

SIDFExplore Abschlussbericht

30. April 2024

Helge Gößling (Goessling) und Valentin Ludwig

Zuwendungsempfänger: Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Förderkennzeichen: 03F0868A

Vorhabenbezeichnung: MOSAiC 1 - SIDFExplore: Auswertung des Meereisdrift-Vorhersage-Experiments im Zusammenhang mit MOSAiC-Beobachtungen zur Verbesserung von Eisdrift-Vorhersagen und Klimamodellen

Laufzeit: 01.11.2020 bis 31.10.2023

Berichtszeitraum: 01.11.2020 bis 31.10.2023

Teil I: Kurzdarstellung

Aufgabenstellung

Der arktische Ozean und Teile des Südozeans sind ganzjährig von Meereis bedeckt. Diese Eisdecke ist unter dem Einfluss von Wind, Ozean und internen Kräften ständig in Bewegung, reißt auf und wird deformiert, wodurch einzelne Schollen entstehen. Die Bewegung dieser Schollen, auch Meereisdrift genannt, kann zum Beispiel über Bojen oder Satellitendaten beobachtet werden. Für verschiedene Anwendungen, zum Beispiel Navigation, ist jedoch auch die Vorhersagbarkeit von Meereisdrift von Interesse. So können Forschungsschiffe erheblich Treibstoff und wertvolle Schiffszeit sparen, wenn einzelne Eisschollen umfahren werden können, anstatt sie zu durchbrechen. Aus diesem Grund ist es von großem Interesse, zu erforschen, inwiefern die Meereisdrift mit gängigen Computermodellen vorhergesagt werden kann.

Der SIDFEx-Datensatz (Sea Ice Drift Forecast Experiment) erfüllt genau diesen Zweck: Durch das Sammeln von Vorhersagen verschiedener Computermodelle für die Drift derselben Bojen wurde ein einzigartiger Datensatz generiert, der uns in die Lage versetzt hat, eine in diesem Rahmen einmalige umfassende Analyse von Driftvorhersagen durchzuführen. Diese Analyse ist Gegenstand von SIDFExplore. Hauptsächlich haben wir uns in SIDFExplore den folgenden Aufgaben gewidmet: Kombination verschiedener Vorhersagen zu einer Konsensvorhersage; Entwicklung eines Webtools, um die Vorhersagen der breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen; Operationelle Unterstützung von Schiffsexpeditionen; Analyse der Vorhersagbarkeit von Deformation auf kleinen räumlichen Skalen; Vorhersagbarkeit von Meereisdrift über mehrere Monate.

Voraussetzungen

Die Infrastruktur, um die Vorhersagen operationell zu sammeln, wurde im Vorfeld des Projekts von Helge F. Gößling (im Folgenden HFG) aufgebaut. Ursprünglich wurde der SIDFEx-Datensatz aufgebaut, um im Vorfeld der 2019 gestarteten MOSAiC-Expedition eine optimale Startposition zu ermitteln. Während der Expedition wurde er um weitere Bojen ergänzt und über die Jahre weiter ausgebaut. Bei Projektstart (Oktober 2020) umfasste er etwa 130.000 einzeln vorhergesagte Drifttrajektorien, mittlerweile ist die Anzahl auf knapp 300.000 gestiegen. Ein Softwarepaket zur Analyse wurde ebenfalls vor Projektstart von HFG entwickelt und veröffentlicht (<https://github.com/helgegoessling/SIDFEx>), sowie im Laufe des Projekts weiterentwickelt.

Ablauf (personell)

Die Postdoc-Stelle wurde zunächst von Dr. Lorenzo Zampieri besetzt. Nach dessen Ausscheiden aus dem Projekt konnte mit etwas Verzögerung ab dem 1. Oktober 2021 bis zum 31. Oktober 2023 Dr. Valentin Ludwig für SIDFExplore gewonnen werden. Mit den verbleibenden Mitteln konnte 2023 zur zusätzlichen Unterstützung mit Dr. Svetlana Loza eine erfahrene Wissenschaftlerin für fünf Personenmonate eingestellt werden. Gleichzeitig wurde 2022/23 Antonia Jost als studentische Hilfskraft im Projekt eingestellt. Über den gesamten Zeitraum wurde das Projekt von HFG geleitet.

Wissenschaftlicher und technischer Ausgangspunkt

Vor SIDFExplore gab es keine breit angelegte internationale Initiative zur Auswertung der Vorhersagegüte von Meereisdrift in Modellen. Meist wird die Meereisdrift zur Optimierung anderer Modellparameter genutzt (beispielsweise Massonnet et al., 2014; Sumata et al., 2019), jedoch nicht, um die Vorhersagbarkeit der Meereisdrift selbst zu verbessern. Eine Studie von Schweiger und Zhang (2015) kommt zu dem Schluss, dass Modellvorhersagen deutlich besser sind als auf Klimatologien basierende Referenzvorhersagen und dass die Vorhersagbarkeit der Atmosphäre, im speziellen der Winde, am wichtigsten für die Vorhersagbarkeit der Meereisdrift ist. Alle diese Studien wurden jedoch von einzelnen Gruppen für einzelne Modelle durchgeführt, so dass die Ergebnisse sich nur auf einzelne Aspekte und Modelle beschränkt waren. Ein breit angelegtes Projekt, um Vorhersagen verschiedener Modelle zu evaluieren, gab es nicht. Der SIDFEx-Datensatz bot die ideale Gelegenheit für ein solches Projekt, wie es schließlich im Rahmen von SIDFExplore durchgeführt wurde.

Zusammenarbeit

Ohne unsere internationalen Partner wäre SIDFExplore nicht möglich gewesen. Die meisten führenden Forschungsgruppen in Europa und Amerika waren mit ihren Vorhersagesystemen beteiligt. Dazu zählen das UK MetOffice aus Großbritannien mit drei Vorhersagesystemen, ECCC aus Kanada mit zwei Systemen, NRL (zwei Systeme), University of Washington (ein System), NCEP (ein System), CIRES/NOAA (ein System) aus den USA, das ECMWF (ein System), das NMI aus Norwegen (ein System), das DMI aus Dänemark (ein System), das UCL aus Belgien mit einem System sowie das AWI mit zwei Systemen. Weitere Expert*innen aus den USA und Europa waren in beratender Funktion beteiligt. Die folgende Karte zeigt die beteiligten Institute und die Anzahl der gelieferten Vorhersage-Trajektorien:

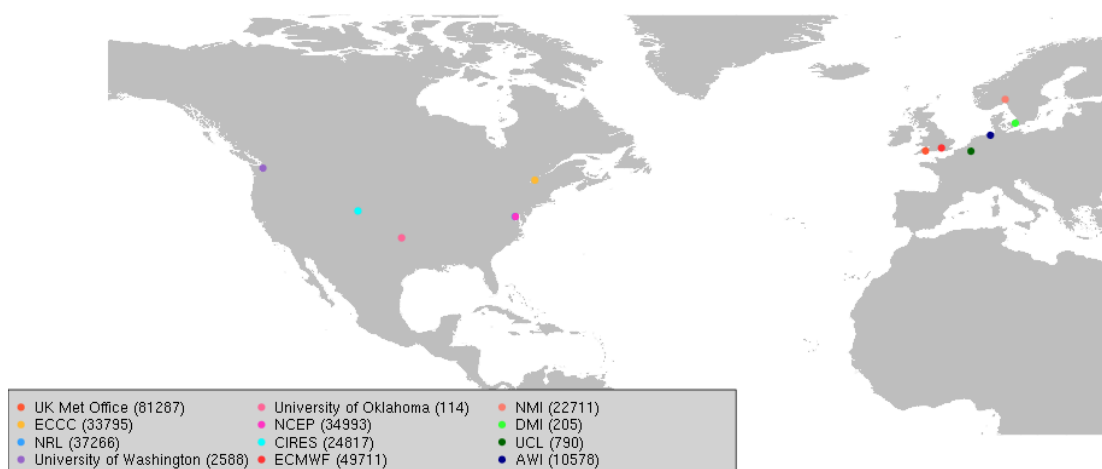


Abb. 1: An SIDFEx beteiligte Institute (farbige Punkte) und Anzahl der gelieferten Vorhersage-Trajektorien in Klammern.

SIDFExplore Abschlussbericht

30. April 2024

Helge Gößling (Goessling) und Valentin Ludwig

Zuwendungsempfänger: Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung

Förderkennzeichen: 03F0868A

Vorhabenbezeichnung: MOSAiC 1 - SIDFExplore: Auswertung des Meereisdrift-Vorhersage-Experiments im Zusammenhang mit MOSAiC-Beobachtungen zur Verbesserung von Eisdrift-Vorhersagen und Klimamodellen

Laufzeit: 01.11.2020 bis 31.10.2023

Berichtszeitraum: 01.11.2020 bis 31.10.2023

Teil II: Eingehende Darstellung

	Q1.1	Q1.2	Q1.3	Q1.4	Q2.1	Q2.2	Q2.3	Q2.4	Q3.1	Q3.2	Q3.3	Q3.4
WP1												
D1.1	■	■	■	■								
D1.2	■	■	■	■	■	■						
D1.3	■	■	■	■	■	■						
WP2												
D2.1					■	■	■	■	■	■		
WP3												
D3.1					■	■	■	■				
D3.2							■	■	■	■	■	■
WP4												
D4.1							■	■				
D4.2									■	■		
D4.3					■	■	■	■	■	■	■	■
WP5												
D5.1				■				■				
D5.2									■	■		
D5.3											■	■

Abb. 2) Übersicht über den zu Projektende erreichten Stand nach Work Packages und Deliverables.

WP 1: Auswertung der Güte der Drift-Vorhersagen

WP 1, D1.1, 11/2020 - 10/2021 (grundlegende Auswertung der Vorhersagen für das MOSAiC Central Observatory und Distributed Network)

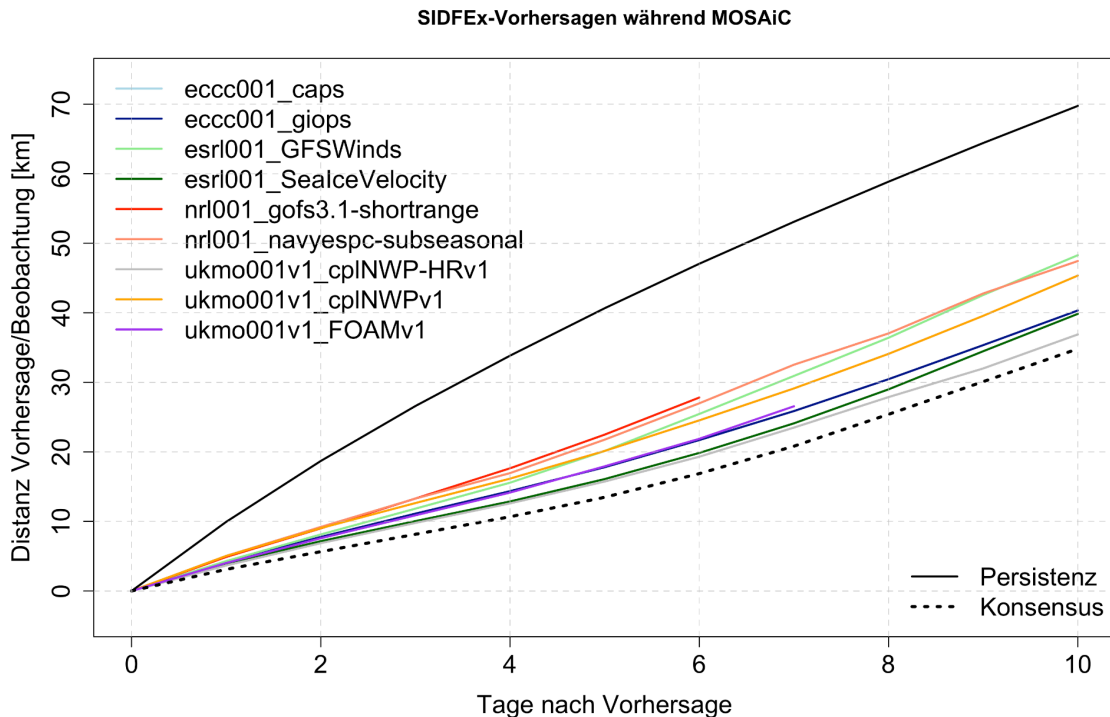


Abb. 3: Illustration der Vorhersagegüte einiger der in SIDFExplore verwendeten Systeme. Gezeigt wird die Distanz zwischen vorhergesagter und beobachteter Bojenposition auf der y-Achse in Abhängigkeit von den Tagen nach Initialisierung (x-Achse). Jede farbige Linie zeigt ein Vorhersagesystem, deren Namen in der Legende aufgeführt werden. Die schwarze durchgezogene Linie zeigt eine Persistenzvorhersage, die schwarze gestrichelte Linie zeigt die Konsensvorhersage (Details jeweils im Text). Die Daten basieren auf allen Vorhersagen für das Central Observatory (FS Polarstern) während der MOSAiC-Expedition.

Inhalt von WP 1 (D1.1) ist eine grundlegende Auswertung der während MOSAiC gesammelten Vorhersagen. Diese wurden sowohl für FS Polarstern (Central Observatory) als auch für während der Fahrt ausgebrachte Bojen in einem Umkreis von bis zu 50 km (Distributed Network) um FS Polarstern gesammelt. Im weiteren Verlauf von SIDFExplore kamen auch weiter entfernte Bojen hinzu. Abbildung 3 veranschaulicht die Vorhersagegüte der verschiedenen Systeme exemplarisch für FS Polarstern. Die in der Abbildung veranschaulichte Analyse liefert drei Hauptkenntnisse:

Erstens liefert jedes einzelne System für jeden einzelnen Tag nach Initialisierung bessere Ergebnisse als die sogenannte Persistenzvorhersage. Die Persistenzvorhersage besteht aus einer linearen Verlängerung der Trajektorie in die Zukunft, basierend auf der Drift vom vorherigen bis zum aktuellen Tag. Generell gilt, dass ein System bessere Vorhersagen liefern muss als die Persistenzvorhersage, um einen Mehrwert zu erzeugen. Der in Abb. 3 visualisierte Nachweis, dass dies für die in SIDFExplore verwendeten System der Fall ist, gibt uns das notwendige Vertrauen in die Systeme für die im weiteren Verlauf von SIDFExplore durchgeführten Analysen. Besonders ist anzumerken, dass die meisten verwendeten Systeme nicht primär für Driftvorhersagen entwickelt wurden (Details im nächsten Abschnitt), was die in Abb. 3 gezeigte Vorhersagegüte in einem umso helleren Licht erscheinen lässt.

Zweitens schneidet im Vergleich zwischen den Systemen kein System substantiell schlechter als alle anderen ab, auch wenn sich Unterschiede erkennen lassen. Dies ist ermutigend, da es sich um recht unterschiedliche Systeme handelt: Manche (z. B. `eccc001_giops`, `nrl001_gofs3.1-shorrange`, `ukmo001v1_FOAMv1`) werden hauptsächlich für die Vorhersage von Eis- und Ozeanbedingungen genutzt, während andere (z. B. `ukmo001v1_cpINWP-HRv1`) primär der numerischen Wettervorhersage dienen. Zu sehen, dass alle diese Systeme ähnliche Ergebnisse liefern, gibt uns weiteres Vertrauen in deren Robustheit.

Drittens schneidet die in Abb. 3 ebenfalls gezeigte Konsensvorhersage an jedem einzelnen Tag nach Initialisierung besser ab als jedes einzelne System. Kurz gesagt kombiniert die Konsensvorhersage die einzelnen Systeme zu einer "mittleren Vorhersage". Auf ihren genauen Aufbau gehen wir unter D3.1 ein. Abb. 3 demonstriert, dass die Konsensvorhersage entscheidende Vorteile gegenüber den einzelnen Systemen liefert. Da die Bandbreite an verschiedenen System das zentrale Alleinstellungsmerkmal von SIDFEx darstellt, demonstriert die Konsensvorhersage die Wichtigkeit dieses Alleinstellungsmerkmals. Sie wurde während MOSAiC, aber auch während anderer aufsehenerregender Expeditionen zum Einsatz gebracht, ihre Relevanz für die tägliche Fahrtplanung und ad-hoc Entscheidungen an Bord wurde mehrfach von Fahrtteilnehmenden unterstrichen.

Zuletzt sei genannt, dass wir im Rahmen der beschriebenen Analyse eine neue Version des Systems `ukmo001v1_cpINWPv1` testen konnten. Es handelt sich hierbei um das vom UK MetOffice (meteorologischer Dienst in Großbritannien, vergleichbar dem DWD in Deutschland) operationell betriebene und daher höchst relevante Vorhersagemodell. In Abb. 3 ist auch das zur damaligen Zeit noch experimentelle System `ukmo001v1_cpINWP-HRv1` aufgeführt, das eine feinere räumliche Auflösung als `ukmo001v1_cpINWPv1` aufweist. Anhand des geringeren Fehlers vor allem ab dem dritten Tag nach Initialisierung konnten wir die Vorteile der feineren Auflösung für die Driftvorhersage demonstrieren und das Ergebnis an die Projektpartner am UK MetOffice direkt zurückmelden. Mittlerweile wird das damals noch experimentelle

System ukmo001v1_cpINWP-HRv1 operationell betrieben und hat ukmo001v1_cpINWPv1 abgelöst.

Die Ergebnisse sind Teil der ersten aus SIDFExplore hervorgehenden Erstautorenpublikation (Goessling et al., in prep.).

WP 1, D1.2, 11/2020 - 04/2022 (Vorhersagen der Deformation)

Während sich D1.1 mit der Auswertung von Vorhersagen für die Bewegung einzelner Bojen befasst, befasst sich D1.2 mit Vorhersagen der Bewegung verschiedener Bojen relativ zueinander. Daraus lassen sich Scherung und Kon- beziehungsweise Divergenz ableiten, aus denen sich wiederum die Verformung, auch Deformation genannt, des Meereises zusammensetzt. Dieser Vorgang beschreibt, wie Meereis sich verhält, wenn es zusammengedrückt beziehungsweise auseinandergerissen wird, da die Vektoren von Wind und Ozean in unterschiedliche Richtungen zeigen. Dieser Vorgang ist aus verschiedenen Gründen hoch relevant für das arktische Klimasystem und in Modellen schwierig abzubilden. Es existieren viele Studien, die sich mit der Repräsentation von Deformation in Modellen befassen, jedoch keine, die sich mit der Vorhersagbarkeit von Deformation befassen. D1.2 schließt diese Forschungslücke.

Zunächst zeigt die Zeitreihe in Abb. 4, dass in den meisten Fällen die beobachtete Vorhersage innerhalb der Modell-Spannbreite (Mittelwert \pm Standardabweichung der Modellvorhersagen) liegt. Dies allein ist noch kein zuverlässiges Qualitätskriterium, gibt aber schon Zuversicht für die weiteren Analysen. Darüber hinaus zeigt Abb. 4, dass die Vorhersagen am Großteil der Tage recht gut sind, selbst wenn die absoluten Werte nicht immer übereinstimmen. Insgesamt sind jedoch sowohl der Mittelwert als auch die Standardabweichung in den Modellen zufriedenstellend abgebildet. Die Boxplots im unteren Teil von Abb. 4 zeigen die statistische Verteilung der Deformationsereignisse für die einzelnen in die Zeitreihe im oberen Teil von Abb. 4 eingegangenen Systeme. Es zeigt sich, dass der Mittelwert meist nah an den Beobachtungen liegt, die Spannbreite der Ereignisse in den Modellen aber meist kleiner ist als in den Beobachtungen.

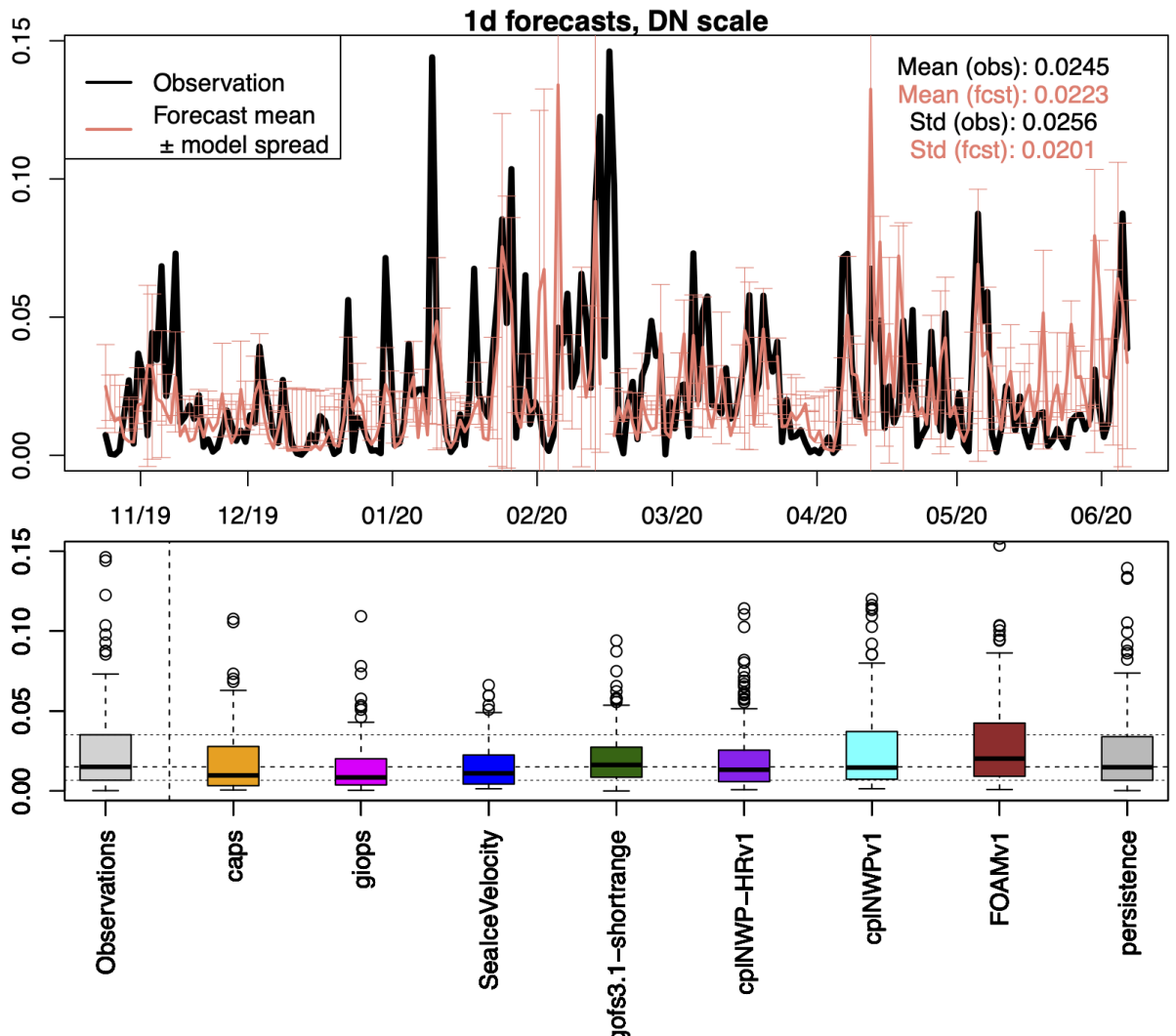


Abb. 4: Zeitreihe (oberer Teil) und Verteilung (unterer Teil) der Deformationsvorhersagen zwischen November 2019 und Mai 2020. Im oberen Teil ist die über alle Modelle/Vorhersagesysteme gemittelte Deformation einen Tag nach Initialisierung abgebildet, die Balken geben die zugehörige Standardabweichung an. Der untere Teil zeigt Boxplots für jedes einzelne System.

Während in Abb. 4 Vorhersagen einen Tag nach Initialisierung gezeigt werden, zeigt Abb. 5 die Korrelation zwischen beobachteter und vorhergesagter Deformation für alle Tage nach Initialisierung. Hierbei ist ein Unterschied zwischen den Systemen zu erkennen: Fünf von ihnen liefern über die ersten 3 Tage Korrelationen von 0.4 und höher, während zwei andere deutlich darunter liegen, sogar unterhalb der Persistenzvorhersage. Wie zu erwarten ist, nimmt die Korrelation mit fortschreitender Dauer nach der Initialisierung ab. Es ist darüber hinaus sehr interessant zu sehen, dass selbst zehn Tage nach Initialisierung zumindest für ein System noch eine signifikante Korrelation zwischen Vorhersage und Beobachtung bestehen kann.

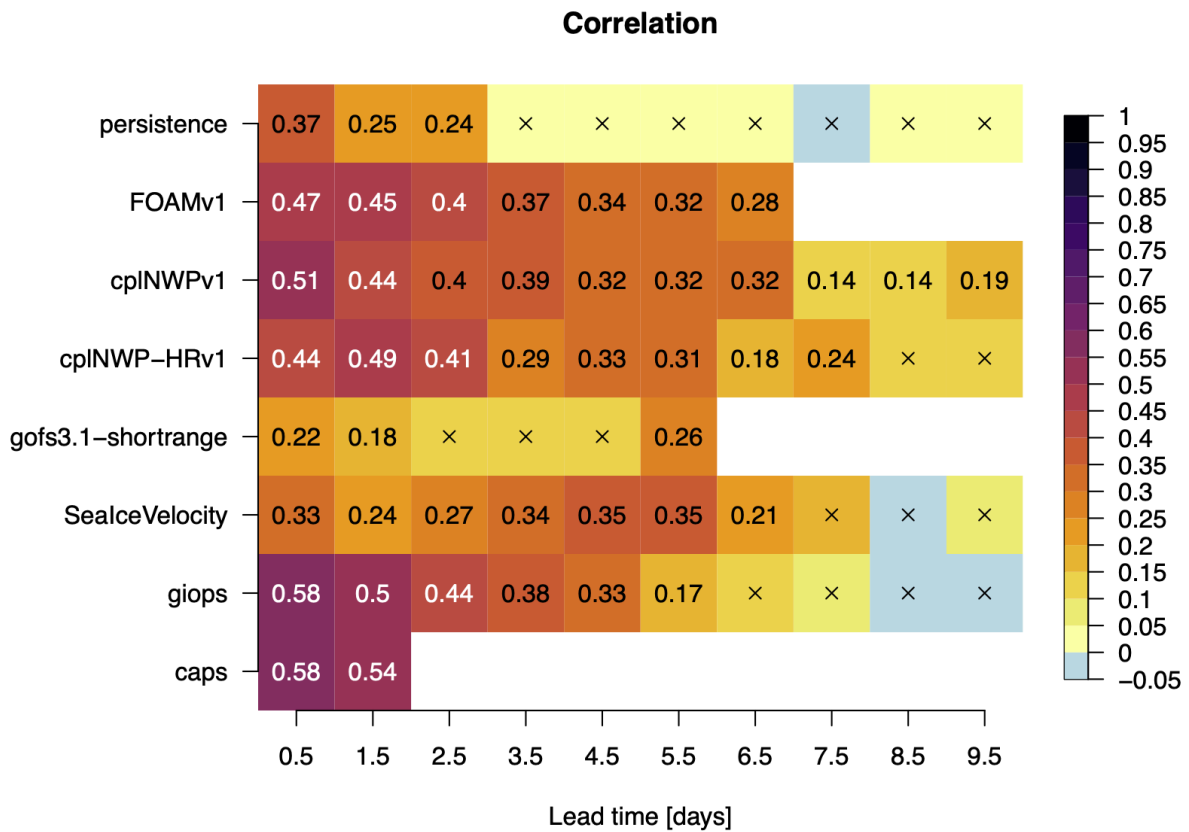


Abb. 5: Illustration der Korrelation zwischen Vorhersagen und Beobachtung für die einzelnen Vorhersagesysteme, in Abhängigkeit von den Tagen nach Initialisierung. Die x-Achse zeigt die Tage nach Initialisierung, auf der y-Achse sind die einzelnen Systeme aufgeführt. Die Farbskala gibt den Betrag des Korrelationskoeffizienten an, die Zahl den genauen Wert. Kreuze markieren Felder, deren zugehöriger p-Wert größer als 0.01 ist.

Zur Einordnung der Ergebnisse aus D1.2 sei gesagt, dass die Analyse sich mit Deformation auf kleinen räumlichen Skalen befasst, der initiale Abstand der Bojen zueinander betrug etwa 40 km. Die meisten Modelle verfügen über Gitterzellen von 5-10 km, was also nicht wesentlich kleiner als der darzustellende Prozess ist. Dass auf diesen kleinen räumlichen Skalen Deformation in der von uns demonstrierten Güte vorhersagbar ist, war so nicht zu erwarten und stellt daher ein sehr zufriedenstellendes Hauptergebnis von D1.2 und WP 2 dar. Die Ergebnisse sind Teil der zweiten aus SIDFExplore hervorgehenden Erstautorenpublikation (Ludwig et al., in prep.).

WP 1, D1.3, 11/2020 - 04/2022 (Abhängigkeit der Vorhersagen von geophysikalischen Parametern)

In vielen Analysen konnten wir sehen, dass der Vorhersagefehler innerhalb der ersten Tage stärker anstieg als in den Tagen danach. Das deutet daraufhin, dass die Störungen des atmosphärischen Antriebs, der das Ozean- und Eismodell initialisiert zu stark sein könnten, was wiederum die Wichtigkeit der Winde für eine gute Driftvorhersage unterstreicht. Auch die Tatsache, dass der Fehler der Vorhersage auf ähnlichen Zeitskalen ansteigt wie der Fehler für typische Wind-/Atmosphärenvorhersagen, deutet in diese Richtung. Dies gilt für Vorhersagen von bis zu zehn Tagen. Im Rahmen von SIDFExplore wurde eine Bachelorarbeit verfasst, die durch Dr. Ludwig hauptbetreut wurde und sich mit den Vorteilen von zeitlich hochaufgelösten Driftvorhersagen befasste. Ein Ergebnis der Arbeit war, dass der Vorteil vor allem vom Wind und der vorherrschenden Eiskonzentration abhängt. Im Rahmen der Deformationsanalyse sahen wir, dass die Vorhersagequalität drastisch abnahm, sobald das Packeis verlassen wurde und die Eiskonzentration dauerhaft unter 100% lag.

Basierend auf diesen Ergebnissen können wir sagen, dass für die Vorhersagegüte vor allem eine gute Windvorhersage wichtig ist, und dass Vorhersagen im Packeis besser funktionieren als im Eisrandgebiet mit niedrigen Eiskonzentrationen. Für die Zukunft ist geplant, dass neben den vorhergesagten Positionen auch die vorhergesagten Windrichtungen (u und v) mitgeliefert werden, so dass der Zusammenhang zwischen Qualität der Windvorhersage und Qualität der Driftvorhersage direkt analysiert werden kann. Darüber hinaus wurden während einer von SIDFExplore unterstützten Expedition umfangreiche Daten gesammelt, die es ermöglichen, den Einfluss von Schmelzprozessen auf das Zusammenspiel zwischen Eis, Ozean und Atmosphäre sowie die davon abhängige Qualität der Vorhersagen zu untersuchen.

WP 2: Verbesserungen der Vorhersage-Systeme

WP 2, D2.1, 11/2021 - 04/2023 (Zusammenstellung von Ergebnissen der modell-spezifischen Auswertungen)

Die Ergebnisse der modellspezifischen Auswertungen wurden unter WP 1 detailliert beschrieben, auf eine erneute Beschreibung wird daher an dieser Stelle verzichtet. Durch ständige Kommunikation mit den Projektpartnern wurde sichergestellt, dass die von uns gefundenen Ergebnisse direkt weitergegeben wurden, um zum besseren Verständnis der relevanten Prozesse und damit schlussendlich zur Verbesserung der Modelle beizutragen.

Als Beispiel der erfolgreichen Zusammenarbeit sei hier die Zusammenarbeit

WP 3: Kalibrierung und Multi-Modellvorhersage

WP 3, D3.1, 11/2021 - 10/2022 (on-the-fly Kalibrierung)

Abb. 6 zeigt eine Veranschaulichung unserer Konsensvorhersage. Die Vorhersage dient zum Einen dazu, die verschiedenen Systeme mit kurzen Vorhersagezeiträumen (bis zu zehn Tage) mit den Systemen mit längeren Vorhersagezeiträumen (vier bis sechs Monate) zu kombinieren. Zum Anderen ermittelt sie einen "best guess" der Drift basierend auf den verschiedenen Kurzzeitvorhersagen. Dazu werden zunächst alle Vorhersagen ausgewählt, die höchstens drei Tage alt sind und die noch mindestens drei Tage in die Zukunft reichen. Dann werden alle Vorhersagen auf den beobachteten Punkt rotiert, so dass sie alle vom selben Punkt starten. Daraufhin wird für jeden Zeitschritt das Baryzentrum (geographischer Mittelpunkt) aller verfügbaren Kurzzeitvorhersagen ermittelt und als Konsensvorhersage gespeichert. Sind keine kurzfristigen Vorhersagen mehr vorhanden, wird über eine erneute Rotation ein nahtloser Übergang zu einer langfristigen Ensemble-Vorhersage sichergestellt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass der größtmögliche Nutzen aus der Anzahl an verschiedenen Systemen gezogen wird, die eines der Alleinstellungsmerkmale von SIDFEx darstellt. Die Konsensvorhersage kann zur Unterstützung von Schiffsexpeditionen operationell produziert werden. Dann werden eine graphische Auswertung, ein an Bord in den MapViewer integrierbares shapefile und die vorhergesagten Koordinaten selbst operationell entweder per FTP-Server oder per Mail an die Kommandobrücke geschickt, wo sie direkt in die Entscheidungsfindung an Bord einfließen. Das Prozedere wurde während MOSAiC entwickelt und seither bei sechs weiteren Expeditionen erfolgreich angepasst und umgesetzt.

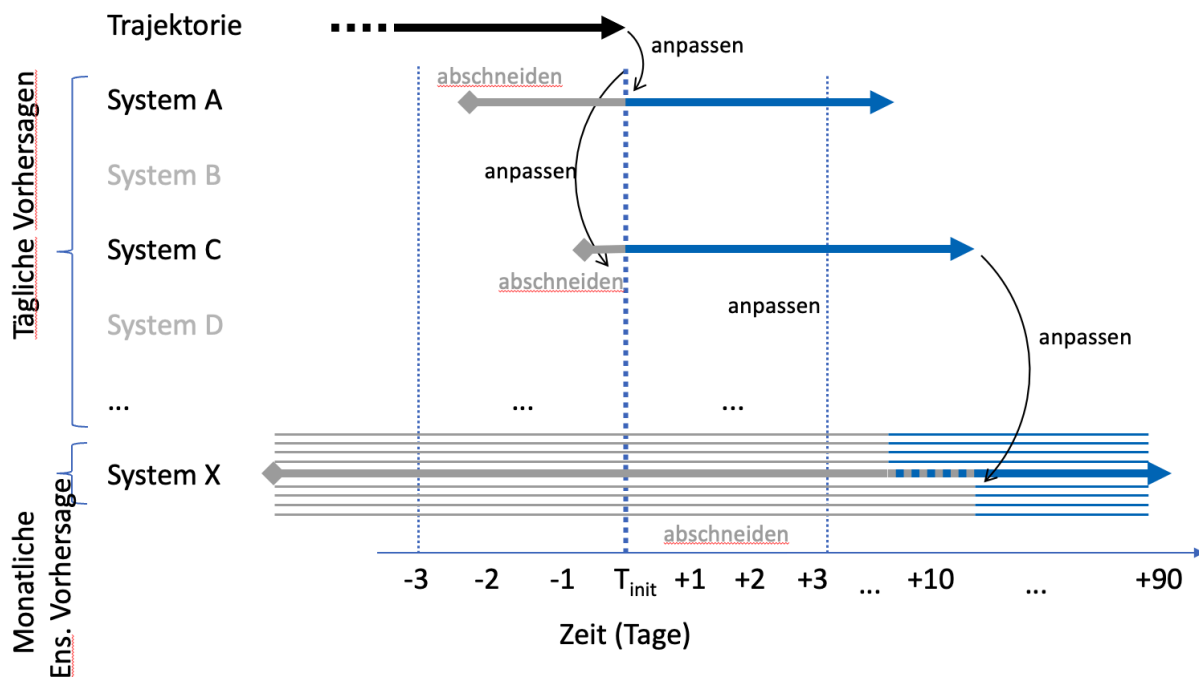


Abb. 6: Illustration der Methodik zur Generierung der Konsensvorhersage.

WP 3, D3.2, 05/2022 - 10/2023 (probabilistische Kalibrierung)

Für D3.2 war die probabilistische Kalibrierung unserer Vorhersagesysteme (gewissermaßen eine Erweiterung der in D3.1 entwickelten Konsensvorhersage) unter Nutzung von Machine Learning (ML) geplant. Im Laufe von SIDFExplore ergab es sich, dass ein Projektpartner (MetOffice Norway/norwegischer meteorologischer Dienst) eine Methode zu ML-kalibrierter Driftvorhersage entwickelte. Dieses nutzt einen Trainingsdatensatz aus Drifftrajektorien in der Arktis, um eine KI zu trainieren. Die so trainierte KI wird dann auf vorhergesagte Trajektorien angewandt, um diese weiter zu verbessern. Die so kalibrierten Vorhersagen haben wir in SIDFEX aufgenommen, so dass die probabilistische Kalibrierung bereits abgedeckt ist und wir anstelle der eigenen Entwicklung einen entsprechend größeren Arbeitsaufwand in die Analyse investieren konnten.

Um den Vorteil der KI-Methode gegenüber herkömmlichen Vorhersagen zu untersuchen, haben wir einen groß angelegten Vergleich gestartet: Für jeden Monat zwischen Juni 2020 und Dezember 2023 haben wir den mittleren Fehler (Distanz zwischen beobachteter und vorhergesagter Position) für alle Systeme berechnet, die mindestens 50 Vorhersagen für mindestens fünf unterschiedliche Bojen geliefert haben. Betrachtet wurden Vorhersagen zwei, fünf und zehn Tage nach Initialisierung. In über der Hälfte der Fälle hat die KI-Methode hierbei von allen Methoden am Besten abgeschnitten, und in 121 von 129 Fällen gehörte sie zu den besten drei Methoden.

Ein weiteres Beispiel für das Potential der KI-Vorhersagen ist in Abb. 7 gezeigt. Hier haben wir für eine Boje für alle Tage in 2023, an denen Vorhersagen der KI-Methode

zur Verfügung standen, eine Konsensvorhersage (siehe D3.1) mit und ohne KI-Methode berechnet. Aus Abb. 7 geht hervor, dass der Fehler durch die Miteinbeziehung der KI-Methode deutlich verringert werden kann. Darüber hinaus ist die KI-Methode alleine fast so gut wie die Konsensvorhersage, falls die Konsensvorhersage nur auf den anderen zur Verfügung stehenden Methoden basiert.

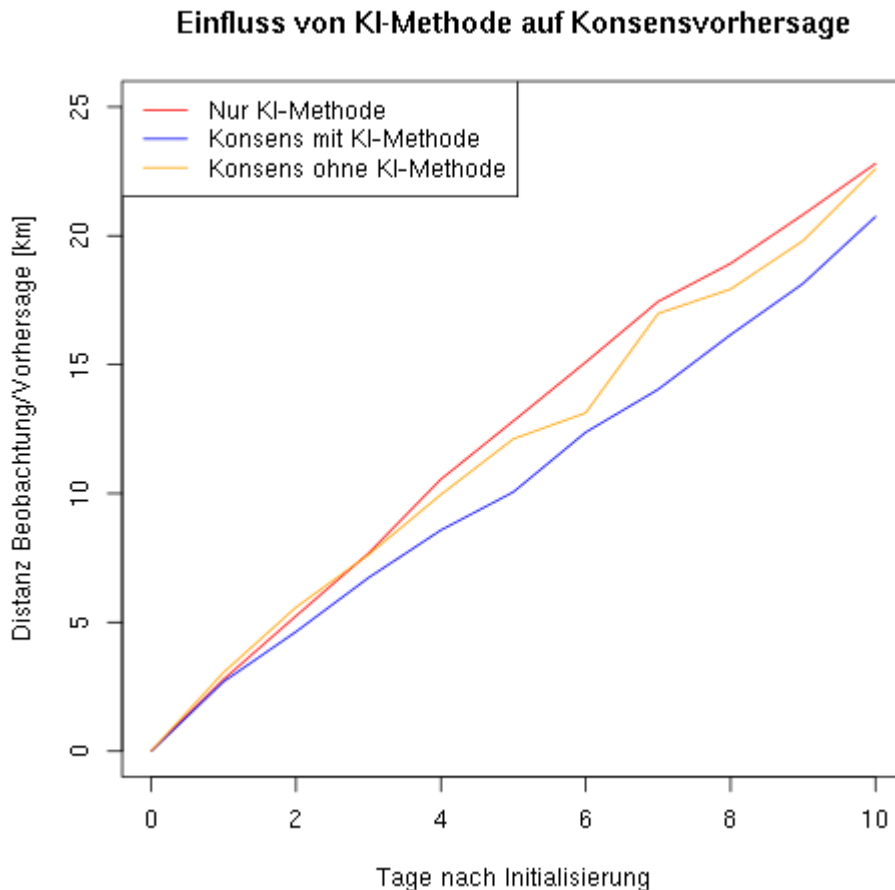


Abb. 7: Vorhersagegüte der KI-Methode und Einfluss auf die Konsensvorhersage.

Zur Einordnung sei gesagt, dass die KI-Methode bereits auf einem etablierten Vorhersagemodell basiert, das durch die KI weiter verbessert wird. Nichtsdestotrotz betrachten wir die Ergebnisse als deutliche Demonstration des Potentials für die Nutzung von KI zur Kalibrierung von Driftvorhersagen.

WP 4: Verbreitung und Fortführung

WP 4, D4.1, 05/2022 - 10/2022 (Veröffentlichung des Datensatzes)

Indirekt ist der Datensatz bereits öffentlich verfügbar. Das spezifisch für SIDFEx entwickelte Software-Paket (siehe D4.2) erlaubt es Nutzer*innen, mittels der Open-Source-Software R die Daten herunterzuladen und zu analysieren. Da die Publikationen noch in Arbeit und kurz vor dem Abschluss sind, haben wir bisher

darauf verzichtet, die Daten auf Zenodo zur Verfügung zu stellen. Mit Veröffentlichung der Paper werden alle Daten, die zu den Analysen in den Papern beigetragen haben, auf Zenodo zur Verfügung gestellt werden. Dann soll auch der komplette SIDFEx-Datensatz jahresweise auf Zenodo veröffentlicht werden.

Kurz vor Ende des Projektes ergab sich eine wissenschaftlich hochinteressante Kooperation mit einer Gruppe aus Grenoble, die das neuartige neXtSIM-Modell für Driftvorhersagen nutzt. neXtSIM unterscheidet sich von allen anderen in SIDFEx genutzten Modellen durch eine grundsätzlich andere Handhabung des räumlichen Gitters durch einen sogenannten Lagrange'schen Ansatz, weswegen wir dieses Produkt als wertvolle Ergänzung betrachten. Erste Resultate dieser Gruppe sehen äußerst vielversprechend aus. Da sie sich bereit erklärt haben, in naher Zukunft auch für die Vergangenheit Vorhersagen zu liefern, haben wir uns entschieden, mit der Veröffentlichung zu warten, bis die neXtSIM-Vorhersagen eingetroffen sind. Der dadurch ermöglichte Mehrwert für die wissenschaftliche Gemeinde wiegt die unwesentlich verlängerte Wartezeit unserer Meinung nach mehr als auf. Die verbleibende Arbeit wird vom AWI intern finanziert.

WP 4, D4.2, 11/2022 - 04/2023 (Veröffentlichung der Software)

Ein Kernelement der in SIDFExplore verfolgten Open-Access-Policy ist das frei verfügbare von Dr. Gößling entwickelte Software-Paket SIDFEx. Es ist in R geschrieben und daher ohne Lizenz und Gebühren für alle nutzbar. Mit dem Paket können die Daten heruntergeladen und detailliert ausgewertet werden. Unter anderem kann die in D3.1 beschriebene Konsensvorhersage berechnet werden, Trajektorien können zeitlich und räumlich aneinander angepasst werden und es können Metriken wie Distanz, Driftwinkel oder relative Driftgeschwindigkeit problemlos und nutzer*innenfreundlich berechnet werden. Das komplementäre, ebenfalls von Dr. Gößling entwickelte und frei verfügbare R-Paket spheRlab ermöglicht es, detaillierte Karten der Trajektorien zu erzeugen. Beide Pakete sind frei auf GitHub verfügbar (SIDFEx: <https://github.com/helgegoessling/SIDFEx>; spheRlab: <https://github.com/FESOM/spheRlab>).

Darüber hinaus wurde ein interaktives Benutzerhandbuch als Jupyter Notebook entwickelt, das Nutzer*innen intuitiv an die Nutzung und Analyse der SIDFEx-Daten heranführt. Es ist ebenfalls frei hier verfügbar: <https://gitlab.awi.de/vludwig/sidfex-user-guide>. Das Benutzerhandbuch beschreibt den Download der Daten, die Installation der relevanten Software-Pakete und ermöglicht erste Analysen. Danach sollten Nutzer*innen soweit mit dem Datensatz und der zugehörigen Software vertraut sein, um tieferegreifende Analysen selbstständig, oder im Austausch mit uns, durchzuführen.

Um SIDFEx einer noch breiteren Öffentlichkeit zugänglich zu machen, wurde auch ein Webtool entwickelt: <https://sidfex.polarprediction.net/>. Das Webtool ermöglicht

die Analyse von Daten und das Erstellen von Grafiken, ohne die Software selbst herunterladen und installieren zu müssen. Man kann sich einen Überblick über vergangene und aktuelle Bojen verschaffen, Trajektorien aus verschiedenen Gebieten untersuchen und die Daten interaktiv auswerten. Abb. 8 zeigt einen Screenshot des Herzstücks von unserem Webtool. Für verschiedene Bojen können verschiedene Vorhersagen ausgewählt werden (oben links) und visualisiert werden (oben rechts). Die Histogramm-Funktion unten links erlaubt es, die Verteilung verschiedener Metadaten (Initialisierungsdatum und -region, Aktualität der Vorhersagen u.v.m) zu inspizieren. Der Speedangle-Plot (Mitte unten) zeigt, inwiefern die vorhergesagte Trajektorie von der beobachteten bezüglich Distanz und Winkel abweicht und die Grafik unten rechts zeigt den Fehler als Funktion der Tage nach Initialisierung. Die so erzeugten Bilder können direkt heruntergeladen und in Präsentationen, auf Konferenzen oder während Schiffsexpeditionen zur Entscheidungsfindung an Bord genutzt werden. Im Verlauf von SIDFExplore wurde eine studentische Hilfskraft angestellt, die das Webtool überarbeitet, neue Funktionen hinzugefügt und die Rechenzeit deutlich verringert hat.

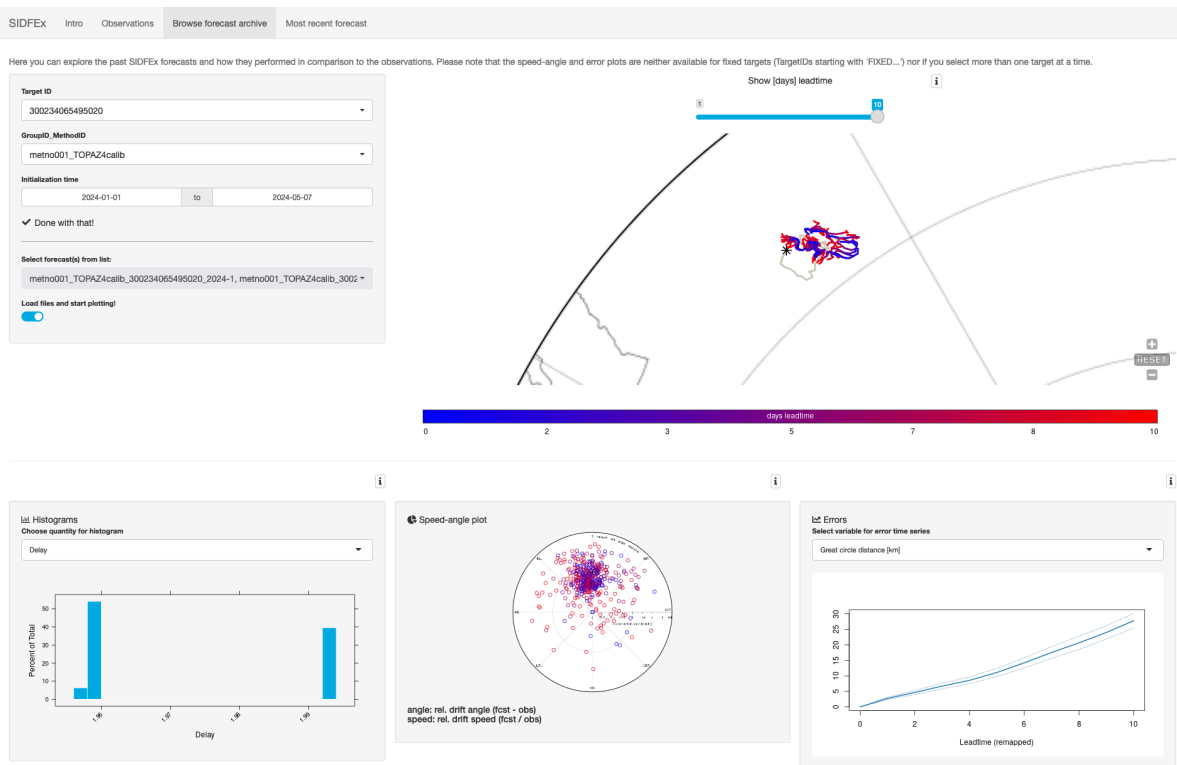


Abb. 8: Screenshot unseres Webtools.

WP 4, D4.3, 11/2021 - 10/2023 (Fortführung)

Ein wichtiger Aspekt von SIDFExplore ist die perspektivische Nutzbarkeit für Partner aus der Industrie. Hierfür arbeiten wir eng mit Drift+Noise zusammen, einem mittelständischen Unternehmen mit acht Angestellten, das sich auf die Unterstützung bei der Planung und Durchführung von Polarexpeditionen spezialisiert hat und aus einem AWI-Projekt hervorging. Die aufsehenerregende erfolgreiche

Suche nach der Endurance (<https://endurance22.org/>) wurde im Jahr 2022 maßgeblich von Drift+Noise mit durchgeführt. Auch im Sommer 2023 haben wir Drift+Noise erfolgreich bei Expeditionen unterstützt. Sie haben wiederholt Interesse geäußert, den Datensatz und die Software zur Echtzeit-Prozessierung weiter zu nutzen. Auf lange Sicht wäre es also denkbar, die Prozessierung von SIDFEx komplett an Drift+Noise zu übertragen, um eine nachhaltige Entwicklung und Nutzung des Datensatzes zu ermöglichen.

Da der Datensatz quasi-operationell produziert wird, ist auch unabhängig von Drift+Noise garantiert, dass er weiter bestehen und wachsen wird. Da die Daten frei verfügbar sind und wir uns von den beiden in Arbeit befindlichen Erstautorenpublikationen einen deutlich erhöhten Bekanntheitsgrad versprechen, sind wir äußerst zuversichtlich, dass SIDFEx auch in Zukunft weiter genutzt werden wird, spätestens wenn die Datensätze auch auf Zenodo veröffentlicht werden. Einige Ideen für Praktika oder Abschlussarbeiten, die sich mit SIDFEx-Daten befassen, existieren bereits. Insgesamt sind wir sehr zuversichtlich, dass wir die zukünftige Nutzbarkeit der SIDFEx-Vorhersagen innerhalb und außerhalb der Wissenschaft durch unsere Arbeit in SIDFExplore sichergestellt haben.

WP 5: Beigestellte Aktivitäten

WP 5, D5.1, 08/2021 - 10/2022 (Ausbringung von Bojen)

Drei GPS-Bojen wurden in 2021 ausgebracht, und drei weitere Bojen wurden bei der Icebird-Kampagne im Sommer 2022 durch Dr. Valentin Ludwig ausgebracht. Die durch Dr. Ludwig ausgebrachten Bojen wurden auch als SIDFEx-Targets aufgenommen, so dass die Nutzbarkeit für SIDFExplore sichergestellt wurde.

WP 5, D5.2, 11/2022 - 04/2023 (Implementierung Advektion in FESOM-Icepack)

Der vorgeschlagene Weg wurde durch eine alternative Arbeit mit gleichem Arbeitsumfang ersetzt, da die ursprüngliche Implementierung der Advektion sich als effizienter herausgestellt hat, als befürchtet.

Die freigewordenen Personenstunden wurden verwendet, um jährlich eine Meereisdrift-Komponente zum "Sea Ice Outlook" beizutragen. Der Sea Ice Outlook ist ein renommiertes internationales Unterfangen, in dem verschiedene Gruppen mehrere Monate im Voraus versuchen, das Minimum der Meereisausdehnung im September vorherzusagen. Wir komplementierten dies, indem wir analysierten, wie gut sich die Position von Bojen über mehrere Monate voraussagen lässt. Während der Großteil der Arbeit in SIDFExplore sich mit Vorhersagen auf kurzen Zeitskalen bis zu 10 Tagen befasste, wurden hier also Vorhersagen für Zeiträume von mehreren Monaten analysiert. Im Gegensatz zu kurzen Zeiträumen, in denen die Drift

hauptsächlich vom Wind dominiert wird, spielen hier Größen wie die Eisdicke eine größere Rolle.

Unsere Ergebnisse haben ergeben, dass die Position der Bojen in ca. 60% der Fälle korrekt vorhergesagt werden kann. Die Vorhersagegüte variierte stark zwischen einzelnen Systemen, Bojen, Regionen und Jahren, ohne dass sich ein eindeutiger Trend feststellen ließ. Die Sea Ice Outlook Berichte sind jeweils online publiziert worden, wobei unserem Beitrag jeweils ein eigenes Kapitel gewidmet ist. Ein Link findet sich in der tabellarischen Darstellung der Veröffentlichungen.

WP5, D5.3, 05/2023 - 10/2023 (Implementierung FESOM-Icepack in AWI-CM3)

2023 wurde sichergestellt, dass der ICEPACK-Code in FESOM2, also der FESOM-Version von AWI-CM3, funktioniert. Damit der Code ebenfalls in der gekoppelten Version mit dynamischer Atmosphäre funktioniert, mussten Anpassungen vorgenommen werden, da das Atmosphärenmodell (OpenIFS) die Berechnung der thermodynamischen Austauschflüsse und des Impulses selbst vornimmt. Um keine Inkonsistenz mit der ICEPACK-Thermodynamik zu erzeugen, musste u.A. die Advektion einer Temperatur der obersten Eis-/Schneesicht berücksichtigt werden. Die Arbeiten konnten weitestgehend erfolgreich umgesetzt werden, sodass AWI-CM3 in Zukunft mit komplexerer Meereis-Thermodynamik benutzt werden kann. Damit sollte auch die Meereisdrift realistischer abgebildet werden können, so dass das AWI realistische Meereisdriftvorhersagen basierend auf dem eigenen Modell erzeugen können wird.

Tabellarische Darstellung

a) Veröffentlichungen (SIDFEx-Autor*innen in **fett**)

Autor*innen	Jahr	Titel	Status
Goessling, Ludwig et al.	2021, 2022, 2023, 2024	SIDFEx-Kapitel im jährlichen Bericht des Sea Ice Prediction Network "Sea Ice Outlook"	Online veröffentlicht https://www.arcus.org/sipn/sea-ice-outlook/2023/post-season
Rabe, Goessling, Ludwig et al.,	2024	The MOSAiC Distributed Network: observing the coupled Arctic system with multidisciplinary, coordinated platforms	Veröffentlicht
Goessling, Ludwig, Reifenberg, Jost et al.	2024	Insights from six years of the international Sea Ice Drift Forecast Experiment	In Arbeit
Ludwig, Goessling et al.	2024	Sea-ice deformation forecasts from the SIDFEx database	In Arbeit

b) Konferenzbeiträge

Erstautor	Titel	Konferenz	Art
H. Goessling	Combining model, satellite and observational data for science and services: The Sea Ice Drift Forecast Experiment	AWI-IUP Uni Bremen Blockseminar, Februar 2022	Vortrag
V. Ludwig	Sea-ice deformation forecasts for the MOSAiC Arctic	EGU 2022	Vortrag

	drift campaign in the SIDFEx database		
H. Goessling	Lessons from the Sea Ice Drift Forecast Experiment	Year Of Polar Prediction (YOPP) Final Summit, Montreal, Kanada, August 2022	Vortrag (online)
H. Goessling	The Sea Ice Drift Forecast Experiment	Ocean Science Meeting, Ocean University of China, November 2022	Vortrag (online)
V. Ludwig	Deformation forecasts for the MOSAiC Distributed Network from the Sea Ice Drift Forecast Experiment (SIDFEx)	MOSAiC-Konferenz 2023	Vortrag
V. Ludwig	The Sea Ice Drift Forecast Experiment (SIDFEx): Introduction and applications	EGU 2023	Poster
V. Ludwig	Sea-ice deformation forecasts and their scale dependence from the Sea Ice Drift Forecast Experiment (SIDFEx)	IGS 2023	Vortrag
V. Ludwig	Deformation forecasts from the Sea Ice Drift Forecast Experiment (SIDFEx)	IICWG-DA 2023	Vortrag

S. Reifenberg	Best of SIDFEx: Highlights and lessons learned from six years of sea-ice drift forecasting	EGU 2024	Poster
---------------	--	----------	--------

c) Abschlussarbeiten

Verfasserin	Betreuer	Titel	Jahr
Antonia Jost, B. Sc.	V. Ludwig	Evaluation of Short-Term Sea Ice Drift Forecasts: Benefits from and Limitations of Subdaily Resolution	2023