



universität
wien

MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Vergleich arktischer Erwärmung in Satellitenprodukt und Reanalyse

verfasst von / submitted by

Ulrich Voggenberger, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2019 / Vienna, 2019

Studienkennzahl lt. Studienblatt /

degree programme code as it appears on

the student record sheet: UA 066 614

Studienrichtung lt. Studienblatt /

degree programme as it appears on

the student record sheet: Masterstudium Meteorologie

Betreut von / Supervisor: Univ.-Prof. Mag. Dr. Leopold Haimberger

Abstract

This paper deals with the problems of reanalysis and satellite product data. The main focus is on the Arctic and the sea ice concentration data sets. Differences between these two time series are searched for, quantified and examined in detail. This is done in a global context as well as in separate zones of great relevance. The focus is on the European North Sea, the Greenland Sea and the Barents Sea, as these contain the longest year-round sea ice edge.

The basics of climate influence of sea ice and melting are explained. Data formats and the regridding necessary for the comparison, the interpolation of the satellite data onto a regular grid, are also presented.

The critical areas of these comparisons are the edge areas of the sea ice. The ICELINE method is introduced in order to be able to compare them better and more easily. Only the edge data of the sea ice are searched and compared. This method saves computing power and offers some advantages in addition to easily interpretable results.

The comparison provides two basic sources of difference: Sea ice near the coast and sea ice during the melting phase in the summer months. Several zones are considered separately. Above all, an estimation regarding the magnitude of the differences is of interest.

Finally the relationship between temperature and distance to the sea ice edge will be investigated. These are to support the understanding and represent the direct connections of these two variables. The problem of the liquid melt water on the sea ice will be discussed here again in detail.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird auf die Probleme der Reanalyse und Satellitenprodukt Daten eingegangen. Hauptsächlich betrachtet wird die Arktis und die Datensätze der Meereiskonzentration. Es werden Unterschiede zwischen diesen beiden Zeitreihen gesucht, diese quantifiziert und näher betrachtet. Dies geschieht in globalen Rahmen sowie in gesonderten Zonen mit großer Relevanz. Der Fokus liegt im europäischen Nordmeer, der Grönlandsee und der Barentssee, da diese den längsten ganzjährigen Meereisrand beinhalten.

Es werden die Grundlagen des Klimaeinflusses von Meereis und Abschmelzen erläutert. Ebenso werden Datenformate und das für den Vergleich notwendige Regridding, das Interpolieren der Satellitendaten auf ein gleichmäßiges Gitter, vorgestellt.

Die kritischen Bereiche dieser Vergleiche sind die Randbereiche des Meereises. Um diese besser und einfacher vergleichen zu können, wird die Methode der ICELINE vorgestellt. Hierbei werden lediglich die Randdaten des Meereises gesucht und miteinander verglichen. Diese Methode spart Rechenleistung und bietet neben leicht interpretierbaren Ergebnissen einige Vorteile.

Der Vergleich liefert zwei grundlegende Differenzquellen: Meereis in Küstennähe und Meereis während der Schmelzphase in den Sommermonaten. Mehrere Zonen werden separat betrachtet. Vor allem eine Abschätzung bezüglich Größenunterschied der Differenzen ist von Interesse.

Abschließend wird noch der Zusammenhang zwischen der Temperatur und der Nähe zum Meereisrand abgeschätzt. Diese sollen das Verständnis fördern und die unmittelbaren Verbindungen dieser beiden Größen darstellen. Hierbei wird erneut genauer auf die Problematik des flüssigen Schmelzwassers auf dem Meereis eingegangen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	1
Zusammenfassung	1
1. Motivation	5
1.1. Polare Amplifikation	5
1.2. Messstationen	6
1.3. Ziel	6
2. Grundlagen	8
2.1. Daten	8
2.1.1. Datenformat	8
2.1.2. SIC aus Satellitendaten abgeleitet	8
2.1.3. ERA5 Reanalyse	10
2.2. Regridding	11
2.2.1. Bilineare nearest neighbour	12
3. ICELINE	13
3.1. Definition ICELINE	13
3.1.1. Schwellwert für die ICELINE	13
3.2. Vorteile und Schwächen der ICELINE	14
3.3. Vergleich von ICELINEs	16
3.4. Beispiele	16
3.4.1. ICELINE von Satellitenprodukt und Reanalyse	16
3.4.2. ICELINE im zeitlichen Verlauf	17
4. Vergleich	21
4.1. Vergleich zwischen Reanalyse und Satellitenprodukt	21
4.1.1. Küstennähe	22
4.1.2. Meereis Rand - ICELINE	24
4.2. Ergebnisse	25
4.2.1. Östlicher Nordatlantik	27
4.2.2. Fazit	29
5. Experimente	31
5.1. Zusammenhang Temperatur u. Abstand zur ICELINE	31
5.1.1. Im Jahresverlauf	33
5.1.2. Interpretation	34
5.2. Zusammenhang Wind u. Streuung der Temperatur-Distanz-Punkte	37
5.2.1. Windrichtung	37
5.2.2. Gewichtete Windgeschwindigkeit	38
5.2.3. Windvektor Darstellung	41
5.3. Breitenabhängigkeit	42
5.4. Höhenabhängigkeit	43
5.5. Streuung um 0 km Distanz	44
5.6. Schmelzwasser	45

Literaturverzeichnis

45

Tabellenverzeichnis**Abbildungsverzeichnis**

1. Matthews (2018): Globale Erwärmung in °C pro °C mittlerer globaler Erwärmung (links) und die dazugehörige Abhängigkeit der geographischen Breite (rechts)	5
2. http://www.wmo.int - Global Observing System: Surface Observations	7
3. http://www.wmo.int - Global Observing System: Sea Observations	7
4. wikimedia.org - Schema der Lambert'sche Azimutalprojektion	11
5. SIC im August 2015, Betrachtetes Gebiet: zwischen Grönland und Spitzbergen (ERA5 - Monatsmittelwerte)	14
6. Generierte ICELINES im August 2015 mit unterschiedlichen Schwellwerten für die SIC: 15% (oben links), 30% (oben rechts), 50% (unten links) und 70% (unten rechts) (ERA5 - Monatsmittelwerte)	14
7. Darstellung der SIC im Nordatlantik östlich von Grönland Mai 2015 (ERA5 - Monatsmittelwerte)	15
8. Darstellung der SIC im Nordatlantik östlich von Grönland Oktober 2015 (ERA5 - Monatsmittelwerte)	16
9. Generierte ICELINES von Reanalyse (oben links - ERA5) und Satellitenprodukt (oben rechts), sowie deren Differenz (unten links) und die Differenz der SIC - räumlich und zeitlich identisch: Januar 2015	17
10. Generierte ICELINES im Januar 2015 (oben links), 2014 (oben rechts), 2013 (unten links) und 2012 (unten rechts) (ERA5 - Monatsmittelwerte)	18
11. Generierte ICELINES im Januar (links) und Februar (rechts) 2015 sowie deren Differenz Februar - Januar (ERA5 - Monatsmittelwerte)	18
12. Differenzen von gemittelten ICELINES (2012-2015): Februar(2012-2015) - Januar(2012-2015) (links oben) März(2012-2015) - April(2012-2015) (rechts oben) Juni(2012-2015) - Mai(2012-2015) (links mitte) August(2012-2015) - Juli(2012-2015) (rechts mitte) Oktober(2012-2015) - September(2012-2015) (links unten) Dezember(2012-2015) - November(2012-2015) (rechts unten) (basierend auf ERA5 - Monatsmittelwerte)	20
13. Differenzen der SIC von Reanalyse und Satellitenprodukt im Januar 2015	21
14. Differenzen der SIC von Reanalyse und Satellitenprodukt im Januar 2012-2014	23
15. Differenzen der SIC von Reanalyse und Satellitenprodukt 2015 : April, Juni, August Oktober	24
16. https://www.google.at/maps - Das im Folgenden betrachtete Gebiet zwischen Grönland und Spitzbergen, SIC im Januar 2015 in betreffender Zone	26
17. ICELINE der Reanalyse (links) und des Satellitenprodukts (rechts) von Januar 2015	26
18. Das im Folgenden betrachtete Gebiet in der Barentssee zwischen Spitzbergen und der Nordinsel, SIC im Januar 2015 in betreffender Zone	28

19. ICELINES aus der Reanalyse (links) und der Satellitenprodukt (rechts) zwischen Spitzbergen und Nowaja Semlja Januar 2015	28
20. SIC der Reanalyse im betrachteten Gebiet im August 2014 (links) und im August 2015 (rechts)	29
21. ICELINE der Reanalyse (in Rot) und des Satellitenprodukts (in Blau) von August 2014 (links) und von August 2015 (rechts)	30
22. SIC (links in %SIC) und T2m (rechts in K) für den gleich Zeitpunkt östlich von Grönland: 2015 Januar	31
23. ICELINE (blau) und Beispiel-Track (rot) für das Gebiet östlich von Grönland: 2015 Januar	32
24. Variierter Track um 2 ° Breite nach Norden und Süden ICELINE (blau) und Track (rot) für das Gebiet östlich von Grönland: 2015 Januar	32
25. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar . .	33
26. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2015 Januar, Februar, März, April, Mai, Juni	34
27. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2015 Juli, August, September, Oktober, November, Dezember	35
28. T2m Verlauf an gewissen Breitengraden - rote vertikale Linie = ICELINE 2015 Januar . .	36
29. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar, Windgeschwindigkeit in Farbe [m/s]	37
30. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar, Windrichtung in Farbe [°]	38
31. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar, Faktor des Windrichtungsgewicht - parallele Windrichtungen zur ICELINE gehen gegen 0, normal zur ICELINE gehen gegen 1 [1]	39
32. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar, Windgeschwindigkeit durch Richtung gewichtet - Hohe Gewichtung bei Windrichtung normal zur ICELINE in Farbe [m/s * 1]	40
33. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2015 Januar, Windvektoren	41
34. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar, Breitengrad [°N]	42
35. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2015 Januar, in unterschiedlichen Druckniveaus (975, 950, 925, 900, 875 hPa) und Windgeschwindigkeit in Farbe [m/s]	44
36. Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2014 & 2015 August .	45

1. Motivation

Die Daten aus Reanalysen und Satellitenprodukten sind vor allem in der Klimaforschung wichtig. Anfangsbedingungen für Klimamodelle werden aus diesen Daten gespeist. Somit ist die Qualität dieser wiederum ausschlaggebend für die Qualität der berechneten Ergebnisse.

1.1 Polare Amplifikation

Die globale Erwärmung ist eine mittlere Größe und nicht für alle Bereiche der Erde gleich. Ein Gebiet mit wesentlich stärkerer Erwärmung als im Mittel ist die Arktis. Matthews (2018) „Viele Landregionen und Jahreszeiten erfahren zurzeit eine Erwärmung, die stärker ist als der globale Jahresdurchschnitt, darunter zwei- bis dreimal höhere Werte in der Arktis“. Siehe Abbildung: 1

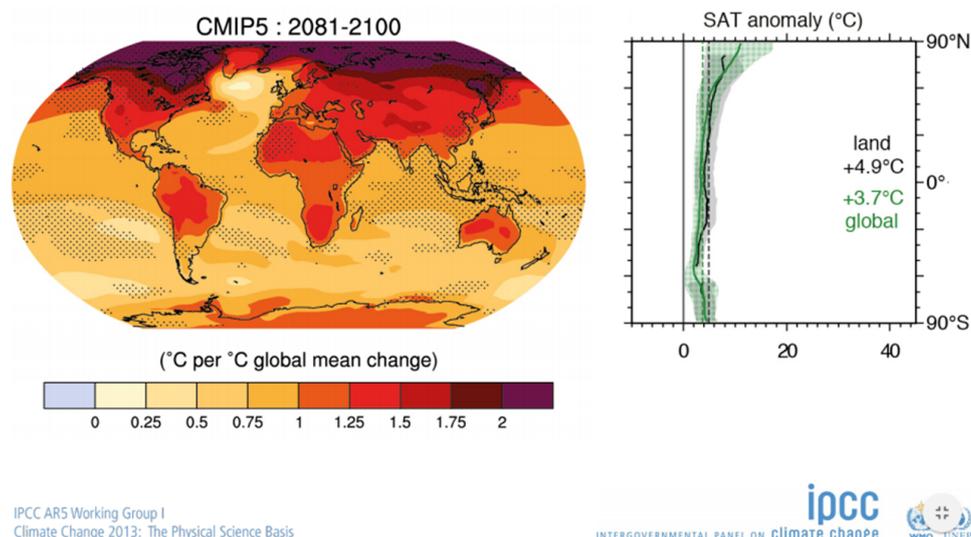


Abbildung 1: Matthews (2018): Globale Erwärmung in °C pro °C mittlerer globaler Erwärmung (links) und die dazugehörige Abhängigkeit der geographischen Breite (rechts)

Diese polare Amplifikation ist auf verschiedene Rückkopplungseffekte zurückzuführen, welche im folgenden kurz beschrieben werden:

- Eis-Albedo-Rückkopplung
Die Albedo von offenem Meerwasser (ca. 6%) ist deutlich geringer als jene von Meereis (bis zu 90% bei Schneebedeckung). Somit führt ein Abschmelzen von Meereis wiederum zu einer Abnahme der Albedo, in Folge dieser wird weniger solare Strahlung reflektiert. Positiver Rückkopplungseffekt.
- Atlantic meridional overturning circulation (AMOC)
Durch die AMOC wird warmes Wasser oberflächennah vom Äquator nordwärts transportiert. Bei einer gleichbleibenden AMOC und einer globalen Erwärmung wird somit wärmeres Wasser nordwärts transportiert. Dies kann einen erhöhten Wärmetransport zur Arktis hin bedeuten, wenn das zum Ausgleich abfließende Wasser nicht auch deutlich wärmer ist.

- Auftauen von Permafrost

Beim Auftauen von Permafrost werden die im Boden gespeicherten Gase wie zum Beispiel Methan frei, welche in Folge selbst klimaaktiv sind. Dadurch wird ein erneutes Frieren unwahrscheinlicher.

- Anstieg des Meeresspiegels (global)

Durch das Abschmelzen des Meereises wird gespeichertes Wasser frei, welches den Meeresspiegel ansteigen lässt. Ein Anstieg von $3,3 \pm 0,4$ mm/a führen zu einer kontinuierlichen Ausbreitung des Meeres auf das Land, was wiederum, wie bei der Eis-Albedo-Rückkopplung beschrieben, zu einer Abnahme der Albedo führt.

Dieser Effekt ist in Relation zu den andern Aufgelisteten gering.

1.2 Messstationen

Da die Arktis und das nördliche Polargebiet ($> 66,6^\circ\text{N}$ siehe Abbildung: 2 nördlich der obersten Linie) nur schwach bis gar nicht besiedelt ist, sind dort in situ Messungen nur sehr begrenzt verfügbar. Mehr, jedoch im Vergleich zu südlicheren Breiten immer noch wenige, Messungen sind auf dem Ozean vorhanden. Siehe Abbildung: 3. Am Eis gibt es keine Messungen.

Aus diesem Grund sind für diese Region Daten aus Satellitenprodukten und Reanalysen äußerst wichtig, um flächendeckende Messwerte zu erhalten.

1.3 Ziel

Beide genannten Methoden zur Bestimmung der relevanten Daten sind nicht absolut fehlerfrei. Es ist von großem Interesse Fehler oder Unterschiede in den Daten finden, evaluieren und für die nachfolgende Nutzung größenordnungsweise abschätzen zu können.

In dieser Arbeit wird besonders auf das Satellitenprodukt und die Reanalyse von Meereis eingegangen, da dieser Parameter eng mit der Temperatur über der Meeres- oder Eisoberfläche zusammenhängt. Die Meereisbedeckung selbst ist eine sehr klimarelevante Größe.

Es werden erst einige Betrachtungen der Größe selbst vorgenommen sowie Experimente mit den Daten angestellt, um eine umfangreiche Übersicht der Daten und Zusammenhänge zu erhalten.

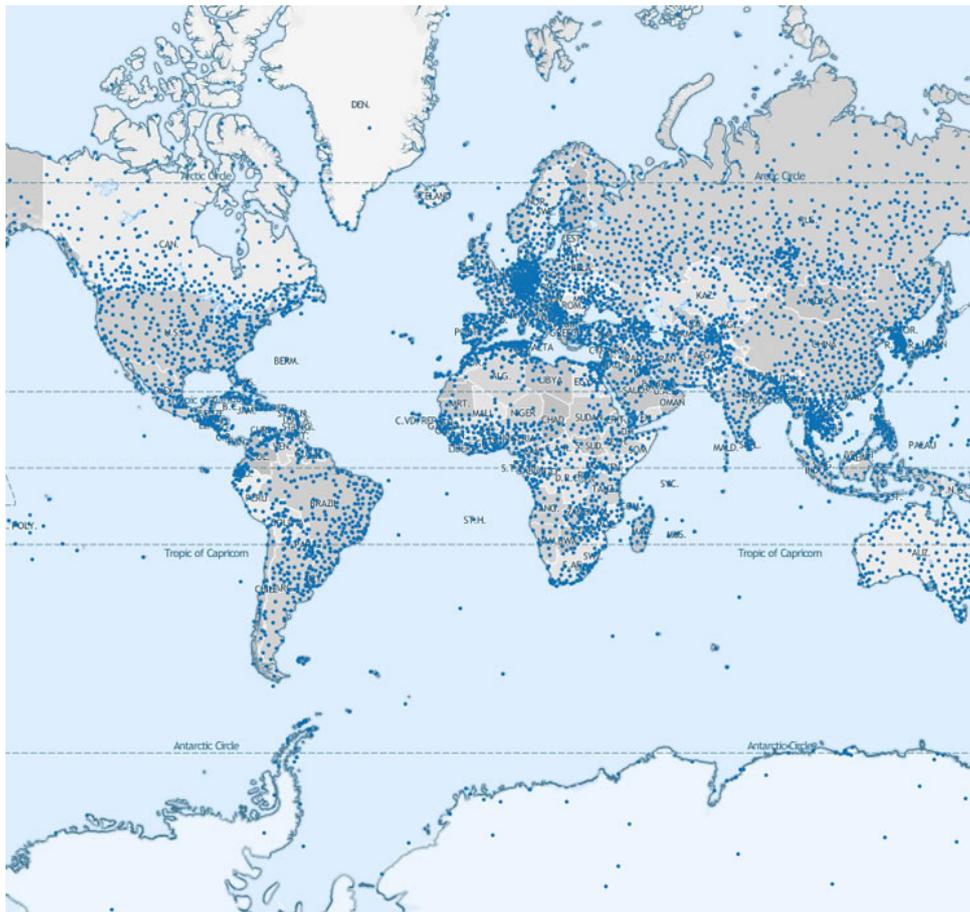


Abbildung 2: <http://www.wmo.int> - Global Observing System: Surface Observations

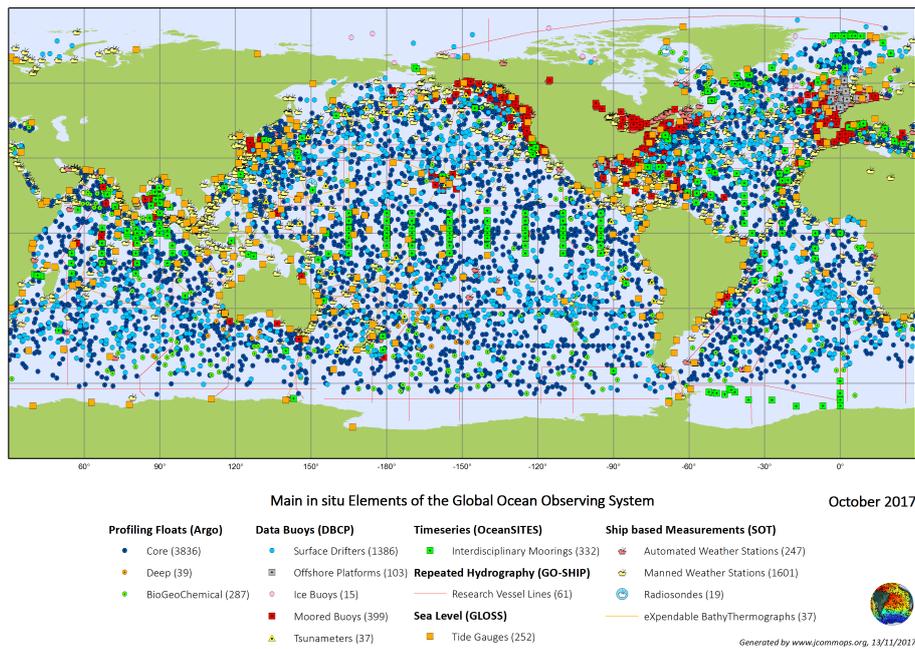


Abbildung 3: <http://www.wmo.int> - Global Observing System: Sea Observations

2. Grundlagen

Um später die Schritte der Vergleiche und Experimente besser verstehen zu können, folgen einige wichtige Grundlagen.

Grundsätzlich wurden alle Berechnungen und Experimente mit Python und diversen open-source Paketen durchgeführt (Python, 2019). Dies ermöglicht eine rasche und sorgfältige Berechnung von großen Datenmengen und alle Vorgänge sind stets zu 100% nachvollziehbar.

2.1 Daten

Alle verwendeten Daten wurde vom Copernicus Climate Data Store zur Verfügung gestellt (Copernicus, 2019).

Copernicus bietet eine umfangreiche Sammlung von Klimadaten aus Gegenwart und Vergangenheit. Prognosen und Reanalysen sind ebenso vorhanden. Die meisten Datensätze sind kontinuierlich wachsend, da Reanalysen weiter in die Vergangenheit berechnet, und neue Messdaten hinzugefügt werden.

Alle verwendeten Daten sind im netCDF-Format verfügbar (NetCDF, 2019).

2.1.1 Datenformat

Das Meereis als Größe wird im Folgenden immer in Form der “sea ice concentration“ betrachtet. Diese ist als jener Anteil des betrachteten Gitterpunktes definiert, welcher mit Eis bedeckt ist. Im Folgenden wird die sea ice concentration kurz als SIC bezeichnet.

Eine SIC von 1 bzw. 100% entspricht also einem vollständig zugefrorenen Ozeanausschnitt. Hingegen bedeutet eine SIC von 0 oder 0% eine vollständig eisfreie Wasseroberfläche.

Der “sea ice extent“ ist als Fläche oder als Summe der Gitterpunkte, welche eine SIC von mehr als 15% aufweisen, definiert.

Die Temperaturdaten werden durch die 2 Meter Temperatur oder kurz T2m dargestellt. Diese ist so nah über der Wasser oder Eisoberfläche, dass sie sich schnell an deren Temperatur anpassen kann.

2.1.2 SIC aus Satellitendaten abgeleitet

Das Satellitenprodukt des Meereises basiert auf Messungen der “microwave brightness temperature“ durch AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) Sensoren. Aus diesen Beobachtungsdaten werden SIC Daten abgeleitet, dies wird später in diesem Kapitel unter SIC aus Brightness Temperature noch genauer beschrieben. Seit 2012 stammen die verwendeten Daten von einem AMSR-2 Sensor (NASA, 2019).

Die einzelnen Werte liegen in diesem Datensatz auf einem EASE-Gitter (Equal-Area Scalable Earth). Am Pol wird eine Auflösung von 40 km erreicht, diese nimmt mit niedriger werdenden geografischen Breiten ab. Die Daten sind nicht auf ganzzahligen Koordinaten verfügbar, sondern variieren und es besteht eine Abhängigkeit von der Bahn des Satelliten.

Ab 1979 sind tägliche Daten für die nördliche Hemisphäre verfügbar. Bis 2015 sind die Daten bereits von Copernicus verifiziert worden und sind mit anderen Klimadaten konsistent. In den folgenden Experimenten wird versucht, in diesem verifizierten Zeitraum zu arbeiten.

Microwave brightness temperature

Die Brightness Temperature oder Strahlungstemperatur ist ein Maß für die Ausstrahlung der Mikrowellenstrahlung, die zum Satelliten nach oben abgestrahlt wird, ausgedrückt in Einheiten der Temperatur eines gleichwertigen schwarzen Körpers.

$$T_b(\nu) = \frac{L_\nu(T) * c^2}{2\nu^2 * k} [K] \quad (1)$$

T_b = Brightness Temperature

L_ν = Spektrale Radianz

ν = Frequenz

c = Lichtgeschwindigkeit

k = Boltzmann Konstante

(Haimberger, 2016)

Die Strahlungstemperatur ist der grundlegende Parameter, der mit passiven Mikrowellenradiometern gemessen wird. Die Brightness Temperatures, gemessen bei verschiedenen Mikrowellenfrequenzen, werden bei Fernerkundungssystemen verwendet, um Wind-, Dampf-, Wolken-, Regen- und Meeresoberflächen-Produkte abzuleiten.

Die Brightness Temperature ist abhängig von der Temperatur (welche sich bei Eis und Meerwasser überschneiden kann ca. -2 °C bis 0 °C) und vom Emissionskoeffizienten der strahlenden Oberfläche. Wasser hat einen niedrigeren Emissionsgrad als Eis, somit kann es bei dieser Betrachtungsweise gänzlich von Eis unterschieden werden.

$$T_b(\nu) = \left(\frac{k}{h\nu} * \ln \left[1 + \frac{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}{\epsilon} \right] \right)^{-1} [K] \quad (2)$$

T_b = Brightness Temperature

T = Temperatur der beobachteten Oberfläche

ϵ = Emissionsgrad

ν = Frequenz

h = Planck Konstante

k = Boltzmann Konstante

Problematisch hingegen sind jedoch Schmelzwassertümpel, welche sich auf der Eisoberfläche bilden können. Diese haben meist eine sehr ähnliche Temperatur wie das angrenzende Wasser und den gleichen Emissionskoeffizienten. In solchen Fällen kann es zu Unterscheidungsschwierigkeiten kommen (Sandven, 2018).

SIC aus Brightness Temperature

Die SIC wird aus den gemessenen Brightness Temperatures geschätzt. Durch Linearkombination der unterschiedlichen Emissionswerte von Wasser und Eis in den 18, 36 und optional 90 GHz Kanälen werden die Anteile der Eisbedeckung berechnet.

Durch niederfrequente zusätzliche Kanäle (meist 6 GHz) können hier noch Verbesserungen erreicht werden. Diese Kanäle sind jedoch nur selten verfügbar, da die dafür notwendigen Antennen sehr groß sind und nur selten in Satelliten verbaut werden.

Die meisten Eiskonzentrationsalgorithmen, die auf Mikrowellenradiometrie basieren, basieren auf der doppelten Beobachtung: 1. verschiedene Oberflächentypen haben unterschiedliche Mikrowellensignaturen und 2. die radiometrische Signatur am Instrumentenkopf ist eine Linearkombination aus den Signaturen der verschiedenen Oberflächentypen. Wenn aus jedem der Instrumentenkanäle ein Vektorraum gebildet wird, in dem alle bis auf eine der Signaturen der verschiedenen Oberflächentypen linear unabhängig sind, dann ist es einfach, die relativen Konzentrationen zu lösen (Rothrock, 1988):

$$\vec{T}_b = \vec{T}_{b0} + \sum_{i=1}^n (\vec{T}_{bi} - \vec{T}_{b0}) * C_i \quad (3)$$

\vec{T}_b = radiometrischen Signatur am Instrumentenkopf (Brightness Temperature)

\vec{T}_{b0} = Signatur des Hintergrund-Oberflächentyps (Wasser)

\vec{T}_{bi} = Signatur der weiteren Oberflächentypen (Eis)

C_i = relative Concentration (SIC)

Alle Algorithmen zur Umwandlung von Brightness Temperature zu einer SIC basieren grundsätzlich auf dieser Annahme.

Probleme treten hierbei vor allem durch Wasser oder Schnee auf dem Eis auf, da diese unterschiedliche Emissionsgrade haben.

Ein weiterer Fehler der SIC entsteht oft an den Küsten, da dort die Brightness Temperature einerseits von der Landfläche der Küste und andererseits von der teilweise zugefrorenen Meeresoberfläche gemessen wird (Sandven, 2018).

Die SIC aus den Satellitendaten ist also keine echte Beobachtung, sondern ein Produkt, welches aus Beobachtungsdaten abgeleitet und geschätzt wird.

EASE - Grid

Die Equal-Area Scalable Earth (EASE) Gitter sind als vielseitige Formate für global skalierte Rasterdaten, einschließlich Fernerkundungsdaten, gedacht.

Der EASE Grid wurde im National Snow and Ice Data Center (NSIDC), in Boulder definiert und hat drei verschiedene Optionen, die hier verwendete Projektion ist die Lambert'sche Azimutalprojektion auf der Nordhemisphäre. Die Projektion erfolgt wie in Abbildung: 4 dargestellt.

Bei einer Breite von 75°N beläuft sich der Flächenfehler durch Verzerrung auf 2% und ab einer Breite von 60°N auf 7%. Da sich das betrachtete Gebiet hauptsächlich sehr nahe zum Pol (>70°N) befindet, spielt diese Verzerrung keine große Rolle und wird vernachlässigt.

2.1.3 ERA5 Reanalyse

Numerische Wettermodelle und Datenassimilationssysteme können dazu verwendet werden um archivierte Messdaten neu zu analysieren und globale Datensätze zu erstellen, die die Atmosphäre, die Landoberfläche und die Ozeane beschreiben. Reanalysedaten werden zur Überwachung des Klimawandels, für Forschung und Lehre sowie für kommerzielle Anwendungen verwendet (Hirahara, 2016).

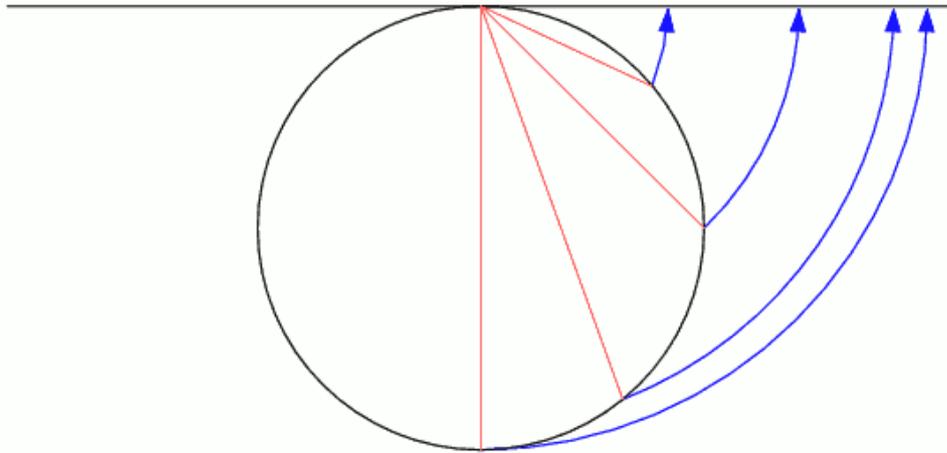


Abbildung 4: wikimedia.org - Schema der Lambert'sche Azimutalprojektion

Als Reanalyse Daten wurde die aktuelle Generation des ERA Datensatzes, ERA5, verwendet (Hennermann, 2019). ERA5 wird vom ECMWF berechnet und zur Verfügung gestellt. Diese sind ab 1979 verfügbar und verbinden Punktbeobachtungen und den physikalischen Hintergrund zu flächendeckenden Daten über dem ganzen Globus. Es werden eine Vielzahl an meteorologischen Parametern berechnet und bereitgestellt, für die folgenden Vergleiche und Auswertungen wurden zusätzlich zur SIC noch die Temperatur in 2 m Höhe und die Windkomponenten in 10 m Höhe verwendet (Hennermann, 2019).

ERA5 SIC

Die SIC im ERA5 Datensatz werden nicht darin berechnet, sondern aus dem OSI-SAF (EUMETSAT, 2019) entnommen.

Die OSI-SAF Daten werden aus Beobachtungen von DMSP/SSMIS (Defense Meteorological Satellite Program - Special Sensor Microwave Imager / Sounder) Satelliten erstellt. Die so erlangten Daten sind komplementär zu den AMSR Daten (NASA, 2019), welche im Satellitenprodukt verwendet werden.

Es ist festzuhalten, dass auch die Reanalyse SIC Daten auf Beobachtungen basieren. Diese werden jedoch noch zusätzlich verbessert um einerseits im zeitlichen Verlauf homogen zu sein und andererseits werden sie an die angrenzenden Küsten angepasst. Diese Adaptionen sind notwendig, da diese Daten in weiterer Folge direkt in die Berechnungen von anderen Parametern der ERA5 Daten eingehen (Hirahara, 2016).

Die ERA5 SIC Daten sind auf einem regelmäßigen $0,25^\circ$ Gitter verteilt, dies entspricht einer Auflösung von etwa 27 km. Die berechneten Daten sind jedoch auf einem $0,36^\circ$ Gitter.

2.2 Regridding

Regridding ist der Prozess der Interpolation von einer Gitterauflösung auf eine andere Gitterauflösung. Dies kann zeitliche, vertikale oder horizontale (Fläche) Interpolationen beinhalten. In diesem Fall handelt es sich um räumliche, also horizontale Interpolation. Es gibt zahlreiche Interpolationsmethoden, welche alle für ihre jeweilige Aufgabe am besten geeignet sind. Die Verwendung eines ungeeigneten Interpolationsschemas kann zu irreführenden Ergebnissen führen. Darüber hinaus sind

die meisten Gitter auf einer Sphäre georeferenziert, in der Polsingularitäten und die Konvergenz der Längenmeridiane Probleme sein können, die es zu lösen gilt.

Um die Vergleichbarkeit beider Datensätze zu gewährleisten müssen diese auf das gleiche Gitter gebracht werden. Somit können die Gitterpunkt-Werte direkt miteinander verglichen werden.

Die des Satellitenprodukts sind von geringerer Auflösung. Um eine möglichst genaue Darstellung zu erhalten, werden diese auf das Gitter der Reanalysedaten interpoliert.

Dies wurde mit dem open-source Python Package "Earth System Modeling Framework" durchgeführt (xESMF, 2019).

Für diesen Zweck wird das Zielgitter und dazu ein Datensatz mit den Gewichten generiert, welcher direkt auf die zu interpolierenden Satellitendaten angewendet werden kann. Diese Gewichte werden durch eine "bilineare nearest neighbour"-Methode erstellt. Diese Methode wird für eine Erhöhung der Auflösung empfohlen (xESMF, 2019). Diese Option ist am schnellsten und das Ergebnis wird geglättet, so dass das Satellitenprodukt an das Zielgitter angepasst wird.

2.2.1 Bilineare nearest neighbour

Die bilineare Interpolation ist eine Technik zur Berechnung der Werte eines Gitterstandortes basierend auf benachbarten Gitterzellen. Der Hauptunterschied zu anderen Methoden besteht darin, dass bei dieser die vier nächsten Gitterpunkte verwendet werden.

Unter Verwendung der vier nächstgelegenen benachbarten Zellen weist die bilineare Interpolation den Wert der Ausgangszelle zu, indem sie den gewichteten Durchschnitt verwendet. Es werden Gewichte angewendet, die auf der Entfernung der vier nächstgelegenen Zellmittelpunkte basieren und das Ausgabegitter glätten.

Andere Methoden wie zum Beispiel die kubischen Methoden glätten die Ausgabe noch stärker. Dies ist jedoch für einen verhältnismäßig hoch aufgelösten Vergleich unerwünscht.

3. ICELINE

Die ICELINE ist ein Konzept zur einfacheren Betrachtung des Überganges zwischen Meereis und offenem Ozean. Sie soll helfen, große Datenmengen besser darstellbar zu machen und auf den ersten Blick Informationen zur Verfügung zu stellen.

In den folgenden Kapiteln wird die ICELINE verwendet, um zwei Datensätze miteinander zu vergleichen, für diesen Zweck wurde die ICELINE auch konzipiert. Zusätzlich birgt sie noch weitere Vorteile und Betrachtungsoptionen, welche in diesem Kapitel erläutert werden.

3.1 Definition ICELINE

Die ICELINE ist jene Linie, an welcher für jedes Längengradelement (in diesem Fall alle 0.25°), von Süden nach Norden kommend zum ersten mal ein gewisser SIC-Schwellwert erreicht oder überschritten wird.

Der Schwellwert für die SIC ist vom betrachteten Gebiet sowie von der Jahreszeit abhängig. Dieser darf jedoch innerhalb des Vergleiches nicht verändert werden.

Für das Erstellen einer ICELINE ist nur der Bereich, welcher von Interesse ist, notwendig. Im Anhang ist das dafür vorgesehene Programm zu finden.

3.1.1 Schwellwert für die ICELINE

Ein geläufiger Schwellwert für die Bestimmung des Meereisrandes ist oft 15 %SIC (Goessling1, 2016). In den Phasen des Eiszuwachses ist ein so niedriger Schwellwert ohne Problem verwendbar, in der Schmelzphase jedoch stellt sich die Frage, ob dieser Wert die richtige Wahl ist. Um diese Frage zu beantworten kann Abbildung 5 betrachtet werden.

Das Meereis weist in der Schmelzphase große Flächen mit geringerer SIC auf. Wird dazu ein Schwellwert wie 15 %SIC gewählt, entfällt die Information über das differenzielle Eisabschmelzen in dieser Region. In Abbildung 6 werden einige unterschiedliche Schwellwerte für den gleichen Zeitpunkt dargestellt.

Dabei sind eindeutige Unterschiede erkennbar, wobei keine davon falsch oder richtig sind. Der Schwellwert kann für unterschiedliche Betrachtungen oder andere Experimente angepasst werden.

Es ist darauf zu achten, dass der Schwellwert nicht variiert wird, wenn Vergleiche zwischen unterschiedlichen Zeitpunkten vorgenommen werden. Eine Betrachtung der Unterschiede zwischen einer Eiszuwachphase mit Schwellwert 15 %SIC und einer Schmelzphase mit 70 %SIC als Grenze ist nicht aussagekräftig.

Jedoch kann der Grenzwert bei zeitlich konstanten ICELINEs variiert werden, um das Ausmaß einer Schicht mit gewissem SIC Werten abschätzen zu können.

In den folgenden Auswertungen und Experimenten wird meist ein Schwellwert von 70 %SIC verwendet, da dieser anschauliche Ergebnisse über das ganze Jahr liefert.

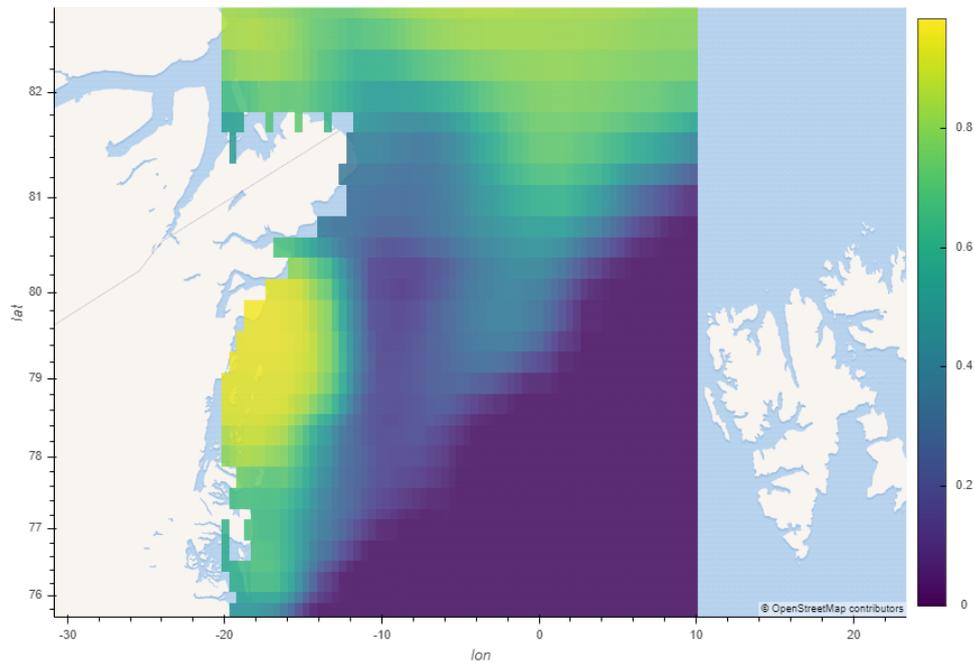


Abbildung 5: SIC im August 2015, Betrachtetes Gebiet: zwischen Grönland und Spitzbergen (ERA5 - Monatsmittelwerte)

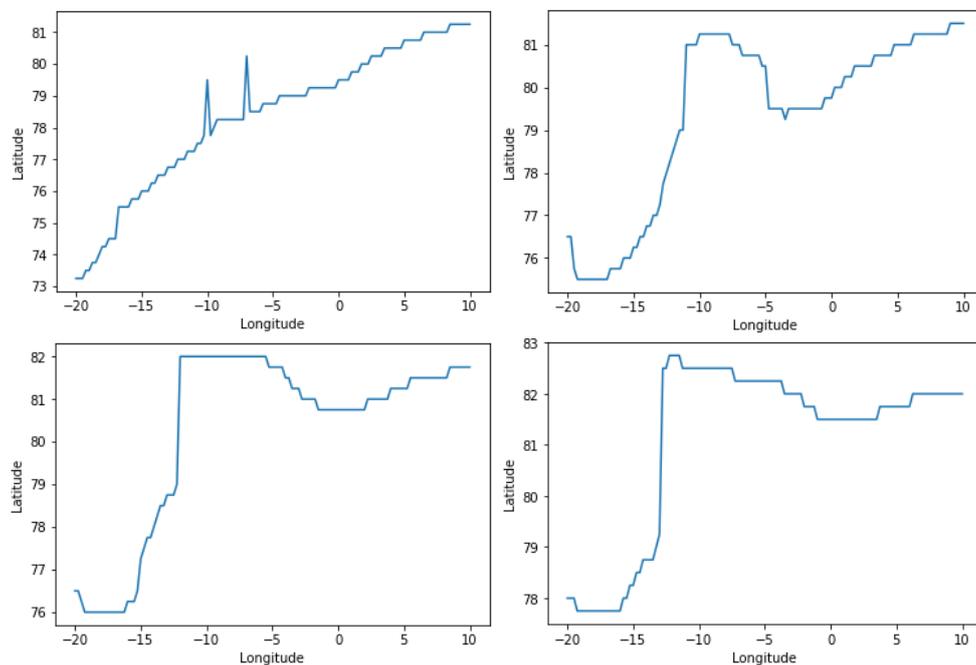


Abbildung 6: Generierte ICELINES im August 2015 mit unterschiedlichen Schwellwerten für die SIC: 15% (oben links), 30% (oben rechts), 50% (unten links) und 70% (unten rechts) (ERA5 - Monatsmittelwerte)

3.2 Vorteile und Schwächen der ICELINE

Der Vorteil der ICELINE gegenüber Daten auf einem Gitter liegt vor allem in der einfachen Vergleichbarkeit mit andern Zeitpunkten. Zusätzlich sind ICELINE-Daten wesentlich kompakter bei gleicher Aussagekraft.

Bei sehr rauen und ungleichmäßigen Meereis-Formationen ist es ratsam die gesamte Fläche für den Vergleich heranzuziehen. Ebenso wird es schwierig, ab einem gewissen Ausmaß des betrachteten Gebietes, eine durchgängige ICELINE zu finden. Für einen solchen Fall ist es sinnvoll das Gebiet zu unterteilen.

In Abbildung 7, ist der Nordatlantik abgebildet. Hier wäre eine Aufteilung der ICELINE angebracht. Die roten Linien zeigen zwei mögliche ICELINES, welche den Ausschnitt beschreiben können.

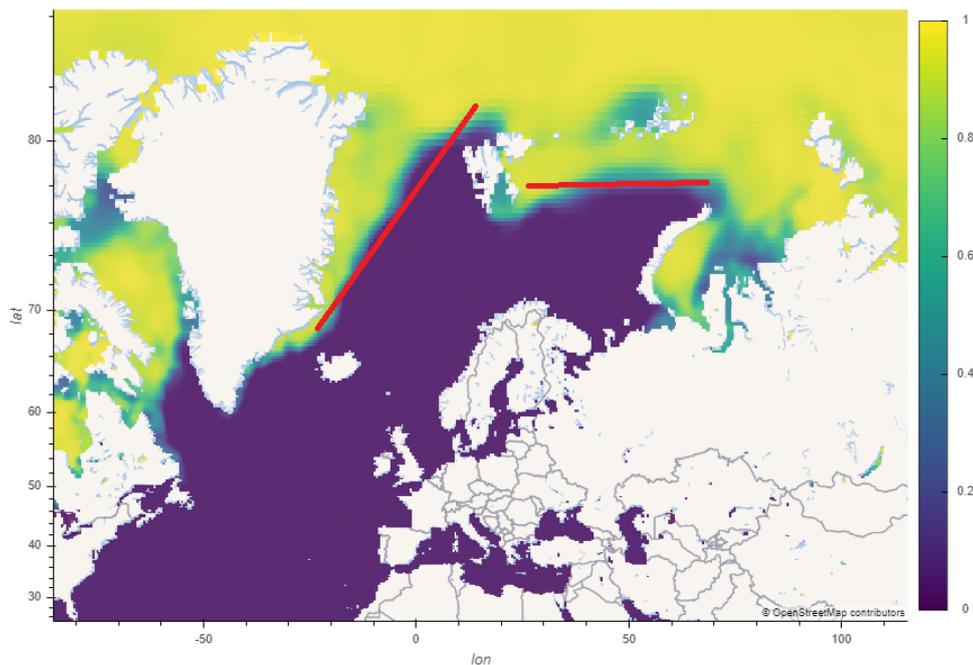


Abbildung 7: Darstellung der SIC im Nordatlantik östlich von Grönland Mai 2015 (ERA5 - Monatsmittelwerte)

In Abbildung 8 hingegen kann das gesamte Gebiet theoretisch mit einer einzelnen langen ICELINE beschrieben werden.

Wichtig für die Unterteilung ist, dass berücksichtigt wird, dass die ICELINE nur den südlichsten Punkt wählt, welcher den Schwellwert überschreitet. Meereissegmente sollten immer so gewählt werden, dass dies zu keinem Problem führt.

Ist eine ICELINE einmal festgelegt, kann sie für aufeinander folgende Jahre verwendet und verglichen werden. In der Regel ändert sich das Meereis außerhalb des jährlichen Zyklus weniger stark wie in diesem. Es gibt jedoch regionale Ausnahmen, insbesondere dort, wo starke Meeresströmungen herrschen! Es treten jedoch im Normalfall keine Probleme auf, wenn einige aneinander gereihte Jahre untereinander verglichen werden. Für längere Zeiträume, in welchen sich die ICELINE so weit verschiebt, dass sie aus dem Beobachtungsgebiet wandert, müssen diese Umstände berücksichtigt werden.

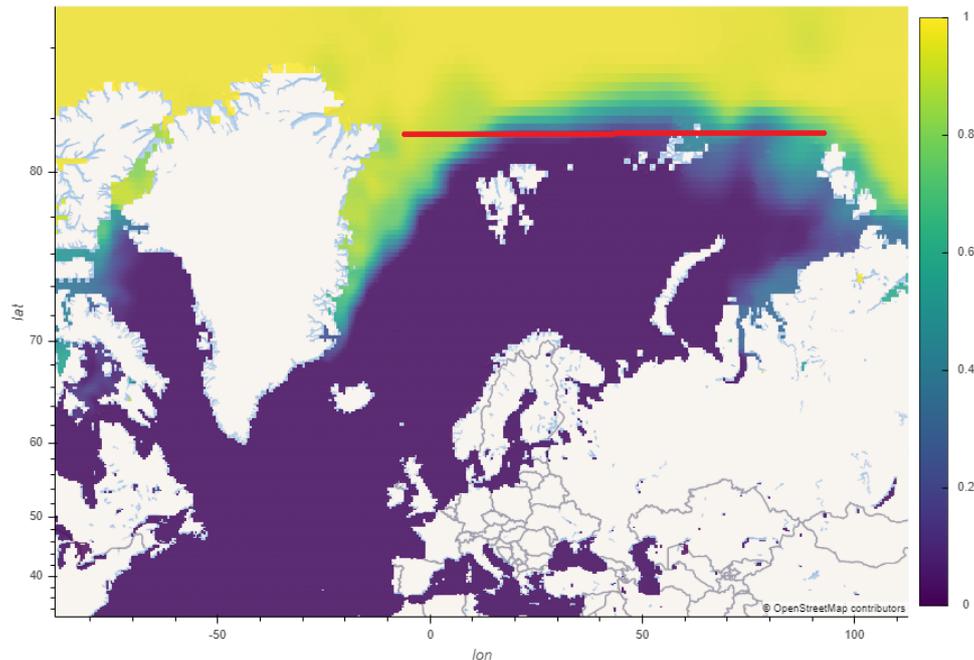


Abbildung 8: Darstellung der SIC im Nordatlantik östlich von Grönland Oktober 2015 (ERA5 - Monatsmittelwerte)

3.3 Vergleich von ICELINES

Generell dienen ICELINES zum Vergleich untereinander, wie in den vorhergegangenen Kapiteln ist der einfachste Vergleich für Momentanwerte, jener durch simple Differenzbildung.

Für die Betrachtung von zeitlich veränderlichen Daten kann die Korrelation der ICELINES verwendet werden.

Das Konzept der ICELINE birgt jedoch noch zusätzlichen Betrachtungsweisen, welche sinnvoll sein können.

ICELINES können über folgende Eigenschaften verglichen werden:

- Mittlere geografische Breite: Der arithmetische Mittelwert aller Breiterelemente auf der ICELINE. Dieser gibt Auskunft über einen möglichen Rückgang oder eine Ausdehnung des Eises.
- Neigung: Bearing = Winkel den die ICELINE gegen 0° Nord aufspannt
- Rauigkeit: Mittlerer Betrag des Abstandes der ICELINE zu einer Geraden, welche durch den Start- und Endpunkt verläuft (siehe 5.1).

3.4 Beispiele

3.4.1 ICELINE von Satellitenprodukt und Reanalyse

Der erste Vergleich in Abbildung 9 der SIC zwischen Reanalyse und Satellitenprodukt, mithilfe der ICELINE zeigt sofort, dass die Unterschiede im ausgewählten Bereich nur minimal sind. Die ICELINES der beiden Datensätze unterscheiden sich maximal um einen Gitterpunkt.

Hierzu können Schwellwerte festgelegt werden. Werte wie der mittlere Unterschied in Gitterpunkten können hier als Maßzahl verwendet werden.

Für diesen Fall beträgt der Unterschied im Mittel +0.198 Gitterpunkte.

Für dermaßen ähnliche ICELINES ist ein Vergleich bezüglich Neigung oder Rauigkeit nicht sinnvoll.

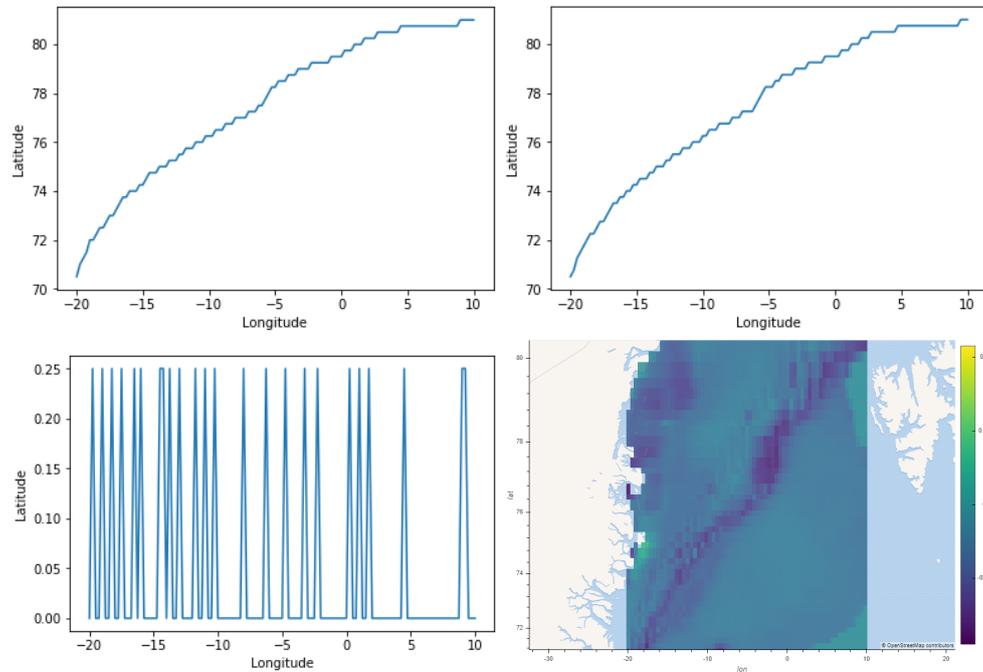


Abbildung 9: Generierte ICELINES von Reanalyse (oben links - ERA5) und Satellitenprodukt (oben rechts), sowie deren Differenz (unten links) und die Differenz der SIC - räumlich und zeitlich identisch: Januar 2015

Solche Parameter sind bei Vergleichen zwischen den Jahren sinnvoller.

3.4.2 ICELINE im zeitlichen Verlauf

Jährlicher Verlauf

In Abbildung 10 werden die ICELINES im jährlichen Verlauf betrachtet.

Auf Anbieh sichtbar ist die geringere Ausdehnung der Fläche mit hoher SIC im Jahre 2013. Für eine genauere Analyse betrachtet man jedoch besser die mittleren Breiten der ICELINES.

2015 = 77.55 °N

2014 = 77.50 °N

2013 = 77.32 °N

2012 = 77.98 °N

Diese Kenngröße ist leicht zu vergleichen und sehr aussagekräftig. Sie lässt aufgrund der räumlichen Beschränkung der ICELINE nicht direkt auf die gesamte Eisausdehnung schließen, kann aber in Summe für diesen Zweck verwendet werden.

Regionaler Rückgang und Ausbreitung werden anschaulich dargestellt.

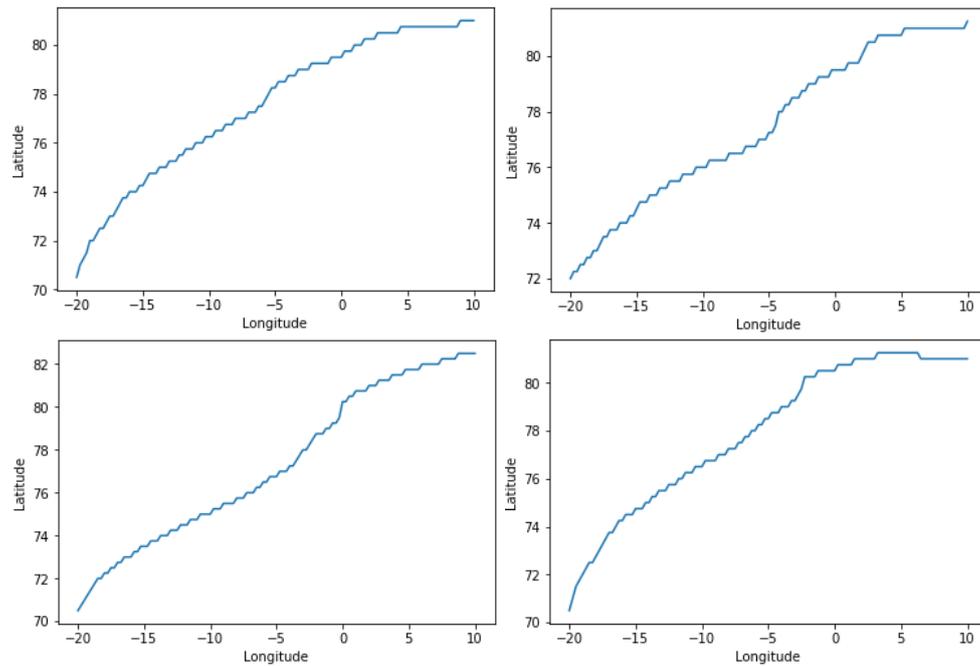


Abbildung 10: Generierte ICELINES im Januar 2015 (oben links), 2014 (oben rechts), 2013 (unten links) und 2012 (unten rechts) (ERA5 - Monatsmittelwerte)

Vergleich zwischen Monaten

Soll der Jahresverlauf der ICELINE betrachtet werden, kann zwischen den einzelnen Monaten verglichen werden. Es zeichnen sich vor allem Zonen verstärkten Rückgangs in der Schmelzphase ab.

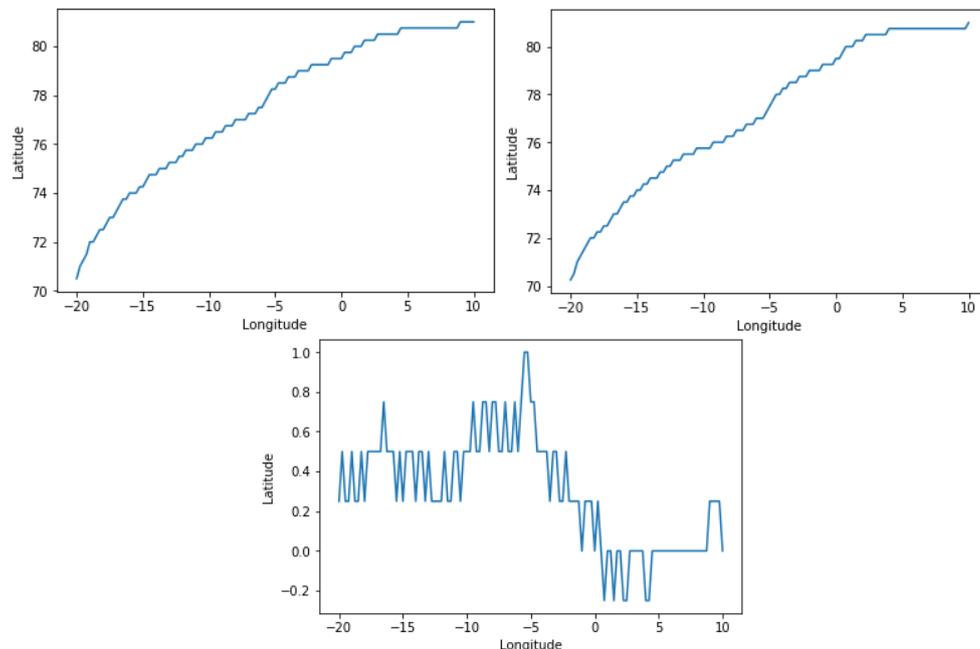


Abbildung 11: Generierte ICELINES im Januar (links) und Februar (rechts) 2015 sowie deren Differenz Februar - Januar (ERA5 - Monatsmittelwerte)

In Abbildung 11 ist eine im Mittel positive Differenz für 2015 im betrachteten Gebiet sichtbar. Dies bedeutet, dass sich das Eis von Januar auf Februar bereits zurückgebildet hat. Es liegt also ein Ab-

schmelzen vor.

Mit Hilfe dieser Grafik lässt sich dieses Abschmelzen auch gut lokalisieren. Zwischen -20 °E und 0 °E gibt es im Januar deutlich mehr Eis als im Februar, zwischen 0 °E und 5 °E gibt es jedoch einen leichten Eiszuwachs.

Die Winkel der beiden ICELINES sind sehr ähnlich und betragen:

$$Jan = 21.16\text{ °}$$

$$Feb = 20.77\text{ °}$$

Die unterschiedlichen Winkel resultieren aus differenziellem Eiszuwachs und Eisabbau. In diesem Beispiel ist der Unterschied jedoch minimal, dies ist auch in der Differenz sichtbar. Große Unterschiede im Winkel und in der Differenz finden sich vor allem im Sommer, in den Zeiten des stärksten Eisrückganges.

In Abbildung 12 werden die Daten monatsweise über vier Jahre gemittelt, um zeigen zu können, wann sich das Meereis etwa in der Schmelzphase (positive Werte) und wann in der Zuwachsphase (negative Werte) befindet. Aus den Grafiken geht hervor, dass die Schmelz- und Zuwachsprozesse große regionale Unterschiede aufweisen.

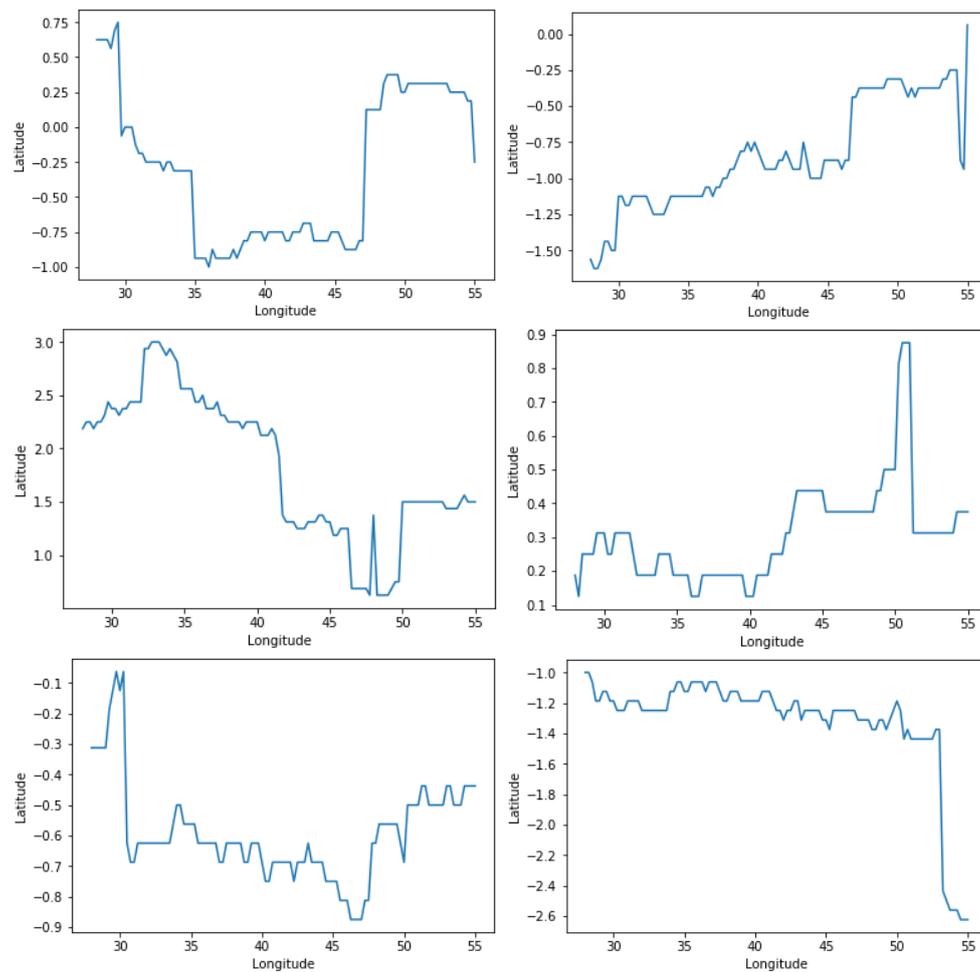


Abbildung 12: Differenzen von gemittelten ICELINES (2012-2015):

Februar(2012-2015) - Januar(2012-2015) (links oben)

März(2012-2015) - April(2012-2015) (rechts oben)

Juni(2012-2015) - Mai(2012-2015) (links mitte)

August(2012-2015) - Juli(2012-2015) (rechts mitte)

Oktober(2012-2015) - September(2012-2015) (links unten)

Dezember(2012-2015) - November(2012-2015) (rechts unten)

(basierend auf ERA5 - Monatsmittelwerte)

4. Vergleich

Der Meereis-Vergleich zwischen Reanalyse und Satellitenprodukt erfolgt generell durch die Differenzbildung der beiden Datensätze. Hierfür werden einzelne Zeitpunkte und Monatsmittelwerte herangezogen. Bei den Differenzen handelt es sich im Folgenden stets um Reanalyse abzüglich Satellitenprodukt.

Die Unterschiede belaufen sich auf einstellige Prozentwerte und sind vor allem in Küstennähe sowie im Bereich des Überganges zwischen Meereis und offenem Ozean signifikant.

4.1 Vergleich zwischen Reanalyse und Satellitenprodukt

Die erste Differenzbildung der Datensätze erfolgt für den Januar 2015. In Abbildung 13 wurde für diesen Monat die Differenz gebildet.

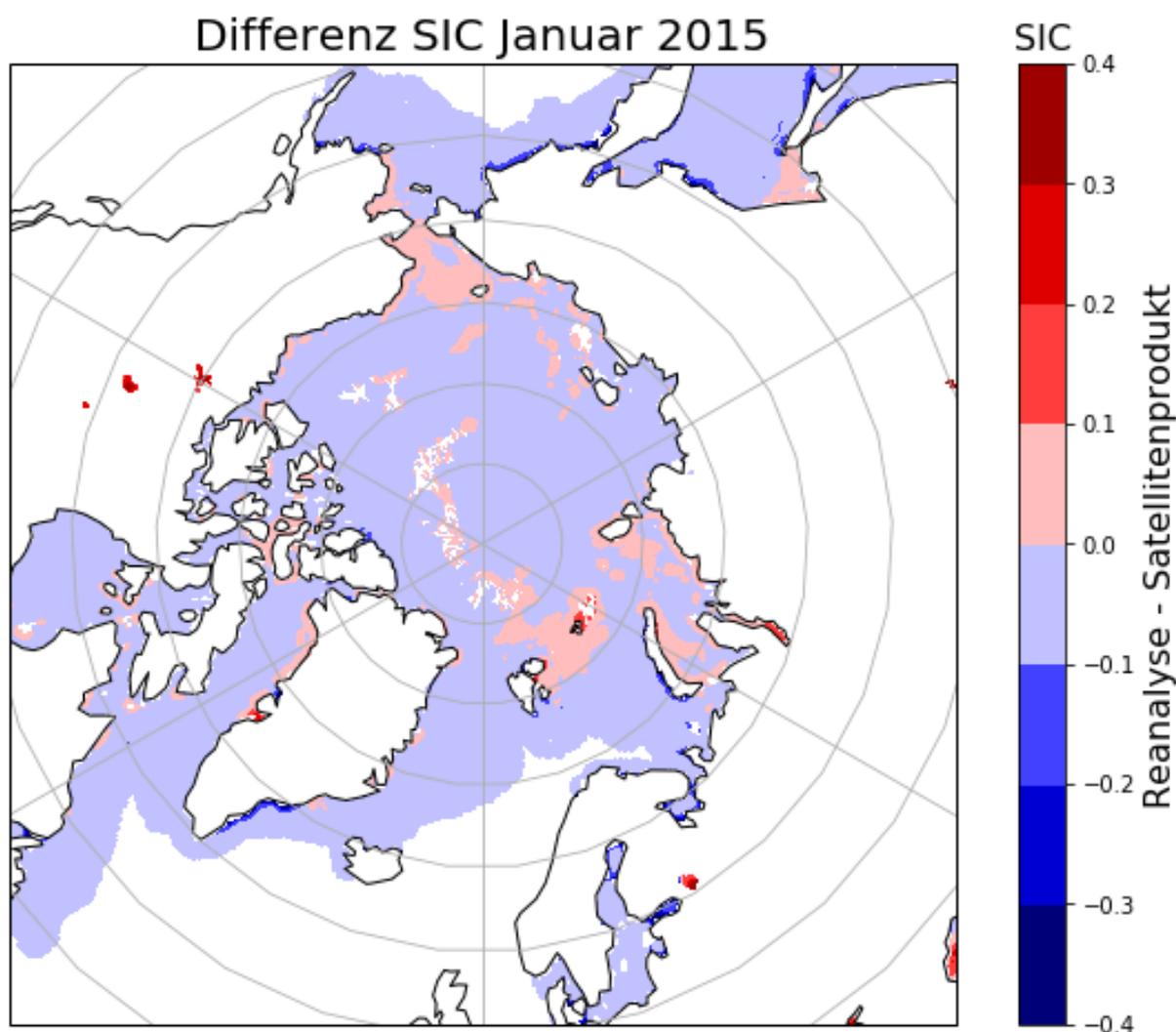


Abbildung 13: Differenzen der SIC von Reanalyse und Satellitenprodukt im Januar 2015

Die Unterschiede liegen wie vorher schon erwähnt vor allem im Bereich des Überganges zwischen Meereis und offenem Ozean (an der ICELINE siehe: 3.1) sowie in Küstennähe. Hier sollte erwähnt werden, dass jene Unterschiede in Küstennähe deutlich größer sind, als jene auf dem freien Ozean.

Differenzen im Bereich der ICELINE betragen im Winter meist weniger als 10% SIC. In der Schmelzphase jedoch, sind auch Werte um 25 %SIC möglich. Küstennahe Unterschiede können sich im Gegensatz dazu auch auf 40 %SIC oder mehr belaufen.

In Abbildung 15 ist ersichtlich, dass die Unterschiede an der ICELINE variieren, aufgrund des sich permanent verändernden Meereisrandes ist dies auch zu erwarten. Die Unterschiede an den Küsten variieren nur in geringem Ausmaß.

In Küstennähe befindliche Differenzen sind relativ invariabel, diese Tatsache ist auf die Ursache dieser Unterschiede zurückzuführen. Näher darauf eingegangen wird in Kapitel 4.1.1.

Im Mittel über die Meeresfläche in der nördlichen Hemisphäre belaufen sich die Differenzen auf:

$$2015 - 01 = -0.60 \% \text{SIC}$$

$$2015 - 02 = -0.91 \% \text{SIC}$$

$$2015 - 03 = -0.83 \% \text{SIC}$$

Diese insgesamt negativen Werte bedeuten, dass das Satellitenprodukt insgesamt höhere SIC aufweist als die Reanalyse.

Als Vergleich sind in Abbildung 14 noch die Differenzen der vorherigen Januare dargestellt.

In Abbildung 15 ist der Verlauf der Differenzen noch einmal im Jahresverlauf dargestellt. Hierbei fällt sofort auf, dass mit Übergang in die Schmelzphase des Meereises, die Fläche nördlich der ICELINE positive Werte annimmt. Dies bedeutet, dass die Reanalyse in diesem Gebiet größere SIC annimmt als das Satellitenprodukt misst.

Die größeren Unterschiede in Küstennähe sind auf jeder Abbildung sichtbar. Dieser variieren nur wenig und werden im folgenden Kapitel erläutert.

4.1.1 Küstennähe

Die Abtastung der Brightness Temperature ist, im Verhältnis zur Rauigkeit der Küstenlinie, relativ grob. Die Abstrahlung kommt in Küstennähe bei manchen Messpunkten zu großen prozentualen Anteilen von Landoberfläche und ist somit verfälscht. Im ERA5 Datensatz wird versucht diese Fehler zu korrigieren (Sandven, 2018). Im Datensatz des Satellitenprodukts wird nicht versucht diese Fehler zu reduzieren. Eine höhere Auflösung der Basis Daten, mit welchen beide Datensätze rechnen, würde diesen Unterschied reduzieren.

Die Unterschiede resultieren unter anderem auch aus dem Regridding Prozess. Während bei der Reanalyse der Ozean fix im Gitterpunktnetz verankert ist, werden bei den Satellitendaten die Koordinaten der jeweiligen Messpunkte durch die Umlaufbahn bestimmt. Wird hierbei nun die SIC in einer sehr nah an der Küste gelegenen Stelle bestimmt, wird bei der Interpolation auf das festgelegte Gitter an gewissen Stellen auch ein SIC Wert auf einen Gitterpunkt dargestellt, welcher in der Reanalyse nicht zum Ozean zählt.

An einem solchen Punkt entspricht die Differenz dann rein dem gemessenen Wert.

Der Unterschied in diesen der Küste nahen Zonen ist also zu einem Teil als Fehler bei der Interpolation wahr zu nehmen, und zum anderen als Fehler auf Grund des komplexen Terrains und der begrenzten Auflösung.

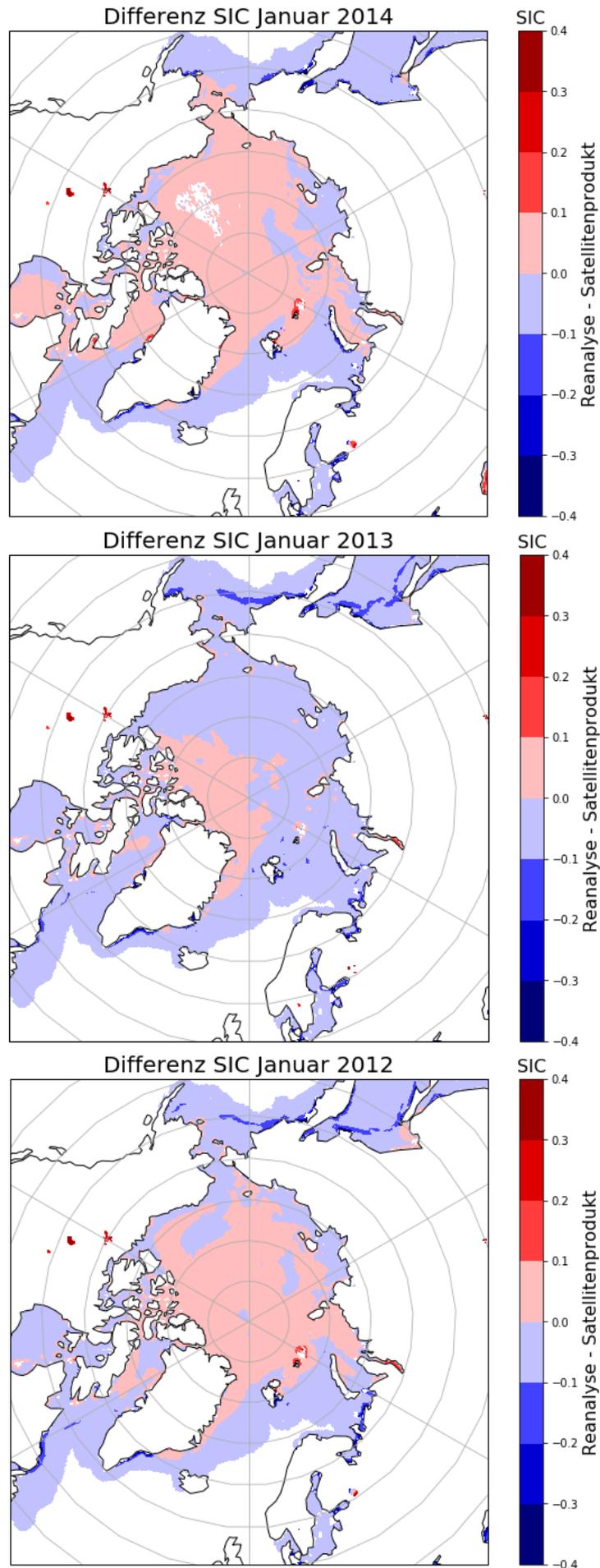


Abbildung 14: Differenzen der SIC von Reanalyse und Satellitenprodukt im Januar 2012-2014

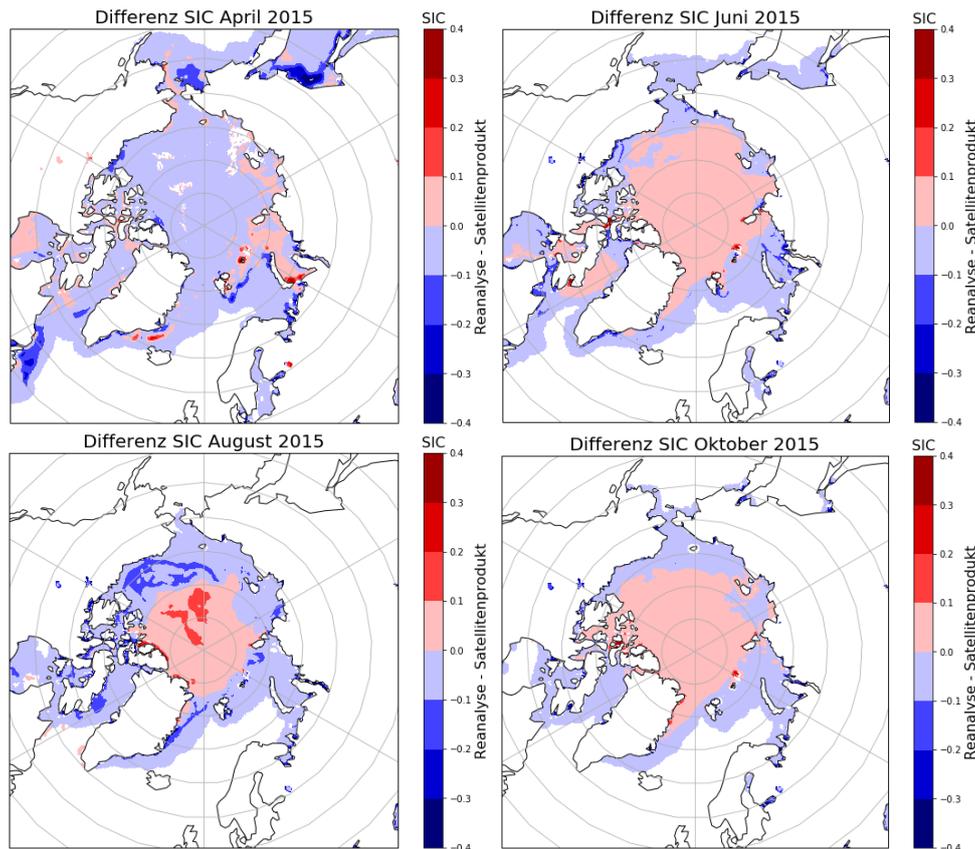


Abbildung 15: Differenzen der SIC von Reanalyse und Satellitenprodukt 2015 : April, Juni, August Oktober

4.1.2 Meereis Rand - ICELINE

Hier wird erläutert, woraus sich der Unterschied an der ICELINE zusammensetzt. Ungenauigkeiten seitens des Satellitenprodukts sind auf folgende Punkte zurückzuführen:

- Winkel zwischen Normalen der Oberfläche und Satellit: Die Messung wird nur dann mit maximaler Genauigkeit durchgeführt, wenn sich der Satellit genau über der zu messenden Fläche befindet. Ist dies nicht der Fall, oder handelt es sich um Randbereiche, resultiert daraus stets eine Unsicherheit.
- Zeitpunkt der Beobachtung: Abhängig von der Tageszeit zur Messung, können sich während des Tages Schmelzwassertümpel auf dem Eis gebildet haben, oder über Nacht wieder angefroren sein. Dies kann große Unterschiede vor allem im Randbereich des Meereises, wie der ICELINE, ergeben.
- Auflösung: Je geringer die Auflösung, desto mehr Fehler werden vor allem im Randbereich an des Meereises gemacht. Ist ein Gitterpunkt beispielsweise von 60 %SIC bedeckt, befindet sich jedoch zu einem Teil über Land, wird je nach Landesoberfläche der Messwert verzerrt.
- Messungenauigkeit des Sensors am Satelliten: Ungenauigkeit, Alterung und Auswertungsfehler der Satelliten Daten fließen ebenso in die Ungenauigkeit der Ausgangsdaten ein.

Fehler auf der Seite der Reanalyse können durch folgende Möglichkeiten entstehen:

- Eingangsdaten: Die assimilierten Eingangsdaten für die Reanalyse sind einerseits in der Auflösung begrenzt, andererseits auch Messwerte und darum nicht vollkommen fehlerfrei. So fließen Fehler in die Daten ein und können sich bis zum Zeitpunkt der nächsten Korrektur entwickeln.
- Näherungen: Modelle sind aufgrund der nicht unbegrenzten Rechenleistung (und der nicht unbegrenzt verfügbaren Rechenzeit) meist auf Näherungen in der Modellphysik angewiesen. Hier werden einige Parameter approximiert und weichen letztendlich vom wahren Wert ab. Dies ist notwendig und die dadurch entstehenden Fehler sind bekannt und verhältnismäßig gering.

Abschließend sollte in diesem Kapitel noch erwähnt werden, dass keiner der beiden Datensätze vollständig korrekt ist. Es handelt sich um eine Berechnung und eine Messung. Beide weisen Fehler auf, in welche Richtung diese vom wahren Wert abweichen, ist oft nicht bekannt. Aus diesem Grund bedeuten geringe Unterschiede nicht zwangsläufig eine hohe Genauigkeit.

Des Weiteren kann auch nur schwer festgestellt werden, welcher von beiden Datensätzen letztlich richtiger ist. Aufgrund der möglichen Fehler und der verschiedenen Quellen für Ungenauigkeiten, lässt sich für diese Betrachtung keine Feststellung bezüglich des Ursprungs der Unterschiede mehr machen. Lediglich die Unterschiede selbst werden ermittelt.

4.2 Ergebnisse

Ein Ziel dieser Betrachtung ist das Feststellen der Unterschiede zwischen Reanalyse und Satellitenprodukt. Das Quantifizieren von Differenzen über die gesamte Nordhemisphäre ist ein schwieriges Unterfangen. Aus diesem Grund wird ein Hilfsmittel konstruiert:

Mit Hilfe der im Folgenden erklärten ICELINE (siehe 3.1) wird die erste Beschreibung der Unterschiede durch die Korrelation zwischen den beiden Zeitreihen betrachtet. Für eine gute Übereinstimmung sollte dementsprechend auch die Korrelation zwischen den beiden Datensätzen hoch (gegen 1 gehend) sein.

Es wird nur ein Teil des Ozeans betrachtet und nicht die ganze nördliche Hemisphäre. Der Meeresabschnitt zwischen Grönland und Spitzbergen bietet einige Vorteile. Einerseits ist dies der längste Meeresabschnitt der Arktis, andererseits ist dieser sehr stabil, wenig rau und weit von Küstengebieten entfernt. Diese Eigenschaften machen dieses Gebiet zum idealen Vergleichspunkt. Mit einer Länge von über 1300 km und Monatsmittelwerten werden synoptische Ereignisse großteils gemittelt. Siehe Abbildung 16. Vor allem der Punkt den Abstand zur Küste betreffend ist für den Vergleich relevant. In Kapitel 4.1.1 wird beschrieben, warum sich gerade dort Probleme ergeben. Durch eine Betrachtung dieser Zone wird dies vermieden und es kann ein Vergleich ohne Verzerrung durch die Randgebiete erfolgen.

In Abbildung 17 sind die ICELINES der beiden Zeitreihen dargestellt. Diese sind sehr ähnlich und zeigen den Vorteil dieses Abschnitts der ICELINE. Ohne Einfluss von Störungen durch Küstenregionen können die Datensätze verglichen werden.

Durch den Pearson Korrelationskoeffizienten (beschrieben wird hier die Korrelation im monatlichen Verlauf) wird im folgenden der Zusammenhang zwischen den Daten von ausgewählten Zeiträumen



Abbildung 16: <https://www.google.at/maps> - Das im Folgenden betrachtete Gebiet zwischen Grönland und Spitzbergen, SIC im Januar 2015 in betreffender Zone

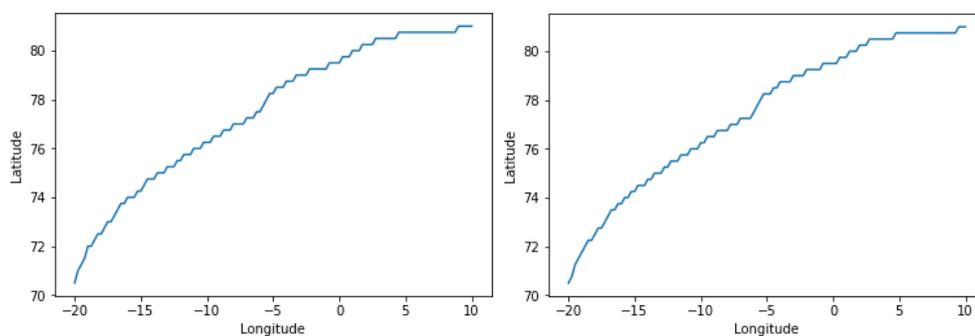


Abbildung 17: ICELINE der Reanalyse (links) und des Satellitenprodukts (rechts) von Januar 2015

beschrieben. Für den ersten Überblick sollte die folgende Tabelle die Korrelation über die Jahre zeigen:

Jahr	Korrelation nach Pearson
2012	0.9943
2013	0.9913
2014	0.9930
2015	0.9942

Es wird deutlich, dass die beiden Zeitreihen hoch korreliert sind, was in Anbetracht dessen, dass beide die selbe Größe abbilden, zu erwarten ist.

Interessanter sind jedoch die Korrelationsunterschiede innerhalb der Jahre. Die Eiszuwachphase weist deutlich höhere Korrelationen auf, als die Schmelzphase. In der nächsten Tabelle werden die Jahreszeiten von den oben gelisteten Jahren dargestellt (auch hier wird die Korrelation im monatlichen Verlauf beschrieben):

Zeitraum	2012	2013	2014	2015
01 - 03	0.9995	0.9990	0.9993	0.9992
04 - 06	0.9940	0.9903	0.9945	0.9869
07 - 09	0.9532	0.8511	0.9325	0.9826
10 - 12	0.9988	0.9959	0.9950	0.9991

Hier wird festgehalten, dass die größten Unterschiede zwischen Reanalyse und Satellitenprodukt im

Sommer aufzufinden sind.

Hier muss angemerkt werden, dass diese Korrelationen keine große Aussagekraft für den Vergleich zwischen den Datensätzen haben. Der Vergleich an sich wurde durch die Differenzbildung erstellt. Jedoch ist die Korrelation für einen Überblick dienlich, es wird auf den ersten Blick klar, ob sich die Datensätze ähnlich entwickeln oder nicht.

Um diese Aussage durch mehr Daten zu bestätigen, werden die Korrelationen für die noch nicht verifizierten Jahre auch bestimmt:

Zeitraum	2016	2017	2018
01 - 03	0.9696	0.9700	0.9995
04 - 06	0.9582	0.7616	0.9993
07 - 09	0.7944	0.4349	0.9148
10 - 12	0.9528	0.7559	0.9988
Ganzjährig	0.9555	0.8251	0.9902

Die drei Jahre des nicht verifizierten Zeitraumes bestätigen die Beobachtung bezüglich des größten Unterschiedes im Sommer.

Jedoch ist im Jahr 2017 die Korrelation verhältnismäßig sehr niedrig, und auch 2016 passt nicht in das Schema der restlichen betrachteten Jahre. Aus diesem Grund werden die Daten im Folgenden nicht mehr aus diesem Zeitraum, welcher möglicherweise seitens des Satellitenprodukts fehlerhaft ist, bezogen. Die Daten bis 2015 sind bezüglich des Klimawandels nicht mehr aktuell, wurden jedoch mit den gleichen Methoden wie die neueren Daten gewonnen, somit ist es für diesen Zweck besser, mit verifizierten Daten zu rechnen. Diese sind für einen Vergleich zwischen Reanalyse und Satellitenprodukt relevanter als aktuelle Daten.

Einerseits ist der Abbruch des Eises und dem daraus resultierenden Abdriften nach Süden ein Prozess, welcher von vielen Parametern abhängt. Da diese Parameter wie Eisdichte, Lufteinschlüsse, etc. regional stark variieren können, ist das Abbrechen ein wesentlich komplexerer Vorgang als reines Abschmelzen.

Andererseits haben die Satellitenmessungen Schwierigkeiten mit Schmelzwasser auf dem Eis. Auf diesen Punkt wurde bereits im Kapitel 2.1.2 genauer eingegangen.

Aus diesen beiden Gründen divergieren die SIC Werte für die Jahreszeit stärker als für den Rest des Jahres. Korrelationen von 0.99 oder mehr sind durchaus als Verläufe mit sehr guter Übereinstimmung zu bezeichnen.

4.2.1 Östlicher Nordatlantik

Hier werden noch einmal die Ergebnisse für ein anderes Gebiet gezeigt. Es handelt sich bei diesem Gebiet um die Barentssee zwischen Spitzbergen und der Nordinsel von Nowaja Semlja. Die vom Meeris aufgespannte zu untersuchende Grenzfläche ist nur halb so lang wie jene im westlichen Nordatlantik und auch von mehr Inseln und Küsten umgeben. Siehe Abbildung 18. Des Weiteren sind die ICELINES in diesem Abschnitt viel rauer.

In Abbildung 19 werden die ICELINES der beiden Datensätze für den gleichen zeitlichen und räumlichen Punkt gegenüber gestellt. Hier wird deutlich, dass es größere Unterschiede in der ICELINE

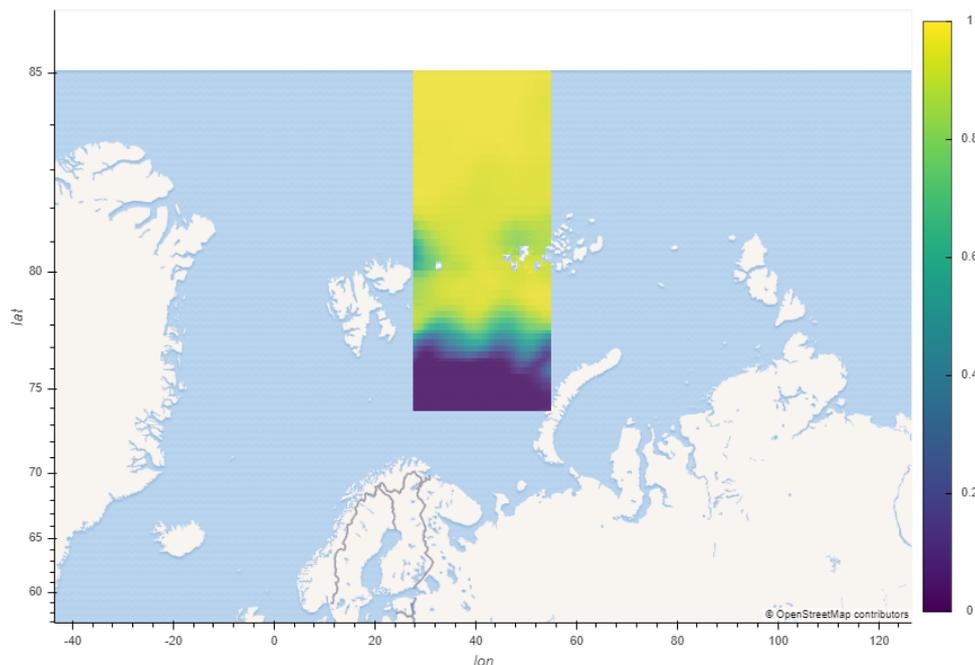


Abbildung 18: Das im Folgenden betrachtete Gebiet in der Barentssee zwischen Spitzbergen und der Nordinsel, SIC im Januar 2015 in betreffender Zone

für dieses Gebiet gibt, als für das vorher betrachtete weiter im Westen. Dies ist einerseits auf die geringere Distanz zu Küsten zurückzuführen und andererseits möglicherweise von den Ausläufern des Golfstroms abhängig.

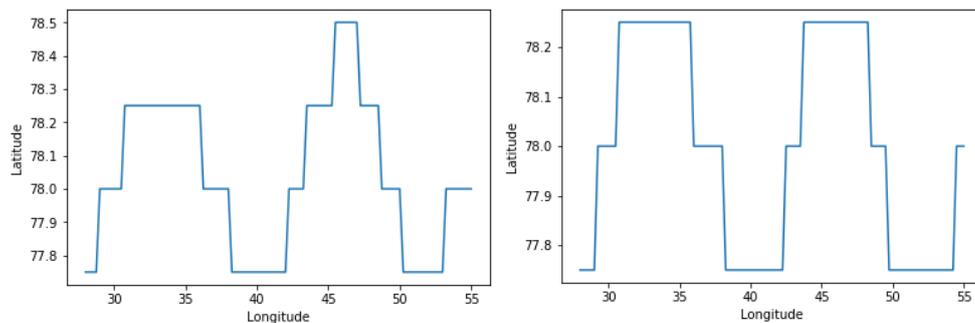


Abbildung 19: ICELINES aus der Reanalyse (links) und der Satellitenprodukt (rechts) zwischen Spitzbergen und Nowaja Semlja Januar 2015

Im Folgenden werden wieder die Unterschiede zwischen den ICELINES der Reanalyse und des Satellitenprodukts im zeitlichen Verlauf ermittelt:

Zeitraum	2012	2013	2014	2015
01 - 03	0.8966	0.9587	0.9632	0.9136
04 - 06	0.9975	0.9572	0.9763	0.9445
07 - 09	0.9705	0.4359	0.8798	0.9896
10 - 12	0.9422	0.9985	0.9882	0.8778
Ganzjährig	0.9955	0.9780	0.9726	0.9913

Auch hier sind beide Zeitreihen über das Jahr hoch korreliert. Die Jahre 2013 und 2014 entsprechen dem Schema, welches bei der weiter westlich liegenden längeren ICELINE zugetroffen hat. 2012 und 2015 weisen den unterschiedlichen Verlauf im Sommer jedoch nicht auf, haben aber auch geringere Korrelationen in anderen Jahreszeiten.

Der hier ausschlaggebende Faktor ist, ob sich die ICELINE im untersuchten Zeitraum gerade in Nähe der Inseln von Franz Josefs Land befindet.

ICELINEs auf dem freien Ozean sind stets besser korreliert, als in Nähe der Inseln. In Abbildung 20 werden zwei SIC gezeigt, welche ein Jahr auseinander beide im August berechnet wurden. Die geringere Korrelation im August 2014 kann auf die dort ersichtliche Nähe der ICELINE zu den Inseln zurück geführt werden.

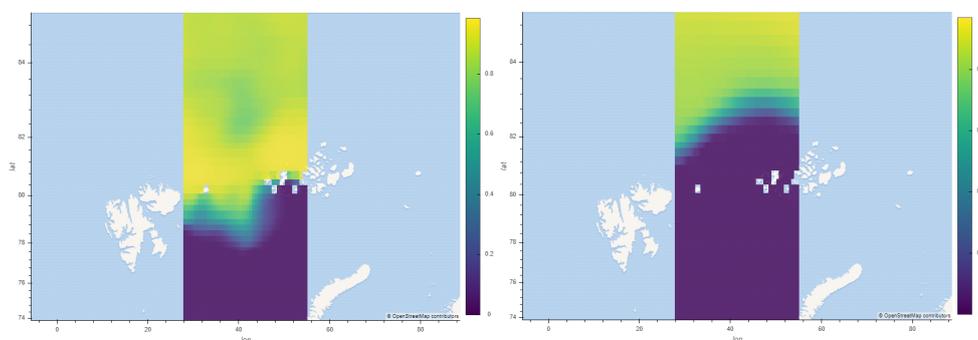


Abbildung 20: SIC der Reanalyse im betrachteten Gebiet im August 2014 (links) und im August 2015 (rechts)

Zusätzlich werden in Abbildung 21 noch die Unterschiede der zu vergleichenden ICELINES gezeigt. Es wird deutlich, dass die beiden Zeitreihen wesentlich besser übereinstimmen, wenn die ICELINE auf offenem Ozean liegt.

Die ICELINES von August 2015 sind als gut übereinstimmend zu bezeichnen, wobei die ICELINES vom August 2014 große Unterschiede aufweisen, welche in einer weiteren Verwendung der Daten, abhängig davon, welche Zeitreihe als Quelle herangezogen wird, mit großer Wahrscheinlichkeit unterschiedliche Ergebnisse liefern würden.

4.2.2 Fazit

Abschließend soll hervorgehoben werden, dass die Unterschiede zwischen Reanalyse und Satellitenprodukt hauptsächlich von den beiden erläuterten Faktoren, Nähe zu Küsten und Schmelzphase, abhängen.

Die Schmelzphase bringt zufällige Unterschiede in die Datensätze ein, welche nur schwer gefiltert werden können und bis auf Weiteres unvermeidbar sind. Für eine globale mittlere Eisausdehnung oder über das Jahr gemittelte Daten sind diese Fehler jedoch sehr klein.

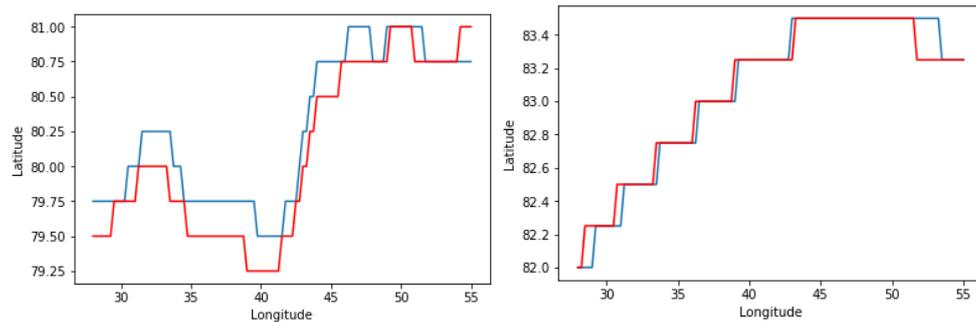


Abbildung 21: ICELINE der Reanalyse (in Rot) und des Satellitenprodukts (in Blau) von August 2014 (links) und von August 2015 (rechts)

Die Nähe zu Küsten bringt hingegen einen kalkulierbaren Unterschied in die Datensätze ein. Lokal gleich bleibende Fehler können berücksichtigt werden. Es muss aber auch beachtet werden, dass ein gewisser Teil der Differenz von der Interpolation herrührt.

Außerhalb dieser beiden Fehlerquellen wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden, was darauf hindeutet, dass die Physik und die Parametrisierung der Reanalyse die Meereis-Variabilität gut darstellen.

Es könnten auch noch andere Gebiete wie zum Beispiel die Labradorsee oder das Beringmeer untersucht werden. Diese Meereisregionen sind jedoch von verhältnismäßig kleiner Ausdehnung und grenzen im Fall der Labradorsee, insbesondere in den Sommermonaten, an sehr langen Küstenregionen an. Am Beringmeer besteht erneut das Problem mit Inselgruppen, ähnlich wie in der Barentssee. Beim Untersuchen dieser beiden Regionen wurden, sich mit dem vorangegangenen deckende, Ergebnisse gefunden.

5. Experimente

Für eine bessere Einsicht in das Verhalten des Meereises und in die Interaktion zwischen Meereis und Lufttemperatur, werden im folgenden Kapitel einige theoretische Experimente mit diesen Größen durchgeführt.

Für diese Experimente werden, so fern nicht anders beschrieben, stets die Reanalysedaten aus dem Nordatlantik zwischen Grönland und Spitzbergen verwendet. Dieser Bereich eignet sich auf Grund der glatten ICELINE besonders gut für diesen Zweck.

5.1 Zusammenhang Temperatur u. Abstand zur ICELINE

Betrachtet man die Temperatur sowie die ICELINE, so sieht man in Abbildung 22 sofort einen starken Zusammenhang zwischen der ICELINE und der Temperatur in Bodennähe. Somit muss auch ein direkter Zusammenhang zwischen dem Abstand zur Meereisgrenze und der an diesem Punkt herrschenden Temperatur bestehen. Dieser wird im Folgenden erläutert.

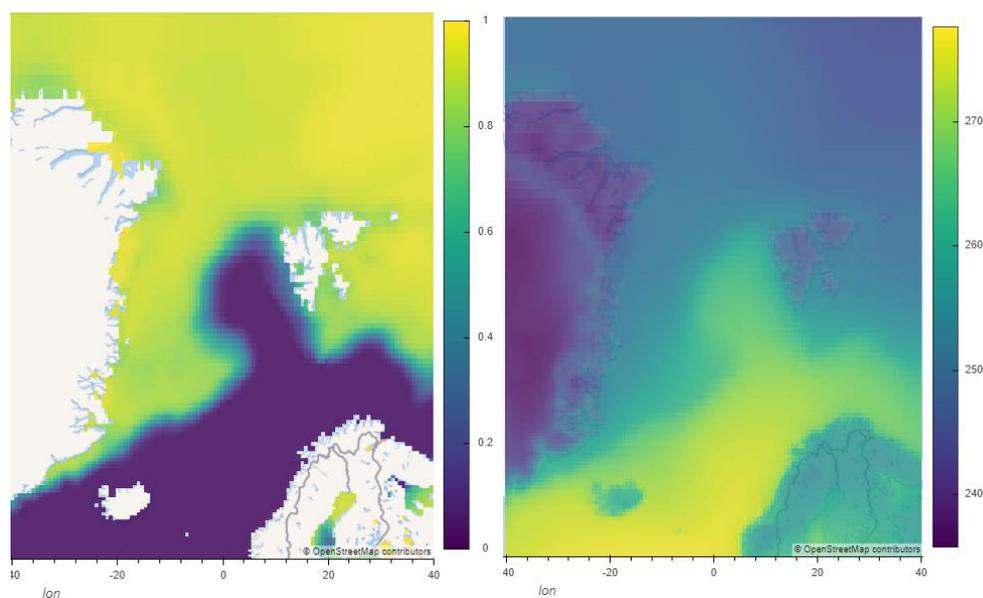


Abbildung 22: SIC (links in %SIC) und T2m (rechts in K) für den gleich Zeitpunkt östlich von Grönland: 2015 Januar

Der Aufbau des Experiments ist simpel:

Zu Beginn wird eine Gerade durch den Start- und Endpunkt der ICELINE gebildet. In Abbildung 23 ist eine schematische Abbildung dargestellt. Die so erstellte Linie wird im folgenden Track genannt und bildet den kürzesten Weg zwischen dem ersten und letzten Punkt der ICELINE ab. Dieser Track kann auch angepasst werden, um dann möglichst deckungsgleich mit der ICELINE zu sein. Das Ziel ist es, dass der Track Punkte nördlich und südlich der ICELINE hat.

Für jeden Punkt auf dieser Geraden wird die Temperatur 2 Meter über Grund (im folgenden T2m) sowie der Abstand zur ICELINE bestimmt. Der Abstand ist als der kürzeste Weg von der ICELINE zum Referenzpunkt definiert, also der Normalabstand. Hier ist darauf zu achten, dass nicht der Abstand

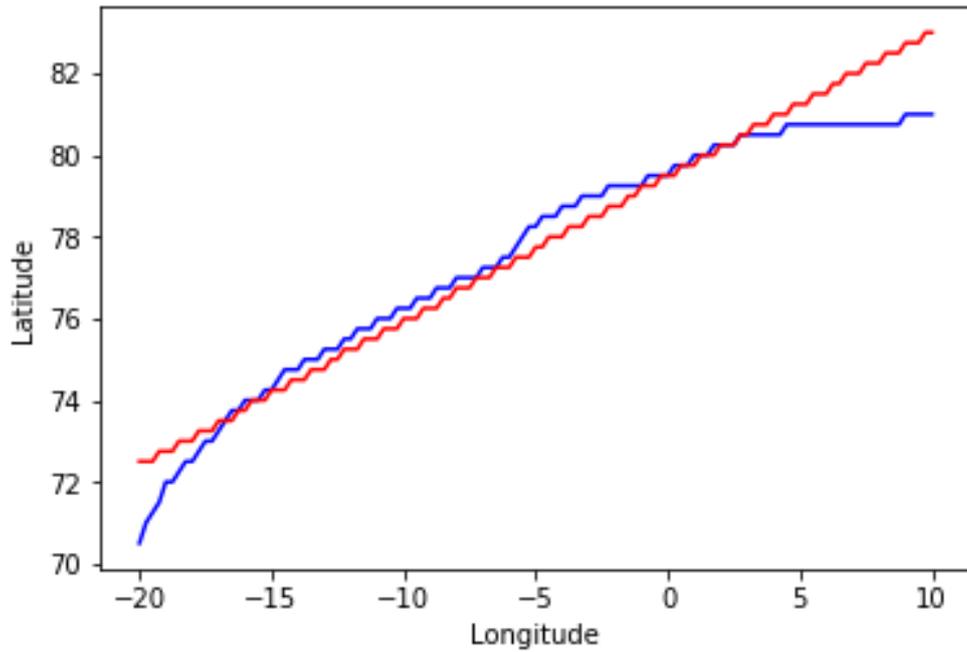


Abbildung 23: ICELINE (blau) und Beispiel-Track (rot) für das Gebiet östlich von Grönland: 2015 Januar

nach Norden oder Süden gewählt wird, sondern wirklich der Normalabstand. Dies kann ansonsten zu Problem bei rauen ICELINES führen.

Um eine größere Fülle von Messpunkten und eine gleichmäßige Verteilung über und unterhalb der ICELINE zu erzielen, wird der Track variiert. Dies wird durch ein Verschieben desselbigen nach Norden und Süden umgesetzt. In Abbildung 24 sind zwei variierte Tracks dargestellt. Es können Tracks im 0.25° geografischer Breite Abstand erstellt werden. Für die im Folgenden sichtbaren Grafiken, wurden der originale Track und jeweils 3 Tracks nach Norden und Süden verwendet.

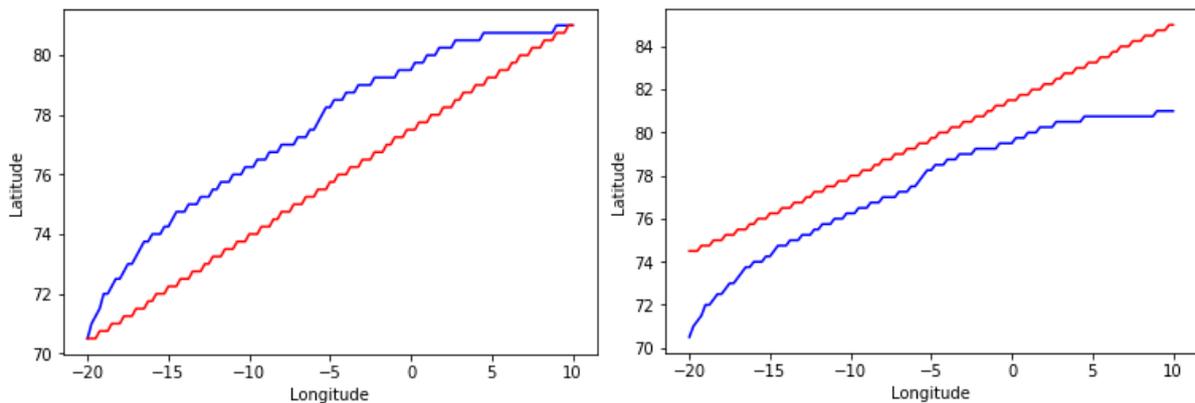


Abbildung 24: Variierter Track um 2° Breite nach Norden und Süden | ICELINE (blau) und Track (rot) für das Gebiet östlich von Grönland: 2015 Januar

Sobald diese Daten gefunden sind, werden sie gegeneinander aufgetragen und grafisch dargestellt. Für diese Diagramme werden auch immer Monatsmittelwerte verwendet. Als Schwellwert für die ICELINE-Berechnung wird wieder 70% SIC verwendet. Dies ist vor allem von Vorteil, wenn die Mo-

nate eines ganzen Jahres verglichen werden. Siehe Abbildung: 25.

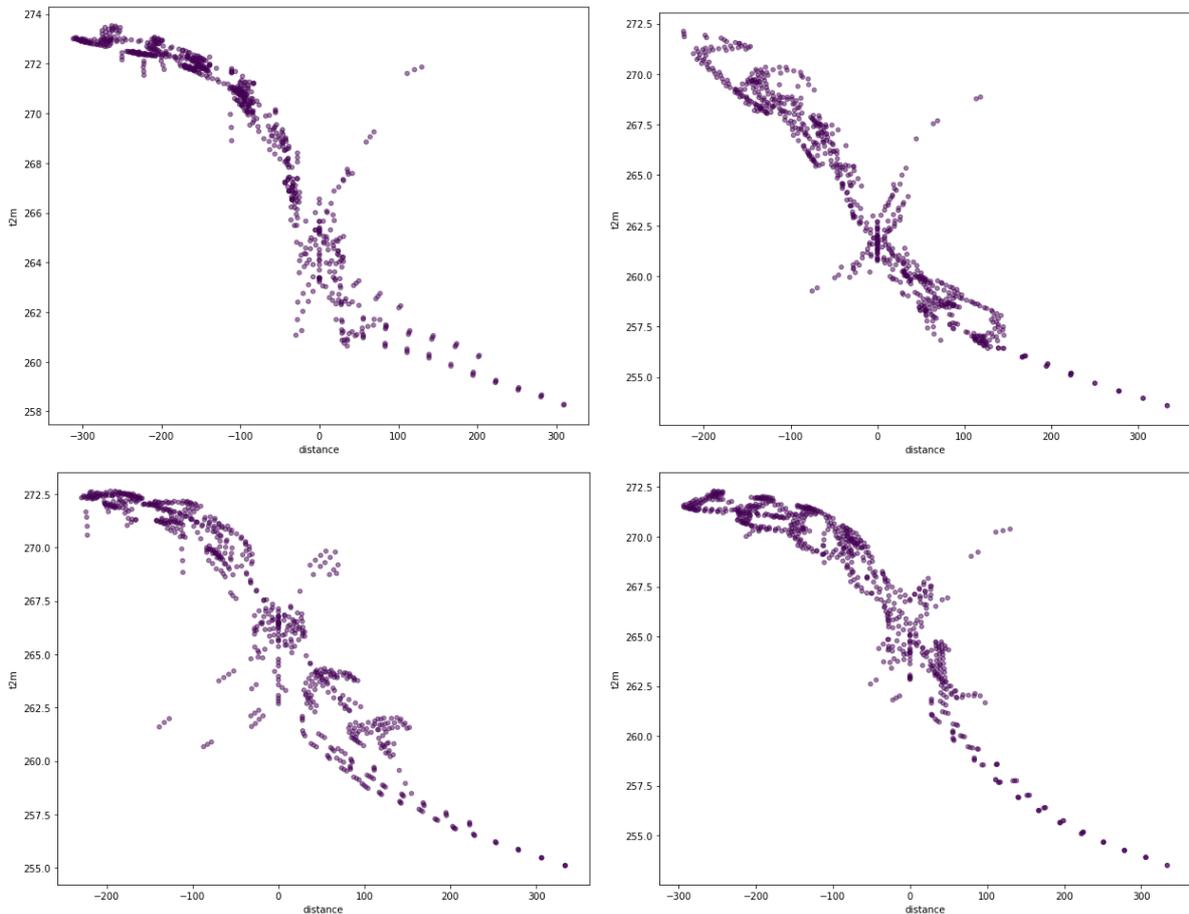


Abbildung 25: Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar

Eine kurze Erklärung erleichtert die Interpretation der Grafik: Eine negative Distanz zur ICELINE bedeutet, dass sich das betrachtete Element auf dem offenen Ozean befindet. Eine positive Distanz hingegen beschreibt ein Element über dem Eis.

5.1.1 Im Jahresverlauf

In den Abbildungen 26 und 27 ist die Darstellung für alle Monatsmittel eines Jahres zu sehen. Der Verlauf ist fließend und weist einige Charakteristika auf. Diese werden später in der Interpretation erläutert.

Ab Juni ist ein Zusammenbrechen der markanten Struktur ersichtlich. Dies ist auf die Schmelzphase des Meereises zurückzuführen. Mehr dazu in Kapitel 5.6. Abgesehen vom Sommer bleibt die Verteilung der Abstands-Temperatur-Punkte über das ganze Jahr sehr ähnlich. Das Meereis hat also im Frühling, Herbst und Winter einen sehr gleichmäßigen Einfluss auf die Temperatur.

Die Streuung, welche besonders um die 0 km Distanzlinie auffällt wird im Folgenden und in 5.5 genauer erläutert.

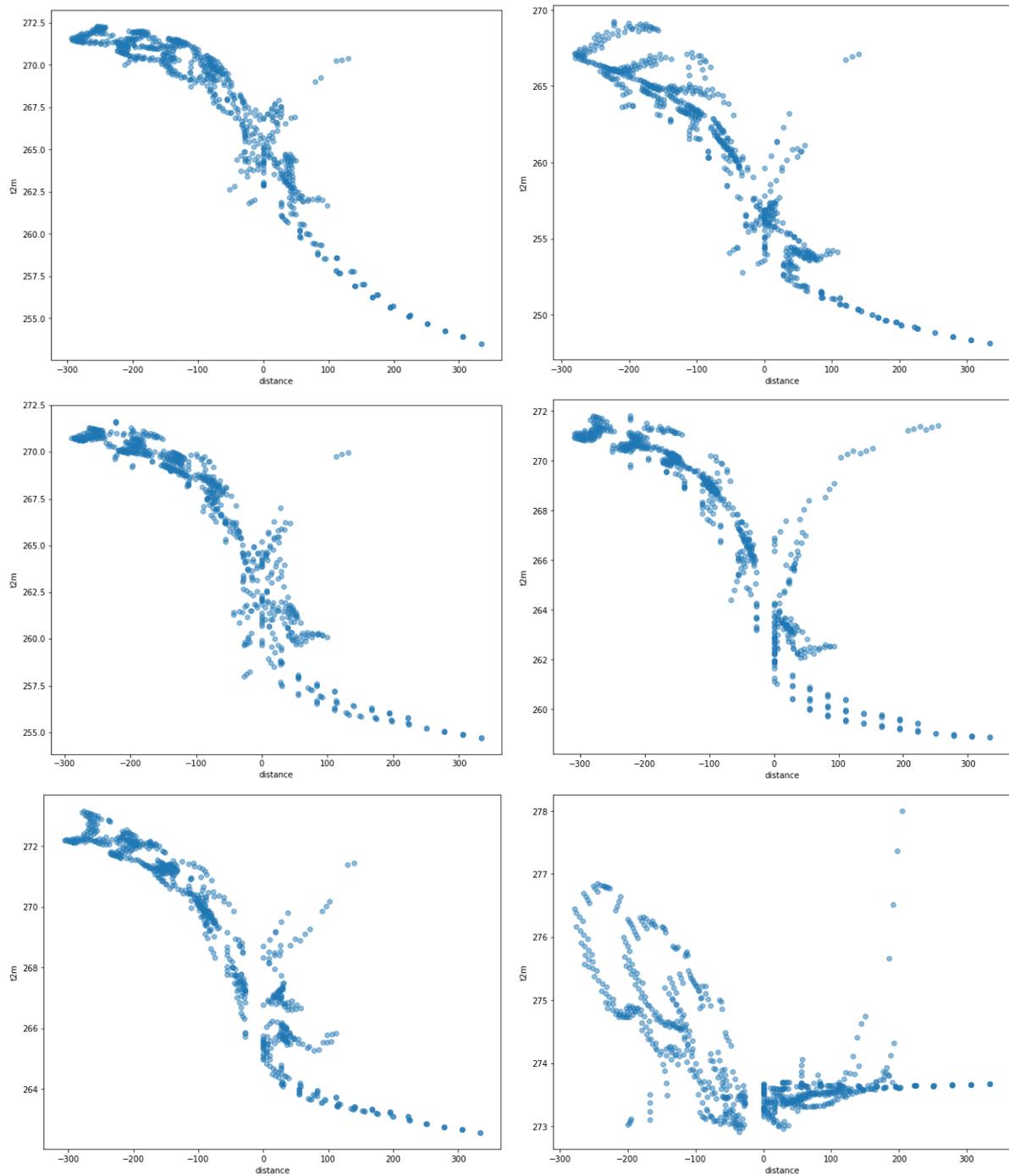


Abbildung 26: Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2015 Januar, Februar, März, April, Mai, Juni

5.1.2 Interpretation

Die beschriebene Funktion ähnelt dem Verlauf des Arcustangens, weist also in einem schmalen Bereich um die 0 km Distanz eine wesentlich stärkere Temperaturabnahme (Richtung offenes Meer auf Eis) auf, als an den weiter entfernten Punkten. Dies lässt sich auf den starken Zusammenhang zwischen ICELINE und T2m zurückführen. Beim Überschreiten dieser, kühlt die Luft rasch ab. Diese Abkühlung pro Distanz wird Richtung Meereis gehend geringer. Ebenso, nur invers, verhält es sich mit der Erwärmung pro Distanz auf das offene Meer hingehend.

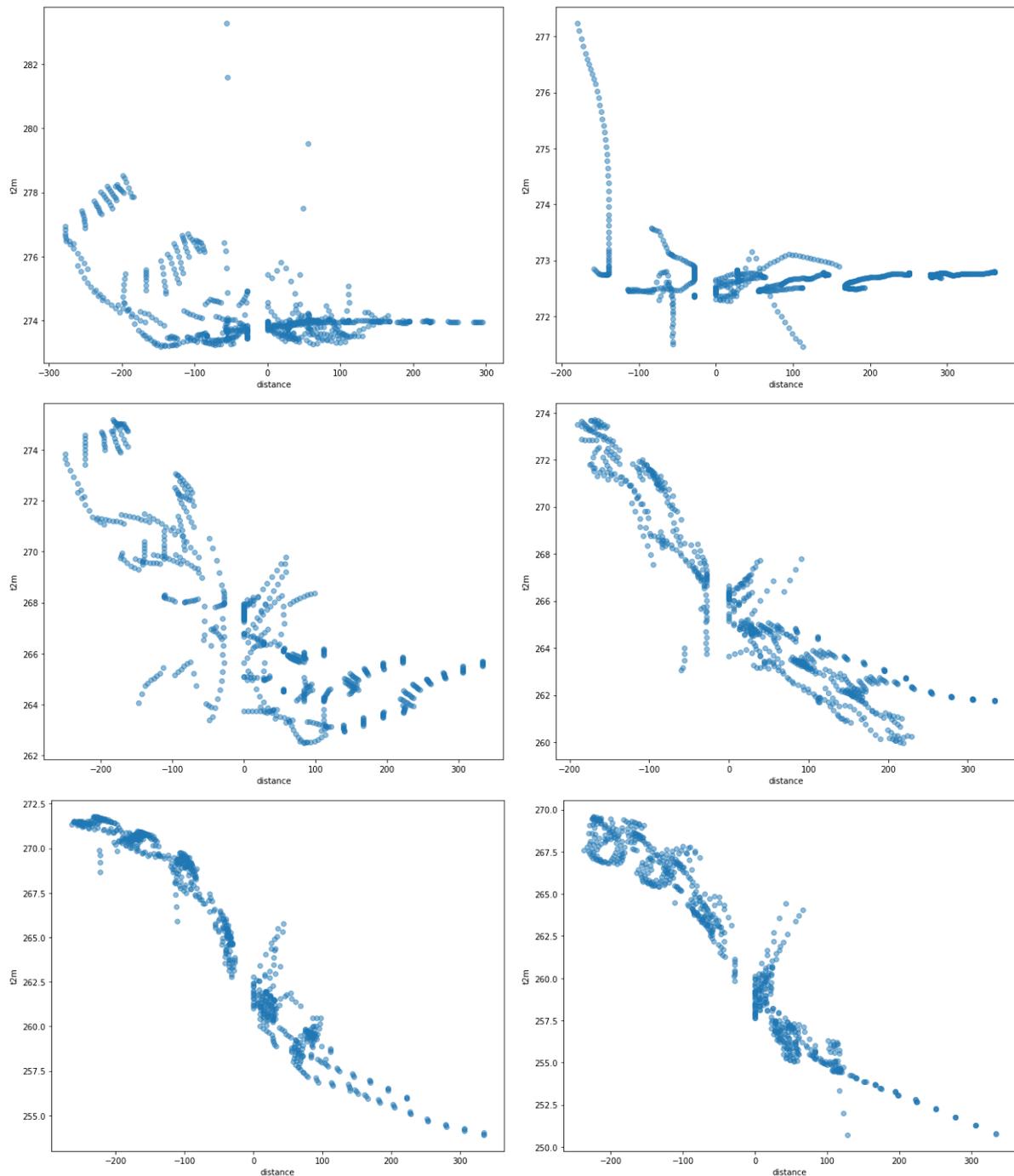


Abbildung 27: Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2015 Juli, August, September, Oktober, November, Dezember

Zusätzlich sollte hier erwähnt werden, dass in dieser Ansicht im Januar alle betrachteten Punkte unter 0 °C liegen, also keine Abhängigkeit von möglichen Schmelzprozessen für diesen schmalen Bereich um die 0 km Distanzlinie gegeben ist.

Blendet man diesen "Sprung" aus, so lässt sich erahnen, wie der Temperaturverlauf über einem eisfreien Ozean aussehen könnte. Es würde eine reine Abhängigkeit der Temperatur von der darunter liegenden Ozeantemperatur resultieren.

Für exakte Werte sind diese Grafiken nicht zu verwenden, hierfür sind Modelldaten notwendig. Es wird lediglich auf den offensichtlichen Einfluss des Meereises hingewiesen und dieser näher betrach-

tet.

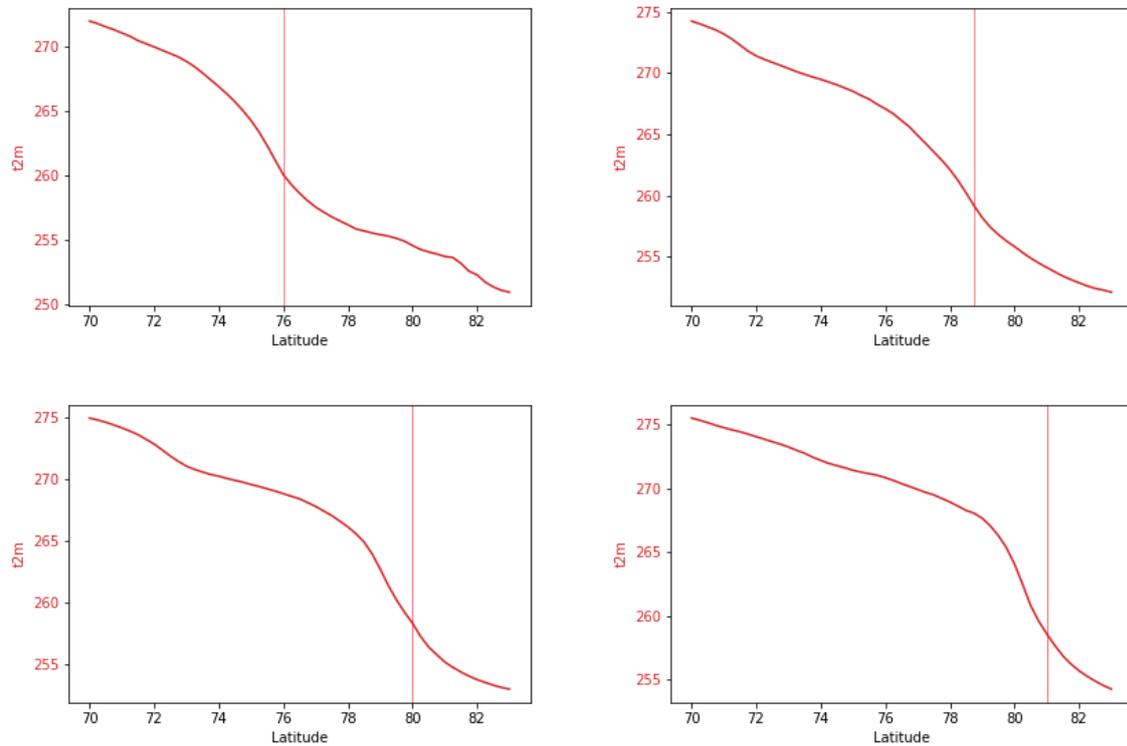


Abbildung 28: T2m Verlauf an gewissen Breitengraden - rote vertikale Linie = ICELINE 2015 Januar

Hierzu zeigt Abbildung 28 einige Temperaturverläufe über die ICELINE für einen Einzelfall (01.2015). Auch hier wird der Einfluss deutlich. Es handelt sich hier um Monatsmittelwerte, also sind synoptische Einflüsse nur gering.

Weiterhin fällt sofort ins Auge, dass die Punkte über Meereis eine wesentlich geringere Abweichung vom mittleren Verlauf aufweisen. Dies lässt sich auf die homogenere Temperaturverteilung über dem Eis zurückführen, welche deutlich stärker von der Einstrahlung, also von der geografischen Breite, abhängt als vom Wetter. Im Mittel unterliegen die räumlichen Temperaturunterschiede über Eis geringeren Schwankungen als über offenem Wasser.

Letztlich stellt sich noch die Frage, woraus die Streuung um die 0 km Distanzlinie resultiert. Nach ersten Überlegungen lässt sich vermuten, dass diese vereinzelt durch Advektion über die ICELINE entsteht. Anlässlich dieser Vermutung wird Experiment 2: "Zusammenhang Wind und Streuung der Temperatur-Distanz-Punkte" vorgenommen.

5.2 Zusammenhang Wind u. Streuung der Temperatur-Distanz-Punkte

Als erster Schritt wird die Windgeschwindigkeit an den jeweiligen Punkten betrachtet. Diese wird direkt aus den beiden Windkomponenten abgeleitet:

$$V = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Stimmt die Hypothese der Advektion, sollten nun also Punkte, welche sich verhältnismäßig weit weg von andern befinden, eine hohe Windgeschwindigkeit aufweisen. Siehe 29: Die Erwartungen treffen nicht zu. Es sind keine erhöhten Windgeschwindigkeiten an den beobachteten Stellen erkennbar.

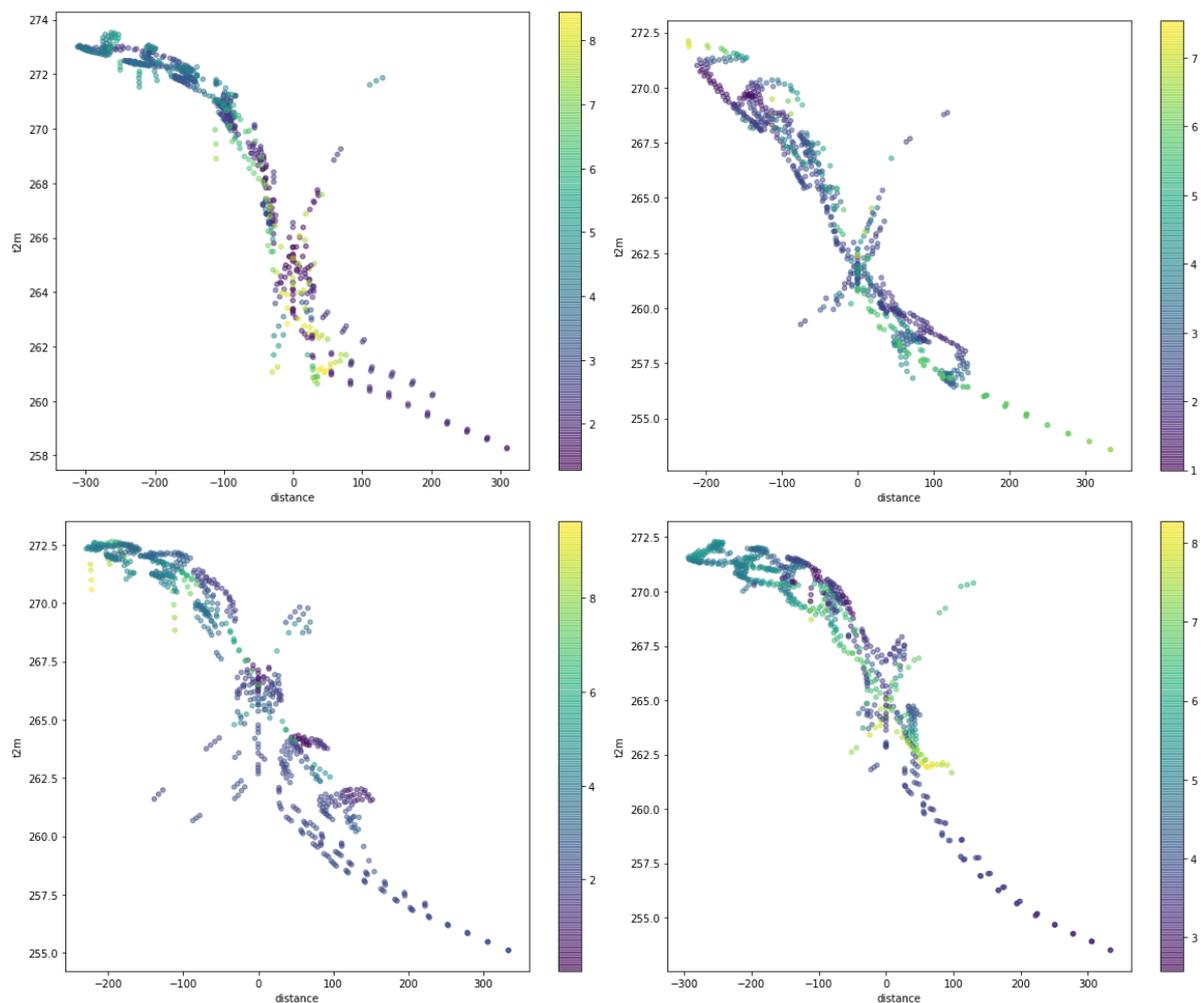


Abbildung 29: Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar; Windgeschwindigkeit in Farbe [m/s]

5.2.1 Windrichtung

Hohe Windgeschwindigkeiten parallel zur ICELINE führen nicht zu Advektion von Luft mit höherer oder niedriger Temperatur. Daher könnte eine Berücksichtigung der Windrichtung gegebenenfalls bessere Einsicht bieten. Dazu wird die Windrichtung aus den beiden Windkomponenten abgeleitet:

Siehe: 30

$$direction = \arctan2\left(\frac{u}{v}, \frac{v}{v}\right)$$

$$direction_{degree} = direction * \frac{180}{\pi}$$

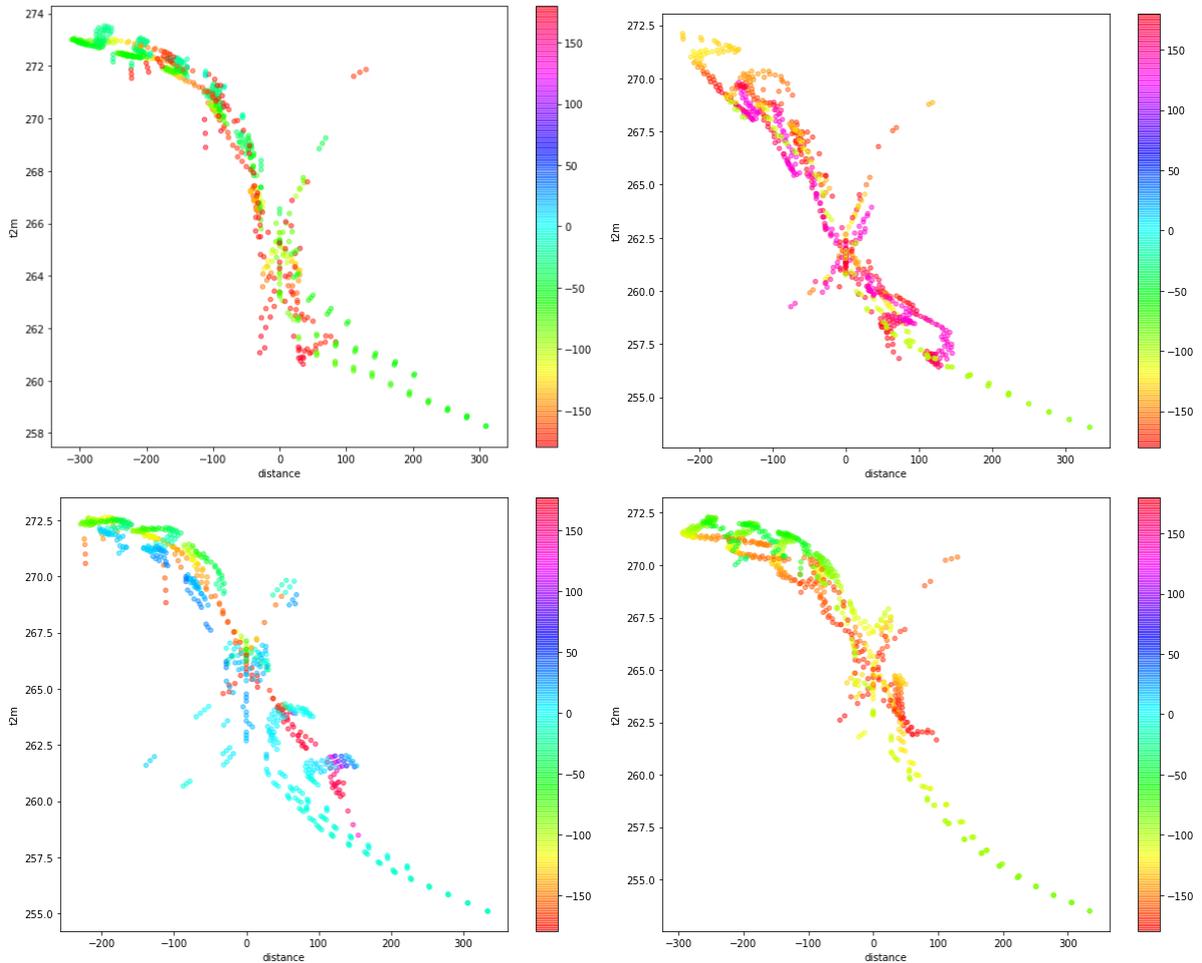


Abbildung 30: Abstand zur ICELINE (x -Achse) gegen $T2m$ (y -Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar, Windrichtung in Farbe [$^{\circ}$]

Es lässt sich keine eindeutige Windrichtung aus machen, bei welcher die Streuung auftritt. Jedoch sind für die einzelnen Monate die Streuungspunkte bei sehr ähnlichen Windrichtungen vorzufinden.

5.2.2 Gewichtete Windgeschwindigkeit

Eine zusätzliche Betrachtung jenes Windanteils, welcher normal zur ICELINE weht, gibt gegebenenfalls mehr Aufschluss. Hierzu werden die Windgeschwindigkeiten der Punkte gewichtet. Windrichtungen normal zur ICELINE werden zu 100% berücksichtigt. Die Gewichtung nimmt linear bis zur ICELINE parallelen Windrichtungen ab und erreicht für diese 0%.

$$direction = \arctan2\left(\frac{u}{v}, \frac{v}{v}\right)$$

$$bearing = \arctan2(y, x)$$

$$y = \sin(rad(lon_{end}) - rad(lon_{start})) * \cos(rad(lat_{end}))$$

$$x = \cos(rad(lat_{start})) * \sin(rad(lat_{end})) - \sin(rad(lat_{start})) * \cos(rad(lat_{end})) * \cos(rad(lon_{end}) - rad(lon_{start}))$$

$$normality = \frac{1 - \cos(bearing - direction)}{2}$$

direction	Beschreibt die Windrichtung der einzelnen Punkte [rad]
bearing	Beschreibt die Gesamtausrichtung der ICELINE (genähert durch eine Linie durch Start- und Endpunkt) [rad]
x, y	Kartesische Koordinaten [1]
normality	Faktor der Normalität der Windgeschwindigkeit zur ICELINE [1]

In Abbildung 31 wird die “normality“ in Farbe dargestellt. In Abbildung 32 wird die Windgeschwindigkeit mit der “normality“ multipliziert um eine gewichtete Windgeschwindigkeit zu erzeugen.

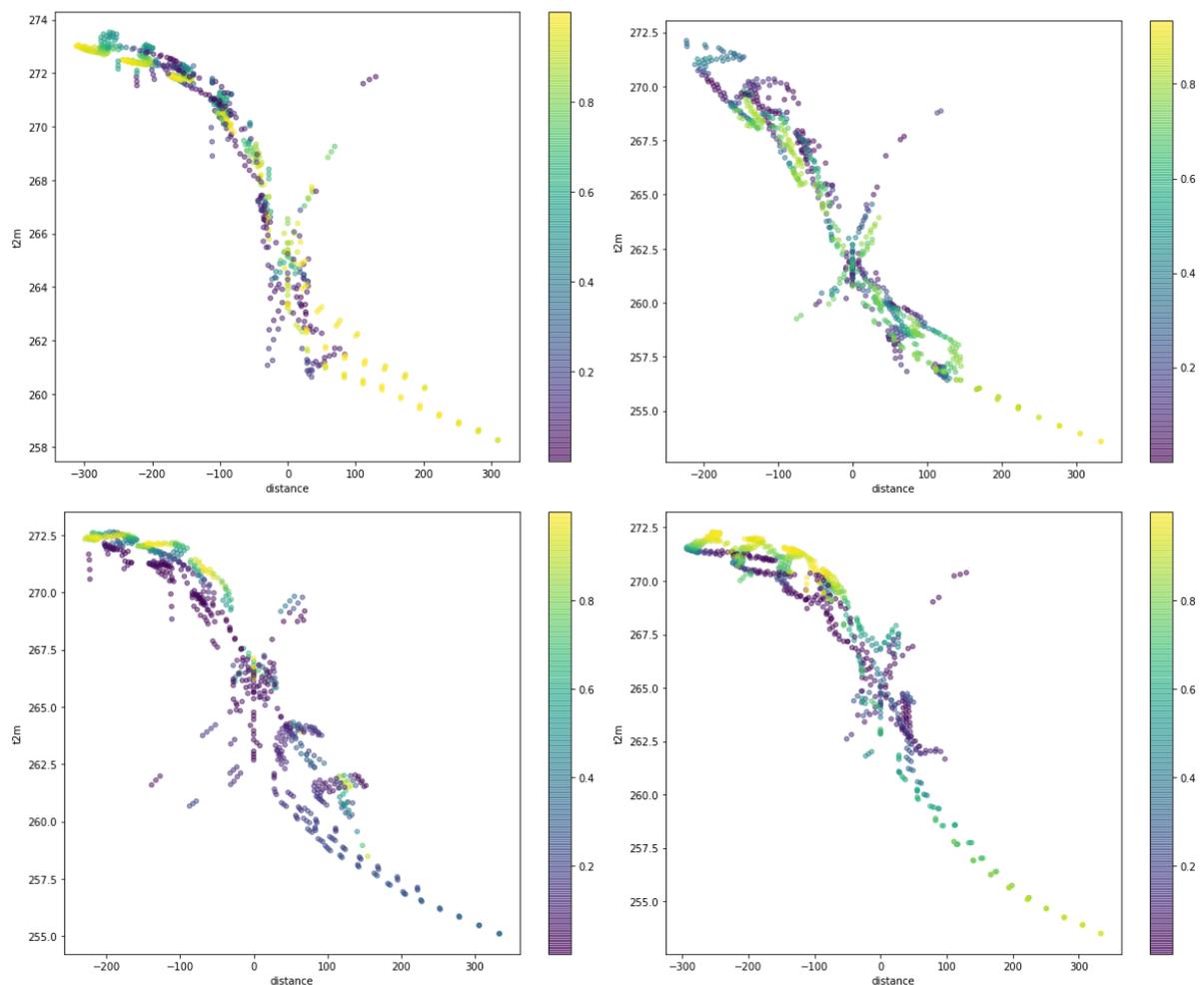


Abbildung 31: Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar, Faktor des Windrichtungsgewicht - parallele Windrichtungen zur ICELINE gehen gegen 0, normal zur ICELINE gehen gegen 1 [1]

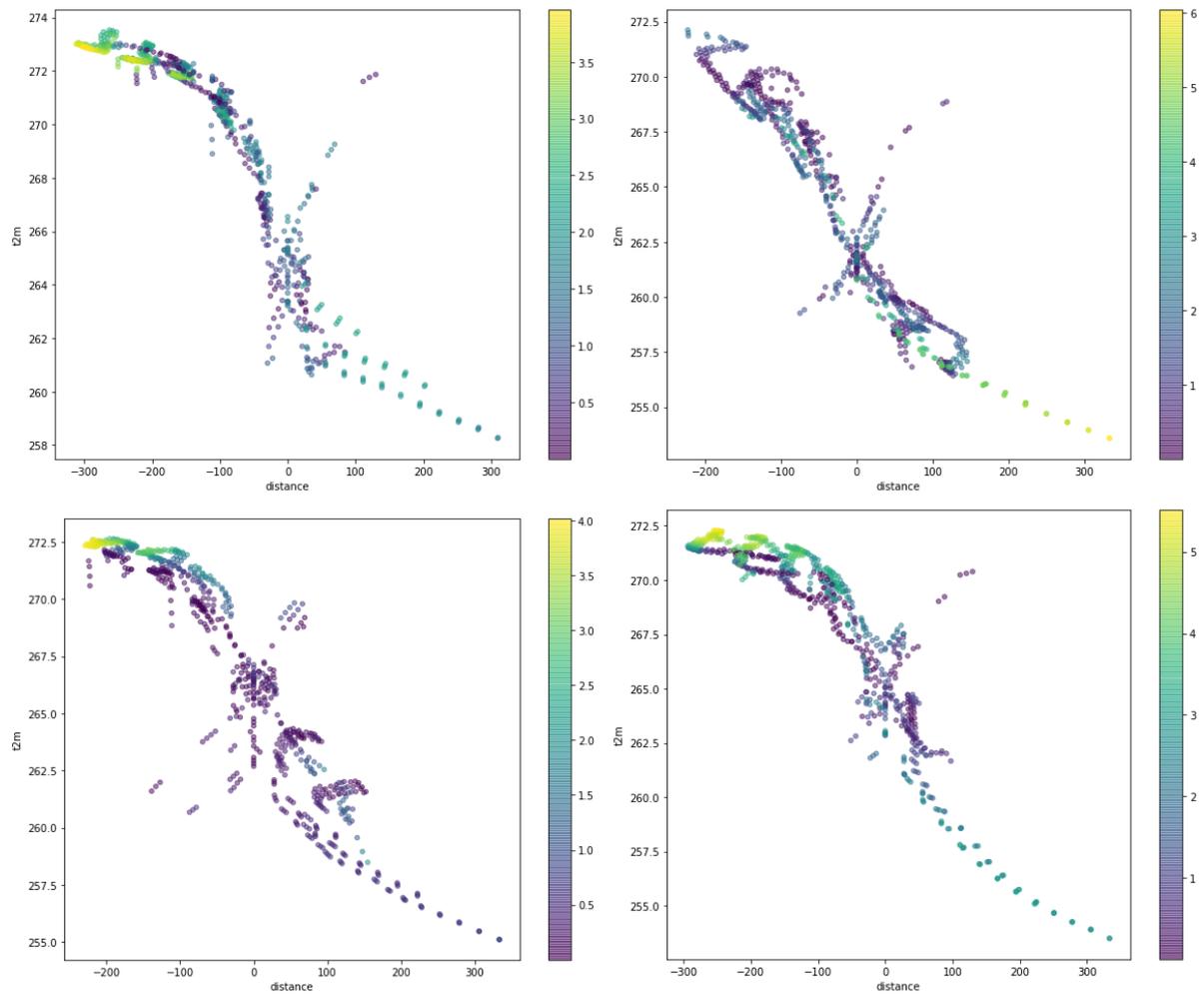


Abbildung 32: Abstand zur ICELINE (x -Achse) gegen $T2m$ (y -Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar, Windgeschwindigkeit durch Richtung gewichtet - Hohe Gewichtung bei Windrichtung normal zur ICELINE in Farbe [$m/s * 1$]

Beide Darstellungen erklären die Streuung um die 0 km Distanzlinie nicht. Die Grafiken deuten viel mehr auf Punkte mit geringer Advektion hin.

5.2.3 Windvektor Darstellung

Eine Darstellung mit Windvektoren scheint möglicherweise einfacher zu sein, als die Windkomponenten aufzuspalten. Doch treten durch die große Anzahl an Punkten große Schwierigkeiten in der Darstellung auf. In Abbildung 33 ist zu sehen, dass sich die Windvektoren oft überlappen.

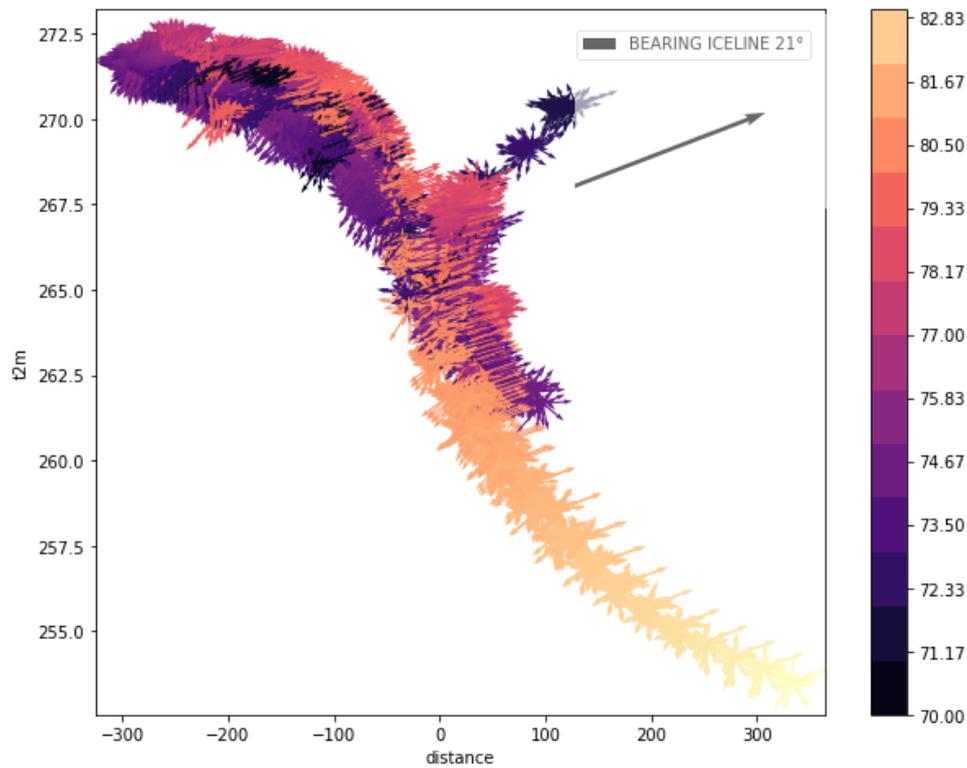


Abbildung 33: Abstand zur ICELINE (x -Achse) gegen T_{2m} (y -Achse) aufgetragen 2015 Januar, Windvektoren

Eine Reduktion der Windvektoren ist nicht sinnvoll, da ansonsten die Information verloren geht. Ein Mitteln der Vektoren ist nicht möglich, da diese zwar stets auf 0.25° Distanzpunkten liegen, die Temperaturen sich jedoch im Bereich von $10^{-5}K$ unterscheiden und so Punkte nie genau übereinander liegen.

5.3 Breitenabhängigkeit

Da die Streuung um die 0 km Distanzlinie durch Advektion nicht erklärt werden kann, wird hier die Abhängigkeit der geographischen Breite erläutert.

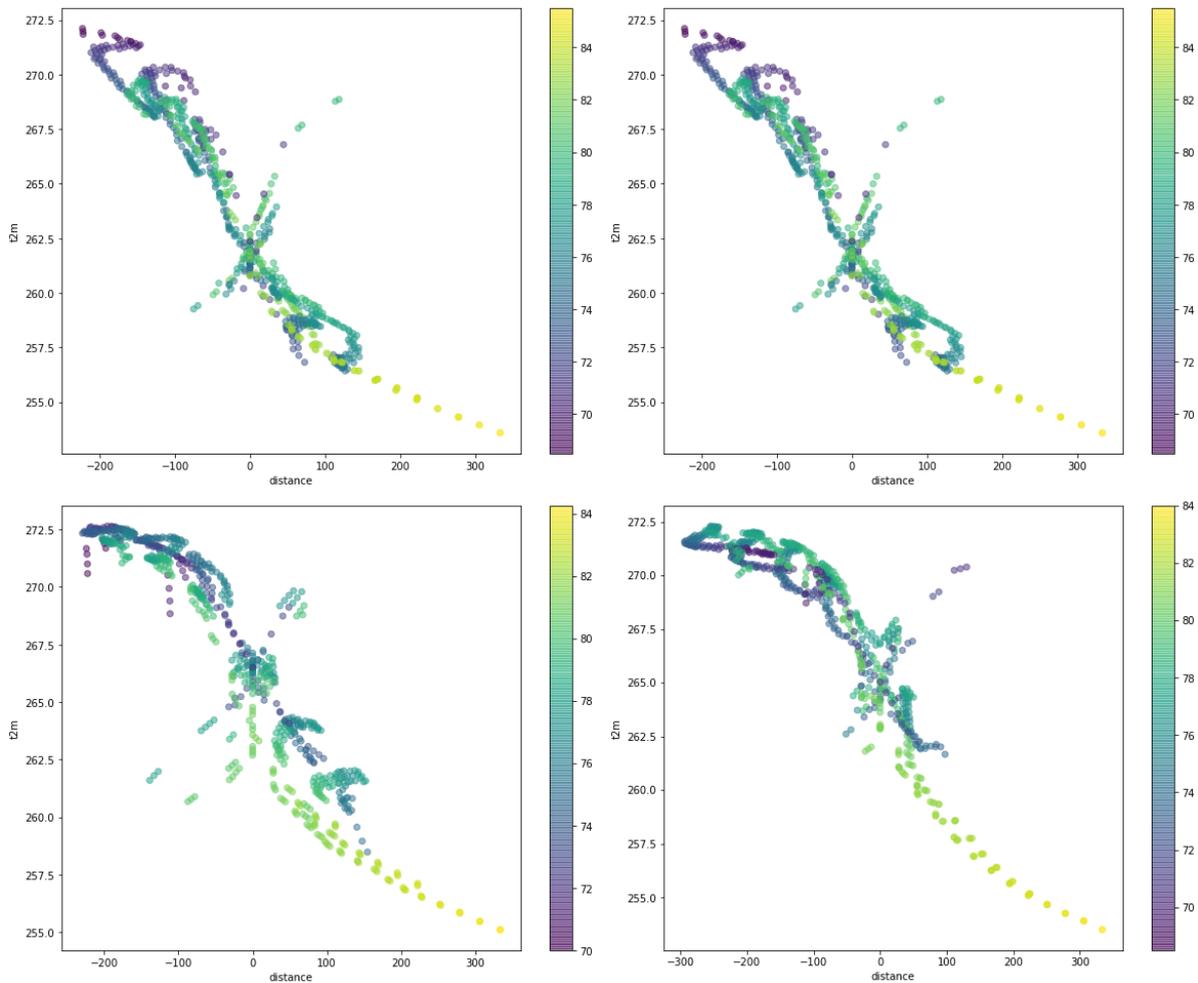


Abbildung 34: Abstand zur ICELINE (x -Achse) gegen T_{2m} (y -Achse) aufgetragen 2012-2015 Januar, Breitengrad [$^{\circ}N$]

In Abbildung 34 ist eine eindeutige Abhängigkeit der Temperatur von der geografischen Breite erkennbar. In der Streuung um die 0 km Distanzlinie lässt sich aber keine Verbindung mit dieser Größe erkennen.

5.4 Höhenabhängigkeit

In diesem Experiment wird die Höhenabhängigkeit des Meereis-Einflusses auf die Temperatur untersucht. Dazu werden die Temperaturdaten aus höher gelegenen Schichten mit verwendet.

In Abbildung 35 ist eindeutig ersichtlich, wie mit zunehmender Höhe, der untersuchte Einfluss abnimmt. Jedoch ist auch in diesen Niveaus die Lufttemperatur über dem Eis wesentlich homogener verteilt als über dem Ozean.

Es zeigt sich, dass bei höheren Windgeschwindigkeiten die Temperatur über dem Ozean ebenso höher ist. Dies lässt sich auf die stärkere Durchmischung zurückführen.

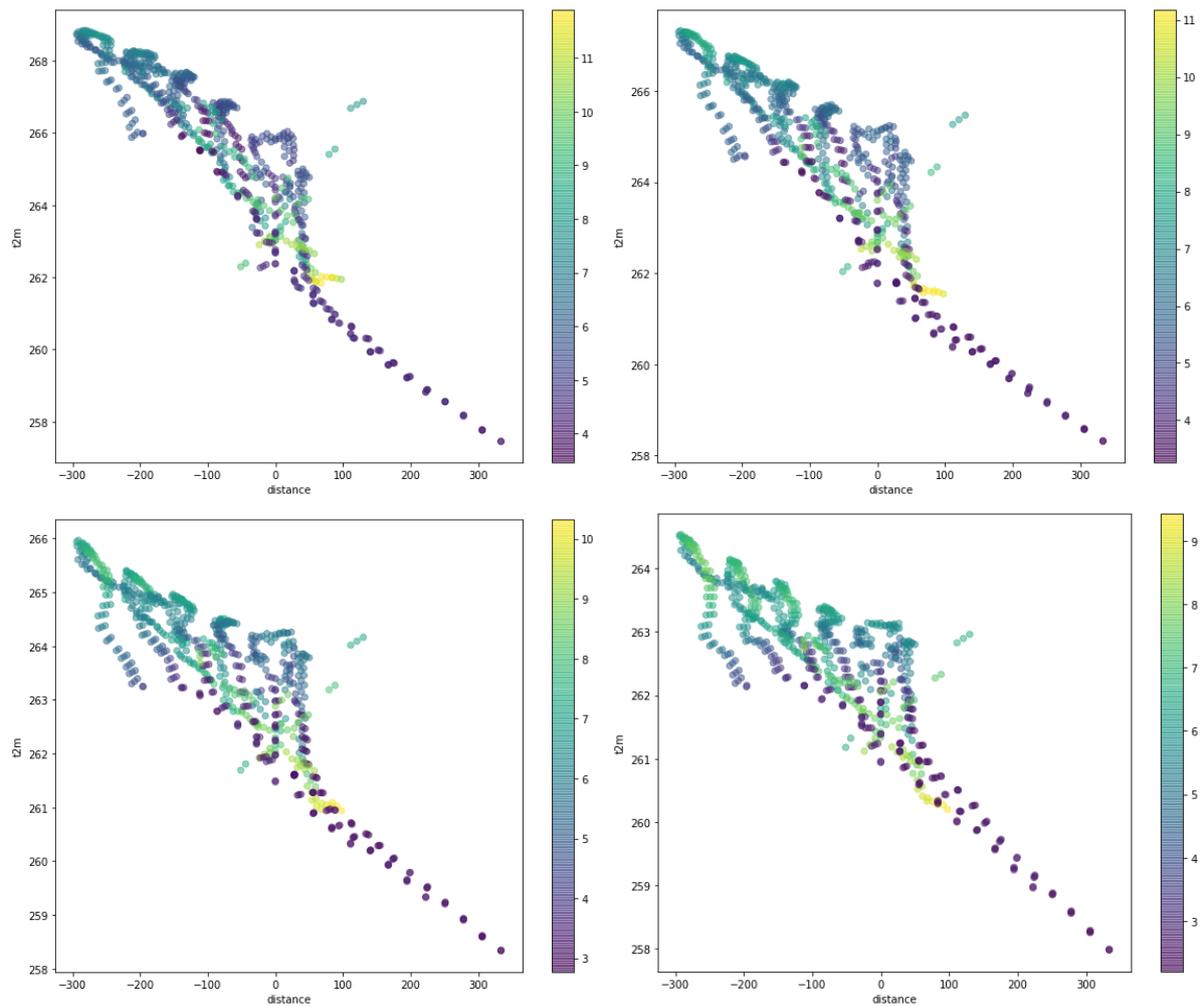


Abbildung 35: Abstand zur ICELINE (x -Achse) gegen T_{2m} (y -Achse) aufgetragen 2015 Januar, in unterschiedlichen Druckniveaus (950, 925, 900, 875 hPa) und Windgeschwindigkeit in Farbe [m/s]

5.5 Streuung um 0 km Distanz

Es kann keine Größe mit dieser Streuung verbunden werden. Daher ist auch deren Ursprung unbekannt. Die Anzahl jener Punkte ist verhältnismäßig gering gegenüber jener des Rests. Trotz der geringen Anzahl liegen genügend Werte vor, um einzelne zufällige Fehler auszuschließen.

Sie ist auch in den Kurven aus höher gelegenen Schichten auffindbar, was darauf schließen lässt, dass sie unabhängig von der Temperatur ist.

Da sich diese Streuung auch in beide Richtungen, also auf das Eis sowie auch auf den freien Ozean hinaus, finden lässt, handelt es sich dabei vermutlich um keine Fehler die nur über Eis oder über offenem Meer auftreten. Hier muss erwähnt werden, dass die Streuung über Eis deutlich weiter reicht als über dem eisfreien Ozean.

Die Streuung an sich ist am größten an der ICELINE, also dort wo die Luft über dem Eis einige Zeit benötigt um abzukühlen und umgekehrt über dem verhältnismäßig warmen Wasser dessen Temperatur anzunehmen. Dieser Teil der Streuung ist somit physikalisch gesehen zu erwarten. Die Anteile der Ausreißer in Richtung offenem Ozean sind nur wenige und weichen nur etwa 50 km von der Punktmasse ab. Dies kann bei passenden Bedingungen noch erklärt werden.

Jener Teil der Streuung, welcher aber über hunderte Kilometer auf das Eis hinaus reicht, kann nicht durch diese Anpassungsverzögerungen erklärt werden. Die Frage nach der Ursache dieser weitreichenden Abweichungen bleibt offen.

5.6 Schmelzwasser

In den Sommermonaten, vor allem im Juli und im August (Abbildung 36) sieht die Kurve der Abstand-Temperatur-Punkte wesentlich anders aus, als in den restlichen Monaten. Aufgrund des starken Abschmelzens in dieser Zeit werden große Energiemengen für den Schmelzprozess benötigt und dadurch die Temperatur großflächig bei 0 °C gehalten. Dies gilt nicht nur für den Randbereich des Meereises, sondern auch bis zu einigen Hundert Kilometern auf das Eis und den offenen Ozean. Der offene Ozean wird durch das kalte Schmelzwasser gespeist, wodurch auch dessen oberflächennahes Wasser nahe am Gefrierpunkt gehalten wird. Auf dem Meereis bilden sich in dieser Phase Schmelzwassertümpel, welche einen sehr ähnlichen Effekt aufweisen.

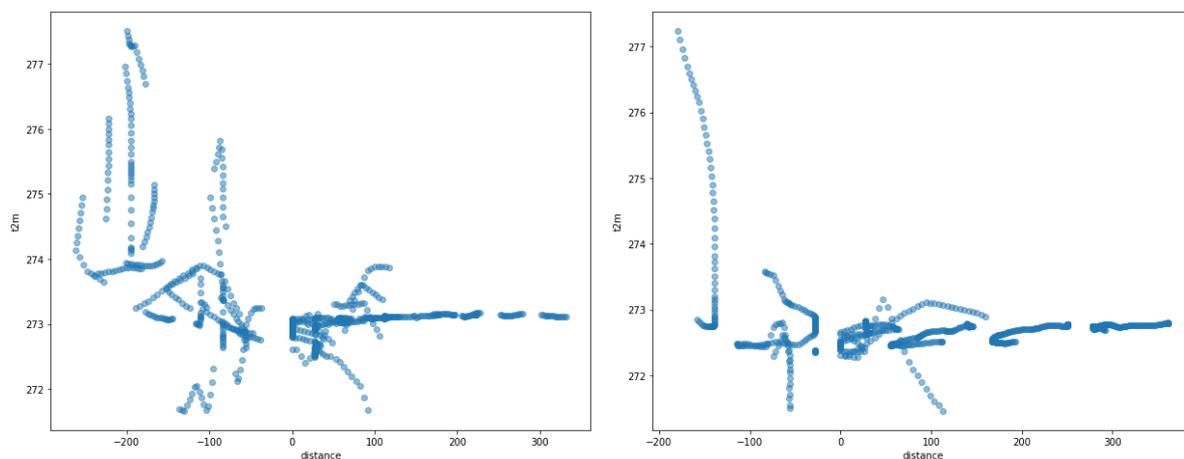


Abbildung 36: Abstand zur ICELINE (x-Achse) gegen T2m (y-Achse) aufgetragen 2014 & 2015 August

Literaturverzeichnis

- Copernicus (2019), Climate data store. <https://cds.climate.copernicus.eu/#!/home>, Accessed: 17.09.2019.
- EUMETSAT (2019), Osi-saf global sea ice concentration (ssmis). <http://www.osi-saf.org/?q=content/global-sea-ice-concentration-ssmis>, Accessed: 17.09.2019.
- Goessling1, H. F. (2016), Predictability of the arctic sea ice edge. *AGU Publication - Geophysical Research Letters*.
- Haimberger, L. (2016), Skript fernerkundung.
- Hennermann, K. (2019), Era5 data documentation. <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5+data+documentation>, Accessed: 17.09.2019.
- Hirahara, S. (2016), Sea surface temperature and sea ice concentration for era5. *ERA Report Series*.
- Matthews, J. (2018), Ipcc, 2018: Summary for policymakers. in: Global warming of 1.5°C. *ipcc.ch*.
- NASA (2019), Advanced microwave scanning radiometer 2 (amsr2). <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/download-nrt-data/amsr2-nrt>, Accessed: 17.09.2019.
- NetCDF (2019), Network common data form. <https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>, Accessed: 17.09.2019.
- Python (2019), Programmiersprache python. <https://www.python.org/>, Accessed: 17.09.2019.
- Rothrock, D. A. (1988), Principal component analysis of satellite passive microwave data over sea ice. *Journal of Geophysical Research* 93.
- Sandven, S. (2018), Gap analysis document sea ice. *Copernicus Climate Change Service*.
- xESMF (2019), xesmf: Universal regridding for geospatial data. <https://xesmf.readthedocs.io/en/latest/>, Verfügbar unter Python Conda "conda-forge xesmf", Accessed: 17.09.2019.