

BMBF Projekt MOSAiC 1 CiASOM

Verwendung von stabilen Wasserisotopen
für ein besseres Verständnis des arktischen Wasserkreislaufs

Förderkennzeichen: 03F0869A

Laufzeit: 01.11.2020 - 31.10.2023

Schlussbericht

Antragsteller:

Dr. Hanno Meyer und PD Dr. Martin Werner

Alfred-Wegener-Institut

Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Postfach 120161

27515 Bremerhaven

Autoren:

Dr. Hanno Meyer, Alfred-Wegener-Institut, Forschungsstelle Potsdam

PD Dr. Martin Werner, Alfred-Wegener-Institut, Bremerhaven

Inhaltsverzeichnis:

1	Kurzbericht	2
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	2
1.3	Ablauf des Vorhabens	2
1.4	Wesentlichen Ergebnisse	3
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen	3
2	Sachbericht zum Verwendungsnachweis	4
2.1	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	4
2.1.1	Teilprojekt TP1	4
2.1.2	Teilprojekt TP2	10
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	17
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	17
2.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit.....	18
2.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	18
2.6	Abschlussarbeiten, Tagungsbeiträge und Veröffentlichungen	18
2.6.1	Abschlussarbeiten	18
2.6.2	Veröffentlichungen.....	18
2.6.3	Tagungsbeiträge.....	20
2.6.4	Publizierte Datensätze.....	21
3	Kurzfassung	22
3.1	Berichtsblatt / Control Sheet.....	22

1 Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung

Das MOSAiC Drift-Experiment, welches im Zeitraum September 2019 bis Oktober 2020 stattfand, bot die einzigartige Möglichkeit, die wichtigsten hydrologischen Prozesse in der zentralen Arktis über ein ganzes Jahr hinweg zu untersuchen und dabei erstmalig auch den arktischen Winter zu erfassen. Im Vorhaben CiASOM „Verwendung von stabilen Wasserisotopen für ein besseres Verständnis des arktischen Wasserkreislaufs“ wurden hierfür die stabilen Wasserisotope (H_2^{16}O , H_2^{18}O , HD^{16}O) als Klima- und Umweltparameter für die Untersuchung des heutigen Wasserkreislaufs verwendet. Dazu wurden die Beiträge der einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs (z. B. Meereis, Meerwasser, Schnee) in der Umgebung der FS Polarstern untersucht, um Austauschprozesse zwischen Ozean, Meereis und Atmosphäre quantitativ zu erfassen. Der Einsatz eines CRDS-Spektrometers ermöglichte zudem, die isotopische Zusammensetzung des atmosphärischen Wasserdampfs während der gesamten MOSAiC Expedition kontinuierlich zu messen. Sämtliche Messdaten wurden gemeinsam zur Charakterisierung der arktischen Feuchtesignatur genutzt. Eine quantitative Erfassung der Kopplung von Klima- und Isotopensignalen erfolgte dabei über Modellstudien, welche sowohl die Simulation der Feuchtetransporte mit Hilfe eines Lagrangeschen Transport- und Dispersionsmodells als auch Klimasimulationen mit dem Atmosphären-Modell ECHAM6 mit expliziter Isotopendiagnostik umfassten. Die Datensätze des CiASOM-Projekts aus der zentralen Arktis wurden des Weiteren mit Isotopen-Datensätzen kontinentaler Stationen, welche im gleichen Zeitraum isotopische Änderungen im Wasserdampf und Niederschlag gemessen hatten, verglichen und gemeinsam analysiert. Dieser methodisch weit umfassende Ansatz des CiASOM-Projekts trug zu einem verbesserten Verständnis des hydrologischen Kreislaufs einer sich erwärmenden Arktis bei.

1.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Stabile Wasserisotope sind von grundlegender Bedeutung für das Verständnis des arktischen Wasserkreislaufs. Wasserisotope wurden in jüngerer Vergangenheit in verschiedenen Studien verwendet, z.B. um Feuchtetransporte nach Grönland zu identifizieren und um zwischen verschiedenen Wasserquellen im Arktischen Ozean zu unterscheiden. Im Jahr 2015 wurde ein CRDS-Spektrometer erfolgreich auf der FS Polarstern installiert, um auch erstmalig kontinuierlich die isotopische Zusammensetzung des atmosphärischen Wasserdampfs in Arktis und Antarktis untersuchen zu können. Vergleichbare Messungen wurden zeitgleich auch erstmals an mehreren Küstenstationen in der Arktis durchgeführt. Ferner wurden in den letzten Jahren verbesserte Klimamodelle entwickelt, welche über eine explizite Diagnostik von stabilen Wasserisotopen im simulierten hydrologischen Kreislauf verfügen. Das Vorhaben CiASOM hat an alle diese maßgeblichen Entwicklungen angeknüpft, um seine beschriebenen Aufgaben zu erfüllen.

1.3 Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben CiASOM ist in den wesentlichen Teilen wie geplant verlaufen. Das gilt insbesondere für die erfolgreiche Messung und Charakterisierung des Isotopensignals in verschiedenen Kompartimenten des arktischen Wasserkreislaufs sowie der integrativen Analyse von Feuchtequellen und atmosphärischen Transportwegen von Wasserdampf in der zentralen Arktis. Wenige Projektdetails wurden etwas abweichend von der ursprünglichen

Planung umgesetzt. Die vorgesehene Zusammenstellung der land-basierten Isotopen-Messungen verzögerte sich zu Projektbeginn aufgrund von Problemen der zuständigen internationalen Partner und der Corona-Pandemie. Bei der Analyse von panarktischen Verbindungen zwischen den Land-Stationen und den Polarstern Wasserdampf-Isotopendaten zeigte sich dann, dass die Identifizierung derartiger Verbindungen mit den vorhandenen Datensätzen nur in wenigen Fällen gelang, weshalb diese Arbeiten in geringerem Umfang als ursprünglich geplant durchgeführt wurden. Beim Daten-Modell-Vergleich der Wasserdampf-Isotopendaten wurde außerdem ein Fokus auf Warmlufteinbrüche gelegt, da es bei diesen meteorologischen Ereignissen eine besonders gute Übereinstimmung zwischen CRDS-Messungen und ECHAM6-wiso Modelldaten gab.

Die sehr anspruchsvolle und zeitaufwendige Aufgabe der Isotopenanalysen der verschiedenen diskreten Wasserproben wurde im CiASOM-Projekt von dem für das Vorhaben angestellten Doktoranden Herrn Moein Mellat Ardakani durchgeführt. Die Prozessierung der kontinuierlichen Wasserdampf-Messungen und die quantitative Analyse von Klima- und Isotopensignalen mit Hilfe von Klimasimulationen wurden von der für das Projekt angestellten Wissenschaftlerin Frau Dr. Camilla Brunello (PostDoc) durchgeführt. Mit der Anstellung beider Personen war es gelungen, zwei junge Wissenschaftler, die beide bereits auf dem Gebiet der Isotopenanalyse und der klimatologischen Interpretation von Isotopendaten gearbeitet hatten, für die herausfordernden CiASOM Aufgabenstellungen zu gewinnen.

1.4 Wesentlichen Ergebnisse

Wesentlichen Ergebnisse des CiASOM-Projekts sind

- die erstmalige kontinuierliche Messung der isotopische Zusammensetzung des atmosphärischen Wasserdampfs in der Arktis über ein ganzes Jahr
- die erstmalige umfassende Messung und Zusammenstellung von Isotopenänderungen in den wesentlichen Komponenten des arktischen Wasserkreislaufs (z. B. Meereis, Schnee)
- eine Identifizierung der relevanten Prozesse, welche das Isotopensignal der Schneedecke, die das arktische Meereis bedeckt, verändern
- eine Analyse von Hauptfeuchtequellen und Transportwegen von atmosphärischem Wasserdampf während Warmlufteinbrüchen in der Arktis im Sommer und im Winter

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Die Arbeiten des CiASOM Vorhabens waren eng mit anderen MOSAiC Arbeiten und auch mit komplementären Isotopenstudien weiterer internationaler Kooperationspartner verzahnt. Hierbei gab es vor allem eine enge Abstimmung und Zusammenarbeit mit den für die eigentliche Probennahme verantwortlichen MOSAiC-Teams, insbesondere mit E. Damm und S. Arndt (beide AWI), D. Bauch (GEOMAR), D. Nomura (Hokkaido University), M. Granskog (Norwegian Polar Institute), M. Schneebeli und A. MacFarlane (beide SLF Davos). Vor allem die Kooperation mit dem SLF Davos hat sich als sehr erfolgreich herausgestellt, da sich dessen Arbeiten zum Isotopensignal in der Schneedecke, welche das Meereis bedeckt, sehr gut mit den eigenen Arbeiten ergänzten. Der Vergleich der Wasserdampf-Messungen von FS Polarstern mit gleichzeitig stattfindenden land-basierten Isotopen-Messungen wurde gemeinsam mit J. Welker und B. Kopec (beide University of Alaska) durchgeführt. Des Weiteren wurde für die detaillierte Analyse der Isotopenprozesse, welche bei Warmluft-Ereignissen in der Arktis von Bedeutung sind, eine enge Arbeitskooperation mit M. Dütsch (Universität Wien) etabliert.

2 Sachbericht zum Verwendungsnachweis

2.1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Das MOSAiC Drift-Experiment bot dem BMBF-geförderten Projekt CiASOM („Changes of water isotopes in Arctic Sea ice, Ocean and atMosphere“) - trotz fehlender eigener Feldarbeiten in MOSAiC - die einzigartige Möglichkeit, die wichtigsten hydrologischen Prozesse in der zentralen Arktis über ein ganzes Jahr (von Oktober 2019 bis Oktober 2020) hinweg zu untersuchen und erstmalig auch den arktischen Winter zu erfassen. Hierbei wurden die stabilen Wasserisotope (H_2^{16}O , H_2^{18}O , HD^{16}O) als Klima- und Umweltparameter für das Verständnis des heutigen Wasserkreislaufs eingesetzt. Die einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs (z. B. Meereis, Meerwasser, Schnee) wurden in der Umgebung der driftenden FS Polarstern detailliert untersucht, um Austauschprozesse zwischen Ozean, Meereis, Schnee und Atmosphäre zu erfassen. Laserspektroskopische Isotopen-Analysen ermöglichten zudem kontinuierliche Messungen am Wasserdampf, die zur Charakterisierung der arktischen Luftfeuchte-Signatur genutzt wurden. Die quantitative Erfassung der gekoppelten Klima- und Isotopensignale erfolgte über Simulationen mit einem hochmodernen Klimamodell mit expliziter Isotopendiagnostik, welche die direkte Verschneidung von Modell- und Messdaten erlaubten. Zusätzlich wurden ein Trajektorien-Modell sowie ein Prozess-Attributionsmodell eingesetzt, um die wesentlichen Verdampfungsregionen und Prozesse, die zum Feuchtetransport von mittleren Breitengraden in die Arktis beitragen, zu bestimmen. Die CiASOM-Datensätze, welche in der zentralen Arktis erhoben wurden, wurden darüber hinaus mit Daten aus einem Netzwerk von diskreten und kontinuierlichen Isotopen-Datensätzen kontinentaler Stationen verglichen. Dieser hoch-integrative Ansatz des CiASOM-Projekts hat zu einem verbesserten Verständnis des hydrologischen Kreislaufs einer sich erwärmenden Arktis beigetragen.

Das CiASOM-Projekt wurde im November 2020 begonnen und ist Ende des Jahres 2023 erfolgreich abgeschlossen worden. Wichtigste Ergebnisse wurden in 10 Publikationen (4 bereits erschienen, 6 in Begutachtung) und 8 Tagungsbeiträgen mit der wissenschaftlichen Community geteilt. Des Weiteren wurden 2 Abschlussarbeiten kurz vor Ende der Projektlaufzeit fertig gestellt: zum einen hat der Doktorand im CiASOM-Projekt, Herr Moein Mellat Ardakani im März 2024 seine Dissertation mit dem Titel „Frozen Signals - Isotopic Insights into the Central Arctic's Hydrology“ an der Universität Potsdam eingereicht. Die kumulative Dissertation enthält drei eingereichte oder publizierte Manuskripte, und vor allem zentrale Ergebnisse des Teilprojekts TP2. Zudem hat Herr Florian Gebhardt seine Masterarbeit „Stable water vapour isotopes as integrated tracers of moisture sources, transport and deposition during warm air intrusions in the Arctic“ im Januar 2024 ebenfalls an der Universität Potsdam eingereicht und im Juni 2024 erfolgreich verteidigt. Diese Arbeit wurde maßgeblich von Frau Dr. Camilla F. Brunello, der Postdoktorandin im CiASOM-Projekt, betreut und die Ergebnisse sind in eines ihrer Manuskripte (Brunello et al., in revision) eingeflossen. Teile der Ergebnisse des CiASOM-Projektes wurden bereits in den Zwischenberichten ausführlich dokumentiert und sind hier in komprimierter Form erneut in den Abschlussbericht eingearbeitet.

2.1.1 Teilprojekt TP1

Im Rahmen des Teilprojekts TP1 wurde die Erstprozessierung der CRDS-Isotopendaten, welche während der MOSAiC-Expedition an Bord der FS Polarstern gewonnen wurden,

durchgeführt. Die Rohdaten wurden mit Hilfe eines eigens entwickelten Softwareprogramms korrigiert und kalibriert. Des Weiteren wurden alle Messungen um die Abhängigkeit der Isotopenmesswerte von der Feuchtigkeitskonzentration (sogenannte „humidity response function“) korrigiert. Als letzter Schritt der Erstprozessierung wurden die per CDRS-Instrument gemessenen Werte der verwendeten Isotopenstandards mit unabhängig im Labor ermittelten Referenzwerten verglichen, und die Messwerte wurden über eine lineare Regressionsanalyse final kalibriert. Anschließend wurde der Datensatz sowohl auf ein 1h-Intervall als auch ein 6h-Intervall aggregiert. Mit diesem Arbeitsschritt wurde Meilenstein M1 im CiASOM-Projekt erreicht und der für den gesamten MOSAiC-Zeitraum erstellte Polarstern CRDS Datensatz für Wasserdampf, H_2^{18}O , und HDO (Deliverable D1) stand anschließend für weitergehende Analysen zur Verfügung.

Bei den Analysen der $\delta^{18}\text{O}$ -Messungen im Wasserdampf zeigte sich ein klarer saisonaler Zyklus, der durch abgereicherte Isotopenwerte im Winter und angereicherte Isotopenwerte im Sommer gekennzeichnet ist (Abb. 1). Weitere positive Isotopenauslässe auf der synoptischen Zeitskala sind das ganze Jahr über zu beobachten. Außer den Isotopendaten wurden im Berichtszeitraum Datensätze von verschiedenen meteorologischen Variablen, welche routinemäßig an Bord von Polarstern gemessen werden, zusammengestellt und mit den Isotopendaten verglichen. Hierbei wurden eindeutige, lineare Zusammenhänge zwischen dem $\delta^{18}\text{O}$ -Signal im atmosphärischen Wasserdampf und der lokalen Lufttemperatur und spezifischen Luftfeuchtigkeit festgestellt. Für den Deuterium Exzess, einen Isotopeneffekt 2. Ordnung, scheinen diese Beziehungen jedoch nicht linear zu sein, sondern sie sind durch anomale negative Werte sowohl bei kalten und trockenen als auch bei warmen und feuchten Bedingungen gekennzeichnet. Um die Variabilität dieser Zusammenhänge im Verlauf der MOSAiC-Expedition zu untersuchen, wurden die verschiedenen Daten in Abhängigkeit von der Jahreszeit analysiert. Es zeigte sich, dass die Korrelation zwischen $\delta^{18}\text{O}$ und Lufttemperatur bzw. Luftfeuchtigkeit in allen vier betrachteten Jahreszeiten (ON, DJF, MAM, JJAS) ähnlich ist und durch eine gemeinsame Regressionsgerade wiedergegeben werden kann. Weitere Analysen zeigten, dass die Isotopenzusammensetzung der Luft dabei in den Sommermonaten stark mit der Temperatur und Luftfeuchtigkeit über dem offenen Ozean korreliert ist, während das $\delta^{18}\text{O}$ -Signal im Wasserdampf im Winter hauptsächlich von den Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen über angrenzenden Meereisflächen bestimmt wird.

Im Gegensatz dazu zeigten die Deuterium Exzess-Werte sehr spezifische saisonale Muster. Die Herbstwerte zeigten keine Sensitivität gegenüber den lokalen meteorologischen Bedingungen. Trotz deutlicher Veränderungen bei Temperatur und Luftfeuchtigkeit lagen die Deuterium Exzess-Werte alle in einem engen Wertebereich (0-10‰). Im Winter wurden extrem negative Deuterium Exzess-Werte (bis zu -40‰) bei sehr kalten trockenen Bedingungen beobachtet. Diese Werte sind ein Novum, da der Deuterium Exzess im atmosphärischen Dampf normalerweise positiv ist. Im Frühjahr schwankten die Deuterium Exzess-Werte stark und deckten quasi den gesamten Wertebereich ab. Dieses könnte durch analog starke Temperatur- und Feuchtigkeitsschwankungen in der Arktis im Frühling verursacht werden. Für den Sommer wurde eine lineare negative Korrelation von Deuterium Exzess mit der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit beobachtet. Der Deuterium-Exzess weist somit eine gegensätzliche Beziehung zur Umgebungstemperatur und zur Luftfeuchtigkeit im Sommer bzw. im Winter auf.

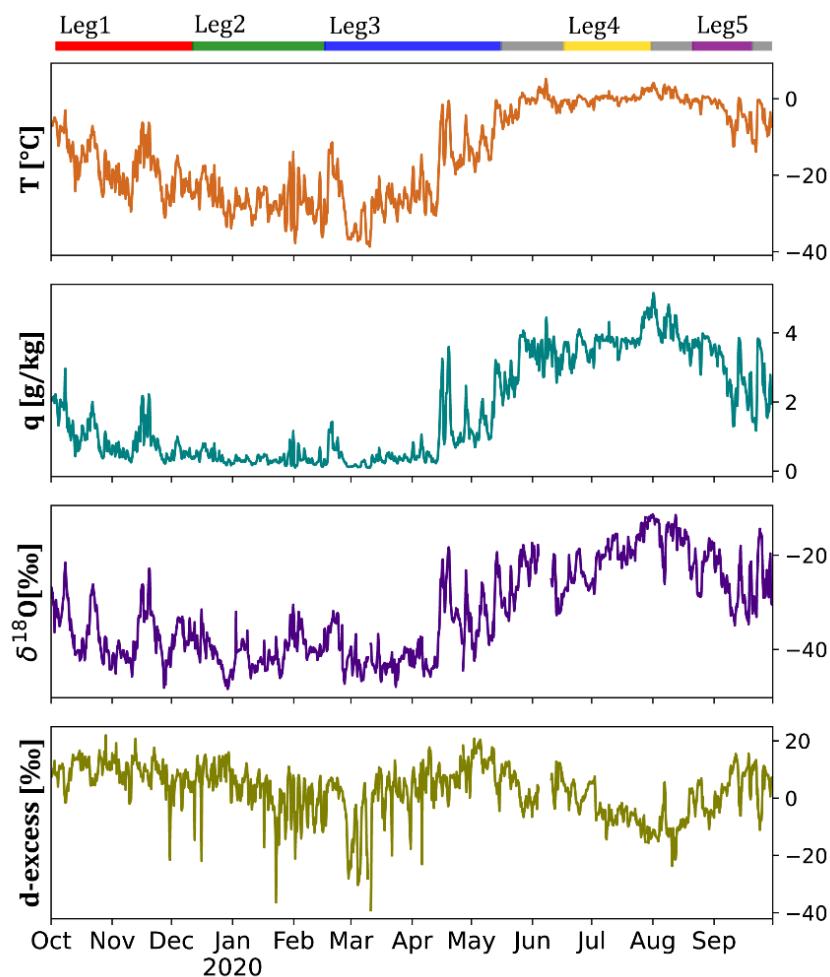


Abbildung 1. Von oben nach unten: Temperatur T , absolute Feuchte q , $\delta^{18}\text{O}$ und d -Exzess des atmosphärischen Wasserdampfs, gemessen während der MOSAiC-Driftexpedition in der zentralen Arktis. Gezeigt werden Mittelwerte in 6h-Auflösung. Die Zeitspanne der einzelnen MOSAiC Expeditionsphasen („legs“) ist in der oberen Farbleiste dargestellt. Hierbei sind Zeiten, in welchen die FS Polarstern aus logistischen Gründen ihre Drift-Position verlassen musste, in grau dargestellt.

In einem nächsten Arbeitsschritt von TP1 wurden mit Hilfe des ERA5-Datensatzes des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (ECMWF) räumliche Korrelationen der Wasserisotope mit verschiedenen meteorologischen Daten im Bereich der Arktis durchgeführt und analysiert. Die Analysen zeigten eine starke, großräumige positive ($\delta^{18}\text{O}$) bzw. negative (d -Exzess) Korrelation des Isotopensignals im Wasserdampf mit der Lufttemperatur. Die signifikanten Korrelationen deckten dabei den gesamten Ozeansector der Arktis ab, wobei die stärksten Korrelationen mit einer Region südwestlich von Svalbard festgestellt wurden. Hingegen wurden keine Korrelationen der Isotopenänderungen mit Temperaturänderungen in meereisbedeckten Regionen des Arktischen Ozeans gefunden.

Um die Feuchtequellen des Wasserdampfs, welcher zu verschiedenen Zeiten zur FS Polarstern transportiert wurde, noch genauer zu bestimmen, wurden mit Hilfe des FLEXPART Modells Trajektorien des Feuchtetransports erstellt und analysiert. Die FLEXPART Resultate zeigten deutlich, dass die Feuchtigkeitsquelle der Luftmassen, die während der MOSAiC-Kampagne beprobt wurden, von Jahreszeit zu Jahreszeit stark variierten (Abbildung 2). Zu Beginn der MOSAiC-Expedition, im Herbst 2019, wurde überwiegend Feuchtigkeit aus den mit Meereis bedeckten Regionen der Zentralarktis zur FS Polarstern transportiert. Es konnten dabei drei Hauptquellen identifiziert werden: (i) das Gebiet um die FS Polarstern mit dichtem

Meereis; (ii) der Meereisrand über der Laptew-See, der Ostsibirischen See und der Beaufort-See, wo die Meereiskonzentrationen im Durchschnitt niedriger und gemischte Bedingungen von offenem Ozean und Meereis anzutreffen sind; (iii) die weitgehend eisfreie Kara/Barentssee-Region. Im Winter 2019 nahm die Feuchte der arktischen Luftmassen ab, wobei sich hierbei vor allem die Aufnahme von Feuchtigkeit über Meereisgebieten verringerte und die einzige verbleibende Feuchtigkeitsquelle die Barentssee war. Im Frühjahr 2020, während FS Polarstern über den Arktischen Ozean nach Süden driftete, nahm die Feuchtigkeitsaufnahme wieder zu, und die Region, in der arktische Luftmassen Feuchtigkeit aufgenommen haben, erstreckte sich von der Barentssee nach Westen über Spitzbergen und die Grönlandsee. Diese Jahreszeit markierte den Übergang von "gefrierenden" Wetterbedingungen mit wachsendem oder kompaktem Meereis zu „schmelzenden“ Wetterbedingungen mit zurückweichendem Meereis. Im Vergleich zum Winter 2019 verschob sich im Frühjahr 2020 dabei die atmosphärische Zirkulation, und es wurde mehr Feuchtigkeit aus dem westlichen Arktischen Ozean und dem Atlantiksektor aufgenommen. Im Sommer 2020 erreichte die Feuchtigkeitsaufnahme in der Arktis ihr saisonales Maximum, bezogen auf die Gesamtmenge als auch die räumliche Ausdehnung. Die Feuchtigkeitsaufnahme erstreckte sich über den gesamten arktischen Ozean, wobei der größte Beitrag von der südlichen Küste Spitzbergens stammte. Weitere Beiträge kamen aus der zentralen Arktis und den eurasischen Küstenregionen. Die große Streuung der Feuchtigkeitsquellen kann dabei durch den häufigen Wechsel zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten und das Auftreten außertropischer Wirbelstürme im arktischen Sommer erklärt werden. Diese umfassende Beschreibung der verschiedenen Feuchtequellen auf saisonaler Skala stellt einen Beitrag von TP1 zu Erreichung von Deliverable 6 dar.

Bei der geplanten Zusammenstellung der vorhandenen land-basierten Isotopen-Messungen, welche als Meilenstein 4 für die Identifizierung panarktischer Verbindungen zwischen Küstenstationen und der zentralen Arktis während MOSAiC-Kampagne vorgesehen waren, gab es zu Projektbeginn unvorhergesehene Verzögerungen bei den internationalen Projektpartnern (J. Welker und B. Kopec, beide University of Alaska). Auch gestaltete sich die Zusammenarbeit aufgrund des eingeschränkten Reise- und Informationsaustausches während der Corona-Pandemie in den Jahren 2021 und 2022 schwieriger als geplant. Dennoch konnte eine gemeinsame erste Auswertung dieser land-basierten Daten mit den FS Polarstern Messungen für den Zeitraum September bis November 2020 durchgeführt werden. Ein wissenschaftlicher Artikel, welcher panarktische Verbindungen zwischen den Land-Stationen und den Polarstern-Wasserdampf-Isotopendaten beschreibt, wurde gemeinsam erstellt und befindet sich derzeit in der Begutachtungsphase (Kopec et al., JGR-Atmospheres, in review). Diese Arbeit wird mit als Erreichung von Deliverable 4 eingestuft. Allerdings zeigte diese Arbeit auch, dass derartige panarktische Verbindungen mit den existierenden verschiedenen Wasserdampf-Datensätzen deutlich schwieriger als erwartet und nur für wenige meteorologische Situationen nachweisbar waren. Daher wurde von weiteren Arbeiten zu diesem Themenkomplex im Rahmen des CiASOM-Projekts abgesehen.

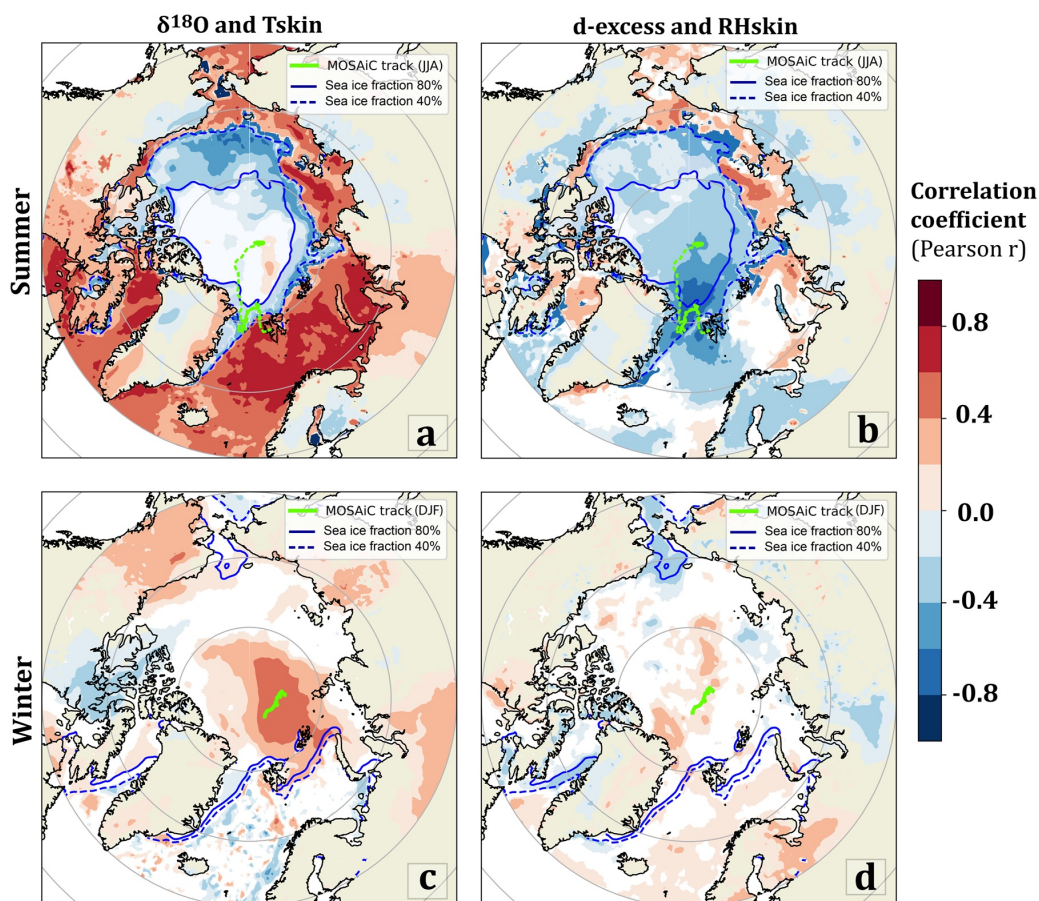


Abbildung 2. Saisonale Korrelationskarten von (a, c) Wasserdampf $\delta^{18}\text{O}$ und Skintemperatur T_{skin} , und von (b, d) d-Exzess und relativer Feuchtigkeit RH_{skin} . Die Karten in a) und b) zeigen die arktische Sommersaison (JJA), und c) und d) die Wintersaison (DJF). Die blauen Linien markieren den Bereich, in dem die Meereisbedeckung über 80 % (durchgezogen) bzw. 40 % (gestrichelt) liegt.

Ein weiterer Schwerpunkt des CiASOM Projekts lag auf einem Vergleich der gemessenen atmosphärischen Isotopen-Daten mit Simulationsergebnissen, welche mit Hilfe des ECHAM6-Atmosphärenmodells durchgeführt wurden. Während die simulierten ECHAM6-Feuchtigkeitswerte sehr gut mit den Beobachtungen übereinstimmten, wurden große Diskrepanzen zwischen modellierten und gemessenen Wasserdampf-Isotopendaten festgestellt. Es zeigte sich, dass das ECHAM6-wiso Modell zwar den Jahrgang der Isotopenveränderungen generell gut abbilden kann, jedoch die Amplituden von saisonalen Änderungen und kurzfristigen synoptischen Ereignissen nur teilweise richtig wiedergegeben werden. Hierbei sind im Winter die simulierten absoluten $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen deutlich weniger stark abgereichert als die entsprechenden Wasserdampf-Messungen. Im Sommer ist hingegen die mittlere Differenz zwischen Messwerten und Modelldaten kleiner, allerdings sind in dieser Jahreszeit die simulierten $\delta^{18}\text{O}$ -Änderungen zu stark abgereichert. Analog zu diesen Differenzen im $\delta^{18}\text{O}$ -Signal, sind die simulierten Deuterium Exzess-Werte im Winter systematisch niedriger und im Sommer systematisch höher als die entsprechenden Wasserdampf-Messungen. Weitere Analysen ergaben, dass das ECHAM6-wiso Modell die im Sommer in der Arktis ablaufenden Fraktionierungsprozesse im Großen und Ganzen korrekt wiedergibt, während im Winter zusätzliche Fraktionierungsprozesse stattfinden, die bisher im Modell nicht berücksichtigt werden. Aufgrund dieser systematischen, unerwarteten Modelldefizite wurde im weiteren Verlauf des CiASOM Projekts entschieden, die ursprünglich

vorgesehenen ECHAM6-wiso Sensitivitätsstudien und Ensemblesimulationen (Meilenstein M5) nicht wie geplant durchzuführen, sondern sich stattdessen auf sogenannte "warm air intrusion" (WAI) Ereignisse zu fokussieren, bei welchen das ECHAM6-wiso Modell eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den beobachteten atmosphärischen Isotopen-Daten zeigte. Für die detaillierte Analyse der Isotopenprozesse, welche bei den WAI-Ereignissen von Bedeutung sind, wurde ein Prozess-Attributionsmodell verwendet und erweitert, welches ursprünglich von Frau Dr. Marina Dütsch (Universität Wien) entwickelt wurde. Hierzu wurde im Rahmen des CiASOM-Projekts eine enge Arbeitskooperation von Frau Brunello mit Frau Dütsch aufgebaut. Es konnte gezeigt werden, dass die wesentlichen Prozesse, die für das Isotopensignal verantwortlich sind, vom ECHAM6-wiso Modell im Großen und Ganzen korrekt simuliert werden (Abb. 3).

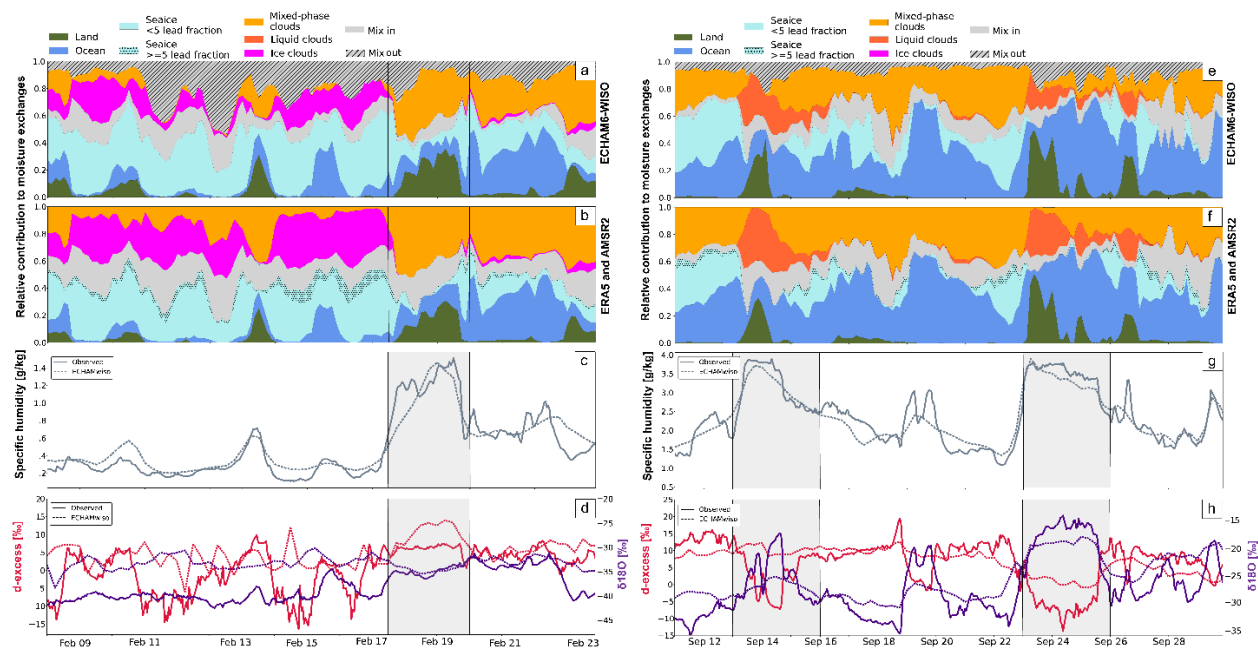


Abbildung 3: Obere Plots: Ergebnisse der Prozessattributionsdiagnose für den Winter (links) und den Sommer (rechts) auf der Grundlage von ECHAM6-wiso (a, e) und im Vergleich zu den aus ERA5-Feldern gewonnenen Ergebnissen (b, f). WAI1, WAI2a und WAI2b sind durch vertikale schwarze Linien hervorgehoben. In den mittleren Plots sind (c) die modellierte und (g) die beobachtete lokale Luftfeuchtigkeit an FS Polarstern dargestellt. Die untersten Plots zeigen (h) den beobachteten lokalen d-Exzess und $\delta^{18}\text{O}$, die vom CRDS an Bord von FS Polarstern gemessen wurden, sowie (d) die entsprechenden oberflächennahen Variablen, die vom ECHAM6-wiso Modell simuliert wurden.

Für das untersuchte WAI-Ereignis im Winter (Abb. 3 links) ergab die Prozesszuschreibung, die auf ECHAM6-wiso oder ERA5-Feldern basierte, sehr ähnliche Ergebnisse für die atmosphärische Wasserdampf-Aufnahme. Die Verdunstung aus dem Meereis ist im ECHAM6-wiso Modell etwas größer und die Beiträge aus der Durchmischung sind im Vergleich zu ERA5 etwas geringer, aber die Beiträge aus der Ozean- und Landverdunstung sind nahezu identisch. Die mit den Feuchtigkeitsverlusten verbundenen Prozesse weisen jedoch erhebliche Unterschiede auf. ECHAM6-wiso zeigt einen hohen Beitrag von Verlusten, die durch "Ausmischen" verursacht werden, und einen geringeren Beitrag von Eis- und Mischphasenwolkenbildung, insbesondere während kalter Wetterphasen.

Auch für WAI-Ereignisse im Sommer (Abb. 3 rechts) zeigte die ECHAM6-wiso-Simulation im Vergleich zu ERA5 nahezu gleiche Prozessbeiträge für die Wasserdampf-Aufnahme. Die dominante Rolle der Mischphasenwolkenbildung in kalten Phasen und der Übergang zur

Flüssigwolkenbildung während der Intrusion werden ebenfalls reproduziert. Anders als bei ERA5 Daten gibt es im ECHAM6-wiso Modell jedoch einen anhaltenden Beitrag des "Ausmischens", der bis zu 20 % des Feuchteausstauschs während der Sommer-WAIs ausmacht.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das ECHAM6-wiso Modell die gemessenen täglichen Schwankungen der spezifischen Luftfeuchtigkeit und die Änderungen des Isotopensignals an FS Polarstern für die mit WAIs einhergehenden atmosphärischen Veränderungen richtig wiedergibt (Deliverable D5 bzw. D6 auf synoptischer Zeitskala, hier bezogen auf "warm air intrusions" Ereignisse).

2.1.2 Teilprojekt TP2

Wie bereits im einleitenden Teil des Abschlussberichtes angedeutet, sind die Ergebnisse des TP2 vor allem durch Publikationen und Datenpublikationen der in der kumulativen Dissertation von Moein Mellat Ardakani integrierten Manuskripte dokumentiert.

Im ersten Manuskript (Mellat et al., 2024), das im MOSAiC Special Issue in *Elementa* veröffentlicht ist, wurde die Isotopenzusammensetzung von mehr als 3000 diskreten Proben (Meerwasser, Meereis, Schnee, Schmelztümpel, Frost Flowers, Leadeis, und Niederschlag) diskutiert, die im Isotopenlabor des AWI Potsdam gemessen wurden. In Manuskript werden Fallbeispiele und Isotopenzeitreihen der drei wichtigsten hydrologischer Kompartimente im Detail vorgestellt: (1) dem Meereis, (2) dem Meerwasser und (3) dem Schnee auf dem Meereis. Die assoziierten Datensätze, die bereits in beiden CiASOM-Zwischenberichten im Detail diskutiert wurden, sind mittlerweile auf dem PANGAEA Informationssystem veröffentlicht.

Zusammenfassend zeigt der Datensatz, dass die Isotopenzusammensetzungen der diskreten Proben von Schnee, Frost Flowers, Meerwasser, einjährigem Eis (FYI), zweijährigem Eis (SYI), Eistrücken, Schmelztümpel und Leads sich sehr stark unterscheiden (vgl. Tabelle 1). Hierbei hat Schnee die am stärksten angereicherten und auch variabelsten $\delta^{18}\text{O}$ -Werte und die höchsten Deuterium Exzess-Werte. Die Isotopensignatur von Frostblumen (Frost Flowers) ist der des Schnees ähnlich, diese konnten aber deutlich seltener beprobt werden. Beide Kompartimente haben somit in erster Näherung eine atmosphärisch-geprägte Isotopensignatur. Ein Schlüsselergebnis ist jedoch die deutliche Strukturierung der Schneedecke auf dem Meereis: der Schnee im Kontakt zur Atmosphäre ist hierbei isotopengeochemisch systematisch leichter als der Schnee in direktem Kontakt zur Meereisdecke. Dieser Beobachtung wurde in den späteren Manuskripten der Dissertation von Moein Mellat Ardakani systematisch nachgegangen.

In Vergleich zum Schnee hat das Meerwasser eine deutlich stärker angereicherte Isotopensignatur. Zur Beprobung wurde täglich Salzwasser unter der FS Polarstern (sog. Underway-Proben, ca. 3-5 m Wassertiefe) entnommen. Diese wurden mit 1-2x/Woche beprobten Meerwasser-Proben von Ocean City, der Meerwasser-Beprobungsstation nahe FS Polarstern, verglichen. Letztere enthalten auch Wasserproben aus größerer Tiefe und Meerwasser-Tiefenprofile. Beide Datensätze zeigen ein generell konsistentes Bild und helfen ozeanische Wassermassen von Frischwassereinträgen, z. B. durch die sibirischen Flüsse in den Arktischen Ozean zu unterscheiden bzw. deren Einflussgebiete nachzuweisen. Sobald Spalten im Meereis aufreißen und sich größere offene Wasserflächen (sog. Leads) im Meereis bilden, kann man das Meerwasser, aber auch das in den Leads neugebildete Eis untersuchen.

Durch den direkten Kontakt zum Meerwasser ähneln Lead-Eis und Lead-Wasser isotopengeochemisch dem Meerwasser. Details einer solchen Studie sind in Zusammenarbeit mit den in MOSAiC aktiven Kollegen veröffentlicht worden (Nomura et al., 2024; Ko-Autoren Moein Mellat Ardakani, Hanno Meyer). Ein Schlüsselergebnis der Studie ist, dass die variierende Breite der Leads bedingt, wie dick die Süßwasserlinse auf dem Meerwasser ist.

Tabelle 1. Statistische Auswertung der einzelnen Kompartimente des arktischen Wasserkreislaufs.

Probentyp	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)				$\delta^2\text{H}$ (‰)				<i>d-excess</i>				N
	Mean	Range		SD	Mean	Range		SD	Mean	Range		SD	
Meerwasser	-1.33	-2.72	0.17	1.94	-8.8	-17.9	3.0	14.2	1.8	-2.3	9.7	1.7	126
Meerwasser (Underway, täglich)	-1.55	-3.44	0.36	0.88	-11.2	-26.0	2.5	6.7	1.2	-1.1	3.5	0.8	302
Schnee	-16.26	-39.63	-0.64	9.06	-123.5	-304.9	-4.7	66.3	6.6	-26.5	26.5	9.3	306
Frost flower	-9.55	-31.12	-2.71	9.35	-69.1	-235.0	-20.8	69.7	7.3	-2.9	19.3	7.7	10
FYI	-0.78	-17.76	1.60	2.26	-5.8	-132.2	12.2	17.3	0.5	-4.1	15.9	1.3	666
SYI	-4.52	-24.48	0.94	2.57	-34.7	-175.7	6.9	19.4	1.5	-11.7	20.1	1.9	355
IFYI	0.20	-2.60	1.44	0.66	2.0	-19.4	12.2	5.1	0.4	-1.3	4.7	0.8	107
Lead-Eis	-1.65	-16.96	1.36	2.41	-12.0	-120.5	11.2	17.8	1.1	-7.7	15.1	2.3	136
Schmelztümpel	-2.05	-12.59	0.94	2.69	-15.5	-93.3	8.0	20.4	0.9	-2.7	7.4	1.6	109
Eisrücken	-2.15	-10.21	0.66	2.74	-16.5	-78.5	5.0	21.2	0.7	-1.0	3.2	1.0	21

Meereis bildet sich in direktem Kontakt mit dem Meerwasser, entweder an der Oberfläche (als FYI) oder unterhalb existierender, älterer Eiskörper (als I-FYI, Insulated First Year Ice). Es ist hierbei wichtig, zwischen beiden Prozessen zu unterscheiden, da der Gefrierprozess nahe der Oberfläche schneller verläuft als unter einem mächtigen Eispanzer. Das Second Year Ice (SYI) hat bereits einen Sommer und damit einen Gefrier-Schmelz-Zyklus überlebt. Daher ist es mit niedrigen $\delta^{18}\text{O}$ -Werten von bis zu -10‰ isotopisch deutlich leichter als FYI und i-FYI. Voraussichtlich enthält es Anteile von Schnee-Schmelzwasser, also ein ererbtes Signal des vorangegangenen Jahres. Eisrücken enthalten Anteile von FYI und SYI und sind diesen ähnlich. Schmelzwassertümpel (sog. Meltponds) weisen eine ähnliche Isotopensignatur wie das SYI und im Vergleich zum Meerwasser deutlich abgereicherte Isotopenwerte auf.

Der in TP2 gewonnene Datensatz an diskreten Wasser- und Eis-Proben aus der zentralen Arktis (Legs 1-3: Meilenstein M2.1 und Legs 4-5: Meilenstein M2.2) bietet eine noch nie dagewesene Momentaufnahme der heutigen Isotopenzusammensetzung des arktischen Wasserkreislaufs während eines ganzen Jahres, sowohl für das evaporative als auch das sublimative Regime. Der Datensatz ist für alle hydrologischen Kompartimente abgeschlossen. Auch die Proben, die durch die Erkrankung einer Projektpartnerin (Dr. Bauch) verspätet geliefert wurden, sind mittlerweile abgeschlossen und als Datenpublikation bei PANGAEA eingereicht. Durch die enge Zusammenarbeit mit dem Team SNOW, insbesondere mit Dr. Martin Schneebeli und Frau Amy MacFarlane (SLF Davos), konnte der Schnee-Datensatz erweitert und mit den physikalischen Eigenschaften des Schnees verknüpft werden. Dies lässt eine bessere Auswertung der Prozesse zwischen dem Schnee und anderen hydrologischen Kompartimenten (z. B. dem Meereis) zu. Zur Erreichung von Deliverable D2 wurden die räumlichen und zeitlichen Veränderungen der einzelnen Kompartimente wie Schnee, Meereis, Meerwasser, Leads und Schmelztümpeln im Detail betrachtet und Beiträge der einzelnen Kompartimente zum regionalen bzw. lokalen Feuchtigkeitsgehalt der Arktis abgeschätzt. Stabile Wasserisotope haben somit dazu beigetragen, die Zusammenhänge zwischen

Meereis, Ozean und Atmosphäre detailliert zu charakterisieren. Die Zusammenhänge sind in Abb. 4, die aus Mellat et al. (2024) stammt, schematisch zusammengefasst.

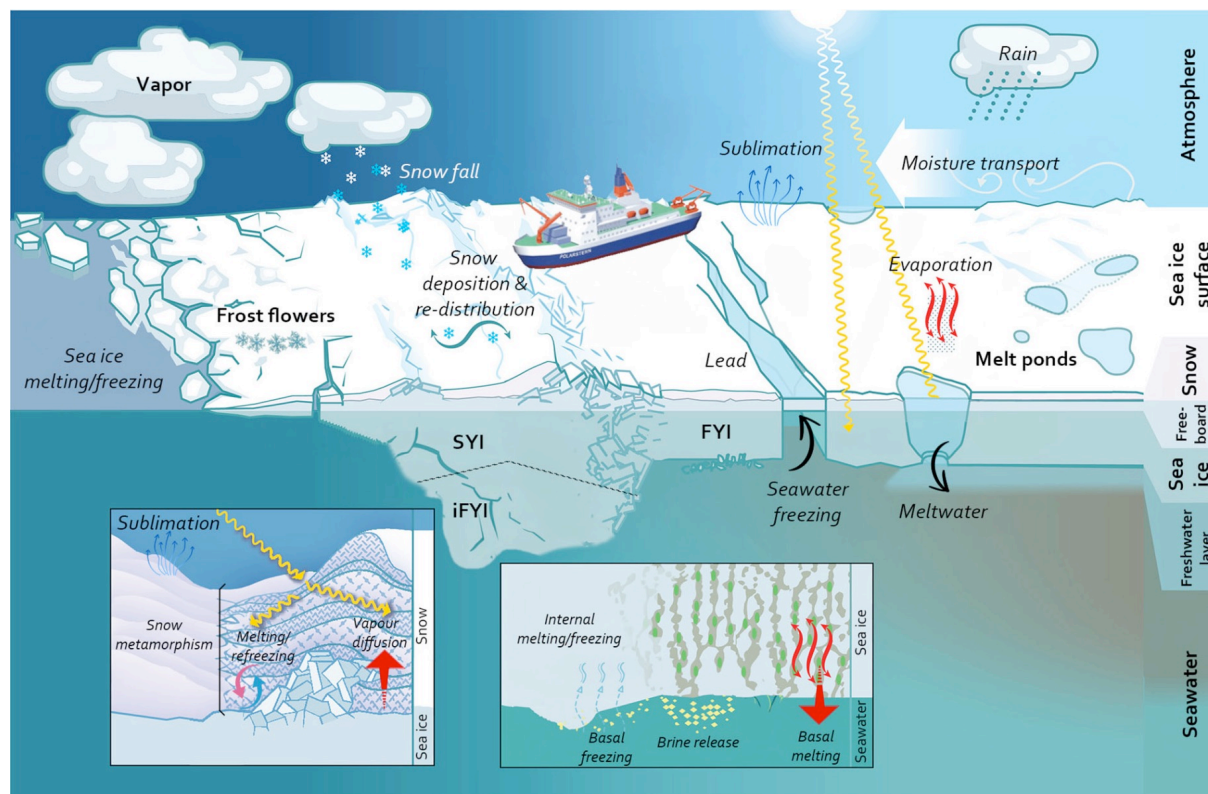


Abbildung 4. Schematische Zusammenstellung der hydrologischen Kompartimente der zentralen Arktis und deren wichtigsten Austauschprozesse. Zentrale Einflussfaktoren auf deren Isotopenzusammensetzung sind ebenfalls dargestellt.

Neben den eigentlichen Probenmessungen und Analysen fand im Berichtszeitraum eine enge Abstimmung und Zusammenarbeit mit den für die Probennahme verantwortlichen MOSAiC-Teams für die verschiedenen Themenschwerpunkte Biogeosciences (BGC), Schnee (SNOW) und Meereis (ICE) statt, insbesondere mit Ellen Damm und Stefanie Arndt (beide AWI), Dorothea Bauch (GEOMAR), Daiki Nomura (Hokkaido University), Mats Granskog (Norwegian Polar Institute), Martin Schneebeli und Amy MacFarlane (beide SLF Davos).

Vor allem die Kooperation mit den Kolleginnen und Kollegen vom SLF Davos hat sich als sehr erfolgreich herausgestellt, da die gemeinsamen Arbeiten Einzug in das zweite und dritte Manuskript der Dissertation von Moein Mellat Ardakani gefunden haben. Während sich das zweite Manuskript (MacFarlane et al., in review bei Nature Geosciences, mit >30% Arbeitsanteil von Moein Mellat Ardakani und Ko-Autorenschaft des gesamten CiASOM-Teams) mit den Prozessen an der Grenzfläche von Meereis und Schnee beschäftigt, hat das dritte Manuskript (Mellat et al., eingereicht bei der Zeitschrift The Cryosphere) den Austausch zwischen Schnee und Atmosphäre zum Thema. Beide Manuskripte ergänzen sich somit in ihrer wissenschaftlichen Fragestellung und betrachten den Isotopengradienten in der Schneedecke aus unterschiedlichen Perspektiven.

Im MacFarlane et al.-Manuskript werden Isotopenprofile aus der Schneedecke auf dem Meereis mit schneephysikalischen Parametern (wie Dichte, Anisotropie und SSA = Specific Surface Area) verschnitten. Ein Schlüsselergbnis dieser Studie ist, dass das Meereis als Quelle für Feuchte fungiert, die durch Dampfdiffusion bei insbesondere im Winter starken

Temperaturgradienten Feuchte an die untere Schneedecke abgibt. Die oberste Schicht des Meereises wird dabei strukturell so verändert, dass sie optisch nicht oder nur sehr schwer von Schnee zu unterscheiden ist (siehe Abb. 5)

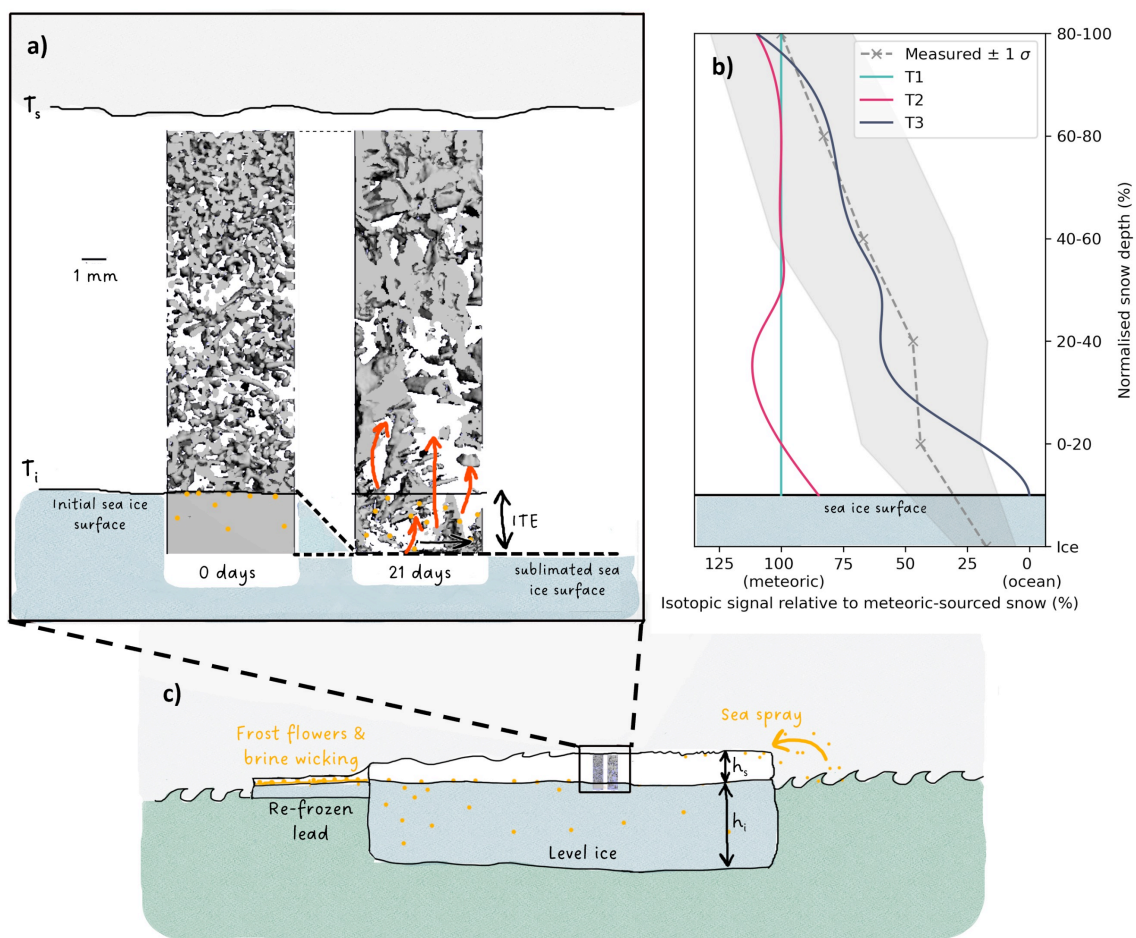


Abbildung 5. a) und c) Schematische Zusammenstellung der Transformation der Meereis-Oberfläche durch Dampfdiffusion in die untere Schneedecke. b) Die Abbildung zeigt schematisch den Anteil des meteorischen vs. ozeanischen Anteils anhand normalisierter Isotopenprofile. T1: keine Dampfdiffusion, T2: Dampfdiffusion ohne Meereis als Substrat, T3: Dampfdiffusion auf Meereis, im Vergleich zu den durchgeführten Isotopenmessungen (in grau).

Der Beitrag des dabei entstandenen „Sea-ice-sourced snow“ beträgt laut einer auf der eigenen Isotopenanalytik basierenden Abschätzung etwa 20% der Schneedecke. Dieser substantielle Beitrag ist bisher bei Massenbilanz-Studien weder für den Schnee noch für das Meereis berücksichtigt worden, was zu einer Fehleinschätzung der Meereisdicke und der Abschätzung des atmosphärischen (meteorischen) Beitrags zur Schneedecke führt. Dieser Prozess hat auch Konsequenzen für die geochemischen Stoffkreisläufe in der zentralen Arktis, da Salzpartikel mobilisiert und als Aerosol der Atmosphäre zugetragen werden können. Neben der temperaturgetriebenen Dampfdiffusion, die durch oftmals negative Deuterium Exzesse-Werte gekennzeichnet ist, gibt es weitere Prozesse, die zur Bildung von salzhaltigem Schnee beitragen können (siehe Abb. 6), z. B. eine trockene Deposition von Salz, die eher durch erhöhte Deuterium Exzesse gekennzeichnet ist.

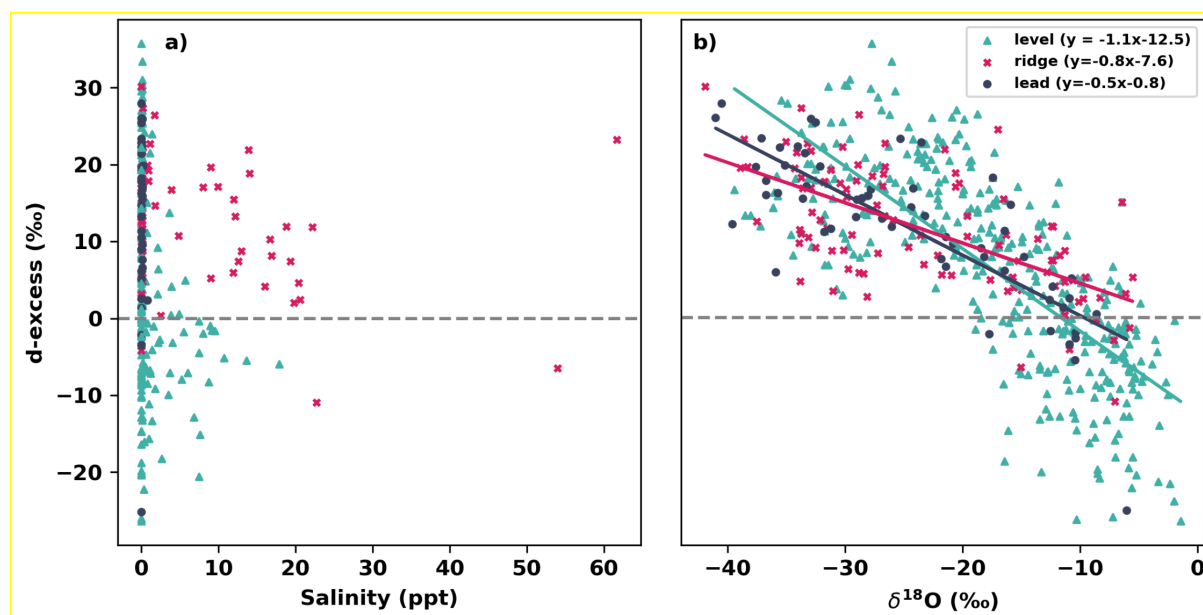


Abbildung 6 a) Deuterium Exzess gegen Salzgehalt, sowie b) Deuterium Exzess gegen $\delta^{18}\text{O}$ in der Schneedecke. Jeder Punkt entspricht einer Schneeprobe. Die Beobachtung, dass verschiedene Arten Schnee unterlagernden Eises (Level-Eis, rückgefrorenes Leadeis und Ridge-Eis) unterschiedliche Isotopensignaturen und -gradienten besitzen, deutet auf verschiedene Prozesse hin, die zur Bildung von salzhaltigem Schnee führen können.

Basierend auf den Erkenntnissen des MacFarlane et al. Manuskriptes ist offenkundig, dass die Schneedecke von unten sekundär verändert wird. Wenn durch Dampfdiffusion veränderte Schneeanteile die Oberfläche erreichen, können sich diese anschließend mit der Atmosphäre austauschen. Das Mellat et al. Manuskript (2024, in revision) betrachtet daher die Interaktion der Schneedecke mit der Atmosphäre. Die wissenschaftliche Fragestellung war, inwieweit im Gegensatz zur Dampfdiffusion von unten die Niederschlagsereignisse von oben ebenfalls die Schneedecke beeinflussen und wieviel des ursprünglichen Isotopensignals noch im Schnee erhalten bleibt. Generell ist die Korrelation zwischen den Isotopenwerten des Schnees und der Lufttemperatur niedrig, wenn man die gesamte Schneedecke betrachtet. Auch wenn der Datensatz auf die Schneeoberfläche beschränkt wird, verbessert sich die Korrelation mit der Lufttemperatur nur leicht (Mellat et al., 2024). Da während der MOSAiC-Kampagne leider keine direkten Niederschlagsereignisse beprobt wurden, wurde im Rahmen von CiASOM versucht, diskrete Proben der obersten Schneedecke mit den kontinuierlichen Isotopensignalen aus dem Wasserdampf (die in TP1 gemessen und prozessiert wurden) zu verschneiden (siehe Abb. 7). Es fällt dabei auf, dass es insbesondere in den Wintermonaten eine deutliche Diskrepanz zwischen beiden hydrologischen Kompartimenten Schneeoberfläche und Wasserdampf gibt, die in den wärmeren und feuchteren Sommermonaten deutlich reduziert wird.

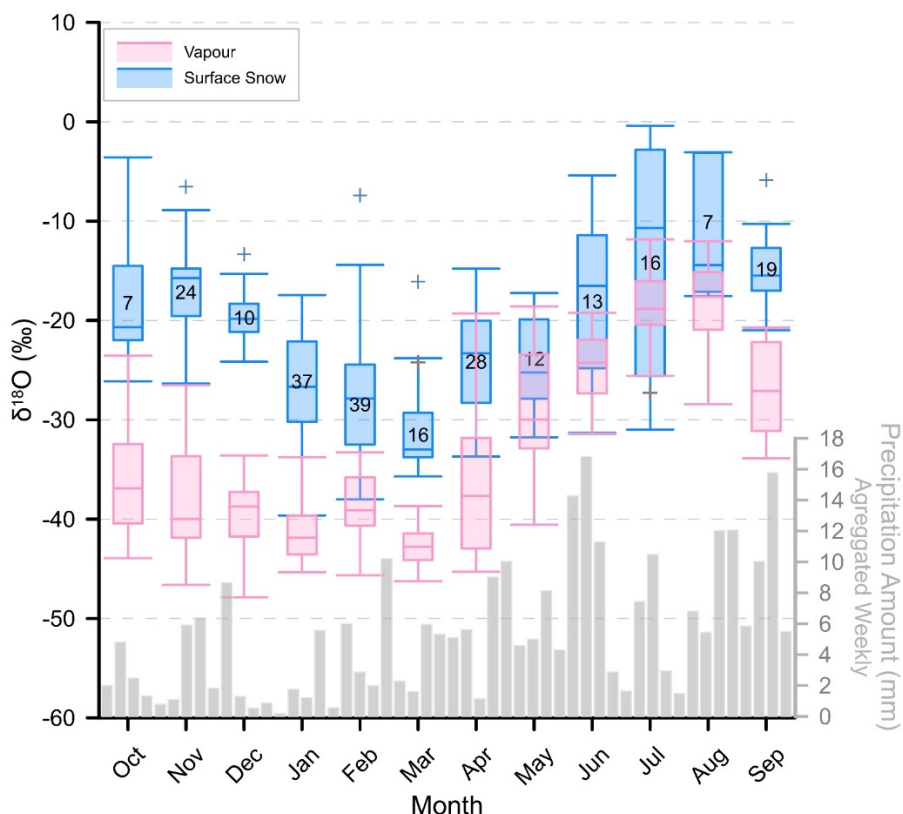


Abbildung 7. Monatsmittelwerte für $\delta^{18}O$ im Oberflächen-Schnee (hellblau) im Vergleich zu $\delta^{18}O$ im Wasserdampf (rosa). Es fällt auf, dass es insbesondere in den Wintermonaten eine deutliche Diskrepanz zwischen beiden hydrologischen Kompartimenten gibt, die in den wärmeren und feuchteren Sommermonaten deutlich reduziert wird. Grau gekennzeichnet ist die wöchentliche Niederschlagsmenge, welche aus ERA5 Reanalyse-Daten rekonstruiert wurde.

Die Phasen niederer und hoher Übereinstimmung zwischen Schnee und Wasserdampf auf Monatsmittelbasis wurden genauer untersucht und für den Winter generell mit einem niedrigen Feuchteniveau in der Arktis und bevorzugten Ungleichgewichts-Fraktionierungsprozessen erklärt. Im Sommer ist mehr Feuchte in der Luft und Gleichgewichtsfraktionierung ist tendenziell vorherrschend. Ein Teil der Feuchte wird durch Transport aus mittleren Breiten in die Arktis (z. B. durch Warm Air Intrusions) erklärt, ein Teil ist lokale Feuchte, z. B. von offenen Wasserflächen (Leads oder eisfreier Ozean) oder durch Sublimation von Schnee in die Atmosphäre. Diese Kombination von diskreten Schneeproben (aus TP 2) und dem Wasserdampf-Datensatz (aus TP 1) ist ein wichtiger Teilaspekt unseres Synthesekapitels und bedient Meilenstein M6 und Deliverable D6.

Die deutliche Diskrepanz im Isotopensignal zwischen der Schneeoberfläche und dem Wasserdampf wird auch dann nicht wesentlich verringert, wenn nur relativ starke Niederschlagsereignisse (mit einer Niederschlagsmenge > 2 mm/Tag) betrachtet werden (Abb. 8). Die Korrelation mit den Wasserdampf-Isotopendaten für alle Oberflächen-Schneeproben ist niedrig ($R^2 = 0.23$), und auch für Niederschlagsereignisse > 2 mm/Tag ist die Korrelation nur leicht höher ($R^2 = 0.37$). Das bedeutet, dass selbst bei einer Beschränkung auf die 25 geeignetsten Proben (Schnee-Oberfläche, Niederschlagsmaxima) noch 63% der statistischen Variabilität des $\delta^{18}O$ Signals im Schnee durch andere Prozesse als durch direkte Niederschläge erklärt werden müssen. Dies deutet auf sekundäre Prozesse hin, welche die Schneedecke auch von oben so deutlich verändern, dass nur eine geringe Korrelation mit meteorologischen Parametern messbar ist. Daher wurden weitere Analysen zum Datensatz

durchgeführt. Es herrschten z. B. während des gesamten MOSAiC-Zeitraumes durchgehend hohe Windgeschwindigkeiten über einem Schwellenwert von ca. 3 m/s, bei welchem Schnee aufgewirbelt und umverteilt wird. Ein Vergleich von Flat Ice Proben mit geringer Schneemächtigkeit und Ridge Ice Proben mit bis zu 80 cm Schneedecke zeigte in einzelnen Profilen mehrere Dezimeter Schnee mit uniformer Isotopenzusammensetzung (nicht dargestellt), wie man ihn bei der Durchmischung durch Winddrift erwarten würde. Um weitere Prozesse zu untersuchen, die die Schneedecke sekundär verändern, z.B. Sublimation, ist der Schnee-Datensatz während der MOSAiC-Expedition leider nicht ausreichend hochaufgelöst beprobt worden. Daher kann zur Rolle der potenziell wichtigen sekundären Veränderung des Schnees durch Sublimation mit den vorliegenden Daten keine belastbare Aussage getroffen werden.

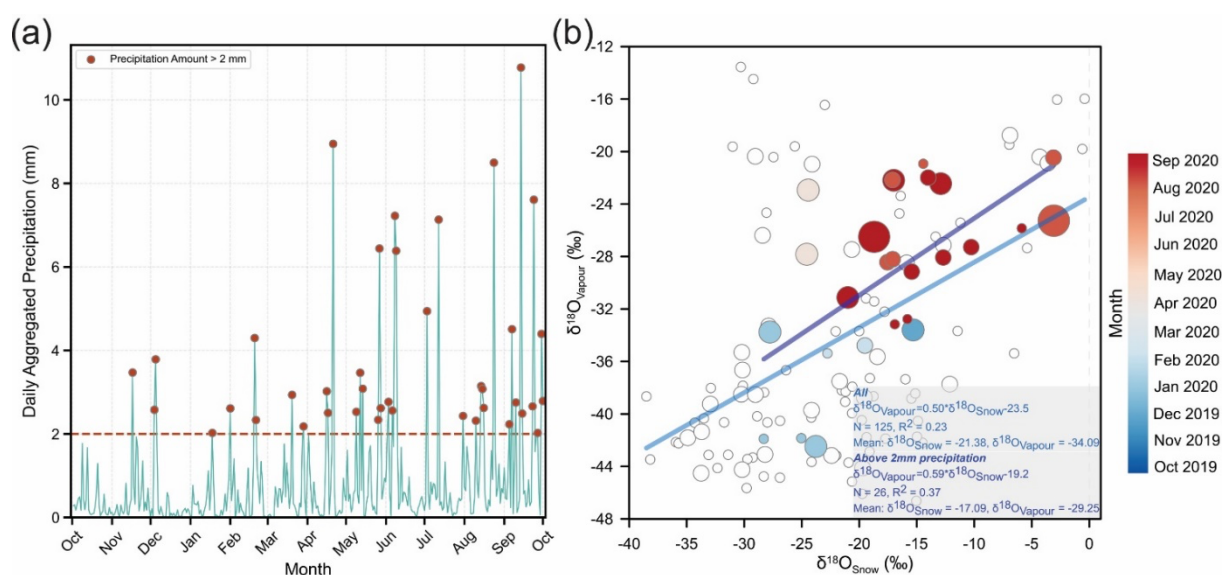


Abbildung 8 a) Filtern der Daten mit > 2 mm Niederschlag. b) Korrelation zwischen Schnee ($\delta^{18}\text{O}_{\text{Snow}}$) mit Wasserdampf ($\delta^{18}\text{O}_{\text{Vapour}}$) in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge.

Für das CiASOM-Projekt standen neben den im Rahmen der MOSAiC-Expedition erhobenen Schneedaten auch diskrete Isotopenmessungen von Niederschlägen arktischer Küstenstationen zur Verfügung. Diese Messungen beinhalteten sowohl eigene Daten, als auch Daten aus dem PAPIN Netzwerk (Mellat et al., 2021). Die Vergleichsstudie der MOSAiC-Daten mit den Messungen an den Küstenstationen wurde wegen geringer Datendichte sowie der großen Entfernung der meisten Stationen zur FS Polarstern auf eine Station nahe dem Beginn des MOSAiC-Driftexperiments (Samoylov Station, Sibirien) und eine Station nahe dessen Ende (Ny Alesund, Spitsbergen) beschränkt (Abb. 9).

Während es auf Monatsmittelbasis für alle Schnee-Proben durchaus Ähnlichkeiten mit den Daten der beiden meteorologischen Stationen gab, waren höher aufgelösten Analysen der Datensätze nicht erfolgreich. Daher bleibt eines der Schlüsselergebnisse von TP2, dass die sekundären Prozesse nach der Schneeablagerung (durch Winddrift, Sublimation und Dampfdiffusion aus dem Meereis) offenbar so stark sind, dass nur ein sehr kleiner Teil der statistischen Variabilität des Isotopensignals im Schnee direkt mit Niederschlagsereignissen in Verbindung gebracht werden kann. Da wir keine klaren Belege für diskrete Niederschlagsereignisse in den während MOSAiC gewonnenen Schneeproben finden konnten, wurde der Verschneidung der Schneedaten mit kontinentalen Stationen nicht weiter

nachgegangen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs von MOSAiC Schneeproben und Daten von Küstenstationen sind ebenfalls ein Teil der Doktorarbeit von Moein Mellat Ardakani und bedienen CiASOM Meilenstein M3 und Deliverable D3.

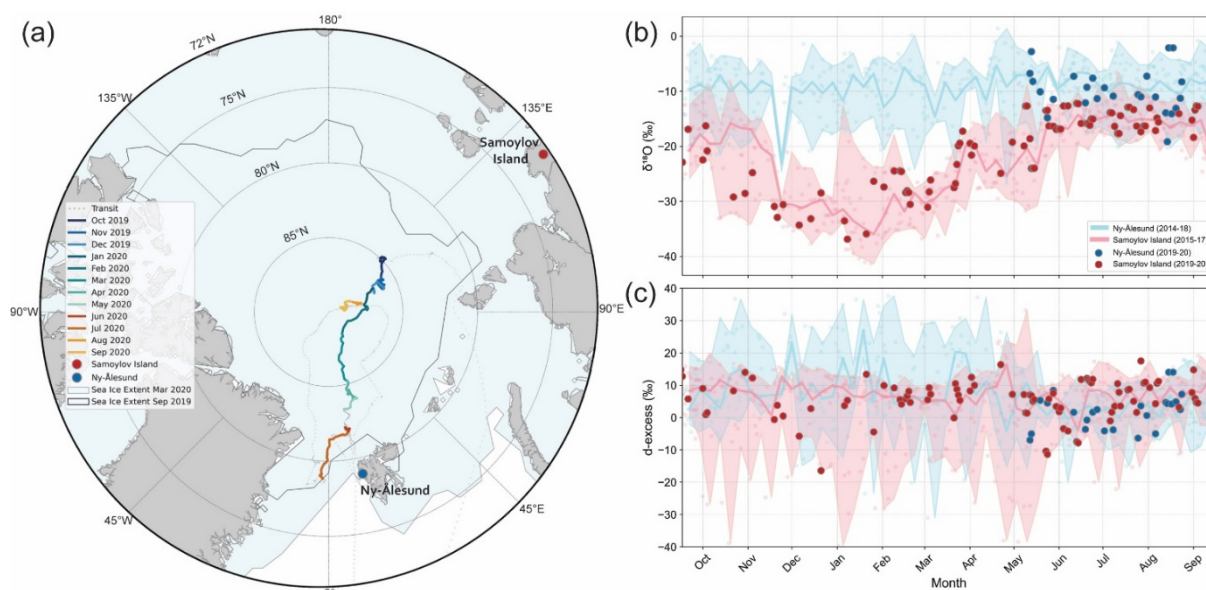


Abbildung 9 a) Drift der FS Polarstern während MOSAiC und Positionen der kontinentalen Stationen Samoylov Island und Ny Alesund. b) und c) Niederschlags-Isotopendaten ($\delta^{18}\text{O}$ und d-excess) von Samoylov Island (rot) und Ny Alesund (blau), schattierte Bereiche kennzeichnen mehrjährige Mittel, farbige Punkte diskrete Niederschlagsproben, die während des MOSAiC-Jahres genommen wurden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Arbeiten in TP2 - mit kleineren Abstrichen für die Verschneidung mit kontinentalen Stationen - im Berichtszeitraum den erwarteten Fortschritt und Abschluss genommen haben. Da einige eigene Arbeiten, aber auch Arbeiten von externen Kooperationspartnern erst relativ spät zu eingereichten Manuskripten führten, wäre eine Fortführung des Projektes (als Synthesephase) sinnvoll und wünschenswert gewesen. Leider konnte diesem Wunsch nicht entsprochen werden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der größte Teil der bewilligten Gelder wurde als Personalkosten für die Wissenschaftlerin (PostDoc) Frau Dr. Camilla Brunello und den Doktoranden Herrn Moein Mellat Ardakani verwendet. Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt durch die Verwaltung des AWI.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren für eines der wesentlichen Ziele der MOSAiC Initiative - ein verbessertes Verständnis des aktuellen Klimazustandes der Arktis und seiner zukünftigen Entwicklung - notwendig und angemessen. In enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit den für die Probennahme verantwortlichen MOSAiC-Teams konnten erstmals die Isotopensignaturen der verschiedenen Komponenten des arktischen Wasserkreislaufs und die relevanten Austauschprozesse zwischen Ozean, Meereis und Atmosphäre über ein ganzes Jahr erfasst werden. Erst mit Hilfe dieser neuen Isotopendaten ist ein erweiterter quantitativer Modell-Datenvergleich möglich und es kann so über die Zuverlässigkeit der Modelle in der Simulation von zukünftigen Veränderungen des arktischen Wasserkreislaufs gelernt werden.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Das Vorhaben CiASOM ist in der Grundlagenforschung angesiedelt. Der wirtschaftliche Nutzen, der aus den erzielten Ergebnissen erwächst, ist naturgemäß nur mittel- bis langfristiger Natur. Kurzfristig hat das Vorhaben aber die Zusammenarbeit und den wissenschaftlichen Austausch mit anderen Arbeitsgruppen intensiviert, welche an Fragestellungen zu Wasserkreislaufänderungen in der Arktis und der dabei möglichen Anwendung von Isotopendaten, arbeiten. Durch die Einbindung von jungen Wissenschaftlern wurde außerdem die Qualität in der Ausbildung gesichert. Die Ergebnisse des Vorhabens tragen insgesamt zu einem komplexeren Verständnis des „Systems Erde“ und damit zu gesicherteren Prognosen zukünftiger globaler Entwicklungen und auch regionaler Klimaänderungen in der Arktis bei.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind während des Projektzeitraums keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für den Fortschritt auf dem wissenschaftlichen Gebiet des CiASOM Projekts relevant wären. Die während der MOSAiC Expedition erhobenen CiASOM-Isotopendaten im atmosphärischen Wasserdampf und den verschiedenen Eis- und Schneekompartimenten stellen einen einzigartigen Datensatz dar, der von keiner anderen Stelle auf ähnliche Art bisher erhoben wurde.

2.6 Abschlussarbeiten, Tagungsbeiträge und Veröffentlichungen

Die Projektergebnisse in CiASOM haben zu 4 bereits erschienenen wissenschaftlichen Veröffentlichungen geführt, weitere 6 Manuskripte sind eingereicht und in verschiedenen Stadien der Begutachtung. CiASOM-Projektergebnisse wurden zusätzlich in Form von 8 Vorträgen und Postern auf nationalen und internationalen Tagungen und Arbeitstreffen präsentiert. Hierbei wurden die bewilligten Projektmittel teilweise für Tagungskosten eingesetzt. Darüber hinaus wurden substanzielle Beiträge zu wissenschaftlichen Datenbanken wie PANGAEA geleistet. Aus dem Projekt sind eine Doktorarbeit (Herr Moin Mellat Ardakani) und eine Masterarbeit (Herr Florian Gebhardt) bei der Universität Potsdam eingereicht worden. Herr Gebhardt hat seine Masterarbeit am 20. Juni 2024 erfolgreich verteidigt.

2.6.1 Abschlussarbeiten

Doktorarbeit Moein Mellat Ardakani (eingereicht im März 2024)

Titel: Frozen Signals - Isotopic Insights into the Central Arctic's Hydrology
Universität Potsdam, 2024

Master of Science Arbeit Florian Gebhardt (erfolgreich verteidigt am 20.06.2024)

Titel: Stable water vapour isotopes as integrated tracers of moisture sources, transport and deposition during warm air intrusions in the Arctic
Universität Potsdam, 2024

2.6.2 Veröffentlichungen

Veröffentlichungen von CiASOM-Projektergebnissen

- 1) Shupe, M. D., Rex, M., [...], Welker, J. M., Wendisch, M., **Werner, M.**, Xie, Z., Yue, F. (2022). Overview of the MOSAiC expedition: Atmosphere, Elementa: Science of the Anthropocene, 10(1). <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00060>

- 2) D. Nomura, Y. Kawaguchi, A. Webb, Y. Li, M. Dall'osto, K. Schmidt, E. S. Droste, E. J. Chamberlain, N. Kolabutin, E. Shimanchuk, M. Hoppmann, M. R. Gallagher, **H. Meyer, M. Mellat Ardakani**, D. Bauch, C. Gabarró, M. M. Smith, J. Inoue, E. Damm, B. Delille (2022). Meltwater layer dynamics of a central Arctic lead: Effects of lead width variation and re-freezing and mixing events during late summer. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 11(1). <https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00102>.
- 3) **C.F. Brunello, H. Meyer, M. Mellat**, M. Casado, S. Bucci, M. Dütsch, **M. Werner** (2023). Contrasting seasonal isotopic signatures of near-surface atmospheric water vapour in the Central Arctic during the MOSAiC campaign. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres* 128, e2022JD038400. <https://doi.org/10.1029/2022JD038400>.
- 4) **Mellat M., Brunello C.F., Werner M.**, Bauch D., Damm E., Angelopoulos M., Nomura D., Welker J.M., Schneebeli M., Granskog M.A., Hoerhold, M., Macfarlane A., Arndt S., **Meyer H.** (2024). Isotopic Signatures of Snow, Sea Ice, and Surface Seawater in the Central Arctic Ocean during MOSAiC Expedition. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 12(1). <https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00078>
- 5) **Brunello C.**, Gebhardt F., Rinke A., Duetsch M., Bucci S., **Meyer H., Mellat M., Werner M.**, (2024) Moisture transformation in Arctic warm air mass intrusions: process attribution with stable water isotopes. *Geophysical Research Letters*. (in revision)
- 6) Kopec B., **Werner, M.**, Mattingly, K. S., Klein, E., Noone, D., Akers, P. D., Bailey, H., Bonne, J.-L., **Brunello, C. F.**, Mustonen, K.-R., Hubbard, A. L., Kløve, B., Welker, J. M. (2024). Pan-Arctic water vapor isotope measurements reveal sea ice-ocean-atmosphere interactions during MOSAiC. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*. (in revision)
- 7) Macfarlane, A., **Mellat, M.**, Dadic, R., **Meyer, H., Werner, M., Brunello, C.**, Arndt, S., Krampe, D., Schneebeli, M. (2024). Ocean-sourced snow: An unaccounted process on Arctic sea ice. *Nature Geoscience* (in revision)
- 8) **Mellat, M.**, Macfarlane, A. R., **Brunello, C. F., Werner, M.**, Schneebeli, M., Dadic, R., Arndt, S., Mustonen, K.-R., Welker, J. M., and **Meyer, H.** (2024). Arctic Surface Snow Interactions with the Atmosphere: Spatio-Temporal Isotopic Variability During the MOSAiC Expedition, *The Cryosphere* (in revision; preprint: <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-719>)
- 9) Yoshimura, M., Nomura, D., Webb, A. L., Li, Y., Dall'osto, M., Schmidt, K., Droste, E. S., Chamberlain E. J., Posman, K. M., Angot, H., Blomquist, B., **Meyer, H.**, Hoppema, M., Tozawa, M., Inoue, J., Delille B. (2024). Melt pond CO₂ dynamics and fluxes with the atmosphere in the Central Arctic Ocean during the summer-to-autumn transition. *Elementa: Science of the Anthropocene*. (in revision)
- 10) G. Laukert, D. Bauch, B. Rabe, T. Krumpfen, E. Damm, M. Kienast, E. Hathorne, M. Vredenburg, S. Tippenhauer, N. Andersen, **H. Meyer, M. Mellat**, A. D'Angelo, D. Nomura, T.J. Horner, K. Hendry, S. S. Kienast (2024). Arctic Transpolar Drift Amplifies Siberian Matter Dispersal through Decoupled Sea Ice and Ocean Surface Pathways. *Nature Communications*. (submitted)

Weitere Veröffentlichungen von CiASOM-Mitarbeitern im Projektzeitraum

- 11) **Mellat, M.**, Bailey, H., Mustonen, K.-R., Marttila, H., Klein, E. S., Gribanov, K., Bret-Harte, M. S., Chupakov, A. V., Divine, D. V., Else, B., Filippov, I., Hyöky, V., Jones, S., Kirpotin, S. N., Kroon, A., Markussen, H. T., Nielsen, M., Olsen, M., Paavola, R., Pokrovsky, O. S., Prokushkin, A., Rasch, M., Raundrup, K., Suominen, O., Syvänperä, I., Vignisson, S. R., Zarov, E., and Welker, J. M. (2021). Hydroclimatic Controls on the Isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, d-excess) Traits of Pan-Arctic Summer Rainfall Events. *Frontiers in Earth Science*, 9.

<https://doi.org/10.3389/feart.2021.651731>.

- 12) Ala-aho, P. W., J.M.; Bailey, H.; Højlund Pedersen, S.; Kopec, B.; Klein, E.; **Mellat, M.**; Mustonen, K.-R.; Noor, K.; Marttila, H. (2021). Arctic Snow Isotope Hydrology: A Comparative Snow-Water Vapour Study. *Atmosphere*, 12 (2). <https://doi.org/10.3390/atmos12020150>.
- 13) Kwiecien, O., Braun, T., **Brunello, C. F.**, Faulkner, P., Hausmann, N., Helle, G., Hoggarth, J. A., Ionita, M., Jazwa, C. S., Kelmelis, S., Marwan, N., Nava-Fernandez, C., Nehme, C., Opel, T., Oster, J. L., Perşoiu, A., Petrie, C., Prufer, K., Saarni, S. M., Wolf, A., Breitenbach, S. F. M. (2022). What we talk about when we talk about seasonality – A transdisciplinary review, *Earth-Science Reviews*, 225. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103843>.

2.6.3 Tagungsbeiträge

- 1) **Brunello, C. F., Meyer, H., Mellat, M., Werner, M.** (2021). Atmospheric water vapour isotopes in the Arctic at the interface with sea ice and open ocean, Workshop: “Water Isotopes: From Weather to Climate”, Geophysical Institute, Universität Bergen, Norwegen, 17-19 November 2021, Vortrag (virtuelle Teilnahme)
- 2) **Mellat Ardakani, M., Werner, M., Brunello, C. F., Meyer, H.** (2021). Isotopic traits of the Arctic water cycle, Workshop: “Water Isotopes: From Weather to Climate”, Geophysical Institute, Universität Bergen, Norwegen, 17-19 November 2021, Vortrag (virtuelle Teilnahme)
- 3) **Mellat, M., Brunello, C. F., Werner, M.,** Bauch, D., Damm, E., Nomura, D., D'Angelo, A., **Meyer, H.** (2021). Changes of water isotopes in Arctic Sea ice, Ocean and atMosphere (CiASOM), AGU Fall Meeting 2021, New Orleans, USA, 13-17 Dezember 2021, Posterpräsentation C55C-0609 (virtuelle Teilnahme)
- 4) **Brunello, C.F., Meyer, H., Mellat, M., Werner, M.,** (2022). Changes of atmospheric water vapour isotopes in the Arctic at the interface with sea ice and open ocean, International MOSAiC Science Conference, Potsdam, Deutschland, 25-29 April 2022, Vortrag.
- 5) **Mellat, M., Werner, M., Brunello, C.F.,** Bauch, D., Damm, E., Angelopoulos, M., Nomura, D., Welker, J., Schneebeli, M., Granskog, M.A., D'Angelo, A., Hoerhold, M., Arndt, S., **Meyer, H.** (2022). Isotopic traits of the Arctic water cycle, International MOSAiC Science Conference, Potsdam, Deutschland, 25-29 April 2022, Poster.
- 6) **Brunello, C. F., Meyer, H., Mellat, M.,** Casado, M., Rinke, A., Bucci, S., **Werner, M.** (2022). The isotopic composition of water vapour in the Central Arctic during the MOSAiC campaign: local versus distant-moisture sources., EGU General Assembly 2022, Wien, Österreich, 23-27 May 2022, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11574>, 2022, Vortrag.
- 7) **Mellat, M., Werner, M., Brunello, C. F.,** Bauch, D., Damm, E., Nomura, D., D'Angelo, A., Welker, J. M., Schneebeli, M., **Meyer, H.** (2022). Isotope measurements of the Arctic water cycle and exchange processes between seawater, sea ice, and snow during MOSAiC, EGU General Assembly 2022, Wien, Österreich, 23-27 May 2022, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-7062>, 2022, Vortrag.
- 8) **Brunello, C. F., Gebhardt, F.,** Rinke, A., **Meyer, H., Mellat, M.,** Bucci, S., Dütsch, M., **Werner, M.** (2024). Moisture exchange processes during warm air intrusions in the Arctic under different sea ice conditions, International MOSAiC Science Conference, Potsdam, Deutschland, 26 February-1 March 2024, Poster.

2.6.4 Publierte Datensätze

Zusätzlich wurden folgende Datensätze in das PANGAEA Informationssystem hochgeladen und stehen nun der wissenschaftlichen Community zur Verfügung:

- Brunello, CF; Werner, M; Meyer, H et al. (2022): Continuous near-surface atmospheric water vapour isotopic composition from Polarstern cruise PS122-4 (MOSAiC); <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.951448>
- Brunello, CF; Werner, M; Meyer, H et al. (2022): Continuous near-surface atmospheric water vapour isotopic composition from Polarstern cruise PS122-1 (MOSAiC); <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.951424>
- Meyer, H; Mellat, M; Nomura, D et al. (2022): Stable water isotopes and conductivities of a lead case study during leg 5. Related to: Nomura, D; et al.: Freshwater layer structure of a lead in the central Arctic varied with lead width and re-freezing and mixing events during late summer; <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.945285>
- Mellat, M; Meyer, H; Brunello, CF et al. (2022): Stable water isotopes of underway seawater during MOSAiC expedition; <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.948291>
- Brunello, CF; Werner, M; Meyer, H et al. (2022): Continuous near-surface atmospheric water vapour isotopic composition from Polarstern cruise PS122-2 (MOSAiC); <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.951446>
- Brunello, CF; Werner, M; Meyer, H et al. (2022): Continuous near-surface atmospheric water vapour isotopic composition from Polarstern cruise PS122-3 (MOSAiC); <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.951447>
- Brunello, CF; Werner, M; Meyer, H et al. (2022): Continuous near-surface atmospheric water vapour isotopic composition from Polarstern cruise PS122-5 (MOSAiC); <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.951449>
- Mellat, M; Meyer, H; Brunello, CF et al. (2022): Stable water isotopes of snow during MOSAiC expedition; <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.948511>
- Mellat, M.; Meyer, H.; Werner, M. et al. (2023): Stable water isotopes of sea ice at Main Coring Site (MCS) during MOSAiC expedition; <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.958466>
- Macfarlane, A. R; Schneebeli, M.; Dacic, R. et al. (2022): Snowpit stable isotope profiles during the MOSAiC expedition; <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.952556>; part of: Macfarlane, A. R; et al. (2021): Snowpit raw data collected during the MOSAiC expedition; <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.935934>
- B. G. Kopec, M. Werner, K. S. Mattingly, E. S. Klein, P. D. Akers, H. Bailey, J.-L. Bonne, C. F. Brunello, K.-R. Mustonen, J. M. Welker (2022): Arctic Water Isotope Network observations, vapor transport, and storm track site connections for September-November 2019. Arctic Data Center. <https://doi.org/10.18739/A2JS9H884>

3 Kurzfassung

3.1 Berichtsblatt / Control Sheet

Eine Kurzfassung des abgeschlossenen Vorhabens CiASOM ist in deutscher und englischer Sprache dem folgenden Berichtsblatt bzw. *Control Sheet* zu entnehmen.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN <p style="text-align: center;">geplant</p>	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) <p style="text-align: center;">Schlussbericht</p>
3. Titel Abschlussbericht des Vorhabens MOSAiC 1 CiASOM Verwendung von stabilen Wasserisotopen für ein besseres Verständnis des arktischen Wasserkreislaufs	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Meyer, Hanno Werner, Martin	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31. Oktober 2023
	6. Veröffentlichungsdatum 2022, 2023, 2024, geplant
	7. Form der Publikation Fachzeitschrift
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung Postfach 120161, 27515 Bremerhaven	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03F0869A
	11. Seitenzahl 23
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 13
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 9
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das MOSAiC Drift-Experiment bot die einzigartige Möglichkeit, die wichtigsten hydrologischen Prozesse in der zentralen Arktis über ein ganzes Jahr hinweg zu untersuchen und dabei erstmalig auch den arktischen Winter zu erfassen. Im Vorhaben CiASOM wurden hierfür stabilen Wasserisotope als Klima- und Umweltparameter für die Untersuchung des heutigen Wasserkreislaufs verwendet. Dazu wurden die Beiträge der einzelnen Komponenten des hydrologischen Kreislaufs in der Umgebung der FS Polarstern untersucht, um Austauschprozesse zwischen Ozean, Meereis und Atmosphäre quantitativ zu erfassen. Der Einsatz eines CRDS-Spektrometers ermöglichte zudem, die isotopische Zusammensetzung des atmosphärischen Wasserdampfs während der gesamten MOSAiC Expedition kontinuierlich zu messen. Sämtliche Messdaten wurden zur Charakterisierung der arktischen Feuchtesignatur genutzt. Eine quantitative Erfassung der Kopplung von Klima- und Isotopensignalen erfolgt dabei über Modellstudien, welche die Simulation der Feuchtetransporte mit Hilfe eines Lagrangeschen Transport- und Dispersionsmodells als auch Klimasimulationen mit dem Atmosphären-Modell ECHAM6 mit expliziter Isotopendiagnostik umfassten. Die Datensätze des CiASOM-Projekts aus der zentralen Arktis wurden ferner mit Isotopen-Datensätzen kontinentaler Stationen, welche im gleichen Zeitraum isotopische Änderungen im Wasserdampf und Niederschlag gemessen hatten, verglichen und gemeinsam analysiert.	
19. Schlagwörter Arktis, stabile Wasserisotope, MOSAiC Expedition, Klimasimulation	
20. Verlag University of California Press; Wiley(AGU), Washington DC	21. Preis Open Access

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN <p style="text-align: center;">planned</p>	2. type of document (e.g. report, publication) <p style="text-align: center;">Final Report</p>
3. title Final Report of the project CiASOM Use of stable water isotopes for a better understanding of the Arctic water cycle	
4. author(s) (family name, first name(s)) Meyer, Hanno Werner, Martin	5. end of project October 31, 2023
	6. publication date 2022, 2023, 2024, planned
	7. form of publication scientific journal
8. performing organization(s) (name, address) Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre of Polar and Marine Research Postfach 120161, 27515 Bremerhaven	9. originator's report no.
	10. reference no. 03F0869A
	11. no. of pages 23
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 13
	14. no. of tables 1
	15. no. of figures 9
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract The MOSAiC drift experiment offered the unique opportunity to investigate the most important hydrological processes in the central Arctic over an entire year and to record the Arctic winter for the first time. In the CiASOM project, stable water isotopes were used as climate and environmental parameters for the investigation of today's water cycle. To this end, the contributions of the individual components of the hydrological cycle in the vicinity of the RV Polarstern were analysed in order to quantitatively record exchange processes between the ocean, sea ice and atmosphere. The use of a CRDS spectrometer also made it possible to continuously record the isotopic composition of the atmospheric water vapour during the entire MOSAiC expedition. All measurement data was used to characterise the Arctic moisture signature. The coupling of climate and isotope signals was quantified using modelling studies, which included the simulation of moisture transport using a Lagrangian transport and dispersion model as well as climate simulations using the ECHAM6 atmospheric model with explicit isotope diagnostics. The data sets of the CiASOM project from the central Arctic were also compared with isotope data sets from continental stations that had measured isotopic changes in water vapour and precipitation during the same period and analysed together.	
19. keywords Arctic, stable water isotopes, MOSAiC expedition, climate simulation	
20. publisher University of California Press; Wiley(AGU), Washington DC	21. price Open Access