

Forschungsthema des Monats Januar: Topic 2
Meeresspiegeländerungen von globaler zu regionaler und lokaler Skala

Veränderungen im südlichen Weddellmeer beeinflussen den globalen Meeresspiegel

Die Küstenlinie der Antarktis wird zu großen Teilen von Schelfeisflächen gesäumt, die durch den Abfluss von Eis aus dem Antarktischen Eisschild entstehen. Das in den Schelfeisen gebundene Süßwasser geht durch zwei verschiedene Prozesse zu etwa gleichen Teilen in den Ozean über: Einerseits lösen sich an der Schelfeiskante Eisberge, die durch Wind und Meeresströmungen auf den Ozean hinaus getrieben werden und dort langsam schmelzen. Andererseits schmilzt das Eis direkt an der Schelfeisunterseite durch den Kontakt mit dem Ozeanwasser. Schmelz- und Gefrierprozesse an der Grenzschicht zwischen Eis und Wasser haben großen Einfluss auf die Hydrographie in der Kavene unterhalb des Schelfeises und auf die Geometrie des Schelfeiskörpers. Veränderungen in der Geometrie der Schelfeise beeinflussen auch den gegründeten Teil des Eisschildes; der beschleunigte Abfluss und die damit verbundene Ausdünnung der Quellgletscher des Larsen-Schelfeises nach dem Zerfall seiner nördlichen Teilgebiete (SCAMBOS ET AL. 2004) und die kürzlich beobachteten Änderungen in den Schelfeisgebieten der Bellingshausen- und Amundsen-See (JENKINS ET AL., 2010) belegen dies. Die Wechselwirkungen zwischen Schelfeis und Ozean sind

daher für die Entwicklung des Antarktischen Eisschildes und damit auch des globalen Meeresspiegels von großer Bedeutung. Ein Überblick über die verschiedenen Prozesse der Schelfeis-Ozean-Wechselwirkungen wird von GROSSELD ET AL. (2014) gegeben.

Aus ozeanographischer Sicht sind die Schmelz- und Gefrierprozesse an der Basis der Schelfeise insbesondere für die Modifikation der Wassermassen im Südpolarmeer wichtig. Eisschelfwasser, welches durch Schmelzen an der Eisunterseite gebildet wird, ist durch Temperaturen unterhalb des Ozean-Oberflächengefrierpunkts gekennzeichnet. Strömt dieses Wasser aus den Kavernen des Filchner-Ronne-Schelfeises in der Westantarktis ins südliche Weddellmeer (Abb. 1c), leistet es dort einen entscheidenden Beitrag zur Bildung von Tiefen- und Bodenwasser (FOLDVIK ET AL., 2004) und damit zur globalen Umwälzbewegung des Ozeans. Es ist also damit zu rechnen, dass Veränderungen der Eis-Ozean-Wechselwirkungen in dieser Region Auswirkungen haben, die über den lokalen und regionalen Rahmen weit hinausgehen.

Zur Untersuchung des aktuellen Zustands des Klimasystems und von möglichen Änderungen im Rahmen einer globalen Klimaänderung benutzen wir neben hydrographischen und glaziologischen Beobachtungen auch Modelle des Oze-

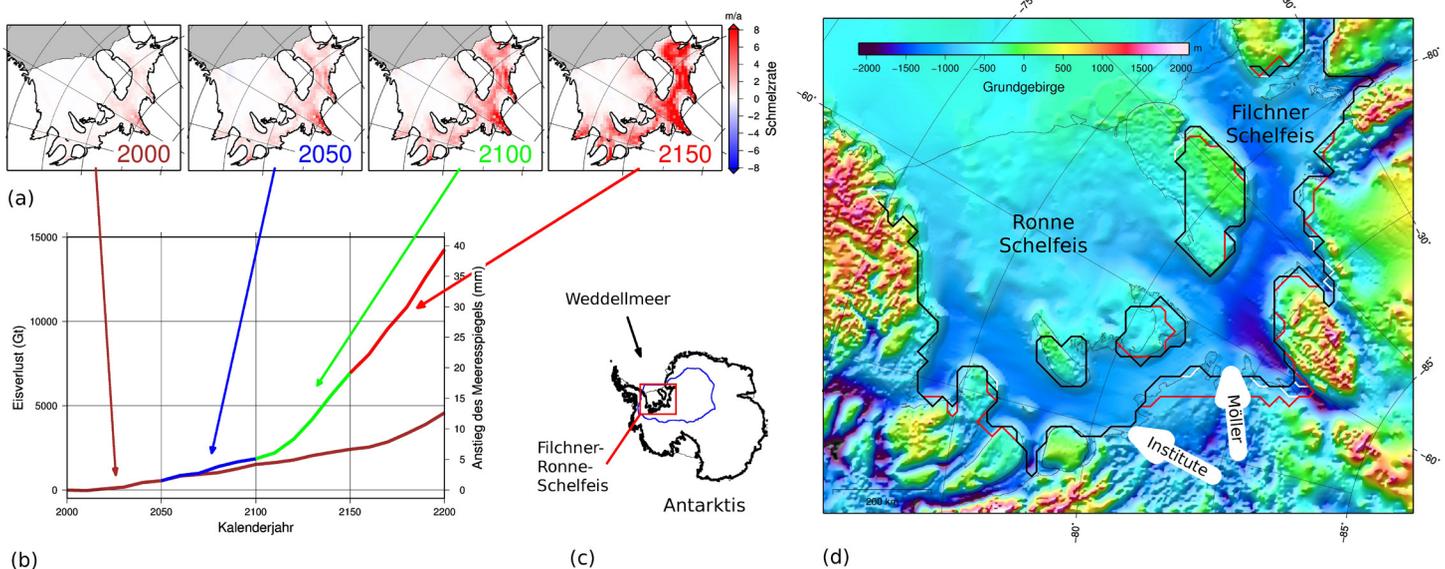


Abb. 1: (a) Heutige und zukünftige Schmelzraten unter dem Filchner-Ronne-Schelfeis, simuliert vom Meereis-Schelfeis-Ozean-Modell FESOM. (b) Mit dem Eismodell RIMBAY simulierter Anstieg des mittleren Meeresspiegels als Reaktion auf die von FESOM prognostizierten Schmelzraten. (c) Lage des Untersuchungsgebietes (Filchner-Ronne-Schelfeis) in der Antarktis. Die blaue Linie zeigt die Ränder des RIMBAY-Modellgebietes. (d) Relief des Gebirges unter dem gegründeten Eis und Topographie des Meeresbodens mit dem bis zu 1500 m tiefen Filchner-Trog, durch den zukünftig warmes Tiefenwasser die Schelfeisbasis erreichen könnte. Die Differenz zwischen schwarzer und roter Aufsetzlinie kennzeichnet den simulierten Rückgang des Inlandeises als Antwort auf diesen Warmwasserzustrom innerhalb der nächsten zwei Jahrhunderte (Eismodell RIMBAY).

ans sowie des Schelf- und Inlandeises. Ein Schwerpunkt der aktuellen Arbeiten liegt auf der Kopplung des **Finite-Element Sea ice – ice shelf – Ocean Model** (FESOM, TIMMERMANN ET AL., 2012) mit einem dynamisch-thermodynamischen Eismodell (RIMBAY; PATTYN, 2003, THOMA ET AL., 2014). Letzteres simuliert die Entwicklung des Filchner-Ronne-Schelfeises und seines gegründeten Einzugsgebietes, in welchem mehrere schnell fließende Eisströme Masse aus dem Inneren des Eisschildes zum Schelfeis und damit zum Ozean transportieren.

Im gegenwärtigen Zustand des Klimasystems ist die Kaverne des Filchner-Ronne-Schelfeises mit salzreichem Wasser gefüllt, dessen Temperatur nahe dem Oberflächengefrierpunkt liegt. Diese Wassermasse entsteht, indem vergleichsweise warmes und salzreiches Tiefenwasser aus dem offenen Ozean auf den breiten, relativ flachen Kontinentalschelf im südlichen Weddellmeer strömt, wo es abgekühlt und durch die Bildung großer Mengen Meereises mit Salz angereichert wird. Aufgrund seiner hohen Dichte breitet sich dieses salzreiche Schelfwasser am Meeresboden bis in die stellenweise 1500 m tiefe Schelfeiskaverne aus. Nahe der Aufsetzlinie, der Grenze zwischen Schelfeis und Inlandeis, führt der Temperaturkontrast zwischen dem einströmenden Schelfwasser (ca. -1.9°C) und der in-situ Gefrierpunktstemperatur an der Schelfeisbasis (ca. -3°C) zum Schmelzen von Eis und damit zu einer erheblichen Ausdünnung des Schelfeises in diesem Bereich. Typische Schmelzraten nahe der Aufsetzlinie im tiefsten Teil der Kaverne liegen zwischen 5 und 7 m pro Jahr (TIMMERMANN ET AL., 2012). Gemittelt über die Gesamtfläche beträgt die Schmelzrate für das Filchner-Ronne-Schelfeis, das mit etwa 450.000 km² das flächenmäßig zweitgrößte Schelfeis der Antarktis ist, etwa 0.35 Meter pro Jahr. Das durch die Schmelzprozesse entstehende kalte Süßwasser vermischt sich mit den Wassermassen der Umgebung zum bereits erwähnten Eisschelfwasser und steigt aufgrund seiner geringeren Dichte entlang der geneigten Eisunterseite in Richtung der Schelfeiskante auf.

Lange Zeit wurde angenommen, dass die Schelfeisgebiete des Weddellmeeres durch ihre Abgelegenheit und die Distanz zu den warmen Wassermassen des Antarktischen Zirkumpolarstroms vor tiefgreifenden Veränderungen geschützt seien. FESOM-Studien mit Atmosphärendaten aus Projektionen von Klimamodellen der IPCC-Sachstandsberichte 4 und 5 weisen jedoch darauf hin, dass eine Abnahme der Meereisproduktion auf dem Kontinentalschelf des Weddellmeeres zu einem Abschwächen der Konvektion und einer Abnahme der Dichte des Schelfwassers führen kann. Die resultierende Neuorientierung des Küstenstroms ermöglicht dann den Zustrom warmen Tiefenwassers in die Kaverne und bis hinunter zur Aufsetzlinie (TIMMERMANN UND HELLMER, 2013). Das Filchner-Ronne-Schelfeis würde sich dadurch in seinen Charakteristiken den Schelfeisen der Amundsen-See annähern, die durch relativ warme Wassermassen (bis zu 1°C) in den Kavernen gekennzeichnet sind.

Bis zur Mitte des 22. Jahrhunderts könnten die Schmelzraten dann auf bis zu 18 m pro Jahr an der Aufsetzlinie und 3 m pro Jahr gemittelt über die gesamte Fläche ansteigen (Fig. 1a). Eine unabhängige Analyse von Beobachtungsdaten (SCHMIDTKO ET AL., 2014) weist darauf hin, dass die angesprochenen Veränderungen im Ozean möglicherweise bereits begonnen haben. Das beschriebene Szenario ist also nicht nur eine theoretische Möglichkeit, sondern steht mit den (wenigen) verfügbaren Beobachtungen im Einklang.

Schelfeis schwimmt im Ozean; sein Schmelzen beeinflusst den globalen Meeresspiegel direkt also nur über den Einfluss auf Temperatur und Salzgehalt (sterischer Effekt), der hier einen verschwindend geringen Einfluss hat (JENKINS UND HOLLAND, 2007). Einen deutlich größeren Effekt auf den Meeresspiegel hat dagegen ein beschleunigtes Abfließen von Eismassen aus dem Antarktischen Eisschild in den Ozean (eustatischer Effekt) als Folge einer reduzierten Schelfeis-Dicke. Ausgedehnte Schelfeisgebiete üben einen stützenden Effekt („buttressing effect“) auf das Inlandeis aus und hemmen so den Abfluss von Gletschern und Eisströmen. Schon eine reduzierte Schelfeisdicke kann somit den Eistransport beschleunigen.

Wir benutzen simulierte Schmelzraten aus FESOM als Antrieb für das Schelf- und Inlandeismodell RIMBAY (Abb. 1b). Unsere Simulationen zeigen eine hohe Sensivität der Eisdynamik im südwestlichen Bereich des Einzugsgebiets (Möller-Eisstrom und Institute-Eisstrom, Abb. 1d). Die Aufsetzlinie zwischen diesen beiden Eisströmen liegt auf einem untermeerischen Rücken am Nordrand eines weiten Troges. Bereits bei relativ geringen Schmelzraten wird dieser Bereich instabil und die Aufsetzlinie beginnt sich über die komplette Fläche des Troges südwärts zurückzuziehen (Abb. 1d). Bisher gegründete Eismassen schwimmen dabei auf und werden Teil des Schelfeises; der verbleibende gegründete Eiskörper fließt mit erhöhten Geschwindigkeiten nach. Unseren Modellrechnungen zufolge trägt dieser Prozess bis zum Jahr 2200 mit zusätzlichen rund 39 mm zum Anstieg des globalen Meeresspiegels bei.

Das Ziel weiterer Untersuchungen mit dem gekoppelten Meereis-Ozean-Schelfeis-Inlandeismodell ist eine bessere Abschätzung zukünftiger Klimaänderung in der Antarktis. Ein besonderer Fokus liegt hier auf der Stabilität des Westantarktischen Eisschildes. Dessen Eismasse gründet größtenteils unterhalb des Meeresspiegels und reagiert durch den unmittelbaren Kontakt zum Ozean besonders sensitiv auf Klimaänderungen. Das hierbei entstehende Schmelzwasser wird in den nächsten Dekaden neben den Beiträgen der grönländischen Eiskappe und der weltweiten Gebirgsgletscher zunehmend an Bedeutung für den eustatischen Meeresspiegelanstieg gewinnen.

Referenzen:

Foldvik, A., Gammelsrød, T., Østerhus, S., Fahrbach, E., Rohardt, G., Schröder, M., Nicholls, K. W., Padman, L., Woodgate, R. A., 2004. Ice shelf water outflow and bottom water formation in the southern Weddell Sea. *J. Geophys. Res. Oceans* 109, C02015, doi:10.1029/2003JC002008

Grosfeld, K., Thoma, M., Determann, J., Hellmer, H. and Timmermann, R., 2014. Die Wechselwirkung zwischen antarktischen Schelfeisgebieten und dem Ozean und der Beitrag zur ozeanischen Wassermassenbildung / J. Lozán, H. Graßl, D. Notz and D. Piepenburg (editors), In: Warnsignal Klima: die Polarregionen; Gebiete höchster Empfindlichkeit mit weltweiter Wirkung, (Warnsignale Klima; 14), Hamburg, Wissenschaftliche Auswertungen, ISBN: 978-3-9809668-6-3.

Jenkins, A., Holland, D., 2007. Melting of floating ice and sea level rise. *Geophys. Res. Lett.* 34, L16609, doi:10.1029/2007GL030784

Jenkins, A., P. Dutrieux, S. S. Jacobs, S. D. McPhail, J. R. Perrett, A. T. Webb & D. White, 2010. Observations beneath Pine Island Glacier in West Antarctica and implications for its retreat, *Nature Geoscience*, 3, 468-472, doi:10.1038/ngeo890.

Pattyn, F., 2003. A new three-dimensional higher-order thermomechanical ice-sheet model: basic sensitivity, ice stream development, and ice flow across subglacial lakes, *Journal of Geophysical Research*, 108 (B8), 2382, doi: 10.1029/2002JB002329.

Scambos, T.A., Bohlander, J.A., Shuman, C.A. & P. Skvarca, 2004. Glacier acceleration and thinning after ice-shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 31, doi: 10.1029/2004GL020670.

Schmidtko, S., K.J. Heywood, A.F. Thompson, and S. Aoki, 2014. Multidecadal warming of Antarctic Waters. *Science*, 346(6214), 1227-1231, doi: 10.1126/science.1256117

Timmermann, R., Q. Wang & H. H. Hellmer, 2012. Ice shelf basal melting in a global finite-element sea ice/ice shelf/ocean model, *Annals of Glaciology*, 53(60), doi:10.3189/2012AoG60A156.

Timmermann, R. & H.H. Hellmer, 2013. Southern Ocean warming and increased ice shelf basal melting in the 21st and 22nd centuries based on coupled ice-ocean finite-element modelling, *Ocean Dynamics*, doi:10.1007/s10236-013-0642-0.

Thoma, M., K. Grosfeld, D. Barbi, J. Determann, S. Goeller, C. Mayer & F. Pattyn, 2014. RIMBAY – A multi-physics 3D ice-dynamics model for comprehensive applications: Model-description & examples, *Geoscientific Model Development*, 7, 1-21, www.geoscientific-model-dev.net/7/1/2014/, doi:10.5194/gmd-7-1-2014.

Ansprechpartner:

Dr. Ralph Timmermann / Dr. Sebastian Goeller/
Dr. Klaus Grosfeld (AWI, Bremerhaven)

Kurzbiografie REKLIM Nachwuchswissenschaftler

Sebastian Göller, Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)

Sebastian Göller hat an der Humboldt Universität zu Berlin Physik mit den Schwerpunkten *Computational Physics und Statistische Physik / Nichtlineare Dynamik* studiert und in seiner Diplomarbeit Strategien der Nahrungssuche sowie das Schwarmverhalten von Tieren modelliert. Nach seinem Studium hat er als Softwareentwickler im Bereich Mobilfunk gearbeitet, bis er im Juni 2010 im Rahmen des REKLIM-Projektes seine Promotion am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung, in Bremerhaven begann. In der Sektion Glaziologie des Fachbereichs Geowissenschaften erforschte er dabei Seen und Wasserflüsse unter dem Antarktischen Eisschild mit einem besonderen Fokus auf die numerische Modellierung von Wechselwirkungen zwischen subglazialer Hydrologie und Eisdynamik. Seit Januar 2014 arbeitet Sebastian als PostDoc im Fachbereich Klimawissenschaften und beschäftigt sich mit der Kopplung von Meereis-Ozean- und Inlandeis-Schelfeis-Modellen in der Region des südpolaren Weddellmeeres.



“REKLIM bietet die besondere Möglichkeit, die verschiedenen Blickwinkel der Forschungszentren der Helmholtz Gemeinschaft auf regionale Klimaänderungen sinnvoll zu vernetzen und damit einen tieferen Einblick in das komplexe Klimasystem der Erde zu gewinnen.“