

**Antarktisches Meereis**  
**Vergleichende Betrachtung von Modell- und Satellitendaten**  
**und daraus erkennbare Entwicklungen**

Bachelor-Arbeit  
im Bachelorstudiengang (B.Sc.), Physik der Erdsystems -  
**Meteorologie, Ozeanographie, Geophysik**  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von  
Madeleine Freund  
Matrikelnummer: 908908

Erstgutachter/in: Dr. rer. nat. Markus Scheinert

Zweitgutachter/in: Dr. rer. nat. Torge Martin

Kiel im Juli 2010



## 1.1 Zusammenfassung

Bei der Untersuchung inwieweit die Modelldaten die Satellitenbeobachtungen wiedergeben, wurden zwei Modellexperimente, die die antarktische Meereisbedeckung möglichst realistisch wiedergeben sollen, mit Satellitendaten der NASA von SSMI/SMMR verglichen.

Dabei konnten Aussagen darüber getroffen werden, wie gut die Modelle die Realität widerspiegeln. Bei genauen Betrachtungen gehen die Ergebnisse von Modell- und Satellitendaten zum Teil stark auseinander. Zu diesen gehört die zeitliche Auflösung einzelner Monate, bei der vor allem die maximale und minimale Meereisfläche abweichen und die exaktere Analyse der fünf Regionen, in die die Antarktis unterteilt wurde. Es sind vor allem im Bereich des west-pazifischen Ozeans und der Bellingshausen und Amundsen Seas deutliche Abweichungen zu verzeichnen. Die Gebiete der Tiefenwasserbildung, Weddell- und Ross- Sea, werden sehr gut wieder gegeben und auch für die Gesamtantarktis liefern die Modelle hinreichend gute Ergebnisse.

Entgegen der weit verbreiteten Annahme, die antarktische Meereisfläche nähme zu, haben die Analysen der Meereisentwicklung gezeigt, dass ausschließlich die letzten Jahrzehnte, seit denen es Satellitenmessungen gibt, eine Zunahme der Meereisfläche verzeichnen, während über die letzten 50 Jahre eher eine Abnahme statt fand. Darüber hinaus wurde deutlich, dass das antarktische Meereis durch sehr starke Schwankungen geprägt ist, die vor allem seit Mitte Ende der siebziger Jahre auftreten und demzufolge zum Teil kaum einen Trend erkennen lassen.

Für das Geschehen in den Ozeanen der Erde könnte diese Entwicklung von großer Bedeutung sein, denn die Wechselwirkungen zwischen Eis und Meer spielen eine wichtige Rolle. An den Polen, wird über die Abgabe der am Äquator aufgenommenen Wärme, der gesamte Strahlungshaushalt des Planeten balanciert.

Ein besonders wichtiger Aspekt des Wärmeaustausches zwischen Ozean und Atmosphäre ist verbunden mit der, in der Weddel-Sea und Ross-Sea stattfindenden, Tiefenwasserbildung. Diese ist ein wichtiger Teil der meridionalen Umwälzbewegung (MOC).

Darüber hinaus bleibt herauszufinden, ob nicht auch Wechselwirkungen mit der Atmosphäre z.B. mit Temperaturänderungen oder mit Phänomenen, die globale Auswirkung haben, wie mit El Niño Southern Oszillation (ENSO) und dem Southern Annular Mode (SAM) bestehen.

## 1.2 Abstract

During the research how far model data is showing the satellite views, there have been compared two model experiments, which are intent to show the antarctic Sea-Ice coverage in a most realistic way, with satellite data from NASA's SSMI/SMMR.

In doing so could make conclusions about how good the models are mirroring the reality. In detail the results between model- and satellite data differ partly a lot. Belonging to this the temporal resolution of single months, where mainly the maximum and minimum Sea-Ice-Area vary, and the more exact examination of the five regions in which the antarctic has been split. There are mainly differences in the west pacific Ocean and the Bellingshausen and Amundsen Seas. The regions, where deep water formation happens, Weddell- and Ross-Sea are reflect very good and for the whole Antarctic the models yield adequate results, too.

Contrary to the general opinion, the antarctic Sea-Ice-Area is growing, the analysis of the Sea-Ice-development showed, that exclusively the last decades, since there are satellite measurements, the Sea-Ice-Area is growing but during the last 50 years there is a rather decrease. Further more it becomes clear, that the antarctic Sea-Ice is embossed of very strong variations, which occur since mid end of the seventy years and partly a trend is little-noticed.

This development could be very fundamental for the events in the oceans, because the interactions between Sea-Ice and ocean is playing an important role. In the polar regions the whole radiation budget of the planet is balanced about the release of the heat, which was taken up at the equator. A especial weighty aspect of the heat exchange between ocean and atmosphere is linked with the, in the Weddell- and Ross-Sea happen, deep water formation, which is an important part of the meridional overturning circulation (MOC).

Moreover reside to discover, if there are atmospheric interactions par example with changes in temperature, too or with phenomena, which have global consequences like El Niño Southern Oscillation (ENSO) and the Southern Annular Mode (SAM).

## 2. Einleitung

Die mittleren bis hohen Breiten der Südhemisphäre stellen noch immer einen kritischen, blinden Fleck unseres Verständnisses des globalen Klimasystems dar [14].

Das antarktische Meereis hat, durch seine Wechselwirkungen, für viele Komponenten des Erdsystems eine wesentliche Bedeutung, wie wir im folgenden sehen werden.

Am Südpol spielen die thermodynamischen Prozesse des Eises eine besondere Rolle. Das antarktische Festland umschließt das Eis nicht, sondern ist davon Umgeben – im Gegensatz zur Arktischen Situation – so dass das Eis unter dem Einfluss verschiedenster Kräfte, z.B. von Wind und Strömungen, eher davon driftet und schmilzt oder durch weitere Gefrierprozesse wächst [3]. Dementsprechend kann das Meereis vor allem auf Zeitskalen von Tagen bis wenigen Jahren wirken [2]. Wesentlich dabei ist die Isolation des Ozeans von der Atmosphäre, welche die Eisdecke zwischen Beiden verursacht. Unter diesen Umständen ist kein direkter Impuls- und Energie-Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre möglich.

Eine Änderung der Eisbedeckung hat damit wesentlichen Einfluss auf dem Austausch von Wärme, Frischwasser und Spurengasen.

Eine besondere Rolle spielt des Meereis bei der Tiefenwasserbildung der Antarktis, wie sie vorrangig in der Weddell- und Ross-Sea vorkommt. Man unterscheidet dabei zwei Formen, die eine findet in den „coastal“ Polynyas und die andere in den „open ocean“ Polynyas statt.

In den eisfreien Flächen mitten im Packeis, den open ocean Polynyas, wird das Meerwasser durch die Atmosphäre abgekühlt, wird dichter und sinkt nach unten. Anschließend wird es durch wärmeres Wasser ersetzt, das durch die entstandene Konvektionsbewegung nach oben gebracht wird und das Polynya eisfrei hält.

In den eisfreien Gebieten vor der antarktischen Küste, den coastal Polynyas, weht der vom Festland kommende kalte Wind neu gebildetes Meereis ständig von der Küste weg und nimmt dabei viel Wärme auf, so dass der sich abkühlende Ozean ständig neues Eis bildet.

Beim Gefrieren des Meerwassers gefriert nur der Süßwasseranteil, so dass das gelöste Salz in das unter dem Eis liegende kalte Meerwasser gedrängt wird oder als Salzlake aus Einschlüssen im Eis dorthin austritt. Dieses kalte Wasser wird salzreicher und damit sehr dicht. Es sinkt nach unten, fließt die Schelfkante hinunter und bildet, zusammen mit dem durch Konvektion in die Tiefe gebrachten Wasser der open ocean Polynyas, das Antarktische Bodenwasser (AABW) als einen wichtigen Teil der MOC.

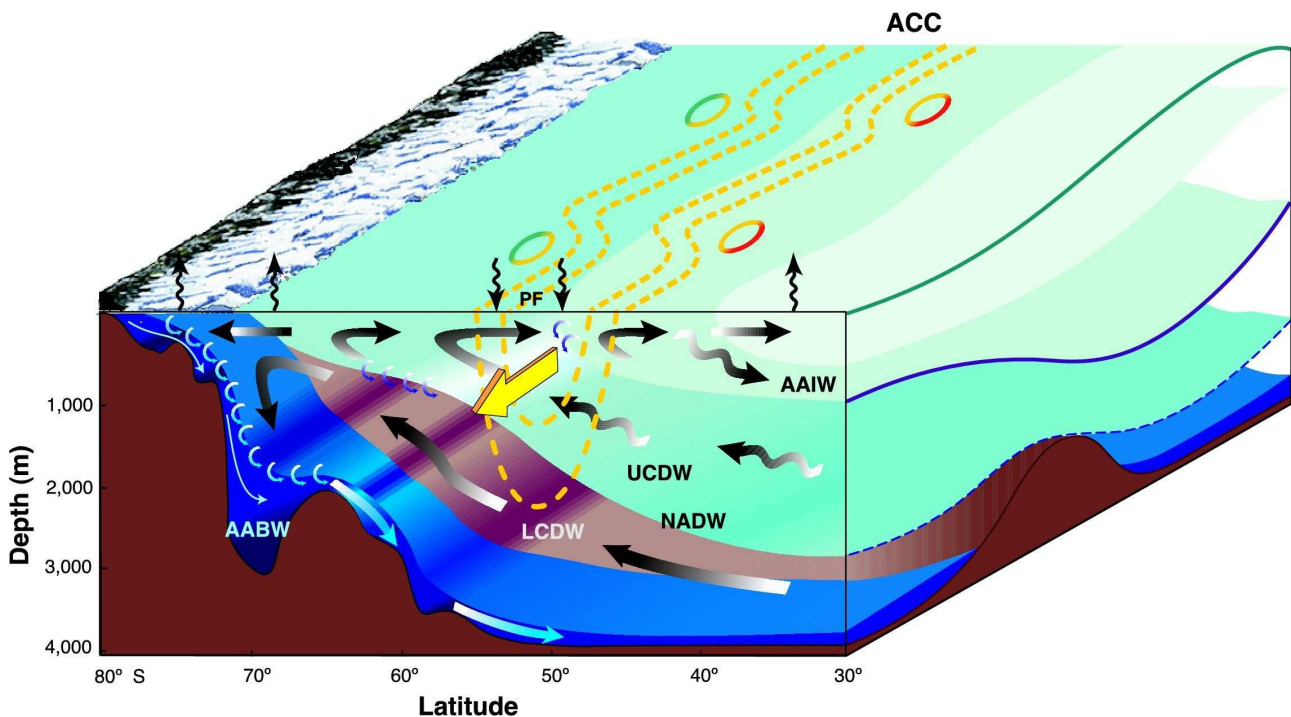


Abb. 1: Schematische Darstellung der MOC im Bereich der Antarktis

Quelle: <http://dimes.ucsd.edu/>

mit den Wassermassen: Antarktisches Intermediate Water (AAIW), Upper Circumpolar Deep Water (UCDW), North Atlantic Deep Water (NADW) und Lower Central Deep Water (LCDW)

Das antarktische Bodenwasser kommt in allen tiefen Becken der südlichen Hemisphäre vor, im wesentlichen entlang der westlichen Ränder, reicht aber sowohl im Pazifik als auch im Atlantik beachtlich weit in die nördliche Hemisphäre. Die kälteste und frischeste Form des AABW bildet sich in der Weddell-Sea, während die Wärmste und Salzreichste der Ross-Sea entstammt [12]. Besonders in der Weddell-Sea und Ross-Sea könnte eine Veränderung der Meereisbedeckung also weitreichende Folgen haben.

Im allgemeinen geht man aktuell davon aus, dass die Eisbedeckung in der Arktis abnimmt und in der Antarktis eine Zunahme verzeichnet, wie es von Cavalieri und Parkinson 2008 ([1] und [5]) dargelegt wurde. Zhang [11] beschäftigte sich darüber hinaus mit der Frage, wie es zu einer Zunahme der antarktischen Meereisfläche kommen kann, wenn ansteigende Oberflächen-Temperaturen sowohl des Meeres, als auch der Atmosphäre beobachtet werden. Seine Vermutung ist eine Abschwächung der antarktischen Tiefenwasserbildung, so dass weniger Konvektionswärme das Eis schmelzen kann.

Die Ergebnisse des IPCC-Berichtes von 2007 sind etwas verhaltener, deuten aber in eine andere Richtung. Dort ist zu lesen, dass es Anhaltspunkte einer Abnahme der antarktischen Eisfläche in einigen Regionen gibt aber zu wenig Daten aus der „Vor-Satelliten-Zeit“ vorhanden seien, um dies sicher zu sagen. Denn erst die mit Mikrowellen messenden Satelliten ermöglichen eine kontinuierliche Beobachtung der Antarktischen Meereisbedeckung [13].

Mit Hilfe der Satelliten kann die Eisbedeckung der kompletten Antarktis beobachtet werden aber

die so erhobenen Zeitserien reichen nur bis 1978 zurück.

Mit Hilfe von Modellen besteht die Möglichkeit Zeitserien zu produzieren, an denen auch Langzeitbetrachtungen (bzw. zumindest langfristige Betrachtungen) möglich sind. Aus einer solchen Analyse erhält man z.B. Trends über einen vergleichsweise langen Zeitraum, dessen Aussagekraft für die Zukunft deshalb höher sein kann, als die eines Trends von Satellitenbeobachtungen.

Voraussetzung dafür ist, dass das Modell möglichst realitätsnahe Werte liefert.

Im Zuge der Diskussion zum und um den Erdsystemwandel stellt sich die Frage nach der Relevanz von Schwankungen und Änderungen im Meereis, deren Auswirkungen und deren möglicherweise anthropogenen Ursachen.

Das Ziel dieser Arbeit ist nun ein Vergleich zwischen Modell- und Satellitendaten.

Dabei soll darauf eingegangen werden inwieweit die jeweiligen Daten räumlich und zeitlich auf einander abgestimmt bzw. wo gravierende Unterschiede zu erkennen sind.

Ferner werden einige vergleichende Analysen über das Meereis durchgeführt, deren Ergebnis eine Aussage über die Entwicklung des Eises in der Antarktis sein soll.

Weiterführende Auswertungen, bei denen diese Entwicklung im Zusammenhang mit anderen Systemkomponenten betrachtet werden, sind im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, können aber durch weitere Arbeiten auf diese aufgebaut werden.

Von Interesse ist dabei besonders, ob und wie sich die Tiefenwasserzirkulation aufgrund der Eisbedeckung ändert.

Auch Wechselwirkungen mit der Atmosphäre sind wahrscheinlich. So könnte z.B. das Ozonloch Ursache oder Folge einer Änderung der Meereisbedeckung sein.

In den folgenden Abbildungen ist sowohl die Abnahme der Ozonkonzentration, vor allem seit 1975, als auch die Zunahme der Ozonlochfläche deutlich zu sehen.

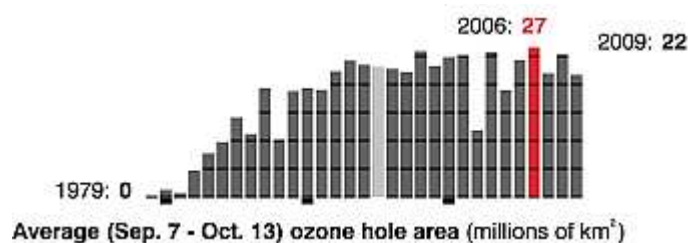
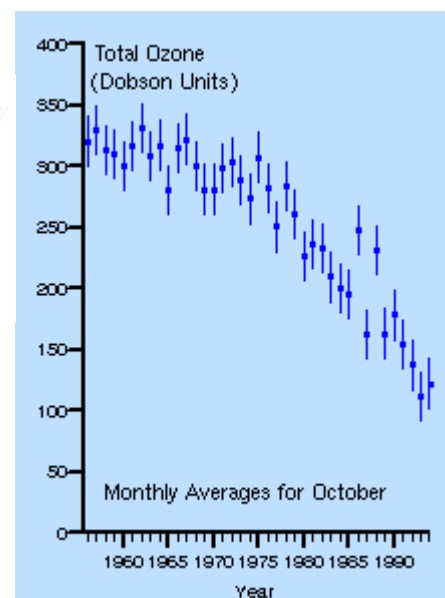


Abb. 2: oben: Entwicklung der mittleren Ozonlochfläche von 1979 bis 2009  
rechts: Entwicklung der mittleren Ozonkonzentration von 1952 bis 1998 [7]



Ist weniger Ozon vorhanden, wird in der Stratosphäre weniger Wärme aufgenommen, so dass sich Änderungen der Temperatur in Stratosphäre und Troposphäre sowie in den Wind- und Druckfeldern über der Antarktis ergeben können, welche wiederum mit dem Meereis Wechselwirken könnten. Es handelt sich beim Ozonloch und dessen Auswirkungen allerdings um noch sehr unerforschte Phänomene, dessen genaue Prozesse noch nicht geklärt werden konnten.

Darüber hinaus vermuten Visbeck & Hall auch einen Zusammenhang der Veränderungen im Meereis mit dem Southern Annular Mode (SAM) [14] und Kwok & Comiso einen weiteren mit der Southern Oszillation [15]. Möglicherweise unterliegt das antarktische Meereis auf Grund dieser Wechselwirkungen überhaupt keinem eindeutigen Trend sondern einer langfristigen Schwankung. Im folgenden werden wir uns die Daten und Methoden ansehen mit denen die Ergebnisse erarbeitet werden.



### 3. Daten und Methoden

Als Grundlage der Arbeit sind drei Datensätze bereitgestellt worden, von denen zwei aus Modellläufen und einer von Satellitenbeobachtungen stammt.

Die zum Vergleich mit den Modelldaten verwendeten Satellitendaten waren GSFC-Daten. Sie stammen vom NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) und wurden durch passive Mikrowellen vom SMMR/SSM/I erfasst ([gsfc.nasateam.month.extent.1978-2007.s](http://gsfc.nasateam.month.extent.1978-2007.s), [gsfc.nasateam.month.area.1978-2007.s](http://gsfc.nasateam.month.area.1978-2007.s) [d]).

Diese enthalten monatliche Mittelwerte, über einen Zeitraum von November 1978 bis Dezember 2007, also 29 Jahre. Sie enthalten Angaben in Quadratkilometern über die Meereisfläche und den Eisextent der Antarktis. Bei letzterem handelt es sich um die mit Meereis bedeckte Fläche vom Festland bis zur äußeren Eiskante, definiert durch eine Minimum-Eiskonzentration von 15%. Neben Angaben für die gesamte Antarktis enthalten die Werte eine räumliche Unterteilung in die fünf Regionen: Weddell-Sea, Bellingshausen und Amundsen Seas (im folgenden auch BellAm genannt), Ross-Sea, west-pazifischer Ozean und indischer Ozean. Diese sind wie in Abb. 3 gezeigt.

Im Hinblick auf die spätere Auswertung wird nur die tatsächlich vom Meereis bedeckte Fläche verwendet, weil in ihr auch die, für die Tiefenwasserbildung so wichtigen, Polynyas erfasst sind, während das Eisextent innerhalb der Grenzen eine geschlossene Eisdecke annimmt.

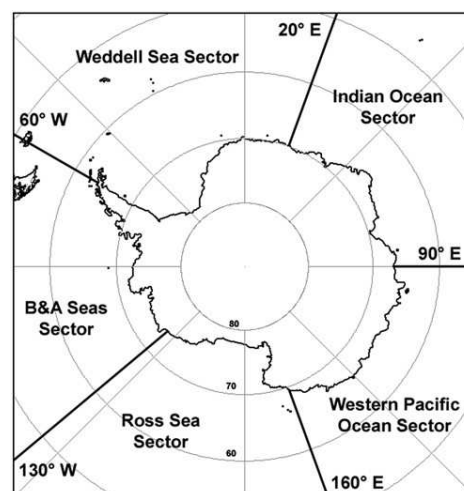


Abb. 3: Karte mit der Einteilung der verschiedenen Regionen [5]

Die Grundlage des Modell-Codes ist das Ozean-Meereis-Modell NEMO.

Die zur Analyse verwendeten Modelldatensätze stammen aus den beiden Hindcast-Experimenten KAB042 und KAB109. Dabei handelt es sich um Experimente, in denen versucht wird, den Ozean mit seinen Wassermassen und Strömungen möglichst realistisch für die letzten 50 Jahre zu simulieren. Dazu wurde ORCA05, d.h. ein tripolares Gitter mit einer Auflösung von einem halben Grad, verwendet, bei dem ein Pol am tatsächlichen Südpol liegt, und zwei weitere auf der Nordhemisphäre über Nordkanada und Sibirien.

Der Unterschied der beiden Experimente besteht im atmosphärischen Antrieb. Da es sich um ein „ocean-only“ Modell handelt, mussten diese Antriebe extern vorgegeben werden. Dazu wurden die CORE – Datensätze ([16] und [17]) verwendet.

Für KAB042 wurde die CORE-Version 1 verwendet. Mittlerweile ist bekannt, dass der

Süßwassereintrag dieses Datensatzes zu hoch eingeschätzt wird. Deshalb wurde eine dreidimensionale Korrektur des Salzgehaltes notwendig. Dabei wurde die Wassersäule alle 180 Tage an die Levitus – Klimatologie WOA98 angepasst, was dazu führt, dass Schwankungen und Trends in den Wassermassen polarer Gebiete stark gedämpft werden.

Für KAB109 wurde die CORE–Version 2 verwendet. Diese ist an einen aktuelleren Stand der Beobachtungen angepasst. Darüber hinaus wurden die Werte für den Niederschlag aus dem DSF3-Datensatz [18] eingearbeitet. In Folge dessen ist hier nur eine Korrektur des Oberflächensalzgehaltes notwendig, um eine Salzdrift zu verhindern. Dabei wird der Salzgehalt in den polaren Gebieten jeden Monat und in den anderen jedes Jahr an die Klimatologie angepasst. Die Daten liegen als Monatsmittel bei KAB042 über einen Zeitraum von 1958-2000, also 42 Jahre und bei KAB109 von 1958-2004, über 46 Jahre, vor.

Es sind in KAB042 Angaben über Meereiskonzentration, Eisdicke, Eisproduktion sowie Geschwindigkeitskomponenten des Eises und ferner sind der Niederschlag (Schnee) und die Schneedicke enthalten. Für KAB109 war nur die Meereiskonzentration gegeben.

Aufgrund der später angestrebten Auswertung der Daten für eine Aussage über die Entwicklung der Antarktischen Meereis-Bedeckung wird die Region auf den Südpol, sowie auf die Variable der Eiskonzentration beschränkt.

Um nun die mit Meereis bedeckte Fläche der Antarktis in Quadratkilometern zu erhalten, wird zuerst aus dem verwendeten Gitter die Fläche des Süd-Ozeans berechnet. Dafür wird die meridionale Gitterseite ( $l_1$ ) mit der zonalen ( $l_2$ ) multipliziert und man erhält die Fläche jedes Gitterpunktes in diesem Gebiet. (Bei  $70^\circ\text{S}$  z.B. hat ein Gitterpunkt eine Fläche von  $354,9 \text{ km}^2$ , bei  $65^\circ\text{S}$  eine von  $575,5 \text{ km}^2$ ). Anschließend wird die Landfläche ( $F_L$ ) abgezogen. Multipliziert man nun die Meereiskonzentration ( $K_M$ ) mit der errechneten Fläche, so erhält man die Fläche ( $F_M$ ) in der Meereis vorhanden ist. Kurz zusammengefasst ergibt sich:  $F_M = (l_1 * l_2 - F_L) * K_M$ .

Da die Angaben des Gitters in Metern sind, ergibt sich auch eine Fläche in Quadratmetern, welche durch den Faktor  $10^6$  geteilt wurde, um eine Angabe in Quadratkilometer zu erhalten. Diese Angabe gilt für die Gesamtantarktis. Im nächsten Schritt geht es um die Werte der einzelnen Regionen. Dazu wird die Fläche des Südozeans ungleichmäßig, nach links umlaufend, in folgende fünf Gebiete unterteilt: Weddell-Sea, Bellingshausen und Amundsen Seas, Ross-Sea, west-pazifischer Ozean und indischer Ozean (dargestellt in Abb. 3). Diese Einteilung erfolgt analog zu der, die in den Satellitendaten gegeben ist. Die jeweilige Region wird über die Indizes des Gitters definiert. Analog zu der Meereisfläche für die gesamte Antarktis wird aus der Meereiskonzentration die mit Meereis bedeckte Fläche der einzelnen Regionen errechnet.

Die Daten wurden größtenteils mit „Ferret“ bearbeitet. Für die Korrelationskoeffizienten wurde

jedoch auch „Matlab“ benutzt (Skripte siehe Anhang 1 und 2).

Zuerst wurde die gewählte Größe – vom Meereis bedeckte Fläche – für die Modelldaten, wie oben beschrieben, aus der Eiskonzentration errechnet. Die Ergebnisse wurden vergleichbar für alle drei Datensätze über die Zeit geplottet. Daraus war zu erkennen, dass die Antarktis starke jahreszeitliche Schwankungen von 13 Mio. km<sup>2</sup> aufweist, die eingehendere Betrachtungen aufgrund von Unübersichtlichkeit verhindern.

Als Nächstes wurden die Monate des Jahres über Indizes gesucht. Jeder dieser Monate wurde vergleichend für die drei Datensätze gegen die Jahre aufgetragen. Diese Betrachtung wurde später durch Hinzufügen der einzelnen Trends erweitert.

Wie in den ersten Ergebnissen schnell offensichtlich, zeigten die Satellitendaten eine signifikante Zunahme der Eisfläche im Jahre 1987. Diese ist allerdings nicht auf ein Naturereignis zurückzuführen. Ursache war ein fehlender Wert im Dezember 1987, so dass alle nachfolgenden Monate um einen Index nach vorn rutschten und „versetzt“ aufgetragen wurden. Dieser Wert im Dezember 1987 wurde deshalb mit einem „not-a-number“-Eintrag hinzugefügt, und erzeugt in einigen späteren Darstellungen eine entsprechende Lücke im Graphen aber verfälscht die Daten nicht mehr.

Nun wurden erste Bilder (Maps) erstellt, um einen Einblick in die eisbedeckte Fläche der Antarktis zu erhalten. Dafür wurden die Werte der Eiskonzentration aus KAB042 und KAB109 für den entsprechenden Zeitpunkt bzw. -raum gemittelt und aufgetragen. Letztlich erwiesen sich dabei diejenigen Plots mit polarer Darstellung in deren Zentrum die Antarktis liegt als intuitiver und übersichtlicher. Für einen Vergleich mit den Satellitendaten wurde eine von Cavaliri und Parkinson 2008 erstellte Abbildung [5] verwendet (siehe Abb. 4).

Die Zeitserien der Gesamtantarktis wurden mit „Ferret“ in ASCII-Dateien gespeichert, um in „Matlab“ eingelesen werden zu können. Mit „Matlab“ wurden, durch die Standardfunktion „corrcoef.m“, die Kreuzkorrelationskoeffizienten zwischen der Eisfläche aus den Satelliten- und Modelldaten berechnet. Dafür mussten die Zeitachsen angepasst werden, d.h. die Korrelation gilt nur für den Zeitraum von 1988 bis 2000 in dem tatsächlich für alle drei Datensätze Werte existieren. Eine Korrelation von 1978 bis 2000 ergibt auf Grund des fehlenden Wertes nur „not-a-number“-Ausgaben.

Im weiteren Verlauf wurden (nun wieder mit „Ferret“) mittlere Jahresgänge der drei verwendeten Datensätze erstellt, indem eine Zeitachse mit zwölf Monaten (Januar bis Dezember) definiert wurde, über die die Größen, für jeden Monat gemittelt, aufgetragen sind. Dies wurde sowohl für die Gesamtantarktis, als auch für jede deren Teilregionen durchgeführt. Um ein vergleichbares Ergebnis

zu erhalten beschränken sich diese Mittelungen der Jahresgänge auf den Zeitraum von November 1978 bis Dezember 2000.

Die weitere Analyse ist vor allem auf einen Vergleich der Aussagen über die Entwicklung der Eisbedeckung in der Antarktis ausgerichtet.

Über den Filter „@shn:t“, werden die Daten Tiefpass gefiltert. Es handelt sich um einen Hanning-Box-Filter, dabei wird über den angegebenen Zeitraum  $t$  eine Box erstellt, die über die Zeitreihe geschoben wird und gewichtet filtert. So werden kurzzeitige Veränderungen unbeachtet gelassen. Schnell fiel aber auf, dass bei der Darstellung von echten Langzeitvariabilitäten über 10 Jahre (bei dem kürzeren Datensatz auch schon über 5 Jahre) kaum auswertbare Signale zurückblieben. Auf Grund dessen wurde die Boxbreite des Filters auf 25 Monate gewählt. Dadurch ist die letztendlich gewählte Darstellung für die Größe aller drei Datensätze gleichermaßen möglich, im folgenden Tiefpass gefilterte Zeitserie (TPZeit) genannt. Durch die starken Schwankungen des Jahresganges bleiben jedoch auch saisonale Einflüsse im gefilterten Signal zu erkennen.

Diese Analyse wurde wiederum durch die zugehörigen Trends ergänzt.

Für eine genauere Betrachtung der Trends wurden die drei Datensätze, inklusive der Trends, übereinander gelegt, indem der jeweilige Mittelwert abgezogen wurde. Es ist also eine Anomalie der TPZeit der Meereisfläche zu sehen.

Der beschriebene Prozess wurde sowohl für die Gesamtantarktis als auch für jede Teilregionen durchgeführt. Ferner wurde der Zeitraum in dem die Daten betrachtet werden variiert.

Für den Vergleich zwischen den Satelliten- und Modelldaten wurde der Zeitraum von November 1978 bis Dezember 2000 gewählt. Für eine weiterführende Analyse wurde auch der Zeitraum 1958 bis 2007 dargestellt, denn wie in Kapitel „3. Ergebnisse“ beschrieben werden wird, ist eine Analyse der vollständigen Modellzeitreihen (inklusive Trends) gerechtfertigt.

Im Folgenden werden die daraus entstandenen Ergebnisse dargestellt.

#### 4. Ergebnisse

Jetzt werden die Übereinstimmungen der Modelldaten mit den Satellitendaten für die Gesamtantarktis analysiert. Dazu werden zunächst die Korrelationskoeffizienten, die räumliche Meereisverteilung anhand von Karten, anschließend die mittleren Jahresgänge und die TPZeiten sowie die Anomalie der TPZeit betrachtet.

Im weiteren Verlauf folgen diese Betrachtungen für die einzelnen Regionen.

##### Gesamtantarktis

Um ein formelles Maß für die Übereinstimmung der Daten zu bekommen betrachten wir zunächst die Korrelationskoeffizienten zwischen Satelliten- und Modelldaten von 1988 bis 2000:

der zwischen KAB042 und den Satellitendaten ist  $r=0,16$  und der zwischen KAB109 mit den Satellitendaten ist  $r=0,2$ . Die Datensätze sind also miteinander korreliert.

Wie wir gleich sehen werden sind die drei Datensätze gut aufeinander abgestimmt, oder anders ausgedrückt: die Modelldaten geben die Satellitenbeobachtungen nicht perfekt wieder sind aber eine gute Annäherung daran. Betrachten wir das antarktische Meereis im Vergleich der drei Datensätze nun Schritt für Schritt im Detail.

Die Abb. 4 gibt einen Überblick über die mit Meereis bedeckte Fläche während minimaler (Süd-Sommer, Februar) und maximaler (Süd-Winter, September) Eiskonzentration. Der unterste Teil der Abbildung stammt aus einer Auswertung von SSMI-Satellitendaten durch Cavaliri et al. (2008) [5]. Offenbar unterliegt das antarktische Meereis einem dominanten Jahresgang, in dem im Süd-Winter laut Satellitendaten in der Weddell-Sea und in einigen Buchten entlang der Küste Meereis zurück bleibt, so dass selbiges nie vollständig abschmilzt. In KAB042 bleibt mehr Eis zurück als in KAB109 aber weniger als in den Satellitenbeobachtungen. Auffällig ist, dass in beiden Modellen im Bereich des Indischen Ozeans und des Westpazifiks im Winter kein Meereis zurück bleibt und die Bucht der Ross-Sea auch im Winter eisbedeckt ist. Dies steht im Gegensatz zu dem was die Satelliten zeigen. Im Bereich der BellAm zeigt KAB042 Ansätze der Eisrückstände unterschätzt diese aber. In KAB109 bleibt auch hier kaum Eis zurück. Die Weddell-Sea letztlich wird in der winterlichen Eisbedeckung durch beide Modelle unterschätzt, wird aber schon vergleichsweise gut wieder gegeben.

Beim Vergleich des Monatsmittels für September scheint es eine gut Übereinstimmung zu geben. Dennoch wird die Meereiskonzentration durch beide Modelle überbewertet. KAB042 gibt die Form der Eisfläche im wesentlichen besser wieder als KAB109.

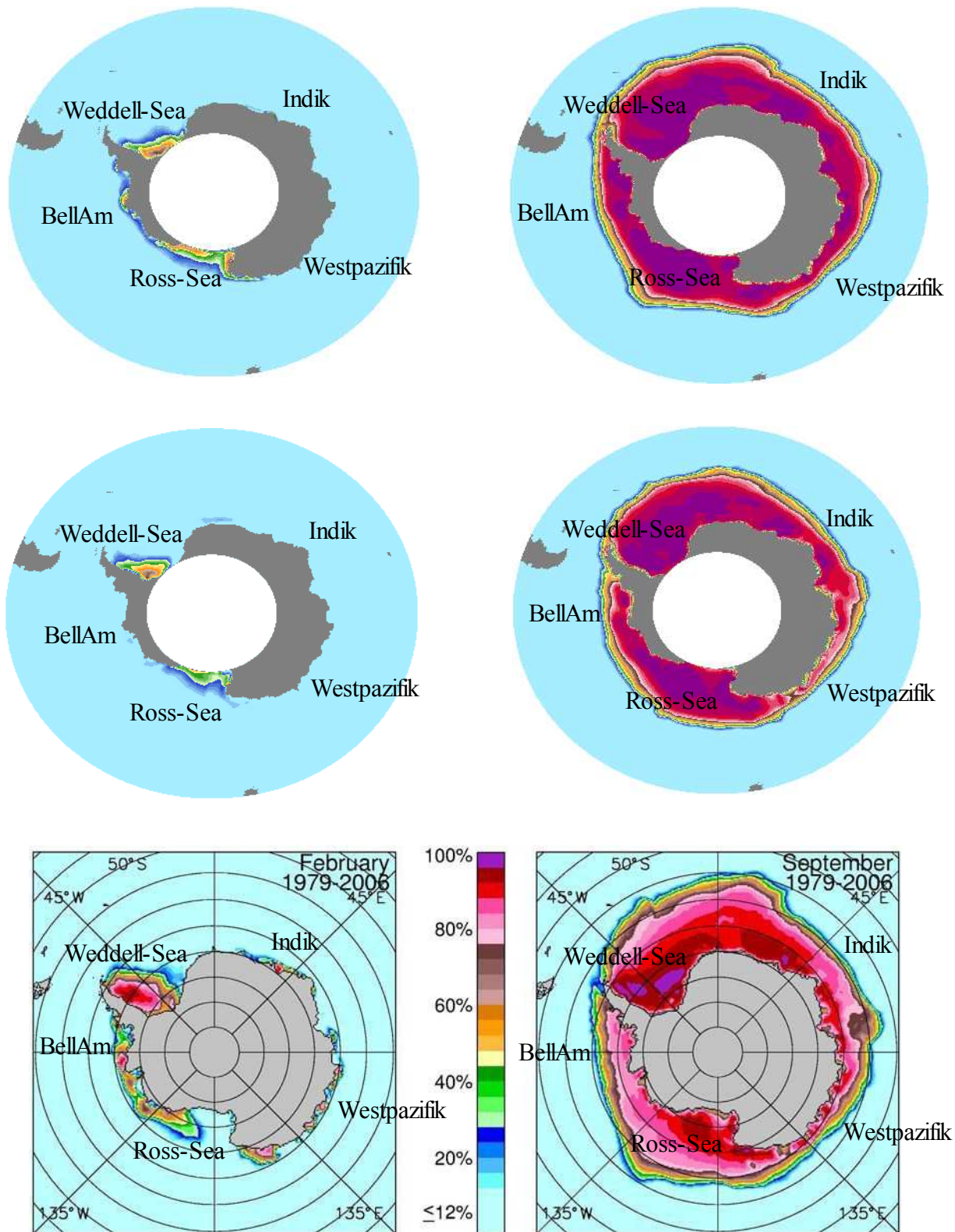
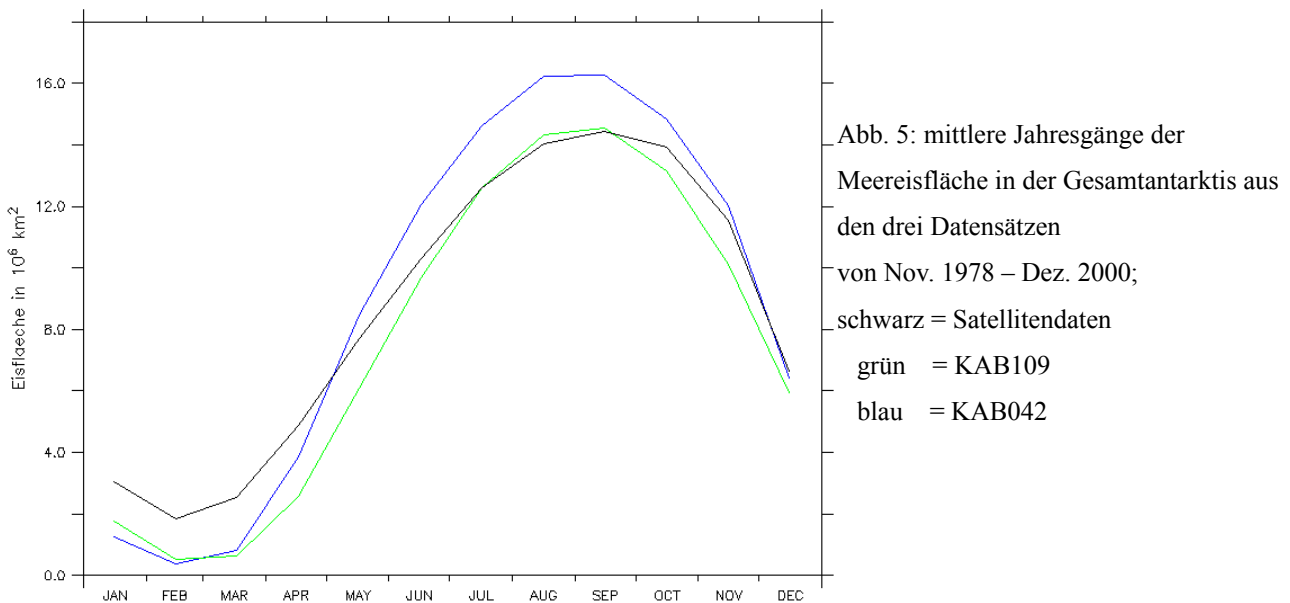


Abb. 4: Mittel der minimalen Meereiskonzentration bis 50°S im Süd-Sommer (Februar, links) und der Maximalen im Süd-Winter (September, rechts) über dem Zeitraum von Nov. 1978 – Dez. 2000 aus dem Modell KAB042 (oben), aus KAB109 (mitte) und zum Vergleich aus Satellitendaten von Cavalieri et al. [5] (unten, allerdings gemittelt über 1979-2006)

Im folgenden werden die Zeitreihen untersucht.

Im Vergleich der mittleren Jahresgänge (Abb. 5) ist ersichtlich, dass die Satellitendaten eine vergleichsweise geringe Schwankungsbreite zwischen Sommer (Minima bei ca. 2 Mio. km<sup>2</sup>) und Winter (Maxima bei ca. 14,5 Mio. km<sup>2</sup>) aufweisen. Die beiden Kurven von Satellit und KAB042 sind im saisonalen Verlauf sehr ähnlich, aber KAB042 über- bzw. unterschätzt den Maximal- bzw. Minimalwert etwa gleichermaßen. Die Kurve von KAB109 hingegen weist etwa das selbe Maxima auf, wie die Satellitendaten, unterschätzt aber die Minimalwerte im selben Maße wie KAB042.



Generell lässt sich also sagen, dass der Wert minimaler Meereisbedeckung laut Satellitendaten etwa 2 Mio. km<sup>2</sup> beträgt aber von den Modellen mit einem Wert von ca. 0,2 Mio. km<sup>2</sup> deutlich unterschätzt wird. Die größte Abweichung zwischen Modellexperimenten und Satellitendaten gibt es bei den Extremwerten.

Der Dezember wird von beiden Modellen sehr gut wieder gegeben.

Im (Süd-)Winter (Juli bis Oktober) stimmt KAB109 besonders gut überein. Vermutlich liegt das an den verbesserten atmosphärischen Größen, insbesondere dem Niederschlag, die für dieses Experiment benutzt wurden. Da KAB042 zu viel Süßwassereintrag hat, gefriert dieses Wasser vermutlich schneller zu Eis und überschätzt in diesem Maße die wirkliche Meereisbedeckung. Während der Zeit der Meereisbildung, vor allem von Ende März bis Juli, zeigen sich unterschiedlich starke Anstiege der Meereisfläche in den Jahresgängen, wobei der der Satellitendaten mit einem Zuwachs von ca. 9 Mio. km<sup>2</sup> am geringsten ist. Der Zuwachs von KAB109 beträgt 11 Mio. km<sup>2</sup> und der von KAB042 sogar 13 Mio. km<sup>2</sup>. Dies könnte wiederum mit den über- bzw. unterschätzten Extrema zusammen hängen. Um vom geringeren Minimum zum höheren Maximum zu gelangen ist wie in der Abb. 5 zu sehen ein steilerer Anstieg nötig. Ein Zeitversatz u.a. bei Beginn der Meereisbildung ist nicht explizit zu erkennen.

Das Abschmelzen des Meereises im Oktober bis Dezember wird gut wieder gegeben, obwohl auch hier bei KAB042 der zu hohe Maximalwert Einfluss zeigt.

Als nächstes gehen wir zu den TPZeiten über, um langfristige Entwicklungen zu betrachten.

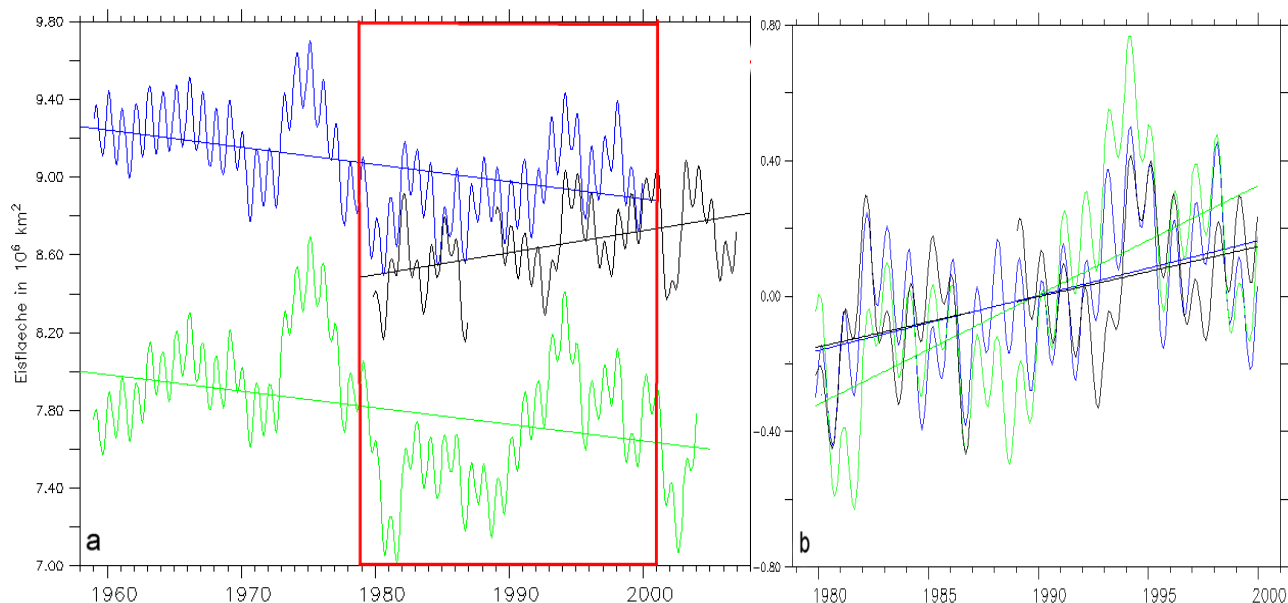


Abb. 6: (a) TPZeit der Meereisfläche der Gesamtantarktis (1958-2007)

(b) Anomalie der TPZeit der Meereisfläche der Gesamtantarktis (für den gemeinsamen Zeitraum, 1978-2000)  
aus den drei Datensätzen und deren jeweiliger Trend:

schwarz = Satellitendaten  
grün = KAB109  
blau = KAB042

In Abb. 6a fällt zunächst einmal auf, dass der Mittelwert, um den die Eisfläche des jeweiligen Datensatzes schwankt, verschieden ist. Der des KAB042 liegt (mit 9,1 Mio. km<sup>2</sup>) am höchsten, knapp über dem der Satellitenmessungen (mit 8,7 Mio. km<sup>2</sup>); der des KAB109 ist (mit 7,7 Mio. km<sup>2</sup>) der kleinste. Anders ausgedrückt heißt das, dass generell KAB042 die Satellitenwerte um 0,4 Mio. km<sup>2</sup> überbewertet, während KAB109 um eine Mio. km<sup>2</sup> zu geringe Werte gibt.

Dennoch gibt KAB042 die Satellitenmessung gut wieder, wie im folgenden noch deutlicher wird. Um die drei Datensätze besser vergleichen zu können, wird der Zeitraum von November 1978 bis Dezember 2000 gewählt (in dem für alle drei Daten vorliegen) und die Graphen übereinander gelegt, indem man die jeweiligen Mittelwerte über diesen Zeitraum abzieht (siehe Abb. 6b).

(Mittelwerte 1978-2000: für Satelliten = 8,6 Mio. km<sup>2</sup>, für KAB042 = 8,9 Mio. km<sup>2</sup>,  
für KAB109 = 7,5 Mio. km<sup>2</sup>)

Die größte Schwankungsbreite von ca. -0,65 bis +0,80 Mio. km<sup>2</sup> zeigt KAB109. Er über- und unterschätzt dabei die lokalen Maxima und Minima sowohl des KAB042 als auch der Satellitendaten. KAB042 dagegen zeigt aber eine ähnlich starke Schwankungsbreite, wie die Satellitendaten von +/-0,45 Mio. km<sup>2</sup>. Den größten Unterschied zwischen KAB042 und den



Satelliten bilden lediglich einige der Restsignale saisonaler Schwankungen, die geringfügig voneinander abweichen. Möglicherweise liegt das an den zu stark ausgeprägten Extrema im Jahresgang des KAB042.

Alle drei Zeitreihen zeigen einen positiven Trend. Der des KAB042 stimmt ziemlich genau mit dem der Satelliten überein, wohingegen der des KAB109 zu steil ist. KAB042 scheint also, im Gegensatz zu KAB109, gut geeignet für die Betrachtung langfristiger Variabilitäten zu sein. Kehren wie mit diesen Erkenntnissen zurück zu Abb. 6a, kann KAB042 unter der Frage nach langfristigen Änderungen der Meereisfläche betrachtet werden.

Von den Satelliten noch nicht erfasst, sehen wir in KAB042 ein starkes Maximum (das größte der gesamten Zeitreihe) Mitte der siebziger Jahre, gefolgt von einem starken Minimum Ende der siebziger Jahre (welches ebenfalls zu den kleinsten der Zeitreihe gehört). KAB042 zeigt über den Zeitraum von 1958 bis 2000 einen negativen Trend. Obwohl nach dem Minimum Ende der siebziger Jahre wieder die Zunahme der Meereisfläche zu erkennen ist, welche für die letzten zwei Jahrzehnte (in Abb. 6b) durch die Satelliten verifiziert wurde.

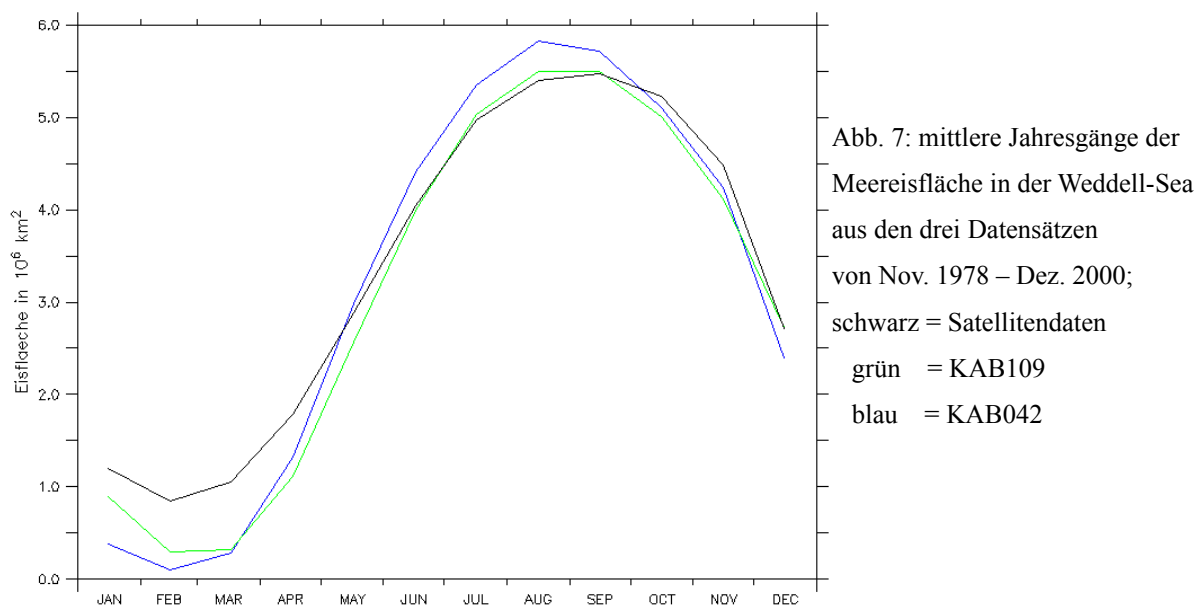
Insgesamt können wir also festhalten, dass wir uns wie in den Satellitenbeobachtungen zu erkennen ist, in einem Zeitabschnitt befinden, in dem die mit Meereis bedeckte Fläche zunimmt. Langfristig ist jedoch, wie in den Modelldaten KAB042 zu sehen, mit einer Abnahme der Meereisfläche der Antarktis zu rechnen. Großen Einfluss darauf, welches Szenario letztlich dominiert, scheinen Ereignisse zu haben, denen starke Maximal- bzw. Minimalwerte der Meereisfläche folgen. Diese können direkt nacheinander auftreten, wie wir es Mitte bis Ende der siebziger Jahre sehen. Darüber hinaus ist es nicht auszuschließen, dass diese Zeitreihe einer mehr dekadischen Variabilität unterliegt. Diese deutet sich durch eine lange Phase im Maximalbereich 1958 bis 1975 gefolgt von einem langen Minimal-Phase an. Aus den hier betrachteten Daten kann dies allerdings nicht weiter untersucht werden, da die Zeitreihen für eine solche Analyse zu kurz sind.

Wie wir jetzt festgestellt haben, gibt es monatliche bzw. jahreszeitliche Unterscheide zwischen den verschiedenen Datensätzen. Es bleibt nun die Frage ob sich dies in den Teilregionen der Antarktis wiederfinden lässt und ob auch in verschiedenen Regionen der Antarktis unterschiedliche Entwicklungen zu finden sind.

Betrachten wir aufgrund deren Bedeutung für die Tiefenwasserbildung zuerst die Weddell-Sea.

## Weddell-Sea

Die Jahresgänge der drei Datensätze sind für die Weddell-Sea gut aufeinander abgestimmt. Wie wir Eingehens schon am Vergleich der Karten (Abb. 4) gesehen haben, fällt auch hier auf, dass die minimale mit Meereis bedeckte Fläche unterschätzt wird. Während die Satellitenmessungen knapp eine Mio. km<sup>2</sup> angeben, verzeichnen die Modelle nur 0,25 Mio. km<sup>2</sup> (KAB109) bzw. weniger als 0,1 Mio. km<sup>2</sup> (KAB042). Dies entspricht 41,7% bzw. etwa 50% der Fläche, die die Modelle im (Süd-)Sommer der Gesamtantarktis zu wenig angeben.



Die Phase der Meereisbildung ist in beiden Modellen der der Satelliten sehr ähnlich und auch die Phase der Eisschmelze zeigt gute Übereinstimmungen. Mai und Juni sowie Oktober bis Dezember werden besonders gut wieder gegeben. Im (Süd-)Winter überschätzt auch hier KAB042 das Maximum, allerdings nur mit 0,5 Mio. km<sup>2</sup>.

Auch hier sehen wir uns im folgenden die TPZeiten an.

In Abb. 8a ist zu erkennen, dass die beiden Modellläufe sehr dicht bei einander liegen. Die jeweiligen Mittelwerte von 3,1 Mio. km<sup>2</sup> (KAB109) und 3,2 Mio. km<sup>2</sup> (KAB042) liegen auch hier unter dem der Satellitenwerte mit 3,4 Mio. km<sup>2</sup>. Damit wird die Eisfläche, die von den Satellitenbeobachtungen gegeben ist, von den Modellläufen um 0,3 bzw. 0,2 Mio. km<sup>2</sup> unterschätzt. In den Modelldaten ist zu sehen, dass die auftretenden Schwankungen im Meereis mit voranschreitender Zeitachse größer werden, bis sie in den letzten Jahren, in denen nur noch Satellitenmessungen vorliegen, ihr Maximum erreichen. Die Zeitreihe ist seit Mitte der siebziger Jahre durch eine ununterbrochene Folge starker Maxima und Minima geprägt.

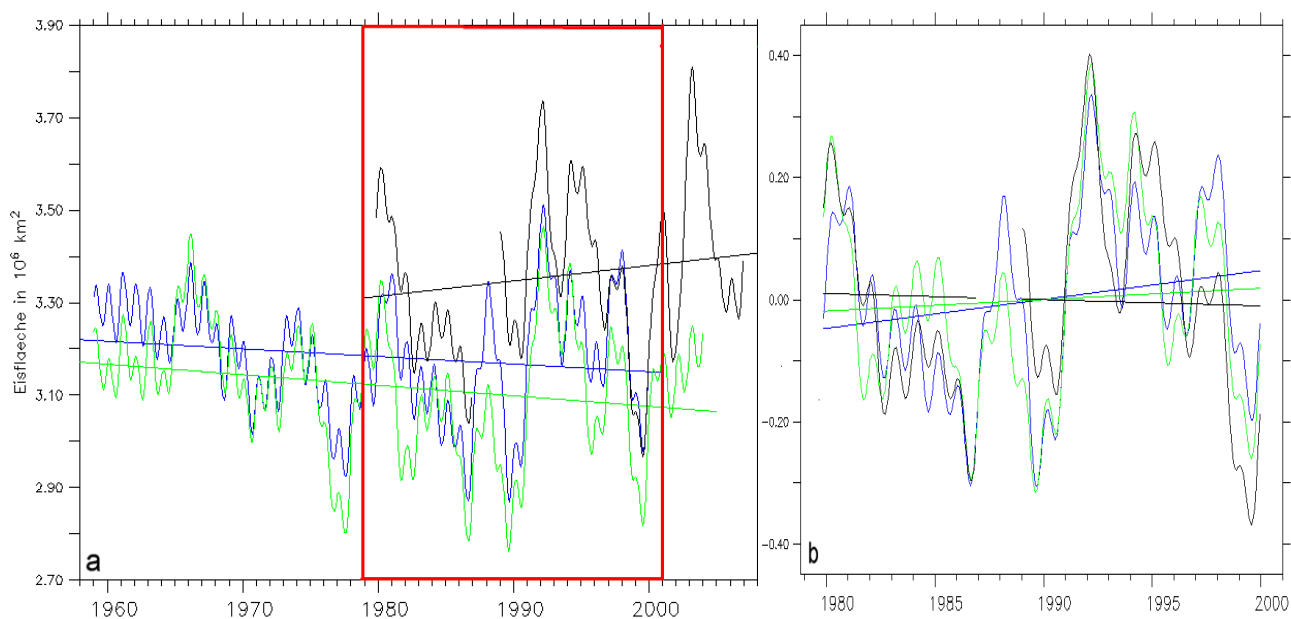


Abb. 8: (a) TPZeit der Meereisfläche der Weddell – Sea (1958-2007)

(b) Anomalie der TPZeit der Meereisfläche der Weddell-Sea (für den gemeinsamen Zeitraum, 1978-2000)

aus den drei Datensätzen und deren jeweiliger Trend:

schwarz = Satellitendaten

grün = KAB109

blau = KAB042

Betrachten wir nun Abb. 8b um festzustellen wie gut die Modelle sind. (Die jeweiligen Mittelwerte die zum erstellen der Grafik b abgezogen wurden sind: für die Satelliten 3,3 Mio. km<sup>2</sup>, für KAB042 3,2 Mio. km<sup>2</sup> und für KAB109 3,1 Mio. km<sup>2</sup>.)

Die Satellitendaten zeigen die größte Schwankungsbreite von -0,4 Mio. km<sup>2</sup> bis +0,45 Mio. km<sup>2</sup>.

Dennoch ist die Abweichung der Modelle gering. Bei verschiedenen lokalen Extrema sind sie sogar deckungsgleich mit den Satellitenwerten.

Die Trendangaben sind widersprüchlich und jeder gezeigte Trend ist hier recht klein. Die Satellitenbeobachtungen zeigen einen schwachen negativen Trend. Die Modelle dagegen einen Positiven, wobei der des KAB042 stärker ist. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Trendangaben durch die Extrema dominiert sind. Vergleicht man die Satellitentrends aus a und b, fällt auf, dass Abb. 8a 2004 ein weiteres starkes Maximum zeigt, das den Anstieg des Trends aus Abb 8b umkehrt, wenn man die Zeitreihe um nur wenige Jahre verlängert.

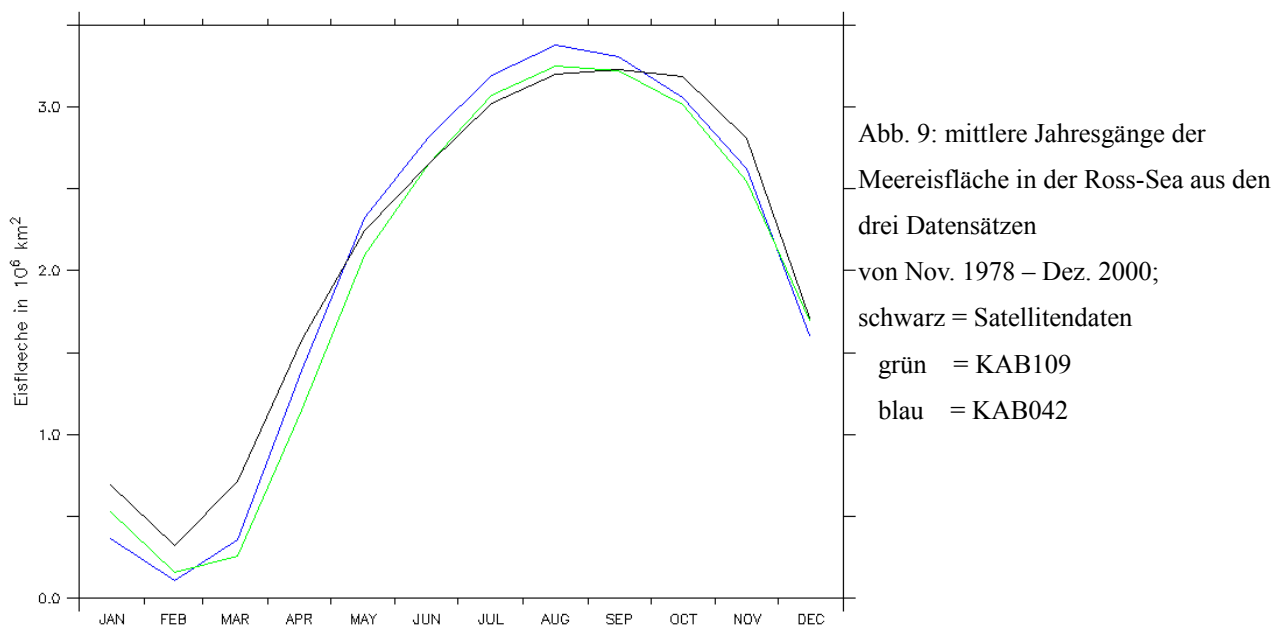
Da abgesehen von den Trends die Modelle eine gute Übereinstimmung mit den Satelliten zeigen, betrachten wir auch hier die langfristige Entwicklung der Modelle. Diese zeigen beide insgesamt einen negativen Trend. Man könnte demnach annehmen, dass auch hier langfristig die Meereisfläche abnimmt, wenngleich wir uns seit den letzten zwei Jahrzehnten in einer Phase zunehmender Eisbedeckung befinden. Wahrscheinlicher ist aber, dass die Weddell-Sea durch einen Wechsel starker Extrema geprägt bleibt, wie es sich die letzten 30 Jahre abgezeichnet hat. Diese Entwicklungen könnten sehr wahrscheinlich Auswirkungen auf die Tiefenwasserbildung in diesem

Gebiet haben. Es ist anzunehmen, dass auch diese einen Wechsel von Extrema aufweist, weil es offensichtlich einen ständigen Wechsel von Jahren gibt, in denen dem oberflächennahen Wasser besonders viel bzw. wenig Salz zugeführt wird. Was sich aber wie im Detail und mit welchen Folgen verändert, ist Teil einer eigenständigen Arbeit\*.

Nun wollen wir sehen, ob sich ähnliches auch für das zweite Tiefenwasserbildungsgebiet der Antarktis, die Ross-Sea, feststellen lässt.

### Ross-Sea

Hier gibt es sehr gute Übereinstimmungen zwischen Modellen und Satellitendaten (wie in Abb. 9 zu sehen). Der Minimalwert der Meereisfläche im Februar wird von den Satelliten mit ca. 0,3 Mio. km<sup>2</sup> und von den Modellläufe mit ca. 0,2 Mio. km<sup>2</sup> angegeben. Es besteht also nur eine Abweichung von 0,1 Mio. km<sup>2</sup>. Diese entspricht nur 5,6% der Fläche die die Modelle im Winter der Gesamtantarktis zu wenig angeben. Des weiteren ist wie schon anfangs beschrieben und in Abb. 4 zu sehen das Meereis in den Datensätzen dies Gebietes unterschiedlich verteilt. Die Satelliten beobachten es an den äußeren Rändern des antarktischen Kontinents, während die Bucht eisfrei ist. In den Modellen wird es andersherum dargestellt.



Auch der Maximalwert der mit Meereis bedeckten Fläche wird von KAB042 nur um 0,1 Mio. km<sup>2</sup> zu hoch angegeben, KAB109 gibt es genau wieder. Es gibt jedoch einen kleinen Zeitversatz an dieser Stelle. Das Maximum der Meereisfläche ist in den Satellitenbeobachtungen im September zu finden, während es die Modelldaten schon im August zeigen.

Die Form des Jahressanges in dieser Region insgesamt zeigt (anhand der Meereisfläche) einen

\* Bachelor – Arbeit von Tina Dippe im Studiengang Physik des Erdsystems an der Christian–Albrechts–Universität Kiel

deutlich ausgeprägten (Süd-)Winter, während sich der (Süd-)Sommer ausschließlich auf die Monate Januar bis März zu beschränken scheint. Verglichen mit den Jahresgängen der Gesamtantarktis und der Weddell-Sea scheint dieser Jahresgang formverändert zu sein.

Dennoch wird sowohl die Phase der Meereisbildung als auch die der Schmelze gut wieder gegeben. Es gibt hier sehr geringe Abweichungen und die beste Übereinstimmung zwischen Satellitenmessungen und Modelldaten; verglichen mit den anderen vier Teilregionen und der Gesamtantarktis, wie ersichtlich werden wird.

Betrachtet man nun auch hier die TPZeiten zeigen diese ebenfalls sehr gute Übereinstimmungen:

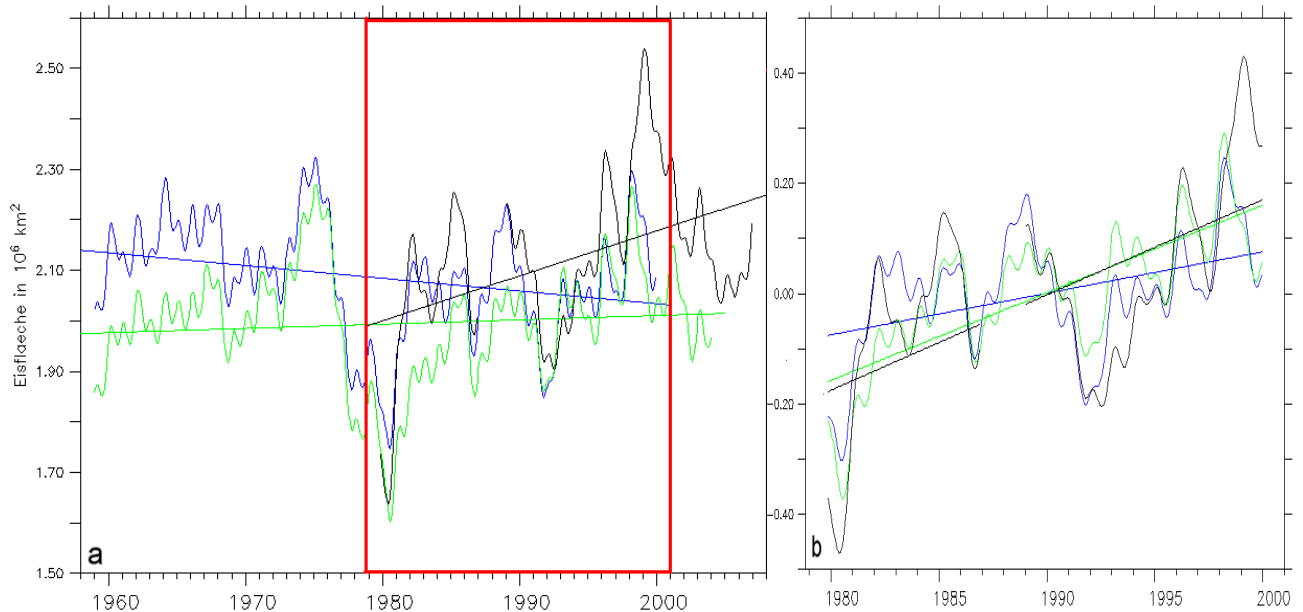


Abb. 10: (a) TPZeit der Meereisfläche der Ross – Sea (1958-2007)

(b) Anomalie der TPZeit der Meereisfläche der der Ross – Sea (für den gemeinsamen Zeitraum, 1978-2000)

aus den drei Datensätzen und deren jeweiliger Trend:

schwarz = Satellitendaten

grün = KAB109

blau = KAB042

In Abb. 10a ist erkennbar, dass die drei Datensätze fast deckungsgleich sind. Es bestehen nur geringe Unterschiede zwischen den Mittelwerten. Der der Satelliten und des KAB042 ist 2,1 Mio. km<sup>2</sup> und der des KAB109 2,0 Mio. km<sup>2</sup>. Diese Werte gelten sowohl für den Zeitraum, der in Abb. 10a dargestellt ist, als auch für den von 1978 bis 2000 in b dargestellten.

In beiden Abbildungen sind das starke Minimum der Eisbedeckung 1980 und das starke Maximum 1999 auffällig gut erkennbar. Beide sind die jeweils stärksten Extrema der Zeitreihe (sowohl in Abb. 10a als auch b) und beide werden von beiden Modellläufen als nicht so stark ausgeprägt wieder gegeben. Aus Abb. 10b ist ersichtlich, dass die Satellitenwerte die größte Schwankungsbreite mit +/-0,45 Mio. km<sup>2</sup> aufweisen. Der Zeitraum 1978-2000 (im Abb. 10b) liegt genau zwischen diesen Ereignissen und ist demzufolge von den Satellitendaten mit einem positiven Trend gekennzeichnet,

der mit dem des KAB109 fast deckungsgleich ist. Der Trend des KAB042 ist ebenfalls positiv aber nicht so steil.

KAB109 ist demnach, abgesehen von der generell zu geringen Schwankungsbreite, gut geeignet um einen Blick auf die langfristige Entwicklung der Meereisfläche zu werfen.

In Abb. 10a, über den Zeitabschnitt von 1958-2004, zeigt KAB109 einen minimalst positiven Trend, der kaum als ein Trend zu erkennen ist. Darüber hinaus scheint auch hier die Meereisfläche von einem Wechsel der Extrema geprägt zu sein. Mitte der Siebziger tritt ein Maximum auf, gefolgt von dem bereits erwähnten Minimum Anfang der Achtziger, einem nicht so stark ausgeprägten Maximum Ende der Achziger, einem Minimum 1992 und dem Maximum Ende der Neunziger. Dies deutet eine mehrdekadische Variabilität mit einer Periode von ca. 12 Jahren an.

In diesem Gebiet ist deshalb damit zu rechnen, dass die Meereisfläche etwa gleich bleibt aber durch Variabilitäten mit einer 12-jährigen Periode geprägt sein kann. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass sich auch die Tiefenwasserbildung in diesem Gebiet nicht oder nur sehr langsam ändern wird, denn auch die Wechsel der Extremwerte folgen, anders als in der Weddell-Sea, einer langsamen Änderung, so dass auch Änderungen im Salzgehalt und damit verbunden der Dichte des Oberflächenwassers nur sehr langsam von statten gehen und dann zurück pendeln.

Im nächsten Schritt werden die drei verbleibenden Gebiete betrachtet.

Beginnen wir mit der Region der Bellingshausen und Amundsen Seas, die direkt zwischen Weddell-Sea und Ross-Sea liegt.

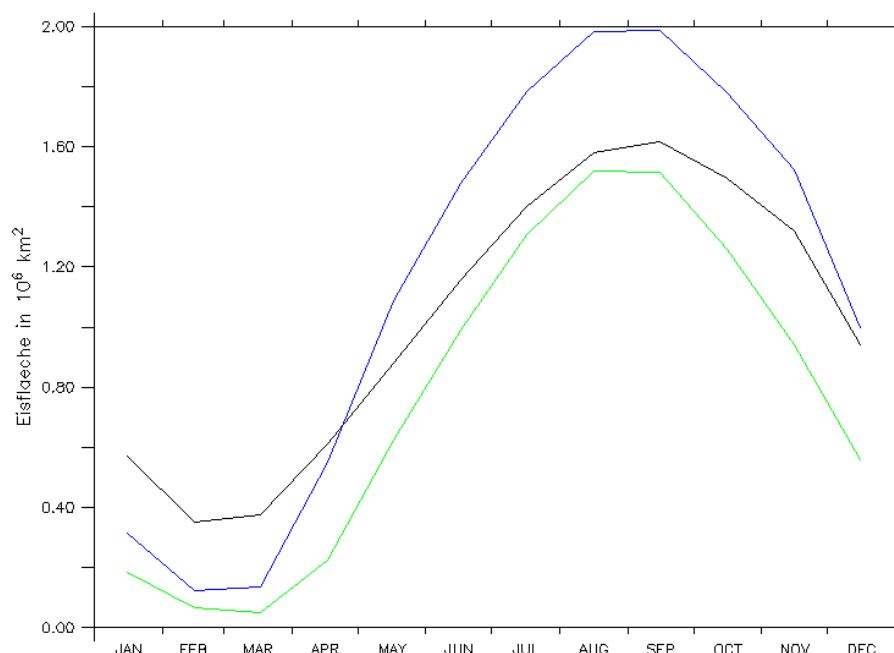
### Bellingshausen und Amundsen Seas

Hier sind deutliche Abweichungen zwischen allen drei Datensätzen offensichtlich. Im Gegensatz zu den beiden bisher betrachteten Teilregionen liefern im Gebiet der BellAm die Modelle deutlich unterschiedliche Ergebnisse.

KAB042 überschätzt die Eisfläche von Mai bis Dezember und unterschätzt selbige Januar bis März. Im April schneidet sich der Graph mit dem der Satellitendaten. Am stärksten sind diese Abweichungen in den Monaten der Extrema. Da die maximale Eisfläche aus den Satellitenbeobachtungen hier nur knapp 1,6 Mio. km<sup>2</sup> beträgt fallen diese Abweichungen stark ins Gewicht. Das Minimum der mit Meereis bedeckten Fläche im Februar wird um etwa 0,3 Mio. km<sup>2</sup> zu gering eingeschätzt. Dies entspricht 16.7% der Fläche, die die Modelle in der Gesamtantarktis für diesen Zeitpunkt zu wenig angeben.

Das Maximum wird nicht im September, sondern schon im August durch das Modell dargestellt und mit ca. 0,5 Mio. km<sup>2</sup> überschätzt, das ist fast ein Drittel der Fläche zu viel. Entsprechend der, durch KAB042 stark verfehlten, Extremwerte können auch die Phasen der Meereisbildung und Meereisschmelze nicht realistisch wieder gegeben werden.

Abb. 11: typische Jahrgänge der Meereisfläche in BellAm aus den drei Datensätzen von Nov. 1978 – Dez. 2000; schwarz = Satellitendaten grün = KAB109 blau = KAB042



Auch die Übereinstimmung zwischen KAB109 und den Satellitenbeobachtungen ist wesentlich schlechter als in den zuvor betrachteten Gebieten. Besonders bemerkenswert ist, dass KAB109 die Eisfläche das gesamte Jahr hindurch unterschätzt. Am geringsten ist diese Abweichung im August, wo auch KAB109 einen Monat zu früh das Maximum erreicht. Die Stärkste Abweichung findet sich im März wo das Minimum mit 0,05 Mio. km<sup>2</sup> einen Monat zu spät erreicht wird. Dies entspricht sogar 19,4% der Fläche, die die Modelle in der Gesamtantarktis für den (Süd-)Sommer zu wenig angeben. Folglich ist der Anstieg der Meereisfläche in der Phase der Meereisbildung zu steil und die ganze Form des Jahrganges in sich verändert, so dass auch die Meereisschmelze nicht korrekt wieder gegeben werden kann.

Eine Analyse der hiesigen Jahrgänge aus diesen Modellexperimenten kann offensichtlich kaum realistische Ergebnisse liefern.

Betrachten wir nun, ob zumindest langfristige Analysen aus diesen Modelldaten möglich sind.

Im den TPZeiten scheinen die Abweichungen nicht so viel Einfluss zu haben, denn die sich ergebenden Grafiken, sind nach der Analyse der Jahrgänge überraschend gut.

Der Verlauf der Graphen in Abb. 12a ist ähnlich, stimmt aber auch hier nicht mehr so gut überein, wie in den zuvor betrachteten Regionen. Auch jetzt fällt die Abweichung der Modelle voneinander auf: KAB042 gibt etwa 0,4 Mio. km<sup>2</sup> mehr an als KAB109. Der Mittelwert der Satelliten beträgt eine Mio. km<sup>2</sup>, der des KAB042 1,2 Mio. km<sup>2</sup> und der des KAB109 0,8 Mio. km<sup>2</sup>. Die Satellitenwerte liegen damit ziemlich genau zwischen denen der beiden Modelle und weichen damit von jedem um ca. 0,2 Mio. km<sup>2</sup> ab.

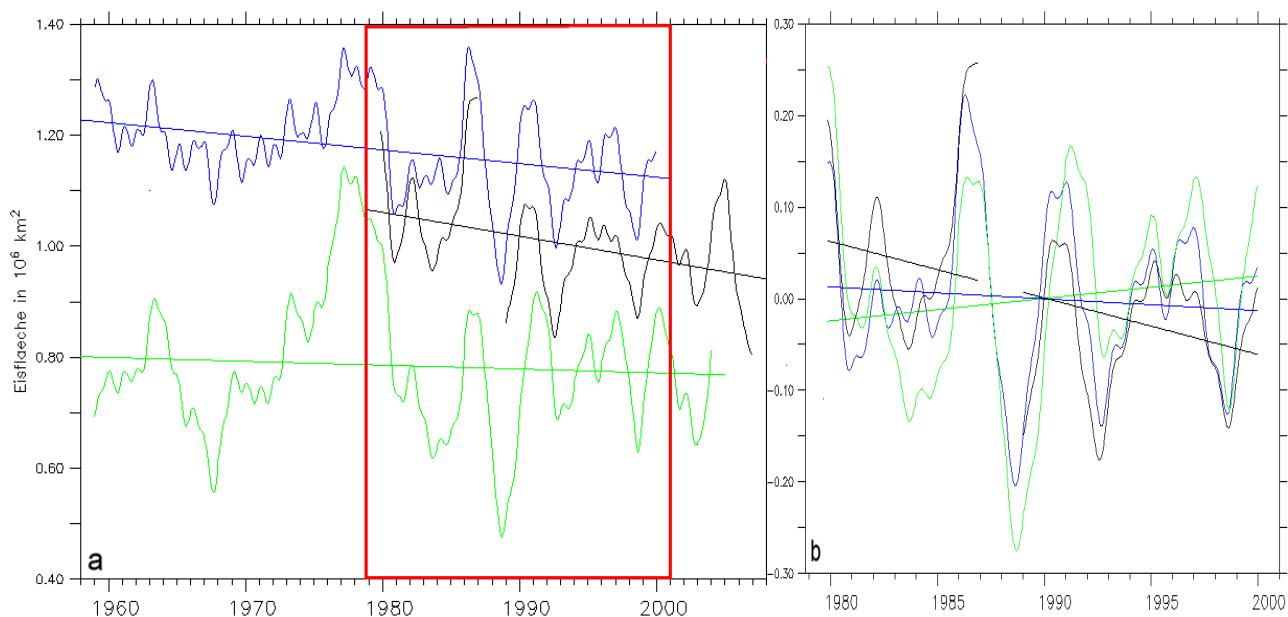


Abb. 12: (a) TPZeit der Meereisfläche im BellAm Gebiet (1958-2007)

(b) Anomalie der TPZeit der Meereisfläche im BellAm Gebiet (für den gemeinsamen Zeitraum, 1978-2000) aus den drei Datensätzen und deren jeweiliger Trend:

schwarz = Satellitendaten

grün = KAB109

blau = KAB042

Auch hier werden die Mittelwerte für den Zeitraum 1978 bis 2000 (für die Satelliten und KAB109 genauso eine Mio. km<sup>2</sup> bzw. 0,8 Mio. km<sup>2</sup> und für KAB042 1,1 Mio. km<sup>2</sup>) abgezogen um die in Abb.12b dargestellte Anomalie zu erhalten.

KAB042 weist mit gut  $\pm 0,2$  Mio. km<sup>2</sup> die geringste Schwankungsbreite auf, während KAB109 mit gut  $\pm 0,25$  Mio. km<sup>2</sup> die stärkste zeigt. Für die Satelliten ist auch hier die Mitte der beiden Modelle zutreffend.

KAB042 gibt die Satellitendaten besser wieder, als KAB109, doch die Trendangaben der drei Datensätze weichen stark voneinander ab. Die Satelliten zeigen einen klaren negativen Trend. KAB042 zeigt einen ebenfalls negativen aber nur minimalen Trend und KAB109 zeigt einen Positiven.

Betrachten wir, mit dem Vorbehalt der bisherigen Ergebnisse des BellAm Gebietes, KAB042 (in Abb. 12a) um eine mögliche Aussage über die langfristige Entwicklung der Meereisfläche zu machen.

Auch hier ist ein Wechsel der Extrema in der Meereisfläche zu erkennen.

Ein dominantes Maximum ist 1978 und ein dominantes Minimum ist 1989 zu erkennen. Die Satellitendaten können keines der Ereignisse wirklich erfassen. Demzufolge dominieren wohl auch hier die Wechsel der Extrema den Trend. Dennoch ist eher mit einer Abnahme der Eisfläche zu rechnen, weil diese sich in den Satellitendaten (von 1978-2007) schon zeigt. Sowohl der kurzzeitige Trend der Satelliten, als auch der langfristige des KAB042 sind negativ und eine Trendumkehr



deutet sich nicht an. Anders als in den anderen Regionen befinden wir uns für das BellAm Gebiet also nicht in einem Zeitabschnitt, indem die Meereisfläche zunimmt, trotz langfristigem negativen Trend sondern können generell von einer Abnahme der Meereisfläche ausgehen.

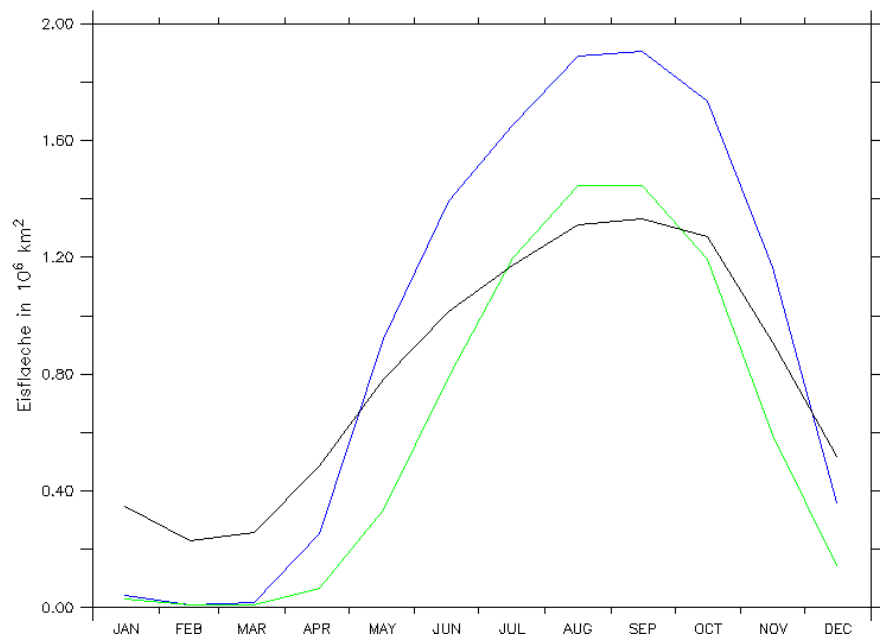
Genaue langfristige Betrachtungen sind aber, auf Grund der starken Abweichungen der Modelle, kaum möglich und detailliertere Aussagen über die Realität deshalb gewagt.

Ähnlich schlechte Übereinstimmung (zumindest im Jahresgang) scheint es, wie wir jetzt sehen werden, auch für den Bereich des Westpazifiks zu geben.

### Westpazifik

In den Jahresgängen (Abb. 13) ist zu sehen, dass die Satelliten, mit einem Maximum von ca. 1,3 Mio. km<sup>2</sup> und einem Minimum von ca. 0,2 Mio. km<sup>2</sup>, eine vergleichsweise sehr geringe Schwankungsbreite aufweisen.

Abb. 13: mittlere Jahresgänge der Meereisfläche im Bereich des Pazifischen Ozeans aus den drei Datensätzen von Nov. 1978 – Dez. 2000;  
schwarz = Satellitendaten  
grün = KAB109  
blau = KAB042



Es gibt eine schlechte Übereinstimmung mit den Modelldaten. Sowohl KAB042 als auch KAB109 weisen mit einer Änderung der Meereisfläche um 1,9 Mio. km<sup>2</sup> bzw. 1,5 Mio. km<sup>2</sup> eine viel zu große Schwankungsbreite auf. KAB042 „schießt damit regelrecht über das Ziel hinaus“.

Ein auffälliger Fehler der Modelle, ist das komplette abschmelzen des Meereises im Februar und März, was in den Beobachtungen nie eintritt. Damit unterschätzen sie die Eisfläche um 0,2 Mio. km<sup>2</sup>, was 11,1% der Fläche entspricht die die Modelle für die Gesamtantarktis zu wenig angeben. Des weiteren wird der Jahresgang durch die zu hohen Extrema deformiert und folglich kann auch die Meereisbildung und Schmelze nicht realistisch wieder gegeben werden.

Schauen wir und nichts desto trotz auch hier die TPZeiten an.

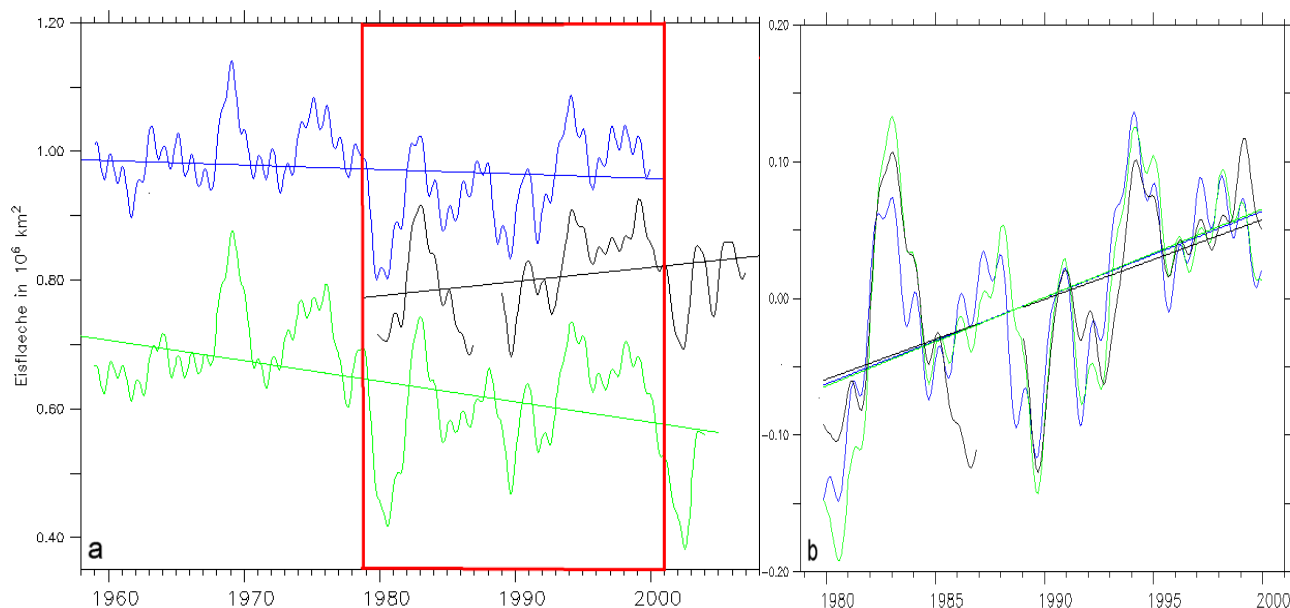


Abb. 14: (a) TPZeit der Meereisfläche im Pazifik (1958-2007)

(b) Anomalie der TPZeit der Meereisfläche im Pazifik (für den gemeinsamen Zeitraum, 1978-2000)

aus den drei Datensätzen und deren jeweiliger Trend:

schwarz = Satellitendaten

grün = KAB109

blau = KAB042

Auch im Gebiet des west-pazifischer Ozeans (Abb. 14a) liegen die Werte der Satellitenmessung zwischen denen der Modelle, welche gut 0,4 Mio. km<sup>2</sup> voneinander abweichen. Der Mittelwert der Satellitenbeobachtungen ist 0,8 Mio. km<sup>2</sup>, der des KAB042 eine Mio. km<sup>2</sup> und der des KAB109 0,6 Mio. km<sup>2</sup>. Diese ergeben sich sowohl für den jeweiligen gesamten Zeitraum, als auch von 1978 bis 2000 und werden abgezogen um die Anomalie der TPZeit (in Abb. 14b) zu erhalten.

Hier unterschätzen die Modellwerte nur das erste Minima 1980 deutlich. Danach gibt es eine unerwartet gute Übereinstimmung der drei Datensätze. Den Satellitenbeobachtungen zu Folge gibt es generell in diesem Gebiet eine auffällig geringe Schwankungsbreite von ca. +/- 0,1 Mio. km<sup>2</sup>, die von den Modellen in nur wenigen Ausnahmen etwas überschritten wird. Als dominante Extremwert-Ereignisse sind die lokalen Maxima 1983-84 und 1994-95 sowie das Minimum 1989 festzuhalten. Diese beeinflussen den Trend aber nicht allzu stark. Die Zeit ist durch einen eindeutig positiven Trend gekennzeichnet, den alle drei Datensätze gleich angeben.

Es können also gut beide Modelle eine Aussage über die langfristige Entwicklung geben. Dazu betrachten wir wieder Abb. 14a.

Beide Modelle zeigen einen, wenn auch unterschiedlich starken negativen Trend. Es ist auch hier nicht zu vermuten, dass dieser durch Extrema dominiert ist, weil Minima im späteren Teil der Zeitreihe vorherrschend zu sein scheinen. Wahrscheinlich hat auch hier der positive Satellitentrend der letzten Jahrzehnte nicht lange bestand, und wird letztlich durch einen langfristigeren negativen Trend überlagert. Wie stark dieser ausfallen wird, lässt sich aber nicht sagen, da beide

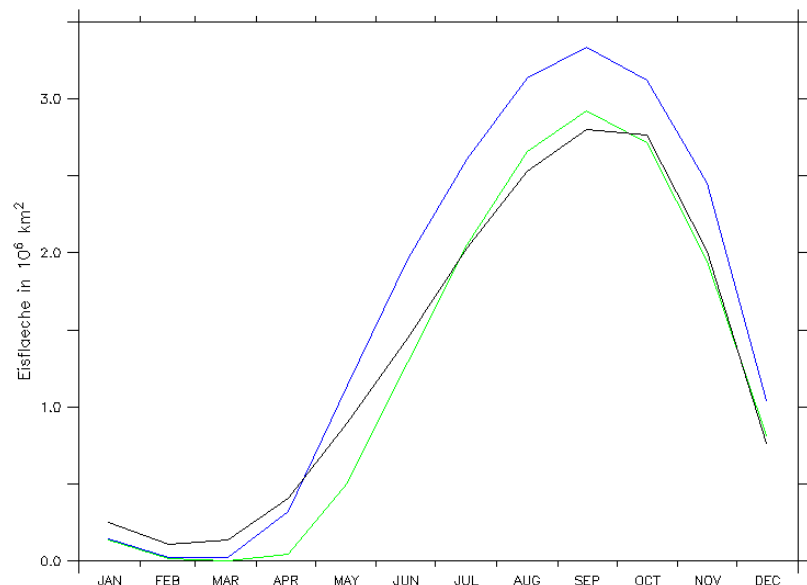
Modelldarstellungen, wie in Abb. 14b zu sehen, offensichtlich zu dem Ergebnis führen können, das die Satelliten heute zeigen.

Abschließend bleibt nur noch die Region des Indischen Ozeans zu betrachten.

### Indischer Ozean

Hier gibt es wieder eine bessere Übereinstimmung der drei Datensätze miteinander, besonders zwischen den Satellitendaten und KAB109. Dennoch schmilzt auch hier, in den Satellitenbeobachtungen sichtbar, das Meereis nie vollständig, wie es in den Modellen für Februar und März zu sehen ist. Es wird lediglich bis auf ca. 0,1 Mio. km<sup>2</sup> reduziert. Hier entspricht die Unterschätzung der Meereisfläche durch die Modelle 5,6%, der Fläche die die Modelle im Winter der Gesamtantarktis zu wenig angeben.

Abb. 15: mittlere Jahresgänge der Meereisfläche im Bereich des Indischen Ozeans aus den drei Datensätzen von Nov. 1978 – Dez. 2000;  
schwarz = Satellitendaten  
grün = KAB109  
blau = KAB042



Das Maximum der Meereisfläche überschätzt KAB042 auch hier mit ca. 0,5 Mio. km<sup>2</sup> und wieder wird auch die Phase der Meereisbildung und -schmelze durch die zu stark ausgeprägten Extrema ungenau wieder gegeben.

Bei KAB109 setzt die Meereisbildung zu dem zu spät, erst Ende April, ein. Die Phase der Eisschmelze wird noch recht gut dargestellt.

Insgesamt scheint KAB109, für dieses Gebiet, besser für die Auswertung der Meereisfläche zu sein als KAB042, denn die Übereinstimmung mit den Satellitendaten ist bei KAB109, mit Ausnahme der verspäteten Eisbildung, ziemlich gut.

Und auch für dieses Gebiet wollen wir uns noch die langfristige Variabilität ansehen.

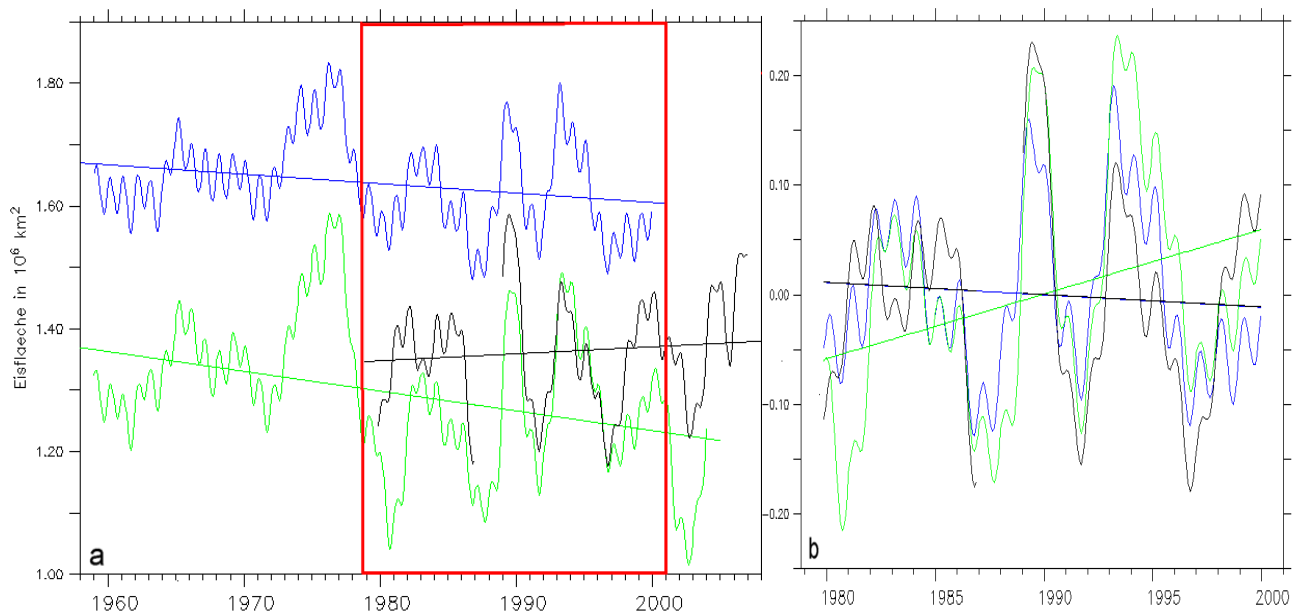


Abb. 16: (a) TPZeit der Meereisfläche im Indik (1958-2007)

(b) Anomalie der TPZeit der Meereisfläche im Indik (für den gemeinsamen Zeitraum, 1978-2000)

aus den drei Datensätzen und deren jeweiliger Trend:

schwarz = Satellitendaten

grün = KAB109

blau = KAB042

Betrachten wir hier zunächst die Trends in Abb. 16b. Erstaunlicherweise ist der leicht negative Trend von KAB042 deckungsgleich mit dem der Satellitendaten, wohingegen KAB109 einen steileren Positiven zeigt. Anscheinend gibt KAB042 die TPZeit besser wieder als KAB109, obwohl dieser die bessere Übereinstimmung mit dem Jahresgang zeigt.

Dennoch hat auch KAB042 einige Abweichungen von den Satellitenwerten. So werden vor allem die Jahre seit 1998 und das Maxima 1989 unterbewertet und das Maxima 1993-94 als zu hoch eingeschätzt. Hier scheint der Trend wieder durch Extrema dominiert zu sein, die in vergleichsweise schneller Folge wechseln. Es sind drei Perioden mit einer Dauer von vier bis sechs Jahren auszumachen, was eine mehrjährige Variabilität in diesem Gebiet zeigen könnte. Da aber auch ENSO in Perioden von zwei bis sieben Jahren auftritt, könnte hier auch eine Wechselwirkung zwischen ENSO und dem Meereis sichtbar geworden sein. Für 1997/98 ist ein starkes El Niño Phänomen bekannt und in der Zeitreihe ein Minimum zu sehen. Diese eine Übereinstimmung kann allerdings noch nicht als Bestätigung gewertet werden.

Nun untersuchen wir mit diesen Erkenntnissen Abb. 16a für eine Aussage über die langfristige Entwicklung.

Dabei muss zunächst festgehalten werden, dass auch im Bereich des Indian Ozean die Modelle Abweichungen voneinander zeigen. Der Mittelwert der Satelliten beträgt 1,4 Mio. km<sup>2</sup>, der des KAB042 1,6 Mio. km<sup>2</sup> und der des KAB109 1,3 Mio. km<sup>2</sup> (diese Werte ergeben sich auch für den Zeitraum 1978 bis 2000). D.h. generell gibt KAB042 gegenüber den Satellitenwerten 0,2 Mio. km<sup>2</sup>

zu viel an. Des weiteren fällt auf, dass der Trend der Satellitenbeobachtungen mit der nächsten Periode der Meereisfläche ins positive umschlägt. Auch dies bestätigt, dass der Trend von Extrema dominiert ist. KAB042 zeigt insgesamt einen leicht negativen Trend. Man könnte demnach meinen, dass wir uns auch in diesem Gebiet im Moment in einer Phase befinden, in der die Eisfläche zu nimmt, langfristig aber mit einer Abnahme der Eisfläche zu rechnen ist. Wahrscheinlicher ist aber, dass der indische Ozean vor allem durch Extrema geprägt bleibt, die vermutlich eine mehrjährige Periode von vier bis sechs Jahren haben.

## 5. Diskussion

Zur Verlässlichkeit dieser Ergebnisse aus dem Vergleich heraus kann man sagen, dass sich zunächst die Übereinstimmungen für die Gebiete wie folgt ergaben (geordnet mit absteigender Übereinstimmung): Ross-Sea, Weddell-Sea, Gesamtantarktis, Indik, Pazifik und Bellingshausen and Amundsen Seas.

Offensichtlich sind in den Modellen die Tiefenwasserbildungsgebiete, gut eingearbeitet, aber insgesamt gibt es für die Antarktis Defizite. Diese schlagen sich zusammen im Bild Gesamtantarktis nieder. Besonders im Bereich des Pazifischen Ozeans und den zum Pazifik gehörenden BellAm Seas gibt es Verbesserungsbedarf der Modelldaten.

Mit anderen Worten: eine Auswertung der Modelldaten für Weddell- und Ross-Sea ergibt durchaus realistische Ergebnisse. Ähnliches gilt auch noch für die Gesamtantarktis, wenngleich die Abweichungen schon größer sind. Generell sollte man sich, je nach angestrebter Auswertung, besonders den Abweichungen der Modelle an den Extrema des Jahresganges bewusst sein. Ein systematischer Fehler der Modelle ist die zu dem die zu geringe Meereisfläche im (Süd-)Sommer, deren prozentualen größten Anteil die Weddell-Sea liefert, gefolgt vom BellAm Gebiet. Der Indik und Westpazifik, in denen fälschlicherweise im (Süd-)Sommer gar kein Meereis zurück bleibt, haben zusammen daran einen Anteil von 16,7%.

Für die Entwicklung der mit Meereis bedeckten Fläche offenbart sich ein ziemlich einheitliches Bild in der Antarktis: Langfristig ist mit einer Abnahme der vom Meereis bedeckten Fläche zu rechnen, obwohl wir uns noch in einem Zeitabschnitt befinden, indem die Meereisfläche zunimmt. Wie schnell der negative Trend in den einzelnen Regionen überwiegt, kann unterschiedlich sein und ist von vielen Faktoren abhängig. Darüber hinaus wird die Eisfläche vorrangig durch Extrema geprägt, die in einigen Regionen einen eindeutigen Trend kaum zu lassen und die zum Teil periodischen Charakter haben. Die kürzesten Schwankungen von vier bis sechs Jahren treten dabei im Westpazifik auf. In der Ross-Sea treten sie vermutlich mit einer Periode von 12 Jahren auf und für die Gesamtantarktis bleibt die Frage nach einer Langzeitvariabilität, in der eine Periode die gesamte Zeitspanne von 1958 bis 2007 umfasst. Es ist nicht auszuschließen, dass diese Schwankungen zumindest zum Teil im Zusammenhang mit Phänomenen wie SAM oder ENSO stehen, konnte aber auch nicht bestätigt werden.

Bei der Frage nach diesen langfristigen Variabilitäten bleibt abzuwarten, welche Werte uns die Satelliten langfristig liefern und was daraus zu erkennen ist.

Als Ursache für die Abnahme der Meereisfläche kommt durchaus eine erhöhte Atmosphärentemperatur in Frage. Es ist bekannt [6], dass es in der Südhemisphäre von 23,6°S-90°S sowie auch in der Antarktis direkt eine positive Temperatur-Anomalie mit steigendem Trend seit 1930 gibt (siehe Anhang 3).

Auch ein Vergleich der zu Anfang aufgeführten Ozonwerte zeigt Übereinstimmungen mit den für die Fläche des Meereises erhaltenen Ergebnissen. Besonders auffällig ist, dass ab Mitte der siebziger Jahre sowohl die Ozonkonzentration als auch die Meereisfläche deutliche Änderungen zeigen, wobei zusätzlich auch die Fläche des Ozonloches seit dem Ende der siebziger Jahre zunimmt und heute die gesamte Antarktis überdeckt. Genauere Spezifizierungen sind aber nicht möglich.

Fraglich bleibt, warum wir trotz dieser Übereinstimmungen und einer langfristigen Abnahme der Meereisbedeckung für den Zeitraum in dem die Satelliten messen, eine Zunahme des Meereises verzeichnen. Möglicherweise ist dies tatsächlich, wie von Zhang 2007 erörtert [11], auf eine veränderte Tiefenwasserbildung zurück zu führen, und erfordert daher eine gemeinsame Betrachtung von Meereis und Tiefenwasserbildung\*.

Einer weitere Überlegung betrifft den Zusammenhang zwischen Land- und Sea-Ice, da die Antarktis generell (also auch an Land) von einer Schmelze betroffen zu sein scheint und besonders eine Instabilität des west-antarktischen Eisschildes befürchtet wird [2]. Es ist möglich, dass von Festland abrutschende Gletscherteile ebenfalls mit dem Meereis vor Ort wechselwirken. Rutscht Landeis ins Meer, so wird auch dies zu einer Komponente des Wärme- und Frischwassertransports und kaltes, frisches Wasser wäre an der Oberfläche des Südozeans vorzufinden, welches viel schneller gefrieren würde und damit den Ozean anormalerweise von der Atmosphäre isoliert. Demzufolge hätte dies Auswirkungen auf die Tiefenwasserbildung und damit wiederum Auswirkungen auf die MOC.

Darüber hinaus ist auch fraglich, ob die (Meer-)Eisschmelze nicht auch zu einer Erhöhung der Größe und Anzahl der Eisberge führt, welche auf ihrem Weg bedeutende Komponenten des Wärme- und Frischwassertransports sind [10].

Diese beiden Punkte sind auch für die Modellrechnungen wichtige Anhaltspunkte, denn generell werden im verwendeten Modell weder atmosphärische Wechselwirkungen noch Eisberge dargestellt.

Dies sind möglicherweise Gründe für die schlechteren Modellwerte in einigen Regionen.

Jongma et al. beispielsweise betrachten den Süd-Ozean unter der Berücksichtigung der Meereis-Eisberge, die ein Modell sehr verbessern können [10].

Ein weiterer Punkt der für ungenaue Modellwerte sorgt, sind die lückenhaften Messwerte für die Randbedingungen. Das meteorologische Messnetz der Antarktis beschränkt sich auf die wenigen, dortigen Forschungsstationen und wird für den Rest des Gebietes extrapoliert. (Für einen globalen Einblick in das Messnetz siehe Anhang 3.)

Generell sollte erwähnt sein, dass sowohl Satellitenmessungen, als auch Modellrechnungen Nachteile oder zumindest Ungenauigkeiten aufgrund von technischen Gegebenheiten und/oder Paramterisierungen aufweisen.

Denn auch für die Satellitendaten muss man Abstriche machen. Für die, aus den Satellitenbeobachtungen gewonnenen Werte, gibt es verschiedene Berechnungsalgorythmen. Diese können Fehler produzieren, scheinen aber auch für die gleichen Satellitenbeobachtungen unterschiedliche Satellitendaten, die wissenschaftlich ausgewertet werden, zu produzieren [4].



## 6. Literatur

- [d] (Datenquelle der Satellitendaten): <http://www.nsidc.org/data/>
- [1] Parkinson, Claire L.; Cavalieri, Donald J. (2008): Arctic sea ice variability and trends, 1979-2006. *Journal of geophysical research*, **113**, C07003
- [2] Latif, Mobif (2009) Klimawandel und Klimadynamik, Verlag Eugen Ulmer Stuttgart
- [3] Lemke P., Hilmer M. (2003): Meereismodelle. *promet*, **Jahrg. 29, Nr. 1-4**, 90-97 (Deutscher Wetterdienst)
- [4] [http://nsidc.org/cgi-bin/get\\_metadata.pl?id=nsidc-0079](http://nsidc.org/cgi-bin/get_metadata.pl?id=nsidc-0079)
- [5] Parkinson, Claire L.; Cavalieri, Donald J. (2008): Antarctic sea ice variability and trends, 1979-2006. *Journal of geophysical research*, **113**, C07003
- [6] Vorlesung Klimaphysik bei Prof. Latif: verwendete Folie siehe Anhang
- [7] <http://www.atm.ch.cam.ac.uk/tour/index.html>
- [9] Rosemary C. Willatt, Katharine A. Giles, Saymour W. Laxon, Lucas Stone-Drake, and Anthony P. Worby (2010): Field Investigations of Ku-Band Radar Penetration Into Snow Cover on Antarctic Sea Ice. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*, **48**, 365-372
- [10] Jochem I. Jongma, Emmanuelle Driesschaert, Thierry Fichefet, Hugues Goosse, Hans Renssen (2009) The effect of dynamic-thermodynamic icebergs of the Southern Ocean climate in a three-dimensional model. *Ocean Modelling*, **26**, 104-113
- [11] Zhang, J. (2007) Increasing Antarctic Sea Ice under Warming Atmospheric and Oceanic Conditions. *American Meteorological Society*, 2515-2529
- [12] Angela Colling (1989, Neuauflage: 2001,2002,2004,2007) Ocean Circulation, The Open University
- [13] [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/) ...  
...publications\_ipcc\_fourth\_assessment\_report\_wg1\_report\_the\_physical\_science\_basis.htm
- [14] Visbeck M., Hall A. (2002) Synchronous Variability in the Southern Hemisphere Atmosphere, Sea Ice, and Ocean Resulting from Annular Mode. *American Meteorological Society*, 3043-3057
- [15] Kwok R., Comiso J. C. (2002) Southern Ocean Climate and Sea Ice Anomalies Associated with the Southern Oscillation. *American Meteorological Society*, 487-501
- [16] Large W. G. and Yeager S. G. (2004) Diurnal to decadal global forcing for ocean and sea-ice models: the data sets and flux climatologies. (TN-460+STR), Technical Report, NCAR, P.O. Box 3000 Boulder, Colorado 80307
- [17] Large W. G. and Yeager S. G. (2008) The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set, *Climate Dynamics*, **33**(2-3), 341-364

[18] Brodeau L., Barnier B., Treguier A., Penduff T. and Gulev S. (2010) An ERA40-based atmospheric forcing for global ocean circulation models, *Ocean Modelling* **31**(3-4), 88-104

\* Bachelor – Arbeit von Tina Dippe im Studiengang Physik des Erdsystems an der Christian–Albrechts–Universität Kiel

## 7. Anhang

### 1: Matlab-Skript:

```
%Bestimmen der Korrelationskoeffizienten zu den Daten der Bachelorarbeit
clc; clear all; close all
%einlesen der Daten
data_sat=load('D:\Forschung\AA_Meereis\data\ascii_sat\tot_sat_m.dat');
areasat=data_sat(111:266,2);
data_042=load('D:\Forschung\AA_Meereis\data\ascii_042\tot_042_m.dat');
ice042k=data_042(361:516,2);
data_109=load('D:\Forschung\AA_Meereis\data\ascii_109\tot_109_m.dat');
ice109k=data_109(361:516,2);
%berechnen
disp('Korrelation zwischen den Modelllaufen 042 & 109')
K1=corrcoef(ice042k,ice109k)
disp('Korrelation zwischen Modelllauf 042 und Satellit')
K2=corrcoef(areasat,ice042k)
disp('Korrelation zwischen Modelllauf 109 und Satellit')
K3=corrcoef(areasat,ice109k)

% Ausgegebenes Ergebnis
% von jan 1988 bis dec 2000
% Korrelation zwischen den Modelllaufen 042 & 109
% K1 =
% 1.0000 0.3336
% 0.3336 1.0000
% Korrelation zwischen Modelllauf 042 und Satellit
% K2 =
% 1.0000 0.1610
% 0.1610 1.0000
% Korrelation zwischen Modelllauf 109 und Satellit
% K3 =
% 1.0000 0.0205
% 0.0205 1.0000
```

### 2: Ferret-Skripte:

#### bilder.jnl

```
ca da/all
ca window/all
ca var/all

use "ORCA05/mask.nc"
use "ORCA05/KAB109/ORCA05-KAB109_1m_19580101_20041231_soicecov_grid_T.nc"

say fuer_polaren_Plot_KAB109
say Jahresmittel_KAB109
set window 1
let Jahresmittel_der_Eiskonzentration=SOICECOV[d=2,l=251:516@ave]
go sp05 Jahresmittel_der_Eiskonzentration
!frame/file=jmpol_109.gif

say Februar_KAB109
let FEB=SOICECOV[d=2,l=260:504:12]
let Februar_Mittel_der_Eiskonzentration=FEB[l=@ave]
go sp05 Februar_Mittel_der_Eiskonzentration
frame/file=fmpol_109.gif

say September_KAB109
let sep=soicecov[d=2,l=267:507:12]
let September_Mittel_der_Eiskonzentration=sep[l=@ave]
go sp05 September_Mittel_der_Eiskonzentration
frame/file=sempol_109.gif

say fuer_polaren_Plot_KAB042
use "ORCA05/KAB042/KAB042_1m_19580101_20001231_icemod.nc"

say Jahresmittel_KAB042
let Jahresmittel_der_Eiskonzentration=ileadfra[d=1,l=251:516@ave]
go sp05 Jahresmittel_der_Eiskonzentration
frame/file=jmpol_042.gif

say Februar_KAB042
let feb=ileadfra[d=1,l=260:504:12]
```

## M. Freund: Antarktisches Meereis (Bachelor – Arbeit)

```
let Februar_Mittel_der_Eiskonzentration=feb[l=@ave]
go sp05 Februar_Mittel_der_Eiskonzentration
frame/file=fmpol_042.gif
```

```
say September_KAB042
let sep=ileadfra[d=1,l=267:507:12]
let September_Mittel_der_Eiskonzentration=sep[l=@ave]
go sp05 September_Mittel_der_Eiskonzentration
frame/file=smpol_042.gif
```

### fertig\_neu.jnl

```
sp rm /*.gif
ca da/a
ca var/a
ca window/a
```

```
! Einlesen der Satellitendaten
def ax/x=1:1/npoints=1 xlocal
def ax/y=1:1/npoints=1 ylocal
def ax/z=1:1/npoints=1 zlocal
def ax/t=16-NOV-1978:16-DEC-2007:1/units=month/cal=noleap tlocal
def gr/x=xlocal/y=ylocal/z=zlocal/t=tlocal glocal
se da/format="(6(f11))"/var="artotal,aweddell,aindian,apacific,aross,abellam" /skip=1/gr=glocal sat_neu_voll.dat
```

```
!einlesen der Modelldaten
use "ORCA05/mesh_hgr.nc"
use "ORCA05/KAB042/KAB042_1m_19580101_20001231_icemod.nc"
use "ORCA05/KAB109/ORCA05-KAB109_1m_19580101_20041231_soicecov_grid_T.nc"
use "ORCA05/mask.nc"
```

```
!setzen der Variablen
let atotal=ignore0(artotal[d=1,i=1,j=1,k=1,gt=tlocal@asn,l=1:266]/10^6)
let zero=ignore0(tmash[d=mask,k=1,l=1])
let area=e1t[d=mesh_hgr,k=1,l=1]*e2t[d=mesh_hgr,k=1,l=1]
let ida=ileadfra[d=KAB042_1m_19580101_20001231_icemod,k=1]*zero*area[l=1]
let ice042=ida[i=1:720@SUM,j=1:200@SUM,l=251:516]/(10^6*10^6)
let idb=soicecov[d=ORCA05-KAB109_1m_19580101_20041231_soicecov_grid_T,k=1]*zero*area[l=1]
let ice109=idb[i=1:720@SUM,j=1:200@SUM,l=251:516]/10^12
```

```
!plotten der Eisflaeche der Antarktis
set window/new
plot/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Eisflaeche der Antarktis" ice042
ppl xlab "Zeit"
ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
ppl plot
plot/ov/color=green ice109
plot/ov/color=black atotal
frame/file=fertig_neu_1_2.gif
```

```
say vergleich der regionen
go regio
say langzeitanalyse ueber 2 Jahre
go langfer_2
go jahr
```

### regio.jnl

```
!definieren der Regionen
!Weddel-Sea
let awed=ignore0(aweddell[d=1,l=1:266]/10^6)
let wed042=ida[i=456:615@sum,j=1:200@sum,l=251:516]/10^12
let wed109=idb[i=456:615@sum,j=1:200@sum,l=251:516]/10^12
!Bellinghausen and Amundsen Seas
let abel=ignore0(abellam[d=1,l=1:266]/10^6)
let bel042=ida[i=316:455@sum,j=1:200@sum,l=251:516]/10^12
let bel109=idb[i=316:455@sum,j=1:200@sum,l=251:516]/10^12
!Ross-Sea
let aros=ignore0(aross[d=1,l=1:266]/10^6)
let ros042=ida[i=176:315@sum,j=1:200@sum,l=251:516]/10^12
let ros109=idb[i=176:315@sum,j=1:200@sum,l=251:516]/10^12
!Pacific Ocean
let apac=ignore0(apacific[d=1,l=1:266]/10^6)
let pac042=ida[i=36:175@sum,j=1:200@sum,l=251:516]/10^12
let pac109=idb[i=36:175@sum,j=1:200@sum,l=251:516]/10^12
!Indean Ocean
let aind=ignore0(aindian[d=1,l=1:266]/10^6)
let ind042=ice042[l=251:516]-(ida[i=616:36@sum,j=1:200@sum,l=251:516]/10^12)
let ind109=ice109[l=251:516]-(idb[i=616:36@sum,j=1:200@sum,l=251:516]/10^12)
```

```

say Weddel-Sea
let cice02=wed042[l=@shn:25]
let bice02=wed109[l=@shn:25]
let aice02= awed[l=@shn:25]
!Trend
let p=t[g=cice02]
let q=cice02
go regresst
    !gemeinsamer Plot - Teil 1
    plot/vlim=2.7:3.9/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Weddell Sea Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" cice02,qhat
    ppl xlab "Zeit"
    ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
    ppl plot
let p=t[g=bice02]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 2
    plot/color=green/ov bice02,tbice
let p=t[g=aice02]
let q=aice02
go regresst
let taice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 3
    plot/ov/color=black aice02,taice
    frame/file=lwed.gif
say Ross-Sea
let cice02=ros042[l=@shn:25]
let bice02=ros109[l=@shn:25]
let aice02= aros[l=@shn:25]
!Trend
let p=t[g=cice02]
let q=cice02
go regresst
let tcice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 1
    plot/vlim=1.5:2.6/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Ross Sea Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" cice02,tcice
    ppl xlab "Zeit"
    ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
    ppl plot
let p=t[g=bice02]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 2
    plot/ov/color=green bice02,tbice
let p=t[g=aice02]
let q=aice02
go regresst
let taice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 3
    plot/ov/color=black aice02,taice
    frame/file=lros.gif
say Bellinghausen and Amundsen Seas
let cice02=bel042[l=@shn:25]
let bice02=bel109[l=@shn:25]
let aice02= Abel[l=@shn:25]
!Trend
let p=t[g=cice02]
let q=cice02
go regresst
let tcice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 1
    plot/vlim=0.4:1.4/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="BellAm Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" cice02,tcice
    ppl xlab "Zeit"
    ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
    ppl plot
let p=t[g=bice02]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 2
    plot/ov/color=green bice02,tbice
let p=t[g=aice02]
let q=aice02
go regresst
let taice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 3

```

```

        plot/ov/color=black aice02,taice
        frame/file=lbel.gif
say Pacific Ocean
let cice02=pac042[l=@shn:25]
let bice02=pac109[l=@shn:25]
let aice02= apac[l=@shn:25]
!Trend
let p=t[g=cice02]
let q=cice02
go regresst
let tcice=qhat
        !gemeinsamer Plot - Teil 1
        plot/vlim=0.35:1.2/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Pacific Ocaen Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" cice02,tcice
        ppl xlab "Zeit"
        ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
        ppl plot
let p=t[g=bice02]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
        !gemeinsamer Plot - Teil 2
        plot/ov/color=green bice02,tbice
let p=t[g=aice02]
let q=aice02
go regresst
let taice=qhat
        !gemeinsamer Plot - Teil 3
        plot/ov/color=black aice02,taice
        frame/file=lpac.gif
say Indian Ocean
let cice02=ind042[l=@shn:25]
let bice02=ind109[l=@shn:25]
let aice02= aind[l=@shn:25]
!Trend
let p=t[g=cice02]
let q=cice02
go regresst
let tcice=qhat
        !gemeinsamer Plot - Teil 1
        plot/vlim=1:1.9/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Indian Ocean Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" cice02,tcice
        ppl xlab "Zeit"
        ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
        ppl plot
let p=t[g=bice02]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
        !gemeinsamer Plot - Teil 2
        plot/ov/color=green bice02,tbice
let p=t[g=aice02]
let q=aice02
go regresst
let taice=qhat
        !gemeinsamer Plot - Teil 3
        plot/ov/color=black aice02,taice
        frame/file=lind.gif
say Gesamtantarktis
let cice02=ice042[l=@shn:25]
let bice02=ice109[l=@shn:25]
let atot02=atotal[l=@shn:25]
!Trend
let p=t[g=cice02]
let q=cice02
go regresst
let tcice=qhat
        !gemeinsamer Plot - Teil 1
        plot/vlim=7:9.8/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Langzeitvariabilitaet der Gesamtantarktis ueber 2 Jahre" cice02,tcice
        ppl xlab "Zeit"
        ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
        ppl plot
let p=t[g=bice02]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
        !gemeinsamer Plot - Teil 2
        plot/ov/color=green bice02,tbice
let p=t[g=atot02]
let q=atot02

```

M. Freund: Antarktisches Meereis (Bachelor – Arbeit)

```

go regresst
let tatot=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 3
    plot/ov/color=black atot02,tatot
    frame/file=lges.gif

langfer_2.jnl
say Gesamtantarktis
!Eisflaeche Modelllauf042
let l042ice02=ice042[l=@shn:25]
let m042p=l042ice02[l=@ave]
let m042=l042ice02*0+m042p
!Trend
let p=t[g=l042ice02,l=251:516]
let q=l042ice02
go regresst
    !gemeinsamer Plot - Teil 1
    plot/vlim=-1:1/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" l042ice02-m042,qhat-m042
    ppl xlab "Zeit"
    ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
    ppl plot
!Eisflaeche Modelllauf109
let l109ice02=ice109[l=@shn:25]
let m109p=l109ice02[l=@ave]
let m109=l109ice02*0+m109p
!Trend
let p=t[g=l109ice02,l=251:516]
let q=l109ice02
go regresst
let t109ice02=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 2
    plot/ov/color=green l109ice02-m109,t109ice02-m109

!icearea
let gare02=atotal[l=@shn:25]
let marep=gare02[l=@ave]
let mare=gare02*0+marep
!Trend
let p=t[g=gare02,l=1:266]
let q=gare02
go regresst
let tgare02=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 3
    plot/ov/color=black gare02-mare,tgare02-mare
    frame/file=langfer_ges.gif

say Weddel-Sea
let cice02=wed042[l=@shn:25]
let bice02=wed109[l=@shn:25]
let aice02= awed[l=@shn:25]
let mcicep=cice02[l=@ave]
let mcice=cice02*0+mcicep
let mbicep=bice02[l=@ave]
let mbice=bice02*0+mbicep
let maicep=aice02[l=@ave]
let maice=aice02*0+maicep
!Trend
let p=t[g=cice02,l=251:516]
let q=cice02
go regresst
let tcice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 1
    plot/vlim=-0.45:0.45/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Weddel Sea Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" cice02-
    mcice,tcice-mcice
    ppl xlab "Zeit"
    ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
    ppl plot
let p=t[g=bice02,l=251:516]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 2
    plot/ov/color=green bice02-mbice,tbice-mbice
let p=t[g=aice02,l=1:266]
let q=aice02
go regresst
let taice=qhat
    !gemeinsamer Plot - Teil 3
    plot/ov/color=black aice02-maice,taice-maice

```

```

frame/file=weddell_20.gif
say Ross-Sea
let cice02=ros042[l=@shn:25]
let bice02=ros109[l=@shn:25]
let aice02= aros[l=@shn:25]
let mcicep=cice02[l=@ave]
let mcice=cice02*0+mcicep
let mbicep=bice02[l=@ave]
let mbice=bice02*0+mbicep
let maicep=aice02[l=@ave]
let maice=aice02*0+maicep
!Trend
let p=[g=cice02,l=251:516]
let q=cice02
go regresst
let tcice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 1
plot/vlim=-0.5:0.5/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Ross Sea Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" cice02-mcice,tcice-
mcice
ppl xlab "Zeit"
ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
ppl plot
let p=[g=bice02,l=251:516]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 2
plot/color=green/ov bice02-mbice,tbice-mbice
let p=[g=aice02,l=1:266]
let q=aice02
go regresst
let taice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 3
plot/color=black/ov aice02-maice,taice-maice
frame/file=ross_20.gif
say Bellinghausen and Amundsen Seas
let cice02=bel042[l=@shn:25] !ueber zwei Jahre
let bice02=bel109[l=@shn:25] !ueber zwei Jahre
let aice02= abel[l=@shn:25] !ueber zwei Jahre
let mcicep=cice02[l=@ave]
let mcice=cice02*0+mcicep
let mbicep=bice02[l=@ave]
let mbice=bice02*0+mbicep
let maicep=aice02[l=@ave]
let maice=aice02*0+maicep
!Trend
let p=[g=cice02,l=251:516]
let q=cice02
go regresst
let tcice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 1
plot/vlim=-0.5:0.4/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="BellAm Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" cice02-mcice,tcice-
mcice
ppl xlab "Zeit"
ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
ppl plot
let p=[g=bice02,l=251:516]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 2
plot/ov/color=green bice02-mbice,tbice-mbice
let p=[g=aice02,l=1:266]
let q=aice02
go regresst
let taice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 3
plot/color=black/ov aice02-maice,taice-maice
frame/file=bellam_20.gif
say Pacific Ocean
let cice02=pac042[l=@shn:25]
let bice02=pac109[l=@shn:25]
let aice02= apac[l=@shn:25]
let mcicep=cice02[l=@ave]
let mcice=cice02*0+mcicep
let mbicep=bice02[l=@ave]
let mbice=bice02*0+mbicep
let maicep=aice02[l=@ave]

```



## M. Freund: Antarktisches Meereis (Bachelor – Arbeit)

```

let maice=aice02*0+maicep
!Trend
let p=t[g=cice02,l=251:516]
let q=cice02
go regresst
let tcice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 1
plot/vlim=-0.3:0.3/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Pacific Ocaen Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" cice02-
mcice,tcice-mcice
ppl xlab "Zeit"
ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
ppl plot
let p=t[g=bice02,l=251:516]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 2
plot/color=green/ov bice02-mbice,tbice-mbice
let p=t[g=aice02,l=1:266]
let q=aice02
go regresst
let taice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 3
plot/color=black/ov aice02-maice,taice-maice
frame/file=paco_20.gif
say Indian Ocean
let cice02=ind042[l=@shn:25]
let bice02=ind109[l=@shn:25]
let aice02= aind[l=@shn:25]
let mcice=cice02[l=@ave]
let mcice=cice02*0+mcicep
let mbicep=bice02[l=@ave]
let mbice=bice02*0+mbicep
let maicep=aice02[l=@ave]
let maice=aice02*0+maicep
!Trend
let p=t[g=cice02,l=251:516]
let q=cice02
go regresst
let tcice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 1
plot/vlim=-0.3:0.3/hlim=16-JAN-1958:16-DEC-2007/color=blue/title="Indian Ocean Langzeitvariabilitaet ueber 2 Jahre" cice02-
mcice,tcice-mcice
ppl xlab "Zeit"
ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
ppl plot
let p=t[g=bice02,l=251:516]
let q=bice02
go regresst
let tbice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 2
plot/color=green/ov bice02-mbice,tbice-mbice
let p=t[g=aice02,l=1:266]
let q=aice02
go regresst
let taice=qhat
!gemeinsamer Plot - Teil 3
plot/color=black/ov aice02-maice,taice-maice
frame/file=indo_20.gif

jahr.jnl
!mittlere Jahregaenge im Vergleich
say Gesamtantarktis
def ax/t=16-JAN:16-DEC/npoints=12/units=month/cal=noleap/mod myt
let jc=ice042[gt=myt@mod]
let jb=ice109[gt=myt@mod]
let ja=atotal[gt=myt@mod]
plot/color=blue/title="Jahresgang der Eisflaeche" jc
ppl xlab "Zeit"
ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
ppl plot
plot/ov/color=green jb
plot/ov/color=black ja
frame/file=fertig_neu_2.gif
say Weddell Sea
let jc=wed042[gt=myt@mod]
let jb=wed109[gt=myt@mod]

```

```
let ja= awed[gt=myt@mod]
  plot/color=blue/title="Jahresgang der Weddell Sea" jc
  ppl xlab "Zeit"
  ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
  ppl plot
  plot/ov/color=green jb
  plot/ov/color=black ja
  frame/file=wed_1.gif
```

say Ross Sea

```
let jc=ros042[gt=myt@mod]
let jb=ros109[gt=myt@mod]
let ja= aros[gt=myt@mod]
  plot/color=blue/title="Jahresgang der Ross Sea" jc
  ppl xlab "Zeit"
  ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
  ppl plot
  plot/ov/color=green jb
  plot/ov/color=black ja
  frame/file=ros_1.gif
```

say BellAm Seas

```
let jc=bel042[gt=myt@mod]
let jb=bel109[gt=myt@mod]
!let jd=(jc+jb)/2
let ja= abel[gt=myt@mod]
  plot/color=blue/title="Jahresgang der BellAm Seas" jc
  ppl xlab "Zeit"
  ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
  ppl plot
  plot/ov/color=green jb
  plot/ov/color=black ja
  !plot/ov/color=blue jd
  frame/file=bel_1.gif
```

say Pacific

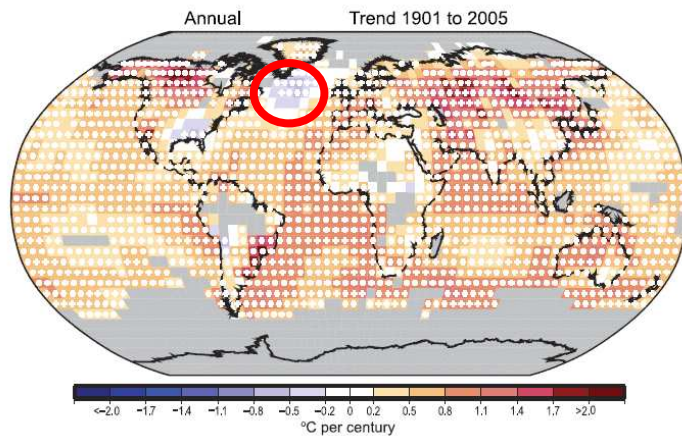
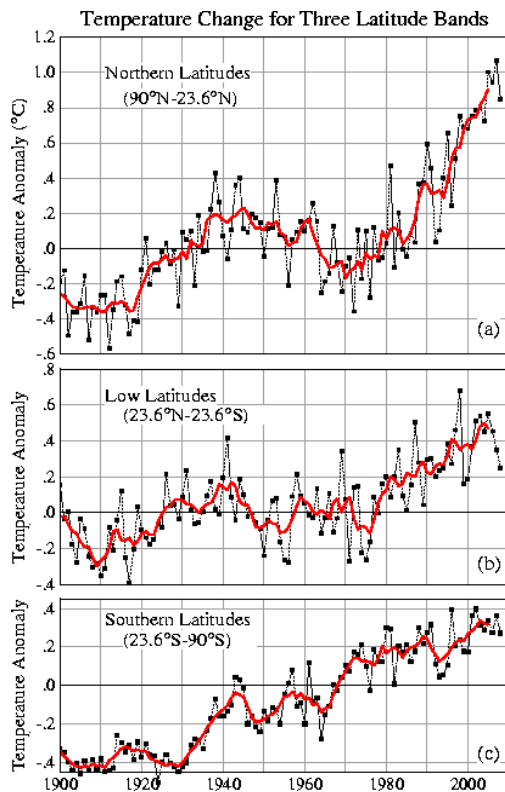
```
let jc=pac042[gt=myt@mod]
let jb=pac109[gt=myt@mod]
let ja= apac[gt=myt@mod]
  plot/color=blue/title="Jahresgang des Pacific" jc
  ppl xlab "Zeit"
  ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
  ppl plot
  plot/ov/color=green jb
  plot/ov/color=black ja
  frame/file=pac_1.gif
```

say Indic

```
let jc=ind042[gt=myt@mod]
let jb=ind109[gt=myt@mod]
let ja= aind[gt=myt@mod]
  plot/color=blue/title="Jahresgang des Indic" jc
  ppl xlab "Zeit"
  ppl ylab "Eisflaeche in 10^6 km^2"
  ppl plot
  plot/ov/color=green jb
  plot/ov/color=black ja
  frame/file=ind_1.gif
```

3: Folie der Klimaphysik-Vorlesung von Prof. Latif:

# Details der Erwärmung



**Die Datenbasis ist nicht befriedigend. Es gab in der Vergangenheit sehr viele Lücken.**

Besonders Interessant:

- (1) „Temperature Changes for Three Latitude Bands“ (c) von etwa 1960 bis 2000. In dem in der Arbeit betrachteten Zeitraum ist ein deutlicher Anstieg der Temperaturen in den südlichen Breiten zu sehen.
- (2) Die rechte Abbildung hat für die grauen Flächen keine Daten und verweist damit deutlich auf die schlechte Datenlage, vorrangig in der Antarktis.

## **8. Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Die eingereichte schriftliche Fassung der Arbeit entspricht der auf dem elektronischen Speichermedium. (Name der Datei: ba\_freund\_2010.pdf)

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit noch nicht als Abschlussarbeit an anderer Stelle vorgelegen hat.

Kiel, den 06.07.2010 \_\_\_\_\_

Madeleine Freund