

## Abschlussbericht

# ERANET EUROPOLAR Großskalige Entwicklung des arktischen Meereises und ihre Bedeutung für die Ozeanzirkulation

im Verbundprojekt:

Arctic Ocean sea-ice and ocean circulation changes using satellite methods  
(SATICE)

Zuwendungsempfänger: <b>Stiftung Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung</b>	Förderkennzeichen: <b>03F0615A</b>
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2010 – 31.12.2012	
Antragsteller: Prof. Dr. Rüdiger Gerdes Projektwissenschaftler: Dr. Cornelia Köberle Dr. Karel Castro-Morales	

### I. Kurzdarstellung

#### 1. Aufgabenstellung

Das arktische Meereis hat sich in der letzten 20 Jahren stark verändert. Diese Änderungen gehen einher mit Veränderungen in der Meereisdynamik. Das allgemeine Ziel von SATICE bestand darin, durch die Entwicklung und die Erprobung von neuen, auf GPS und satellitengestützte Fernerkundung beruhende Beobachtungstechniken, zum Verständnis der Wechselwirkungen im Arktischen Meereis-Ozean System beizutragen. Die Ergebnisse werden Einfluss auf die Modellierung der Schlüsselprozesse von Meereis und Ozean Parameter haben und werden durch den Vergleich mit sich auf dem Stand der Technik befindenden Meereis-, Ozean-, und Tidenmodellen die Validierung der Methoden unterstützen. Die Genauigkeit der Messungen der dynamischen Topographie (DT, definiert als die mittlere Höhe des Wasserstandes über dem Geoid) durch Satellitenaltimetrie des Arktischen Ozeans hängt von der Fähigkeit den Meereisfreibord, die Ozeantopographie und die Tiden zu trennen ab (Forsberg et al., 2007). Die Trennbarkeit wiederum hängt vom Erfolg von Filtertechniken niedriger Ordnung und der Charakterisierung der Wellenformen bei der Abbildung der Satellitenantwort über offenem Wasser und dünnem Eis auf den Meeresspiegel ab. Flugzeug gestützte Studien mit Lasern helfen die Fehler zu quantifizieren.

Um diese Fehler abzuschätzen, war ein Hauptziel des SATICE Projektes die Entwicklung und Ausbringung von 'geodetic-quality' GPS Meereisdriftbojen (hpGPS), die kontinuierlich Höhenschätzungen in cm-Genauigkeit liefern, um Tidenmodelle des Arktischen Ozeans zu verbessern.

Die überspannenden Ziele des Projektes sind: 1) die Entwicklung und Testen neuer Satelliten gestützter Methoden zur Beobachtung des Meereises und der Ozean DT; 2) die Verbesserung von gekoppelten Meereis-Ozean-Atmosphärenmodellen des Arktischen Ozeans.

Um dieses zu erreichen, war das SATICE Projekt in vier Arbeitspakete (WP) unterteilt: WP1, Geräteentwicklung; WP2, Feldmessungen; WP3, Datenaufbereitung und WP4, Modellierung.

Der vorliegende Endbericht beschreibt die Ergebnisse des Arbeitspaketes 4 (WP4) des SATICE Projektes. Das Hauptziel dieses Teilprojektes ist: 1) die Vertiefung des Verständnisses der großskaligen arktischen Meereisentwicklung und ihre Wechselwirkung mit dem Arktischen Ozean und 2) die Verbesserung von existierenden Ozean-Meereismodellen mit Hilfe der Informationen aus WP3.

Gegenwärtige Ozean-Meereismodelle, wie auch gekoppelte Klimamodelle, enthalten unzählige unsichere und teilweise sogar beliebige Parametrisierungen von Meereisprozessen und sehr vereinfachte Meereisdynamik. Zuerst werden Satellitenbeobachtungen der Eisdicke und Bedeckung mit Modellergebnissen

aus historischen Modellläufen verglichen, um Abweichungen zu identifizieren. Dann werden neue Parametrisierungen in das Modell eingepflegt und bewertet. Dazu werden neue historische Modellläufe ausgeführt. Basierend auf diesen Ergebnissen werden Empfehlungen ausgesprochen, die einen Einfluss auch auf globale Klimamodelle haben.

## **2. Voraussetzungen**

### Zusammensetzung der Arbeitsgruppe:

Prof. Dr. R. Gerdes, Projektleiter

Dr. Karel Castro-Morales, Projektwissenschaftlerin

Dr. Cornelia Köberle, Projektwissenschaftlerin

Dr. F. Kauker, Dr. M. Karcher, Dr. M. Losch, Dr. K. Riemann-Campe,

Das AWI verfügt über eine umfassende Raum- und Rechner-Infrastruktur die dem Projekt zur Verfügung stand. Die Arbeitsgruppe zur Modellierung der Zirkulation und Meereis des Nordpolarmeers hatte in den Jahren vor Projektbeginn eine Hierarchie von Ozean-Meereis Modellen für das System aus Atlantik und Nordpolarmeer entwickelt (NAOSIM, North Atlantic-Arctic Ocean Sea Ice Models). Diese Modelle waren in verschiedenen nationalen und internationalen Projekten zum Einsatz gekommen und mit anderen Modellen verglichen worden (unter den Projekten DEKLIM, SIRRO, ASOF-N, VEINS, CONVECTION, DAMOCLES, AOMIP). NAOSIM-Versionen waren eingesetzt worden, um die Variabilität des Ozean-Meereissystems des Nordpolarmeeres über die letzten 50 bis 60 Jahre zu beschreiben (z.B. Gerdes et al., 2003; Köberle and Gerdes, 2003; Karcher et al., 2003; Kauker et al., 2003; Gerdes et al., 2005).

In letzter Zeit wird auch eine regionale Konfiguration des arktischen Ozeans basierend auf dem Modell des Massachusetts Institute of Technology general circulation model (MITgcm) (Marshall et al., 1997) benutzt. Anwendungen und Modellbeschreibungen dieser und ähnlicher Konfigurationen wurden in den letzten 5 Jahren in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben (z.B. Losch et al., 2010; Nguyen et al., 2009; Nguyen et al., 2011).

## **3. Planung und Ablauf**

Mit dem regionalen, gekoppelten Eis-Ozean Modell NAOSIM (North Atlantic/Arctic Sea Ice Ocean Model) und MITgcm (Massachusetts Institute of Technology general circulation model) wurden Experimente zur Meereisdynamik ausgeführt. Diese wurden mit atmosphärischen Daten aus verschiedenen Reanalyse Projekten (NCEP-NCAR, CORE, JRA25, ERAinterim, DRAKKAR) im Zeitraum von 1948 bis 2007 angetrieben.

Eine hochauflösende (~9km) NAOSIM Version mit 50 vertikalen Schichten wurden mit künstlichen Tracern versehen. Das Modell wurde mit täglichen realitätsnahen atmosphärischen Daten (NCEP) angetrieben. Damit sind Vergleiche mit aktuellen Messungen möglich. Diese künstlichen Tracer erlauben eine erweiterte Diagnostik des Meereis-Ozean Zustandes. Einen solchen Ozean-Tracer hat die Süßwasserflüsse als obere Randbedingung, die mit dem Schmelzen und Frieren von Meereis verbunden sind. Dies erlaubte ein besseres Verständnis der Rolle des Meereises für die Salzgehaltsbilanz des Nordpolarmeeres.

Parallel wurde ein Vergleich zwischen NAOSIM und MITgcm vorgenommen. Beide Modelle wurden in einer gleichen Konfiguration aufgesetzt. Die horizontale Auflösung beträgt 25km und beide Modelle haben eine vertikale Auflösung mit 25 Schichten. Ziel war die Bestimmung des Einflusses unterschiedlicher Parametrisierungen der Modelle. Modellparameter wurde soweit möglich einheitlich gesetzt. Dabei wurde sich an das AOMIP Protokoll gehalten (<http://www.who.edu/page.do?pid=29920>).

In einer ausführlichen Analyse wurden Advektionsschemata, horizontale Diffusitäten und vertikale Mixingschemata variiert und deren Einfluss bestimmt. Des Weiteren wurden unterschiedliche atmosphärische Antriebsdatensätze (Reanalysen) benutzt. Diese Datensätze variieren besonders in der nur unvollkommen beobachteten Arktis sehr stark und es sollte sicher gestellt werden, dass gefundene Unterschiede in den Modellen nicht sensitiv auf die unterschiedlichen Antriebe reagieren.

Auf Satelliten basierende Beobachtungen des Meereises wurden herangezogen, um gefundene Unterschiede in den Modellen zu bewerten, soweit dieses durch die unbefriedigende Datenlage möglich war.

## **4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

In den vergangenen 50 Jahren war die Ausdehnung und Dicke des arktischen Meereises starken Veränderungen unterworfen (Rothrock et al., 1999; Francis et al., 2005; Serreze et al., 2007). Verbunden damit war ein Rückgang der Menge des mehrjährigen Eises (Maslanik et al., 2007). Der Rückgang der Meereisausdehnung und Meereisfläche mit saisonaler und/oder mehrjähriger Meereisbedeckung über die gesamte Arktis beschleunigte von etwa 2,5% per Dekade auf über 10% per Dekade (Comiso et al., 2008).

Dieser dramatische Wandel wird das Klima auf lokaler, regionaler und globaler Ebene beeinflussen und ist einer der deutlichsten Auswirkungen des Klimawandels weltweit.

Im Jahr 2007 schrumpfte die Ausdehnung der Sommereisdecke auf ein Allzeittief von nur 4,3 Millionen km<sup>2</sup> (Stroeve et al., 2008, dies wurde 2012 mit 3.6 Millionen km<sup>2</sup> noch einmal deutlich unterboten). Die von Satelliten gemessene Meereisausdehnung liegt mehr als zwei Standardabweichungen unter den Vorhersagen des IPCC Reports. Dies mag teilweise durch die interne Variabilität des arktischen Klimasystems und der Unsicherheit der Modelle erklärbar sein. Es unterstreicht jedoch auch den Einfluss der Thermodynamik und der dynamischen Prozesse, wie: den Anstieg der Lufttemperatur an der Oberfläche, Präkonditionierung der Eisbedeckung (Zhang et al., 2008; Comiso et al., 2008; Perovich und Richter-Menge, 2009), Verschiebungen der Meereiszirkulation durch die Veränderungen der Meeresströmungen (Kwok, 2008) besonders in Beaufortwirbel und der Transpolar drift und dem lückenhaften Verständnis der Gezeiten Wechselwirkung mit dem Meereis.

Komplexe numerische Modelle mit realistischen Anfangs- und Randbedingungen können dabei helfen, die oben aufgeführten Veränderungen konsistent zu beschreiben und zu verstehen. Insbesondere ist es mit Modellen möglich a) die dynamischen Beziehungen zwischen verschiedenen Klimasystemkomponenten zu bewerten, b) die quantitative Rolle bestimmter Prozesse in der Impuls- und der Massenbilanz des Meereises und des Ozeans zu bestimmen, c) die Rolle des atmosphärischen und ozeanischen Antriebs für die Meereisdynamik und Thermodynamik zu quantifizieren, d) sowie die groß-skalige und langfristige Entwicklung des Meereises und Ozeans abzuschätzen. Wegen der ausschlaggebenden Rolle der Modelle bedarf es sorgfältiger Tests und kritischer Einschätzungen. Leider sind viele Aspekte des arktischen Meereises immer noch nicht gut genug bekannt, um die Modelle und ihre Parameter ausreichend einzuschränken. Ziel des SATICE Projektes ist es zu einer Verbesserung dieser Situation beizutragen.

## Literatur

- Comiso, J.C., C.L. Parkinson, R. Gersten and L. Stock, 2008. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L01703.
- Forsberg, et al., 2007. ARCGICE: Combination of spaceborne, airborne and in-situ gravity measurements in support of Arctic sea-ice thickness mapping, ESA Contract report/DNS Tech. Report 7, 136 pp.
- Francis, J.A., E. Hunter, J.R. Key and X. Wang, 2005. Clues to variability in Arctic minimum sea ice extent. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L21501.
- Gerdes, R., M.J. Karcher, F. Kauker and U. Schauer, 2003. Causes and development of repeated Arctic Ocean warming events. *Geophys. Res. Lett.*, 20(9), 1980.
- Köberle, C. and R. Gerdes, 2003. Mechanisms determining the variability of Arctic sea ice conditions and export. *J. Clim.*, 16, 2842-2858.
- Karcher, M.J., R. Gerdes, F. Kauker and C. Köberle, 2003. Arctic warming-evolution and spreading of the 1990s warm event in the Nordic seas and the Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 108(C2), 3034.
- Kauker, F., R. Gerdes, M. Karcher, C. Köberle and J. Lieser, 2003. Variability of Arctic and North Atlantic sea ice: a combined analysis of model results and observations from 1978 to 2001. *J. Geophys. Res.*, 108(C6).
- Kwok, R., 2008. Outflow of Arctic sea ice into the Greenland and Barents Seas: 1979-2007. *J. Clim.* 22(9), 2438-2457.
- Losch, M., D. Menemenlis, J.-M. Campin, P. Heimbach, C. Hill, 2010. On the formulation of sea-ice models. Part 1: Effects of different solver implementations and parameterizations. *Ocean Model.*, 33, 129-144.
- Manizza, M., M.J. Follows, S. Dutkiewicz, J.W. McClelland, D. Menemenlis, C.N. Hill, A. Townsend-Small and B.J. Peterson, 2009. Modeling transport and fate of riverine dissolved organic carbon in the Arctic Ocean. *Global Biogeochem. Cy.*, 23, GB40006.
- Marshall, J., A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman and C. Heisey, 1997. A finite-volume, incompressible Navier-Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *J. Geophys. Res.*, 102(C3), 5753-5766.
- Maslanik, J., S. Drobot, C. Fowler, W. Emery and R. Barry, 2007. A younger, thinner Arctic ice cover: increased potential for rapid, extensive sea-ice loss. *Geophys. Res. Lett.*, 34(24), L24501.
- Nguyen, A.T., D. Menemenlis and R. Kwok, 2009. Improved modelling of the Arctic halocline with a subgrid-scale brine rejection parameterization. *J. Geophys. Res.*, 114, C11014.
- Nguyen, A.T., D. Menemenlis and R. Kwok, 2011. Arctic ice-ocean simulation with optimized model parameters: approach and assessment. *J. Geophys. Res.*, 116, C04025.
- Perovich, D.K. and J. A. Richter-Menge, 2009. Loss of sea ice in the Arctic. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 1, 417-441.
- Rothrock, D.A., Y. Yu and G.A. Maykut, 1999. Thinning of the Arctic sea-ice cover. *Geophys. Res. Lett.* 26(23), 3469-3472.
- Serreze, M.C., M.M. Holland and J. Stroeve, 2007. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *Science*. 315(5818). 1533-1536.
- Stroeve, J., M. Serreze, S. Drobot, S. Gearheard, M. Holland, J. Maslanik, W. Meier and T. Scambos, 2008. Arctic sea ice extent plummets in 2007. 89(2), 13-14.
- Zhang, J., M. Steele, R. Lindsay, A. Schweiger and J. Morison, 2008. Ensemble 1-year predictions of Arctic sea ice for the spring and summer of 2008. *Geophys. Res. Lett.* 35, L08502.

## 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Modellarbeiten waren eng mit mehreren nationalen und internationalen Projekten verbunden bzw. beeinflussten und beeinflussen diese Projekte. Zu nennen sind:

Das EU-Projekt ArcRisk (Arctic Health Risks: Impacts on health in the Arctic and Europe owing to climate-induced changes in contaminant cycling) das am 01.06.2009 offiziell begonnen hat. Dieses interdisziplinäre Projekt zielt darauf, die Erforschung von Umweltschadstoffen, Klimaveränderungen und Gesundheitsfürsorge zu verbinden und schließlich die EU Politik zu unterstützen. ArcRisk besteht aus einem Konsortium mit 21 Partnern auf zwölf EU Staaten.

Das EU-Projekt ACCESS (Arctic Climate Change, Economy and Society) das am 01.03.2011 offiziell begonnen hat. Hier geht es um die Auswirkungen der Veränderungen, insbesondere des Meereises, im Nordpolarmeer auf ökonomische und soziale Aspekte in der Arktis, wie z.B. Mariner Transport, Fischerei, Tourismus, und den Abbau von Rohstoffen. ACCESS ist ein Konsortium aus 27 Partnern aus neun EU Staaten.

Das Helmholtz-Verbund Projekt REKLIM (Regionale Klimaveränderungen) das 2010 offiziell begonnen hat. Acht Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft haben sich zusammengeschlossen um u.a. folgende Fragen zu beantworten: Wie hängt die Entwicklung des Klimas von der Wechselwirkung zwischen Atmosphäre-Ozean-Eis und Landoberfläche ab? Welchen Einfluss haben natürliche und anthropogene Prozesse? Wie groß sind die Verluste der kontinentalen Eismassen und wie reagiert der Meeresspiegel?

## II. Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse im Vergleich zu Zielsetzung

Die Zuwendungen wurden verwendet zur Finanzierung der Wissenschaftlerstellen für  
Dr. Karel Castro-Morales, Angestellt von 01.06.2011 bis 31.12.2012

Auslandsreisen:

SATICE progress meeting in Barcelona, Spanien, 21-22 May 2012 (Castro-Morales, Gerdes)  
European Geophysical Union General Assembly in Wien, April 2012 (Castro-Morales)  
International Polar Year 2012, Montréal, Canada, April 2012 (Gerdes, Köberle)

### Folgende Studien wurden unternommen (eine deutsche ausführliche Zusammenfassung ist angehängt):

- A) We have performed ocean-sea ice hindcast simulations until the end of 2011 with realistic atmospheric forcing and using the highest resolution version of NAOSIM (9-km horizontal resolution, 50 levels in the vertical). Additional tracers carried in the simulations are used to trace Atlantic Water and the salinity signal associated with melting and freezing in the Arctic Ocean and further on into the Nordic Seas and the subpolar North Atlantic.

From experiments using a salinity-like tracer to trace fresh water exchange between sea ice and ocean, we see large interannual fluctuations in the location and intensity of melt water input, especially in winter near the sea ice margin in the Barents, Kara and other Siberian shelf seas. Interestingly, melt water rejected into the ocean in the Barents Sea and north of Svalbard is partially transferred to deeper layers and contribute substantially to the mid-depth hydrographic distributions in the Arctic (Fig. 1). Furthermore, Atlantic water flux onto shallow shelf seas and the impact on sea ice processes could be studied with the combination of Atlantic water and melt water tracers.

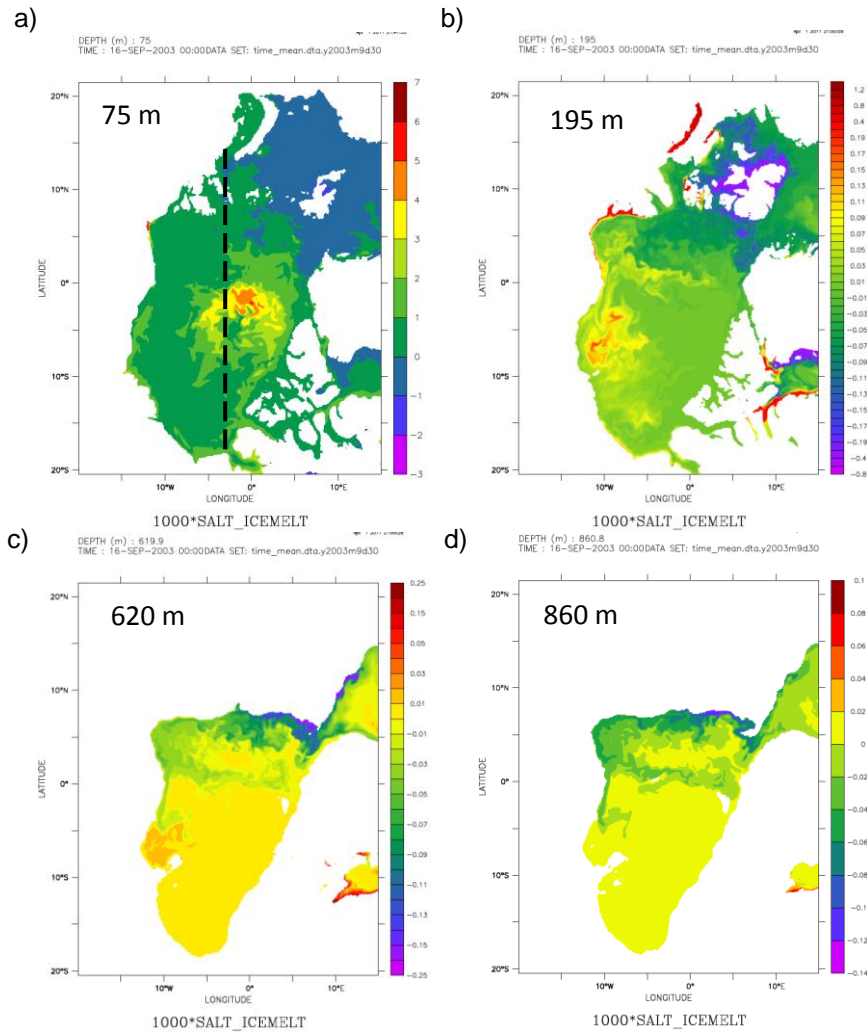


Fig. 1 - Model simulation (NAOSIM 9-km) of Arctic Ocean circulation for the distribution of a salinity-like tracer at different depth levels: a) 75 m, b) 195 m, c) 620 m and d) 860 m. Negative values indicate the fate of fresher water. Dashed line in panel (a) indicates the location of a cross section shown in Fig. 2.

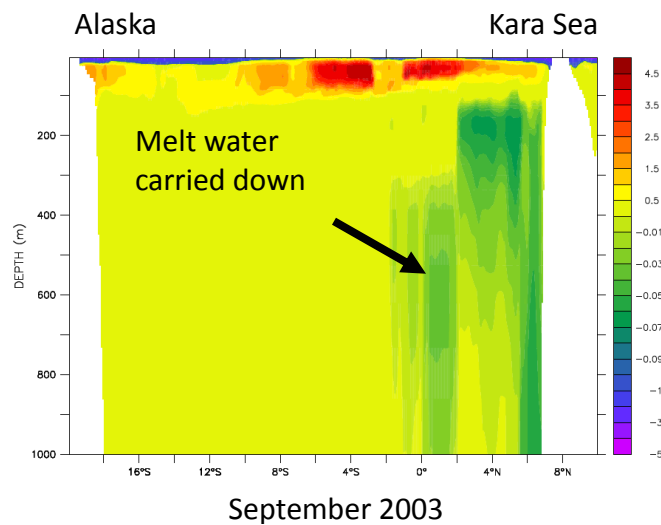


Fig. 2 - Cross section from Alaska to Kara Sea of simulated Arctic Ocean water column. The low values of a salinity-like tracer represent the distribution of fresh water, from melt sea ice, distributed to deep layers through the water column, while sea ice is located on the surface and dense water from salt rejection underneath.

B) With the aim of model improvements in the sea ice dynamics, we have done sensitivity experiments with the MITgcm configuration. First, we have tested different combinations for two sea ice parameters: 1) internal ice strength ( $P^*$ ), which refers to the maximum compressive stress above which the deformation of sea ice sets, and 2) lead closing parameter ( $h_0$ ), which characterizes the thermodynamic heat loss through thin ice and determines the rate of decay of the fraction of open water due to sea ice growth by the demarcation between lateral and basal freezing (Hibler, 1979). These parameters are usually taken as constant in space and time and are determined empirically. For  $P^*$  we have done experiments with two values which are typically used in literature,  $2.7 \times 10^4 \text{ N m}^{-2}$  (Hibler, 1979) and  $1.5 \times 10^4 \text{ N m}^{-2}$  used typically in NAOSIM. For  $h_0$  we have used 0.5 m (Hibler, 1979) and 1 m used in Hibler and Akeley (1983) and also in the NAOSIM configuration. A lower  $P^*$  value represents growing sea ice, as well as a higher value would correspond to thicker ice. An increase in  $h_0$  can lead to an increase in summer ice extent and volume because it would slow the lead closing.

Sensitivity experiments combining  $P^*$  and  $h_0$  were performed. One set of experiments was done using as atmospheric forcing the Coordinated Ocean Research Experiment version 2 (COREv2) forcing based on NCAR/NCEP (Large and Yeager, 2008) for time integration from 1948 to 2007. A second set of experiments was done using the Japanese Reanalysis-25 (JRA25) (Onogi et al., 2007) covering a time integration from 1979 to 2010.

To illustrate the model simulation output from our sensitivity experiments, a time series for sea ice extent for September from 1990 to 2007 is shown in Fig. 3. To validate our results, comparison to satellite observations from SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager; National Sea Ice Data Center) and OSISAF (Ocean and Sea Ice Satellite Application Facility; Meteo-France) are also included.

Changes on the  $P^*$  and  $h_0$  were found to cause moderate quantitative modifications in the simulated sea ice thickness. However, the September sea ice extent was strongly affected, with an average increase of  $1.2 \text{ mio km}^2$  from 1990-2007 with a corresponding increase of 0.5 m in  $h_0$  (i.e. from 0.5 to 1 m) and keeping constant a  $P^*$  value of  $1.5 \times 10^4 \text{ N m}^{-2}$ . Moderate difference was found when the  $P^*$  is solely changed from a low value of  $1.5 \times 10^4 \text{ N m}^{-2}$  to  $2.7 \times 10^4 \text{ N m}^{-2}$  and keeping constant  $h_0$  at 0.5 (or 1 m), with a slight increase on September sea ice extent, when using the lower  $P^*$  value, of about  $0.2 \text{ mio km}^2$  (Fig. 3a).

Contrasting results in comparison to SSM/I September sea ice extent were observed for the traditional combinations of parameters found in sea-ice models (i.e.  $h_0=1.0 \text{ m}$   $P^*=1.5 \times 10^4 \text{ N m}^{-2}$ ; and  $h_0=0.5 \text{ m}$   $P^*=2.7 \times 10^4 \text{ N m}^{-2}$ ).

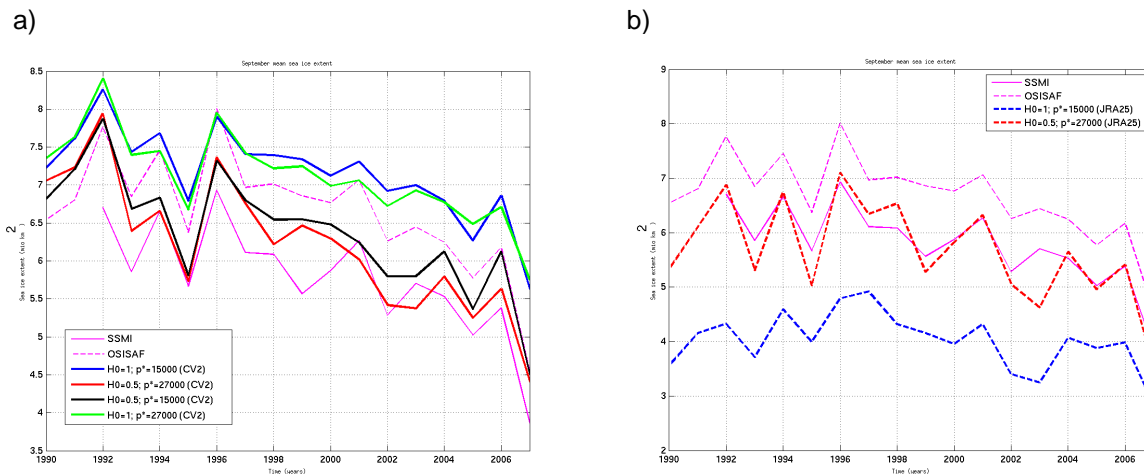


Fig. 3 – Simulated September sea-ice extent from 1990 to 2007 from model simulations using different combinations of the sea-ice parameters  $P^*$  and  $h_0$ , as well as different atmospheric forcings: a) COREv2 and b) JRA25. The corresponding values for satellite observations from SSM/I and OSISAF are also depicted.

The overall sea-ice extent is considerably decreased by forcing our model with JRA25 (by as much as 2 mio km<sup>2</sup>) than with COREv2 forcing, for which the opposite occurred with about 2 mio km<sup>2</sup> higher than the September sea-ice extent from satellite observations (Figs. 3a and b). These results confirm the high sensitivity on model results to different prescribed atmospheric forcings, particularly due to differences in radiation fluxes, air temperature and wind speed. And encourage more studies on this regard.

However, for both set of simulations using both COREv2 and JRA25, a common agreement towards satellite observations from SSM/I was found when using the standard combination of sea-ice parameters after Hibler, 1979 ( $h_0=0.5$  m  $P^*=2.7\times 10^4$  N m<sup>-2</sup>). We consider these pair of values as standard for our MITgcm model configuration for further simulations.

Despite the improvement on the September sea ice extent, the simulated sea-ice thickness was thin (for about 2 to 3 m lower in the regions of major sea ice accumulation, in the north part of Greenland and the Canadian Arctic Archipelago) when compared to satellite observations from ICESat (Ice, Cloud, and land Elevation satellite; NASA) (results not shown). Thus, the sea ice thickness is clearly not affected by the forcing field and by the combination of sea ice parameters. Further simulations in order to improve the simulated sea-ice thickness as a second step are discussed below.

C) In order to improve the sea-ice thickness on our model simulations, we calculated the thermodynamic growth of sea ice for our different model results. Differences are notable during December, representing the month of the peak formation of sea ice. A standard deviation of net sea ice production of  $\pm 500$  km<sup>3</sup> per month due to thermodynamic processes was observed for the range of simulated sea ice from our previous experiments. These results lead us to evaluate closely the winter months and the production of sea ice. For this, a comparative experiment between the NAOSIM and MITgcm configurations at 0.5 °C of horizontal resolution was done. Various parameters were set constant for values typical to Arctic winter conditions, mainly regarding the prescribed atmospheric forcing: air temperature of -50 °C, wind speed to 10 m/s, shortwave downward radiation 0 W/m<sup>2</sup>, longwave downward radiation of 180 W/m<sup>2</sup>, no prescribed precipitation, constant surface ocean salinity of 32 psu and an initial ice thickness of 1 m and snow depth of 0.15 m. Results of this simple winter experiment were revealing for the heat fluxes through the ice, with nearly 2.5 times higher sensible heat delivered from the ice to the underlying ocean in NAOSIM (-293 W/m<sup>2</sup>) compared to MITgcm (-130 W/m<sup>2</sup>), and a skin temperature (temperature above the sea ice layer) of -37 °C in NAOSIM and -44 °C in MITgcm. As a result, the total heat flux through the simulated sea ice layer was evidently higher in NAOSIM (-262 W/m<sup>2</sup>) in contrast to MITgcm (-77 W/m<sup>2</sup>). These results indicate that, despite using the same initial conditions, considerably higher heat flux was released to the ocean during ice formation for the NAOSIM configuration than MITgcm. Our results revealed that this is mainly due to the snow parameterization used in both models. Further experiments on this regard were developed and are shown below.

D) **Ice thickness probability density functions and parameterizations for snow depth.**

For the continuation on the improvement on the sea ice model, we performed new sensitivity studies based on changes on the ice thickness probability density function (pdf) and the analysis on the snow depth parameterization as mentioned above. For the first, we have included a realistic ice pdf consisting in 15 ice thickness classes non-uniformly distributed. The data to construct this pdf was obtained from airborne electromagnetic induced measurements ("EM-bird") from field observations. For the second, we have tested two different types of parameterization for the distribution of snow depth on top of the ice layer: 1) homogeneously and independent of the underlying sea ice thickness, and 2) a distribution proportional to the ice pdf. The description of these parameterizations is given below.

*Ice thickness pdf.*

In order to represent the different classes of sea ice in numerical models, a simplified distribution of thickness categories found in sea ice cover is used. For this, a given ice thickness distribution (itd), with relative frequency of occurrence for each thickness category, is represented in a probability density function (pdf). Thus, a pdf depicts the probability  $p$  of a thickness  $h+dh$ , where  $dh$  corresponds to the width of the thickness category.

Traditionally, ice models make use of a simplified pdf consisting on 7-ice thickness categories distributed homogeneously (i.e. all with the same probability of 0.5) and normalized to ice thickness values between 0 and  $2*h$  (from thin to thick ice). Thus, with this approach each category of ice thickness has the same probability to be modeled within a grid cell. However, direct observations have shown a wide range of thickness categories, with a non-homogeneous uni-, bi- or even tri-modal distributions (i.e. Lange and Eicken, 1991; Whadams et al., 1992; Haas et al., 2010).



In order to improve this approach in our model setup, we have included a more realistic ice pdf. For this, we used frequency distributions of total ice thickness (snow + ice) from airborne electromagnetic induction sounding measurements (EM-bird) done by the Alfred Wegener Institute (Haas et al., 2010). A realistic sea ice pdf was constructed (Fig. 4b) from a series of observations from approximately 120 EM-bird flights performed during 22 field campaigns between 2001 and 2011 mainly during summer and spring. The area coverage of the flights included various Arctic Ocean regions.

Alternatively, we have constructed a second pdf with the same number of ice classes (15) but only for a single field campaign from the group above (Fig. 4a). This corresponded to the ARK-XXVI/3 campaign from Tromsø, Norway to Bremerhaven, Germany, on board the *RV Polarstern* from 05 August 2011 to 06 October 2011.

#### *Snow depth parameterizations.*

The first snow parameterization here discussed is the one distributes the snow homogeneously on top of the ice but independently of the underlying sea ice thickness. This parameterization is used in the MITgcm Arctic Ocean configuration, and it takes into account the case on which a thick snow layer is formed on top of thin ice as such the snow is flooded. If the snow layer is flooded, a flood-freeze algorithm for buoyancy takes part and the snow layer is added as ice up to the level at which the ice level is preserved. This type of parameterization will be referred as to “snowMITgcm” hereinafter.

The second snow parameterization evaluated here is the one where the snow is distributed on top of ice according, and proportionally, to the ice pdf. This snow parameterization is used in most sea-ice numerical models, including the standard configuration of NAOSIM, and therefore will be referred as to “snowNAOSIM” hereinafter.

In order to evaluate the sensitivity of the different snow parameterization on the simulated Arctic sea-ice, we performed hindcast experiments using the MITgcm configuration. Together with the effect of the way to handle the snow, we have also completed our experiments to evaluate the sensitivity to the realistic ice pdf from field observations. Our results show a higher sensitivity on simulated Arctic sea-ice thickness to the snow parameterization than the realistic ice pdf solely. However, considerable improvement is observed in the resulting sea-ice thickness distribution when combined a realistic ice pdf together with a snow parameterization following the ice distribution. The results from these experiments are presented below.

## **Results**

The bin boundaries in both ice pdf's in Fig. 4, are every 0.2 m and are distributed between zero ( $h_{\min}$ ) to  $3 \cdot h_{\max}$ , where  $h_{\max}$  is 3 m. The two ice thickness pdf from field observations are similar in shape showing a modal distribution towards the thinner classes and a tail towards the thicker classes. However, both distributions differ in the location of the most abundant class. In the ice pdf representing one single flight campaign (Fig. 4a) the most abundant ice thickness corresponds to the class 4 (range of thicknesses between  $3 \cdot 0.6 \text{ m} = 1.8 \text{ m}$  and  $3 \cdot 0.8 \text{ m} = 2.4 \text{ m}$ ) followed closely by class 5 ( $3 \cdot 0.8 \text{ m} = 2.4$  and  $3 \cdot 1 \text{ m} = 3 \text{ m}$ ). However, the most abundant ice thickness in the ice pdf obtained from numerous flights corresponds dominantly to the class 3 (range of thicknesses between  $3 \cdot 0.4 \text{ m} = 1.2 \text{ m}$  and  $3 \cdot 0.6 \text{ m} = 1.8 \text{ m}$ ). These differences are particularly important for energy exchange purposes. The representation of the thinnest ice is directly related to the thermodynamic growth of ice due to the heat fluxes occur mainly through the thin (young) portion of the ice cover. Thus, the difference in the most abundant ice class between thickness pdf can lead to a disagreement on the resulting distribution simulated ice thickness.



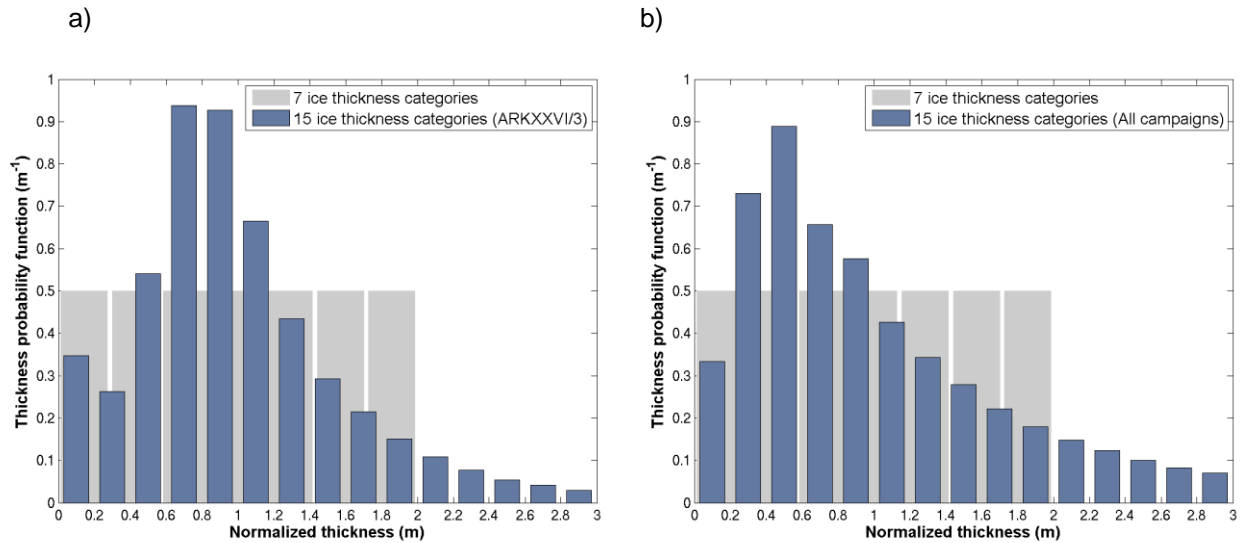


Fig. 4 - Probability density functions depicting sea ice thickness categories for 7 ice classes homogeneously distributed (grey bars in a and b) and overlaid, realistic distributions for one field campaign (ARKXXVI/3, a) and a compilation from 120 airborne EM-bird flights (b) in different regions of the Arctic Ocean.

In the following figures we show results of the simulated sea-ice thickness using the different realistic ice pdf's and contrast the results to the ones obtained using the traditional 7-ice classes distribution.

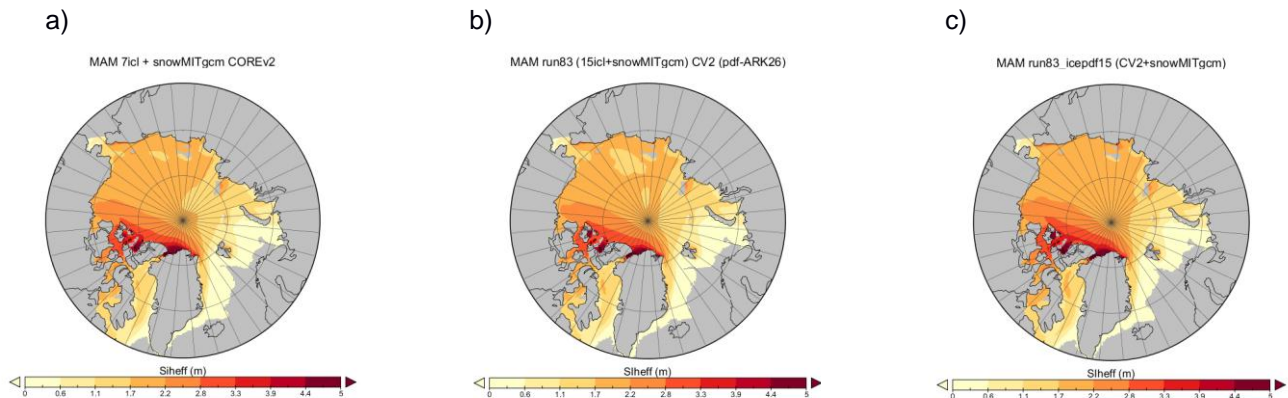


Fig. 5 – Simulated sea-ice thickness (meters) for March-April-May in 1990 to 2007, depicting the sensitivity using: a) a pdf homogeneously distributed with 7-ice thickness classes, b) a pdf with 15-ice thickness classes from a single EM-bird flight and c) a pdf with 15-ice thickness classes from a collection of 120 EM-bird flights between 2001 and 2011.

In simple sea-ice numerical models, the simulated ice thickness per grid cell is the result of the mean ice thicknesses and concentrations of all ice types found in the grid cell. Although is still a very robust approximation, our results show a slight improvement when a more realistic ice thickness distribution is prescribed. The mean ice thickness for the end of the freezing season (March-April-May) increased from 1.38 m using the homogeneous 7-ice classes to 1.43 m when using the ice pdf with 15-ice classes from various EM-bird flights. Although the improvement does not seem to be significant, the overall distribution and extent seemed to be represented in a more realistic manner using a realistic ice-pdf.

Our simulations included experiments to evaluate the effect of different snow parameterizations. Contrary to the simulations including of a realistic ice thickness pdf solely, our results show a

considerable improvement on the simulated ice thickness when the snow is forced to be distributed following the ice pdf, rather than been distributed homogeneously and independently. The average on the simulated winter sea-ice thickness increased from 1.38 m to 1.83 m when the snow is handled similar and proportional to the ice pdf. As an example of these results, in Fig. 6 it is depicted the difference on sea-ice thickness corresponding to the end of the freezing period for these sensitivity experiments.

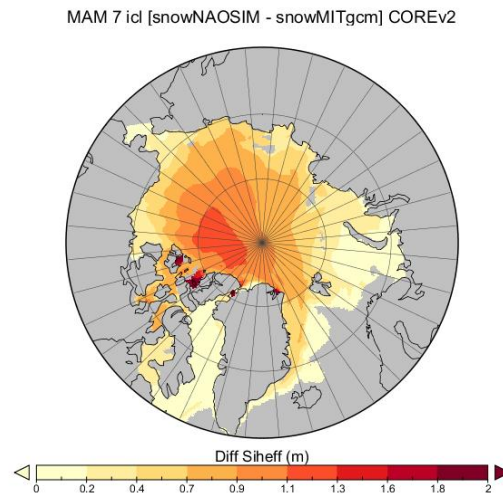


Fig. 6 – Difference on simulated sea-ice thickness (in meters) for March-April-May in 1990 to 2007, depicting the sensitivity where the snow is distributed according to the ice pdf (snowNAOSIM) minus the ice thickness where the snow is distributed homogeneously (snowMITgcm). In both cases a 7-ice thickness pdf is used.

Finally, we extended our simulations by combining both the realistic thickness pdf's together with the different snow parameterizations. Our results show a different and increased sensitivity due to the snow parameterizations when combined to the different 15-ice classes pdf's. We observed a higher sensitivity on the difference on sea-ice thickness for the different snow parameterizations when using the ice pdf that was produced from a number of EM-bird flights (average difference in winter sea-ice thickness of 0.5 m, Fig. 7b) than when using the ice pdf produced from a single flight (average difference in winter sea-ice thickness of 0.4 m, Fig. 7a).

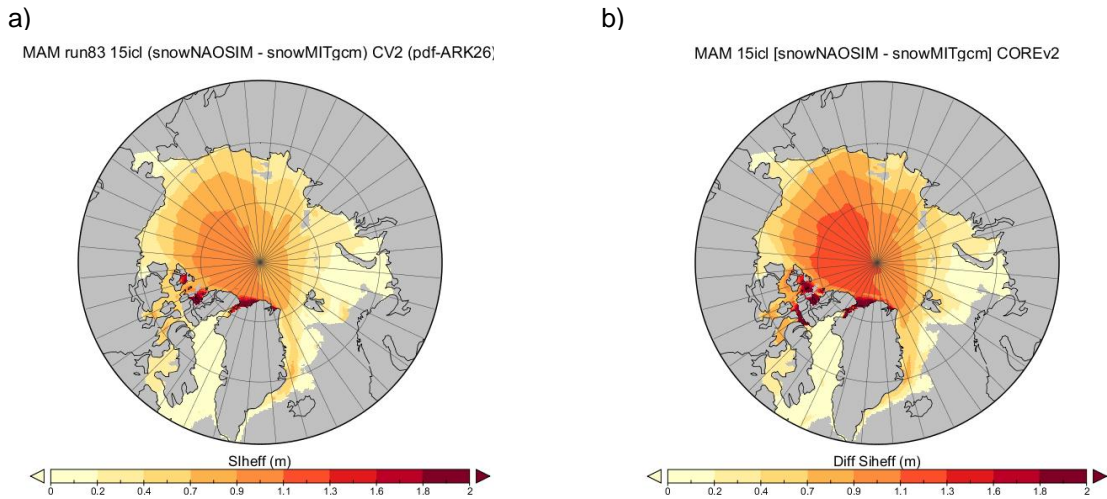


Fig. 7 – Difference on simulated sea-ice thickness (in meters) for March-April-May in 1990 to 2007, depicting the sensitivity where the snow is distributed according to the ice pdf (snowNAOSIM) minus the ice thickness where the snow is distributed homogeneously (snowMITgcm) together with using a 15-ice classes pdf from: a) a single EM-bird flight, and b) ca. 120 EM-bird flights.

*Comparison to satellite observations*

To validate our results, we compared the simulated sea-ice thickness to sea-ice thickness from satellite observations from ICESat. The results of this comparison are depicted in Fig. 8. We compared the sea ice thickness for two seasons during 2007: March/April and October/November.

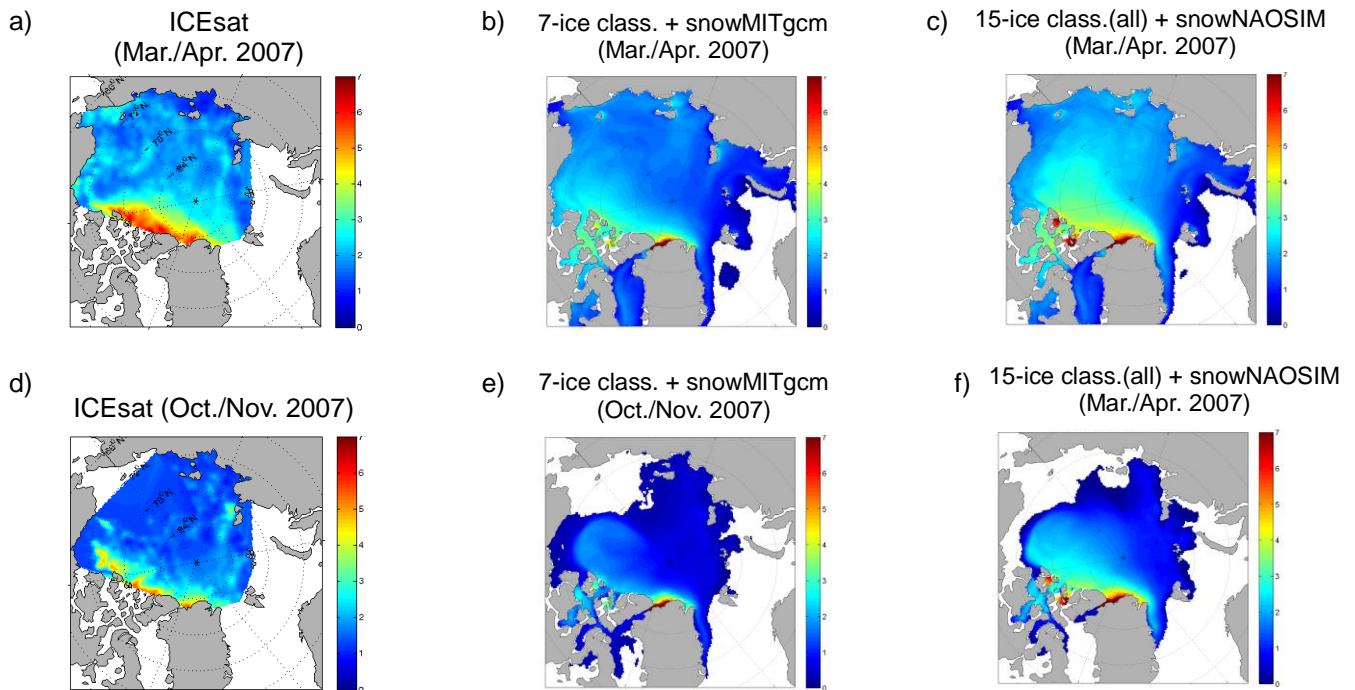


Fig. 8 – Comparison of mean ice thickness (meters) for spring (march/april) (top panels) and autumn (october/november) (bottom panels) in 2007 from: (a and d) satellite observations from ICESat, (b and e) model ice thickness using 7-ice classes pdf with snow distributed homogeneously, and (c and f) 15-ice classes pdf from various EM-bird flights along with snow proportionally distributed to the ice thickness pdf.

These results show a clear improvement that cause using a realistic ice-pdf and snow distributed similarly (right hand side panels in Fig. 8) than using the traditional configuration of 7-ice classes and snow distributed homogeneously (mid panels in Fig. 8). Our experiments highlight the necessity of combining a realistic ice-pdf together with an adequate snow parameterization to improve the thermodynamic growth of sea ice, and ultimately, its extent and thickness. Certainly we do not devote a preference to any of the two snow parameterizations tested in our experiments and the only way to investigate a best way possible is by comparing to field observations of snow depth. Up to date, limited information on this regard is available, and recent efforts to use snow radars for snow depth in wide coverage areas of the Arctic Ocean has been developed and successfully tested. In the future we will use these data to improve the snow parameterization and investigate the relationship between the ice thickness and the overlying snow depth.

Our results highlight the high sensitivity that simple sea-ice models pose to the introduction of a new ice-pdf and snow parameterization. Particular importance is on the distribution on the thinnest ice classes which are dominant in large part of the interior of the Arctic Ocean and determine the thermodynamic growth of ice.

Note that the ice thickness EM-bird measurements include snow depth with the ice thickness underneath, besides this overestimation, the ice thickness representation provides less uncertainty for level ice, than over ridges where accumulation of snow can lead to an interpretation of thicker ice. Despite these disadvantages, this is the first study to our knowledge to include a realistic ice thickness pdf from field measurements in sea-ice modeling to improve the simulation on ice thickness. An ice pdf constructed from observations of the last decade and to present day, includes the current changes that Arctic sea ice has experienced due to a changing climate. The inclusion of these properties in numerical models is of vital relevance and further studies and experiments will be performed to continue these efforts. The results presented in this report are part of a manuscript in preparation to be submitted in *Geophysical Research Letters*, with title and authors:

**“Sensitivity of simulated Arctic sea-ice to realistic ice thickness distribution and snow parameterizations”** by Karel Castro-Morales, Frank Kauker, Martin Losch, Kathrin Riemann-Campe, Stefan Hendricks, Cornelia Köberle, Michael Karcher and Rüdiger Gerdes.

Our model configuration will also be strongly benefited from data from the hpGPS boys for the validation of our simulations.

## Zusammenfassung

Als Teil des Work Packages 4 (Meereisdynamik, Meeresströmung und Modell-Validierung) des ERANET EUROPOLAR-SATICE Projektes beabsichtigten wir, die groß-skalige Entwicklung des Nordpolarmeeres und den Einfluss auf die Meeresströmung zu verstehen, sowie die existierenden Ozean-Meereis-Modelle durch Beobachtungen zu verbessern. Simulationen mit numerischen Modellen sind sinnvolle Werkzeuge, um die groß-skaligen Muster, Trends und Prozesse in Regionen mit räumlich und zeitlich beschränktem Zugriff, wie beim Nordpolarmeer der Fall, zu untersuchen. Mit einer hoch aufgelösten Version (9 km) des regionalen gekoppelten Meereis-Ozean Modells NAOSIM haben wir den Süßwasseraustausch zwischen Meereis und Ozean mit Hilfe eines Süßwassertracers untersucht. Unsere Simulationen zeigen einen Schmelzwassertransport bis in tiefere Wasserschichten, besonders in Regionen, in denen die Schichtung der Wassersäule weniger stark ausgeprägt ist, wie z.B. in der Barents- und Karasee und in anderen sibirische Schelfmeeren. Dieser Prozess könnte den allgemeinen Transport von Wärme und Salz ins Innere des arktischen Bassins beeinflussen wie auch die Meereisprozesse, nämlich die Bildung und Verteilung, verändern. Mit dem Ziel die Meereissimulation zu verbessern, haben wir einen Vergleich zwischen zwei identischen regionalen Nordpolarmeer-Konfigurationen (0.25 deg. horizontale Auflösung, 33 vertikale Schichten, vorgeschriebene offene Grenzen und gleichem realitätsnahem atmosphärischen Antrieb) der Modelle NAOSIM und MITgcm durchgeführt. Dadurch ist es uns gelungen Modellbias des Stromsystems des arktischen Ozeans zu identifizieren, indem wir Advektionsschemata, vertikale Vermischungsschemata und horizontale Diffusion variiert haben. Bei dem simulierten Meereis konnten zwischen dem NAOSIM und MITgcm Modell große Unterschiede beobachtet werden. Obwohl beide Modelle eine recht einfache Methode für die Wärmebudget-Kalkulation benutzen (Bildung und Schmelze des Meereises und Schnees) wurden starke Unterschiede beim simulierten Meereis festgestellt und auf eine unterschiedliche Parametrisierung der Bildung und Schmelze des Schnees zurück geführt. Um diese Unterschiede zu verringern, haben wir in den Modellen die in vielen Meereismodellen benutzte gleichförmige Eisdickenverteilung (auch Eisklassen genannt) durch eine realistischere Eisdickenverteilung (pdf – probability density function) ersetzt.

Diese neue nicht gleichförmige Verteilungsfunktion basiert auf luftgestützten elektromagnetischen Messungen (EM-bird Messungen) von etwa 120 Flügen ins arktische Meereis in den Jahren 2001 bis 2011. Damit einhergehend haben wir die Modellantwort auf die erwähnte unterschiedliche Behandlung des Schnees, die normalerweise in Meereismodellen dieses Typs benutzt werden untersucht: im ersten Fall wird angenommen, dass die Schneeeauflage auf allen Eisklassen gleich ist und im zweiten Fall wird angenommen, dass die Schneeeauflage der gleichen Wahrscheinlichkeitsfunktion wie das Meereis gehorcht. Unsere Simulationen wurden für den Zeitraum 1990 bis 2007 durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen eine erhebliche Verbesserung bei der Meereisdicke, wenn die auf EM-bird Messungen beruhende realistische Eis-pdf durch 15 uneinheitlich verteilte Meereisdicken-Klassen angepasst und der Schnee entsprechend der gleichen pdf verteilt wird. Diese Änderung führte zu einer direkten Verbesserung des Modells bzgl. des thermodynamischen Anwachsens des Eises (Menge schmelzen/gefrieren). Erste Einschätzungen zeigen im Vergleich zu den Satellitenbeobachtungen von ICESat gute, übereinstimmende Ergebnisse.

Unsere Ergebnisse heben die Bedeutung dieser Parametrisierungen in der Meereismodellierung hervor. Wir betonen die Wichtigkeit, Feldbeobachtungen nicht nur zur Validierung zu nutzen, sondern mit ihrer Hilfe Modellparametrisierungen zu verbessern. Insbesondere die Sensitivität der Simulation in Bezug auf Verteilungsfunktion verlangen nach mehr Feldbeobachtungen der Meereisdicke und, fast noch wichtiger, der Schneedicke. Die Unsicherheit in Modellsimulationen und folglich der zukünftigen Projektionen des arktischen Meereises können dadurch verringert werden. In dieser Hinsicht werden unsere Ergebnisse auch einen starken Einfluss auf die globalen Klimamodelle haben, die überwiegend ähnliche Ansätze im Meereis nutzen.

Im Rahmen des SATICE Projekts liefern hochgenaue GPS Bojen den Modellen Informationen, anhand derer neuartige Datensätze der Meereisdrift, Massebalance und Dicke die Bewertung und die Verbesserung der Modellergebnisse ermöglicht werden und außerdem zur Reduzierung der Unsicherheiten der Modelle beitragen. Hoch aufgelöste Felddaten der Meereiseigenschaften werden desweiteren helfen, den jetzigen ‚Hindcast‘ zu verbessern, in dem neuere Trends durch die Veränderungen im Klimasystem mit einbezogen werden.

## **2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Der zahlenmäßige Nachweis kann in einem separat von der Haushaltsabteilung des AWI übermittelten Dokument eingesehen werden und ist daher hier nicht nochmals aufgeführt.

## **3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten**

Die geleisteten Modellsimulationen und deren Interpretation tragen sehr stark zum Verständnis des Arktischen Meereis-Ozean Systems bei. Es ist zu erwarten, dass die Arbeiten Einfluss auf die globalen Klimamodelle haben werden und zur Reduzierung der Unsicherheiten in Klimamodellen beitragen.

## **4. Voraussichtlicher Nutzen im Sinne des Verwertungsplans**

Die arbeiten sind der Grundlagenforschung zuzuordnen. Die Verwertbarkeit der Daten und sonstiger Ergebnisse betrifft die nicht-kommerzielle Nutzung durch die internationale Klimaforschung.

Die aus dem Projekt resultierenden Ergebnisse stehen wie folgt zur Verfügung:

Publikationen in begutachteten Zeitschriften.

Bereitstellung der Ergebnisse und Modelldaten für Teilnehmer des Verbundes und für die internationale Arktis- und Klimaforschung (andere Projekte z.B. ACCESS, ArcRisk, REKLIM, etc.).

Präsentation der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen (siehe Punkt II, 6).

Nutzung für die Lehre an den Hochschulen in Bremen und Bremerhaven und an anderen Hochschulen.

## **5. Während des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Es sind keine Arbeiten bekannt, die sich mit der Problematik des Vorhabens befasst haben.

## **6. Veröffentlichungen**

Gerdes, R., K. Castro-Morales and C. Köberle. Changes in sea ice formation and transport and its consequences for contaminant distribution in the Arctic Ocean. The Arctic as a messenger for global processes – climate change and pollution. *Oral presentation*. AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Programme) conference. Copenhagen, Denmark, May 2011.

Gerdes, R. Expected changes in the Arctic. *Oral presentation*. Arctic Climate Change, Economy and Society (ACCESS) meeting for the Work Package 1, Workshop on climate scenarios and climate simulation, Bremen,

Germany, September 2011.

Gerdes, R., C. Köberle and T. Krumpfen. Sea ice retreat and its consequences for Fram Strait ice export and the Arctic Ocean fresh water balance. *Oral presentation*, International Polar Year, Montreal, Canada, April 2012.

Castro-Morales, K., R. Gerdes, K. Riemann-Campe, C. Köberle and M. Losch. Arctic sea-ice variability and its implication to the path of pollutants under a changing climate. *Poster presentation*. European Geophysical Union General Assembly, Vienna, Austria, April 2012.

Gerdes, R. and Castro-Morales, K. Results on sea ice from models. *Oral presentation*, SATICE progress meeting, Barcelona, Spain, May 2012.

Castro-Morales, K. and R. Gerdes. Arctic Ocean under a changing climate from circulation models. *Oral presentation*. ArcRisk partner forum meeting. Ljubljana, Slovenia, June 2012.

Castro-Morales, K., F. Kauker, M. Losch, K. Riemann-Campe, S. Hendricks, C. Köberle, M. Karcher and R. Gerdes. *Sensitivity of simulated Arctic sea-ice to realistic ice thickness distribution and snow parameterizations*. Scientific publication in preparation, to be submitted to *Geophysical Research Letters*.