Rabe: Klassifikation von *Ra*darsatelliten*b*ildern zur Bestimmung von Meer*e*isparametern mittels statistischer Texturanalyse

Bericht zur DFG-Förderung HE 1746/5-1

Lars Kaleschke, Georg Heygster, Klaus Künzi
Institut für Umweltphysik
Universität Bremen/FB1

November 2000

1 Übersicht

Dieser Bericht wird nach nur vier Monaten Projektarbeit vorgelegt, weil der Abgabetermin für den Fortsetzungsantrag dies erfordert.

Das vorliegende Projekt stützt sich auf Vorarbeiten im Rahmen des EU-Projektes ARTIST (Arctic Radiation and Turbulence Interaction Study). Im Rahmen der Meßkampagne ARTIST wurde ein umfangreicher Datensatz zusammengetragen.

Dieser Datensatz soll in dem Projekt Rabe noch weiter ausgewertet werden mit dem Ziel der Entwicklung eines Verfahrens zur automatischen Erstellung von Eiskarten aus ERS-SAR-Bildern.

Entsprechend dem Zeitplan des ursprünglichen Antrages umfaßt dieser Bericht den Punkt 3.2.1 des Arbeitsplans 'Aufbereitung der Meßdaten'. Bislang noch nicht bearbeitet wurden der Einfluß des Atmosphärensignals auf die Flugzeugmessungen (3.2.1.1) und die Evaluation der Scatterometerdaten (3.2.1.4).

Bei der Aufbereitung der SSM/I-Daten (3.2.1.3) wurde über den Arbeitsplan hinausgehend ein Algorithmus für den 85 GHz Kanal des SSM/I entwickelt und seine besondere Eignung (relativ hohe räumliche Auflösung) für die geplanten Untersuchungen nachgewiesen (Abschnitt 4 dieses Berichts).

2 Einleitung: Aufbereitung der Meßdaten (Juli-Dez. 2000)

Der ARTIST-Datensatz besteht aus diversen Fernerkundungsmessungen des Meereises mit unterschiedlichen Sensoren und Verfahren sowohl von Flugzeugen (POLAR-2 und POLAR-4) als auch von verschiedenen Satelliten (ERS-SAR, DMSP-SSM/I) aus.

Die Verschiedenheit der verwendeten Quellen drückt sich in einer starken Heterogenität des Datensatzes aus: in Form von unterschiedlichen räumlichen Auflösungen (z.B. ERS-SAR: 25 Meter versus SSM/I: 12-50 km) Anzahl der Kanäle (z.B. ERS-SAR: 1 Kanal versus SSM/I: 7 Kanäle), verschiedenen Datenformaten etc.

Die bisher eher informationstechnische Arbeit für das Projekt Rabe bestand darin, die unterschiedlichen ARTIST-Daten zusammenzuführen und zu homogenisieren, um sie für die geplanten Untersuchungen überhaupt erst nutzbar zu machen.

Beim Prozess des Zusammenführens müssen die unterschiedlichen Charakteristika der Daten berücksichtigt werden. Die Datenverarbeitung findet dabei auf verschiedenen Ebenen ab, die durch den Zustand (Rohdaten $\rightarrow$ Kalibration $\rightarrow$ Ableitung von geophysikalischen Parametern) und die Form (irregulär abgetastete Daten $\rightarrow$ Interpolation $\rightarrow$ in ein gemeinsames Gitter gebrachte Daten) gekennzeichnet sind.

Die einzelnen Arbeitsschritte wurden durch Metainformationen dokumentiert, um die Prozeßkette zu automatisieren. Damit ist auch gewährleistet, daß nicht reversible Schritte, wie z.B. die Interpolation, transparent und reproduzierbar bleiben.

3 Flugzeugmessungen

Zum Zwecke der Meereisfernerkundung wurde während der ARTIST-Kampagne das AWI-Forschungsflugzeug POLAR-4 mit zwei dual polarisierten Mikrowellenradiometern ausgestattet, welche bei den Frequenzen 19 und 37 GHz die von dem Meereis emittierte Strahlung messen. Die Radiometer waren so in das Flugzeug eingebaut, daß sie die Strahlung unter einem Einfallswinkel von 53° messen. Die Konfiguration (Frequenzen, Einfallswinkel) der Radiometer auf POLAR-4 erlaubt daher einen direkten Vergleich der Flugzeugmessungen zu den Messungen des SSM/I (siehe Tabelle 1, Abschnitt 4).

Die Radiometerdaten wurden kalibriert, um die Strahlungstemperatur T_B (*Brightness Temperature*) für die einzelnen Kanäle zu ermitteln. Die Verstärkung des Empfängers wurde jeweils vor dem Meßflug durch eine Zweipunktkalibration ermittelt. Ein Offset wurde während der Flüge mehrmals während Meßpausen mit einer geeigneten Strahlungsquelle bestimmt.

Im wesentlichen werden zwei physikalische Effekte zur Unterscheidung verschiedener Oberflächentypen (z. B. Ozean, erstähriges und mehrjähriges Meereis) genutzt:

1. Die Differenz der vertikalen und horizontalen Strahlungskomponente ist für den eisfreien Ozean weitaus größer, als das beim eisbedeckten

Ozean der Fall ist.

2. Die unterschiedliche Frequenzabängigkeit verschiedener Eistypen.

Deswegen werden oft statt der Strahlungstemperaturen selber die Verhältnisse verschiedener Kanäle des Radiometers betrachtet:

$$PR = \frac{T_B(19V) - T_B(19H)}{T_B(19V) + T_B(19H)} \tag{1}$$

$$GR = \frac{T_B(37V) - T_B(19V)}{T_B(37V) + T_B(19V)}, \tag{2}$$

Ein weiterer Vorteil der Verwendung dieser Größen besteht darin, daß die Abhängigkeit von der physikalischen Temperatur verringert wird.

Diese beiden Merkmale werden als unabhängige Variable zur Parametrisierung des NASA-TEAM-Algorithmus (NTA) verwendet [Cavalieri, 1991]. Dieser empirische Algorithmus beruht auf der Annahme, daß die gemessenen Strahlungstemperaturen sich linear aus den Beiträgen von drei dominanten Oberflächentypen (Ozean, erstjähriges und mehrjähriges Eis) zusammensetzt. Die Strahlungstemperaturen der reinen Oberflächentypen werden Eichpunkte genannt. Der NTA hat sich als ein Standard etabliert, um Eiskonzentration aus SSM/I-Daten zu berechnen.

Eine Analyse der Flugzeug-Radiometerdaten ergab, daß die Eichpunkte nur unwesentlich von denen der Satelliten-Radiometerdaten abweichen. Daher kann der NTA angewendet werden, um Eistyp- und Konzentration aus den Flugzeug-Radiometerdaten zu bestimmen (Abb. 1).

4 ASI Eiskonzentrationsalgorithmus für SSM/I

Seit Anfang der siebziger Jahre sind passive Mikrowellensensoren auf Satelliten im Einsatz, die zur Bestimmung des Eisbedeckungsgrades genutzt werden. Der *Special Sensor Microwave/Imager* (SSM/I) ist ein operationeller Satellitensensor für eine tägliche flächendeckende Beobachtung der Eisverhältnisse. Eine Übersicht der wichtigsten Eigenschaften des SSM/I ist in Tabelle 1 zu sehen.

Es gibt verschiedene Algorithmen zur Bestimmung von Eiskonzentrationen aus SSM/I-Daten [Steffen, 1992]. Aber nur wenige Verfahren nutzen die

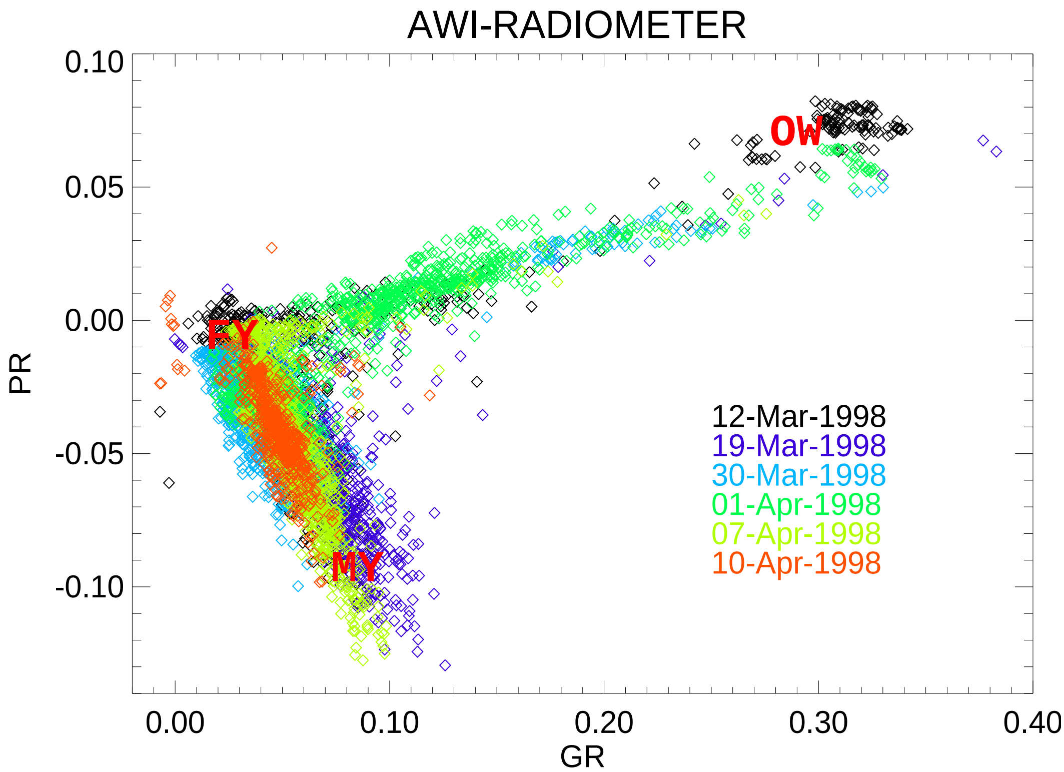

Abbildung 1: Flugzeugradiometermessungen dargestellt als Streudiagramm der normierten Polarisations- (PR) und Gradientenverhältnisse (GR). Die Eichpunkte für eisfreien Ozean (OW), erstjähriges Eis (FY) und mehrjähriges Eis (MY) sind in rot notiert.

85 GHz Kanäle, welche die maximale horizontale Auflösung bieten [Svendsen, 1987; Kern, 2000; Lubin, 1997].

Im Rahmen des Projektes ARTIST wurde ein Algorithmus, der *ARTIST Sea Ice Algorithm* (ASI), entwickelt, welcher die hohe Auflösung der hochfrequenten Kanäle ausnutzt. Dieser Algorithmus basiert auf einem Model von Svendsen zur Berechnung von Eiskonzentrationen aus Polarisationsdifferenzen bei 85 GHz [Svendsen, 1987].

Messungen mit passiven Mikrowellenradiometern vom Schiff aus während der Kampagnen *Norwegian Remote Sensing Experiment* (NORSEX) im Sep-

Tabelle 1: Eigenschaften des SSM/I.

Frequenz [GHz]	Polarisation	Auflösung [km^2]	Abtastung [km]
19,35	V,H	69 x 43	25
22,235	V	60 x 40	25
37,0	V,H	37 x 29	25
85,5	V,H	15 x 13	12,5

tember/Oktober 1979 und *Marginal Ice Zone Experiment* (MIZEX) im Juni/Juli 1983 haben ergeben, daß bei 85 GHz die Polarisationsdifferenz unabhängig vom Eistyp ist. Diese Annahme liegt dem Modell von Svendsen zugrunde [Svendsen, 1987]. Im Gegensatz dazu basiert der NTA darauf, daß zwei Eistypen (erstjähriges und mehrjähriges Eis) radiometrisch unterschieden werden (siehe Abschnitt 3). Dies ist jedoch kein Widerspruch, da der NTA auf tieferen Frequenzen beruht (19 und 37 GHz) und deshalb andere physikalische Eigenschaften, im wesentlichen durch die unterschiedliche Eindringtiefe der elektromagnetischen Strahlung bedingt, in die Berechnungen mit einfließen.

In dieser Arbeit nutzen wir beide Algorithmen, ASI und NTA, um zu einer konsistenten Berechnung von Eiskonzentrationen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen zu gelangen. Wir demonstrieren die Tragfähigkeit dieses Ansatzes anhand von einem Vergleich von Flugzeug- (NTA) und Satellitenmessungen (ASI). Die Flugroute der POLAR-4 ist in Abbildung 2 dargestellt. Ein breites Spektrum von verschiedenen Eistypen wurde beobachtet: Nilas, Pfannkuchen, dünnes und dickes erstjähriges Eis.

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen, daß die verschiedenen Verfahren, ASI (SSM/I) und NTA (Flugzeugradiometer), zu einem konsistenten Ergebnis kommen, obwohl verschiedene Frequenzen verwendet wurden und sich die räumlichen Auflösungen (Flugzeug $\approx$ 200 m, Satellit $\approx$ 12,5 km) deutlich unterscheiden.

Für den Vergleich von SSM/I und ERS-SAR Daten eignen sich die 85 GHz-Kanäle wegen der höheren räumlichen Auflösung besser als die tieferen Frequenzen. Wird der 19 GHz-Kanal (Auflösung: 69 x 43 km^2) genutzt um einen Vergleich zu einer SAR Szene (Fläche: 100 x 100 km^2) durchzuführen, so ergeben sich etwa 3 unabhängige Vergleichswerte. Im Gegensatz dazu liefert der 85 GHz Kanal (Auflösung: 15 x 13 km^2) etwa 50 Meßwerte in derselben Fläche.

Dieser Vorteil der 85 GHz-Kanäle wird im folgenden anhand von zwei Beispielen demonstriert. Zum Vergleich werden zwei SAR-Bilder herangezogen, die sehr unterschiedliche Zustände der Eiskante dokumentieren. Am 30. März 1998 war die Eiskante durch vorherrschenden aufeisigen Wind stark kompaktiert (Abb. 5). Eine Woche später ist die Eiskante diffus (Abb. 6), nachdem sich die vorherrschende Windrichtung umgekehrt hat. Die Änderung des Zustands ist auf den SAR Bildern deutlich zu erkennen. Doch ist die Zustandsänderung auch in den aus den SSM/I-Daten abgeleiteten Eiskonzentrationen sichtbar? Um diese Frage zu beantworten wird der mittlere Abstand zwischen der 30 und der 60 Prozent-Konzentrations-Isolinie als Maß für den Zustand der Eiskante betrachtet. Ist die Eiskante kompakt (Abb. 5), dann ergibt sich ein mittlerer Abstand von 10 km (ASI) bzw. 30 km (NTA). Der Abstand ändert sich bei der diffusen Eiskante (Abb. 6) deutlich (18 km) bei Verwendung des 85 GHz Kanals (ASI), bzw. unwesentlich (33 km) bei Verwendung der tiefen Frequenzen 19 und 37 GHz (NTA).

Die obigen Überlegungen zeigen, daß der ASI Algorithmus für das geplante Vorhaben wichtige Informationen liefern kann. Er kann die Eiskante genauer als der NTA lokalisieren und ihren Zustand (kompakt/diffus) charakterisieren.

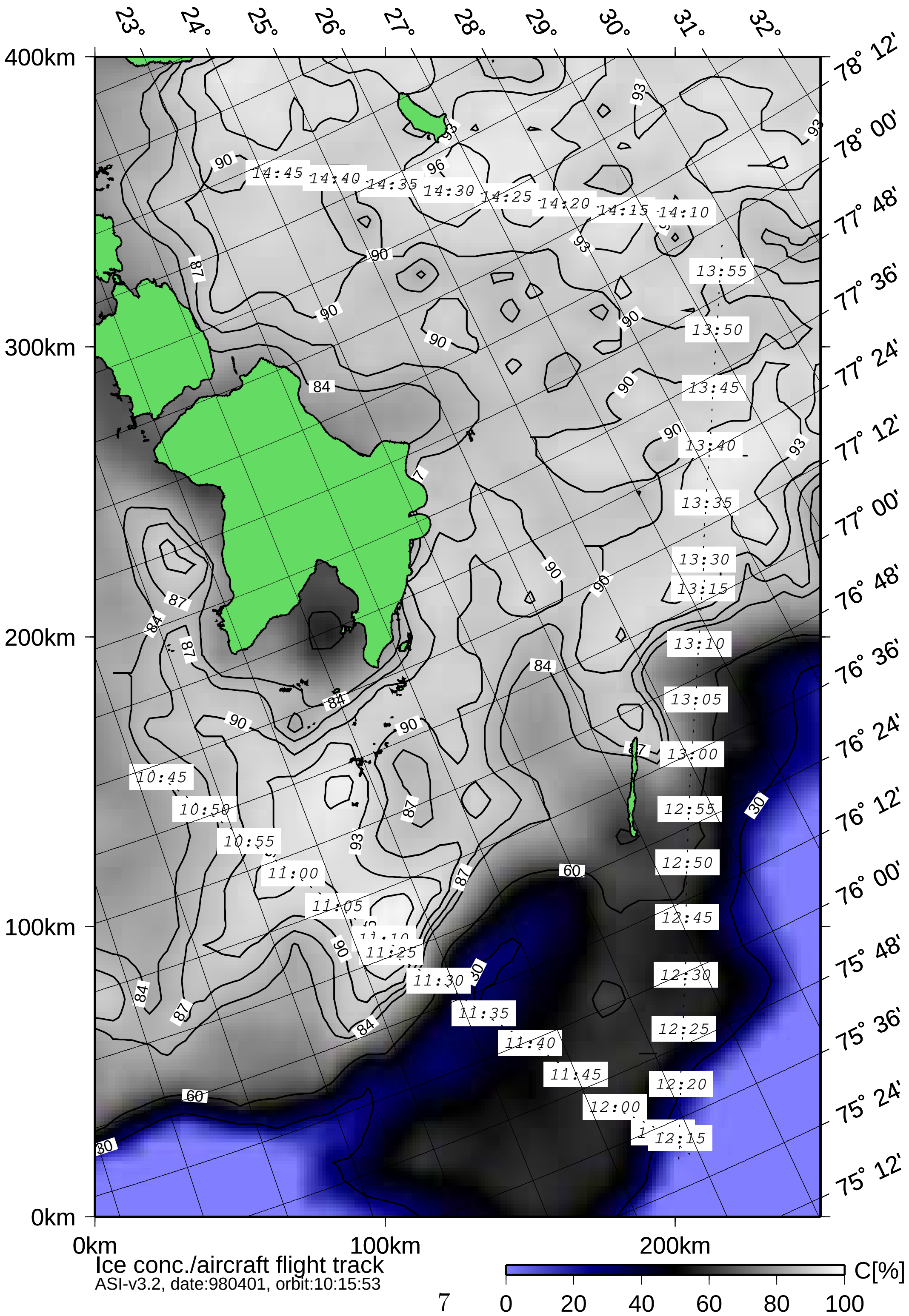

Abbildung 2: Flugroute des AWI-Forschungsflugzeuges POLAR-4 mit den dual polarisierten Mikrowellenradiometern an Bord. Eiskonzentrationen berechnet mit dem ASI Algorithmus sind farbkodiert und mit Isolinien dargestellt. Die Inseln Barentsøa und Edgeøa, welche zum Svalbard-Archipel gehören, sind grün maskiert.

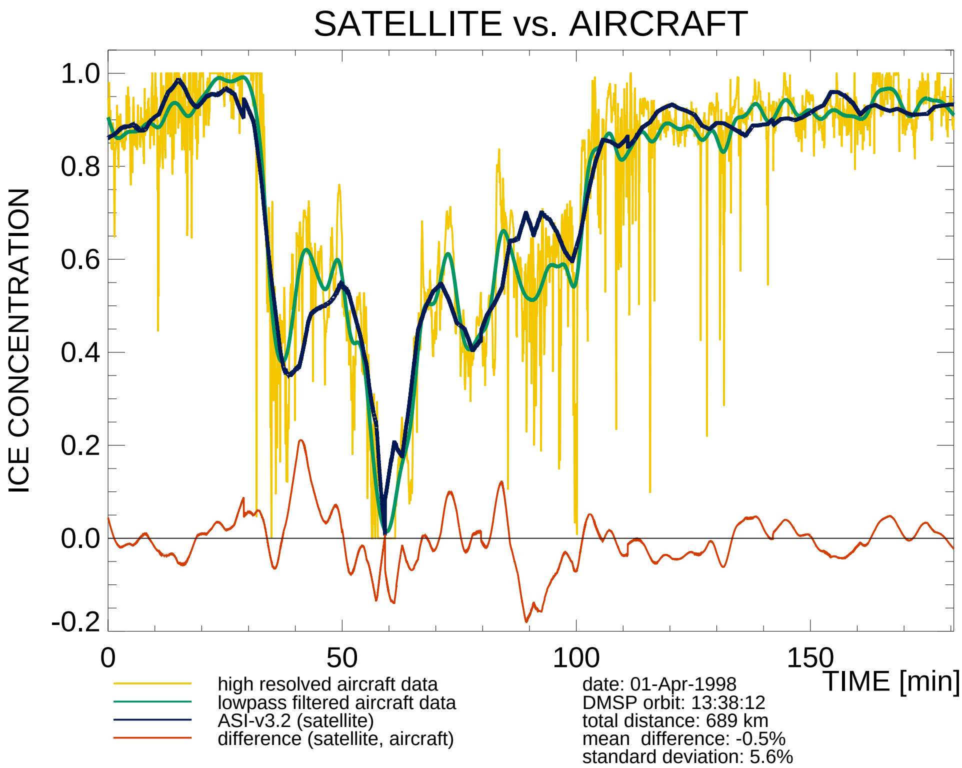

Abbildung 3: Eiskonzentrationen berechnet aus Flugzeugdaten mit dem NTA und aus Satellitendaten mit dem ASI Algorithmus. Die hochaufgelösten Flugzeugmessungen wurden mit einem Tiefpaß gefiltert, um eine zum SSM/I 85 GHz-Kanal vergleichbare Auflösung zu erzielen. Die zugehörige Flugroute ist in Abbildung 2 dargestellt. Die gesamte Zeitreihe setzt sich aus sieben Abschnitten zusammen, die durch Kalibrationen unterbrochen wurden. Die einzelnen Abschnitte sind im folgenden: 10:43 bis 11:12, 11:24 bis 11:45, 11:59 bis 12:08, 12:12 bis 12:33, 12:44 bis 13:16, 13:26 bis 13:57 und 14:09 bis 14:47. Die Position des Flugzeuges zu diesen Meßzeiten sind auch der Abbildung 2 zu entnehmen.

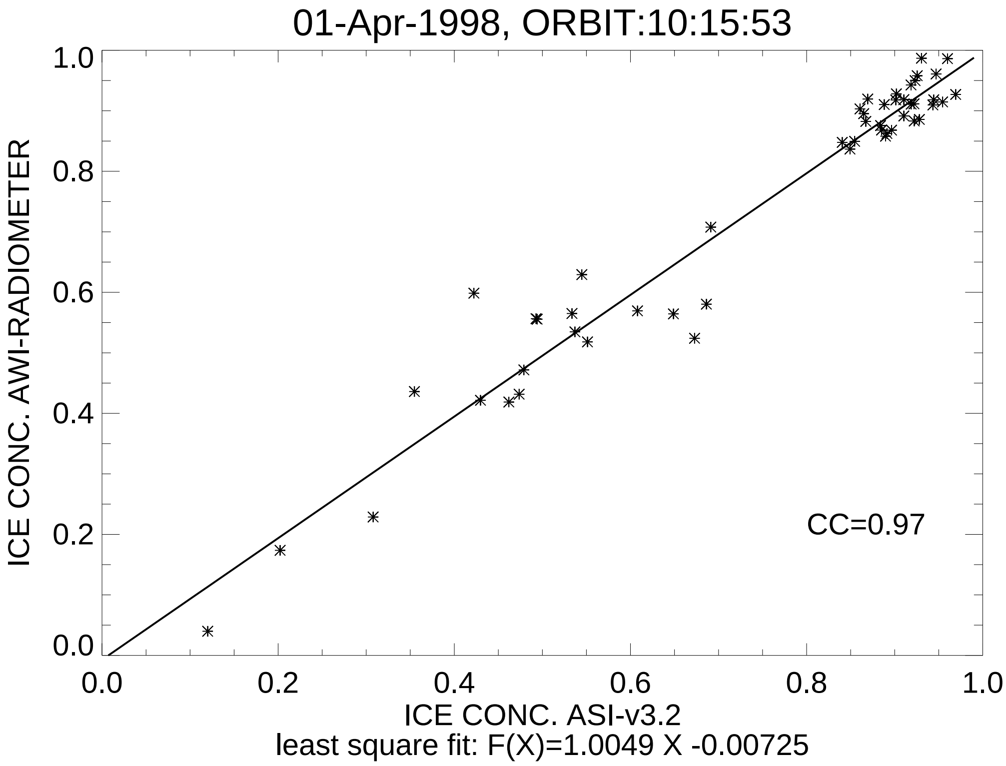

Abbildung 4: Streudiagramm der Flugzeug und Satellitenmessungen. Jeder Punkt repräsentiert eine Eiskonzentration gemittelt über eine angemessene Flugstrecke und die räumlich zugeordnete Eiskonzentration, abgeleitet aus Satellitendaten.

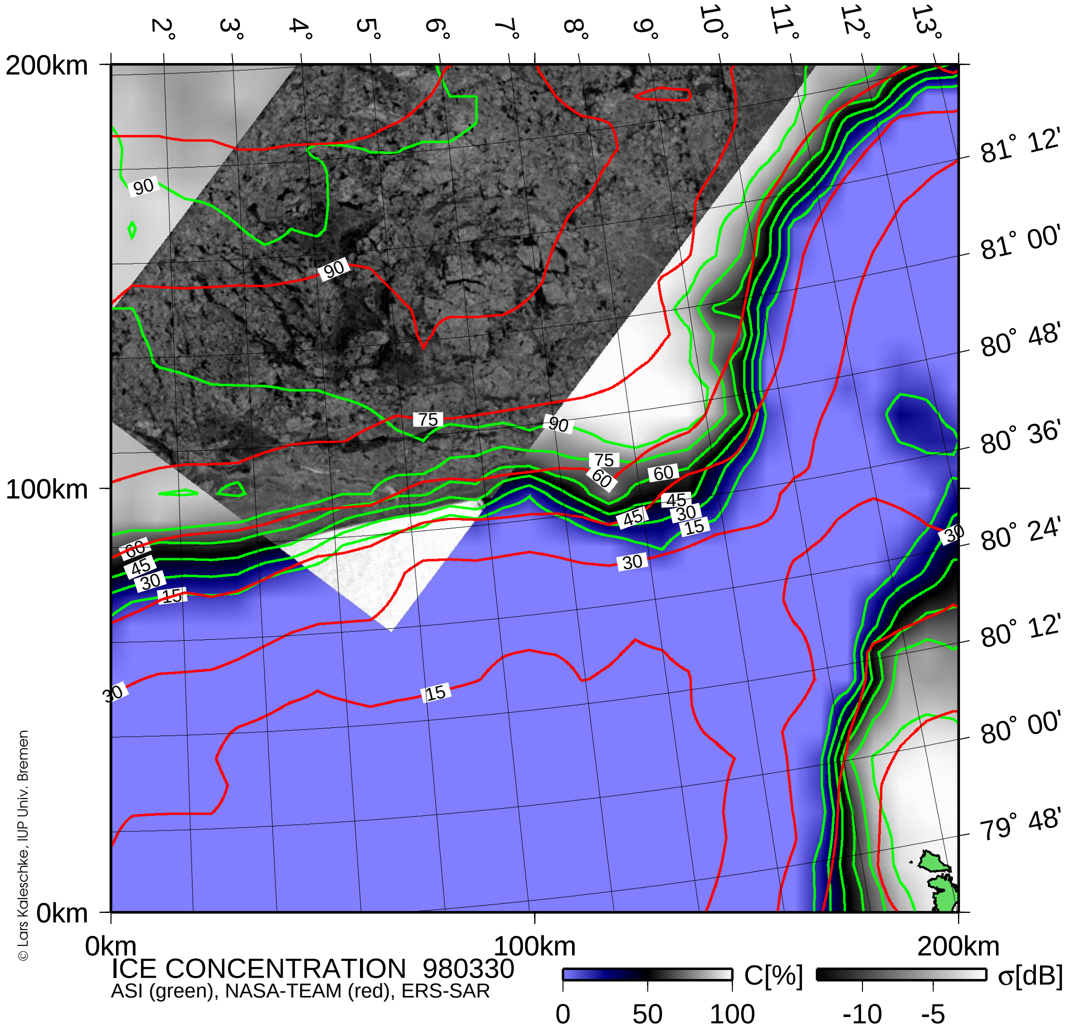

Abbildung 5: Kompakte Eiskante am 30. März 1998, nordwestlich von Spitzbergen. ERS-SAR Bilder und Eiskonzentrations-Isolinien berechnet mit ASI (grün) und NTA (rot).

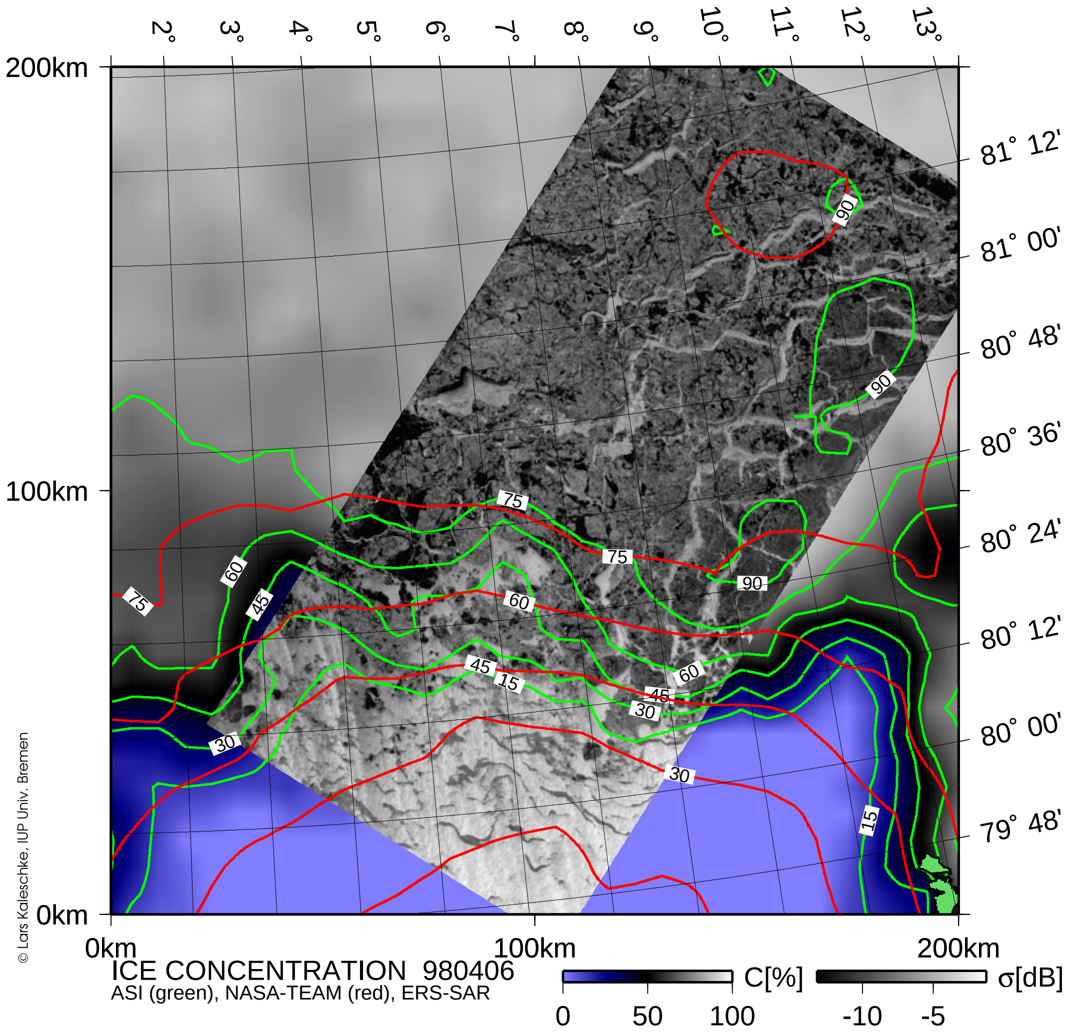

Abbildung 6: Diffuse Eiskante am 6. März 1998, gleicher Ausschnitt wie Abb. 5. ERS-SAR Bilder und Eiskonzentrations-Isolinien berechnet mit ASI (grün) und NTA (rot).

5 ERS-SAR

Die ESA bietet die Bilddaten des ERS-SAR als unterschiedliche Produkte an. Das PRI-Format (Precision Processed Image) ist das Standard-Format für die radiometrische Analyse.

Beim PRI-Format sind die einzelnen Meßdaten bezüglich der technischen Systemparameter (Korrektur der Antennenausleuchtung, Kompensation der Verluste in Entfernungsrichtung) bis auf einen Kalibrationsfaktor $K(\alpha)$ korrigiert. $K(\alpha)$. Für verschiedene Winkel errechnet sich dieser Faktor nach [Laur, 1998] aus:

$$K(\alpha) = K_{ref} \frac{\sin(\alpha_{ref})}{\sin(\alpha)}. \tag{3}$$

Der Faktor K_{ref} ist für den mittleren Einfallswinkel von $\alpha_{ref} = 23^\circ$ gültig. Der Einfallswinkel α berechnet sich aus der Aufnahmegeometrie.

Die Beziehung zwischen der gemessenen mittleren Intensität $\bar{I}$, berechnet aus

$$\bar{I} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} d(i)^2, \tag{4}$$

und dem mittleren Rückstreukoeffizienten σ^0 lautet:

$$\bar{I} = K(\alpha)\sigma^0. \tag{5}$$

wobei $d(i)$ der Wert des Bildpunktes mit dem Index i ist. Es muß eine große Anzahl N (mehr als 500) Bildpunkte bei der Mittelwertbildung berücksichtigt werden, um einen statistisch sicheren Schätzwert (99% Wahrscheinlichkeit für Fehler kleiner als $\pm 0,5$ dB) für $\bar{I}$ zu erhalten [Drinkwater, 1998].

Der Rückstreukoeffizient σ^0 weist im Allgemeinen eine weitere Einfallswinkelabhängigkeit auf, die bei oben beschriebener Kalibration nicht berücksichtigt werden kann. Diese Abhängigkeit ist eine Materialeigenschaft. Bochert weist darauf hin, daß diese Abhängigkeit berücksichtigt werden sollte, um die Klassifikation von ERS-SAR Daten zu verbessern [Bochert, 1996].

Ein sehr lineares Verhalten der Radar Rückstreuung als Funktion des Einfallswinkels (von 20° bis 60°) wurde von Gohin und Cavanie beobachtet

[Gohin, 1994]. Der normierte Radarrückstreukoeffizient σ^0 kann daher als lineare Funktion beschrieben werden:

$$\sigma^0(\alpha) = A + B(\alpha - 23^\circ). \tag{6}$$

Die Winkelabhängigkeit B wird im folgenden auch *Slope Index* genannt. Der Slope Index kann auf verschiendene Weise bestimmt werden. Voraussetzung ist dafür eine Messung des von der zu untersuchenden Oberfläche zurückgestreuten Signals unter verschiedenen Einfallswinkeln. Diese Messung kann im Labor oder vom Schiff aus direkt durchgeführt werden [Onstott, 1992].

Auch vom Satelliten aus kann direkt der Slope Index bestimmt werden, z.B. mit Hilfe eines Scatterometers, welches die Oberfläche unter verschiedenen Blickwinkeln vermißt [Long, 1999].

Leider liefern die verschiedenen Methoden auch verschiedene Ergebnisse, hauptsächlich wegen der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der Messungen [Thomas, 1998]. Es wäre daher wünschenswert, den Parameter direkt aus einem ERS-SAR-Bild bestimmen zu können. Dieses ist direkt nicht möglich, da jedes Pixel unter nur einem bestimmten Einfallswinkel vermessen wurde.

Für ganz bestimmte Gebiete, wo sich die aufsteigenden und des absteigenden Äste des ERS-Orbits kreuzen, gibt es jedoch SAR-Bildpaare, die zeitlich nahe beeinander liegen und eine nahezu orthogonale Blickrichtung des Sensors aufweisen (siehe Abb. 7). Dort gibt es für jeden Punkt am Boden Messungen unter zwei unterschiedlichen Einfallswinkeln.

Das Bildpaar aus Abbildung 7 wurde zur Bestimmung des Slope Index herangezogen. In dem dargestellten Bereich nördlich von Spitzbergen bildet eine kompakte Eiskante den Übergang vom Ozean zum Meereis im Norden. Das Meereis wurde durch südlichen Wind kompaktiert und die Eiskonzentration beträgt nördlich der Eiskante nahezu 100%.

Es wird angenommen, daß ein Gradient in der Zusammensetzung der Meeresoberfläche aus verschienden Eistypen durch ein Profil in Flugrichtung des ERS gegeben ist. Für diese Richtung werden alle Pixel einer Bildspalte unter dem gleichen Einfallswinkel vermessen. Ein Profil, welches in dem einen Bild in Flugrichtung verläuft, ist in dem anderen Bild in Blickrichtung orientiert (Abb. 7). In Blickrichtung variiert der Einfallswinkel von 19,35° am linken Bildrand (*near range*) bis zu 27,5° am rechten Bildrand (*far range*). Der Slope Index B (Gleichung 6) errechnet sich aus der Differenz der Steigung von zwei Profilen durch beide Bilder:

$$B = -(0,3 \pm 0,1)\frac{\mathrm{dB}}{\mathrm{deg}} \tag{7}$$

Dieses Ergebnis stimmt qualitativ mit theoretischen Untersuchungen von Dierking [1992] überein. Das Ergebniss stimmt auch gut mit in-situ Scatterometermessungen überein, Onstott berichtet von Werten des Slope Indexes für erstjähriges Eis im Winter, die von $-0,77$ bis $-0,17$ dB/deg variieren [Onstott, 1992].

Eine Einbeziehung dieser Abhängigkeit in das zu entwickelnde Verfahren zur Meereisklassifikation aus ERS-SAR Bildern sollte ermöglichen, Ambiguitäten aufzulösen. Die maximale Winkeldifferenz beträgt etwa,

$$\Delta\alpha \approx 7.15^\circ \tag{8}$$

daraus ergbit sich eine maximale Differenz des Rückstreukoeffizienten $\Delta\sigma^0$

$$\Delta\sigma^0 \approx 2,15\,\mathrm{dB} \tag{9}$$

Was bedeutet dies nun für die Klassifikation? Nach Bochert [1996] beträgt der Rückstreukoeffizient σ^0 für mehrjähriges Eis etwa

$$\sigma^0(MY) = (-7,1 \pm 1,5)\,\mathrm{dB}, \tag{10}$$

und der Rückstreukoeffizient σ^0 für erstjähriges Eis (dünnes und mitteldickes) etwa

$$\sigma^0(FY) = (-10,5 \pm 1,8)\,\mathrm{dB}. \tag{11}$$

Die ermittelte maximale Differenz im Rückstreukoeffizienten $\Delta\sigma^0 \simeq 2,15$ dB kann also eine Verschmelzung der beiden Vertrauensbereiche hervorrufen. Die Winkelabhängigkeit sollte also berücksichtigt werden, um Fehlklassifikationen zu vermeiden.

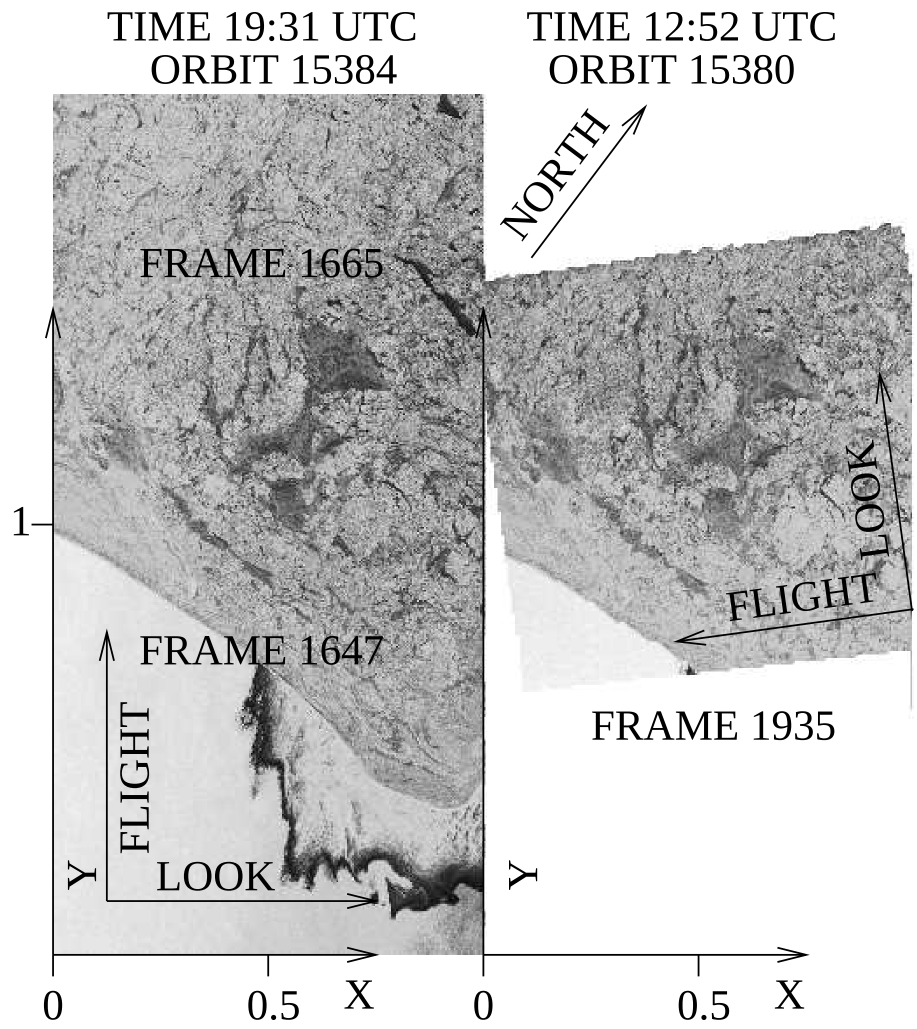

Abbildung 7: ERS-SAR Bilder vom 30.3.1998 aufgenommen im Kreuzungspunkt des aufsteigenden und des absteigenden Ast des ERS-Orbits.

Literatur

Bochert, A. Klassifikation von Radarsatellitendaten zur Meereiserkennung mit Hilfe von Line-Scanner-Messungen, *Berichte zur Polarforschung* , Nr. 209, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1996

Cavalieri, D. J., Crawford, J. P., Drinkwater, M. R., Eppler, D. T., Farmer, L. D., Jentz, R. R., Wackerman, C. C. Aircraft active and passive microwave validation of sea ice concentration from the Defense Meteorological Satellite Program special sensor microwave imager, *J. Geophys. Res.*, 96(C12), 21989-22008, 1991

Dierking, W. Sensitivy Studies of Selected Theoretical Scattering Models with Applications to Radar Remote Sensing of Sea Ice, *Berichte aus dem Fachbereich Physik*, Report 33, Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung, Bremerhaven, 1992

Drinkwater, M. R. Satellite Microwave Radar Observations of Antarctic Sea Ice, in Tsatsoulis C. und R. Kwok (Ed.),*Analysis of SAR Data of the Polar Oceans*, Springer, Berlin, 1998

Gohin F., Cavanie A. A first try at identification of sea ice using the three beam scatterometer of ERS-1, *International Journal of Remote Sensing*, 15:1221-1228, 1994

Kern S., Heygster G. Sea ice concentration retrieved in the Antarctic based on the SSM/I 85.5 GHz polarization, *Submitted to Annals of Glaciology*, 2000

Laur H., Bally P., Meadows P., Sanchez J., Schaettler B., Lopinto E., Esteban D. ERS SAR CALIBRATION Derivation of the Backscattering Coefficient Sigma-Nought in ESA ERS SAR PRI Products, *ESA Document No: ES-TN-RS-PM-HL09 7 September 1998 Issue 2, Rev.5b*, ESA, 1998

Long D. G., Drinkwater M. R. Cryosphere Applications of NSCAT Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3):1671-1684, 1999

Lubin, D., Garrity, C., Ramseier, R., Whritner, R. H. Total sea ice concentration retrieval from the SSM/I 85.5 GHz channels during the Arctic summer, *Remote Sensing of Environment*, 62:63-76, 1997

Onstott R. G. SAR and Scatterometer Signatures of Sea Ice, in Carsey ,F. D. (Ed.), *Microwave remote sensing of sea ice*, AGU, 1992

Steffen, K., Key J., Cavalieri D. J., Comiso J., Gloersen P., St. Germain, K., Rubinstein, I. The estimation of geophysical parameters using passive microwave algorithms, in Carsey ,F. D. (Ed.), *Microwave remote sensing of sea ice*, AGU, 1992

Svendsen, E., Mätzler, C., Grenfell, T. C. A model for retrieving total sea ice concentration from a spaceborne dual-polarized passive microwave instrument operating near 90 GHz *International Journal of Remote Sensing*, 8(10):1479-1487, 1987

Thomas, M. Untersuchungen zur Dynamik und Thermodynamik von Rinnen im Meereis des Weddelmeeres mittels SAR-Daten *Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover, Band 56*, Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover, 1998