

Schlussbericht

des mFUND- Projekts

FAST-CAST2

Schiffsroutenoptimierung in Polargebieten durch KI-basierte
Auswertung von Erdbeobachtungsdaten und Wettermodellprognosen



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurze Darstellung	4
1.1.	Aufgabenstellung	4
1.2.	Voraussetzungen	4
1.3.	Planung und Ablauf	5
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn	6
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2.	Eingehende Darstellung	9
2.1.	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	9
2.1.1.	AP 1 – Projektmanagement und Dissemination	9
2.1.2.	AP 2 – Prozessoptimierung / Weiterentwicklung Routenplanung	10
2.1.3.	AP 3 – Weiterentwicklung Webservice	21
2.1.4.	AP 4 – Parameteridentifikation Schiffsgeschwindigkeit	27
2.1.5.	AP 5 – Prozessoptimierung des Vorhersagetools	36
2.1.6.	AP 6 – Operationalisierung der Eisdriftvorhersagen	42
2.1.7.	AP 7 – Testanwendung und Nutzerinteraktion	44
2.1.8.	AP 8 – Validierung	47
2.1.9.	AP 9 – Detektion von Gefahrenquellen	55
2.1.10.	AP 10 – Ableitung der Bathymetrie, Untiefen und Sichttiefe	57
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	60
2.2.1.	Universität Bremen	60
2.2.2.	Drift+Noise	60
2.2.3.	DLR	60
2.2.4.	EOMAP	60
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit	61
2.3.1.	Universität Bremen	61
2.3.2.	Drift+Noise	61
2.3.3.	DLR	62
2.3.4.	EOMAP	62
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	62
2.5.	Fortschritt bei anderen Stellen	63
2.6.	Veröffentlichungen	65
2.6.1.	Öffentliche Vorträge	65

2.6.2. Poster	66
2.6.3. Paper.....	67
2.6.4. Newsartikel und Pressemitteilungen.....	67
Abbildungsverzeichnis	68
Literaturverzeichnis	69

1. Kurze Darstellung

1.1. Aufgabenstellung

Aufgrund des Klimawandels geht das Meereis in der Arktis immer weiter zurück. Dies begünstigt eine stärkere wirtschaftliche Nutzung der Region durch die Zunahme von Handelsschifffahrt, Rohstoffabbau, Fischerei und Tourismus. Aber auch für die Forschung, wie z.B. Für den deutschen Eisbrecher Polarstern, ist die Arktis von großem Interesse.

Trotzdem ist die Schifffahrt in den Polargebieten eine große Herausforderung, denn sie ist besonderen Risiken ausgesetzt. Neben Packeis und Eisbergen ist die ungenau kartierte Meerestiefe eine zusätzliche Unsicherheit.

Das Projekt FAST-CAST2 zielt darauf ab, diese Risiken zu reduzieren, indem es alle nötigen Informationen, wie die aktuelle Eissituation oder Seetiefen, zusammenführt. Das Framework soll daraus auf Anfrage automatisch eine Routenempfehlung generieren.

1.2. Voraussetzungen

Das Projekt wurde durch ein Konsortium aus vier Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft bearbeitet: die Arbeitsgruppe Optimierung und Optimale Steuerung der Universität Bremen (UniHB), der DLR Forschungsstelle für Maritime Sicherheit (DLR), die Drift Noise GmbH (DNPS) und die EOMAP GmbH & Co KG (EOMAP). FAST-CAST2 baut direkt auf den Ergebnissen des Projektes [FAST-CAST](#) auf. Es geht einige Schritte über eine reine Darstellung von operationellen Eisdriftvorhersagen hinaus, indem es zum Ziel hat, im Ergebnis vollautomatisch konkrete Routenempfehlungen für Schiffe berechnen zu können. Hierfür baut das Projekt auch auf den Ergebnissen der im Juni 2021 ausgelaufenen BMWi-geförderten Machbarkeitsstudie MAP-BORealis auf, welche von UniHB, DLR und DNPS gemeinsam bearbeitet wurde. Diese hat erste Grundsteine zu einer operationellen Routenempfehlung im Eis gelegt. Dabei wurde deutlich, dass in den möglichen Projektgebieten neben Eis auch die Bathymetrie berücksichtigt werden muss. Erste Erfahrungen der Bestimmung von Bathymetrie in den Polargebieten wurden im vom BMWi-geförderten Forschungsprojekt MARSAT gesammelt. Daher ist der dafür zuständige MARSAT-Partner EOMAP dem FAST-CAST2 Konsortium beigetreten.

Die Arbeitsgruppe Optimierung und Optimale Steuerung des Zentrums für Industriemathematik (ZeTeM) betreibt interdisziplinäre Forschung im Bereich der Optimierung nichtlinearer Prozesse und der optimalen Steuerung und Regelung dynamischer Systeme. Die AG kann auf umfangreiche Softwarelösungen zur Optimierung von Realanwendungen zurückgreifen. UniHB übernahm, wie schon für das Projekt MAP-BORealis die Koordination und war verantwortlich für Entwicklung der KI-Algorithmen und der Routenoptimierung .

DNPS ist eine Ausgründung des Alfred-Wegener-Institutes, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI) mit Sitz in Bremen. Neben dem Eisinformationsdienst IcySea

bietet DNPS weitreichende Beratungsdienste in den Polargebieten an und erstellt Softwarelösungen im Bereich Geodatenintegration und Nutzung. Zu den Kunden von DNPS gehören staatliche Institutionen, Firmen aus dem Bereich der Expeditionskreuzfahrt und Lotsen für Fahrten in eisbedeckten Gebieten. Innerhalb FAST-CAST2 übernimmt DNPS die Integration der Ergebnisse in eine nutzerfreundliche App, das Management der Kontakte zu und des Feedbacks von den Nutzern und die Implementation der Operationalisierung der Eisdriftvorhersagen für das Projektgebiet.

Die DLR - Forschungsstelle Maritime Sicherheit (FMS) in Bremen ist Teil des Earth Observation Center (EOC) im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Ihr Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung operationeller Algorithmen zur Untersuchung der Meere mittels Satellitendaten. Im Forschungsbereich Meereis ist die Gruppe seit vielen Jahren aktiv und hat u.a. KI-basierte Algorithmen zur Eisklassifizierung und Methoden zur Bestimmung der Eisdrift entwickelt. Im Projekt ist das DLR zuständig für Eisdrift-Validierung und Gefahrendetektion.

EOMAP ist ein Dienstleister für Industrie und Behörden im Bereich der aquatischen Erdbeobachtung. Aus dem Hauptsitz des Unternehmens in Seefeld, Bayern, bedient EOMAP Kunden weltweit. Kernprodukte sind der Bereich der Wassertiefenvermessung mittels optischer Satellitendaten (bekannt als Satellite-Derived Bathymetry), das Monitoring von Wasserqualität und die Softwareentwicklung im genannten Kernbereich. EOMAP ist im Projekt hauptsächlich für die Auswertung und Analyse von Satellitendaten zur Bestimmung der Bathymetrie und der damit verbundenen IT-Infrastruktur zuständig.

1.3. Planung und Ablauf

Das Projekt wurde in 10 Arbeitspaketen geplant, in denen parallel an den einzelnen Komponenten des Frameworks gearbeitet wurde. Speziell in AP 3 wurden diese Komponenten zusammengeführt. Dazu wurden frühzeitig Schnittstellen zwischen den Partnern definiert, um eine reibungslose Datenübertragung zu ermöglichen. Das Projekt startete im November 2021 mit einer geplanten Projektlaufzeit von 3 Jahren. Es wurde für die Konsortialpartner DLR und Universität Bremen um 6 Monate kostenneutral bis Ende April 2025 verlängert.

Gleich zu Beginn des Projektes wurden Kriterien aufgestellt, um anschließend ein geeignetes Projektgebiet zu definieren. In diesem Gebiet wurde im März/April 2024 ein erster Test des Frameworks durchgeführt. Da zu diesem Zeitpunkt noch nicht alle Komponenten fertig gestellt waren, konzentrierte sich dieser Test auf statische Eisbedingungen und die Berücksichtigung der Bathymetrie. Erstes Nutzerfeedback wurde im Anschluss bei den Weiterentwicklungen berücksichtigt. Im Folgenden wurde auch die Software-Komponente zur Eisdriftvorhersage in das Framework integriert. Ein zweiter Test im September 2024 fokussierte sich dann auf die Routenberechnung unter Berücksichtigung der Eisdrift. Am Ende des Projektes wurden einzelne Komponenten, wie das Modul zur Bestimmung der Schiffsgeschwindigkeiten, weiterentwickelt und verfeinert.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand zu Beginn

Routenberechnungen

Routenberechnungen werden aktuell ausschließlich in eisfreien Meeren kommerziell angeboten. Studien wie z.B. [Lehtola et al. 2019](#) oder [Reimer et al. 2015](#) kamen zu dem Schluss, dass für Routenempfehlungen bei taktischer Navigation im Eis sehr hochauflösende und zeitnahe Erdbeobachtungsdaten und eine akkurate Eisdriftprognose unerlässlich sind.

Fernerkundung von Meereis mit SAR

SAR-Satellitenbilder sind als operationelle Eisinformationsquelle etabliert ([Shokr und Sinha 2015](#)). Verschiedene Eistypen und vor allem offenes Wasser haben signifikant andere Radarrückstreuungseigenschaften. Daher bilden sich auf den Radarbildern die Strukturen der Eisdecke, z.B. einzelne Eisschollen oder sogar einzelne Eisrücken, gut ab.

Meereisdriftvorhersagen

Für die Arktis gibt es zurzeit zwei operationelle Modelle, die tagesaktuelle Eisdriftprognosen zur Verfügung stellen: TOPAZ-4 ([Sakov et al. 2012](#)) und neXtSIM ([Rampal et al. 2016](#)). In FAST-CAST konnte gezeigt werden, dass es außerdem möglich ist, Kurzprognosen der Eisdrift von etwa 48 Stunden aus globalen Windvorhersagen, z.B. aus dem ICON Modell, abzuschätzen.

Ableitung der Wassertiefen und Erkennung von Untiefen

Die Analyse von Wassertiefen mittels optischer Satellitendaten ist ein - in mittleren und tropischen Breiten - bereits häufig verwendetes Verfahren ([Siemann et al. 2014](#)). Die Auswertung der Daten für höhere Breiten ist jedoch noch in den Kinderschuhen und bedarf weiterer systematischer Analyse der Validierung und der Optimierung zur Auswertung. Hierbei spielt auch der relativ neue ICESat-2-Satellit mit dem Lidar-Sensor ATLAS eine wichtige Rolle. Mittels Auswertung der Photonen kann eine Ableitung der Wassertiefe punktuell erfolgen ([Parrish et al. 2019](#)). Auch hierfür gibt es derzeit in höheren Breiten keine ausreichenden Untersuchungen. Dass diese Gewässer außerhalb der gängigen Seewege nur unzureichend vermessen sind, verdeutlicht den Bedarf für die geplanten Untersuchungen.

Studien zur Einschätzung der nördlichen Seewege

Die Länge des befahrbaren Zeitfensters der nördlichen Seewege hat sich seit den 70er Jahren um 1 - 3 Monate verlängert ([Melia et al. 2017](#)). Zurzeit ist die Anzahl der Transits noch gering, aber es werden Frachtvolumen von 101 Mio. Tonnen bis 2030 über die Nordostpassage prognostiziert, bis 2050 bis zu 441 Mio. Tonnen ([Leypoldt 2009](#)) (zum Vergleich: den Suezkanal passierten 2011 929 Mio. Tonnen Ladung).

Maschinelles Lernen und paralleles Rechnen

In den letzten Jahren wurden enorme Fortschritte im Bereich des maschinellen Lernens (z. B. Deep-Learning mit Neuronalen Netzen) sowie in der fortschreitenden Entwicklung von leistungsstarken, effizienten und massiv-parallelen Grafikkarten-Rechnern erzielt, s.a. Chollet 2018 und Goodfellow 2016. Durch Deep-Learning-Ansätze lassen sich sehr effiziente und schnelle Ersatzmodelle für komplexe Algorithmen unter Verwendung des Überwachten Lernens mit Hilfe von Eingabe- und Ausgabedaten finden. Für das Training dieser schnellen und genauen Ersatzmodelle werden große Datenmengen und effiziente und massiv-parallele Algorithmen benötigt.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Thomas Bøggild, Qualitätsmanager und lizenziierter Eispilot bei DanPilot Greenland (<https://danpilot.dk>) wurde bereits zu Beginn des Projektes involviert, um über die potentielle Testregion Rifkol Auskunft zu geben. Als lizenziierter Eispilot ist er selbst regelmäßig auf Schiffen entlang der Küsten Grönlands unterwegs und hat Einsicht in die logistischen Abläufe und navigatorischen Herausforderungen in der Region. Er hielt einen aufschlussreichen Vortrag, der dazu beitrug, dass die Rifkolregion als primäre Testregion für FAST-CAST2 ausgewählt wurde. Im weiteren Verlauf stellte er den Kontakt zu Anders Bay Larsen von Royal Arctic Line her, welcher die Testfahrt auf der Irena Arctica ermöglichte.

Für die Auswahl einer geeigneten Testregion wurden zusätzliche Personen und Stellen kontaktiert, die ihre Einschätzungen zu den jeweiligen möglichen Testregionen abgaben. Dazu gehörten: Christine Wesche (AWI), Marcel Pera (BigLift Shipping), Jan Lieser (Australian Antarctic Program) und Freddie Ligthelm (Master Mariner). Drift+Noise pflegt eine enge Verbindung zum AWI und arbeitet auch im Rahmen von Datenlieferungen und Beratungsarbeiten regelmäßig mit den Besatzungen der FS Polarstern und den relevanten Personen in der AWI Logistik zusammen. Über diese Verbindung ergab sich für den Drift+Noise Mitarbeiter Jonathan Bahlmann die Möglichkeit an der PS144 Expedition (ArcWatch II) teilzunehmen. Im Rahmen dieser Teilnahme konnte im Herbst 2024 ein zweiter FAST-CAST2 Routentest vorgenommen werden. Für die erfolgreiche Durchführung möchten wir der Besatzung der FS Polarstern und besonders dem Kapitän, seinen Offizieren, dem IT-Administrator Andreas Winter und dem wissenschaftlichen Fahrtleiter Benjamin Rabe herzlich für die Unterstützung danken.

Die Zusammenarbeit mit Anders Bay Larsen, Chief Fleet Manager bei Royal Arctic Line (<https://www.royalarcticline.com>) war besonders wichtig für die Durchführung des ersten Routentests auf dem Versorgungsschiff Irena Arctica. Entlang der grönländischen Westküste (Rifkol) konnten die Drift+Noise Mitarbeiter Henning Weidenhöfer und H. Jakob Bünger an Bord der Irena Arctica vom 28.03. - 05.04.2024 erste errechnete und vom Team im Backoffice übermittelten FAST-CAST2-Routen testen. Die Einschätzungen der Routenvorschläge von Kapitän Poul Jensen und seinem Brückenteam waren nicht nur elementar wichtig für die weitere Entwicklung der in FAST-CAST2 entwickelten Algorithmen, sondern flossen auch direkt in die Vorbereitung und Durchführung des Tests auf der FS

Polarstern im Herbst 2024 ein. Vielen Dank an Anders Bay Larsen, Poul Jensen und Royal Arctic Line dafür, dass sie uns diese einmalige Mitfahrt ermöglicht und damit das FAST-CAST2 Projekt entscheidend vorangebracht haben.

Im September 2022 fand ein Austausch mit Maria Fox vom British Antarctic Survey statt, die ebenfalls an Algorithmen zur Verbesserung der Routenplanung im Meereis arbeitet. Sie hielt dabei einen Vortrag mit dem Titel „AI for Polar Route and Mission Planning“ für das Konsortium mit anschließender Diskussion.

Darüber hinaus wurde das Projekt bei stormGeo, einem Unternehmen, das unter anderem kommerzielle Routenplanung-Software im Zusammenhang mit Wetterereignissen anbietet, vorgestellt und diskutiert. Im Anschluss wurde die Nutzung der Routendaten des s-Planners, einer Anwendung von stormGeo, im Rahmen der Entwicklungen in FAST-CAST2 für die FS Polarstern unter Zustimmung der Reederei Laeisz ermöglicht.

Ein weiterer fachlicher Austausch fand mit Dr. Luisa von Albedyll (Alfred Wegener Institut) zum Thema Meereisdeformation und Lead-Detektion statt. Dabei wurde insbesondere die mögliche Verwendung zusätzlicher Daten in der Routenplanung diskutiert.

Das Projekt wurde zudem von der Universität Bremen an der Aalto Universität vorgestellt, wodurch im Anschluss eine gemeinsame Projektidee entstand ([siehe 2.4.](#)).

Mit dem mFUND-Projekt EisKlass2, mit dem sich FAST-CAST2 zwei Projektpartner teilt, bestand während der Laufzeit von EisKlass2 in der ersten Projektphase Austausch, insbesondere, da die in EisKlass2 entwickelte bzw. verbesserte SAR-Meereisklassifikation auch hier im Projekt verwendet wurde.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

2.1.1. AP 1 – Projektmanagement und Dissemination

2.1.1.1. *Projektkoordination*

Der Fortschritt des gesamten Vorhabens wurde regelmäßig geprüft. Es wurden monatliche Besprechungen organisiert und koordiniert. Der Fortschritt einzelner Arbeitspakete wurde regelmäßig dokumentiert und im Rahmen von Besprechungen ausgetauscht. Es wurde gemeinsam diskutiert und Pläne für die weitere Umsetzung wurden erarbeitet. Protokolle dieser Besprechungen wurden den Konsortialpartnern bereitgestellt. Zudem wurden weitere Besprechungen, wie z.B. ein zweitägiger interner Workshop, das Kick-Off-Treffen und ein Abschlusstreffen organisiert und durchgeführt. Es wurde eine Risikobewertungstabelle und ein Maßnahmenkatalog für identifizierte Risiken erstellt. Die realen Kosten des Projekts wurden regelmäßig abgeglichen.

2.1.1.2. *Öffentlichkeits- und Vernetzungsarbeit*

Auf der Seite des ZeTeM wurde eine [Projektwebsite](#) eingerichtet und für die Website des BMVI wurde ein [Projektsteckbrief](#) angefertigt. Eine [Presseerklärung](#) wurde auf der Homepage der Universität Bremen veröffentlicht. Zudem wurden zwei Beiträge zu DLR-News veröffentlicht.

Regelmäßig wurde Präsentationsmaterial für die Vorstellung des Projektfortschritts regelmäßig vorbereitet. Das Projekt wurde auf mehreren nationalen und internationalen Konferenzen präsentiert (siehe [2.6.](#)).

Im Rahmen der Vernetzungsarbeit wurde das Projekt mit mehreren Stellen diskutiert (siehe [1.6.](#)). Im Rahmen der mFund-Begleitforschung wurde an mehreren Abschlussveranstaltungen anderer Projekte teilgenommen und das Projekt wurde im Rahmen eines Driven by Data Workshops präsentiert. Darüber hinaus wurde wiederholt an der mFund-Konferenz teilgenommen, 2024 auch mit einem Beitrag zur Vorstellung des Projektes.

Das Projekt wurde im Rahmen mehrerer Veranstaltungen der breiten Öffentlichkeit präsentiert:

- Nationale Maritime Konferenz
- Forschungsmeile der Maritimen Woche Bremen
- Explore Science Bremen
- Diskussion und Promotion des Projekts an EOMAPs Stand auf der Canadian Hydrographic Conference, Neufundland, Mai 2024
- Vorstellung des Projekts durch EOMAP bei JALBTCX (Joint Airborne Lidar Bathymetry Technical Center of Expertise) im Rahmen der geplanten Alaska-Kartierung

2.1.2. AP 2 – Prozessoptimierung / Weiterentwicklung Routenplanung

In der Machbarkeitsstudie MAP-BORealis, welche diesem Projekt voranging, wurde ein Tool zur automatischen Routenberechnung unter Berücksichtigung von Sentinel-1 basierten Meereisklassifikationen entwickelt. Allerdings hatte diese erste Version einige Schwächen, vor allem hinsichtlich der Berechnungszeit. Es stellte sich heraus, dass die verwendete Implementation komplexeren Situationen und größeren Distanzen nicht gewappnet war. Die Berechnung dauerte entweder sehr lange oder war aufgrund überlaufenden Speichers gar nicht möglich. Weiterhin wurde in MAP-BORealis lediglich die Meereisklassifikation berücksichtigt. In diesem Arbeitspaket sollte das Tool nun weiterentwickelt werden, sodass auch andere wichtige Faktoren, wie Gefahrenstellen und Meerestiefen in die Routenberechnung einfließen können.

2.1.2.1. Laufzeitorientierung

Im Vorgängerprojekt MAP-BORealis wurde ein Tool entwickelt, welches aus einer Zeitreihe von klassifizierten Sentinel-1 Bildern eine Zeit-optimale Route zwischen zwei gegebenen Koordinaten berechnet. Dazu wurde ein angepasster A*-Algorithmus verwendet, der in der Lage war, sowohl die räumlichen als auch die zeitlichen Informationen zu verarbeiten. Der Algorithmus hatte allerdings insbesondere bei längeren Distanzen zwischen Start und Ziel enorme Schwächen, die den Nutzen stark einschränkten. So dauerte die Routenberechnung extrem lange oder war ab einer bestimmten Distanz oder Komplexität schlichtweg unmöglich. Um diese Probleme zu beheben, wurden in FAST-CAST 2 verschiedene Ansätze untersucht.

Implementierung

Zunächst wurden Schwächen in der Implementierung gesucht, da vermutet wurde, dass darin ein großes Potenzial liegt. Dabei wurde festgestellt, dass der vorhandene Code schwer wartbar und schwer austauschbar war. Da im weiteren Verlauf auch verschiedene Algorithmen untersucht werden sollten, entschieden wir die Implementierung direkt neu aufzubauen. Hierbei wurde großer Wert auf Effizienz und Wartbarkeit gelegt. Die modulare Architektur ermöglicht nun einen vergleichsweise einfachen Austausch einzelner Komponenten, wie z.B. der Zielfunktion. Auf diese Weise sind nun Routenberechnungen möglich, die zuvor aufgrund zu großer Rechenkapazitäten nicht durchführbar waren. In Vergleichsrechnungen wurde eine Ersparnis der Rechenzeit von bis zu 87% erzielt.

Pathfinding-Algorithmus

Ein weiterer Ansatzpunkt ist die Wahl des Algorithmus, der zur Routenoptimierung verwendet wird. Graphen-basierte Ansätze wie der A*-Algorithmus sind im Bereich Pathfinding weit verbreitet und bewährt und wurden bereits in MAP-BORealis verwendet. Er berechnet den kürzesten Pfad in einem Graphen basierend auf dem Best-First-Prinzip. Die Knoten des Graphen sind dabei in unserem Fall Koordinaten in Raum (und ggf. Zeit), die Kantengewichte Kosten um von einem Knoten zum anderen zu gelangen. Diese Kosten könnten verschiedene Faktoren enthalten, wurden zunächst jedoch auf die Reisezeit reduziert. Der A*-Algorithmus entwickelt den Graphen ausgehend vom Startknoten iterativ, indem immer

der jeweils kostengünstigste Knoten betrachtet wird. Für jeden seiner Nachbarn x wird das Kantengewicht bestimmt, welches aus zwei Komponenten besteht: den tatsächlichen Kosten um diesen Knoten vom Startknoten aus zu erreichen ($g(x)$) und den geschätzten Kosten, die benötigt werden um von dort aus den Zielknoten zu erreichen ($h(x)$):

$$f(x) = g(x) + h(x)$$

Die zweite Komponente basiert auf einer Heuristik, die nur dann zulässig ist, wenn sie die Kosten für einen Knoten niemals überschätzt. Dies ist die notwendige Optimalitätsbedingung für den klassischen A*-Algorithmus. Im konkreten Anwendungsfall wurden die verbleibenden Kosten unter der Annahme einer Fahrt auf der Luftlinie zur Zielkoordinate durch offenes Wasser berechnet.

Zunächst wurde erneut der A*-Algorithmus in seiner klassischen Form implementiert und dieser dann Schritt für Schritt weiterentwickelt. Im ersten Entwicklungsschritt wurde der gewichtete A*-Algorithmus implementiert (Weighted A*, WA*). Für diesen wird der Anteil der Heuristik an den Gesamtkosten durch einen Faktor verstärkt:

$$f(x) = g(x) + w h(x), w \geq 1$$

Dies sorgt für eine schnellere Konvergenz zum Ziel und damit eine reduzierte Laufzeit, macht die Heuristik jedoch unzulässig. Der gewichtete A*-Algorithmus liefert daher nicht notwendig die optimale Lösung. Es kann gezeigt werden, dass die Kosten der berechneten Route maximal w -mal höher sind als die einer optimalen Route. Um bei einer Anfrage möglichst schnell eine Routenempfehlung geben zu können, kann dieser Algorithmus nach unserer Einschätzung durchaus geeignet sein.

Um dem Nutzer jedoch auch die Möglichkeit zu geben etwas länger auf eine bessere Empfehlung zu warten, wurde ein weiterer Ansatz implementiert: der Anytime Repairing A*-Algorithmus (ARA*, Likhachev et al. 2005).

Der ARA* berechnet zunächst eine suboptimale Route, sucht dann jedoch weiter nach besseren Lösungen. Er garantiert zudem die Optimalität der letzten Lösung und kann eine Abschätzung der Lösungsqualität bieten. Dieser Algorithmus wurde zunächst für das statische Problem (ohne Meereisdrift) implementiert, um seine Eignung zu untersuchen.

Während der Routenberechnung mit ARA* wird das verwendete Gewicht mehrmals angepasst. Dabei kann es passieren, dass Knoten wiederholt besucht werden. In diesem Fall werden sie nicht sofort für eine erneute Untersuchung vorgemerkt, sondern zunächst auf eine Warteliste gesetzt. Erst wenn alle anderen Knoten abgearbeitet wurden, wird mit der Untersuchung der Knoten aus dieser zweiten Warteliste begonnen. Dabei werden für jede Position immer nur die günstigsten Knoten herangezogen, wodurch die Menge an zu untersuchenden Knoten reduziert wird. Des weiteren können auch alle Knoten, die teurer sind als die bereits gefundene suboptimale Route, sofort ignoriert werden.

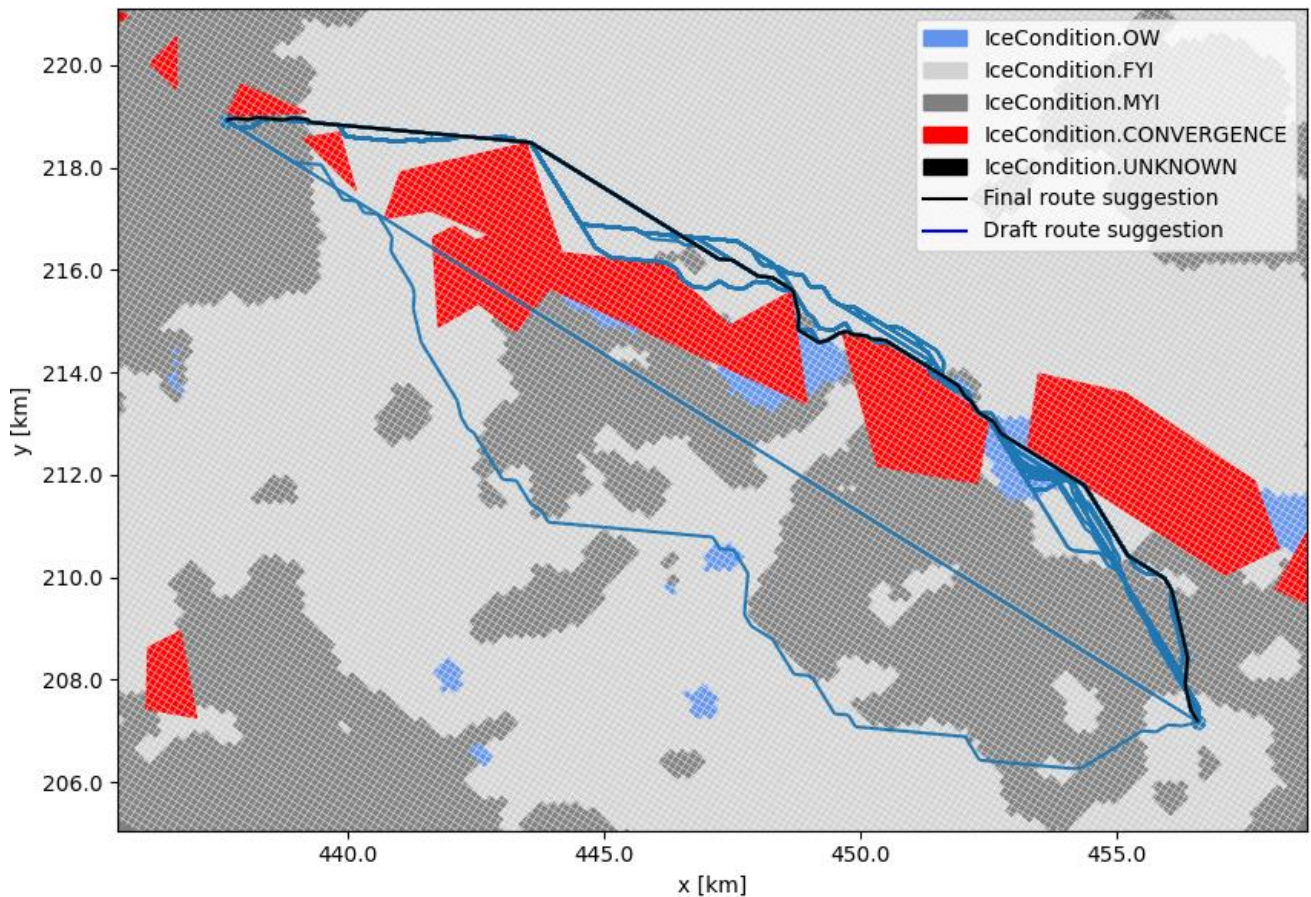


Abbildung 1: Mit ARA* berechnete Routen-Vorschläge für eine Strecke von 22 km (Luftlinie). Die sub-optimalen „draft“ Lösungen sind blau und die finale Lösung ist schwarz dargestellt. Die verschiedenen Eis-Bedingungen sind farblich codiert (OW: Wasser, FYI: Einjähriges Eis, MYI: Mehrjähriges Eis, CONVERGENCE: Gefahrenzone mit erhöhtem Risiko).

In verschiedenen Tests zeigte sich, dass der ARA* gegenüber dem A* und WA* noch weitere Vorteile mit sich bringt. So konnte durch die Änderung des Gewichtungsfaktors sowie die Warteliste vermieden werden, dass sich der Algorithmus in einer komplexen Situation festsetzt. Durch Nutzung der Warteliste wird dabei vermieden, dass Knoten während einer Iteration mehrfach betrachtet werden und erst nach Betrachtung aller anderen Knoten wieder aufgegriffen werden.

Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse wurden weitere Anstrengungen angestellt den ARA* für den dynamischen Fall weiterzuentwickeln. Dazu wurde die interne Datenhaltung so erweitert, dass nicht nur ein Layer (Eisbedingungen für einen Zeitpunkt) sondern mehrere Layer (für je einen Zeitpunkt) vorgehalten werden. Der Algorithmus bestimmt dann die Eisbedingung für einen Ort anhand der Position und der seit dem Start vergangenen Zeit. Das funktioniert ohne weitere Änderungen am Algorithmus, solange vor allem die Reisezeit minimiert werden soll, da dadurch an jedem Knoten immer nur die beste Lösung berücksichtigt werden muss. Das Schiff fährt dabei immer mit der für einen Eistyp maximal zulässigen bzw. möglichen Geschwindigkeit. Um z.B. eine Treibstoff sparende Route zu finden, bei der das Schiff absichtlich langsamer fährt als es könnte und dabei womöglich eine spätere Ankunft in Kauf nimmt, ist nicht ohne weiteres möglich. Es müssten dazu auch

Lösungen mit höheren Kosten an einem Knoten berücksichtigt werden. Dies führt dazu, dass der Algorithmus eine extrem große Anzahl an Kombinationen evaluieren müsste, bevor eine Lösung gefunden wird. Auch Versuche die Anzahl an Kombinationen zu verringern, indem z.B. Änderung der Geschwindigkeit nur in gewissen Situationen zugelassen werden, führten hier bislang nicht zum Erfolg. Es muss geprüft werden, ob der hier verwendete Algorithmus für diese erweiterte Problemstellung geeignet ist, oder ob auf andere Methoden zurückgegriffen werden muss.

Eingrenzung des Suchraums

Eine weitere Möglichkeit die Laufzeit eines Routing-Algorithmus zu reduzieren ist die Eingrenzung des Suchraums, also eine Reduzierung der Knoten des Graphen. Dies kann auf verschiedenen Wegen geschehen. Die einfachste Möglichkeit stellt eine Reduzierung der Auflösung der Eingabedaten dar, wodurch für die gleiche Fläche automatisch weniger Knoten benötigt werden. Dies bedeutet jedoch auch den Verlust von Genauigkeit, da kleinere Features, wie relativ schmale offene Rinnen im Eis, verloren gehen können. Gerade diese werden aber für die Navigation dringend benötigt. Es bedarf also einer fortschrittlicheren Methode, die zwar die Anzahl der Knoten reduziert, aber wichtige Features dabei nicht verliert. Wir haben zwei verschiedene Ansätze untersucht:

Road Mapping

Beim Road Mapping wird der Such-Graph nicht iterativ während der Routenberechnung, sondern bereits vorab generiert. Dieser soll vor allem relevante Gebiete mit vielen unterschiedlichen Eistypen oder Hindernissen detailliert abbilden und dort eine gezielte Navigation ermöglichen. Weniger relevante, z.B. große homogene Gebiete, deren Passage trivial ist, sollen weniger detailliert repräsentiert sein. In allen betrachteten Szenarien war die Anzahl der Knoten eines solchen Graphen mit adaptivem Gitter im Vergleich zu einem Graphen für ein nicht-adaptives Gitter stark reduziert. Dies hat einen direkten Einfluss auf die Laufzeit, da mit der Anzahl der Knoten die Anzahl möglicher Pfade und dadurch der Aufwand reduziert wird. Es ist jedoch festzuhalten, dass dies auf Kosten der Anpassung der Route an die Gegebenheiten passiert, was die Qualität der Lösung beeinträchtigt.

Hier wurde eine verhältnismäßig einfache Methode zum Aufbau des Graphen verwendet: Entlang der Übergänge zwischen verschiedenen Eistypen wurden Punkte erfasst, für welche im nächsten Schritt ein Voronoi-Diagramm berechnet wurde. Start- und Zielpunkt wurden eingefügt, indem sie mit den räumlich nächstgelegenen Knoten verbunden wurden. Im Anschluss können die Kanten dieses Diagramms für die Routenberechnung verwendet werden.

Abbildung 2 zeigt einen für das bereits oben genutzte Szenario generierten Graphen und die darauf berechneten Routen-Vorschläge. Ein Vergleich von unterschiedlichen (finalen) Lösungen findet anhand der Abbildung 4 und Abbildung 5 im weiteren Verlauf statt. An dieser Stelle sei vor allem auf die bereits beschriebene unterschiedlich detaillierte Abdeckung homogener und inhomogener Gebiete hingewiesen. Dies führt dazu, dass eine Passage nördlich der Gefahrenbereiche (in der Abbildung rot dargestellt) mit größeren Umwegen

verbunden ist und daher vom Algorithmus nicht in Betracht gezogen wird. Vorteilhaft ist der Voronoi-Graph jedoch, wenn es um die Navigation innerhalb von kleineren, langgezogenen Gebieten wie Leads (offenes Wasser) geht, da diese meist durch Kanten in der Mitte (mit gleichem Abstand zu den Rändern) repräsentiert werden.

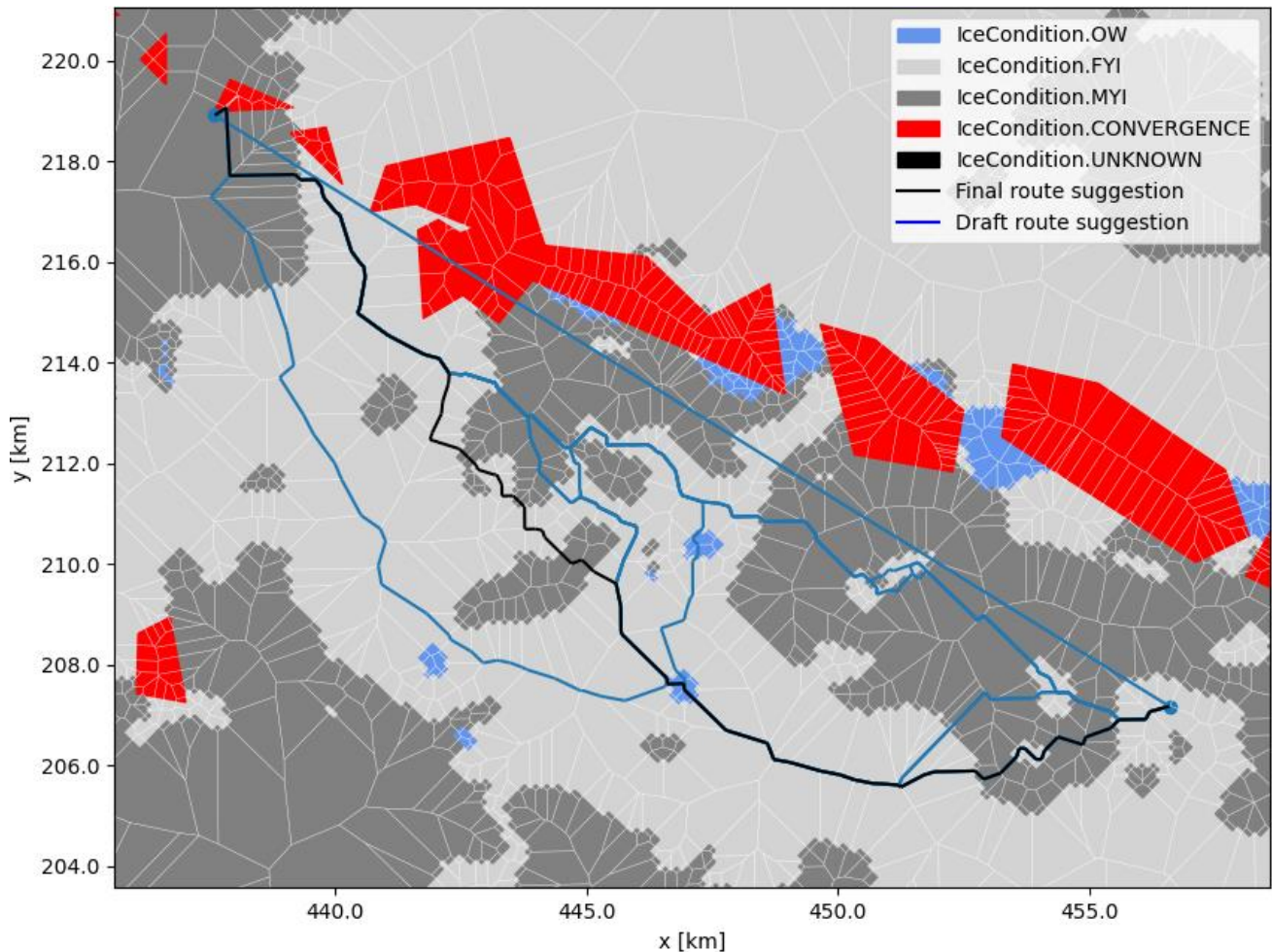


Abbildung 2: Routenvorschläge auf Basis eines bereits vorab generierten Graphen (weiße Linien). Auch hier wurden mittels des ARA* mehrere Routen gefunden. Die blau dargestellten Routen sind vorläufig, die schwarz dargestellte Route ist die finale Route. Beispielsweise an den Rändern der Konvergenz-Zonen (rot) wird ein Nachteil des zur Generierung des Graphen verwendeten Algorithmus deutlich: Das Gebiet kann nicht direkt (nahe) an den Gebietsgrenzen entlang umfahren werden, sondern es sind größere Umwege in Kauf zu nehmen.

Bewegungsmuster

Der klassische A*-Algorithmus entwickelt in jedem Schritt die Nachbarn eines Knoten und fügt sie dem Graphen hinzu. Von entscheidender Bedeutung für die Größe des Graphen ist also wie diese Nachbarn definiert werden. Bei Gitter-basierten Eingabedaten können dafür verschiedene Bewegungsmuster gewählt werden, die sich in ihrer Komplexität deutlich unterscheiden. Die derzeitige Implementierung unterstützt dabei drei verschiedene Bewegungsmuster auf einem rechtwinkligen Gitter („cross“, „spider-knight“ und „many-angle“), sowie ein Bewegungsmuster auf einem hexagonalen Gitter liefert eine Visualisierung dieser Bewegungsoptionen. Bei der hexagonalen Strategie liegt dabei zwischen allen Richtungen der gleiche Winkel vor und auch die Schrittlängen sind gleich. Dies ist zwar auch

bei der cross-Strategie der Fall, jedoch für eine geringere Anzahl an Bewegungsoptionen. Mit 54 Optionen erlaubt die many-angle Strategie (Guinness et. al., 2014) die beste Anpassung des Kurses an die Gegebenheiten.

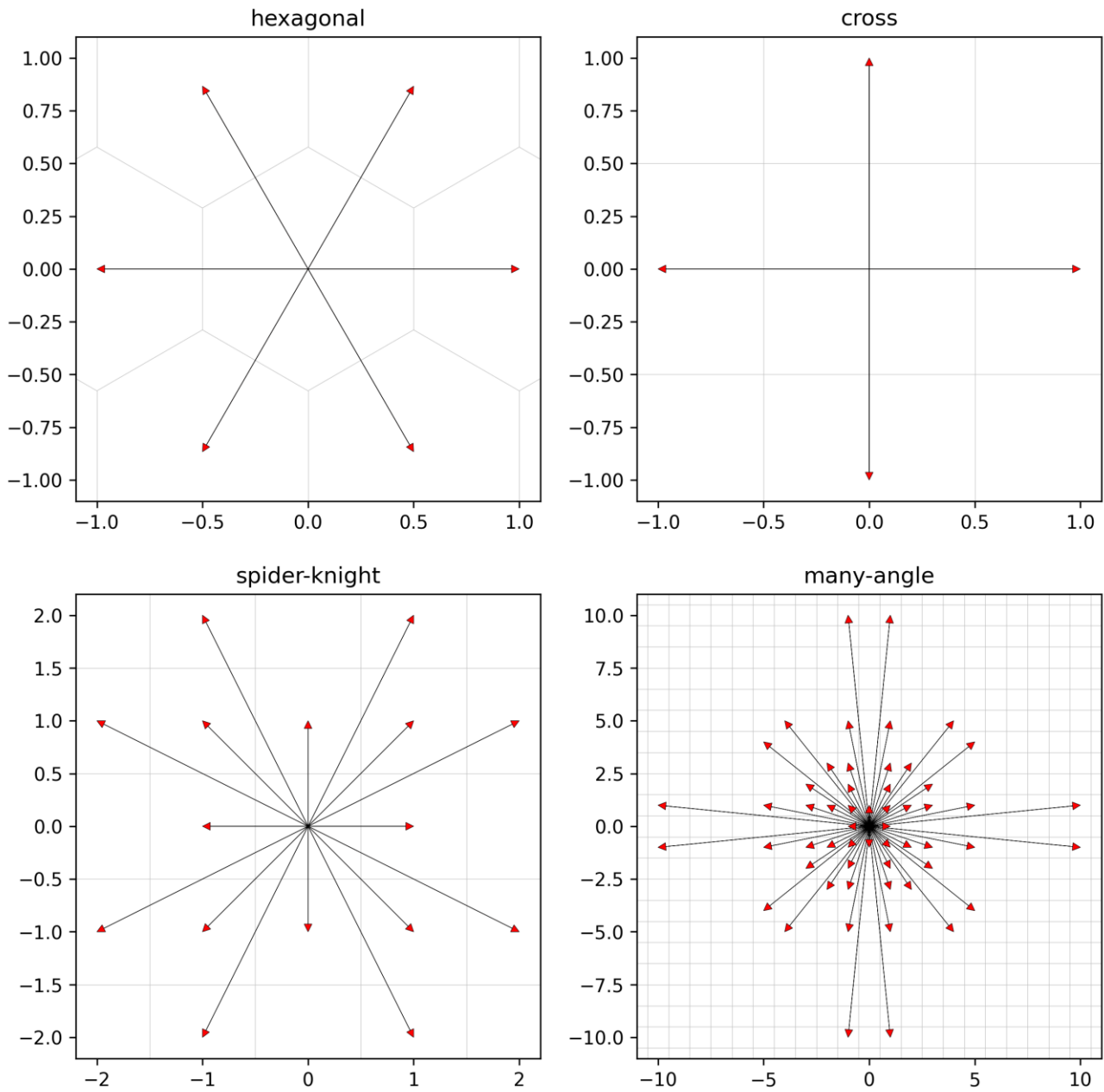


Abbildung 3: Zum Anfahren des nächsten Wegpunktes vom aktuellen Wegpunkt (Koordinaten-Ursprung) aus werden je nach gewählter Strategie unterschiedlich viele Manöver angeboten.

Einfache Bewegungsmuster haben dabei den Vorteil, dass dem Graphen deutlich weniger Knoten hinzugefügt werden. Allerdings schränken sie die Bewegungsmöglichkeiten des Schiffes auch stark ein. Dies kann dazu führen, dass die gefundene Route Artefakte aufgrund des gewählten Bewegungsmusters aufweist. Der A*-Algorithmus garantiert zwar die

Optimalität der gefundenen Route, jedoch nur für den ihm zugrunde liegenden Graphen. Die Qualität der Lösung hängt somit auch maßgeblich von dem gewählten Bewegungsmuster ab.

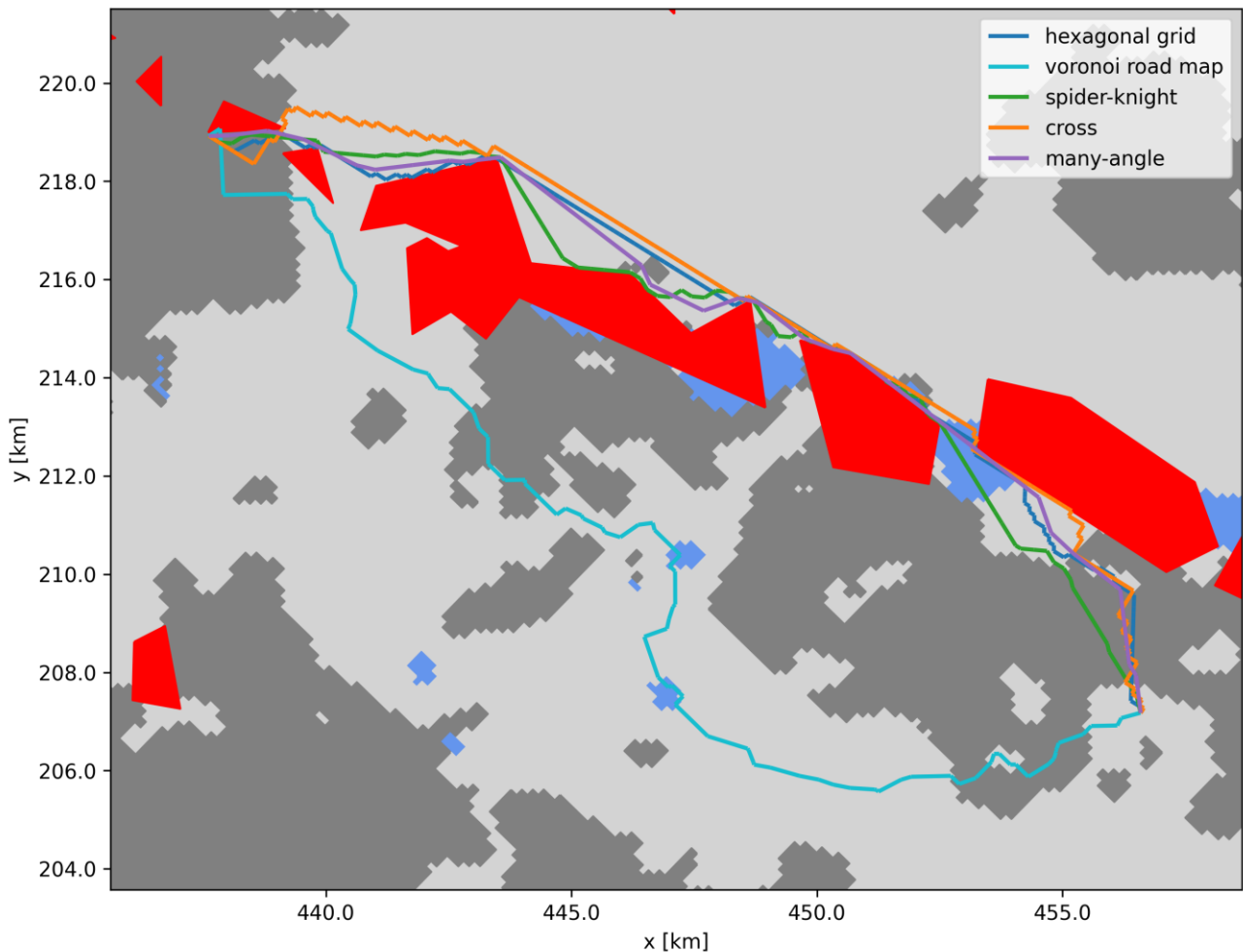


Abbildung 4: Die Road Map-basierte Lösung unterscheidet sich stark von den anderen Lösungen, welche sich recht ähnlich sind, jedoch die Gegebenheiten unterschiedlich gut ausnutzen.

Abbildung 4 visualisiert die anhand der unterschiedlichen Bewegungsmustern gewonnenen Lösungen, wobei der Übersicht halber nur die finalen (optimalen) Lösungen dargestellt sind. Es zeigt sich, dass sich lediglich die Lösung für die vorab generierte Road Map stark von den anderen Lösungen unterscheidet. Kleine Unterschiede zeigen auf, dass die Anpassung an die Gegebenheiten im Falle der einfacheren Bewegungsmuster weniger ausgeprägt ist. Die Unterschiede bzgl. der Qualität der Lösungen aber insbesondere auch der Zeitpunkt zu dem die Lösungen verfügbar sind, wird durch Abbildung 5 aufgezeigt. Werden sub-optimale Lösungen zur Navigation verwendet, so ist der Zeitunterschied zwischen den unterschiedlichen Strategien zumindest für dieses Beispiel nicht signifikant (alle Methoden liefern Ergebnisse innerhalb der ersten 10 Sekunden). Auch für Anfragen für längere Distanzen ist das der Fall (auch wenn mehr die Zeit bis zur ersten Lösung vergeht). Soll die finale, optimale Lösung berücksichtigt werden, so ergeben sich jedoch Unterschiede. Im hier

aufgeführten Beispiel ist die many-angle Strategie überraschend schneller als z.B. die spider-knight Strategie. Dies ist im Allgemeinen nicht der Fall, für längere Strecken wird zur Ermittlung der finalen Lösung mit den komplexeren Bewegungsmustern in der Regel mehr Zeit benötigt. Es wurde aber auch beobachtet, dass der genaue Umfang vom Szenario abhängig ist.

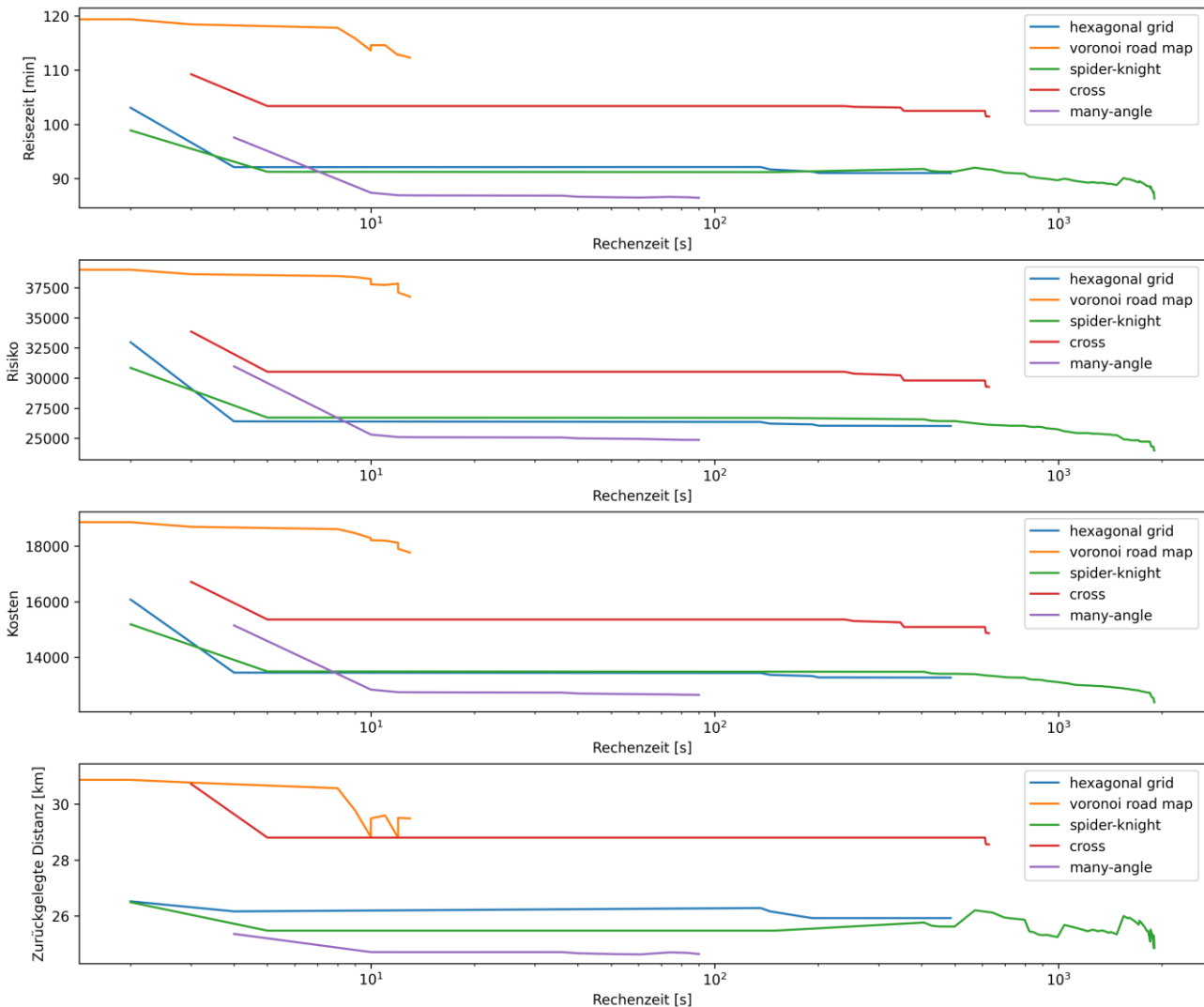


Abbildung 5: Reisezeit, Risiko, Gesamtkosten und zurückgelegte Distanz für die einzelnen Lösungen für die unterschiedlichen Strategien im zeitlichen Verlauf. Die benötigte Rechenzeit ist logarithmisch aufgetragen um die vergangene Zeit bis zur ersten Lösung besser sichtbar zu machen. Es zeigt sich, dass alle Strategien innerhalb von 10 Sekunden eine erste Lösung liefern, welche bereits zur Navigation verwendet werden kann. Hervorzuheben ist außerdem, dass die Reisezeit nicht monoton fallend ist, da für eine Reduktion des Risikos eine längere Reisezeit in Kauf genommen werden muss. Lediglich die Gesamtkosten, die sich aus Reisezeit und Risiko ergeben, sind immer monoton fallend. Ähnliches gilt für die zurückgelegte Distanz.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass durch die Wahl eines bestimmten Bewegungsmusters, bestimmte Nachbarn abhängig von spezifischen Parametern eines

Schiffes ausgeschlossen werden können. So können Kursänderungen nicht beliebig stark sein. Wird nun z.B. das many-angle Muster verwendet, so lässt sich dies viel feiner steuern als bei der Verwendung des cross Musters.

Eine „kantige“ Route könnte auch in einem Post-Prozessierungsschritt geglättet werden. Erste Untersuchungen wurden dabei auf einer Route, welche auf Road Mapping basierte, mittels der visibility-Methode (Niu et al., 2019) angestellt. Dabei konnten die Ergebnisse erheblich verbessert werden. Bei dieser Methode wird versucht ein nicht benachbartes Wegpunkt-Paar direkt zu verbinden und so eine Abkürzung zu finden. Wenn die Kosten für die neue Verbindung geringer sind als die Kosten für das Segment aus der bisherigen Route, so wird die neue Strecke übernommen. Während sich diese Methode im statischen Fall bewährt hat, ist zu prüfen wie eine Umsetzung in einer dynamischen Umgebung funktionieren kann - immerhin führt das Einfügen von Abkürzungen zu neuen Ankunftszeiten an nachfolgenden Knoten und somit auch zu geänderten Eis-Bedingungen. Es wäre dann auch zu prüfen, ob die gewonnene Reduzierung der Laufzeit nach einer solchen zusätzlichen Prozessierung bestand hat.

2.1.2.2. Anbindung zusätzlicher Parameter und Nutzerfeedback

Zusätzlich zur Meereisklassifikation sollen auch Meerestiefen und spezielle Gefahrenzonen und Nutzerfeedback in der Routenberechnung berücksichtigt werden. Ein erster Schritt zur Umsetzung erfolgte bereits mithilfe der neuen Implementierung des Routenplanungsmoduls. So ist es möglich die Zielfunktion beliebig durch neue Komponenten zu erweitern. Durch zusätzliche Anbindung der Schiffsparemeter können nun auch beispielsweise bestimmte Gebiete ausgeschlossen werden, wenn sie für ein spezifisches Schiff nicht befahrbar wären.

Meerestiefen

Es wurde ein Microservice implementiert, welcher die verschiedenen Datensätze der Meerestiefe im Untersuchungsgebiet verwaltet. Auf Anfrage weist dieser Service Gebiete aus, die von einem spezifischen Schiff nicht befahren werden können. Gitter-basierte Sichttiefen-Daten werden dabei auf Basis des gegebenen Tiefgangs als Schwellwert binarisiert und anschließend polygonalisiert. Der resultierende Datensatz wird mit Untiefen-Polygonen (ebenfalls aus AP10) fusioniert. Anschließend werden die Geometrien nicht-befahrbarer Stellen zurückgegeben. Dieser Service kann vom Routenplanungsmodul angesprochen und die erhaltenen Geometrien verarbeitet werden. Bei der Entwicklung eines Knotens während der Routenberechnung werden Nachbarn, die diese Gebiete berühren oder kreuzen ausgeschlossen.

Es ist außerdem möglich Meerestiefen aus einer GeoPackage- oder GeoTiff-Datei zu lesen, welche dann in gleicher Weise verarbeitet werden.

Gefahrenzonen

Gefahrenzonen sind eine Erweiterung zu den durch Eisklass2 bereitgestellten Eistypen. Die Bestimmung der Gefahrenzonen durch das DLR wird in Abschnitt 2.1.9.3 beschrieben. Die Lieferung erfolgt in Form einer GeoPackage-Datei mit Zeitstempel. Die Geometrien werden entsprechend ihrer zeitlichen Gültigkeit in die entsprechenden Layer mit den Eistypen eingefügt, wo sie die ursprünglichen Features überlagern bzw. für das betroffene Gebiet ersetzen. Der Routenplanungsalgorithmus behandelt die Gefahrenzonen als zusätzlichen Eistyp. Ein Beispiel für solche Gefahrenzonen ist bereits z.B. mit Abbildung 1 gegeben.

Nutzerfeedback

Bereits der erste Test (Irena Arctica) wurde genutzt um Parameter zur Routenberechnung zu optimieren. Auch der zweite Test (FS Polarstern) diente der Verfeinerung dieser Parameter. So stellte sich heraus, dass in vielen Fällen eine schnelle Routenberechnung erforderlich ist. Dies war oft durch die geringe Datenverfügbarkeit begründet. Sobald eine neue Klassifikation vorlag, war eine sofortige Berechnung der Route mit schnellen Ergebnissen notwendig. In anderen Fällen sorgte eine Änderung der Start- oder Zielkoordinaten oder der Abfahrtszeit, dafür dass eine schnelle Neuberechnung der Route nötig war. In selteneren Fällen gab es eine längere Vorlaufzeit, die Spielraum für längere Berechnungszeiten bot. Es wurden daher Einstellungen getestet, die einen Kompromiss zwischen Rechenzeit und Qualität der Route darstellten. Anhand dessen wurde während der Praxis-Tests in vielen Fällen die erste berechnete Route des (D)ARA* zur Verfügung gestellt, da eine Berechnung der optimalen Route zu langwierig war. Der Gewichtsparemeter wurde dafür mit dem Wert 1 sehr niedrig gewählt, was die Qualität dieser ersten Route verbessert.

Weitere Anpassung wurden im Hinblick auf das Ausgabeformat getroffen. Hier wurde nicht nur die berechnete Trajektorie, sondern auch Wegpunkte gewünscht. Die Ausgabe der berechneten Route in Form von Punktkoordinaten ist nun möglich. Eine Möglichkeit für zukünftige Arbeiten besteht hier in der Reduktion der aufgegebenen Wegpunkte auf wenige markante Koordinaten.

Neben dem Ausgabeformat spielt auch die Art der Visualisierung einer Route eine entscheidende Rolle für den Nutzer im Feld. Die aktuellen Eisbedingungen werden auf Schiffen zumeist statisch dargestellt, z. B. in Form der Meereiskonzentration zu einem bestimmten Zeitpunkt, oder dem aktuellsten verfügbaren Satellitenbild. Eine auf einem statischen Bild berechnete Route kann so sehr leicht dargestellt werden. Für die Route gewählte offene Wasserflächen oder Gebiete mit Dünneis sind für den Nutzer leicht auszumachen und die vorgeschlagene Route ist leicht nachzuvollziehen. Die zur Navigation benötigten Koordinaten wichtiger Wegpunkte entlang einer solchen statischen Route sind für den Navigator allerdings nicht nutzbar, da sich das Eis in ständiger Bewegung befindet. Besonders die Wegpunkte nahe am Zielort sind durch die kontinuierliche Drift und die vergangene Zeit besonders weit weg von den tatsächlichen Koordinaten. Um also eine Route, die die Eisdrift berücksichtigte darstellen zu können, muss auch die Visualisierung des zugrundeliegenden Satellitenbildes bzw. der Klassifikation angepasst werden. Dies kann

zum Beispiel mit einer Animation erfolgen, die die Verschiebung des Eisfeldes und die sich daran orientierende Route im zeitlichen Verlauf darstellt. Im Rahmen des zweiten Tests wurden solche Animationen für alle relevanten Routen manuell erstellt. Diese Form der Darstellung ist, wenn sie in Eisinformations- oder Navigationssysteme integriert werden soll, allerdings technisch aufwendig und unter Umständen wenig intuitiv. Navigatoren im Eis haben selten genug Zeit sich aufwendige Animationen anzusehen und über einen Zeitstrahl die einzelnen Zeit- und Wegpunkte anzusteuern. Das Feedback von mehreren Nutzern war daher, dass das statische Bild weiterhin für die Visualisierung genutzt werden sollte. Wenn man allerdings eine auf der Eisdrift basierende ‚dynamische‘ Route auf einem statischen Bild anzeigt, dann stimmen vor allem gegen Ende der Route Bild und Route visuell nicht mehr überein. Auf dem statischen Bild geht die Route vielleicht mitten durch eine große mehrjährige Eisscholle, obwohl diese Scholle natürlich in der Zukunft so verdriftet ist, dass die dynamische Route an deren Rand entlang und nicht mitten hindurch verläuft. Diese Darstellung macht die Route wenig glaubwürdig und der Vorschlag verliert Akzeptanz beim Nutzer. Ein Vorschlag war hier zwei Berechnungen zumachen: eine statische Route und dynamische Wegpunkte. Durch die Darstellung der statischen Route auf dem zugrundeliegenden statischen Bild können markante Feature entlang einer Strecke (offene Wasserflächen, einzelne Schollenformen) wiedererkannt werden und der Nutzer kann die Route leicht nachvollziehen. Zusätzlich dazu werden aber die korrekten, auf der Eisdrift basierenden Koordinaten der einzelnen Wegpunkte berechnet und angezeigt, damit sie der Navigator in das Schiffsnavigationssystem übertragen kann. Daher wurde ein erster Ansatz zur Umsetzung implementiert, der in zukünftigen Arbeiten auf Basis neuen Feedbacks weiterentwickelt werden kann.

FAST-CAST2-Berechnungen nutzen folgende Faktoren zur Berechnung von Routen: Eistyp, Eisdrift, Gefahrenzonen, Bathymetrie und Untiefen/Flachwasserstellen. Im Verlauf der PS144 Expedition (2. FAST-CAST2 Test) kam mit ein weiterer Faktor, nämlich die sogenannte Exclusive Economic Zone (EEZ), hinzu. Die FS Polarstern hatte im Herbst 2024 keine Genehmigung für die russische EEZ, weshalb die Grenzen dieser extreme Relevanz für die Routenvorschläge des Schiffes hatten. Weitere zum aktuellen Zeitpunkt vielleicht noch nicht vorhersehbare Faktoren, sollten auf in Zukunft spontan hinzugenommen werden können, damit die Routenberechnungen kurzfristig angepasst werden können und nicht ihre Nützlichkeit verlieren.

Größtes Manko der bisherigen Routenberechnungen ist die schlechte Auflösung der Eisklassifikationen und die Tatsache, dass diese vor allem in den Sommermonaten qualitativ limitiert sind. Auf der FS Polarstern konnten daher bereits Klassifizierungen von höher aufgelösten Satellitenbildern verwendet werden, allerdings zeigte sich auch da, dass die Navigatoren dem initialen Satellitenbild und ihrer eigenen Interpretation mehr Vertrauen entgegenbrachten als der Klassifikation.

2.1.3. AP 3 – Weiterentwicklung Webservice

Im Vorgängerprojekt MAP-BORealis wurde ein stark vereinfachter Webservice aufgesetzt, welcher es ermöglichte Start- und Zielkoordinate durch klicken auszuwählen und anschließend eine Route berechnen zu lassen. Das Tool war auf ein konkretes Satellitenbild und dessen Klassifikation reduziert und diente der Veranschaulichung der entwickelten Tools. Dieser Webservice dient als Grundlage für das Arbeitspaket 3 und sollte im Verlauf des Projektes weiterentwickelt werden.

2.1.3.1. Systemarchitektur und Schnittstellen

Der in MAP-BORealis entwickelte Webservice wurde aufgrund der erweiterten Anforderungen verworfen. Stattdessen wurde eine fortgeschrittenere Architektur entwickelt und implementiert. Dabei wurden auch mögliche zukünftige Anforderungen, wie eine Anpassung der Routenempfehlung bei Verlassen der vorgeschlagenen Route berücksichtigt. Wie Abbildung 7 zeigt, erfolgt die Bearbeitung von Teilaufgaben in einzelnen Diensten. Für die Kommunikation zwischen den Diensten wurde das gRPC (gRPC Remote Procedure Calls) Framework eingesetzt. Die Wahl dieses Frameworks lässt sich unter anderem damit begründen, dass sehr anschaulich festgelegt werden kann, wie Daten übertragen werden. Dabei wird für jeden Dienst angegeben, welche Aufrufe angeboten und welche Daten erwartet werden. Die Festlegung der zu übertragenden Daten erfolgt dabei auch unter Angabe des Daten-Typs. Durch diese genaue Festlegung entsteht eine Art Vertrag zwischen den einzelnen Diensten, wodurch eventuelle Inkompatibilitäten während der Implementierungsphase vermieden werden können. Während dies bei den Schnittstellen zwischen Diensten eines Partners hilfreich ist, ist es insbesondere bei Schnittstellen zwischen Diensten mehrerer Partner von immensen Vorteil, da diese so unabhängiger voneinander entwickelt werden können. Ein weiterer Vorteil von gRPC ist, dass es aus vielen verschiedenen Sprachen heraus verwendet werden kann. In diesem Projekt relevant war die Unterstützung für C++ und python.

```
service SeaIceDataService {
  rpc GetSeaIceInformation (GetSeaIceInformationRequest) returns (stream GetSeaIceInformationResponse) {};
}

message GetSeaIceInformationRequest {
  optional fastcast2.common.v1.Polygon area_of_interest = 1;
  optional string classification_id = 2;
  optional google.protobuf.Timestamp start_time = 3;
  optional google.protobuf.Timestamp end_time = 4;

  option (buf.validate.message).cel = {
    id: "GetSeaIceInformationRequest.area_of_interest_or_classification_id"
    message: "At least `area_of_interest` or `classification_id` must be specified."
    expression: "has(this.area_of_interest) || has(this.classification_id)"
  };
}

message GetSeaIceInformationResponse {
  bytes gpkg = 1;
}
```

REF_Ref13 \hCode-Block 1: Beispielhafte Schnittstellendefinition zur Abfrage von Eis-Informationen aus der Datenbank.

Code-Block 1 gibt beispielhaft eine Schnittstellendefinition an, welche zum Abfragen von Eis-Informationen aus der Datenbank verwendet werden kann. Die Abfrage kann entweder durch eine Gebietsauswahl mittels eines Polygons oder unter Angabe der ID der

Klassifikation durchgeführt werden. Im Rahmen der Abfrage wird automatisch validiert, dass mindestens ein Polygon oder eine ID übergeben wurde. Zusätzlich kann ein zeitlicher Rahmen gesetzt werden. Werden keine Zeiten angegeben, so wird nur die neueste verfügbare Klassifikation ausgegeben. Die Antwort dieses Dienstes besteht in einem Stream, welcher eine GPKG-Datei enthält. Die Verwendung einer GPKG-Datei war an der Stelle ein Kompromiss zwischen Nutzbarkeit und Dokumentation (an dieser Stelle ist die Schnittstelle nicht selbsterklärend, es benötigt Vorwissen über die Struktur der Daten in der GPKG-Datei).

Zentraler Bestandteil der entwickelten Architektur ist der SealceDataService. Hier werden alle relevanten Eis-Informationen in einer Datenbank abgelegt. Neue Meereis-Klassifikationen kommen dabei aus dem Projekt Eisklass2 und können von der EisklassToFastcastBridge an den SealceDataService übertragen werden. Über den CornerPointService, PointFeatureService und IceDriftPredictorService werden automatisch Vorhersagen der Klassifikation erstellt, die wiederum im SealceDataService abgelegt werden (Abbildung 6). Die Berechnung einer Routenempfehlung findet im PathFinder statt. Dieser kann über Schnittstellen auf Eis-Informationen und Meerestiefen zugreifen und hat zudem Zugriff auf verschiedene Schiffsparameter. Die berechnete Route wird gespeichert und kann anschließend in IcySea visualisiert werden. Das Zusammenspiel der einzelnen Module wurde ausführlich erprobt, insbesondere während des PS144-Tests.

Die einzelnen Module laufen in Docker Containern, welche mittels Compose verwaltet werden. Manche Module haben dabei einen HealthCheck implementiert, sodass schnell ersichtlich ist, ob ein Modul verfügbar ist oder nicht. Sollte ein Modul abstürzen, so wird es automatisch neu gestartet. Aktuell kann es bei manchen Modulen dabei noch zu Datenverlust kommen, da laufende Prozesse nicht beendet werden. In dem Fall muss daher anhand der Log-Dateien nachvollzogen werden, welche Daten betroffen waren und eine Verarbeitung bei Bedarf neu angestoßen werden.

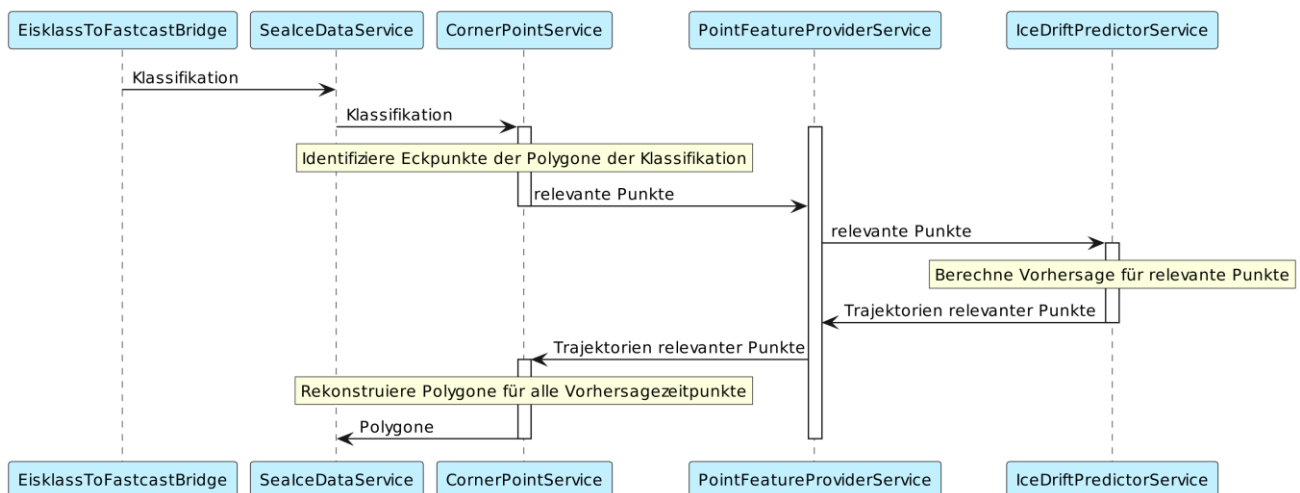


Abbildung 6: Vorbereitung der Meereisklassifikationen.

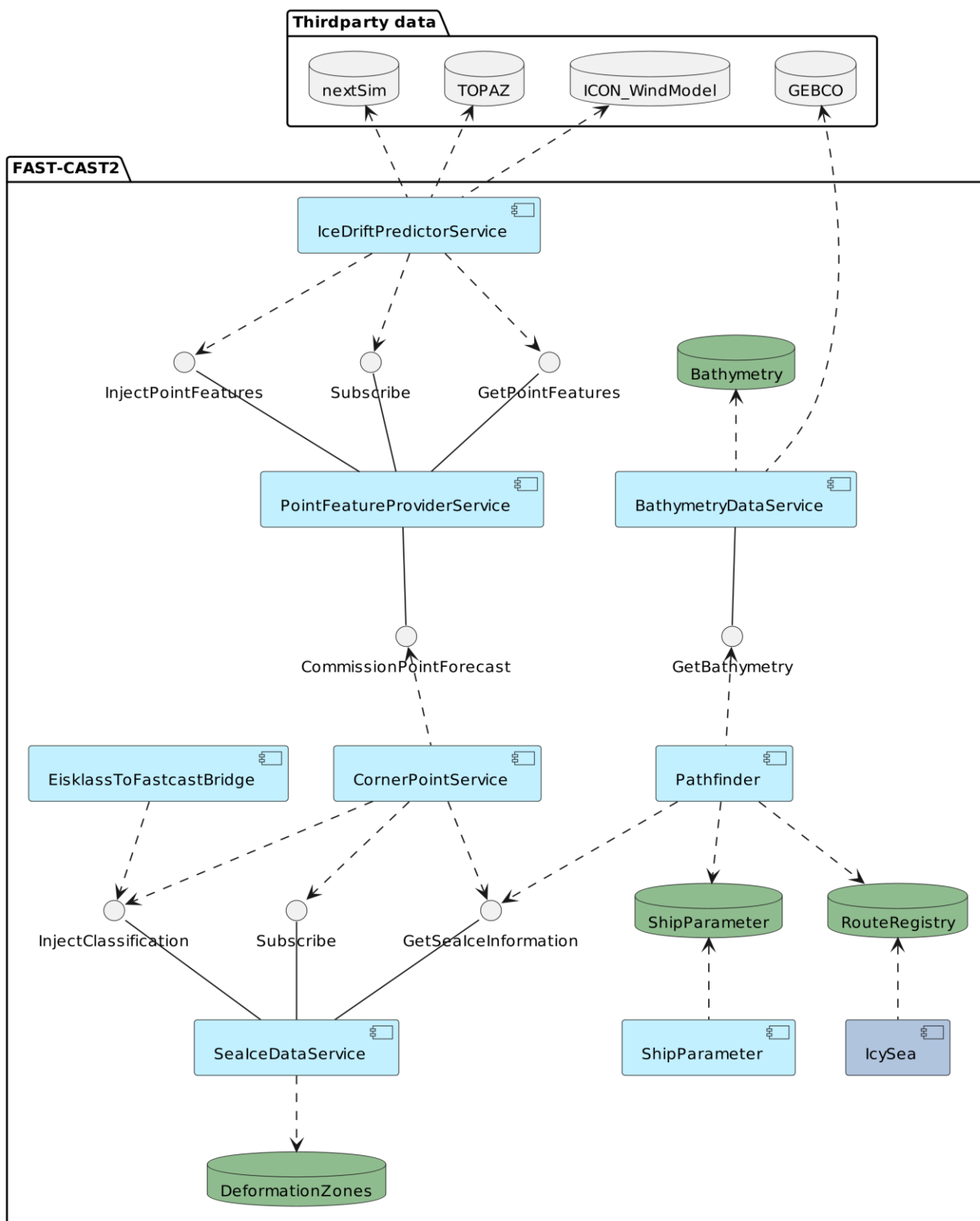


Abbildung 7: Übersicht der Schnittstellen.

2.1.3.2. *Backend Optimierungsrechnungen*

Das Backend zur Berechnung von Routenvorschlägen musste umfassend erweitert werden, um den erweiterten Anforderungen gerecht zu werden. Dabei musste zum einen die globale Anwendbarkeit sichergestellt und zum anderen die Verarbeitung von Vektordaten ermöglicht werden. Zu diesem Zweck wurden mehrere Micro-Services entwickelt, um die verschiedenen Aufgaben unabhängig voneinander zu bearbeiten. Ein wichtiges Modul ist der `SealceDataService`, welcher die Datenbank betreibt, in der alle notwendigen Eis-Informationen abgelegt werden. Dieser Service wird sowohl angesprochen, um Eis-Informationen abzulegen (z.B. eine neue Klassifikation), als auch um diese abzurufen. Dies dient zum einen der Vorbereitung der Daten für die Vorhersage einer Klassifikation, als auch dazu die relevanten Informationen für die Routenberechnung bereitzustellen. Weitere Details zur Datenbank sind in [2.1.5.2.](#) zu finden.

Das Routenplanungs-Modul ist in der Lage Eis-Informationen sowohl vom `SealceDataService` abzufragen, als auch aus verschiedenen Datei-Formaten zu lesen. Letzteres ist von Vorteil, wenn das Modul lokal zu Entwicklungszwecken ausgeführt werden soll und somit nicht die komplette Infrastruktur zur Verfügung steht. Zu Beginn des Projekts erfolgte die Berechnung von Routen-Vorschlägen noch auf Basis von Raster-Daten. Erst später wurde die Unterstützung für Vektor-Daten als Eingangsdaten entwickelt. Aktuell ist die Verwendung von Raster- und Vektordaten möglich. Aus den Eis-Informationen wird eine dreidimensionale Karte für das relevante Gebiet erstellt auf Basis dessen eine Route berechnet wird.

Eine weitere Karte wird auf Basis der Meerestiefen erstellt. Auch dafür können verschiedene Arten von Meerestiefen-Daten, Raster- und Vektordaten, verarbeitet werden. Mithilfe der Schiffsparemeter kann diese Karte auf die Definition nicht befahrbarer Gebiete reduziert werden.

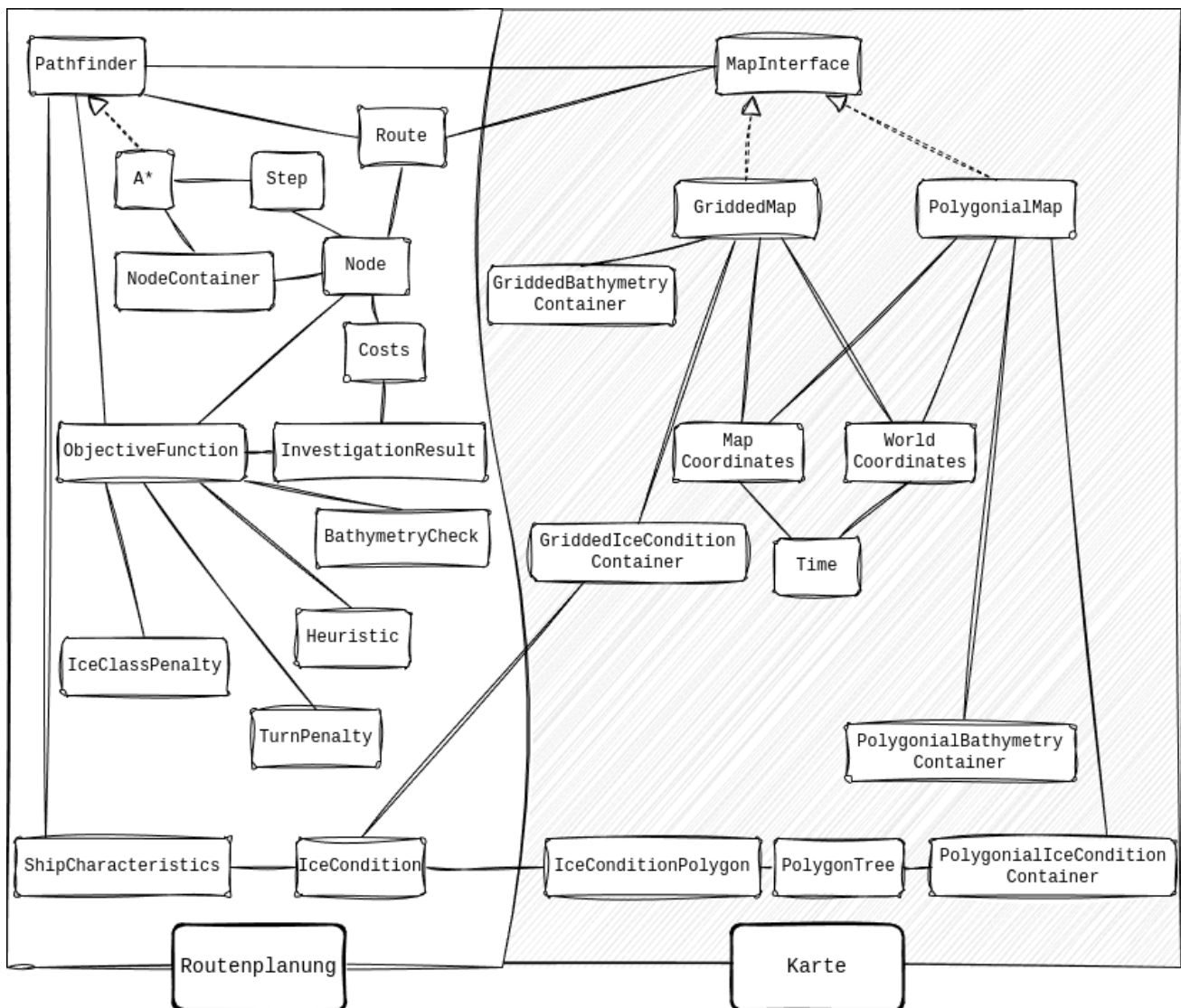


Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Klassen-Architektur der Routenplanung.

Diese Karten bilden die Grundlage zur Berechnung von Routenvorschlägen mithilfe der in [2.1.2.](#) beschriebenen Erweiterungen des A*-Algorithmus.

2.1.3.3. Backend Bathymetrie, Untiefen, Sichttiefen

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 3.3 wurden umfangreiche Arbeiten zur Entwicklung eines leistungsfähigen Backends durchgeführt, das sich auf die Bereitstellung und Verwaltung von bathymetrischen Daten, Untiefen sowie Sichttiefen konzentriert, die aus optischen Satellitendaten abgeleitet wurden. Dieses Backend bildet das Fundament für den effizienten Zugriff, die Analyse und Darstellung von Tiefendaten und relevanten Indikatoren.

Zu Beginn des Projekts stand die Weiterentwicklung und Implementierung einer robusten Datenbankarchitektur im Fokus. Diese Datenbank wurde speziell entwickelt, um die großen Datenmengen, die aus Satellitenbildern gewonnen werden, effizient zu speichern und zu verwalten. Besondere Aufmerksamkeit wurde darauf gelegt, dass die Datenbank skalierbar ist und sich an wachsende Anforderungen anpassen lässt, sowie sicherheitsgerichtete Zugriffskontrollen für den Schutz sensibler Daten implementiert.

Parallel zur Datenbankentwicklung wurde eine API-Schnittstelle entwickelt. Diese API ermöglicht den standardisierten Zugriff auf die gespeicherten Tiefendaten und Indikatoren, was eine nahtlose Integration in bestehende Systeme und Anwendungen erleichtert. Die API wurde so gestaltet, dass sie sowohl für Entwicklerschnittstellen als auch für Endanwender benutzerfreundlich ist, und sie unterstützt moderne Authentifizierungsverfahren zur Sicherstellung der Datensicherheit.

Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeiten war die Nutzung des Swagger Tool Suite zur API-Dokumentation. Durch den Einsatz von Swagger kann eine interaktive, leicht zugängliche und umfassende Dokumentation der API bereitgestellt werden. Benutzer haben dadurch die Möglichkeit, die unterschiedlichen Endpunkte und deren Funktionen intuitiv zu erkunden, was die Implementierung und Nutzung der API für Entwickler erheblich vereinfacht. Die Swagger-Dokumentation dient somit nicht nur als technischer Leitfaden, sondern auch als praktisches Werkzeug zur Sicherstellung einer effektiven Implementierung.

2.1.3.4. Frontend Weiterentwicklung, UX Design

Für dieses AP wurde das IcySea-Frontend so weiter entwickelt, dass die im Rahmen von FAST-CAST2 errechneten Routen in der App direkt dargestellt werden können. Auch die den Routenberechnungen zugrundeliegenden klassifizierten Satellitenbilder können bereits in IcySea bereitgestellt werden. Die Kombination dieser beiden Layer ist elementar wichtig für die Akzeptanz der Routenvorschläge beim Nutzer. Damit können die Nutzer FAST-CAST2 Routen direkt mit weiteren über IcySea bereitgestellten Meereisdaten vergleichen. Zusätzlich wurden zusätzliche Funktionen integriert, die es dem Nutzer erlauben, eigenen Routen (z. B. aus dem Navigationssystem ECDIS) in IcySea zu importieren und selbst Routen manuell in IcySea einzuzeichnen (über die ‚Measure-Distance‘ Funktion). Routen aller Art können über die ‚Drag and Drop‘-Funktion integriert werden. Basierend auf dem Nutzerfeedback wurden die Darstellungen der importierten Routen weiterentwickelt, um eine bessere Nutzbarkeit zu gewährleisten.

Das initiale Ziel, nämlich eine Funktionalität zu entwickeln, die es den Nutzern erlaubt konkrete Start- und Endkoordinaten einer gewünschten Route direkt in IcySea einzuzeichnen und damit die Routenberechnung automatisch anzustoßen (aufbauend auf dem oben erwähnten MAP-BORealis Tool), wurde nicht eingebaut. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, dass die beiden Testläufe (auf Irena Arctica und Polarstern) gezeigt haben, dass die der Routenberechnung zugrundeliegenden Daten zu limitiert sind für die verlässliche operationelle Routenberechnung. Die Integration dieser Funktion hätte daher zu Erwartungen bei den Nutzern geführt, die in der aktuellen Form so nicht zu erfüllen gewesen wären.

Der gesamte Routenberechnungs- und Bereitstellungsprozess funktioniert aktuell nur manuell und für ganz konkrete Schiffe. Für diese einzelnen Schiffe ist das IcySea Frontend allerdings soweit entwickelt, dass FAST-CAST2 Routen dargestellt, genutzt und mit verschiedenen anderen Routenvorschlägen verglichen werden können und auch die zugrundeliegenden Klassifikationen bereitgestellt werden.

2.1.4. AP 4 – Parameteridentifikation Schiffsgeschwindigkeit

Die in MAP-BORealis entwickelte Routenberechnung basiert auf geschätzten Schiffsgeschwindigkeiten, welche sich auf Erfahrungswerte stützen. Da dieser Parameter einen erheblichen Einfluss auf die Routenberechnung hat, ist dies nicht ausreichend. Daher sollten reale Daten verwendet werden, um Geschwindigkeitskurven für verschiedene Schiffe zu bestimmen. Die Daten sollten in einer Datenbank hinterlegt werden und leicht aktualisierbar sein. Dazu sollte ein lernendes System entwickelt werden, dass neue Datensätze leicht integriert.

2.1.4.1. Anlegen einer Datenbank

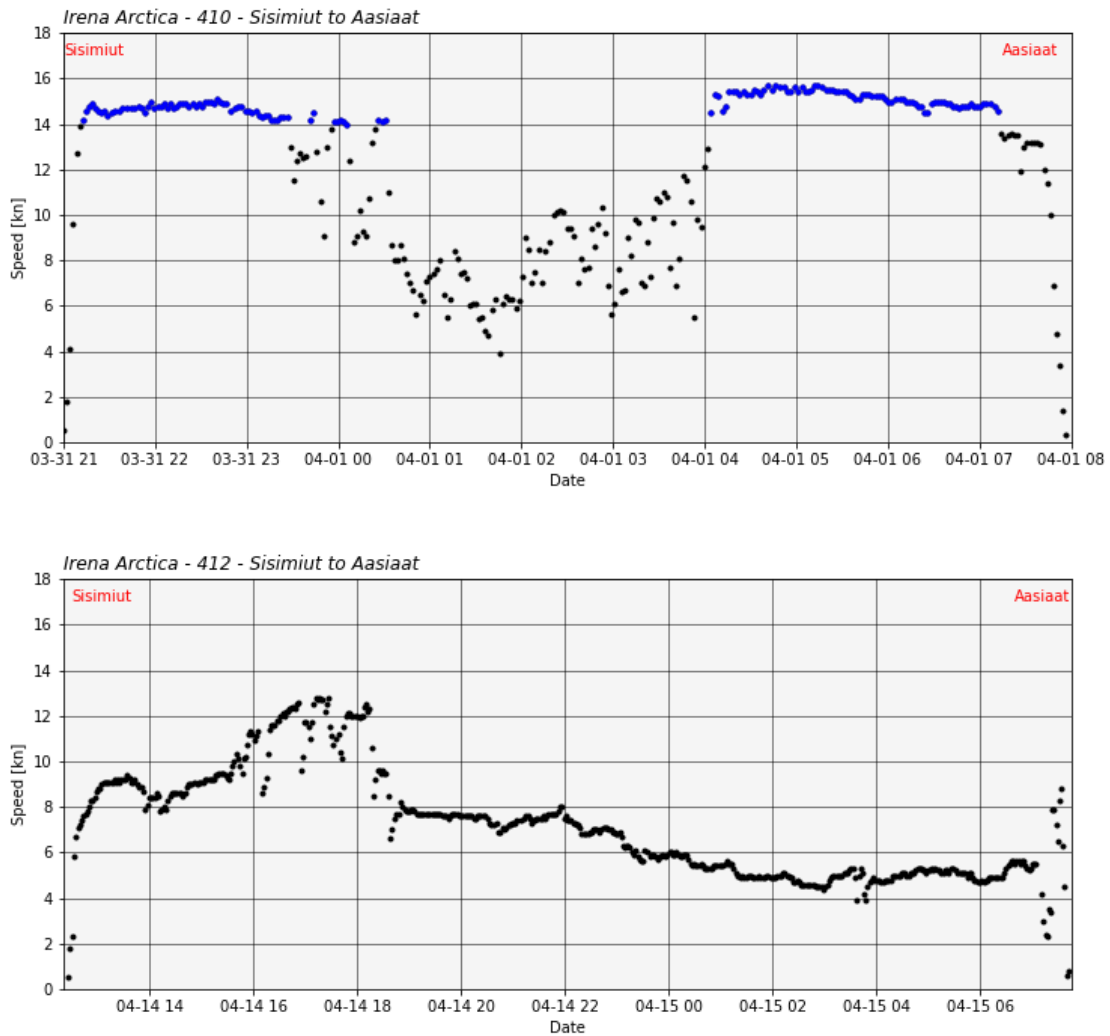
Zur Bestimmung der Geschwindigkeitsparameter werden sowohl Trackingdaten als auch Meereisklassifikationen, welche in Ort und Zeit überlappen benötigt. Dies schränkt die Anzahl infrage kommender Datensätze erheblich ein. Im Verlauf des Projektes wurden zwei Fahrten der FS Polarstern ausgemacht, bei denen es Überschneidungen mit klassifizierten Sentinel-1-Bildern gab: PS137 und PS144. Beide Datensätze und zugehörige Sentinel-1-Klassifikationen wurden gespeichert. Zusätzlich wurden Trackingdaten der Irena Arctica zur weiteren Analyse gespeichert.

2.1.4.2. Identifikation des Geschwindigkeitsparameters

Die Datensätze der Fahrten der Irena Arctica, der PS137 und PS144 wurden getrennt voneinander analysiert.

Irena Arctica

Für die Irena Arctica Fahrten IA406, IA408, IA410 (FAST-CAST2-Testfahrt) und IA412 wurden Geschwindigkeitsprofile analysiert. Dabei fiel auf, dass die Geschwindigkeitsunterscheidungen für einzelne Eisklassen nicht möglich war. Das abgebildete Profil der Testfahrt IA410 (**Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** Abbildung 9, oben) deutet aber deutliche Geschwindigkeitsunterschiede zwischen Fahrten im Eis und Fahrten im offenen Wasser an. Während das Schiff im offenen Wasser Geschwindigkeiten von 14 bis 16 Knoten fährt, befindet sich der Geschwindigkeitsbereich im Eis zwischen 4 bis 10 Knoten. Diese Werte konnten für die Routenberechnungen während des Rifkoltests verwendet werden, allerdings zeigte sich, dass die Irena Arctica nicht grundsätzlich im offenen Wasser mit der Maximalgeschwindigkeit unterwegs ist. Andere Faktoren, wie zum Beispiel die gewünschte Ankunftszeit, spielen für die Fahrtgeschwindigkeit eine ebenso wichtige Rolle. Wenn möglich, kommen die Versorgungsschiffe so im Hafen an, dass sie innerhalb der Kernarbeitszeit der Hafenarbeiter ent- und beladen werden können. Im Beispiel der IA412-Fahrt hieß das, dass die Irena Arctica absichtlich, auch im offenen Wasser, langsam fuhr, um nicht zu früh in Aasiaat einzutreffen (**Fehler! Unbekanntes Schalterargument.** Abbildung 9, unten).



Fehler! Unbekanntes Schalterargument. Abbildung 9: Oben (Unten): Geschwindigkeitsprofil der Irena Arctica für die IA410-Fahrt (IA412) von Sisimiut nach Aasiaat. Die blauen Marker zeigen die Maximalgeschwindigkeit der Irena Arctica, die im offenen Wasser erreicht wurde (oben). Im oberen Bild zeigen die schwarzen Marker die Geschwindigkeit der Irena Arctica im Eis, während ähnlich niedrige Geschwindigkeiten während der IA412-Fahrt durchgehend im offenen Wasser erreicht wurden. Während der IA412-Fahrt war eine schnelle Ankunft nicht gewünscht, weil die Hafenarbeiten in Aasiaat erst ab dem Morgen beginnen sollten. Die Irena Arctica fuhr also absichtlich langsamer, um nicht zu früh in Aasiaat anzukommen.

PS137

Bei Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Schiffsgeschwindigkeit der FS Polarstern während der Kampagne PS137 (Abbildung 10) kann man bereits visuell zwei leicht identifizierbare Geschwindigkeitsniveaus ausmachen. Zu Beginn und Ende der Kampagne befand sich das Schiff leicht erkennbar über längere Zeit im offenen Wasser mit etwa 10-11kn. Zudem erkennt man einige Zeitpunkte in denen das Schiff sich (fast) nicht bewegte und die Geschwindigkeit bei 0-0,5kn lag. In diesen Phasen kann angenommen werden, dass Stationsarbeit stattfand, weshalb sie bei der Identifizierung des Geschwindigkeitsparameters nicht berücksichtigt werden. Die restlichen Werte befinden sich zwischen diesen beiden Niveaus und können ohne weitere Informationen nicht eindeutig einem Eistyp zugeordnet

werden. Daher werden im nächsten Schritt Überlappungen des Schiffstracks mit den vorhandenen Meereisklassifikationen gesucht. Wegen fehlender Vorhersagen für die vorhandenen Klassifikationen wird angenommen, dass eine Klassifikation 6h vor und nach der Aufnahme des zugehörigen Sentinel 1 Bildes verwendbar ist. Auf diese Weise konnten 360 Track-Punkte gefunden werden, für die der Eistyp abgeleitet werden kann. Aufgrund offensichtlich fehlerhafter Klassifikation wurden weitere 6 Datenpunkte ausgeschlossen. Abbildung 11 zeigt die Verteilung der Geschwindigkeiten für drei Eistypen: offenes Wasser, niedriger Widerstand und hoher Widerstand. Eingezeichnet sind außerdem die Median-Werte für alle drei Eistypen, welche als Parameter in der Routenberechnung verwendet werden sollen. Während der Wert von 10,2kn im offenen Wasser mit Blick auf Abbildung 10 als durchaus realistisch einzuschätzen ist, scheinen die beiden anderen Werte überschätzt zu werden.

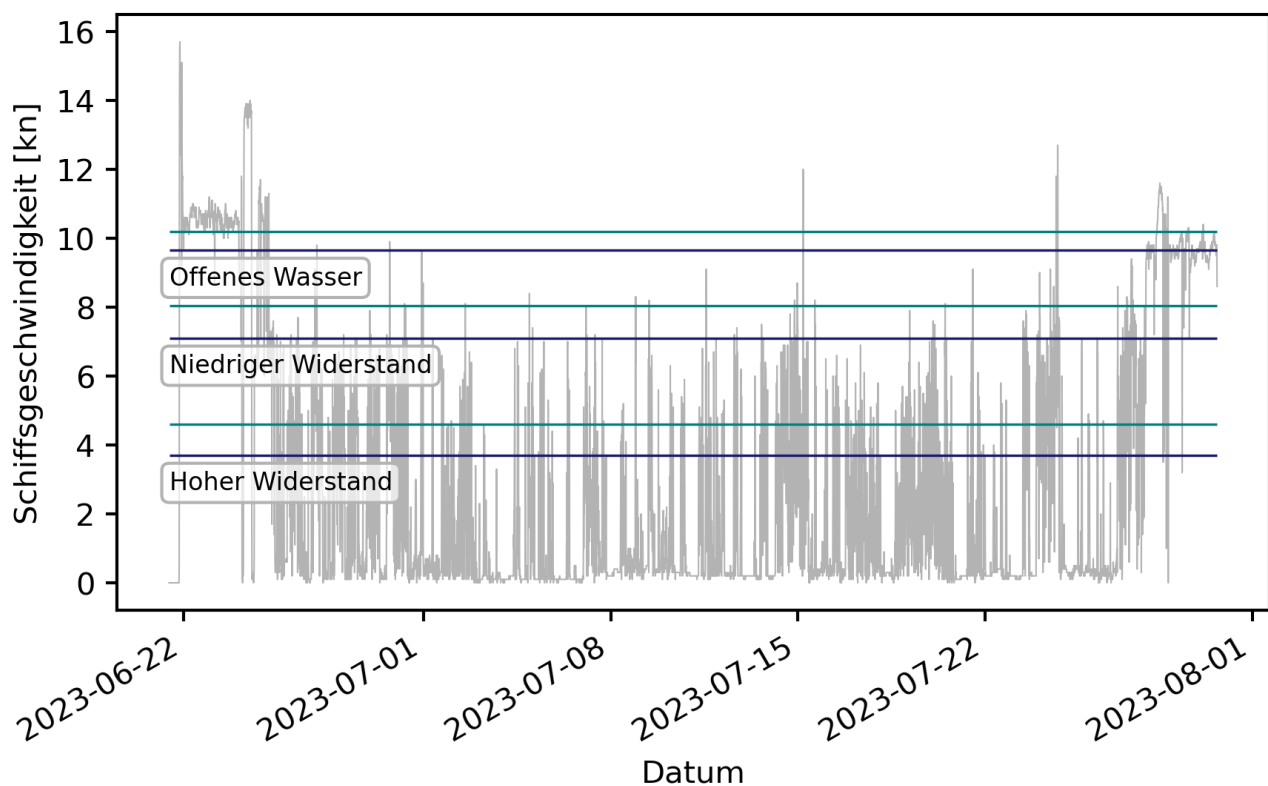


Abbildung 10: Geschwindigkeit der FS Polarstern während der Kampagne PS137. Berechnete Geschwindigkeitslevel für drei Eistypen sind in lila (1h-Zeitfenster) und grün (6h-Zeitfenster) markiert. Während die Werte für offenes Wasser die Abschnitte vor bzw. nach Eintritt in das Eis gut repräsentieren, werden die Geschwindigkeiten für die zwei Resistenzklassen überschätzt.

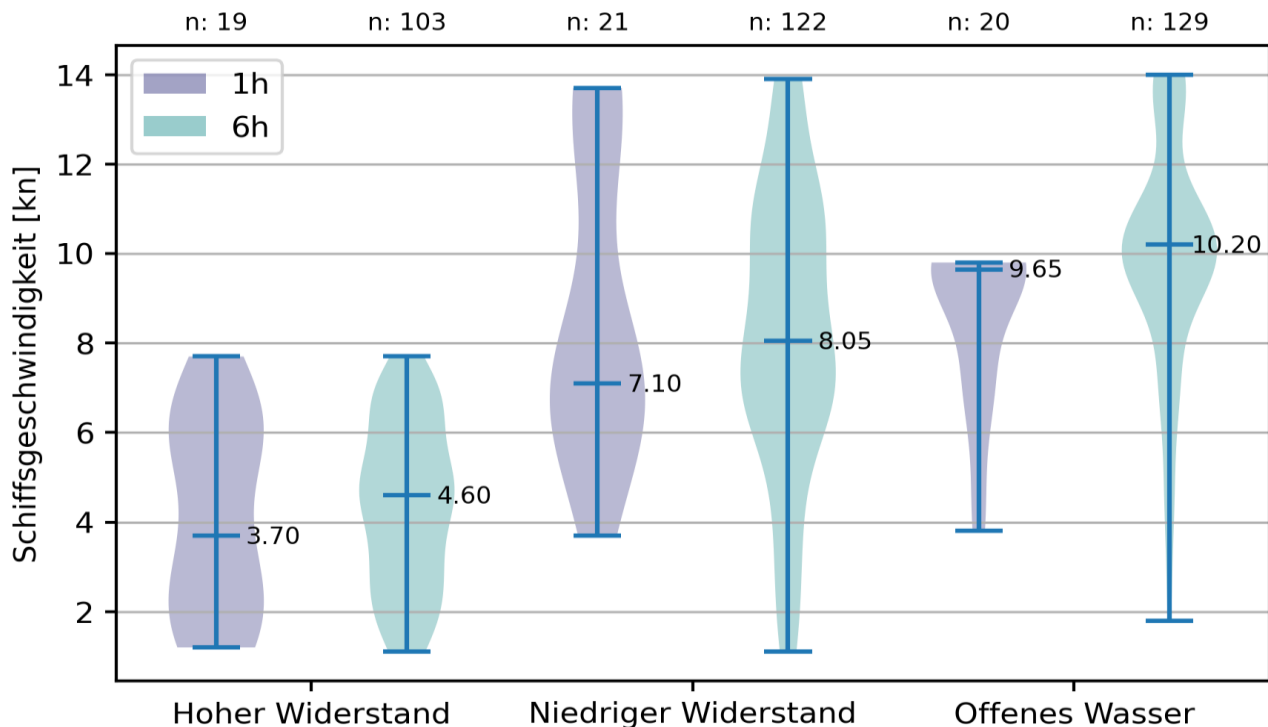


Abbildung 11: Schiffsgeschwindigkeit nach Eistyp während der Kampagne PS137. Es wurden 3 verschiedene Eistypen unterschieden. Die Wahl des Zeitfensters für die Gültigkeit einer Klassifikation (eine bzw. sechs Stunden) beeinflussen die Anzahl der Datenpunkte n (dargestellt am oberen Rand der Grafik) deutlich.

Es ist anzunehmen, dass die hohen Geschwindigkeiten von 8kn eher in Leads, womöglich sogar nur außerhalb des Packeises, erreicht werden können als in Eis mit niedrigerem Widerstand, welches meist einjähriges Eis widerspiegelt. Auch für Eis mit hohem Widerstand (meist mehrjähriges Eis) wurde eine niedrigere Geschwindigkeit erwartet. Ursache hierfür könnten Ungenauigkeiten in der Klassifikation oder ein zu großes zulässiges Zeitfenster für deren Verwendbarkeit sein. Reduziert man das Zeitfenster auf 1h, so überlappen nur noch 60 Datenpunkte mit den Meereisklassifikationen. Das Ergebnis (Abbildung 11) sind insgesamt etwas niedrigere Werte für alle Eistypen. Ca. 7 kn werden nun durchschnittlich im einjährigem Eis (niedriger Widerstand) gefahren, was immer noch sehr schnell erscheint. Aus Gesprächen mit dem Bordpersonal ist bekannt, dass 7 kn maximal in Leads erreicht werden. Man kann hier also davon ausgehen, dass es Fehler in der Klassifikation gab bzw. Leads zu klein waren, um in der Klassifikation aufzutauchen. Die hohe Geschwindigkeit für offenes Wasser ergibt sich daraus, dass die meisten Datenpunkte für diesen Typ außerhalb des Packeises lagen, wo eine deutlich höhere Geschwindigkeit möglich ist.

PS144

Für die Kampagne PS144 wurde die Analyse der Schiffsgeschwindigkeiten wiederholt. Auch in Abbildung 12 kann man die Phasen in denen das Schiff im offenen Wasser war und in denen Stationsarbeit stattfand gut erkennen. Im Wesentlichen sind sich die Geschwindigkeitsverläufe sehr ähnlich.

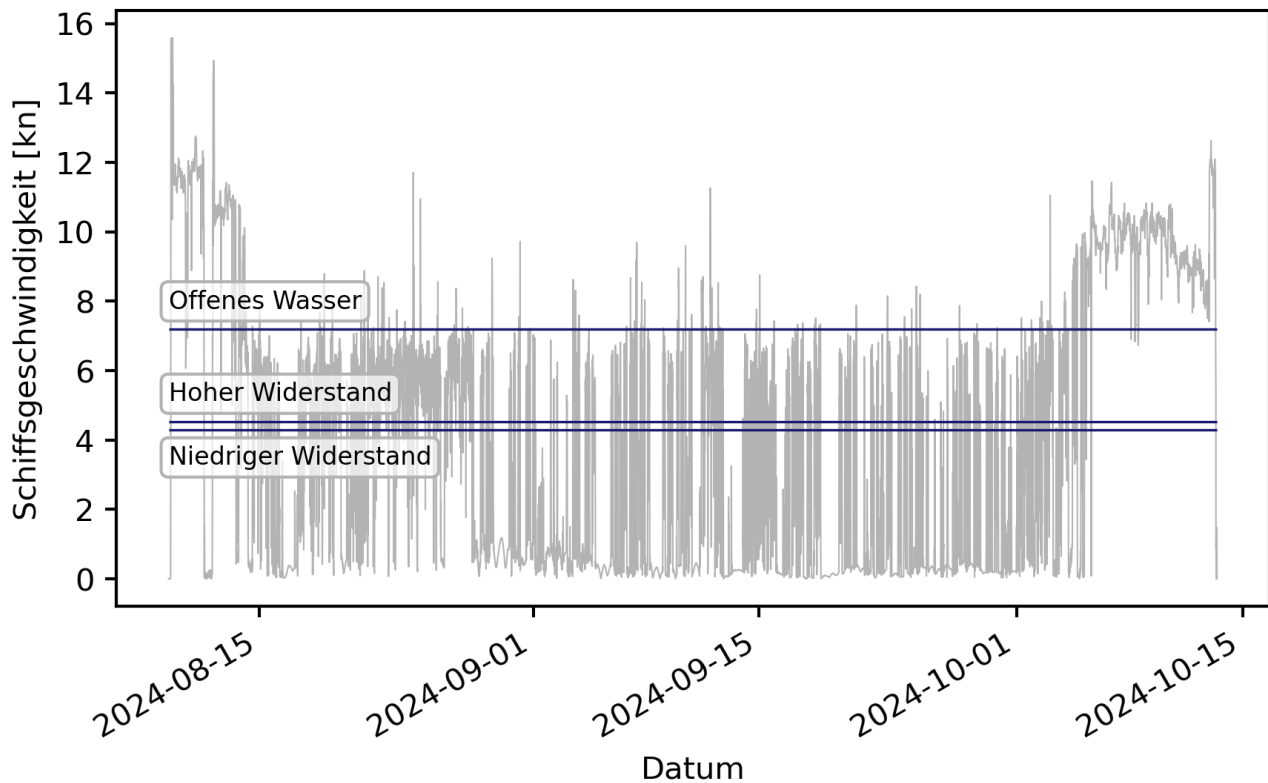


Abbildung 12: Geschwindigkeit der FS Polarstern während der Kampagne PS144. Berechnete Geschwindigkeitslevel auf Basis dieser Kampagne für drei Eistypen sind in markiert. Es fällt auf, dass die Geschwindigkeit für offenes Wasser nicht die Bedingungen vor und nach Eintritt in das Eis widerspiegeln, jedoch die maximale Geschwindigkeit in Leads gut abbildet. Die Werte für die zwei Resistenzklassen dagegen nicht vertrauenswürdig. Es ist anzunehmen, dass die tatsächliche Geschwindigkeit bei hohem Widerstand niedriger ausfällt.

Da für die Klassifikationen während dieser Kampagne auch Vorhersagen vorlagen, wurden diese für die Identifizierung überlappender Punkte genutzt. Somit konnten 555 Datenpunkte ermittelt werden, die in die Auswertung einfließen, wobei ein Großteil davon im Eistyp mit hohem Widerstand liegt. Für offenes Wasser sind nur vier Datenpunkte verfügbar, wodurch eine Statistik in diesem Fall nur sehr begrenzte Aussagekraft hat. Grund für diese geringe Zahl sind Fehler in Klassifikation und Drift. Abbildung 13 zeigt die Verteilung der Geschwindigkeit für die drei bereits bekannten Eistypen. Auffällig ist, dass die Geschwindigkeit für niedrige Widerstände im Median niedriger ist als für höhere Widerstände. Ursache hierfür können erneut fehlerhafte Klassifikationen sein oder eine ungenaue Vorhersage. Aufgrund der Beobachtungen an Bord der FS Polarstern während der Kampagne PS144 ist bekannt, dass beide Fehlerquellen eine Rolle spielten.

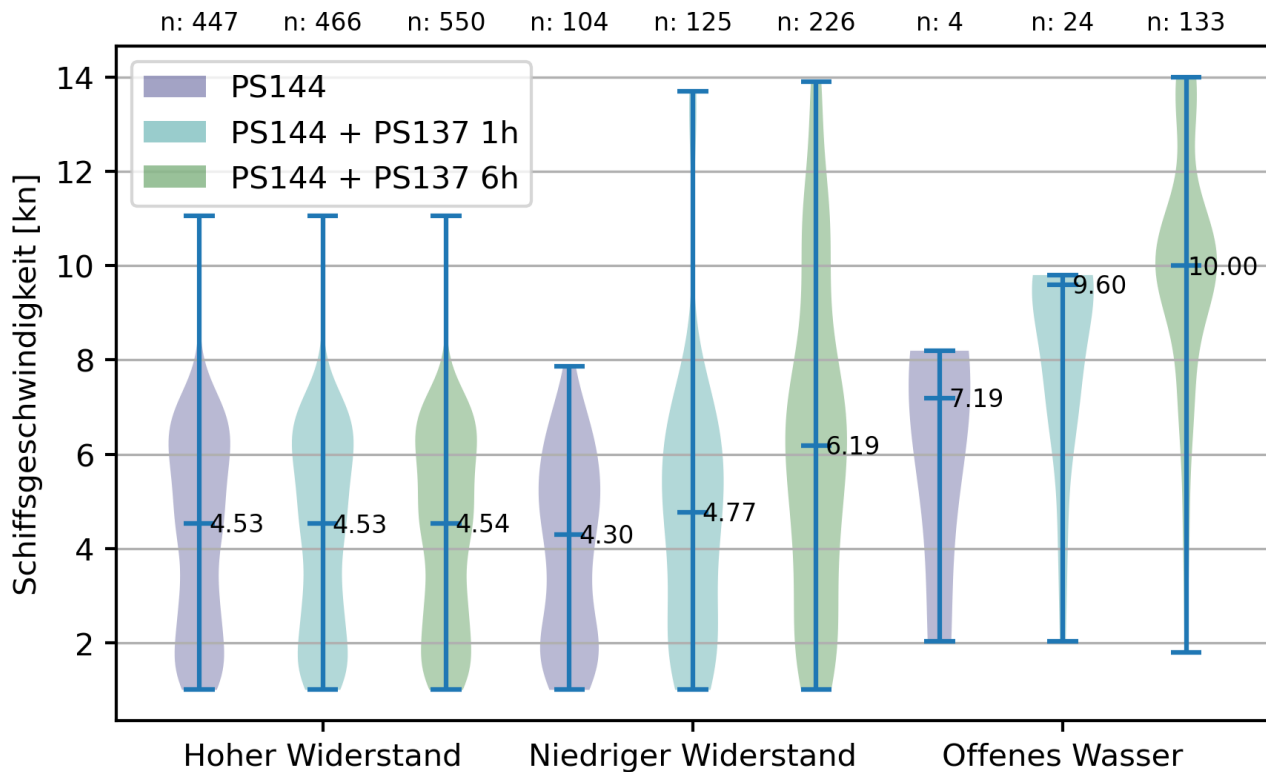


Abbildung 13: Schiffsgeschwindigkeit nach Eistyp auf Basis der Kampagnen PS137 und PS144. Die Anzahl der Datenpunkte n für die jeweilige Auswahl ist am oberen Rand der Grafik dargestellt. Vor allem für offenes Wasser schwankt diese Zahl deutlich.

2.1.4.3. Entwicklung eines lernenden Systems

Die Berechnung der Schiffsgeschwindigkeiten wie in [2.1.4.2.](#) wurde generalisiert, sodass sie für verschiedene Schiffe und Klassifikationen durchführbar ist. Die Ergebnisse wurden in einer Datenbank gespeichert, auf die vom Routenplanungsmodul zugegriffen werden kann. Der Eintrag in die Datenbank erfolgt manuell, nachdem die Daten auf Plausibilität geprüft wurden. Manuelle Einträge auf Basis von Expertenwissen, beispielsweise von Navigatoren an Bord, sind ebenfalls möglich.

Da bisher keine weiteren Datensätze zur Verfügung stehen, konnte das System nicht weitgehend getestet werden. Allerdings wurde untersucht, wie sich die Parameter ändern, wenn man die Datensätze der Kampagnen PS144 und PS137 kombiniert (Abbildung 13). Gegenüber den Ergebnissen für PS144 allein sind die berechneten Werte für eine Kombination der Kampagnen realistischer einzuschätzen. Eine größere Zahl an Datenpunkten würde die Ergebnisse noch deutlich robuster machen.

Die Resultate zeigen, dass eine vollkommen automatisierte Identifikation des Schiffsparameters bei der derzeitigen Datenlage nicht zu empfehlen ist. Zu viele Fehlerquellen fließen in die Berechnung ein und die identifizierten Geschwindigkeiten unterliegen einer großen Ungenauigkeit, sind teilweise sogar vollkommen abwegig. Realistische Einschätzungen der Navigatoren an Bord sollten dringend einbezogen werden.

Routenberechnung für verschiedene Geschwindigkeitskurven

Für die Kampagnen PS137 und PS144 ergaben sich verschiedene zum Teil deutlich voneinander abweichende Geschwindigkeitsprofile. Der Einfluss dieser Abweichungen auf die Routenberechnung soll im Folgenden für eine ausgewählte Strecke der Kampagne PS144 dargestellt werden. Aufgrund der oben gezeigten Ergebnisse, wurden 8 Geschwindigkeitsprofile abgeleitet, welche in Abbildung 14 visualisiert wurden.

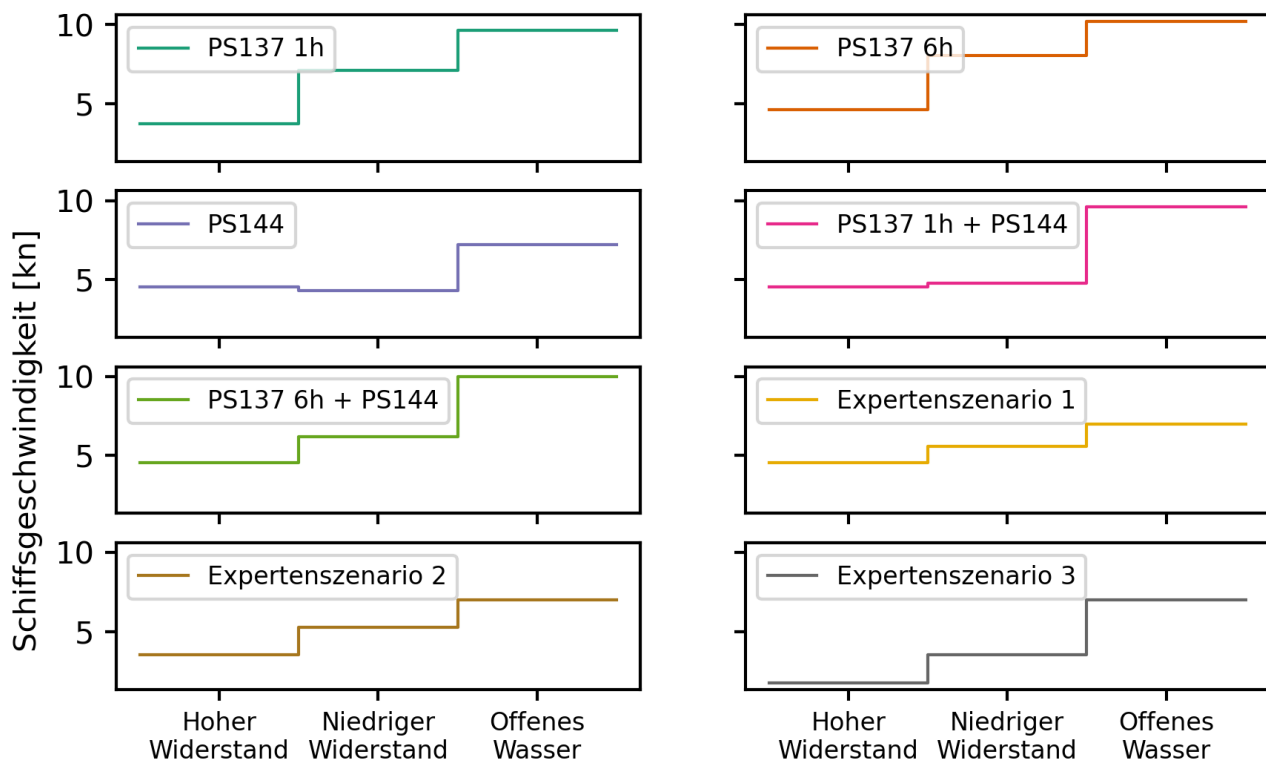


Abbildung 14: Geschwindigkeitsprofile für die FS Polarstern basierend auf den gewonnenen Daten aus den Kampagnen PS137 und PS144. Die drei Expertenszenarien basieren nicht auf den aus Klassifikationen gewonnenen Geschwindigkeiten, sondern wurden nach menschlichem Ermessen gewählt. Sie dienen dem Vergleich des Einflusses verschiedener Profile auf die Routenberechnung.

Abbildung 15 zeigt die Strecke zwischen den Stationen 147 und 148 der Kampagne PS144. Während der Kampagne wurde der von uns vorgeschlagene Route gefolgt, allerdings stimmten Abfahrtszeit und Ort, sowie die Koordinaten, welche schließlich für die Station 148 gewählt wurden, nicht exakt mit der damals empfohlenen Route überein. Im Nachgang des Tests wurden daher erneut Routen auf Basis der korrekten Orte und der korrekten Abfahrtszeit für verschiedene Geschwindigkeitsprofile berechnet. Zum Vergleich liegt der tatsächliche Fahrtverlauf der FS Polarstern vor. Auffällig ist zunächst, dass es zwei Gruppen von Routenvorschlägen gibt. Während die meisten Vorschläge einen fast direkten Weg zum Ziel empfehlen, resultieren die Geschwindigkeitsprofile basierend auf der Kampagne PS137 und das Expertenszenario 3 in den tatsächlichen Fahrtverlauf ähnlichen Routen. Wie gut diese Routen gewesen wären und wie zutreffend die berechneten Fahrtzeiten gewesen wären, lässt sich nicht feststellen. Da sich die Navigatoren an Bord jedoch aufgrund ihrer Erfahrung

und auch aufgrund der Terra-SAR-X Bilder, die an Bord vorlagen, gegen den direkten Weg entschieden haben, kann angenommen werden, dass diese Routenvorschläge die Gesamtfahrtzeit unterschätzt haben. Die beiden Geschwindigkeitsprofile basierend auf der Kampagne PS137 unterschätzten die Fahrtzeit ebenfalls, um 55min (PS137 1h) bzw. 74min (PS137 6h). Das Expertenszenario 3 prognostiziert die Fahrtzeit am besten, mit einer Überschätzung von 40min. Dabei entsteht diese Abweichung vor allem im zweiten Teil der Route, nachdem sie den tatsächlichen Track kreuzt. Die beiden anderen Vorschläge erreichen diesen Kreuzpunkt deutlich früher als das Schiff, verlaufen von dort aus aber zeitlich fast parallel zum tatsächlichen Track.

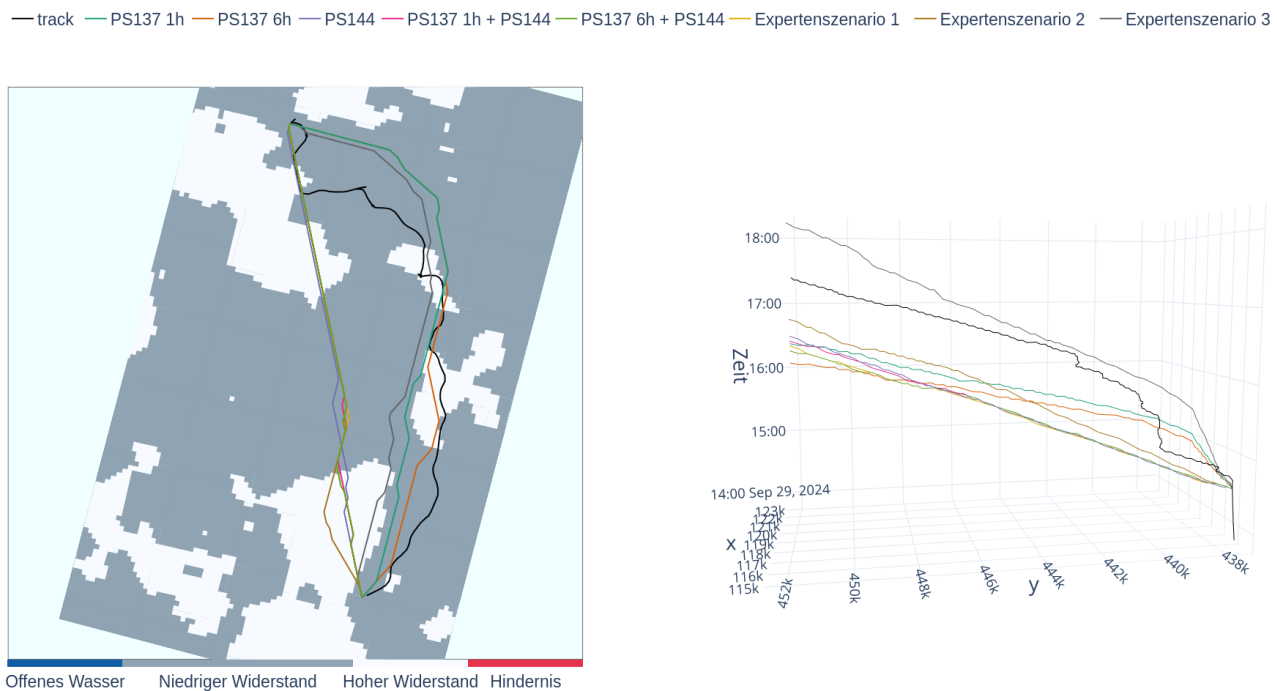


Abbildung 15: Routenvorschläge für den Abschnitt zwischen den Stationen 147 und 148 der Kampagne PS144 in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsprofils. Links: Räumliche Darstellung inklusive Eistypen zu Beginn des Fahrtabschnitts. Rechts: Räumlicher und zeitlicher Verlauf der Routenvorschläge. Nur drei Profile resultieren in einer der tatsächlich gefahrenen Strecke (schwarz) ähnlichen Route. Die beiden Profile basierend auf der Kampagne PS137 unterschätzen die Fahrtzeit dabei, während das Expertenszenario 3 sie überschätzt.

Aus den Beobachtungen an Bord ist bekannt, dass die Klassifikation der Eistypen im Bereich zwischen den Stationen 147 und 148 Schwächen hatte. Im ersten Fahrabschnitt, welcher bis etwa zum Kreuzpunkt des tatsächlichen Tracks mit den Routenvorschlägen reicht, ist das Schiff auf dünnes Eis (ca. 30cm) mit mehreren mehrjährigen Eisschollen getroffen. Im zweiten Abschnitt, folgte es einem dünn überfrorenen Lead. Dieser taucht in der für die Routenberechnungen verwendeten Klassifikation nicht auf. Stattdessen wurde größtenteils niedrigerer Widerstand erwartet. Solche Fehler in der Klassifikation führen zu einer fehlerhaften Prognose der Fahrtzeit. Statt der Geschwindigkeit für offenes Wasser beziehen sich die Routenvorschläge in diesem Fall auf Eis mit niedrigem Widerstand. Eine gut abgebildete Geschwindigkeit in niedrigem Eiswiderstand bedeutet in diesem Fall also, dass das Schiff mit dieser Geschwindigkeit im offenen Wasser fuhr. Daraus lässt sich schließen, dass die Werte aus den Profilen PS137 1h bzw. 6h, mit 7-8kn eine gute Abschätzung für die

Geschwindigkeit der FS Polarstern in Leads darstellen. Diese Einschätzung wurde auch im Gespräch mit den Navigatoren an Bord gewonnen.

Die Klassifikation im ersten Abschnitt stimmt dagegen mit der Beobachtung überein, was darauf hindeutet, dass der Eistyp mit höherem Widerstand besser von Expertenszenario 3 abgebildet wird.

Insgesamt kann geschlussfolgert werden, dass eine exakte Klassifikation die Berechnung von Geschwindigkeitsprofilen signifikant verbessern würde.

2.1.5. AP 5 – Prozessoptimierung des Vorhersagetools

Im Vorgängerprojekt FAST-CAST wurde ein Modell auf Basis eines neuronalen Netzes entwickelt, welches die Laufzeit der Driftvorhersage deutlich verbessern konnte. Dieses Ersatzmodell wurde für eine spezielle Eis- und Driftsituation getestet und sollte nun im Rahmen dieses Arbeitspaketes weiterentwickelt werden. Dazu sollten zunächst die Grenzen der Anwendbarkeit analysiert und das Modell dann generalisiert werden. Ein besonderes Augenmerk sollte dabei auf die Verallgemeinerung für irreguläre Gitter gerichtet werden. Weiterhin sollte die Einbindung von weiteren Eisdriftmodellen ermöglicht bzw. verbessert werden.

2.1.5.1. *Analyse des FAST-CAST 1 Ersatzmodells*

Das FAST-CAST 1 KI-Ersatzmodell wurde vor allem auf seine Anwendbarkeit bei variierenden Inputdaten, die allgemeine Performance im Vergleich zum PRIIMA Warping Algorithmus, den es ersetzen sollte, und seine Architektur untersucht. Es stellte sich heraus, dass das Ersatzmodell zwar eine deutliche Laufzeitverbesserung gegenüber PRIIMA erreicht hat, aber nur für ganz bestimmte Datenformate funktioniert. Zu verschiebende Satellitenbilder brauchen zu jeder Zeit 72 gleichmäßig angeordnete Ground Control Points (GCPs) sowie eine unveränderliche räumliche Auflösung von 3200x2800 Pixeln. Die Anwendbarkeit des Ersatzmodells war damit stark eingeschränkt, da die benötigten Inputdaten durchaus unterschiedliche Formate und Größen aufweisen. Des Weiteren wurde festgestellt, dass das Ersatzmodell vor allem Verschiebungen innerhalb einer Satellitenszene nicht mit der gleichen Genauigkeit wie der PRIIMA-Algorithmus abbilden kann. Statt interne Variationen der Drift in einer bestimmten Region darzustellen, wurde die Szene eher als Ganzes verschoben, was besonders in Regionen mit Landmassen unrealistische Ergebnisse liefert. Dies ist vor allem auf den sehr limitierten Trainingsdatensatz zurückzuführen, der sich auf wenige, von gleichmäßiger Drift dominierte Regionen beschränkte. Die Eisdrift ist dynamisch und weist in unterschiedlichen Regionen der Arktis und Antarktis extreme Unterschiede auf. Das Ersatzmodell, in der analysierten Form, ist damit nicht global anwendbar und hätte erheblich mehr Trainingsdaten benötigt. Eine komplette Neuausrichtung der Trainingsdatensätze, möglicherweise hin zu randomisierten Driftdaten, wäre für eine bessere Anwendbarkeit nötig.

Der in FAST-CAST 1 entwickelte Ansatz basiert auf der zeitlichen Vorhersage eines vollständigen Gitter-basierten SAR-Bildes mittels Morphing. Die Anwendung dieses Verfahrens auf klassifizierte Bilder führt zu einer Verfälschung der Eisstypen durch Interpolation. Bei Nutzung der Methode müsste demnach zuerst die Vorhersage der SAR-Bilder stattfinden. Anschließend müsste dann jedes der vorhergesagten Bilder einzeln klassifiziert werden, was den Nutzen der Laufzeitreduktion zunichte machen würde. Im Lauf des Projektes hat sich herauskristallisiert, dass es für einen Routing Algorithmus von Vorteil ist nicht mit Raster-Daten, sondern mit Vektor-Daten zu arbeiten. Zum einen ist das für den Road-Mapping Ansatz nötig, da hier ein Graph auf Basis von einzelnen Features d.h. zusammenhängenden Gebieten mit gleicher Eisbedeckung erzeugt wird. Auch für einen Gitter-basierten A*-Ansatz bieten Vektor-Daten einen Vorteil: so kann die Länge des

Streckenabschnitts durch ein Feature direkt analytisch bestimmt werden. Bei Verwendung von Raster-Daten wurde hingegen eine Strecke in Teilabschnitte aufgeteilt und für jeden Teil durch Abtastung eine Klasse bestimmt. Dadurch konnte die tatsächliche Länge angenähert werden. Basierend auf der somit geänderten Anforderung wurden die als Raster-Daten bereit gestellten Klassifikationen (Raster-Daten) durch Polygonalisierung in Vektor-Daten umgewandelt. Eine Polygonalisierung der vorhergesagten und dann klassifizierten SAR-Bilder wäre zwar möglich, ginge aber mit weiteren Fehlern einher. Deutlich sinnvoller ist die Vorhersage der bereits polygonalisierten Klassifikation. Da der in FAST-CAST 1 entwickelte Ansatz nur Raster-Daten unterstützt, wurden im Folgenden eine neue Methode implementiert, welche direkt mit Vektor-Daten arbeitet.

Zusammenfassend zeigte die Analyse des Ersatzmodells, welches in FAST-CAST 1 entwickelt wurde, dass umfängliche Anpassungen notwendig wären, um eine Generalisierung zur globalen Anwendung zu erreichen. Wir haben uns daher für den weiteren Verlauf von FAST-CAST2 für eine Form der Vorhersage entschieden, die im Folgenden näher erläutert wird.

2.1.5.2. Implementierung

In diesem Abschnitt wird die derzeitige Implementierung des Vorhersagetools dargestellt, welche eine globale Anwendung ermöglicht und in

Abbildung 16 schematisch dargestellt ist.

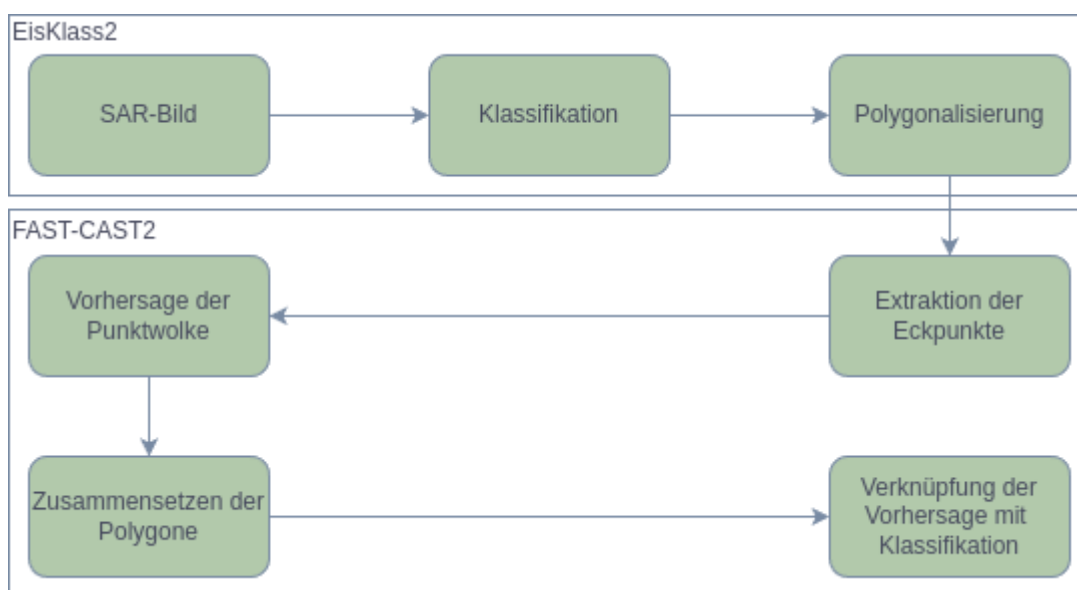


Abbildung 16: Arbeitsablauf des Vorhersagetools.

Ausgangspunkt ist jeweils ein SAR-Bild, im Projekt wurden vorrangig Sentinel-1-Daten verwendet. Das Bild sollte die geplante Fahrstrecke abdecken und wegen der veränderlichen Eissituation möglichst zeitnah aufgenommen sein. Ein SAR-Bild beinhaltet viele Graustufen, im Fall von Sentinel-1 zudem in zwei Polarisationskanälen. Bevor es zur Eisnavigation verwendet werden kann, muss es daher zunächst in verschiedene Bereiche unterteilt bzw. klassifiziert werden. Eine Meereis-Klassifikation für Sentinel-1-Daten wurde im während der Laufzeit von FAST-CAST2 beendeten mFUND-Projekt EisKlass2 entwickelt und wird hierfür

angewendet (Wiehle et al., 2024). Die Klassifikation erfolgt hierbei KI-basiert auf Basis eines Convolutional Neural Network (CNN). Das Ergebnis ist ein Bild, das jedem Pixel des Eingangsbildes eine Eisklasse zuweist; Abbildung 17 zeigt ein Beispiel hierfür. Mit SAR kann die Rauigkeit des Eises festgestellt und damit auf Alter und Dicke rückgeschlossen werden, entsprechend sind die Klassen nach offenem Wasser und vier verschiedenen Eisaltern unterteilt.

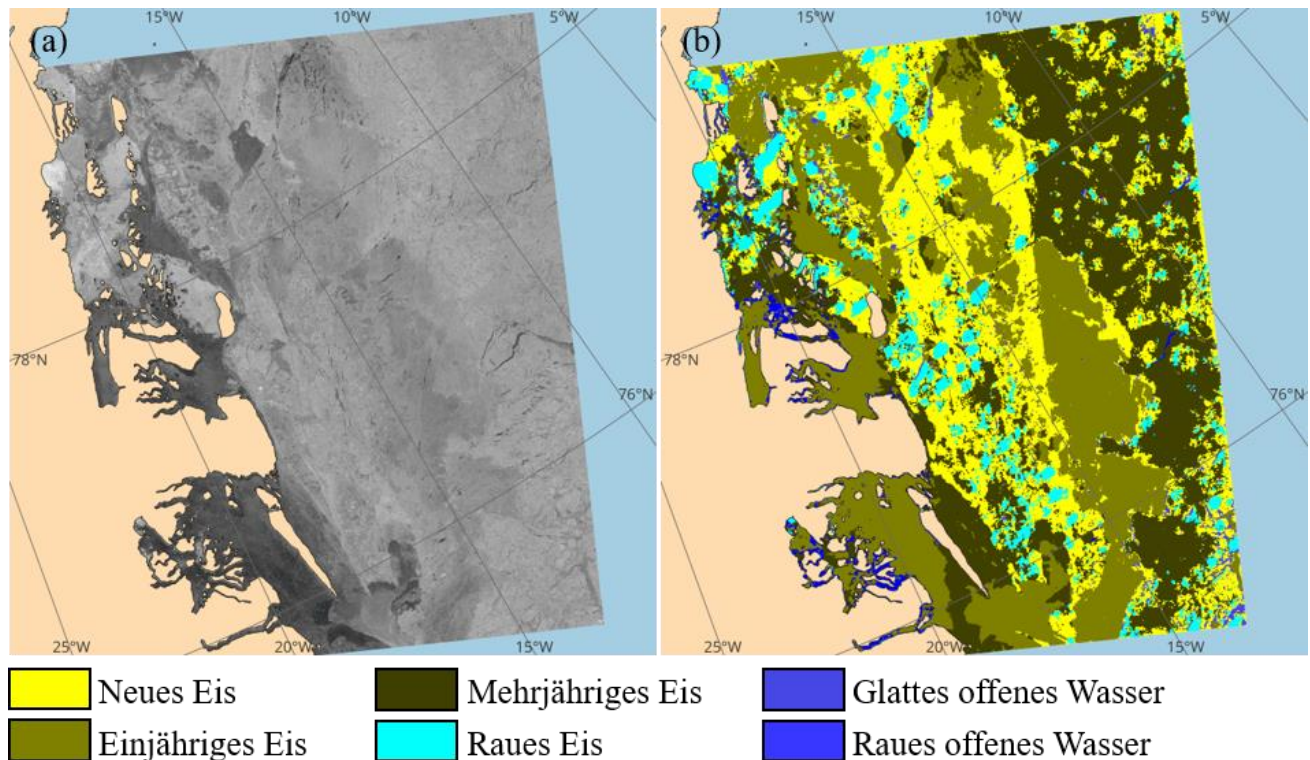


Abbildung 17: (a) Sentinel-1-Aufnahme an der ostgrönländischen Küste (b) resultierende Klassifikation in verschiedene Meereistypen

Bereits im Projekt Eisklass2 wurde der erste Verarbeitungsschritt des klassifizierten SAR-Bildes implementiert, in dem Raster-Klassifikationen in Vektor-Daten umgewandelt werden. Dies bedeutet, dass benachbarte Pixel gleicher Klasse zu Vektor-Geometrien (Polygonen) zusammengefasst und zusammen mit der Information, um welchen Eistyp es sich handelt in einem Feature abgespeichert werden. Anschließend erfolgt die Projektion der mit geographischen Koordinaten georeferenzierten Vektor-Daten in das vom Routing-Algorithmus verwendete Polar Stereographische Koordinatensystem. Für FAST-CAST2 musste der Dienst so erweitert werden, dass die Eisinformationen über eine Schnittstelle (vgl. [2.1.3.](#)) an die Universität ausgeliefert werden, wo dann die weitere Verarbeitung erfolgt.

Die Klassifikation wird dort zunächst in einer Datenbank abgelegt. Anschließend werden relevante Punkte der Klassifikation extrahiert. Dazu werden für alle Polygone der Klassifikation die Eckpunkte der Außenhülle und der eventuell vorhandenen inneren Löcher in einem Datensatz abgelegt. Eine singuläre Liste dieser Punkte wird dann zur Übertragung an ein Tool zur Vorhersage der Punktwolke vorbereitet. Dazu wird jeder Punkt mit einer eindeutigen Kennung versehen, wofür UUIDs (Universally Unique Identifier) verwendet

wurden. Um Informationen über die Struktur der Klassifikation nicht zu verlieren, müssen auch für alle Polygone der Klassifikation die den Eckpunkten entsprechenden IDs in der richtigen Anordnung gespeichert werden.

Anschließend erfolgt die Vorhersage der Punktwolke. Hierzu führen wir ein Value-Adding-Verfahren durch, das eine Kombination der Eckpunkte der Meereistyp-Polygone und der Driftfelder aus Meereisdriftvorhersagen liefert: Der Tracking-Algorithmus arbeitet in Fließkommaauflösung und kombiniert Informationen mit verschiedenen räumlichen Skalen (Meereiskarte - 140 m Auflösung, Meereisdriftvorhersage - 12 km Auflösung) in einen Datensatz. Wir berechnen stündliche Zeitscheiben der getrackten Eckpunkte. Maximal kann so der Zeitraum von 9 Tagen vorausberechnet werden, der durch die Modelldaten abgedeckt ist. Zur Zeitersparnis wurde die Voraussage im durchgeführten Pilottest meistens auf 24-48 Stunden reduziert, was zur geschätzten Dauer der zu berechnenden Routen passte. Lag das zu verwendende SAR-Bild bereits einen Tag oder mehr in der Vergangenheit, wurden für die vergangenen Tage die jeweils besten Forecasts („Reanalyse“-Produkt, siehe [2.1.8.1.47](#)) verwendet. Das Ergebnis ist eine räumlich-zeitliche Meereiskarte in Form einer Punktwolke (Abbildung 18).

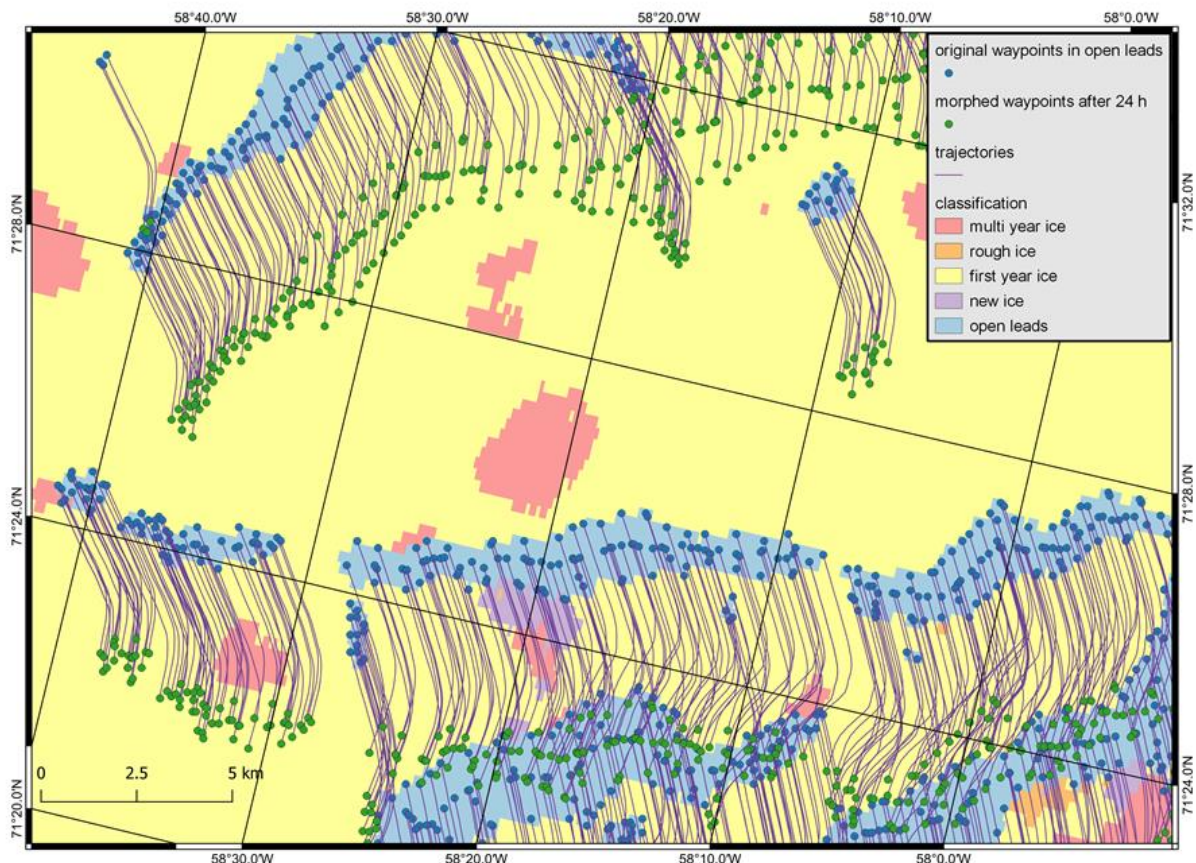


Abbildung 18: Schematische Darstellung der dynamischen Meereiskarte. Zur besseren Sichtbarkeit sind nur Wegpunkte in offenen Fahrinnen visualisiert (blau). Die Trajektorien (lila) zeigen den Weg der Verdriftung an. Die vorhergesagte Position der offenen Fahrinnen nach 24 h ist grün dargestellt.

Die einzelnen Punktwolken für die verschiedenen Vorhersagezeitpunkte müssen anschließend wieder zu Polygonen zusammengesetzt werden. Dazu wird auf die zuvor gespeicherte Struktur der Klassifikation zurückgegriffen. Die ursprünglichen Koordinaten jedes Eckpunktes werden jeweils durch die verdrifteten Koordinaten ersetzt. Abschließend werden eventuell beschädigte Geometrien repariert. Die zusammengefügte vorhergesagten Klassifikationen werden im nächsten Schritt in der Datenbank für Eis-Informationen abgelegt.

Datenbank

Die Datenbank gibt Auskunft darüber, wie die Eisbedingung in einem gegebenen Gebiet zu einer gegebenen Zeit ist. Des Weiteren ist es möglich, ein Eis-Feature über die Zeit zu verfolgen. Außerdem ist der Import von neuen Informationen (Beobachtungen sowie Vorhersagen) möglich. Zudem gibt es eine Möglichkeit, dass das Routing-Modul benachrichtigt wird, sobald neue Daten vorliegen. Dies ist wichtig, weil es Einfluss auf einen Routenvorschlag haben kann.

Das verwendete Datenbank-Schema ist in Abbildung 19 dargestellt. Die `classification` stellt dabei die Gesamtheit aller aus einer Klassifikation ermittelten Polygone von Eistypen dar. Einem `ice\_regime` können mehrere `ice\_regime\_slices` zugeordnet werden, welche jeweils für einen bestimmten Zeitpunkt gültig sind.

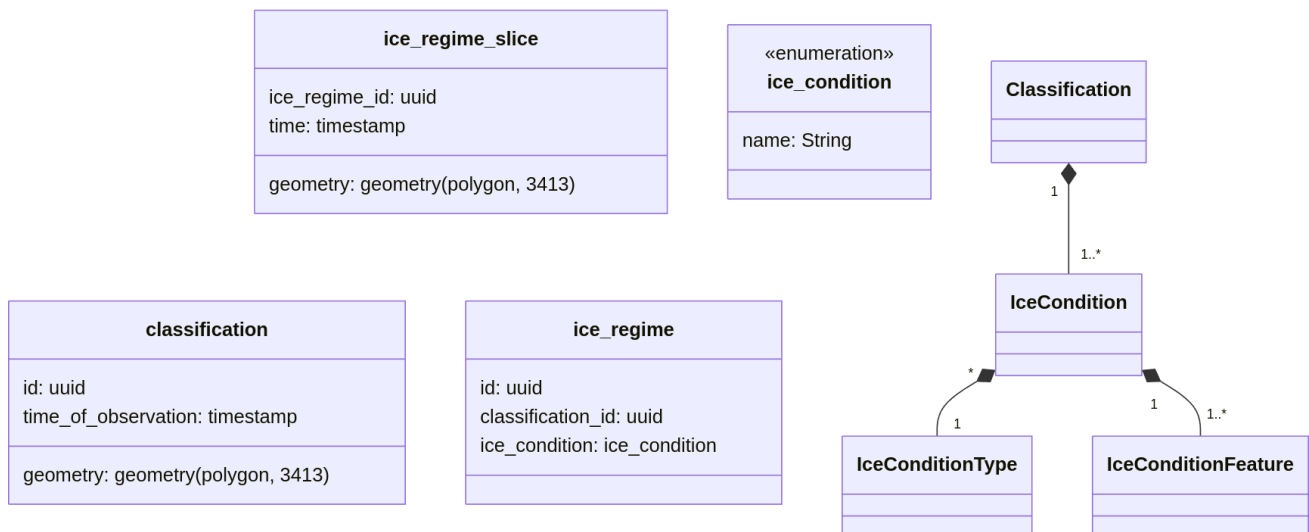


Abbildung 19: Schema der Datenbank für Eisinformationen.

Dadurch, dass `ice\_regime\_slices` wissen, zu welchem `ice\_regime` sie gehören, müssen Meta-Informationen nur einmal abgelegt werden. Die durch die vorhergegangenen Schritte erzeugten Polygone, mit einem Zeitstempel versehen, werden in einer PostGIS-Datenbank abgelegt. Durch Verwendung von PostGIS sind räumliche Abfragen sofort möglich. Über ein Interface werden Anfragen vom Routing-Modul entgegengenommen und angefragte Daten ausgeliefert. Eine weitere Ausbaustufe ist, dass das Routing-Module bei z.B. neuen Satellitendaten in der relevanten Region automatisch benachrichtigt wird, daraufhin die

Daten abrufen und diese dann entsprechend beim Berechnen der Route berücksichtigen kann.

2.1.6. AP 6 – Operationalisierung der Eisdriftvorhersagen

2.1.6.1. *Definition und Einrichtung von Schnittstellen, Performance Level Indikatoren, Datenbanken und Serverstruktur*

Es wurden die nötigen Schnittstellen zum DWD und dem Copernicus Marine Service eingerichtet. Zusätzlich wurden die nötigen Serverstrukturen aufgebaut, um die relevanten Daten operational zu beziehen. Im Laufe des Projekts wurden tägliche Eisdriftvorhersagedaten auch in einer Datenbank gespeichert. Für die operationelle Routenberechnung ist es allerdings nicht erforderlich, Daten über längere Zeiträume in internen Datenbanken aufzubewahren. Alle relevanten Eisdriftvorhersagedaten der Vergangenheit sind über den Copernicus Marine Service abrufbar und werden daher nicht mehr intern gespeichert. Die Daten die während der FAST-CAST2 Routentests verwendet wurden, sind weiterhin archiviert.

2.1.6.2. *Operationeller Testbetrieb inklusive eines Monitoring-Systems*

Im Laufe des Projektes wurden täglich die relevanten Eisdriftvorhersage-Produkte abgerufen und für die Routenberechnung bereitgestellt. Die Nutzung der Eisdriftvorhersagen für die Verschiebung der Satelliten-Klassifikationen erfolgte dabei auf Abruf, zum Beispiel während der verschiedenen FAST-CAST2 Tests und in deren Vor-und Nachgang.

Der operationelle Betrieb wurde durch die Integration der Eisdriftvorhersagen IcySea sichergestellt. Eisdriftvorhersagen wurden den IcySea-Nutzern in Form von täglich aktualisierten Trajektorien angeboten (Abbildung 20). Diese operationellen Daten werden seit mehr als 12 Monaten dauerhaft bereitgestellt. Wenn Fehler in der Datenübertragung auftauchen, dann werden diese direkt an den Administrator gemeldet.

Damit wurden die geplanten Vorgaben zur operationellen Aktivität über einen längeren Zeitraum und zum Monitoringsystem für die Daten vollumfänglich erfüllt.

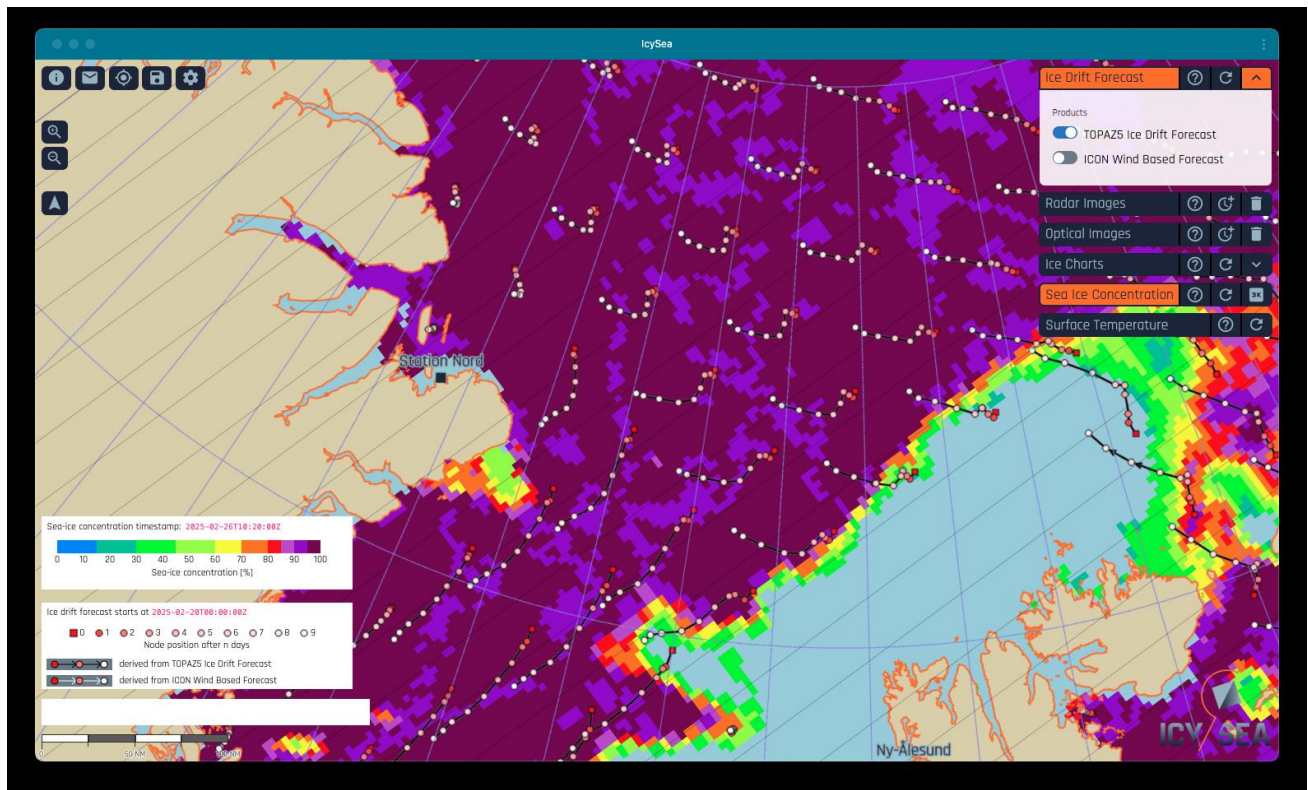


Abbildung 20: TOPAZ5 Eisdriftvorhersagetrajektorien in der Eisinformationsapplikation IcySea (Screenshot vom 26.02.2025). Die farbigen Punkte entlang der Trajektorien geben die vorhergesagte Position des Eises für die nächsten 1, 2, 3, ... 9 Tage an. Hinterlegt ist die Meereiskonzentration basierend auf passiven Mikrowellenmessungen des AMSR-2 Sensors der GCOM-W Mission (https://global.jaxa.jp/projects/sat/gcom_w/) der Japanese Space Exploration Agency (JAXA).

2.1.7. AP 7 – Testanwendung und Nutzerinteraktion

2.1.7.1. Definition des Testgebietes

Die Auswahl einer geeigneten Testregion für FAST-CAST2 beruhte auf einer Reihe von Kriterien:

- Regelmäßige Abdeckung der Region mit Radarsatellitenbildern (Sentinel-1, ESA)
- Regelmäßiger Schiffsverkehr in der Region
- Küstennähe der Region, um Flachwasser und Untiefen bestimmen zu können
- Kontakt zu Schiffen in der Region, um möglicherweise an Bord testen zu können

Drift+Noise konnte sein weitreichendes Netzwerk in der polaren Schifffahrt nutzen, um verschiedenen Möglichkeiten aufzutun. Die möglichen Testregionen:

- Atka-Bucht, Antarktis - Anfahrt der Neumayer III Station durch die *FS Polarstern* (Alfred-Wegener-Institut)
- Davis/Mawson Station, Antarktis - Anfahrt der australischen Forschungsstationen durch *RSV Nuyina* (AAD)
- Rifkol Region, Westgrönland - Dauerhafte Versorgungsroute für grönländische Siedlungen durch Royal Arctic Line (RAL) Schiffe
- Antarktische Halbinsel - Hoch-frequentierte Region für die Expeditionskreuzfahrt

Eine detaillierte Erklärung, warum die Atka-Bucht, die Anfahrt zu den australischen Stationen und die Antarktische Halbinsel nicht für den Test ausgewählt wurden findet sich im ausführlichen Testbericht (auf Anfrage einsehbar).

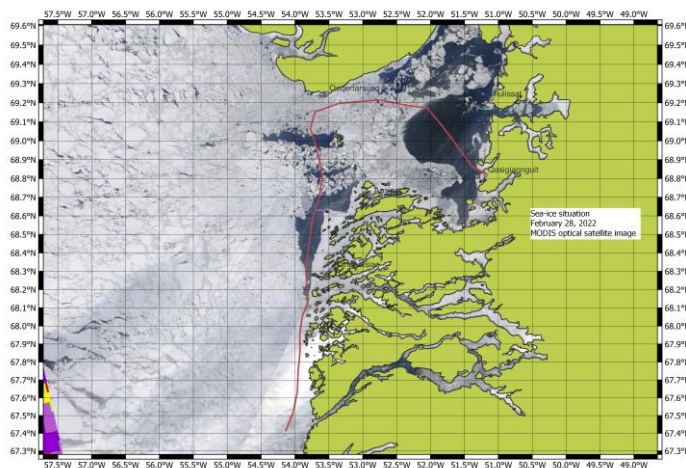


Abbildung 21: Übersicht der nördlichen Rifkol Region, inklusive einer eingezeichneten Route. (bereitgestellt von Thomas Bøggild, DanPilot Greenland)

Nachdem Thomas Bøggild (Eispilot bei DanPilot Grönland) einen ausführliche Vortrag zu den Versorgungen der Siedlungen entlang der Westküste Grönlands im Konsortium gehalten hatte (06.12.2022), wurde die Rifkol Region als primäre Testregion ausgewählt (Abbildung 21). Bis auf die Mitfahrt auf einem der Schiffe, waren zu diesem Zeitpunkt des Projektes die vorgegebenen Kriterien vollständig erfüllt.

Im Laufe des Projektes tat sich dann eine zusätzliche Möglichkeit auf, einen FAST-CAST2 Routentest auf dem deutschen Forschungseisbrecher *RV Polarstern* in der zentralen Arktis durchzuführen.

2.1.7.2. Vorbereitung Testanwendung an Bord

Über den Kontakt zu Thomas Bøggild (DanPilot) tat sich Anfang 2024 die Möglichkeit auf, auf dem Schiff *Irena Arctica* der Versorgungsfirma Royal Arctic Line einen ersten FAST-CAST2 Routentest durchzuführen. Die Fahrt war für Ende März 2025 geplant und führte von Nuuk nach Ilulissat und zurück. Im Vorfeld der Fahrt wurden die nötigen Webservices eingerichtet und einige vorbereitende Meetings innerhalb des FAST-CAST2 Konsortiums, aber auch mit den verantwortlichen Personen auf dem Schiff, abgehalten. Speziell die Funktionen zur Darstellung der klassifizierten Sentinel-1 Satellitenbilder und der damit errechneten Routen wurden in der Vorbereitung auf die Fahrt in IcySea implementiert.

Ein weiterer Test ergab sich im Rahmen der PS144 Expedition auf der *RV Polarstern* für den Zeitraum von August bis Oktober 2024. Da die Fahrt der *RV Polarstern* in die zentrale Arktis führte und damit außerhalb der zu diesem Zeitpunkt üblichen Abdeckung durch Sentinel-1, wurde im Vorlauf eine erweiterte Abdeckung mit der ESA vereinbart. Nur durch die freundliche Unterstützung des Sentinel-1 Missionsmanagements war ein Test während der Expedition überhaupt möglich und wir bedanken uns herzlich bei der ESA für die Unterstützung.

Die Routenberechnungen während der Fahrt auf *Irena Arctica* fanden auf stationären Klassifikationen von Sentinel-1 Bildern statt. Für den Test während der PS144 Expedition wurde die Berechnung auf dynamischen Bildern (unter Einbeziehung der Eisdrift) vorbereitet.

Mehr Details zur Vorbereitung der Tests entnehmen Sie bitte dem Testbericht (auf Anfrage einsehbar)

2.1.7.3. Durchführung des Tests an Bord

Im Rahmen des FAST-CAST2 Projekts wurden zwei sehr erfolgreiche und aufschlussreiche Tests durchgeführt. Der erste Test in der Rifkol Region lieferte einige wichtige Erkenntnisse, die dann während des Tests auf der *Polarstern* direkt angewendet werden konnten. Auf beiden Fahrten waren Mitarbeiter von Drift+Noise an Bord, sodass die Präsentation der Routenvorschläge deutlich vereinfacht wurde. Außerdem erlaubte die direkte Beteiligung an den Fahrten einen unmittelbaren Austausch und wichtige Diskussionen mit den verantwortlichen Offizieren. Beide Fahrten wurden zusätzlich von einem Team an Land permanent unterstützt, sodass auf Nachfragen und Feedback vom Schiff direkt reagiert werden konnte und kurzfristige Planänderungen von Schiffsseite aufgefangen werden konnten. Für die detaillierten Analysen und Ergebnisse der beiden Tests verweisen wir hier wieder auf den ausführlichen Testbericht (auf Anfrage einsehbar).

An dieser Stelle möchten wir uns nochmal bei allen Beteiligten bedanken, die uns diese wertvollen Tests ermöglicht haben. Ganz besonderer Dank gilt den Besatzungen der *Irena Arctica* und der *RV Polarstern*, die immer offen für unsere Vorschläge waren, sie bereitwillig mit uns besprochen haben und uns einmalige Einblicke in die Schiffsnavigation im Eis ermöglicht haben.

Der ausführliche Bericht zu Testfahrten auf der *Irena Arctic* (Rifkoregion, Grönland) und der *FS Polarstern* (zentraler Arktischer Ozean) steht allen Projektpartnern zur Verfügung und

kann auf Anfrage eingesehen werden. Als Kontaktperson fungiert H. Jakob Bünger von Drift+Noise.

2.1.8. AP 8 – Validierung

Ausgangssituation des Projekts war die Verwendung von Modell-Driftdaten auf SAR-Produkte, um daraus möglichst genaue Kursempfehlungen abzuleiten. Die Akzeptanz eines solchen Produkts hängt sehr von der erreichten Genauigkeit bzw. der Zuverlässigkeit der resultierenden Kursempfehlungen ab. Kern dieses Arbeitspaktes ist daher eine umfassende Analyse der Abweichungen, die sich aus der Verwendung der Modelldaten ergeben. Zudem wurde auch untersucht, wie sich die verfügbaren Modelle voneinander unterscheiden.

Zum Start des Projekts war beim DLR ein Eisdrift-Prozessor vorhanden, der die Eisdrift zwischen zwei SAR-Aufnahmen berechnen kann. Dieser wurde durch Driftbojen validiert und eine hohe Genauigkeit nachgewiesen (Frost, 2018). Dieser Eisdrift-Prozessor dient daher als Ausgangspunkt zum Vergleich mit Modelldrift. Das bedeutet, dass die Validierung nur dann erfolgen kann, wenn es ein entsprechendes SAR-Szenenpaar gibt - zum einen erfolgt die Berechnung basierend auf beiden Bildern, zum anderen basierend auf den Modelldaten ab dem Aufnahmezeitpunkt des ersten Bildes.

2.1.8.1. *Verwendete Modelldaten*

Wir verwenden die Modelle TOPAZ und neXtSIM zur Vorhersage der Meereisdrift. Diese Daten werden frei verfügbar vom Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) bereitgestellt (CMEMS 2015, 2020). Von den Modelldaten sind zwei Versionen verfügbar: in der Rückschau die jeweils eintägige Vorhersage ("Reanalyse"-Produkt) und in der Vorschau die Neun-Tage-Vorhersage ab dem jeweils aktuellen Tag. Das Anwendungsszenario im Projekt ist eine anstehende mehrtägige Schifffahrtsroute mit vorgegebenem Start- und Endpunkt, deren schnellstmöglicher Kurs zum Startzeitpunkt bestimmt werden soll. Entsprechend kommt hier nur die zweite Version der Modelldaten in Frage, da nur diese mehrtägige Vorhersagen beinhaltet und vor Fahrtbeginn verfügbar wäre. Zum Sammeln der Daten haben wir folglich täglich die verfügbaren Neun-Tage-Vorhersagen abgerufen und eine Hindcast-Auswertung über zwei Wintersaisons mit der Version 2022/2023 und der Version 2023/2024 der beiden Modelle durchgeführt.

Das Modell TOPAZ4, das bis zur Saison 2022/2023 zum Einsatz kam, verwendet einen Ensemble-Kalman-Filter (EnKF), der auf dem HYCOM-Modell basiert. Es verwendet eine viskos-plastische Rheologie und wird auf einem regelmäßigen Gitter mit einem Abstand von 12,5 km und stündlicher zeitlicher Auflösung interpoliert. TOPAZ5 ist die aktuellste verfügbare Version des TOPAZ-Modells und wird seit Saison 2023/2024 von CMEMS bereitgestellt. Neben anderen Verbesserungen wurde die Modellauflösung auf 6,25 km verdoppelt.

Als zweite Datenquelle verwenden wir das neXtSIM Meereisdrift-Vorhersagedatenprodukt. Dieses Modell arbeitet mit einer elastisch-spröden Rheologie und verwendet einen Gitterabstand von 10 km auf einem adaptiven Lagrangeschen Dreiecksgitter. Im bereitgestellten operationellen Produkt werden die Werte für die Meereisdrift aus dem adaptiven Lagrangeschen Gitter auf ein festes regelmäßiges Gitter mit 3,25 km Gitterabstand interpoliert. Auch hier gab es zur Saison 2023/2024 ein Update.

In diesem Arbeitspaket werden die oben genannten vier Produkte zur Vorhersage der Meereisdrift mit Driftmessungen auf der Grundlage von Satelliten-SAR-Daten bewertet. Dabei werden die Modelle auch mit ihren jeweils eigenen Qualitätsinformationen verglichen.

2.1.8.2. *Vorarbeiten zur Validierung*

In der Validierung verglichen werden sollten Driftfelder aus SAR-Szenen mit Driftfeldern aus Modellen. Die SAR-Driftfelder ergeben sich aus der Unterteilung des SAR-Bilder in einzelne Bild-Patches, in deren Mittelpunkt jeweils ein Driftwert ausgegeben wird. Da die Modell-Gitterpunkte und -auflösung von den Modellanbietern vorgegeben werden, musste zunächst eine Routine entwickelt werden, die die Modelldrift von den Startpunkten des SAR-Driftfeldes ausgehend interpoliert. Hierzu wurde eine Inverse-Distance-Weighting Variante von Runge-Kutta 4ter-Ordnung (RK4-IDW) angewendet.

Weitere Vorarbeiten zur Validierung wurden im Rahmen einer Masterarbeit gesammelt (Jonathan Bahlmann, „Sea Ice Drift Estimation From Sentinel-1 SAR Images“, 2023). Hier wurde der SAR-Driftprozessor bei Verwendung von Sentinel-1-Daten durch Driftvergleiche mit Bojen validiert, mögliche Vorprozessierungen der Sentinel-1-Produkte untersucht, sowie die Unterschiede bei verschiedenen Parameteroptionen des SAR-Driftprozessors verglichen. So konnten für die weiteren Analysen die Einstellungen mit optimaler Genauigkeit verwendet werden.

2.1.8.3. *Analyse-Prozessor*

Zur eigentlichen Durchführung der Validierung wurde ein Prozessor entwickelt, der das räumlich-zeitliche Drift-Modell-Feld verwendet, um in Form einer Testteilchenverfolgung von vorgegebenen Startpunkten die Endpunkte der Drift-Trajektorien zu bestimmen. Trajektorien und Messungen werden hierbei beide ausgehend von einem regelmäßigen Gitter berechnet.

Für die Datenverarbeitung wurde hierzu ein Vektormodell verwendet. Dies bietet u.a. die Möglichkeit in Fließkommazahlen-Auflösung zu arbeiten. Außerdem ist eine hohe Flexibilität in den Anwendungsmöglichkeiten gegeben. Objektorientierte Programmierung, eine Nachbarschaftstopologie, Hashing und räumliche Indizierung erhöhen die Berechnungsgeschwindigkeit des implementierten Prozessors.

Damit die RK4-IDW-Methode anwendbar ist, wird zunächst in der zeitlichen Dimension in jedem Modell-Gitterpunkt mit kubischen Splines die Vorhersagemodell-Meereisdrift interpoliert. In der räumlichen Dimension wird mit einer linearen IDW-Methode zwischen den vier umgebenen Modellgitterpunkten interpoliert.

Um eine Vergleichbarkeit mit den Herstellerangaben der Modelle zu ermöglichen, wurden der Unterschied in der Driftgeschwindigkeit (BIAS), die Winkelabweichung (Angle) und die Entfernung zwischen dem Endpunkt der SAR-basierten Messung und dem Endpunkt der Modelltrajektorie (RMS separation distance) bestimmt. Darüber hinaus wurde die Repräsentation der natürlichen Deformation in den Modellen mit Hilfe einer räumlichen und zeitlichen Skalenanalyse untersucht und mit Literaturwerten verglichen. Abbildung 22 zeigt das räumliche Gitter, das für die Skalenanalyse angewendet wurde. Ausgehend von einem

500-m-Gitter wurden 1,5-km-, 3-km-, 6-km-, 12,5-km-, 25-km-, 50-km- und 100-km-Gitter festgelegt. Dies ermöglicht eine Deformationsanalyse mit Quadraten mit den Kantenlängen 1 km, 3 km, 6 km, 12 km, 25 km, 50 km, 100 km und 200 km. Zur Bestimmung des Gradienten der einzelnen Auflösungen wurden Sobel-Kernel in der entsprechenden Größe angewendet. Die Parameter total deformation, Scherung und Divergenz können dann direkt aus dem Gradienten berechnet werden.

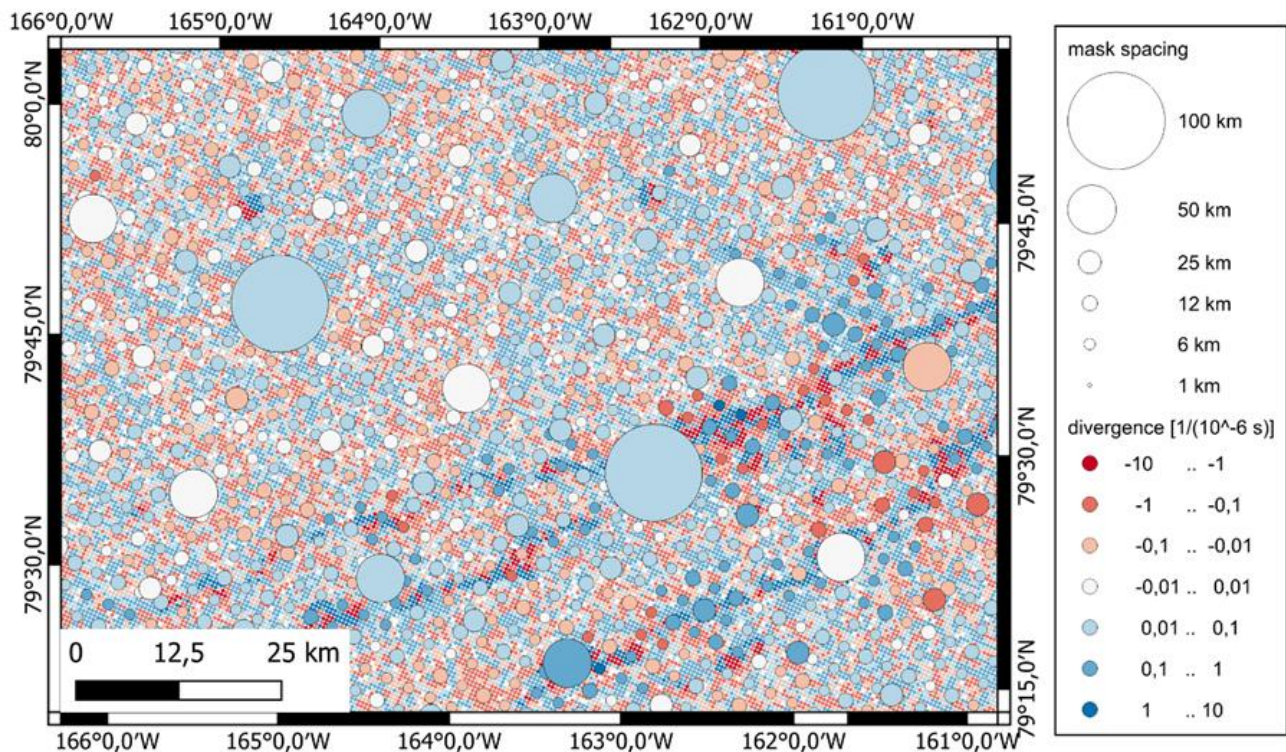


Abbildung 22: Veranschaulichung der Validierungsrechnungen mit verschiedenen Gittergrößen. Dargestellt sind die Gitterabstände mit 1 km, 6 km, 12 km, 25 km, 50 km und 100 km. Aus Gründen der Sichtbarkeit wurde darauf verzichtet, die 3 km Maske zu visualisieren. Jede Kreisgröße entspricht einem Maskenabstand und bildet ein regelmäßiges Gitter.

2.1.8.4. Validierungsdaten

Ab Projektstart wurde zur Beschaffung der Driftfelder und Modelldaten eine semi-automatische Prozesskette implementiert. Es wurden ab August 2022 bis Projektende täglich eine mehrtägige Vorhersage der Modelle TOPAZ und neXtSIM in ihrer aktuellen Version von CMEMS heruntergeladen.

Im Laufe der Entwicklung des Analyseprozessors wurde eine Teststudie in der nördlichen Baffin Bay, nahe der Westküste Grönlands, durchgeführt. Diese umfasste 26 SAR-basierte Driftfelder zwischen Oktober 2022 und Mai 2023 sowie die zugehörigen Modelldaten. Eine erste Evaluation zeigte, dass die Interaktion von Meereis mit der Küste in den Modellen fehlerhaft ist. Eine Rücksprache mit den Modellentwicklern ergab, dass es sich hierbei um falsch vorhergesagtes Arching handelt, d.h. die Bildung von horizontalen Bogenstrukturen im Eis bei der Interaktion mit Land. Diese treten in der Natur auf und verhindern ein Weiterdriften des Eises. Leider ist die Interaktion mit Land schwer zu modellieren und es kommt häufig zu einer fehlerhaften Vorhersage dieser Ereignisse in der Nähe von Land. Daher wurde für die

Evaluation der Modelle ein Datensatz erstellt, der Driftfelder sowohl an der Küste als auch auf dem offenen Ozean umfasst. Abbildung 23 zeigt die Verteilung der Testregionen über die Arktis. Für die erste Evaluierung wurden 219 Driftfelder aus Sentinel-1-Szenenpaaren berechnet und mit den Modellen TOPAZ4 und neXtSIM verglichen.

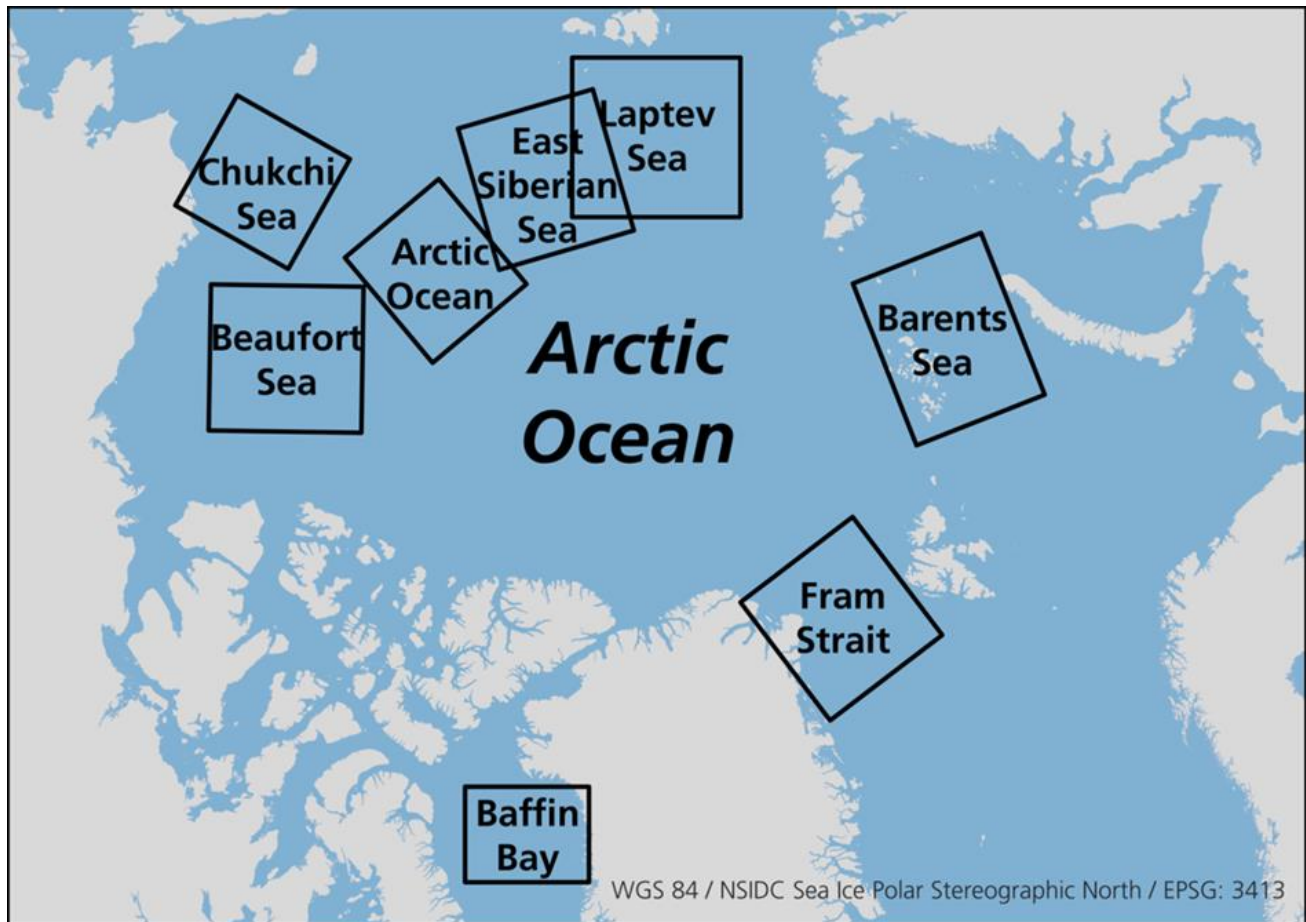


Abbildung 23: Regionen, in denen die Evaluierung durchgeführt wurde.

Im November 2023 kam es zu einer Umstellung der auf CMEMS verfügbaren Modelle auf TOPAZ5 und neXtSIM-F. Durch diese Veränderungen, deren Auswirkungen auf die Modellvorhersagen nicht abschätzbar waren, mussten beide Modelle neu evaluiert werden – eine weitere Verwendung der bisherigen Versionen war nicht möglich, da diese auf CMEMS nicht weiter angeboten werden. In einer zweiten Evaluierung wurde insbesondere auf Veränderungen zu den alten Versionen der Modelle in allen Regionen geachtet. Darüber hinaus wird das Frühjahr untersucht, da dies der kritische Zeitraum für die Versorgung der Siedlungen und Stationen in der Arktis ist (Nutzerfeedback, Royal Arctic Line). Hierzu wurden 81 SAR-basierte Driftfelder im Zeitraum von Januar 2024 bis Mai 2024 analysiert.

Aus den Modelldaten wurden mit Hilfe einer Runge-Kutta-Methode 4ter-Ordnung korrespondierende Trajektorien-Felder abgeleitet und mit den Driftfeldern verglichen. Untersucht wurde der Unterschied in der Driftgeschwindigkeit (BIAS), die Winkelabweichung

(Angle), der Abstand der Endpunkte der Driftfelder und der Trajektorien (RMS separation distance) und die Deformation.

2.1.8.5. Evaluierungsergebnisse: Verfügbarkeit der Modelle

In einer ersten Untersuchung wurde die Verfügbarkeit verlässlicher Modelldaten evaluiert. Hierzu wurde ein Success-Score definiert, der beschreibt, wann keine Fehler wie z.B. falsch vorhergesagtes Arching aufgetreten sind. Dazu wurde für die jeweiligen Trajektorien-Felder der durchschnittliche mit der gemessenen Driftgeschwindigkeit genormte BIAS bestimmt. War dieser kleiner eins, haben wir die Modelldaten als verlässlich angesehen. Tabelle 1 zeigt den Success-Score der Modelle im Vergleich der alten und neuen Versionen. In der Fram Strait und im Norden der Barents Sea war die Eissituation schwierig für unsere Driftmessung und wird können dort keinen Vergleich zwischen Modellen und Messung anstellen. Im Nordosten der Barents Sea und Norden der Baffin Bay kam es häufig zu Fehlern in den Modellen. Nach dieser Metrik sind die Modelle in ihren neuen Versionen zuverlässiger als vorher, produzieren also weniger grobe Fehler..

Tabelle 1: Anteil (%) der Driftfelder bei denen die Modelle innerhalb des Toleranzbereichs liegen (BIAS / gemessene Drift < 1.0).

		old	new
FramStrait	TOPAZ	16,00	0,00
	neXtSIM	16,00	0,00
BeaufortSeaNorth	TOPAZ	93,33	100,00
	neXtSIM	96,67	100,00
BeaufortSea	TOPAZ	77,14	90,91
	neXtSIM	91,43	100,00
LaptevSea	TOPAZ	83,33	100,00
	neXtSIM	83,33	100,00
BarentsSeaNorth	TOPAZ	29,17	0,00
	neXtSIM	58,33	16,67
BarentsSeaNE	TOPAZ	70,83	22,22
	neXtSIM	75,00	88,89
BaffinBayNorth	TOPAZ	58,70	64,71
	neXtSIM	63,04	70,59
ChukchiSea	TOPAZ	76,47	100,00
	neXtSIM	94,12	100,00
EastSiberianSea	TOPAZ	100,00	100,00
	neXtSIM	100,00	100,00

Im weiteren Verlauf der Evaluierung wurden nur Driftfelder verwendet, bei denen weder neXtSIM noch TOPAZ grobe Fehler aufwiesen. Dies bedeutet, dass wir in der Fram Strait und im Norden der Barents Sea keine Evaluierung der neuen Modelle durchführen konnten.

2.1.8.6. Evaluierungsergebnisse: Drift

In Tabelle 2 und Tabelle 3 werden die Messergebnisse der Driftevaluierung angegeben. Die RMS separation distance wird mit den Angaben aus der Qualitätsinformation der Modelle auf CMEMS verglichen. Der Vollständigkeit halber sind in den Tabellen außerdem der BIAS und die Winkelabweichung (Angle) gelistet.

Tabelle 2: Evaluierungsergebnisse der Driftanalyse für neXtSIM (old) und nextSIM-F (new).

ROI – neXtSIM	BIAS old [km/day]	BIAS new [km/day]	Angle old [°]	Angle new [°]	RMS separation distance old [km/day]	RMS separation distance new [km/day]
FramStrait	-2,75	--	40,40	--	6,69	--
BarentsSeaN	-1,77	--	52,46	--	4,01	--
BarentsSeaNE	-2,20	-0,81	37,48	30,39	4,96	2,47
BaffinBayN	-3,30	-1,24	23,34	18,10	5,38	3,20
ArcticOcean	-1,12	0,51	11,98	22,24	2,75	2,30
BeaufortSea	-0,78	-0,58	15,33	31,70	2,74	2,03
ChukchiSea	-1,00	0,12	20,97	41,62	3,21	2,24
LaptevSea	-1,17	-0,26	27,39	26,03	4,09	2,62
EastSiberian Sea	-0,78	-1,62	13,55	50,86	2,22	3,49

Die separation distance von neXtSIM hat sich im Messzeitraum in unserer Messung deutlich verbessert. Die Werte bewegen sich für neXtSIM zwischen 2,22 km/day bis 5,38 km/day und 2,03 km/day bis 3,49 km/day für neXtSIM-F. Ein anderes Bild ergibt sich aus den Qualitätsinformation auf CMEMS. Für neXtSIM sind hier 2,7 km/day und für neXtSIM-F 3,5 km/day angegeben.

Tabelle 3: Evaluierungsergebnisse der Driftanalyse für TOPAZ4 (old) und TOPAZ5 (new).

ROI – TOPAZ	BIAS old [km/day]	BIAS new [km/day]	Angle old [°]	Angle new [°]	RMS separation distance old [km/day]	RMS separation distance new [km/day]
FramStrait	-2,69	--	41,81	--	6,72	--
BarentsSeaN	-1,46	--	59,40	--	4,18	--
BarentsSeaNE	-1,53	-1,43	49,56	49,93	5,81	3,37

BaffinBayN	-2,66	-0,90	22,64	20,08	5,27	3,96
ArcticOcean	-0,58	1,18	14,10	15,00	2,82	2,11
BeaufortSea	-0,26	-0,52	16,72	33,16	2,95	2,12
ChukchiSea	0,01	-0,89	21,85	50,37	3,75	1,79
LaptevSea	-1,30	0,09	34,57	16,56	5,27	2,03
EastSiberian Sea	-0,22	-1,76	14,63	41,40	2,68	3,46

Wir Messen beim TOPAZ-Modell eine ähnliche Verbesserung. Hier bewegen sich die Werte für TOAPZ4 zwischen 2,68 km/day bis 5,81 km/day und für TOPAZ5 2,03 km/day bis 3,96 km/day. In den Qualitätsinformation von TOPAZ wird wie bei neXtSIM eine leichte Verschlechterung angegeben.

2.1.8.7. Evaluierungsergebnisse: Deformation

Um die Verwertbarkeit der Modelle für eine Vorhersage der Eisklassenänderung zu untersuchen, wurden die Deformation, die in den Modellen abgebildet wird, analysiert. In Abbildung 24 ist die Divergenz für die Modelle und Messung in Deformationskarten dargestellt.

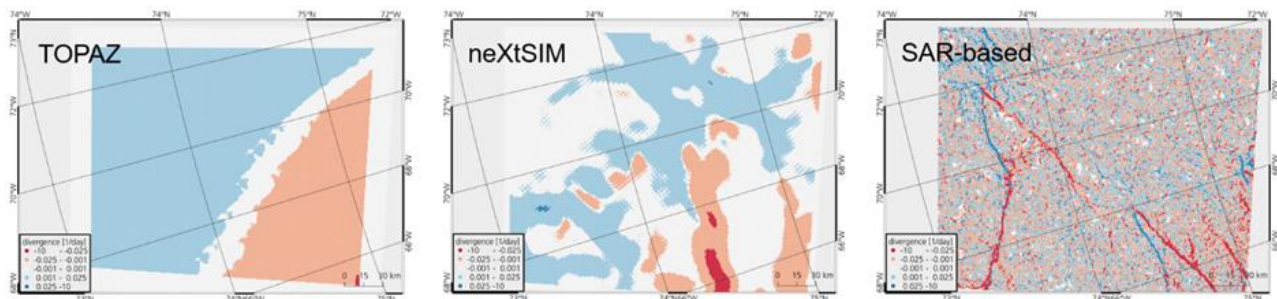


Abbildung 24: Darstellung der Divergenz in einer Deformationskarte für TOPAZ (links), neXtSIM (Mitte) und SAR-basierte Messung (rechts).

Aus den Karten wird deutlich, wie sehr sich Messung und Modelle in der Auflösung der Deformation unterscheiden. Bei TOPAZ weisen große Flächen ähnliche Divergenz auf, bei neXtSIM sind schon 10-km-breite Features zu erkennen und in der SAR-basierten Messung sind lineare kinematische Features (LKF) deutlich abgrenzbar. Dies macht deutlich, dass ein skalenunabhängiger Vergleich nötig ist.

Typischerweise wird in der Literatur eine Untersuchung der Deformation in Modellen mit einer Power-Law-Scaling-Analyse durchgeführt. Hierbei werden die Deformationswerte aus Modellen und Messungen ins Logarithmische transformiert und jeweils eine Regressionsgerade berechnet. Die Steigung dieser Geraden wird dann verglichen. In Abbildung 25 sind die Ergebnisse der Evaluierung für total deformation der alten und neuen Modellversionen geplottet.

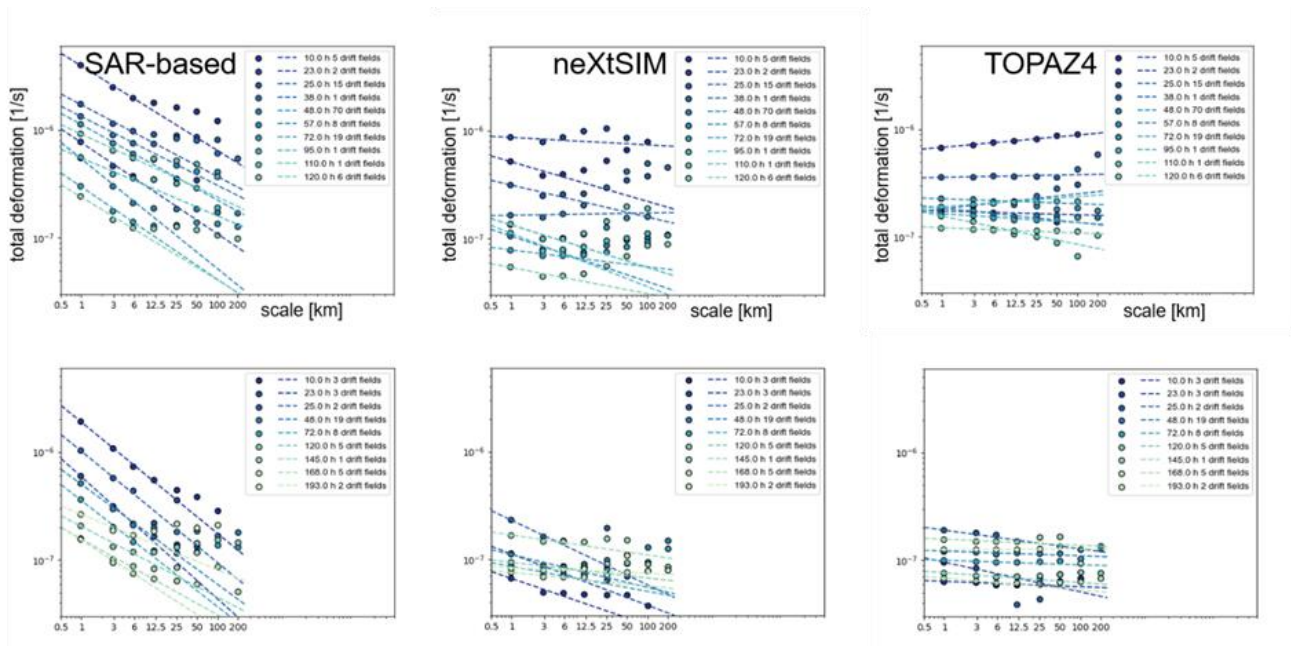


Abbildung 25: Power-Law-Scaling der total deformation für SAR-basierte Messung (links), neXtSIM (Mitte); und TOPAZ (rechts). Hier sind die alten Modellversionen (oben) den neuen (unten) gegenübergestellt.

Für die SAR-basierten Driftfelder messen wir in dem Analysezeitraum der alten Modellversion Steigungen zwischen -0,27 und -0,51. Diese verändern sich kaum im Analysezeitraum der neuen Modellversionen (-0,26 -0,55). Unsere Ergebnisse bewegen sich im Bereich der Werte, die in der Literatur gefunden wurden.

Für neXtSIM messen wir eine Steigung von -0,03 bis -0,25 und für neXtSIM-F von -0,03 bis -0,30. Wir können also eine leichte Verbesserung feststellen. Die Steigung variiert bei TOPAZ4 zwischen 0,07 und -0,13 bei TOPAZ5 zwischen 0,003 und -0,14. Auch hier können wir ebenfalls eine leichte Verbesserung messen. Insgesamt ist die Steigung der Geraden der Modelle deutlich flacher als in den SAR-basierten Driftfeldern und der Literatur. Folglich kann die auftretende Deformation von den Modellen also nur ungenügend abgebildet werden.

2.1.9. AP 9 – Detektion von Gefahrenquellen

Meereis verändert sich schnell und kann sich insbesondere zu unpassierbaren Presseisrücken zusammenschieben, wobei es zuvor offene Rinnen im Eis schließt. Im schlimmsten Fall könnte dadurch ein Schiff im Eis eingeschlossen oder vom Eis zerdrückt werden. Gleichzeitig sind es gerade diese offenen Fahrrinnen, die schnell durchfahren werden können und die der Routenempfehlungsalgorithmus daher häufig verwenden wird. Daher sollte eine Möglichkeit gefunden werden, mit den vorhandenen Drift-Informationen solche Gefahrenquellen zu erkennen. Wegen ihrer langen Struktur werden diese Bereiche als Lineare Kinematische Features (LKFs) bezeichnet.

2.1.9.1. *Entwicklung eines Prozessors zur Erfassung von Divergenz- und Konvergenzzonen*

Der Analyse-Prozessor aus AP8 daher wurde um die Detektion von Deformationszonen erweitert. Hiermit kann die Position von neuen LKFs flächenhaft in 500 m Auflösung bestimmt werden, sowohl für konvergente als auch divergente Bereiche. Neue LKFs durch Konvergenz bedeuten neue Gefahrengebiete (Presseisrücken und sich schließende offene Leads). Je nach Auflösung der Analyse können Gebiete in denen neue LKFs entstehen oder die LKFs direkt lokalisiert werden.

Die Position der LKFs wurde je nach Anwendungsfall driftkompensiert an der Position in der jeweiligen SAR-Aufnahme festgelegt. So lässt sich direkt überprüfen, ob die gemessene Deformation zu den Veränderungen in den dazugehörigen SAR-Szenen passt.

2.1.9.2. *Entwicklung eines multi-temporalen Indexverfahrens*

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Frage nach Gefahrengebieten war die Abgrenzung der Konvergenzzonen nach vorhandener Eisklasse. Sehr dünnes Eis ergibt bei Zusammenschiebung noch keine unpassierbaren Gebiete und das Schließen einer Lücke im Wasser ist etwas anderes als das Zusammenschieben zweier Zonen mit mehrjährigem Eis. An dieser Stelle musste also die Eisklasse mit in die Drift-Betrachtung eingebracht werden.

Eine multitemporale Meereisklassifikation basierend auf mehreren SAR-Aufnahmen wurde entwickelt, kam aber effektiv nicht zur Anwendung. Sowohl im operationellen Betrieb der Routenempfehlungen als auch der Gefahrgebietsdetektion ist ein Forecast mit Modelldaten nötig, während die Klassifikation aus mehreren Szenen nur mittels Hindcast gewonnen werden kann. Zudem zeigten die Tests, dass die Klassifikation über mehrere konsekutive Szenen in den meisten Fällen konsistent ist und mehrere Szenen zu kombinieren hier im Wesentlichen die Messdauer erhöhen und damit den Eisentwicklungszustand über mehrere Tage mitteln würde.

Um Meereistypklassifikationen aus zwei aufeinander folgenden SAR-Aufnahmen mit der gemessenen Deformation zu kombinieren, wurde ein multitemporales Indexverfahren entwickelt. Basis hierfür ist der Prozessor für Konvergenzzonen und der POLARIS Risk Index Outcome (RIO), welcher aus den Eisklassen abgeleitet wurde. Abbildung 26 zeigt die Inputprodukte und Ergebnisse des multitemporalen Indexverfahrens.

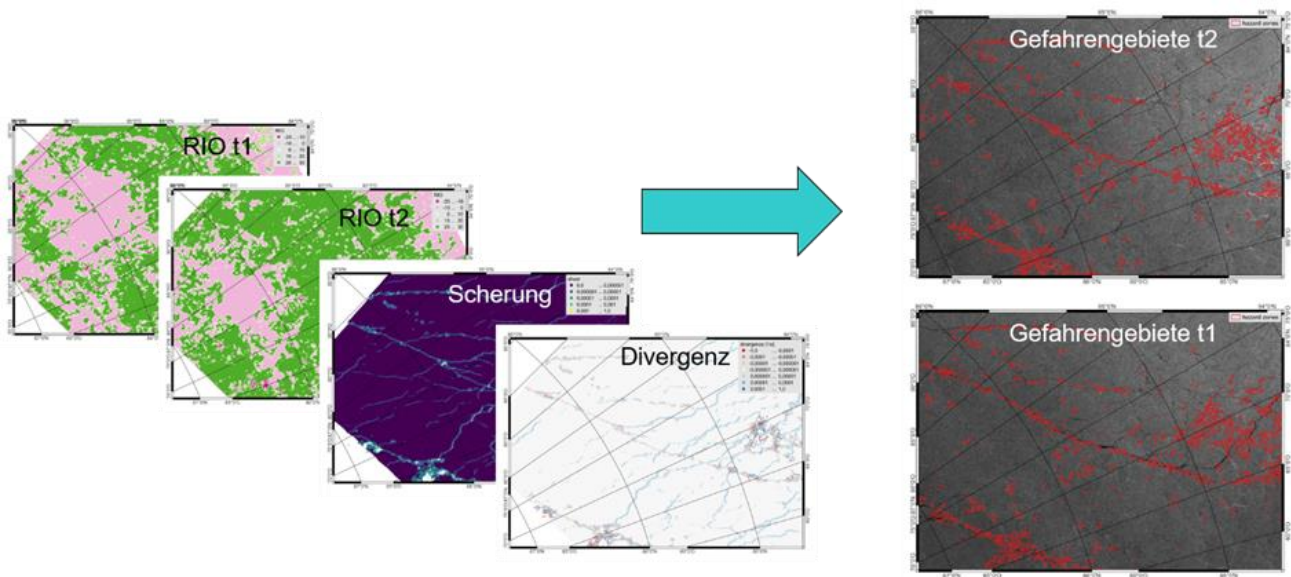


Abbildung 26: Multitemporales Indexverfahren. Die von Meereistypklassifizierung abgeleiteten RIO-Karten werden mit den Deformationsparametern Scherung und Divergenz kombiniert, um die Gefahrengiebetsgebiete zu beiden Zeitpunkten zu bestimmen.

2.1.9.3. Analyse der Gefahrengiebetsdetektion

Das multitemporale Indexverfahren wurde anhand von 11 Szenenpaaren durch mehrere, voneinander unabhängige erfahrene DLR-Mitarbeiter manuell analysiert. Die vom Verfahren ausgegebenen Gefahrengiebetsgebiete wurden hierbei mit den SAR-Aufnahmen, den Eisklassifikationen und den Deformationsparametern verglichen. Es wurde die Anzahl der False Positives und True Negatives abgeschätzt. Außerdem wurde die Anzahl erkannter Gefahrenstellen durch visuellen Vergleich mit der SAR-Eisfeldbewegung abgeschätzt. Die Kernfrage bei der Analyse war, inwieweit der aktuelle Stand des Prozessors für die Schifffahrt nützlich bzw. hilfreich ist.

Als Hauptergebnis wurde festgestellt, dass aktuell deutlich zu viele Markierungen (False Positives) erfasst werden, je nach Szene oft ein Vielfaches der eigentlichen Gefahrengiebetsgebiete. Die tatsächlichen Gefahrengiebetsgebiete - soweit sie aus SAR-Aufnahmen feststellbar waren - wurden jedoch größtenteils ebenfalls erkannt. Daher ist der Prozessor im Einsatz auf Schiffen aktuell vermutlich wenig anwendbar, dies kann jedoch durch andere Filter oder Grenzwerte zukünftig optimiert werden. Allerdings bietet das multitemporale Indexverfahren keine Verbesserung zu einer einzelnen SAR-basierten Meereistypklassifikation bei der Detektion von bereits vorhandenen Gefahrengiebetsgebieten, die im RIO nicht als Gefahrengiebetsgebiet erkannt wurden. Insofern ist eine genaue Erkennung von Gegebenheiten wie Presseisrücken durch die Klassifikation auch für die Gefahrengiebetsdetektion essentiell.

2.1.10. AP 10 – Ableitung der Bathymetrie, Untiefen und Sichttiefe

2.1.10.1. Flachwasserbathymetrie aus multispektralen Satellitendaten

Im Arbeitspaket AP 10.1 lag der Fokus auf der Entwicklung und Implementierung von Methoden zur Flachwasserbathymetrie unter Verwendung multispektraler Satellitendaten. Diese Methodik, die unter dem Begriff „Satellite-Derived Bathymetry“ (SDB) bekannt ist, galt es für die Herausforderungen der höheren Breitengrade anzupassen.

Die Arbeit begann mit einer umfassenden Analyse der bestehenden SDB-Methodik hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in höheren Breiten. In diesen Regionen ist die Ableitung von SDB oft erschwert oder gar nicht möglich: Über die Hälfte des Jahres macht die Eisbedeckung eine Ableitung der Wassertiefe aus Multispektraldaten unmöglich. Während der restlichen Zeit stellen Wassertrübung durch etwa Schnee- und Gletscherschmelze sowie teils flache Sonnen- und Sensorwinkel größere Herausforderungen für die Ermittlung der Wassertiefe dar. Daraus folgte die Notwendigkeit, die etablierten Algorithmen anzupassen und weiterzuentwickeln, um unter diesen spezifischen Bedingungen präzise und zuverlässige Ergebnisse zu liefern.

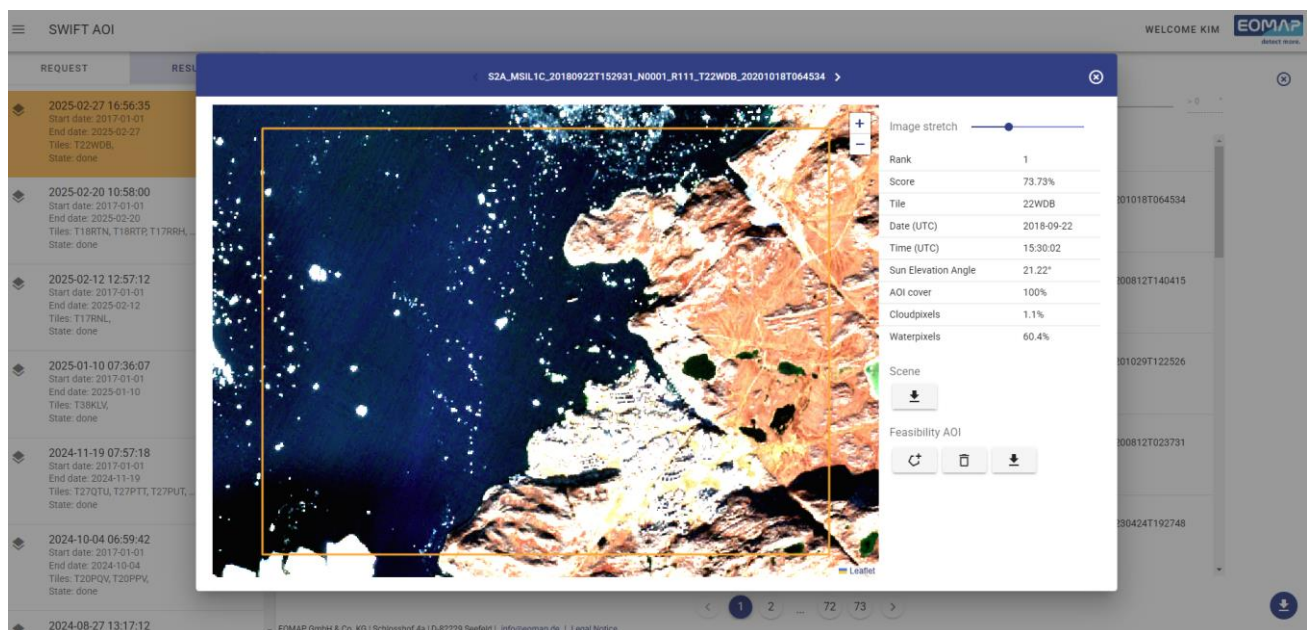


Abbildung 27 EOMAP' SWIFT tool (Shallow Water Image Finder Tool) zur automatischen Erkennung geeigneter Satellitendaten für die Satellitenbathymetrie.

Ein wichtiger Schritt war die Entwicklung von Techniken zur automatisierten Erkennung geeigneter Satellitenaufnahmen. Eisbedeckung, Wolken sowie Trübung, aber auch ungünstige Sonnen- und Sensorwinkel mussten möglichst automatisiert erfasst und bewertet werden. Diese automatisierte Erkennung wurde mithilfe von Künstlicher Intelligenz und Algorithmen für multitemporale Datenanalytik implementiert, welche die zeitliche Veränderung der Wasserbedingungen berücksichtigen. Herausgekommen ist EOMAP's SWIFT Tool (Shallow Water Image Finder Tool), welches in kürzester Zeit die Sentinel-2-Zeitserien für vorgegebene Gebiete analysiert, bewertet und mit jeder Szene mit einem Score

für ihre Nutzbarkeit versieht. All dies geschieht in der Cloud und kann dort mit einem intuitiven Frontend bedient werden.

Ein weiteres wesentliches Element von AP 10.1 war die Validierung der neuen Methodiken. Dies geschah durch den Vergleich der abgeleiteten bathymetrischen Daten mit vorhandenen Referenzdaten, um die Genauigkeit der SDB in diesen anspruchsvollen Gebieten sicherzustellen. Zudem wurde in AP 10.2 die Verifikation durch den Einsatz von ATLAS Lidar-Daten unterstützt, wodurch zusätzliche Daten zur Kalibrierung und Validierung genutzt werden konnten.

2.1.10.2. Satellite-Lidar Evaluation und Datenprozessierung

Im Rahmen des Arbeitspakets AP 10.2 wurde der Schwerpunkt auf die Evaluierung und Datenprozessierung von Satelliten-Lidar-Daten gelegt, um die bathymetrischen Informationen (Satellite Lidar Bathymetry, SLB) unabhängig von der multispektralen Satellitendatenauswertung zu validieren und zu kalibrieren. Dazu wurde das Lidar-System des NASA-Satelliten IceSat-2 genutzt, welches mit dem ATLAS-Instrument ausgestattet ist. Diese fortschrittliche Technologie ermöglicht die Erfassung präziser bathymetrischer Informationen durch die Messung der Zeit, die ein ausgesendeter Laserimpuls benötigt, um vom Meeresgrund reflektiert zum Sensor zurückzukehren.

Die ausgeführten Arbeiten umfassten zunächst die Beschaffung und Vorbearbeitung der Lidar-Daten. Ein wesentlicher Schritt war die detaillierte Analyse der Rohdaten, um Störsignale herauszufiltern und die Qualität der reflektierten Signale zu bewerten. Da der Sensor ursprünglich für Landanwendungen entwickelt wurde, muss mit aufwendiger Methodik das Signal des Seegrunds aus dem der Wasseroberfläche, der Wassersäule, so wie der Atmosphäre heraus gefiltert werden. Auch wurde untersucht, inwieweit die Lidar-Daten Unterschiede in der Tiefenmessung bei unterschiedlichen Umweltbedingungen erkennen lassen, insbesondere unter der Berücksichtigung der Herausforderungen, die in den arktischen und trüben Gewässern auftreten.

Parallel dazu wurde eine Cross-Validation der Lidar-Daten mit den aus multispektralen Satellitenbildern abgeleiteten bathymetrischen Daten durchgeführt. Diese Vergleichsstudien ermöglichen es, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der gewonnenen Informationen zu beurteilen.

Auch die Ableitung der Wassertiefe aus SLB-Daten wurde mittlerweile in einer Webapp umgesetzt und kann mittels API-Schnittstelle genutzt werden.

2.1.10.3. Erkennung und Positionierung von möglichen Untiefen und Hindernissen

Das Arbeitspaket AP 10.3 beschäftigte sich mit der Erkennung und Positionierung von möglichen Untiefen und Hindernissen in Gewässern mit wechselnder und konstanter Trübung. Hierfür wurden multi-temporale Satellitendaten der Sentinel-2 Mission systematisch analysiert. Ziel war es, automatisierte Verfahren zu entwickeln, um Indikatoren für Untiefen aus den Satellitendaten zu extrahieren und deren Positionen präzise zu bestimmen.

Zu Beginn des Arbeitspakets wurden Algorithmen entwickelt und angepasst, um Sentinel-2 Daten auf wiederkehrende räumliche Muster und spezifische Reflektionen zu untersuchen, die auf Untiefen oder Hindernisse hinweisen könnten. Diese Analysen konzentrierten sich darauf, charakteristische Signaturen in der spektralen Rückstreuung zu identifizieren, die typischerweise mit erhöhten oder flacheren Strukturen am Meeresboden assoziiert sind. Besondere Herausforderungen bestanden in der Differenzierung natürlicher, durch kurzzeitige Ereignisse verursachter Veränderungen von dauerhaften, potenziell schifffahrtsrelevanten Strukturen. Um dies zu bewältigen, wurden Methoden der zeitlichen Datenanalyse eingesetzt, die Veränderungen im Verlauf der Zeit überprüfen und beurteilen konnten. Auf diese Weise konnten zufällige und saisonale Effekte minimiert werden, um beständige Gefahrenquellen hervorzuheben.

Das Ergebnis ist eine weitestgehend automatisiert erstellte Karte aus Vektorflächen, welche Flachwasserbereiche ausweisen und von Schiffen besser umfahren werden sollten. Die Gebiete werden auch NoGo-Areas genannt.

2.1.10.4. Multi-temporale Auswertung der Sichttiefen

Im Arbeitspaket AP 10.4 konzentrierten sich die Arbeiten auf die multi-temporale Auswertung der Sichttiefen, um damit wertvolle Informationen für die Navigation in arktischen Gewässern zu gewinnen. Die Analyse basierte auf Sentinel-2-Daten, wobei für jede Szene die Sichttiefe, auch bekannt als Secchi Disc Depth, abgeleitet wurde.

In polaren Gewässern kann es oft schwierig sein, eine exakte Bathymetrie abgeleitet aus Satellitendaten zu berechnen, da insbesondere die Wassertrübung eine freie Sicht bis zum Grund oft verhindert. Um auf eine maximale Sichttiefe zu kommen, wird das Verfahren aus AP10.1 modifiziert und über eine längere Zeitreihe für jedes Pixels eines Gebiets wiederholt. Hierbei wird die Eindringtiefe des Lichts für jedes Pixel über die Zeit bestimmt, wobei dann entweder die tatsächliche Wassertiefe bestimmt wird oder zumindest eben die maximale Sichttiefe bis zur Reflexion an Teilchen der Wassersäule. Die am tiefsten berechnete Beobachtung wird damit letztendlich in das finale Produkt aufgenommen um am Ende eine flächige Karte zu erhalten, die die maximalen Sichttiefen abbildet. Für die Schifffahrt kann eine solche Karte dann entweder sichere Passagen ausweisen oder zumindest in Gebieten mit geringer Sichttiefe auf mögliche Gefahrenstellen hinweisen. Auf diese Weise kann die Gefahr einer Kollision mit Unterwasserobjekten oder ein Auflaufen auf Grund in polar oft schlecht kartierten Gebieten verringert werden. Diese Produkte wie auch die zuvor Beschriebenen wurden im FAST-CAST2-Kontext für die Navigation bereitgestellt.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

2.2.1. Universität Bremen

Die Mittel für die Universität Bremen wurden primär für Personalkosten für zwei wissenschaftliche MitarbeiterInnen eingesetzt. Weiterhin entstanden Reisekosten für Beiträge zu nationalen und internationalen Konferenzen, welche durch Sachmittel finanziert wurden:

- Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft 2023 (Bremen)
- Jahrestagung der Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik 2023 (Dresden)
- IGS International Symposium on Sea Ice 2023 (Bremerhaven)
- Arctic Frontiers 2024 (Tromsø)
- Polar Week 2024 (Kopenhagen)
- Arctic Frontiers 2025 (Tromsø)

Das Projekt wurde für die Universität Bremen kostenneutral um 6 Monate verlängert.

2.2.2. Drift+Noise

Die Mittel für Drift+Noise wurden wie geplant abgerufen und verwendet. Der Hauptteil fiel dabei für Personalkosten an. Die weiteren Sachmittel wurden für Reisekosten verwendet. Wichtige Reisen waren dabei:

- Nutzertreffen mit der Besatzung des norwegischen Fischerbootes Tromsbas in Tromsø (Dezember 2022)
- Arctic Circle Assembly in Reykjavik (Oktober 2022)
- Arctic Frontiers Konferenz (Januar 2023)
- Symposium der Internationalen Glaciological Society (IGS) in Bremerhaven (Juni 2023)
- International Ice Charting Working Group Meeting in Cambridge (September 2023)
- Die Reise für Jakob Bünger nach Nuuk, Grönland zum Test auf dem Royal Arctic Line Schiff *Irena Arctica* (März/April 2024).

2.2.3. DLR

Im DLR fielen primär Personalkosten für die beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter an. Die Sachmittel wurden überwiegend für Konferenzbesuche eingesetzt, die aufgrund des internationalen Themas auch oft ins Ausland führten (Oslo, San Francisco, Frascati).

2.2.4. EOMAP

Die Mittel für die EOMAP GmbH wurden primär für die veranschlagten Personalkosten des Projektmanagers und der Geofachkräfte eingesetzt. Die weiteren Mittel wurden für Reisekosten verwendet, etwa zum Projekttreffen in Bremen.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit

Das Vorhaben war mit einem sehr hohen Risiko im Bereich der technischen Umsetzung der Inhalte versehen und hierdurch bedingt auf eine Förderung angewiesen. Keiner der Partner verfügte über entsprechende Mittel, das Vorhaben aus Eigenmitteln durchzuführen.

2.3.1. Universität Bremen

Der Universität Bremen standen für das Vorhaben keine Mittel aus dem Grundhaushalt zur Verfügung, so dass die Umsetzung des Projektes nur durch die beantragte Bundeszuwendung möglich war. Die erhaltenen Finanzmittel konnten effizient und angemessen eingesetzt werden.

Die Einstellung des Personals zu Projektbeginn verzögert sich, sodass die Arbeiten an der Universität Bremen erst mit etwa drei Monaten Rückstand begonnen werden konnten. Weitere Verzögerungen ergaben sich aufgrund von Elternzeit. Durch die kostenneutrale Verlängerung des Projektes um sechs Monate konnten die Arbeiten trotzdem zum Abschluss gebracht werden. Ein geplanter Rechner konnte auf anderem Weg beschafft werden, wodurch Mittel eingespart werden konnten. Zudem wurden notwendige Berechnungen auf eigenen Servern durchgeführt, wodurch Mieten für externe Server eingespart werden konnten. Die aus dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse können an der Universität Bremen vielfältig weiter genutzt werden (siehe 2.4.). Daher können die Arbeiten als angemessen beurteilt werden.

2.3.2. Drift+Noise

Der Jobwechsel des initialen wissenschaftlichen Leiters des FAST-CAST2 Projektes auf Drift+Noise Seite konnte mit einer zeitnahen Neubesetzung aufgefangen werden. Die durch diesen Personalwechsel und die notwendige Einarbeitung des neuen Mitarbeiters entstandenen Verzögerungen, konnten im Laufe des Projekts erfolgreich aufgeholt werden. Die wissenschaftlichen Arbeiten konnten im weiteren Verlauf auf unterschiedliche Drift+Noise Mitarbeiter verteilt werden, sodass die vielfältigen Aufgaben jeweils mit der größtmöglichen Expertise und so effektiv wie nur möglich erfüllt werden konnten.

Die im vorherigen Kapitel erwähnten Reisen waren extrem wichtig in der Vorbereitung der beiden FAST-CAST2 Tests im Jahr 2024. Sowohl bei den Konferenzen, als auch beim Nutzertreffen konnten wichtige Erkenntnisse gesammelt und Kontakte geknüpft werden, die die Durchführung der Tests unterstützt haben. Auch Erkenntnisse aus FAST-CAST2-unabhängigen Aufträgen von Drift+Noise (z. B. die Polarstern Expedition PS137, <https://driftnoise.com/ps137.html>) konnten in das Projekt einfließen, ohne zusätzliche Kosten zu verursachen. Die Teilnahme an der PS144 Expedition, die einen zweiten FAST-CAST2 Test ermöglichte, kam unabhängig vom Vorhaben zustande und kostete das Projekt ausschließlich die sowieso veranschlagte Arbeitszeit eines Drift+Noise Mitarbeiters an Bord und der Projektmitarbeiter an Land.

Die entstandenen Reisekosten zum zweiten FAST-CAST2 Testgebiet (zur FS Polarstern nach Tromsö) wurden zudem Drift+Noise-intern oder anderweitig finanziert und haben das FAST-CAST2-Projektbudget nicht belastet.

Es wurde also einiger Mehraufwand betrieben, von dem das FAST-CAST2-Projekt profitiert hat. All diese Arbeiten und Ausgaben waren notwendig für die erfolgreiche Erfüllung des Projekts und werden daher als angemessen eingestuft.

2.3.3. DLR

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte überwiegend durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter, dessen Einstellung sich um einige Monate verzögert hatte. Zusätzlich waren weitere erfahrene Wissenschaftler im Rahmen der Projektleitung sowie phasenweise zur Erarbeitung bestimmter Fragestellungen und Problemlösungen mit dem Projekt beschäftigt.

2.3.4. EOMAP

Die Bearbeitung der Projektaufgaben erfolgte durch drei bestehende Mitarbeiter EOMAPs, einen Projektmanager, einen Geodatenanalysten und eine Fachkraft der GeoIT. Zur Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete wurden weitere Mitarbeiter kurzzeitig hinzugezogen, etwa bei der Schnittstellenentwicklung aus dem IT-Team oder bei der Optimierung der Wassertiefen-Ableitung in höheren Breiten ein Physiker zur Weiterentwicklung der Algorithmen.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

Die Ergebnisse des Projekts wurden und werden in wissenschaftlichen Publikationen sowie Vorträgen vor Fachpublikum veröffentlicht, sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene.

Am DLR und an der Universität Bremen werden über die Projektinhalte jeweils eine noch andauernde Promotion durchgeführt. Zudem wurde im Umfeld des Projektthemas eine Masterarbeit durchgeführt. Die Projektergebnisse wurden außerdem in die Lehre am ZeTeM eingebunden.

Die erworbenen Erkenntnisse über Eis-Routing im Allgemeinen aber vor allem auch über verschiedenste Eisdatenprodukte gehen direkt in die weitere Entwicklung des kommerziellen Eisinformationsdienstes IcySea (<https://driftnoise.com/icysea/>) ein. Zusätzlich können die Kontakte zu verschiedenen Stakeholdern in der polaren Schifffahrt (z. B. Royal Arctic Line, FS Polarstern, aber auch die SIMAC Nautical School) für zukünftige Projekte genutzt werden. Alle beteiligten Schiffsbesatzungen sind sehr interessiert an weiteren Entwicklungen und offen für ein kommerzielles Eis-Routing-Produkt, wenn die bestehenden Limitierungen überwunden werden können. Durch den Polarstern-Test konnte zudem die Wertschätzung für Fernerkundungsdaten und deren Nutzung bei Schiffsoffizieren gesteigert werden.

Die polare Schifffahrt gewinnt international kontinuierlich an Wichtigkeit und Interesse. Die Erkenntnisse des FAST-CAST2 Projekts bilden die Basis für die weiteren Entwicklungen im

Bereich des Eis-Routings, die der zunehmenden polaren Schifffahrt in Zukunft zugute kommen werden. Hierbei kann auf den nun entstandenen Prozessen aufgebaut werden und beispielsweise um lokale Informationen ausgebaut werden.

Die Beschäftigung mit Eisdrift-Modelldaten sowie die Teilnahme an den entsprechenden Konferenzen der zugehörigen Community hat die Grundlage für zukünftige weitere Projekte oder Forschungsaufträge an der Schnittstelle zwischen Modellen und Fernerkundung geschaffen.

Die Weiterentwicklungen im Bereich der Tiefenkartierung in hohen Breiten ermöglichen es EOMAP nun an weiteren Studien in dieser Region teilzunehmen, etwa im arktischen Kanada, wo weite Teile unkartiert sind.

Darüber hinaus können einzelne Komponenten der Prozesskette in zukünftigen Projekten auf andere Anwendungen übertragen werden. Als Beispiele sind hier zwei in Planung befindliche Projektideen zu nennen. Bei einem dieser Projekte soll das entwickelte Modul zur Routenplanung auf ein anderes maritimes Thema übertragen werden, welches extreme Wetterereignisse berücksichtigt. Zudem wird beabsichtigt, die Erkenntnisse für eine Anwendung in Fahrzeugen an Land in Katastrophengebieten zu verwenden.

Das Modul zur Routenberechnung wurde so weit entwickelt, dass nun außerdem die Möglichkeit besteht vergleichende Studien mit anderen Ansätzen zur Routenplanung durchzuführen.

2.5. Fortschritt bei anderen Stellen

Mit dem Fortschritt im Bereich der Künstlichen Intelligenz stehen zunehmend weitere hochaufgelöste Meereisklassifikationen zur Verfügung, wie zum Beispiel die des Danish Meteorological Institute (DMI), Nansen Environmental Remote Sensing Centre (NERSC) und des Norwegian Meteorological Institute (MetNo). Das auf dem Copernicus Marine Service (CMEMS) veröffentlichte, Arctic Ocean - High Resolution Sea Ice Information L3' Produkt (<https://doi.org/10.48670/mds-00343>) basiert auf dem DMI-ASIP KI-Model und kombiniert Sentinel-1 EW und IW Aufnahmen mit Mikrowellen Radiometerdaten von GCOM-W AMSR2 (Japanese Aerospace Exploration Agency) zu einem hochaufgelösten Meereiskonzentrations-, Eisklassen- und Schollengrößen-Informationsprodukt. Dieses neue Produkt wurde erst im Oktober 2024 veröffentlicht und konnte deshalb nicht mehr für die Arbeiten im Rahmen von FAST-CAST2 analysiert oder verwendet werden. Während der Projektlaufzeit wurden die auf Copernicus verfügbaren Meereisdrift-Modelle aktualisiert. Diese neuen Versionen wurden in die zweite Validierung einbezogen.

Im Laufe des Projektes fand ein Austausch mit Maria Fox, BAS (British Antarctic Survey), statt, welche mit ihrer Arbeitsgruppe ebenfalls im Bereich der Navigation in Polargebieten forscht. Die dort entwickelten Algorithmen dienen dem Zweck der langfristigen Fahrtplanung und unterscheiden sich daher erheblich in der verwendeten Auflösung.

An anderer Stelle wurden ebenfalls Algorithmen zur Routenplanung in der Arktis weiterentwickelt, wie z.B. in Zhang et. al. (2022), wo ein anderer Ansatz verwendet wird, welcher auch die dynamische Anpassung der Schiffsgeschwindigkeit erlauben soll.

2.6. Veröffentlichungen

2.6.1. Öffentliche Vorträge

Endurance22 Science Workshop (Bremen, 18.-19.01.2023)

Eis, C., B. Schmitz, H.J. Belter, J. Bahlmann, L. Rabenstein, P. Kountouris, M. Bathmann, A. Frost, S. Wiehle, K. Knauer, C. Büskens: *The FAST-CAST 2 project: Ice route optimization based on earth observation data and weather forecasts.*

Schmitz, B., C. Eis, H. J. Belter, J. Bahlmann, L. Rabenstein, P. Kountouris, C. Büskens: *Road mapping for route planning in ice covered waters.*

Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft 2023 (Bremen, 05.-09.03.2023)

Schmitz, B., C. Eis, C. Büskens: *Optimized routes for ship in-ice navigation based on earth observation data and ice drift forecasts.*

Jahrestagung der Gesellschaft für angewandte Mathematik und Mechanik 2023 (Dresden, 30.05.-02.06.2023)

Schmitz, B., C. Eis, C. Büskens: *Optimized routes for ship in-ice navigation based on earth observation data and ice drift forecasts.*

TerraSAR-X/TanDEM-X Science Team Meeting, (Oberpfaffenhofen 18.-20.10.2023)

Bathmann, M., K. Kortum, A. Frost, S. Wiehle, G. Spreen: *Temporal Morphing of X-Band SAR Sea Ice Classification.*

AGU23 (San Francisco 12.-15.12.2023)

Bathmann, M., D. Murashkin, B. Schmitz, A. Frost, S. Wiehle, V. Ludwig, G. Spreen: *Sea Ice Data for Shipping Routes.*

Arctic Frontiers 2024 (Tromsø, 29.01.-01.02.2024)

Schmitz, B., C. Eis, H. J. Bünger, C. Büskens: *How much travel time could we save using a navigation assistance system in ice?*

Polar Week 2024 (Kopenhagen, 03.-06.09.2024)

Schmitz, B., C. Eis, M. Bathmann, C. Büskens: *Calculation of optimal shipping routes through polar waters based on AI supported evaluation of earth observation data and weather forecasts.*

mFUND-Konferenz 2024 (Berlin, 08.10.2024)

Wiehle, S.: *Fast-Cast2 - Dynamische Schiffsrouten durch das Arktische Meereis*

Arctic Frontiers 2025 (Tromsø, 27.-30.01.2025)

Frost, A., C. Eis, B. Schmitz, M. Bathmann, K. Kortum, S. Wiehle, K. Knauer, J. Bünger, L. Rabenstein, J. Bahlmann: *FAST-CAST 2: Towards automatic ship route calculation in ice infested waters.*

mFUND DbD Workshop Series: No 11 - Avoiding disruptions in maritime mobility in times of crises (online, 26.11.2024)

Eis, C. – FAST-CAST 2 - Optimizing Shipping Routes Based on Dynamic Ice Maps

2.6.2. Poster

Arctic Frontiers 2023 (Tromsø, 30.01.- 02.02.2023)

Belter, H. J., J. Bahlmann, L. Rabenstein, B. Schmitz, P. Kountouris, C. Eis, M. Bathmann, A. Frost, S. Wiehle, K. Knauer, C. Büskens: *FastCast-2: Optimized route suggestions for ships in polar regions using AI-based processing, Earth Observation data, and model forecasts.*

11th International Workshop on Sea Ice Modelling, Assimilation, Observations, Predictions and Verification, IICWG-DA-11 (Oslo, 21.-23.03.2023)

Bathmann, M., S. Wiehle, A. Frost, G. Spreen, L. Rabenstein: *Initial Results from SAR-Based Validation of Sea Ice Drift Forecast Models.* doi: 10.5281/zenodo.7993888.IGS

IGS International Symposium on Sea Ice 2023 (Bremerhaven, 05.-09.06.2023)

Bathmann, M., A. Frost, S. Wiehle, G. Spreen: *SAR-Based Sea Ice Drift and Lagrangian Tracking for Evaluating Sea Ice Drift Forecast Models.*

Eis, C., B. Schmitz, C. Büskens: *Optimized routes for ship in-ice navigation based on sea ice classification and ice drift forecasts.*

Bünger, H. J. , J. Bahlmann, L. Rabenstein, B. Schmitz, P. Kountouris, C. Eis, M. Bathmann, A. Frost, S. Wiehle, K. Knauer, C. Büskens: *FastCast-2: Optimized route suggestions for ships in polar regions using AI-based processing, Earth Observation data, and model forecasts.*

12th International Workshop on Sea Ice Modelling, Assimilation, Observations, Predictions and Verification, IICWG-DA-12 (Frascati , 05.-07.11.2024)

Bathmann, M., C. Eis, K. Kortum, D. Murashkin, J. Bahlmann, B. Schmitz, A. Frost, S. Wiehle, G. Spreen, Gunnar: *“Ice-Track”: Providing High-Resolution Sea Ice Type Forecast for Route Optimization.*

Arctic Frontiers 2025 (Tromsø, 27.01.2025)

Schmitz, B., Eis, C., Bathmann, M, Bahlmann, J. Bünger, H. J., Kortum, K. Büskens, C.: *Optimizing shipping routes based on dynamic ice maps*

2.6.3. Paper

Schmitz, B., C. Eis, H. J. Bünger, C. Büskens. *Estimation of travel time reduction for ice-breaking ships when considering ice information data.* Annals of Glaciology. Published online 2024:1-11. doi:10.1017/aog.2024.28

2.6.4. Newsartikel und Pressemitteilungen

Pressemitteilung Universität Bremen: Schiffsverkehr in Eisregionen sicherer machen, 01.04.2022; <https://www.uni-bremen.de/schiffsverkehr-in-eisregionen-sicherer-machen>

DLR News: Schiffswrack der „Endurance“ gefunden – sichere Navigation dank Satellitendaten, 10.03.2022;
https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/01/20220310_schiffswrack-der-endurance-gefunden

DLR News: Pilotprojekt liefert erstmals automatisiert Schiffsrouten durch treibendes Meereis, 11.10.2024; <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2024/pilotprojekt-liefert-erstmal-automatisiert-schiffsrouten-durch-treibendes-meereis>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mit ARA* berechnete Routen-Vorschläge.....	4
Abbildung 2: Road Mapping Routenvorschläge.....	4
Abbildung 3: Manöver-Strategien.	4
Abbildung 4: Lösungen im Vergleich.	5
Abbildung 5: Reisezeit, Risiko, Gesamtkosten und Distanz	6
Abbildung 6: Vorbereitung der Meereisklassifikationen.	7
Abbildung 7: Übersicht der Schnittstellen.	9
Abbildung 8: Vereinfachte Darstellung der Klassen-Architektur der Routenplanung.	9
Abbildung 9: Geschwindigkeitsprofile der Irena Arctica.....	9
Abbildung 10: Geschwindigkeit der FS Polarstern - PS137.....	10
Abbildung 11: Schiffsgeschwindigkeit nach Eistyp - PS137	21
Abbildung 12: Geschwindigkeit der FS Polarstern - PS144.....	27
Abbildung 13: Schiffsgeschwindigkeit nach Eistyp - PS137, PS144.....	36
Abbildung 14: Geschwindigkeitsprofile FS Polarstern.	42
Abbildung 15: Routenvorschläge in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsprofils	44
Abbildung 16: Arbeitsablauf des Vorhersagetools.	47
Abbildung 17: Sentinel-1-Aufnahme und Klassifikation in verschiedene Meereistypen.....	55
Abbildung 18: Schematische Darstellung der dynamische Meereiskarte	57
Abbildung 19: Schema der Datenbank für Eisinformatoren.	60
Abbildung 20: TOPAZ5 Eisdriftvorhersagetrjektorien in IcySea.....	60
Abbildung 21: Übersicht der nördlichen Rfkol Region	60
Abbildung 22: Validierungsrechnungen mit verschiedenen Gittergrößen	60
Abbildung 23: Regionen, in denen die Evaluierung durchgeführt wurde.	60
Abbildung 24: Divergenz für TOPAZ, neXtSIM und SAR-basierte Messung	61
Abbildung 25: Power-Law-Scaling der total deformation	61
Abbildung 26: Multitemporales Indexverfahren.....	61
Abbildung 27: EOMAP' SWIFT tool.	62

Literaturverzeichnis

Chollet, F. (2018). Deep Learning mit Python und Keras: Das Praxis-Handbuch vom Entwickler der Keras-Bibliothek. MITP-Verlags GmbH & Co. KG, 3958458408.

CMEMS (2015). TOPAZ4: Arctic Ocean Physics Analysis and Forecast: European Union - Copernicus Marine Service (doi: 10.48670/moi-00001).

CMEMS (2020). neXtSIM: Arctic Ocean Sea Ice Analysis and Forecast: European Union - Copernicus Marine Service (doi: 10.48670/moi-00004).

Frost, A., S. Wiehle, S. Singha and D. Krause (2018). Sea Ice Motion Tracking from Near Real Time Sar Data Acquired During Antarctic Circumnavigation Expedition, 2338–2341 (doi: 10.1109/IGARSS.2018.8518249).

Goodfellow, I., Yoshua, B., Aaron, C. (2016). Deep Learning. Cambridge, MA, USA: The MIT Press, 978-0262035613.

Guinness, R. E., Saarimäki, J., Ruotsalainen, L., Kuusniemi, H., Goerlandt, F., Montewka, J., Berglund, R., Kotovirta, V. (2014). A method for ice-aware maritime route optimization. In IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium – PLANS 2014, pp. 1371–1378.

Kim, K. G. (2016). Book Review: Deep Learning. Healthcare Informatics Research 2016;22(4):351-354. doi: 10.4258/hir.2016.22.4.351

Lehtola, V., Montewka, J., Goerlandt, F., Guinness, R., & Lensu, M. (2019). Finding safe and efficient shipping routes in ice-covered waters: A framework and a model. Cold regions science and technology, 165, 102795.

Leypoldt, P. (2009). Die Nordostpassage als Alternative zu den bestehenden Seeverkehrsrouten zwischen Europa und Asien. Potenziale bis zum Jahr 2050 (Doctoral dissertation, University_of_Basel).

Likhachev, M., Ferguson, D., Gordon, G., Stentz, A., Thrun, S. (2005). Anytime dynamic A*: An anytime, replanning algorithm. ICAPS. Vol. 5.

Melia, N., Haines, K., Hawkins, E., & Day, J. J. (2017). Towards seasonal Arctic shipping route predictions. Environmental Research Letters, 12(8), 084005.

Niu, H., Savvaris, A., Tsourdos, A., Ji, Z. (2019). Voronoi-Visibility Roadmap-based Path Planning Algorithm for Unmanned Surface Vehicles. Journal of Navigation, 72(4), pp. 850–874. doi:10.1017/S0373463318001005.

Parrish, C. E., Magruder, L. A., Neuenschwander, A. L., Forfinski-Sarkozi, N., Alonzo, M., & Jasinski, M. (2019). Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance. Remote sensing, 11(14), 1634.

Rampal, P., Bouillon, S., Ólason, E., & Morlighem, M. (2016). neXtSIM: a new Lagrangian sea ice model. *The Cryosphere*, 10(3), 1055-1073.

Reimer, N., (2015). Eisvorhersage und Eis-Routen-Optimierung : Entwicklung eines gekoppelten Eisvorhersage- und Routenoptimierungssystems, HSVA, Hamburg.

Sakov, P., Counillon, F., Bertino, L., Lisæter, K. A., Oke, P. R., & Korabely, A. (2012). TOPAZ4: an ocean-sea ice data assimilation system for the North Atlantic and Arctic. *Ocean Science*, 8(4), 633-656.

Shokr, M., & Sinha, N. K. (2015). *Sea ice: physics and remote sensing*. John Wiley & Sons.

Siermann, J., Harvey, C., Morgan, G., & Heege, T. (2014, January). Satellite derived bathymetry and digital elevation models (DEM). In *IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference* (pp. cp-395). European Association of Geoscientists & Engineers.

Wiehle, S., Murashkin, D., Frost, A., König, C., König, T. (2024): Sea Ice Classification using combined Sentinel-1 and Sentinel-3 data. In: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp 102-106. IEEE. IGARSS 2024, 2024-07-07 - 2024-07-12, Athens, Greece. doi: 10.1109/IGARSS53475.2024.10642362

Zhang, C., Zhang, D. Zhang, M., Zhang, J., Mao, W. (2022): A three-dimensional ant colony algorithm for multi-objective ice routing of a ship in the Arctic area. In *Ocean Engineering*, Volume 266, Part 5, 2022, 113241, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113241>.