Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Abschlussbericht ArticSense

FKZ 50EE1917B

Entwicklung einer prä-operationellen Anwendung zum Monitoring von Schmelzwassertümpeln im Arktischen Meereis unter Nutzung von Sentinel-2 Daten und zur Vorbereitung der Nutzung von EnMAP Daten

EOMAP GmbH & Co.KG, 31. Mai 2024

Zuwendungsempfänger: EOMAP GmbH & Co.KG	Förderkennzeichen: 50EE1917B
Vorhabensbezeichnung: Entwicklung einer prä-operationellen Anwendung zum Monitoring von Schmelzwassertümpeln im Arktischen Meereis unter Nutzung von Sentinel-2 Daten und zur Vorbereitung der Nutzung von EnMAP Daten	
Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Projektträger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, RD-FA, Bonn	
Laufzeit des Vorhabens und Berichtszeitraum: 01.10.2019 – 30.9.2023	
Projektleitung EOMAP GmbH & Co.KG: Dr. T. Heege	
Autoren: Dr. Thomas Heege, Rainer Bauer, Julian Wenzel Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.	

Inhaltsverzeichnis

I. Kurzdarstellung 3
1. Aufgabenstellung 3
1.1.1 Gesamtziel des Vorhabens 3
1.1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Verbundvorhabens 3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 4
3. Planung und Ablauf des Vorhabens 4
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabensbeginn 5
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 7
II. Eingehende Darstellung 7
1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse 7
2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 16
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 16
4. Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des Verwertungsplanes 16
5. Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen 17
6. Veröffentlichungen (erfolgt / geplant) 17
III. Erfolgskontrollbericht 18
1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen 18
2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse, Erfahrungen 18
3. Fortschreibung des Verwertungsplanes: 18
4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben 19
5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer – Anwenderkonferenzen, etc. 19
6. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung 19

I. Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

1.1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Meereis, insbesondere das arktische Meereis, stellt eine essenzielle Klimavariable dar. Die Entwicklung des arktischen Meereises und dessen Veränderungen im Nordsommer stehen daher im Fokus von wissenschaftlichen, soziökonomischen und politischen Diskussionen. Im arktischen Sommer tragen Schmelzwassertümpel wesentlich zur Kopplung von Prozessen zwischen Atmosphäre, Kryosphäre und Ozean bei und stellen damit ein wichtiges Merkmal des arktischen Meereises dar. Darüber gibt es Hinweise, dass das arktische Meereis über den Klimawandel und dem Phänomen der „Arktischen Verstärkung“ (arctic amplification) Habitatveränderungen erfährt, welche sich im Tümpelwasser durch erhöhte Konzentrationen von organischen und anorganischen Wasserinhaltsstoffen auswirken. Das Gesamtziel des Vorhabens war daher die Entwicklung eines Erdbeobachtungsproduktes aus Basis von Sentinel-2 MSI (S-2) Daten, welches die raumzeitliche Entwicklung der Schmelzwassertümpel (quantitative Flächenausdehnung und Tiefen) im sommerlichen arktischen Meereis auf einer räumlichen Skala ≤ 30m enthält. Darüber hinaus wurden die Möglichkeiten der Ableitung von optisch aktiven Wasserinhaltsstoffen in den Schmelzwassertümpeln mit Hilfe von Sentinel-2 und EnMAP untersucht und ein Verfahren für ein Monitoring für Chlorophyll-a entwickelt. Durch die Nutzung hyperspektraler Helikopter- und in-situ-Daten konnte die zukünftige Nutzung hyperspektraler Instrumente wie EnMAP vorbereitet werden.

1.1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Verbundvorhabens

Um die oben genannten Gesamtziele zu erreichen, mussten zunächst grundlegende Fragestellungen mit Messdaten vor Ort im Abgleich mit theoretischen Strahlungstransportmodellen angegangen werden. Dieses Wissen wurde in Datenanalyseverfahren mit folgenden Unterzielen implementiert. Der federführende Verbundpartner ist in Klammern gesetzt:

- Überprüfung der Genauigkeiten der Strahlungstransportmodelle anhand von Messdaten und Optical-Closure-Rechnungen und Berechnung der radiometrischen Sensitivität von S-2 und EnMAP auf Reflexionsänderungen über- und unter-Wasser (EOMAP);

- Kalibrierung und Validierung der von der CAU bzw. EOMAP entwickelten bzw. optimierten Methoden und Verfahren durch Messungen im Gelände. Diese Messungen beruhen auf Vorarbeiten der CAU im Rahmen von Polarstern Expeditionen 2017 und 2018. Im Rahmen des internationalen Driftexperimentes (MOSAiC) im Arktischen Meereis wurden diese Messungen ebenfalls für die Sommermonate 2020 durchgeführt. Durch Kooperation mit dem Alfred-Wegener-Institut konnten weitere Messdaten in den Sommern 2022 und 2023 gewonnen werden. (CAU).

- Entwicklung bzw. Anpassung vollphysikalischer Verfahren zur Atmosphärenkorrektur und Nachbarschaftskorrektur. Auch relevante spektroradiometrische Sensorcharakteristika von Sentinel-2 (z.B. Drift) wurden dabei analysiert (EOMAP);

- Implementierung von Spezifika des Strahlungstransfers in Schmelzwassertümpeln in bio-optische Modelle zur Ableitung der Wassertiefe und des Chlorophyll-a Gehaltes der Tümpel als prä-operationelles Produkt (EOMAP) und für wissenschaftliche Anwender unter Nutzung von WASI (CAU);

- Methodenentwicklung zur Nutzung von S-2 und EnMAP Daten für das Monitoring der flächenhaften Ausdehnung von Schmelzwassertümpeln im arktischen Meereis sowie zur quantitativen Bestimmung deren Verteilung, Ausdehnung und Wassertiefe. Dies umfasste auch die Assimilation von S-2 und EnMAP Daten in operationell verwendete (EOMAP) und wissenschaftlich basierter (CAU) Strahlungstransfermodelle;

- Darstellung der räumlichen Verteilung und Tiefen von Schmelzwassertümpeln im Arktischen Meereis mit Fokus auf validierbarer Einzel-Datensätze als Demonstration für wissenschaftliche Anwender (CAU) sowie von Monatsmittelwertkarten für die Arktis im Sommer 2020 (EOMAP) mit Angabe von erreichten Genauigkeiten.

Aufgrund der geographischen Abdeckung von S-2 und EnMAP konzentriert sich das Monitoring auf Bereiche < 84° nördlicher Breite.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

In Hinblick auf die komplexe Aufgabenstellung erforderte das Vorhaben eine Zusammenarbeit mit dem geografischen Institut der Universität Kiel CAU, das federführend für die arktischen Messkampagnen war.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben ArcticSense sah insgesamt acht Arbeitspakete für die Verbundpartner CAU (FKZ: 50EE1917A) und EOMAP (FKZ: 50EE1917B) vor. Davon waren AP 4, 5, 6 und teilweise AP 8 EOMAP zugeordnet.
Entsprechend der genannten Voraussetzungen war eine zeitliche Abstimmung zwischen den Messkampagnen der Universität Kiel und den Entwicklungen bzw. Validierungsarbeiten bei EOMAP wichtig.

Der ursprüngliche Zuwendungsbescheid sah einen Projektzeitraum von 1. Oktober 2019 bis 30. September 2022 vor. Aufgrund der Elternzeit (6 Monate) und anschließenden Elternteilzeit des Projektbearbeiters der Universität Kiel wurde in Absprache mit Projektträger und Univ. Kiel eine kostenneutrale Verlängerung bis 30. September 2023 beantragt und auch bewilligt (siehe auch Abbildung 1).

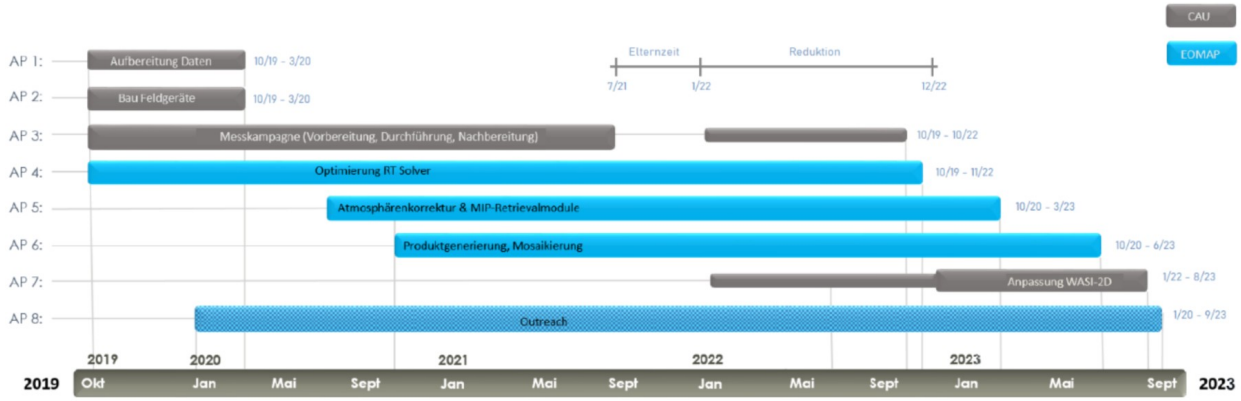


Abbildung 1 Modifizierter Zeitplan des Projektes ArcticSense, nach dem Antrag auf kostenneutrale Verlängerung.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Vorhabensbeginn

Den Antragstellern waren zu Vorhabensbeginn nur wenige Studien bzw. Veröffentlichungen bekannt (wie Hieronymie 2018), in deren Rahmen die Limitierungen von Vorwärtsmodellen des Strahlungstransports unter extremen Sonnen- und Beobachtungswinkeln mit Bodenmessungen validiert oder Verfahrensanpassungen vollphysikalischer Retrieval-Algorithmen und Sensorsensitivität untersucht wurden. Bei den niedrigen, sehr variablen Sonnenwinkeln in arktischen Gewässern bewegen sich die bekannten optischen Verfahren sowie die Sensorik in einem bisher unbekannten Grenzbereich. Weiterhin wurde Forschungsbedarf in der Messung bzw. Entwicklung von Algorithmen zur Korrektur von Nachbarschaftseffekten im arktischen Meereis gesehen (König et al. 2019). Eine effiziente Korrektur der Nachbarschaftseffekte und der Einflüsse der Atmosphäre ist für die weitere Auswertung der Daten essenziell, aber zu unserer Kentnis erstmalig mit den Entwicklungen in diesem Projekt für arktische Bedingungen gelöst. Verfahren zur Ableitung der Wassertiefe in optisch flachen Gewässern folgen einer Reihe verschiedener Prinzipien (Ahola et al. 2018). Sie beinhalten photogrammetrische Verfahren (Hodul et al. 2018), physikalisch-basierte Verfahren (Sierman et al. 2014), gemischte (Morel & Favoretto 2017) und empirische Verfahren (Jegat et al. 2016). Eine wichtige Rolle spielen die Atmosphärenkorrektur (Castillo-Lopez et al. 2017), Nachbarschaftskorrektur (Kiselev et al. 2014) sowie die Wasser-Säulen-Korrektur.

Das Verfahren von EOMAP folgt dem physikalisch basierten Prinzip, indem es auf multispektraler Basis das Signal am Satellitensensor möglichst genau und vollständig als Funktion der verschiedenen Einflussparameter wie atmosphärische Aerosole, Wasseroberflächeneigen-schaften, Wasserinhaltsstoffe, Wassertiefe und Seegrundreflexion (in diesem Fall Meereis) reproduziert. Im Unterschied zu bislang publizierten Verfahren basiert das aktuelle Verfahren von EOMAP auf vollphysikalischer Basis, ohne vereinfachte analytische Formeln. Die Physik wird hier auf ausschließlich auf Basis von einem hochgenauen Referenz-Strahlungstransportmodel beschrieben. Für arktische Bedingungen bestanden dennoch eine Reihe von Limitierungen, da z.B. FEM auf einem planparallelen 2-dimensionalen Atmosphärenmodel basieren, dass unter flachen Sonnenwinkeln <30 Grad ungenau wird.
Forschungsbedarf bestand daher hinsichtlich der Assimilation bzw. Implementierung von Spezifika des Strahlungstransfers im arktischen Meereis in mit Fernerkundungsdaten betriebene, bio-optische Modelle. Neben der Wassertiefe können über die Inversion von bio-optischen Model-len optisch aktive Wasserinhaltstoffe (organische Absorber, Steuer) abgeleitet werden.

Frühere Studien dokumentieren zwar niedrige Chlorophyllgehalte in Tümpeln (< 0,3 mg/m3 in der Zentralarktis; < 3 mg/m³ im Kanadabecken). Trotz der geringen Anzahl verfügbarer Daten zeigte sich jedoch zunehmend, dass die Produktivität von Schmelzwassertümpeln einer großen Schwankungsbreite unterliegt (0.2 mg/m3 bis 16 mg/m3). Aussagen über die tatsächliche Bandbreite und deren Implikationen für die Phytoplanktonproduktion ließen sich bislang aufgrund der schwierigen Erreichbarkeit des Untersuchungsgebietes nicht tätigen.
Bisherige Veröffentlichungen auf Satellitenebene lagen auf einer prinzipiellen spektralen Unterscheidbarkeit von Eis- und Schneeflächen und Schmelzwassertümpeln. Eine Ablei-tung von Tümpeltiefen wurde nach Kenntnis der Antragsteller bisher nur in Demonstrationsstudien für einzelne Szenen durchgeführt, für welche die Verfügbarkeit von in situ Messungen gegeben war. Für die Mehrheit der Studien war die Anzahl von Bodenmessungen und zeitliche Passung zu Überflügen aufgrund der schwierigen Zugänglichkeit des Untersuchungsgebietes stark limitiert. Das sommerliche Meereis ist von rapiden Veränderungen der Meereisoberflächen bzw. der Schmelzwassertümpel je nach Wetterlage gekennzeichnet. Die Erfahrungen aus 2017 und 2018 haben gezeigt, dass rapide einsetzende Schmelzvorgänge die Vergleichbarkeit von Bodenmessungen und Satellitendaten mit großem zeitlichen Versatz, insbesondere bei Temperaturen > 0° C erschweren.

Hieronymi, M. (2015, December). Ocean Colour at low sun and high waves. In Proceedings of Sentinel-3 for Science Workshop. https://www.researchgate.net/profile/Martin_Hieronymi/publication/296330667_Ocean_Colour_at_Low_Sun_and_High_Waves/links/56d44f0c08ae868628b25027/Ocean-Colour-at-Low-Sun-and-High-Waves.pdf

Ahola R., Chenier R., Faucher M., Horner B., Sagram M. (2018): Satellite derived bathymetry for Arctic charting: a review of sensors and techniques for operational implementation within the Canadian Hydrographic Service, Proc. SPIE Remote Sensing, 2018, Berlin, Germany, 10784.

Hodul, M., Bird, St., Knudby, A. & Chenier, R. (2018). Satellite derived photogrammetric bathymetry. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens*., 142: 268-277, https://doi.10.1016/j.isprsjprs.2018.06.015.

Siermann, J., Harvey, C., Morgan, G., Heege, T. (2014): Satellite derived Bathymetry and Digital Elevation Models (DEM). IPTC International Petroleum Technology Conference 2014, https://dx.doi.org/10.2523/17346-MS.

Morel, Y.G., Favoretto, F. (2017): 4SM: A Novel Self-Calibrated Algebraic Ratio Method for Satellite-Derived Bathymetry and Water Column Correction. *Sensors*, 17, 1682, https://doi.10.3390/s17071682.

Jegat, V., Peeri, S., Freire, R., Klemm, A., Nyberg, J. (2016). Satellite-Derived Bathymetry: Performance and Production. *Canadian Hydrographic Conference* May 16-19, 2016 Halifax, NS.

Castillo-Lopez, E., Gómez, J., Pereda, R. de Luis, J., Pérez, R., Piña, F. (2017): The importance of atmospheric correction for airborne hyperspectral remote sensing of shallow waters: Application to depth estimation. *Atmos. Meas. Techn*., 10. 3919-3929. https://doi.10.5194/amt-10-3919-2017.

KISELEV, V., BULGARELLI, B., **HEEGE, T**., (2015). Sensor independent adjacency correction algorithm for coastal and inland water systems. Remote Sensing of Environment, 157: 85-95. , ISSN 0034-4257, https://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.025.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Projektdurchführung erforderte eine Zusammenarbeit

- mit dem geografischen Institut der Universität Kiel CAU, das federführend für die arktischen Messkampagnen war.
- mit dem JRC (Joint Research Center Ispra) zur wissenschaftlichen Austausch zu den Themen Nachbarschaftskorrektur und der optischen Parametrisierung atmosphärischer Aerosole.
- mit CNR Italien zum Tasking von Prisma-Daten, dem DLR Oberpfaffenhofen ENMAP-Tasking und Eignungs-Prüfung der hyperspektralen Satellitendaten

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

1.1 Optimierung des Strahlungstransport-Solvers (AP 4)

Der Strahlungstransport-Solver FEM mit implementiertem Wasserkörper (Bulgarelli et al. 1999) wurde federführend unter Dr. V. Kiselev entwickelt und bildet das physikalische Rückgrat des Modular Inversion & Processing System MIP von EOMAP, welches die Anwendungsmodule bereitstellt. Die bidirektionale Abbildung durch FEM war aufgrund der planparallelen Vereinfachung ungenau bei Sonnenwinkel unter 30 Grad. Für arktische Bedingungen und Geometrien benötigte auch der Schichten-Aufbau der Atmosphäre und seiner Bestandteile sowie deren Phasenstreufunktionen eine besondere Analyse und Anpassungen. Die durch Vorwärtsrechnung in FEM erzeugten Datenbankstrukturen bilden die Stützstellen in MIP. Sie sind unterteilt in die spektral höchstaufgelöste MDB (Main Data Base) und die den Sensordatenbanken, die sensor-spezifisch und spektral reduzierte Datenbanken sind, welche aus der MDB erzeugt werden. Beide speichern für globale Anwendbarkeit die Beziehungen zwischen modellierten/messbaren Strahldichten am Sensor als Funktion von Aufnahmegeometrien und Umwelteigenschaften wie atmosphärischer Aerosole, Wasser-oberflächeneigenschaften, optische Wasserinhaltsstoff-Eigenschaften, Seegrund-reflexion und Wassertiefe ab.
Für die exaktere Abbildung der arktischen Aufnahmebedingungen wurden die relevanten Geometrien untersucht. Dabei wurde der bislang niedrigste Sonnenwinkel von 30 Grad in den Datenbanken heruntergesetzt auf 5 Grad und die Schrittweite im Bereich bis 30 Grad auf 5 Grad erhöht. Erste Untersuchungen für die Vorwärts-Strahlungstransport-Modellierungen haben die Notwendigkeit der höheren Auflösungen von Zenit- und Azimutwinkel gezeigt. Die erforderliche Auflösung wurde in einem zweiten Schritt im Zusammenspiel mit den gegenwärtig genutzten multidimensionalen Interpolier-Verfahren untersucht und erfolgreich getestet.

1.2 Atmosphärenkorrektur und Retrievalmodule (AP 5)

Der Nachbarschaftseffekt stellte aufgrund der extrem hellen Eis-Albedo im sichtbaren Spektralbereich um die teils sehr kleinräumigen Schmelzwassertümpel eine besondere Anforderung der in AP 5 zu optimierenden Korrekturverfahren dar. Daher wurde die vorhandene Umsetzung überarbeitet, um auch kleinräumige Abbildungen der Umgebungsalbedo zu verbessern. In Kooperation mit dem JRC (Dr. Bulgarelli) wurde das Adjacency-Verfahren überarbeitet und anhand der Expertise des JRC mit Radiometermessungen, Aeronet-Stationen sowie mit Vorwärts-Monte-Carlo-Rechnungen zur Simulation des Nachbarschaftseffektes verifiziert.
Im Vorlauf zur Produktgenerierung wurde auch die Trennung von Eis, Wolke und Wasser für arktische Bedingungen untersucht und im Detektionsverfahren verbessert. Im bisherigen Verfahren kam es in diversen Fällen durch fehlerhafte Zuweisungen von Wolke und Eis zu einem größeren Fehler bei der Nachbarschaftskorrektur.

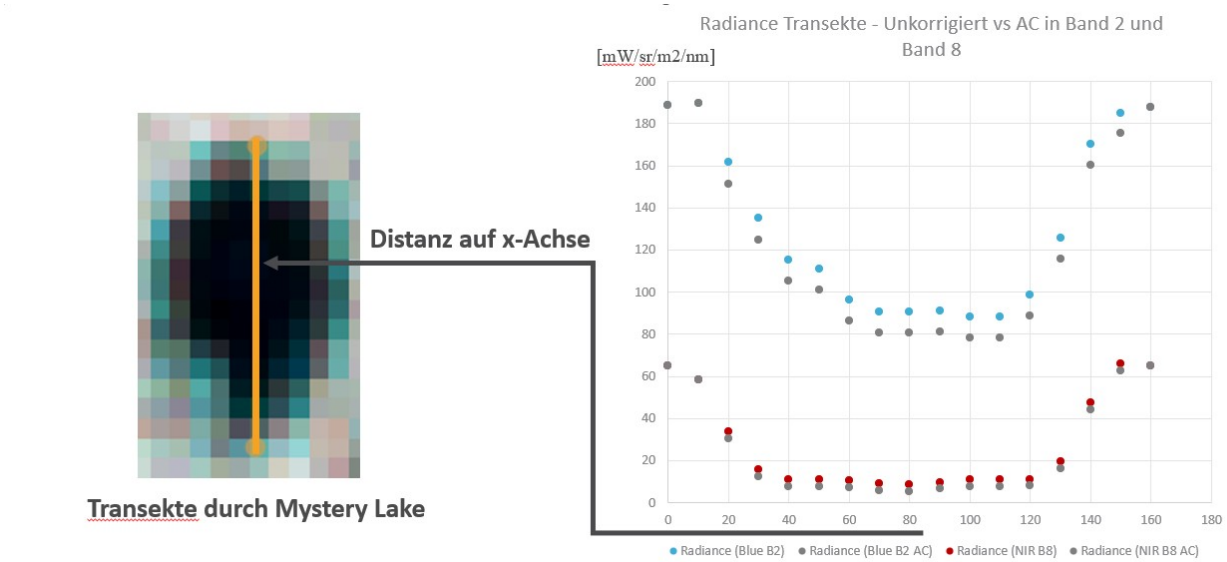


Abbildung 1: Darstellung des Nachbarschaftseffekts am Beispiel des beobachteten Mystery Lakes (links). Vergleich der Strahlungswerte vor und nach Nachbarschaftskorrektur (rechts): Blau – Sentinel Band 2 (490nm), Grau nach Korrektur, Rot - NIR Sentinel Band 8 (842nm), Grau nach Korrektur.

Das verbesserte Korrekturverfahren wurde in verschiedenen Tests mit Sentinel-2 Szenen über arktischen Ponds und Wasser-Eis-Flächen, inklusive der während der Mosaic-Kampagne untersuchten Tümpel auf Plausibilität geprüft. Der Einfluss bzw. die Bedeutung der Nachbarschaftskorrektur hat sich mit 15 - 30% (bezogen auf den Anteil der Strahldichte am Satellitensensor) je nach Wellenlänge und bei starker Richtungsabhängigkeit bestätigt (siehe Abbildung 1).

Das Atmosphärenkorrektur-Verfahren für die arktischen Bedingungen wurde ebenfalls auf den Prüfstand gestellt. Dabei wurden Anpassungen für die Berechnung der Variation der Wellenlängenabhängigkeit der Aerosolstreuung durchgeführt. Für das Atmosphärenkorrekturverfahren wurden methodische Untersuchungen zur Berücksichtigung der

Erdkrümmung durchgeführt. Hierzu zählen Überlegungen zur Korrektur der Luftmasse und relativen Dicke der unterschiedlichen Luftschichten für die tiefen Einstrahlwinkel der Sonne.

Die erwähnten Untersuchungen zur Berechnung der Aerosole haben zu einer kompletten Überarbeitung mit deutlich mehr und unterschiedlichen Aerosolmodellen sowie einer neuen Struktur der Hauptdatenbank geführt. Die automatische Berechnung der Zusammensetzung aller optimalerweise zu berücksichtigenden Aerosol-Typen hat jedoch auch zu Instabilitäten beim Retrieval geführt, so dass wir die Anzahl der Aerosole im operationellen Betrieb auch beim Stand zum Projektende noch begrenzen. Die Entwicklung zur Nutzung von optisch möglichst unterschiedlichen Aerosolen auch im operationellen Betrieb werden wir auch nach Projektabschluss fortführen.

1.3 Produktgenerierung (AP 6)

Es wurden Validationen auf Basis der Messungen im Zuge der MOSAiC Kampagne durchgeführt, um die Verbesserung auf Grund der optimierten Korrekturverfahren zu quantifizieren und den Finalen Prozessor zu validieren. Für die Wassertiefen des vermessenen Ponds (Mystery Lake) und der zeitnächsten Sentinel-2-Aufnahme erreichten wir gute unabhängige Ergebnisse mit einer Genauigkeit von ca. 50 – 80 cm je nach Prozessorversion,

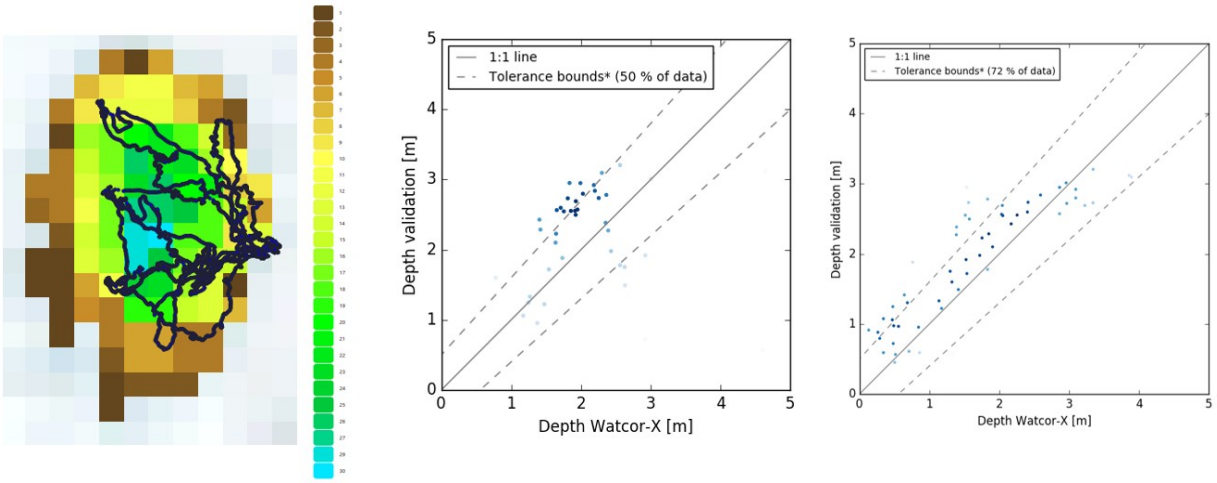


Abbildung 2: Validation der Tiefendaten des Mystery Lakes. Links: Bathymetrie mit Lage der driftkorrigierten Tiefenmessungen. Mitte: Validation mit angepasster Nachbarschaftskorrektur. Rechts: Validation nach verbesserter Maskierung, Nachbarschaftskorrektur und angepasster Atmosphärenkorrektur (Toleranzintervall: +-0.5m + 10% Tiefe).

obwohl die 10m-Pixel-Auflösung nur ein grob-aufgelöstes Abbild des Ponds liefern kann (siehe Abbildung 5). Da die Validationsdaten etwa 2 Tage später als die Multispektraldaten aufgenommen wurden und die Dynamik der Tiefen hoch bzw. der Schmelzvorgang in dieser Zeit relativ schnell voranschreitet, ist es wahrscheinlich, dass die Validation bei gleichzeitigen Aufnahmen sogar etwas besser ausfallen würde. Die zeitlich-räumliche Entwicklung des Mystery-Lakes ist in Abbildung 4 dargestellt.

Zwischenprodukte des vollphysikalischen Retrievals beinhalten auch die Konzentrationen der Wasserinhaltsstoffe bzw. deren optische Größen wie Absorptions- und Streuspektren. Die vom EOMAP-Prozessor berechnete Gesamtabsorption organischer Inhaltsstoffe liegt mit 0,03 bis 0,06 1/m bei 440nm bei erwartungsgemäß niedrigen Werten: Dieser Wertebereich liegt etwas unter den Universität Kiel gemessenen (Abbildung 3), ist jedoch auch im Vergleich zu den gemessenen Chlorophyll-Werten sehr plausibel, da in dieser Absorption nur geringe Chlorophyll-Gehalte abbildbar sind mit Werten von 0.5 bis max 2 µg/l: Gemessen wurden von der Universität Kiel 0,2 bis 0,8 µg/l aus Chlorophyll-a und Cyano-Pigmenten am 6. Und 8. Juli 2020 am James Pond, Outer Pond und Pond N.1 (vergl. Bericht der Univ. Kiel).

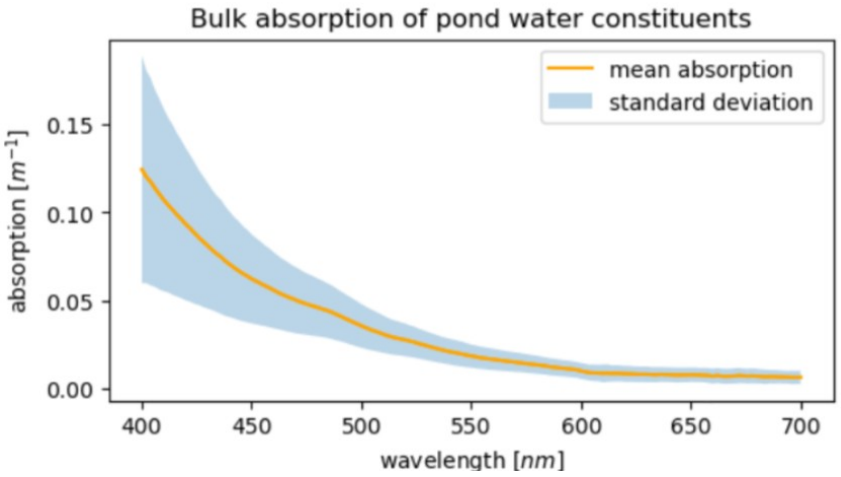
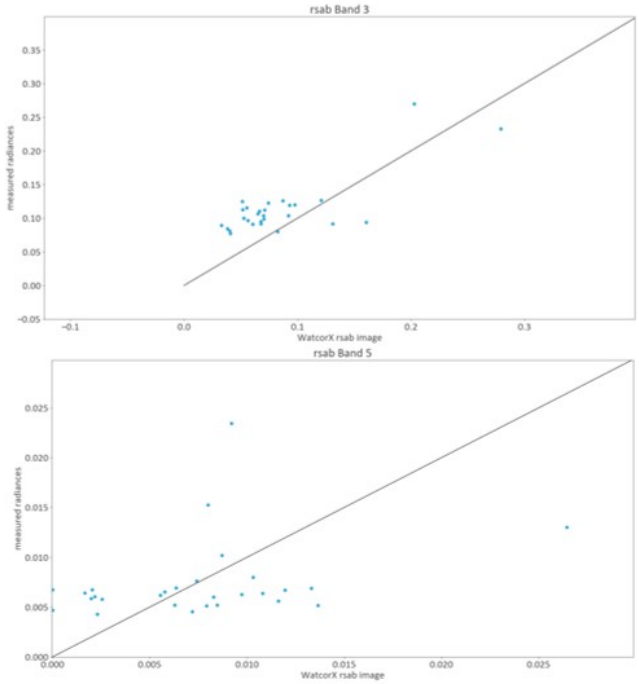


Abbildung 3: Gesamtabsorptionsspektrum und deren Variabilität aus in-situ Messungen der Universität Kiel 2020.

Für die Trübung hat der EOMAP-Wassertiefen-Prozessor Werte um die 1 NTU bzw. 1 mg/l Schwebstoff berechnet, was als plausibel niedrig, jedoch nicht extrem niedrig erscheint. Direkt vergleichen mit den während der Projektlaufzeit vorgenommenen Messungen konnten wir verschiedene Reflexionsmessungen. Diese wurden entsprechend im Kern zur Bewertung und Validation unserer Retrieval-Parameter herangezogen. Verglichen wurden die von Uni Kiel gemessenen und berechneten Strahldichten, Unterwasser-Reflexionsspektren und Bodenspektren. Bei allen Messungen ergibt sich eine gute Konsistenz und Korrelation (vergleiche Abbildung 4 für die Reflexion bei verschiedenen Wellenlängen).
Lediglich bei den berechneten Seegrundreflexion hätten wir eine höhere Übereinstimmung vom spektralen Verlauf des MIP-Models erwartet. Erzwungene Bodenspektren in Form der Mess-Spektren hätten die Validität der berechneten Wassertiefe jedoch verschlechtert. Daher haben wir es bei der vom Prozessor berechneten Boden-Albedo belassen.



Band	Corr.	Corr. improved process
1	0.41	0.45
2	0.66	0.68
3	0.61	0.70
4	0.75	0.49
5	0.70	0.86
6	0.78	0.80

Abbildung 4: Validation der Reflektanzen (Remotesensing Reflectance über Wasser) gemessen am Mystery lake. Links oben: Sentinel Band 3 (560nm) Links unten: Sentinel Band 4 (665nm) Rechts oben: Sentinel Band 5 (705nm) Rechts unten: Vergleich der Korrelation vor und nach den optimierten Atmosphären- und Nachbarschaftskorrekturen

Über die direkte Validation hinaus haben wir das Verfahren auf operationelle Übertragbarkeit durch räumlich-zeitliche Konsistenzprüfungen getestet: So zeigt die zeitliche Abfolge der ohne weitere Kalibration prozessierten Daten des Mystery-Lakes eine plausible Entwicklung in der Tiefe, der räumlichen Ausdehnung und der berechneten Volumina (siehe Abbildung 5). Analog dazu verhalten sich die Entwicklungen von benachbarten Schmelzwasser-Seen.

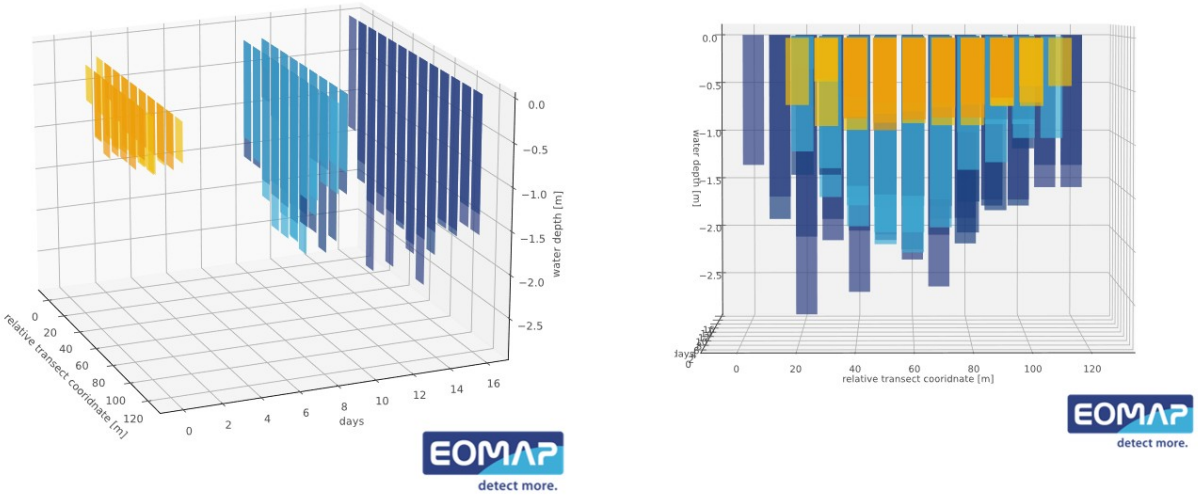


Abbildung 5: Zeitlich-räumliche Entwicklung des Mystery Lakes von 2020-06-21 bis 2020-07-07. Wassertiefe entlang einer Transekte durch den Pond.

Der Problematik der wenigen Validationsdaten sind wir auch durch eine Neuentwicklung zur Nutzung von satellitengestützten Lidar-Daten aus ICESAT-2 angegangen: Wir haben verschiedene Ansätze zur Waveform-Analyse verglichen und ein operationalisierbares Verfahren signifikant weiterentwickelt und getestet. Kern des Verfahrens ist es die vom Boden des Ponds reflektierten Photonen zu identifizieren und von den an der Wasseroberfläche reflektierten Photonen und anderen Signalen zu isolieren. Die kleinräumige Auflösung der Ponds in Kombination mit der geringen Tiefe führt allerdings zu sehr geringen Punktdichten, die ein zuverlässiges Erkennen der Wassertiefe als weitere Validationsquelle in unseren realisierten Prozessen nicht zuließen. Die Prozessierung von Lidar-Daten auch in extremen Bedingungen befinden sich weiterhin in Entwicklung.

Entsprechend lieferten nur die Sentinel-2 Daten eine Datengrundlage für eine großskalige und wo möglich Multi-Temporale Datenprozessierung.

Die großskalige Datenprozessierung zeigt sehr plausible Ergebnisse in der Ausdehnung sowie in der zeitlichen Entwicklung der Tümpel. Zur besseren Darstellung der räumlichen Verteilung der Ponds in größerem Maßstab wurde ein neues Produkt, die Lokale Wasserdichte für unterschiedliche Aggregations-Radien erstellt (Siehe Abbildung 6).

Es wurde eine Analyse der gesamten Arktik über den arktischen Sommer erhoben. Dabei wurden die Szenen der größten wolkenfreien Bereiche (Siehe Abbilung 7) gesichtet und nach Qualitätsprüfung auf (Cirrus-) Bewölkung prozessiert. Aufgrund der Bewölkung und des Drifts war die Darstellung der zeitliche Entwicklungen wie in Abbildung 5 auf großer räumlicher Skala nicht möglich. Die Daten in den dargestellten Regionen sind daher eine zeitliche Überlagerung der geeigneten Vorauswahl zur Prozessierung.

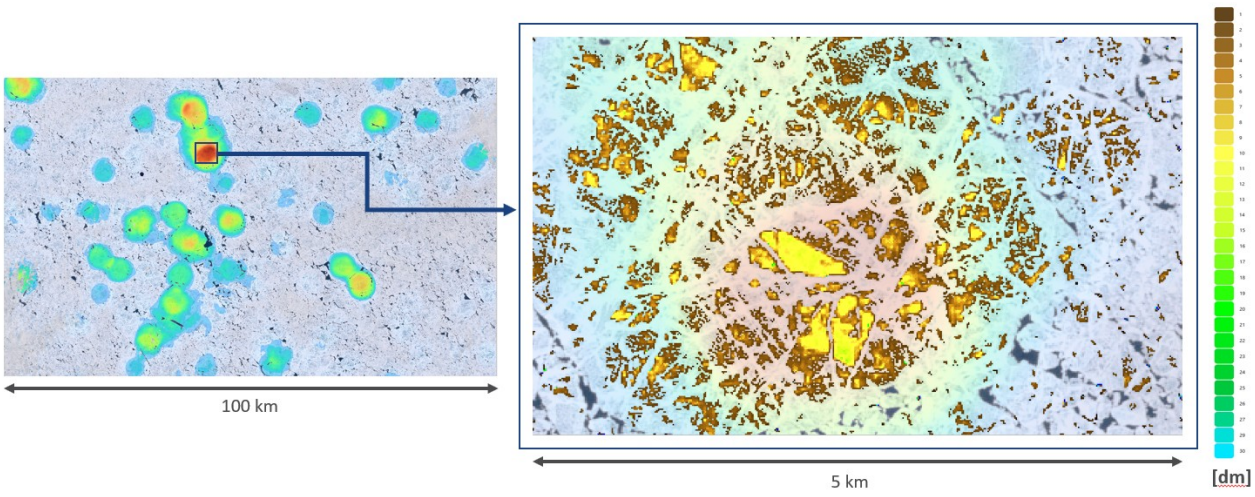


Abbildung 6: Gegenüberstellung von lokaler Wasserdichte mit Radius 2,5km in großräumiger Ansicht (links) und Wassertiefe der Ponds in einem stark vergrößerten Bereich mit hoher lokaler Wasserdichte und dmit hoher dichte an (tieferen) Ponds (rechts).

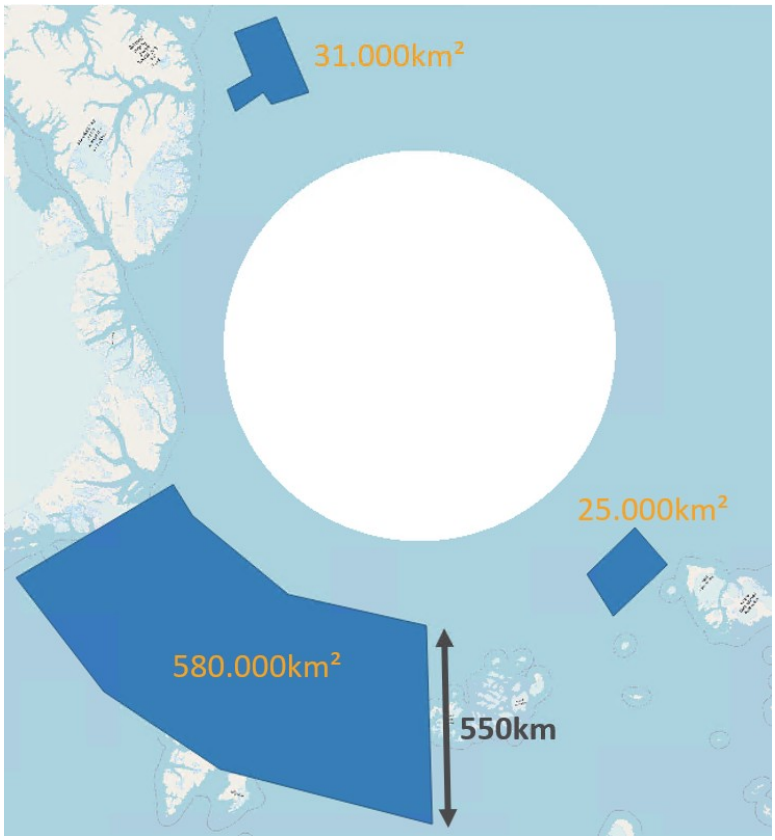


Abbildung 7: Abdeckung der arktischen Region, die in der Prozessierung verwendet wurde. Gebiete, bei denen unter mangelhaften atmosphärischen Bedingungen nur sehr kleinräumig-fleckenhafte und mono-temporale Ergebnisse möglich sind, wurden in der grossflächigen Prozessierung ausgeschlossen.

In Abbildung 8 ist nun die Lokale Wasserdichte mit Radius 2,5 km in den analysierten Regionen, die nach der Qualitatätsprüfung prozessiert wurden, dargestellt. Diese Art der Darstellung lässt eine großräumige Analyse der lokalen Variation der Wasserkonzentration zu. Auffallend ist, dass die Konzentration lokal stark schwankt, was auf Schollen mit mehr und tieferen Ponds (vermutlich mehrjähriges Eis) bzw. weniger und flacheren Ponds (vermutlich einjähriges Eis) schließen lässt. Mögliche Ableitung hieraus wäre z.B. eine Abschätzung des Verhältnisses von einjährigem zu mehrjährigem Eis.

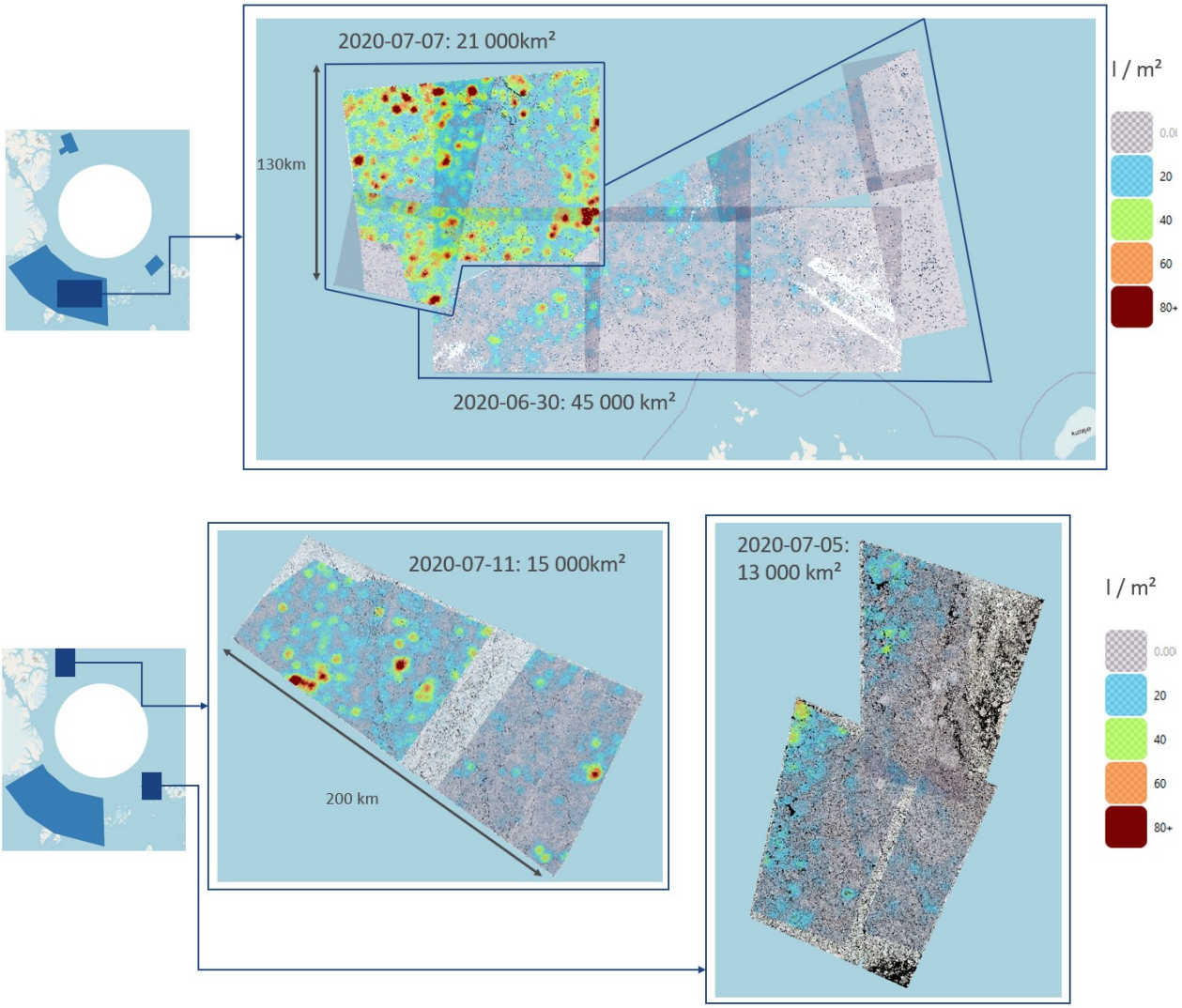


Abbildung 8:Lokale Wasserdichte mit Radius 2,5km. Zeitlich-räumliche Überlagerung aus den analysierten Regionen

Aus den Ergebnissen der Prozessierung wurde die zeitliche Entwicklung der globalen Wasserdichte auf dem arktischen Eis erstellt (siehe Abbildung 9). Aufgrund der Bewölkungssituation liegen die analysierten Regionen oftmals weit auseinander, was eine konsistente Beobachtung der Entwicklung erschwert und zu größeren Unsicherheiten führt.

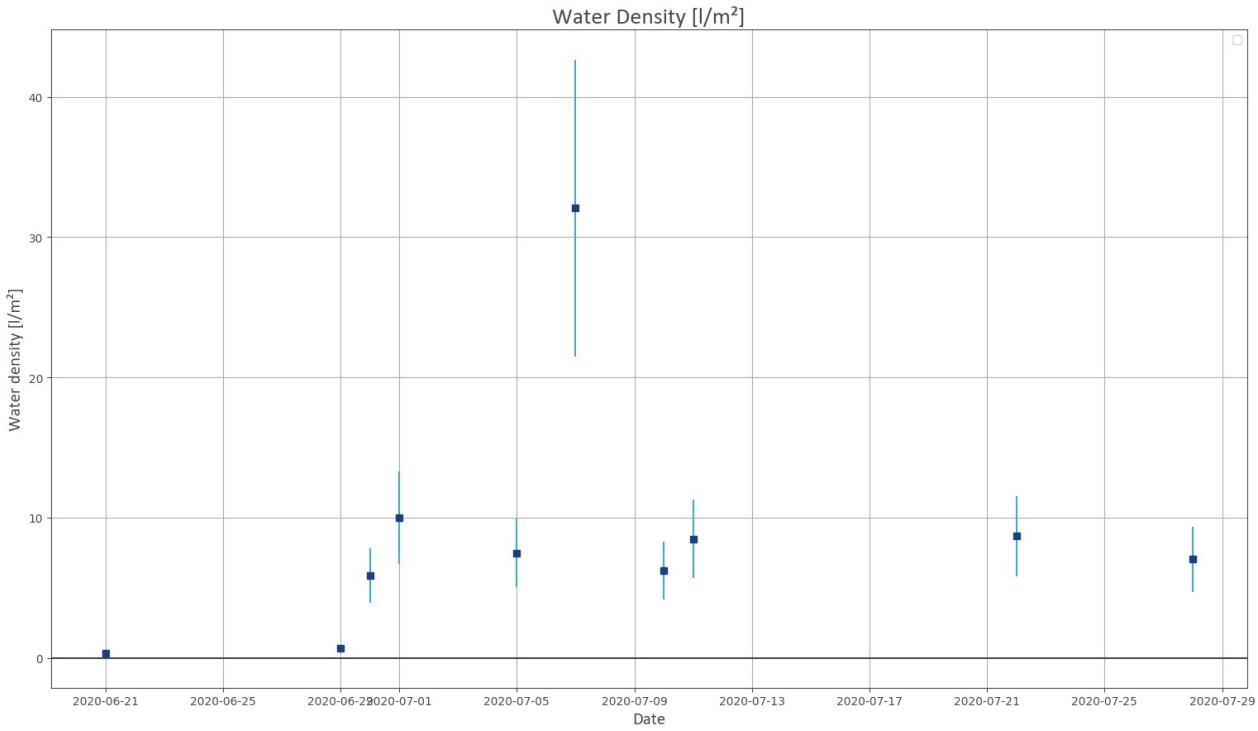


Abbildung 9: Temporale Entwicklung der Wasserdichte auf arktischen Eis im Sommer 2020.

Zur Nutzungvorbereitung von hyperspektralen Satellitendaten wurden angesichts der Verzögerungen beim Launch von ENMAP entsprechende hyperspektrale Bilddaten mittels des FEM-Solvers auf Basis von aus Sentinel-2 berechneten Aerosol-, Land- und Wasserreflexionswerten simuliert. ENMAP Hyperspektraldaten der Arktik (07/2023) aus einem von uns veranlasstem Tasking, konnten aufgrund der Bewölkungssituation nicht weiter zur Prozessierung verwendet werden. Jedoch haben wir die Eignung der ENMAP Radiometrie und Atmosphärenkorrektur in anderen Regionen überprüft. Auch PRISMA-Daten wurden versucht zu gewinnen in Zusammenarbeit mit CNR. Das geplante Tasking von PRISMA während der MOSAiK-Kampagne konnte schliesslich aufgrund der Aufnahmeeinschränkungen von PRISMA für nördliche Breiten nicht realisiert werden.