

Schlussbericht

Vorhabenbezeichnung:

Verbundvorhaben:

Zukünftiger Meeresspiegelanstieg der Antarktis:

Erwartung und Risiko

Zuwendungsempfänger:

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (Verbundkoordinator)

Telegraphenberg A 31, 14473 Potsdam

Ansprechpartner:

Prof. Dr. Anders Levermann

E-Mail: Anders.Levermann@pik-potsdam.de

Alfred-Wegener Institut

Am Handelshafen 12, 27570 Bremerhaven

Ansprechpartner: Dr. Ralph Timmermann

E-Mail: Ralph.Timmermann@awi.de

Förderkennzeichen: **01LP1171A/B**

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Laufzeit des Vorhabens: **November 2011 – September 2013**

Inhaltsverzeichnis

Schlussbericht.....	1
1. Ausgangssituation und Fragestellung	3
2. Ergebnisse des Projekts	4
2.1 Projektion des Meeresspiegelbeitrags der Antarktis im 21. Jahrhundert (PIK/AWI).....	5
2.2 Risikoanalyse abrupten Eisverlustes in West- und Ostantarktis (PIK/AWI)	12
2.2.1 Risikoanalyse abrupten Eisverlustes in Westantarktis (PIK/AWI)	12
2.2.2 Risikoanalyse abrupten Eisverlustes in Ostantarktis (PIK / AWI).....	14
2.3 Langfristig zu erwartender Meeresspiegelanstieg (PIK)	17
2.4 Folgen langzeitlichen Meeresspiegelanstiegs (PIK)	20
2.5 Zukünftiges Projekt zur nachhaltigen Verbesserung der Projektionen.....	23
2.6 Veröffentlichungen, die innerhalb des Projekts entstanden sind	25

1. Ausgangssituation und Fragestellung

Entgegen weitläufiger Meinung wurden im vierten Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2007) keine vollständigen Projektionen des Meeresspiegelanstieg für das 21. Jahrhundert gegeben. Der Grund hierfür waren unzureichende Informationen über das dynamische Verhaltens der großen Eisschilde auf Grönland und der Antarktis.

Während die Niederschlags- und Schmelzprozesse auf beiden Eisschilden abgeschätzt werden konnten (Fettweis et al. 2012; Ligtenberg et al. 2013), fehlten Studien über die Bewegung des Eises, den Eisfluss, und damit über den möglichen Verlust der Eisschilde durch das Abbrechen von Eisbergen, dem sogenannten Kalben.

Für Grönland wurden Abschätzungen für einige wichtige und charakteristische Abflussgebiete vorgenommen und auf den gesamten Eisschild verallgemeinert (hochskaliert). Mit Hilfe numerischer Modelle (Price et al. 2011; Graverson et al. 2010) und allgemeiner kinematischer Überlegungen (Pfeffer, Harper, and O'Neel 2008) konnte gezeigt werden, dass der dynamische Beitrag von Grönland durch die unter dem Meeresspiegel aufliegenden Eismassen begrenzt ist. Der Beitrag zum globalen Meeresspiegel ist damit im 21. Jahrhundert auf etwa 10 Zentimeter begrenzt und liegt wahrscheinlich wesentlich darunter (Church et al. 2013).

Die Situation in der Antarktis ist deshalb wesentlich komplizierter, weil große Mengen des Eises unterhalb des Meeresspiegels auf dem Grund aufliegen (sogenanntes marines Eis) und die Abflussgebiete nicht durch schmale topographische Kanäle begrenzt sind wie auf Grönland. Während das gesamte Eisvolumen Grönlands einem globalen Meeresspiegelanstieg von etwa sieben Metern entspricht, wären allein die marinen Gebiete der Antarktis in der Lage den Meeresspiegel weltweit um mehr als 20 Meter anzuheben.

Satellitenbeobachtungen der letzten zwanzig Jahre haben gezeigt, dass der Eisfluss im Amundsensee-Sektor der Westantarktis sich beschleunigt hat und das Abflussgebiet an Masse verloren hat (Pritchard et al. 2009; Shepherd et al. 2012; Favier et al. 2014). Gleichzeitig haben neue verbesserte Daten der Bodentopographie der Antarktis (Le Brocq, Payne, and Vieli 2010) gezeigt, dass auch die weitaus größere Ostantarktis große marine Eisgebiete besitzt, die einen direkten Zugang zum Meer haben und deren Grund landeinwärts abfällt. Diese Konstellation ist vergleichbar mit der in der Westantarktis und birgt die Gefahr einer Instabilität des Eisflusses, der sogenannten Marine Eisschildinstabilität (Schoof 2007a)

Die Hauptziele dieses Projekts waren die Erstellung von Projektionen der Entwicklung des Antarktischen Eisschildes und eine Untersuchung der Möglichkeit eines abrupten Eisverlustes aus der Westantarktis. Diese

Ergebnisse konnten erreicht werden. Während des Projekts haben sich jedoch zwei weitere Möglichkeiten ergeben. Durch die neuen Topographiedaten und unsere eigenen Simulationen stellte sich heraus, dass die Ostantarktis ein höheres Potenzial für einen abrupten Eisverlust birgt. Gleichzeitig ergab sich die Möglichkeit durch eine Zusammenarbeit mit Kollegen im Meeresspiegelkapitel des IPCC-AR5 aus Österreich, Belgien und den USA, die langzeitlichen Meeresspiegelveränderungen abzuschätzen. Wir haben dieses ohne weiteren Kostenaufwand untersucht und auch dem IPCC zur Verfügung gestellt. Diese Untersuchung hat Eingang in das Meeresspiegelkapitel gefunden und eine große internationale Medienresonanz erzeugt.

2. Ergebnisse des Projekts

Die erzielten Ergebnisse des Projekts „Zukünftiger Meeresspiegelbeitrag der Antarktis“, obwohl nicht direkt Teil einer Förderlinie, leisten einen Beitrag zum **Förderschwerpunkt Klima** des BMBF, insbesondere zu der vom **BMBF geförderten IPCC-relevanten Forschung**.

Die Hauptresultate sind direkt in den ersten Berichtsteil „Climate Change 2013: The Physical Science Basis“ des Fünften Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2013) eingeflossen, welcher über die naturwissenschaftlichen Grundlagen des vergangenen und zukünftigen Klimawandels informiert und die Grundlagen für wissenschaftsbasierte Entscheidungen der Klimapolitik bereitstellt. Hierbei haben unsere Resultate an mehreren Stellen sowohl des Kapitels 13, *Sea Level Change*, des Kapitels 12, *Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility*, als auch der sehr prominenten Zusammenfassung, *Summary For Policymakers*, Eingang gefunden.

Die Prognosen des Meeresspiegelbeitrags der Antarktis wurden im vierten IPCC-Bericht (IPCC 2007) als mit der größten Unsicherheit behaftete Komponente möglicher Meeresspiegelprojektionen ausgewiesen. Das hatte zur Folge, dass im letzten Bericht keine vollständige Meeresspiegelprojektion für das 21. Jahrhundert angegeben wurde. Dieses stellte eine der weitreichendsten Einschränkungen des vierten Sachstandsberichts dar. Die Förderung dieses Projekts durch das BMBF kam entsprechend zu einem hervorragenden Zeitpunkt.

Die Ergebnisse des Projekts haben dazu beigetragen, dass diese Unsicherheiten im jetzigen Fünften IPCC-Sachstandsbericht verringert werden konnten und zum ersten Mal ein Meeresspiegelbeitrag des Antarktischen Eisschildes projiziert wurde. Die Ergebnisse der Meeresspiegelprojektionen und der Risikoanalyse eines abrupten Eisverlustes von der Westantarktis sind

sowohl dem Kapitel 13 als auch dem Kapitel 12 des Fünften Sachstandsberichts rechtzeitig zur Verfügung gestellt worden.

Leider wurde die zentrale Veröffentlichung von einem Editor der Zeitschrift *The Cryosphere* zu einem Zeitpunkt abgelehnt, der kein Wiedereinreichen und damit keine Zitierung im Bericht möglich machte. Diese Ablehnung war möglicherweise nicht vollständig wissenschaftlich begründet. Nichtsdestotrotz waren die Ergebnisse des Projekts und die verwendete Methodik den Autoren der Kapitel über Monate während der Erstellung des Berichts bekannt und sind über andere publizierte Vorarbeiten (Bindschadler et al. 2013; Nowicki et al. 2013a; Nowicki et al. 2013b) in den Bericht eingeflossen. Eine Grafik, die in diesem Projekt entstanden ist, wurde direkt als Abbildung 13.14 im IPCC-Bericht verwendet.

Als Nebenprodukt des Projekts wurde der langzeitliche und unvermeidbare Beitrag des antarktischen Eisschildes zum Anstieg des Meeresspiegels für verschiedene Erwärmungsniveaus berechnet (das langfristige sogenannte Meeresspiegel „commitment“). Daraus ergaben sich bereits zwei Folgestudien (Marzeion and Levermann 2014; Strauss 2013a) mit direktem gesellschaftlichen Bezug und entsprechend umfangreicher internationaler Medienresonanz.

Durch die Einspeisung der Ergebnisse in den Fünften IPCC-Sachstandsbericht konnte die wissenschaftliche Basis für die nationale und internationale Klimapolitik weiter ausgebaut werden. Da das BMBF durch die Förderung klimabezogener Forschung maßgeblich zu den IPCC-Berichten beiträgt, hat dieses Projekt somit unmittelbar zu den förderpolitischen Zielen des BMBF beigesteuert.

Die beiden Projektpartner haben in den meisten Teilprojekten sehr eng zusammen gearbeitet. In den Teilprojekten 2.1 und 2.2 wurden jeweils die ozeanischen Simulationen vom Alfred-Wegener Institut durchgeführt und dienen dann als Randbedingungen für die Eissimulationen, die vom Potsdam-Institut durchgeführt wurden.

2.1 Projektion des Meeresspiegelbeitrags der Antarktis im 21. Jahrhundert (PIK/AWI)

Beobachtungen sowie numerische Simulationen mit Eisschild- und Ozeanmodellen (Hellmer et al. 2012; Brocq et al. 2009; Gladstone et al. 2012; Payne et al. 2007) zeigen die Bedeutung der ozeanischen Randbedingungen für Entwicklung des antarktischen Eisschildes. Insbesondere (Hellmer et al. 2012) haben gezeigt, dass die Unsicherheiten in diesen Randbedingungen außergewöhnlich groß sind. Dieses liegt unter anderem daran, dass die Antarktis abgelegen im Südlichen Ozean liegt und die Dynamik des Antarktischen Zirkumpolarstroms und der dazugehörigen meridionalen Zirkulation noch unzureichend verstanden und von globalen Computernmodellen nicht im Detail simuliert werden können.

Aus diesem Grund haben wir uns in diesem Projekt dafür entschieden, die gesamte Bandbreite der Modellunsicherheit in den Randbedingungen der Antarktis zu berücksichtigen (Levermann, Winkelmann, et al. 2013). Hierzu wurde die gesamte Unsicherheitsspanne der globalen Klimasimulationen mit der Unsicherheit in der Entwicklung der Ozeanströmungen kombiniert. Die Prozedur ist in der Abbildung 1a illustriert. Aus der mathematischen Faltung dieser beiden Unsicherheitsbereiche ergab sich die mögliche Temperaturentwicklung am äußeren Rand der Eisschelfe im offenen Ozean (Abb. 1b).

Diese Temperaturzeitreihen wurden mit dem beobachteten Intervall von Eisschelfschmelzsensitivitäten kombiniert. Diese Sensitivitäten beschreiben wie viel Meter pro Jahr das Eisschelf von der Unterseite her schmilzt, wenn die Temperatur außerhalb des Eisschelfbereichs, im offenen Ozean, um ein Grad erhöht wird. Das Intervall basiert auf eine Reihe von Messungen an verschiedenen Eisschelfen und variiert zwischen 7 und 16 Meter pro (Payne et al. 2007; Jenkins and Holland 2007; Holland, Jenkins, and Holland 2008).

Um die dynamische Antwort des Eisschildes auf dieses basale Schmelzen zu quantifizieren, wurden drei Eisschildmodelle verwendet. Hierzu wurden die Ergebnisse einer Modellvergleichsstudie benutzt, an der auch das Potsdamer Eisschildmodell PISM im Rahmen des Projekts teilgenommen hat (Bindschadler et al. 2013; Nowicki et al. 2013a; Nowicki et al. 2013b). Diese Studie beschreibt die Antwort der Eisschilde auf eine konstante plötzlich angeschaltet Störung induziert durch ein konstantes basales Schmelzen von definierter Stärke. Aus der Antwort der Modelle auf diese Störung lässt sich durch Differentiation die sogenannte Lineare Antwortfunktion des Eisschildes berechnen (Abb. 1c).

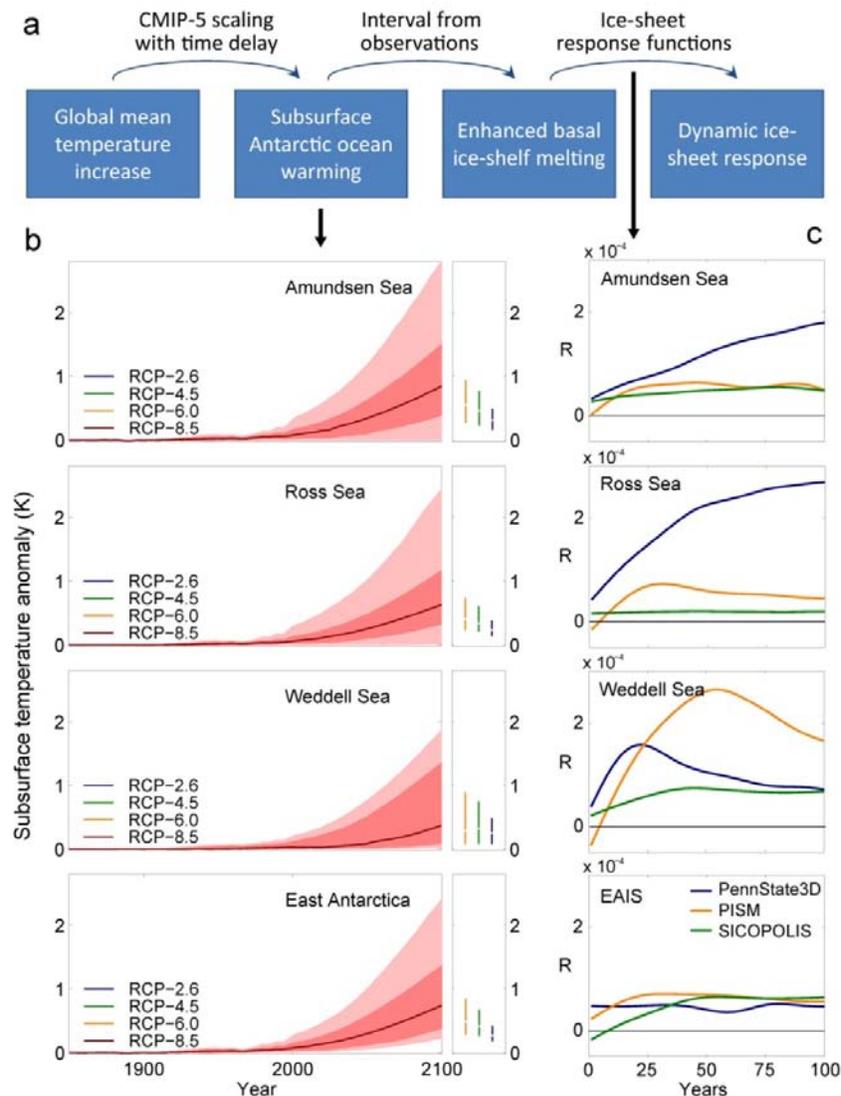


Abb. 1: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Berechnung der Unsicherheitsspanne der zukünftigen Entwicklung des Antarktischen Eisschildes. Die Unsicherheit in der globalen Mitteltemperatur wurde kombiniert mit der Unsicherheit in der Meeresströmungsänderungen (a). Dieser Temperaturfächer (b) wurde mit dem beobachteten Bereich der Schmelzsensitivität der Eisschilde verbunden und als Kern für die lineare Antworttheorie der Eisschilde (c) verwendet.

Mit Hilfe Linearer Antworttheorie konnte so jedes Temperaturszenario mit jedem Eisschild kombiniert werden. Dieses ist ohne nennenswerten Computeraufwand möglich und ergibt eine vollständige Projektion der Unsicherheit der zukünftigen Eisschildentwicklung.

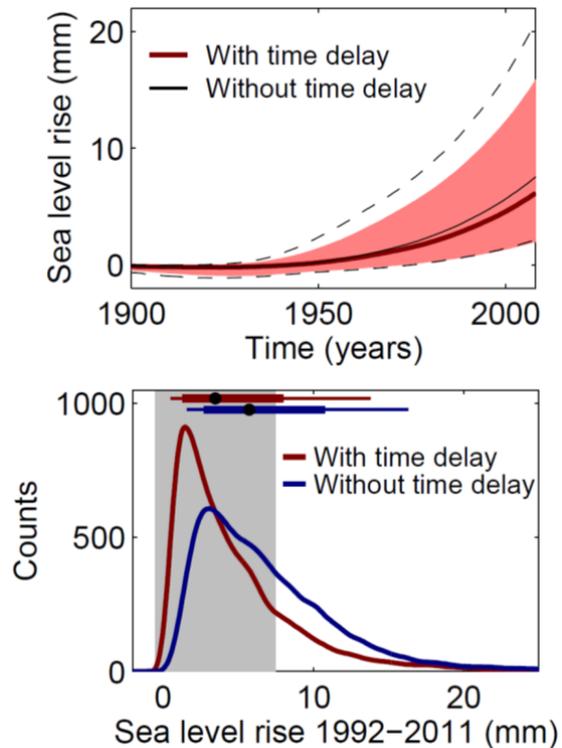


Abb. 2: Reproduktion des beobachteten Meeresspiegelbeitrags der Antarktis seit der Vor-industriellen Zeit. Links: Zeitentwicklung des Meeresspiegelanstiegs aufgrund der globalen Erwärmung berechnet nach der in Abb. 1 illustrierten Methode. Rechts: Unsicherheitsbereich der Projektionen (rote Kurve inklusive der aus den Ozeanmodellen folgenden Zeitverzögerung zwischen Oberflächenerwärmung und Meereseerwärmung in der Tiefe der Eisschelfunterkante; blaue Kurve ohne diese Zeitverzögerung) im Vergleich mit dem von den Modellen gemessenen Bereich (graue Schattierung). Der sogenannte „wahrscheinliche Bereich“ der Projektionen (dicker roter Balken am oberen Rand entsprechend 66% der Simulationen um den Median herum) ist in guter Übereinstimmung mit den Messungen.

Mit Hilfe dieser Unsicherheitsanalyse waren wir in der Lage den direkt beobachteten Beitrag der Antarktis zum globalen Meeresspiegelanstieg innerhalb der Satellitenperiode zwischen 1992 und 2011 (Shepherd et al. 2012) zu reproduzieren (Abb. 2). Das ist bisher, nach unserem Wissen, in keiner anderen Analyse gelungen.

Auf der Grundlage dieser Reproduktion beobachteten Meeresspiegelbeitrags, wurden die Projektionen bis zum Jahr 2100 durchgeführt (Abb. 3). Hierbei

ergaben sich Werte von bis zu 21cm globalem Meeresspiegelbeitrag für den wahrscheinlichen Bereich für das höchste Szenario. Unter Betrachtung der gesamten Evidenz vorhandener Studien wurde diese Zahl im IPCC-AR5 auf 16cm herabgesetzt. Diese Reduktion beruht unter anderem darauf, dass möglicherweise kontinentale Modelle wie hier benutzt aufgrund ihrer groben räumlichen Auflösung möglicherweise eine etwas schnellere Dynamik zeigen als die Wirklichkeit.

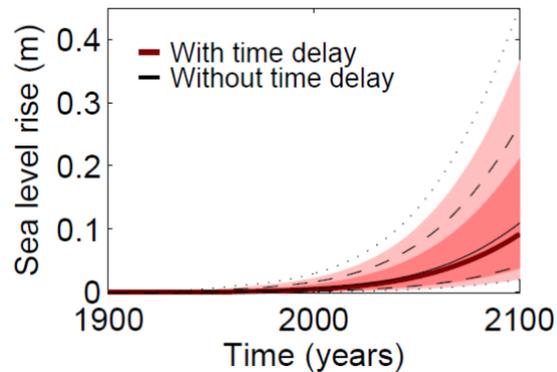


Abb. 3: Projektionen des Meeresspiegelbeitrags bis zum Jahr 2100.

Diese wurde unter anderem in einer Studie, die wir im Rahmen dieses Projekts vorgelegt haben gezeigt (Feldmann et al. 2014). In dieser Studie wurde aber auch gezeigt, dass unser Model, das Parallel Ice Sheet Model, die exakten hochaufgelösten Simulationen mit einem Full-Stokes Model sehr gut reproduzieren kann wenn die Auflösung entsprechend genau ist und dass die Abweichungen bei größeren Auflösungen sich auf die Geschwindigkeit der Reaktion auf Störungen beschränkt und nicht auf das dynamische Gesamtverhalten. Diese Studie war wichtig für die Glaubwürdigkeit des Modells und der Projektionen.

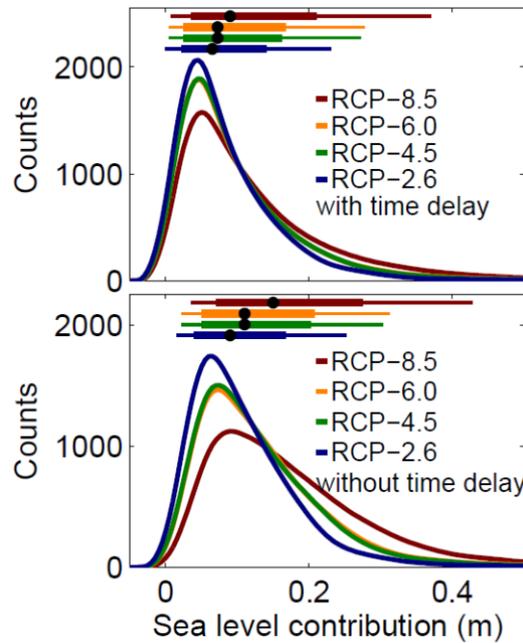


Abb. 4: Projektionen des Meeresspiegelbeitrags für das Jahr 2100 für die unterschiedlichen Szenarien mit Zeitverzögerung (oben) wie in Abb. 2 erklärt und ohne diese Zeitverzögerung (unten).

Entscheidend für die Glaubwürdigkeit unserer Projektionen, neben dem Vergleich mit der Full-Stokes Lösung (Feldmann et al. 2014) und der Modellierung der Beobachtungen (Abb. 2), war, dass die Ergebnisse ähnlichen Meeresspiegelbeiträge lieferten wie auch die Simulationen mit dem hochaufgelösten Ozeanmodellen des Südlichen Ozeans, BRIOS und FESOM (Timmermann, Wang, and Hellmer 2012; Timmermann and Hellmer 2013), die auch Teil des Projekts waren.

Hierzu wurden, entsprechend des Projektplans, Projektionssimulationen mit beiden Modellen durchgeführt, die sich ergebenden Schmelzraten mit den Antwortfunktionen der einzelnen Eismodelle kombiniert. Aufgrund der Stärke des Signal wurden hier nur die beiden Sektoren der Antarktis betrachtet, die die stärkste Störung erfahren (Weddellmeer und Rossmeer). Die Ergebnisse liegen innerhalb des Unsicherheitsbereichs der von der Kombination aller Klimamodellsimulationen aufgespannt wurde (Abb. 5).

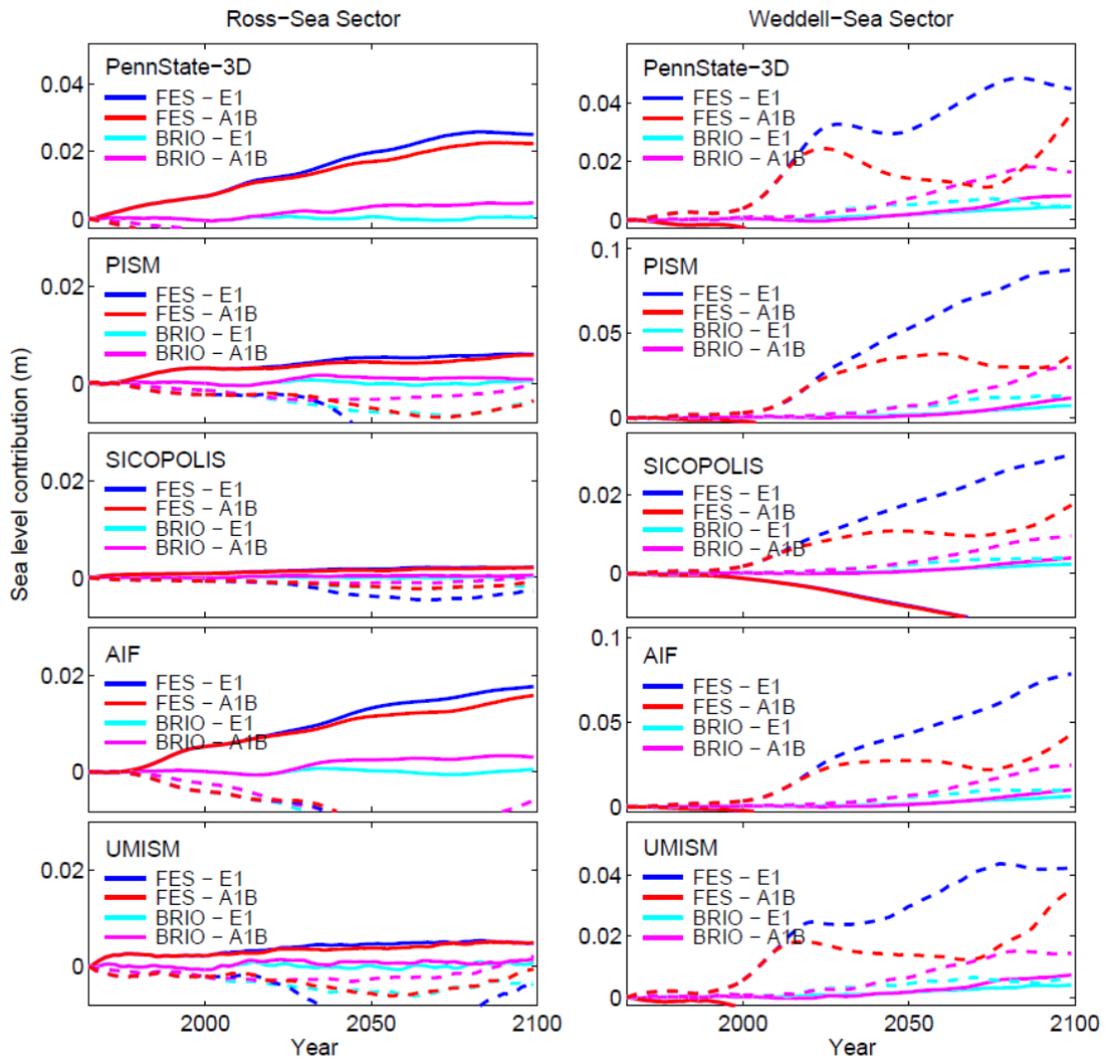


Abb. 5: Projektionen des Meeresspiegelbeitrags bis zum Jahr 2100 für die unterschiedlichen Szenarien mit den Ozeanmodellen FESOM und BRIOS. Die durchgezogenen Linien korrespondieren zu Simulationen die von dem globalen Klimamodell ECHAM-5 aus Hamburg angetrieben wurden, die gestrichelten Linien resultieren vom Antrieb mit dem englischen Modell HadCM-3. Der Unterschied zwischen diesen beiden Simulationsarten unterstreicht die Notwendigkeit des gewählten Ansatzes die gesamte Unsicherheit (globales Klima, lokale Meeresströmungen und unterschiedliche Eisdynamik) in die Projektionen mit einzubeziehen. Unsere Studie ist die erste, die das getan hat.

2.2 Risikoanalyse abrupten Eisverlustes in West- und Ostantarktis (PIK/AWI)

Weite Teile des Westantarktischen Eisschildes liegen auf einem Untergrund auf, der sich unterhalb des Meeresspiegels befindet. Diese sogenannten marinen Eisgebiete zeigen einen stark zunehmenden Eisverlust mit zunehmender Eisdicke an der Aufsetzlinie zwischen Eisschild und Eisschelf. Fällt nun der Untergrund ins Landesinnere hinein ab, dann führt dieses theoretisch zu einer Instabilität des Eisschildes (Schoof 2007b). Das würde bedeuten, dass eine Störung des Eisschildes zum Beispiel durch Erwärmung des umliegenden Meeres, zu einem unaufhaltbaren Eisverlust und dem damit einhergehenden Meeresspiegelanstieg führen könnte. Von dieser theoretischen Möglichkeit sind weitere Teile der Westantarktis betroffen (äquivalent zu etwa 3,5 Meter globalem Meeresspiegelanstieg).

Eine Zielsetzung des Projektes war eine Untersuchung der Möglichkeit einer solchen marinen Eisschild Instabilität in der Westantarktis. Dieses haben wir untersucht (Martin, Levermann, and Winkelmann 2014), wie weiter unten im Detail erläutert. Zusätzlich ergab sich durch die Veröffentlichung eines neuen verbesserten Datensatzes der Untergrundbeschaffenheit der Antarktis (Fretwell et al. 2013) die Möglichkeit eine ähnliche Analyse der Ostantarktis durchzuführen. Die Gefahr einer Instabilität in der Ostantarktis wird seit langem in der glaziologischen Wissenschaftswelt diskutiert, konnte aber bisher nicht gezeigt werden. Wir haben diese Instabilität gefunden und die Studie wurde zur Veröffentlichung im renommierten Wissenschaftsblatt Nature Climate Change akzeptiert (Mengel and Levermann 2014).

2.2.1 Risikoanalyse abrupten Eisverlustes in Westantarktis (PIK/AWI)

Der Untergrund der Westantarktis liegt zu weiten Teilen unterhalb des Meeresspiegels. Diese marinen Gebiete haben drei Hauptausflussgebiete in das Amundsenmeer, das Rossmeer und das Weddellmeer. Aus jedem dieser Regionen könnte theoretisch ein abrupter Eisverlust aus der Westantarktis initiiert werden. Satellitendaten haben gezeigt, dass die Gletscher Pine Island und Thwaites in den letzten zwanzig Jahren stark an Masse verloren haben und sich die Aufsetzlinie zwischen dem Untergrund aufliegendem Eisschild und schwimmendem Eisschelf zurückgezogen hat (Favier et al. 2014; Rignot, Mouginot, and Scheuchl 2011).

Bisher wurde aufgrund der beobachteten Veränderungen hauptsächlich die Entwicklung der Pine-Island- und Thwaitesgletscher untersucht. Durch eine Veröffentlichung der Projektpartner vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven

wurde gezeigt, dass mögliche Veränderungen in den Meeresströmungen im Weddellmeer eine verstärkte Erwärmung unterhalb des Filchner-Ronne Eisschelfs möglich ist (Hellmer et al. 2012).

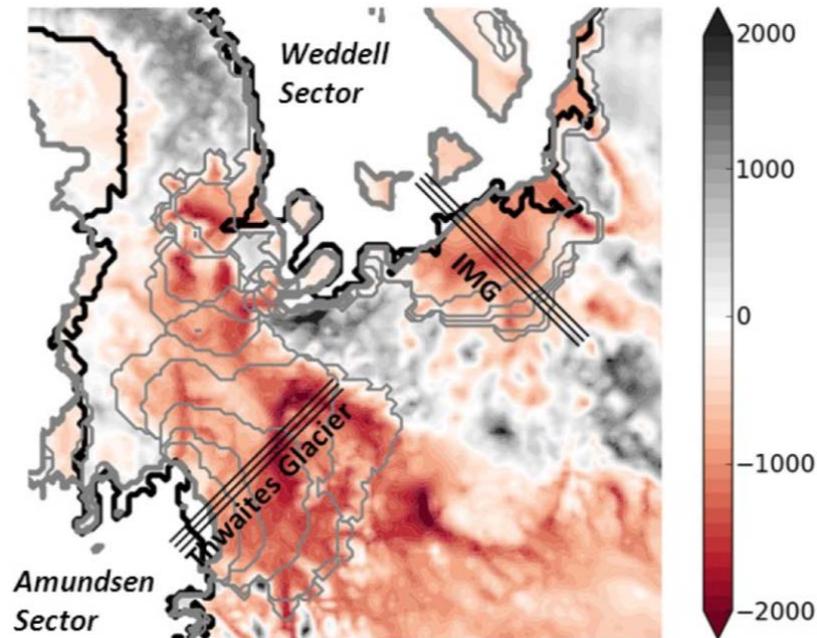


Abb 6: Bodentopographie in der Westantarktis. Rote Bereiche liegen unterhalb des Meeresspiegels.

Wir haben daraufhin untersucht wie die Eisdynamik auf Veränderungen in den einzelnen Meeren reagiert. Hierbei zeigte sich ein starker Unterschied zwischen einer Erwärmung im Weddellmeer im Vergleich zur gleichen Erwärmung im Amundsenmeer (Abb. 6).

Beide Störungen führen zu einem starken Eisverlust in der Westantarktis und entsprechend zu mehreren Metern weltweitem Meeresspiegelanstieg, aber entgegen herkömmlicher Meinung reagiert das Eis wesentlich schneller auf eine Erwärmung im Weddellmeer als auf Veränderungen im Amundsenmeer (Abb. 7).

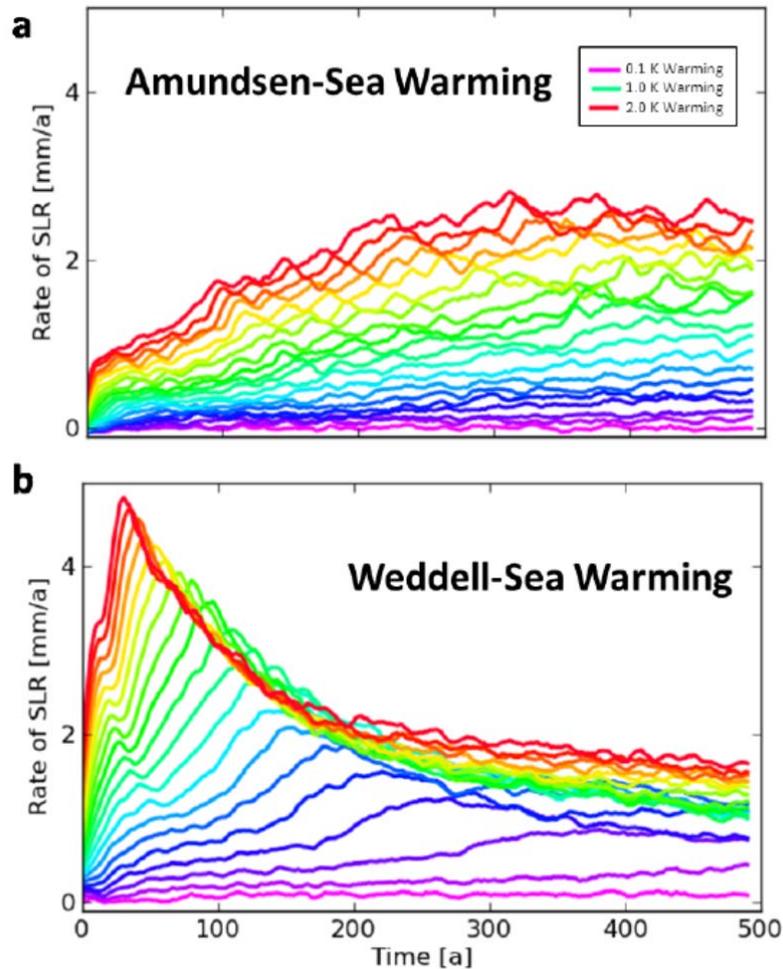


Abb. 7: Anstiegsrate des globalen Meeresspiegels nach Erwärmung im Amundsenmeer (a) und im Weddellmeer (b). Entgegen bisheriger Meinung, ist die Antwort des Eisschildes auf eine Erwärmung im Weddellmeer wesentlich abrupter als bei einer Erwärmung im Amundsenmeer.

Mit diesen Ergebnissen wurde ein neuer Forschungsfokus in Bezug auf den zukünftigen Meeresspiegelbeitrag der Antarktis nahegelegt. Das bisherige Konzentrieren auf das Amundsenmeer sollte um eine ozeanische und glaziologische Analyse der Weddellgebietes erweitert werden, welches bereits jetzt ein spezieller Forschungsschwerpunkt der deutschen Antarktisforschung ist, aber international bisher eine geringere Rolle gespielt hat.

2.2.2 Risikoanalyse abrupten Eisverlustes in Ostantarktis (PIK / AWI)

Die Ostantarktis wurde bislang dynamisch praktisch nicht betrachtet. Das Eis auf der Ostantarktis würde den Meeresspiegel weltweit um mehr als 50 Meter anheben, aber bislang wurden dort keine wesentlichen Eisverluste beobachtet.

Im Gegenteil wird angenommen, dass der zusätzliche Schneefall, der unter einer zukünftigen Erwärmung erwartet wird und aufgrund der großen Fläche zu großen Teilen auf die Ostantarktis fallen wird, den globalen Meeresspiegel senken wird. Wir haben in diesem Projekt gezeigt, dass auch die Ostantarktis die Möglichkeit einer Instabilität birgt.

Hierfür wurden neue verbesserte Topographiedaten (Fretwell et al. 2013) in das Parallel Ice Sheet Model eingearbeitet. Diese Daten zeigen marine Eisgebiete in weiten Teilen der Ostantarktis. Das größte zusammenhängende Gebiet ist das Wilkes Basin (Abb. 8). Dieses wurde in einer regionalen Simulation auf Stabilität gegenüber Untergrundschmelzen untersucht.

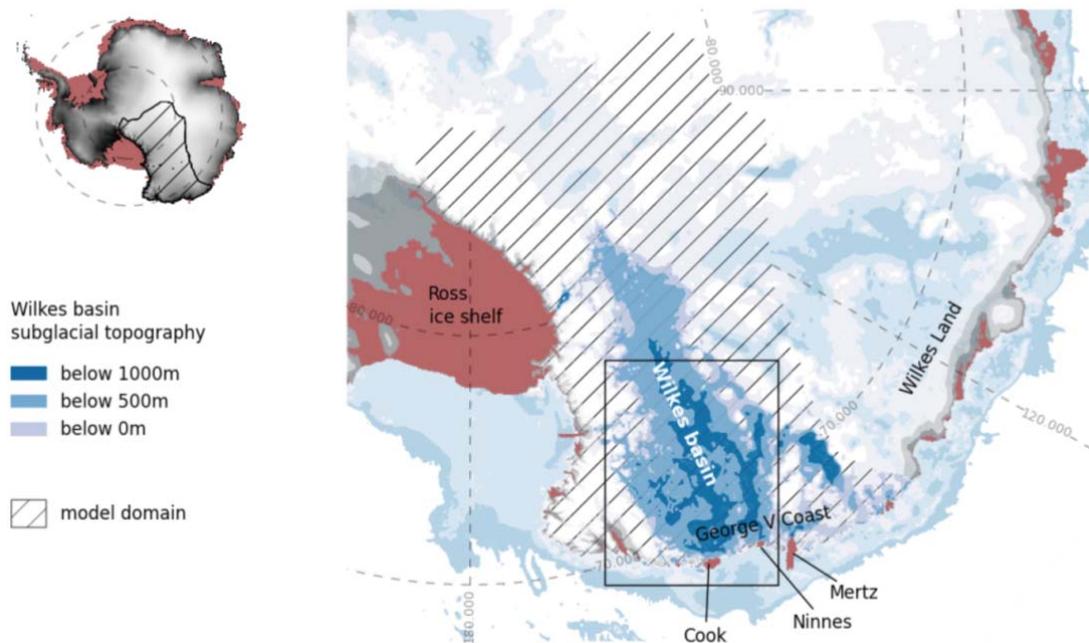


Abb. 8: *Potenziell instabile Eismassen in der Ostantarktis. In diesem Projekt wurde ein Teil der Ostantarktis (siehe links oben) mit einer regionalen Simulation untersucht. Die blauen Gebiete zeigen den Bereich des Eises, der unterhalb des Meeresspiegels auf dem Boden aufliegt und damit die Voraussetzungen für eine marine Eisschildinstabilität birgt.*

Es wurde gefunden, dass ein bestimmtes Eisvolumen an der Küste des Wilkes Basins (rotes Gebiet in Abb. 9) derzeit einen Abfluss des gesamten Eises des Wilkes Basins verhindert. Wird dieser „Eiskorken“ entfernt, so läuft das Wilkes Basin leer und der Meeresspiegel steigt weltweit um 3-4 Meter an (Abb. 10).

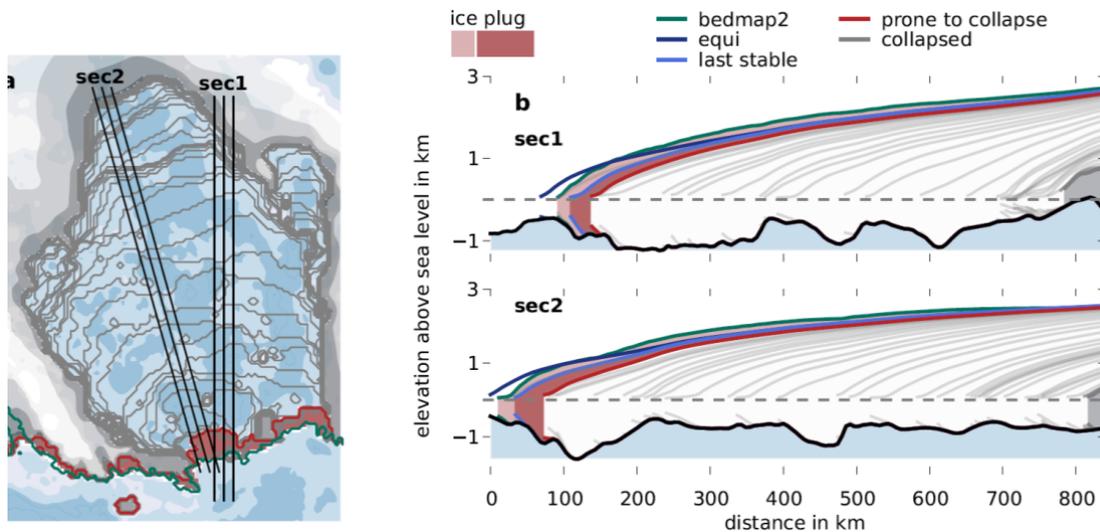


Abb. 9: Der „Eiskorken“ der ein unaufhaltsames Abfließen des Eisschildes im Wilkes Basin verhindert ist in rot eingezeichnet. Wird dieses Eisvolumen durch Schmelzen entfernt, dann zieht sich der Eisschild bis zum grau schattierten Bereich zurück und der Meeresspiegel steigt um 3-4 Meter weltweit an. Rechts sind die Schnitte durch das Eis gezeigt, die links als sec1 und sec2 gekennzeichnet sind.

Mit dieser Arbeit, die in der renommierten Fachzeitschrift Nature Climate Change erscheinen wird (Mengel and Levermann 2014), haben wir die Ostantarktis erstmal zu einem wichtigen Forschungsschwerpunkt in der Debatte um den zukünftigen Meeresspiegelanstieg gemacht.

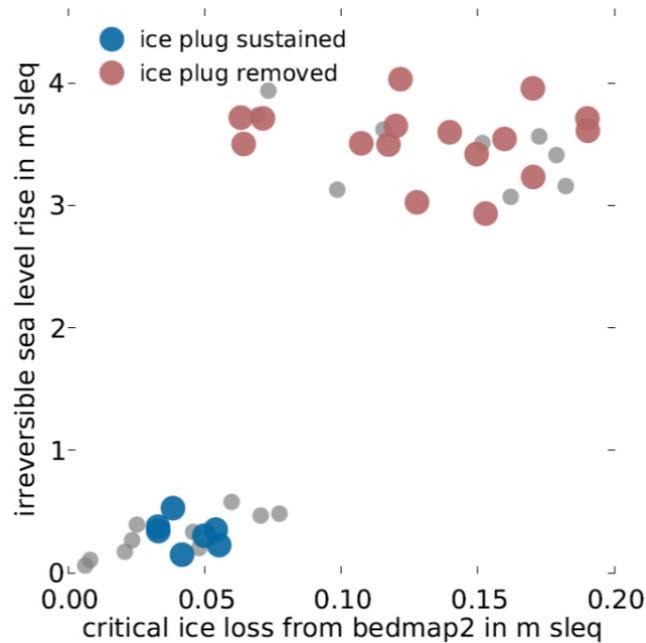


Abb. 10: Eisverlust vom Wilkes Basin nach entfernen des „Eiskorkens“ (rote Bereiche in Abb. 9). Auf der y-Achse ist der Meeresspiegelanstieg in Metern aufgetragen, den man bekommt, wenn man durch Schmelzen Eisvolumen entsprechend der x-Achse entfernt hat (auch in Metern Meeresspiegeläquivalent angegeben). Anders ausgedrückt: Wenn man mehr als 8cm Meeresspiegelanstieg durch Eisschmelze im Wilkes Basin verursacht hat (und damit den Eiskorken entfernt hat), dann läuft das Wilkes Basin leer und der Meeresspiegel steigt unaufhaltsam um 3-4m an, selbst wenn das Schmelzen aufhört.

2.3 Langfristig zu erwartender Meeresspiegelanstieg (PIK)

Innerhalb der IPCC Sachstandsberichte wird eine spezielle Ausdrucksweise für die Unsicherheit bezüglich wissenschaftlicher Aussagen verwendet. So wird die Aussage dass der Mensch einen großen Anteil am beobachteten Temperaturanstieg der Erde hat mit dem Prädikat „praktisch sicher“ belegt. Eine der wenigen anderen Aussagen im Bericht, die „praktisch sicher“ sind, ist, die dass der Meeresspiegelanstieg über das Jahr 2100 hinaus anhalten wird.

Um eine Aussage darüber machen zu können bis zu welchem Niveau der Meeresspiegel schlussendlich auf langen Zeitskalen ansteigen wird (das sogenannte „sea-level commitment“), wenn die Temperatur der Erde erhöht wird, haben wir eine Studie durchgeführt, die direkten Eingang in das Meeresspiegelkapitel des IPCC gefunden hat. Die Grafik 13.14. in (IPCC 2013) ist die Grafik 2 aus (Levermann, Clark, et al. 2013), die wir hier als Abb. 11 präsentieren.

Diese Studie bringt physikalische Simulationen für die Wärmeausdehnung des Ozeans, die Gebirgsgletscher und die Eisschilde auf Grönland und der Antarktis zusammen und vergleicht sie mit den Temperatur- und Meeresspiegeldaten, die wir aus vergangenen Erdperioden haben.

Diese sogenannten Paleodaten aus der Vergangenheit sind mit großen Unsicherheiten belegt und können daher nicht direkt Aufschluss über den zukünftigen langzeitlichen Meeresspiegelanstieg liefern. In Kombination mit den physikalischen Simulationen ergibt sich ein wesentlich schärferes Bild.

Es zeigt sich, dass die Meeresausdehnung aufgrund der Erwärmung in etwa 0.4 Meter pro Grad Erwärmung beiträgt. Diese Sensitivität entspricht einer vollständigen Vermischung der Wärme im Ozean und kann damit auch intuitive verstanden werden. Die Zeitskalen die mit diesem Meeresspiegelanstieg verbunden sind, sind mehrere Jahrhunderte. Sie entspricht der Zeitskala mit der sich die globale Mitteltemperatur an die erhöhte Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre anpasst (das sogenannte „warming commitment“).

Die Gebirgsgletscher äquilibrieren wesentlich schneller und sind bereits nach zwei Jahrhunderten bei ihrem Gleichgewichtszustand angekommen (Marzeion, Jarosch, and Hofer 2012). Aufgrund der relativ geringen Eismenge, die noch in den Gletschern gespeichert ist, ist der Beitrag klein im Vergleich zu dem der Eisschilde und selbst dem der Ozeanerwärmung.

Ein großer Beitrag ergibt sich vom Grönländischen Eisschild. Während der Beitrag nach 20000 Jahren (linke Spalte in Abb. 11) die typische stufenartige Form zeigt (Robinson, Calov, and Ganopolski 2012), die sich aus der selbstverstärkenden Rückkopplung zwischen Oberflächentemperatur und Eisdicke ergibt, ist der Beitrag nach 2000 Jahren durch eine glatte Funktion gegeben. Dieser Beitrag nimmt quasi-quadratisch mit der Temperatur zu. Die verwendeten physikalischen Simulationen wurden mit Daten aus der letzten Warmzeit (dem Eem) validiert und liefern eine robuste Abschätzung der zukünftigen Entwicklung auf diesen langen Zeitskalen.

Der größte Beitrag zum sea-level commitment auf langen Zeitskalen kommt von der Antarktis. Hierzu wurden Simulationen der letzten fünf Millionen Jahre verwendet (Pollard and Deconto 2009). Diese Simulationen basieren wie die übrigen auf physikalischen Grundgleichungen und wurden mit Paleodaten der Antarktis der letzten fünf Millionen Jahre validiert (Naish et al. 2009).

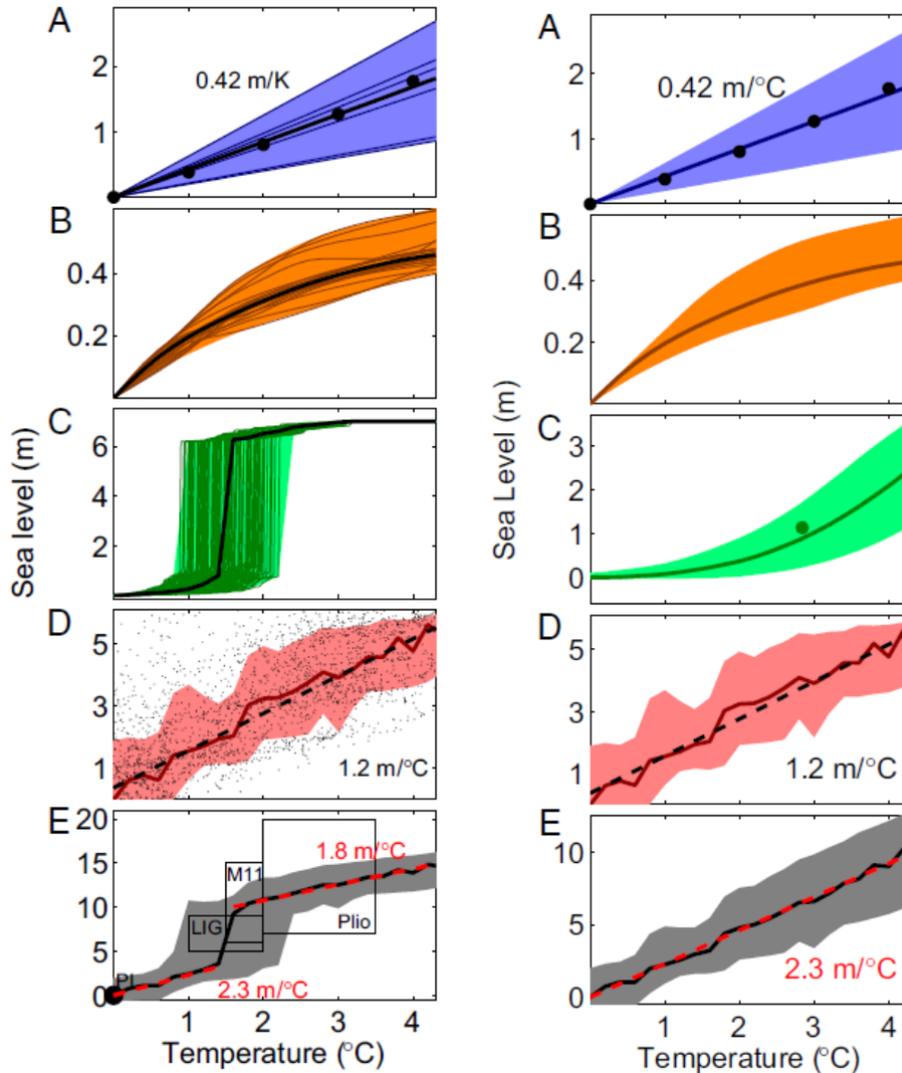


Abb. 11: Langzeitlicher weltweiter Meeresspiegelanstieg für unterschiedliche Grade der globalen Erwärmung (E). Gezeigt sind die Beiträge der Meeresausdehnung (A), Gebirgsgletscher (B) und der Eisschilde auf Grönland (C) und der Antarktis (D). Die linke Spalte zeigt die Situation nach mehr als 20000 Jahren im Vergleich zu vergangenen Zeitepochen mit erhöhter Temperatur und erhöhtem Meeresspiegel (E, links). Die rechte Spalte entspricht der Situation nach 2000 Jahren. Es ergibt sich ein Meeresspiegelanstieg von 2,3m pro Grad globaler Erwärmung. Diese Grafik zeigt, dass der Meeresspiegelanstieg nicht im Jahr 2100 stoppen wird sondern wesentlich über die Projektionen für das 21. Jahrhundert hinausgeht.

Diese Simulationen zeigen, dass die Antarktis mehr als einem Meter pro Grad globaler Erwärmung zum Meeresspiegel beitragen wird. Die Zeitskalen auf denen dieses passiert sind schwer einzugrenzen und bewegen sich im Bereich von mehreren Jahrhunderten bis zu einem Jahrtausend.

Zusammenfassend, kann klar gesagt werden, dass der Meeresspiegelanstieg weit über das Jahr 2100 hinaus anhalten wird. Entsprechend ihrer Größe wird die Antarktis mit großer Wahrscheinlichkeit den größten Anteil am langzeitlichen Meeresspiegelanstieg haben. Insgesamt wird sich der Meeresspiegel innerhalb der nächsten 2000 Jahre um 2,3 Meter erhöhen für jedes Grad globaler Erwärmung.

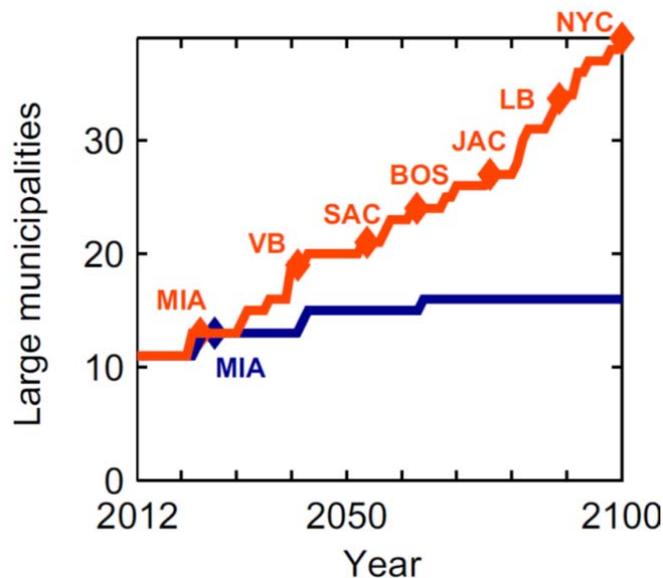


Abb 12: Anzahl der Küstenstädte die auf lange Zeit hin vom Meeresspiegel beeinträchtigt werden. Die blaue Kurve beschreibt das sogenannte RCP 2.6 Szenario, bei dem die globale Temperatur unter zwei Grad Erwärmung bleibt. Das rote Szenario ist das sogenannte business-as-usual scenario RCP 8.5. Die Stadt Miami in Florida bekommt unter beiden Szenarien Probleme mit dem Meeresspiegelanstieg während diese Situation für New York City (NYC) erst am Ende des Jahrhunderts unter RCP 8.5 erreicht wird (Strauss 2013b).

2.4 Folgen langzeitlichen Meeresspiegelanstiegs (PIK)

Auf der Grundlage der Berechnungen des langfristigen Meeresspiegelanstiegs wurden bereits drei Artikel angefertigt, die breites öffentliches Interesse erhalten haben.

Zum einen hat Ben Strauss einen Kommentar zur Studie verfasst, in der er berechnet hat zu welchem Zeitpunkt in diesem Jahrhundert die Treibhausgasemissionen soweit angestiegen sind, dass bestimmte amerikanische Küstenstädte in der Zukunft vom Meeresspiegel beeinträchtigt

werden (Abb. 12). Diese Studie wurde von US-Präsident Obama getwittert und von einer großen Reihe von Print- und Online-Medien aufgegriffen.

Im Rahmen des Projekts wurde des Weiteren berechnet welche UNESCO Weltkulturerbe-Stätten auf lange Sicht vom Meeresspiegel beeinträchtigt werden (Marzeion and Levermann 2013). Die Anzahl der betroffenen Stätten steigt bis zu einer Erwärmung von etwa zwei Grad an und stabilisiert dann bei etwa einem fünftel der 720 Kulturstätten. Bei drei Grad Erwärmung werden 3-12 Länder die Hälfte ihrer Landesfläche verlieren und 25-36 Länder wenigstens 10% des Staatsgebiets. In diesen Gebieten leben derzeit etwa 500 Millionen Menschen (Abb. 13).

Diese Studie wurde von Prof. Anny Cazenave, Mitglieder der Amerikanischen Adademie der Wissenschaft, in einem Artikel kommentiert, der in der nächsten Ausgabe der Zeitschrift Environmental Research Letters erscheinen wird. Ebenso haben die Zeitschriften Nature und Nature Climate Change die Studie mit kurzen Artikeln hervorgehoben.

Die Medienresonanz der Studie ging über das normale öffentliche Interesse an der Klimaforschung hinaus und umfasste nationale sowie internationale Leitmedien. Eine Auswahl wurde in Abb. 14 zusammengestellt.

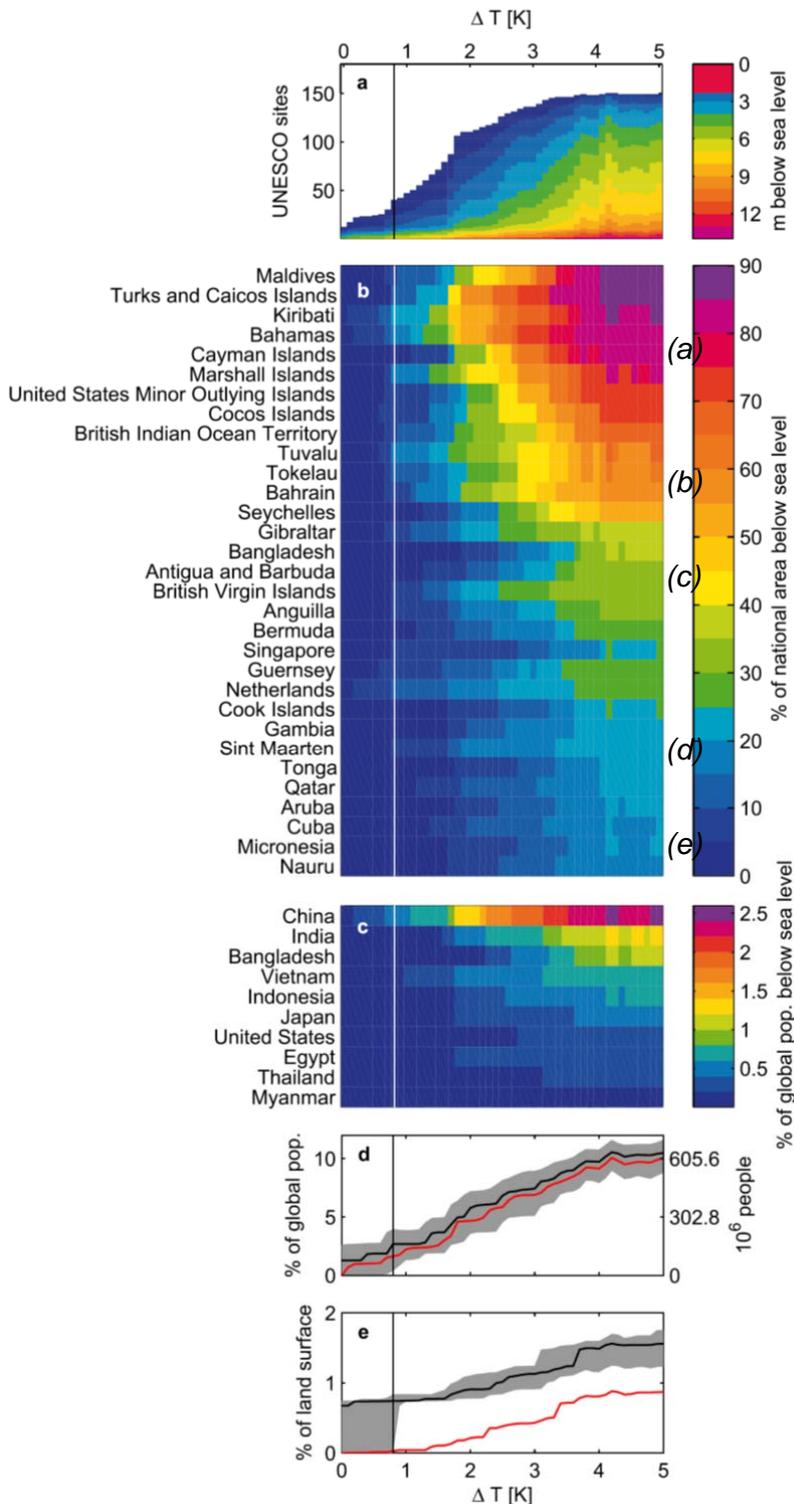


Abb. 13: Kulturelle Konsequenzen des langfristigen Meeresspiegelanstiegs bei unterschiedlichen Niveaus von 1-5 Grad globaler Erwärmung.

(a) Anzahl der Weltkulturerbestätten die vom Meeresspiegelanstieg beeinträchtigt werden.

(b) Prozentualer Landflächenverlust verschiedener Länder.

(c) Prozent der derzeitigen Bevölkerung die betroffen wäre aufgeschlüsselt auf verschiedene Länder.

(d) Prozent Weltbevölkerung die derzeit betroffen wäre.

(e) Prozent der globalen Landoberfläche, die betroffen wäre.

2.5 Zukünftiges Projekt zur nachhaltigen Verbesserung der Projektionen

Das hier vom BMBF geförderte Projekt hat in einigen Gebieten neue Forschungsschwerpunkte aufgetan. So wurde die Ostantarktis als mögliche dynamisch instabile Eisregion identifiziert. Diese Studie wird mit großer Wahrscheinlichkeit eine Reihe von Folgestudien nach sich ziehen, ebenso wie die Studie zum langfristigen Meeresspiegelanstieg, die ja bereits von der Wissenschaftsgemeinde aufgenommen und weiter bearbeitet wurde.

Tatsächlich zentral für die zukünftige Meeresspiegeldebatte ist aber die Studie zur Projektion des Antarktischen Beitrags zum zukünftigen Meeresspiegelanstieg des 21. Jahrhunderts. Hierin haben wir eine Methode entwickelt und vorgestellt, die in zukünftigen Studien weitere Verwendung finden sollte.

Während es eine etablierte internationale Projektstruktur für die Modellierung des zukünftigen Klimaentwicklung und damit der Wärmeausdehnung der Ozeane gibt (die sogenannten Coupled Model Intercomparison Projects, CMIP, in der wir uns derzeit in der sechsten Phase befinden), fehlt diese Art von Projekten für die beiden Eisschilde.

Gleichzeitig hat sich gezeigt, dass die Eisschilde bereits jetzt eine zunehmende Rolle für die Meeresspiegelentwicklung spielen (Van den Broeke et al. 2011) und unsere Studien zeigen, dass dieses sich in der Zukunft noch verstärken wird (Levermann, Clark, et al. 2013).

Der IPCC hat in seinem neusten Bericht zum ersten Mal Projektionen für den Beitrag der Antarktis zum zukünftigen Meeresspiegelbeitrag geliefert. Diese Projektionen waren derzeit noch ohne eine spezifizierte Temperaturabhängigkeit. Das bedeutet, dass die Autoren zwar gesagt haben, dass der Meeresspiegelbeitrag mit der Temperatur zunehmen wird, aber die derzeitigen Studien nicht ausreichen um diese Abhängigkeit zu quantifizieren. Entsprechend beinhaltet der Bericht nur ein Intervall, das angibt in welchem Bereich der Meeresspiegelbeitrag sich in diesem Jahrhundert bewegen wird.

Die hier entwickelte Methodik auf der Grundlage der Linearen Antworttheorie hat das Potenzial die Projektion auf eine feste Grundlage zu stellen. Es wird die gesamte Unsicherheitsbreite der atmosphärischen und ozeanischen Störung mit einbezogen und es werden unterschiedliche Eismodelle quantitativ einbezogen.

In den Vereinigten Staaten von Amerika wird derzeit ein Folgeprojekt für die Eisschilddynamik gestartet. Dieses soll das SeaRISE Projekt, an dem auch im Rahmen dieses Projektes teilgenommen wurde und dass die Grundlage unserer Projektionen darstellte, in die zweite Phase überführen.

Wir glauben, dass eine Weiterführung des hier geförderten Projekts eine wesentliche Verbesserung der Projektionen auf der Grundlage verbesserter Eismodelle und spezieller Ozeansimulationen sinnvoll wäre und wir würden gerne einen entsprechenden Antrag zur Begutachtung erarbeiten.



Abb 14: Die Berichterstattung zur Publikation zum Meeresspiegelanstieg und dem UNESCO Weltkulturerbe umfasste nationale sowie internationale Online- und Printmedien. Hier eine Auswahl.

2.6 Veröffentlichungen, die innerhalb des Projekts entstanden sind

(Projektteilnehmer in Fettdruck)

1. R.A. Bindschadler, S. Nowicki, A. Abe-Ouchi, A. Aschwanden, E. Bueller, H. Choi, J. Fastook, G. Granzow, R. Greve, G. Gutowski, C. Jackson, J. Johnson, **A. Levermann**, W.H. Lipscomb, **M.A. Martin**, M. Morlighem, B. Parizek, D. Pollard, S.F. Price, D. Ren, F. Saito, H. Seroussi, K. Takahashi, R. Walker, W.L. Wang, U. Herzfeld, H. Seddik, T. Sato; Ice-sheet model sensitivities to environmental forcing and their use in projecting future sea-level (The SeaRISE Project); *Journal of Glaciology* 59 (2013), 195-224. DOI:10.3189/2013JoG12J125.
2. **A. Levermann**, **R. Winkelmann**, S. Nowicki, J. Fastook, K. Frieler, R. Greve, **H.H. Hellmer**, **M.A. Martin**, **M. Mengel**, A.J. Payne, D. Pollard, T. Sato, **R. Timmermann**, W.L. Wang, R.A. Bindschadler; Projecting Antarctic ice discharge using response functions from SeaRISE ice-sheet models; *Earth System Dynamics Discussions* 4 (2013), 1117-1168, doi:10.5194/esdd-4-1117-2013.
3. **M.A. Martin**, **A. Levermann**, **R. Winkelmann**; Potentially abrupt ice discharge through West Antarctic Gateways: Weddell versus Amundsen Sea warming; submitted.
4. S. Nowicki, R.A. Bindschadler, A. Abe-Ouchi, A. Aschwanden, E. Bueller, H. Choi, J. Fastook, G. Granzow, R. Greve, G. Gutowski, U. Herzfeld, C. Jackson, J. Johnson, C. Khroulev, E. Larour, **A. Levermann**, W.H. Lipscomb, **M.A. Martin**, M. Morlighem, B. Parizek, D. Pollard, S.F. Price, D. Ren, E. Rignot, F. Saito, T. Sato, H. Seddik, H. Seroussi, K. Takahashi, R. Walker, W.L. Wang; Spatial sensitivities of the Greenland Ice Sheet to Environmental Changes (The SeaRISE Project); *Journal of Geophysical Research* (2013a), accepted.
5. S. Nowicki, R.A. Bindschadler, A. Abe-Ouchi, A. Aschwanden, E. Bueller, H. Choi, J. Fastook, G. Granzow, R. Greve, G. Gutowski, U. Herzfeld, C. Jackson, J. Johnson, **A. Levermann**, W.H. Lipscomb, **M.A. Martin**, M. Morlighem, B. Parizek, D. Pollard, S.F. Price, D. Ren, E. Rignot, F. Saito, T. Sato, H. Seddik, H. Seroussi, K. Takahashi, R. Walker, W.L. Wang; Spatial sensitivities of the Antarctic Ice Sheet to Environmental Changes (The SeaRISE Project); *Journal of Geophysical Research* (2013b), accepted.
6. **R. Timmermann**, Q. Wang, **H. Hellmer**; Ice shelf basal melting in a global finite-element sea ice/ice shelf/ocean model, *Annals of Glaciology*, INT GLACIOL SOC, (2012) 53 (60). doi:10.3189/2012AoG60A156 , hdl:10013/epic.40279.
7. **R. Winkelmann**, **A. Levermann**, K. Frieler, **M.A. Martin**; Uncertainty in future solid ice discharge from Antarctica; *The Cryosphere Discussions* 6 (2012a), 673-714; DOI 10.5194/tcd-6-673-2012.
8. **R. Winkelmann**, **A. Levermann**, **M.A. Martin**, K. Frieler; Increased future ice discharge from Antarctica owing to higher snowfall; *Nature* 492 (2012b), 239-242.
9. **R. Winkelmann** and **A. Levermann**; Linear response functions to project contributions to future sea level; *Climate Dynamics* 38 (2012c), DOI: 10.1007/s00382-012-1471-4, online first.
10. **A. Levermann**; Make supply chains climate-smart; *Nature* 506 (2014), 27-29.
11. J. Hinkel, D. Linke, A.T. Vafeidis, M. Perrette, R.J. Nicholls, R. Tol, B. Marzeion, X. Fettweis, C. Ionescu, **A. Levermann**; Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise; *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (2014), 3292-3297, doi: 10.1073/pnas.1222469111.
12. J.A. Church, P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, **A. Levermann**, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D.

Stammer, A.S. Unnikrishnan; Letter to the Editor: Sea-Level Rise by 2100; Science 342 (2013), 1445, doi: 10.1126/science.342.6165.1445-a.

13. **A. Levermann**, P.U. Clark, B. Marzeion, G. Milne, D. Pollard, V. Radic, A. Robinson; The multi-millennial sea-level commitment of global warming; Proceedings of the National Academy of Sciences 110 (2013), 13745 - 13750, doi:10.1073/pnas.1219414110.
14. B. Marzeion & **A. Levermann**; Loss of Cultural World Heritage and currently inhabited places to sea-level rise; Environmental Research Letters 9 (2014), 034001. doi:10.1088/1748-9326/9/3/034001.
15. **M. Mengel** and **A. Levermann**; Irreversible discharge from East Antarctica after ice-plug removal; Nature Climate Change (2014), accepted.
16. I. Linkov, T. Bridges, F. Creutzig, J. Decker, C. Fox-Lent, W. Kröger, J.H. Lambert, **A. Levermann**, B. Montreuil, J. Nathwani, R. Nyer, O. Renn, B. Scharte, A. Scheffler, M. Schreurs, T. Thiel-Clemen; Risking Resilience: Changing the Paradigm; Nature Climate Change (2014), accepted.

Literatur

- Bindschadler, Robert a., Sophie Nowicki, Ayako Abe-OUCHI, Andy Aschwanden, Hyeungu Choi, Jim Fastook, Glen Granzow, et al. 2013. "Ice-Sheet Model Sensitivities to Environmental Forcing and Their Use in Projecting Future Sea Level (the SeaRISE Project)." *Journal of Glaciology* 59 (214): 195–224. doi:10.3189/2013JoG12J125. <http://www.igsoc.org/journal/59/214/j12J125.html>.
- Brocq, a.M. Le, a.J. Payne, M.J. Siegert, and R.B. Alley. 2009. "A Subglacial Water-Flow Model for West Antarctica." *Journal of Glaciology* 55 (193) (December 1): 879–888. doi:10.3189/002214309790152564. <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0022-1430&volume=55&issue=193&spage=879>.
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, et al. 2013. "Sea Level Change." In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Favier, L., G. Durand, S. L. Cornford, G. H. Gudmundsson, O. Gagliardini, F. Gillet-Chaulet, T. Zwinger, a. J. Payne, and a. M. Le Brocq. 2014. "Retreat of Pine Island Glacier Controlled by Marine Ice-Sheet Instability." *Nature Climate Change* 4 (2) (January 12): 117–121. doi:10.1038/nclimate2094. <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/nclimate2094>.
- Feldmann, J., T. Albrecht, C. Khroulev, F. Pattyn, and a. Levermann. 2014. "Resolution-Dependent Performance of Grounding Line Motion in a Shallow Model Compared with a Full-Stokes Model according to the MISIP3d Intercomparison." *Journal of Glaciology* 60 (220): 353–360. doi:10.3189/2014JoG13J093. <http://www.igsoc.org/journal/60/220/j13J093.html>.
- Fettweis, X., B. Franco, M. Tedesco, J. H. van Angelen, J. T. M. Lenaerts, M. R. van den Broeke, and H. Gallée. 2012. "Estimating Greenland Ice Sheet Surface Mass Balance Contribution to Future Sea Level Rise Using the Regional Atmospheric Climate Model MAR." *The Cryosphere Discussions* 6 (4) (August 2): 3101–3147. doi:10.5194/tcd-6-3101-2012. <http://www.the-cryosphere-discuss.net/6/3101/2012/>.
- Fretwell, P., H. D. Pritchard, D. G. Vaughan, J. L. Bamber, N. E. Barrand, R. Bell, C. Bianchi, et al. 2013. "Bedmap2: Improved Ice Bed, Surface and Thickness Datasets for Antarctica." *The Cryosphere* 7 (1) (February 28): 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013. <http://www.the-cryosphere.net/7/375/2013/>.
- Gladstone, Rupert M., Victoria Lee, Jonathan Rougier, Antony J. Payne, Hartmut Hellmer, Anne Le Brocq, Andrew Shepherd, Tamsin L. Edwards, Jonathan Gregory, and Stephen L. Cornford. 2012. "Calibrated Prediction of Pine Island Glacier Retreat during the 21st and 22nd Centuries with a Coupled Flowline Model." *Earth and Planetary Science Letters* 333-334 (June): 191–199. doi:10.1016/j.epsl.2012.04.022. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012821X12001896>.
- Graversen, Rune G, Sybren Drijfhout, Wilco Hazeleger, Roderik Wal, Richard Bintanja, and Michiel Helsen. 2010. "Greenland's Contribution to Global Sea-Level Rise by the End of the 21st Century." *Climate Dynamics*.

- Hellmer, Hartmut H., Frank Kauker, Ralph Timmermann, Jürgen Determann, and Jamie Rae. 2012. "Twenty-First-Century Warming of a Large Antarctic Ice-Shelf Cavity by a Redirected Coastal Current." *Nature* 485 (7397) (May 9): 225–228. doi:10.1038/nature11064. <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature11064>.
- Holland, P R, A Jenkins, and D M Holland. 2008. "The Response of Ice Shelf Basal Melting to Variations in Ocean Temperature." *Journal of Climate* 21.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- . 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jenkins, A, and D Holland. 2007. "Melting of Floating Ice and Sea Level Rise." *Geophysical Research Letters* 34 (August): 16609.
- Le Brocq, a. M., a. J. Payne, and a. Vieli. 2010. "An Improved Antarctic Dataset for High Resolution Numerical Ice Sheet Models (ALBMAP v1)." *Earth System Science Data* 2 (2) (October 11): 247–260. doi:10.5194/essd-2-247-2010. <http://www.earth-syst-sci-data.net/2/247/2010/>.
- Levermann, Anders, P. U. Clark, B. Marzeion, G. a. Milne, D. Pollard, V. Radic, and A. Robinson. 2013. "The Multimillennial Sea-Level Commitment of Global Warming." *Proceedings of the National Academy of Sciences* (July 15): 1–6. doi:10.1073/pnas.1219414110. <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1219414110>.
- Levermann, Anders, Ricarda Winkelmann, Sophie Nowicki, J. L. Fastook, K. Frieler, R. Greve, H. H. Hellmer, et al. 2013. "Projecting Antarctic Ice Discharge Using Response Functions from SeaRISE Ice-Sheet Models." *Earth System Dynamics Discussions* 4 (2) (December 13): 1117–1168. doi:10.5194/esdd-4-1117-2013. <http://www.earth-syst-dynam-discuss.net/4/1117/2013/>.
- Ligtenberg, S. R. M., W. J. Berg, M. R. Broeke, J. G. L. Rae, and E. Meijgaard. 2013. "Future Surface Mass Balance of the Antarctic Ice Sheet and Its Influence on Sea Level Change, Simulated by a Regional Atmospheric Climate Model." *Climate Dynamics* (April 16). doi:10.1007/s00382-013-1749-1. <http://link.springer.com/10.1007/s00382-013-1749-1>.
- Martin, Maria A, Anders Levermann, and Ricarda Winkelmann. 2014. "Potentially Abrupt Ice Discharge through West Antarctic Gateways: Weddell versus Amundsen Sea Warming Main Part." *Nature Communications* submitted.
- Marzeion, B, and A Levermann. 2013. "Loss of Cultural World Heritage to Sea-Level Rise." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* submitted (December 18). doi:10.1073/pnas.0709640104. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2154402&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.

- . 2014. "Loss of Cultural World Heritage and Currently Inhabited Places to Sea-Level Rise." *Environmental Research Letters* 9 (3) (March 1): 034001. doi:10.1088/1748-9326/9/3/034001. <http://stacks.iop.org/1748-9326/9/i=3/a=034001?key=crossref.b354dee9225889ff61938a83ebed6099>.
- Marzeion, B., a. H. Jarosch, and M. Hofer. 2012. "Past and Future Sea-Level Change from the Surface Mass Balance of Glaciers." *The Cryosphere* 6 (6) (November 12): 1295–1322. doi:10.5194/tc-6-1295-2012. <http://www.the-cryosphere.net/6/1295/2012/>.
- Mengel, M., and A. Levermann. 2014. "Ice Plug Prevents Irreversible Discharge from East Antarctica." *Nature Climate Change* accepted.
- Naish, T, R Powell, R Levy, G Wilson, R Scherer, F Talarico, L Krissek, et al. 2009. "Obliquity-Paced Pliocene West Antarctic Ice Sheet Oscillations." *Nature* 458: 322–328.
- Nowicki, Sophie, Robert a. Bindschadler, Ayako Abe-Ouchi, Andy Aschwanden, Ed Bueler, Hyeungu Choi, Jim Fastook, et al. 2013a. "Insights into Spatial Sensitivities of Ice Mass Response to Environmental Change from the SeaRISE Ice Sheet Modeling Project II: Greenland." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118 (2) (June 10): 1025–1044. doi:10.1002/jgrf.20076. <http://doi.wiley.com/10.1002/jgrf.20076>.
- . 2013b. "Insights into Spatial Sensitivities of Ice Mass Response to Environmental Change from the SeaRISE Ice Sheet Modeling Project I: Antarctica." *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118 (2) (June 12): 1002–1024. doi:10.1002/jgrf.20081. <http://doi.wiley.com/10.1002/jgrf.20076>.
- Payne, Antony J, Paul R Holland, Andrew P Shepherd, Ian C Rutt, Adrian Jenkins, and Ian Joughin. 2007. "Numerical Modeling of Ocean-Ice Interactions under Pine Island Bay's Ice Shelf." *Journal of Geophysical Research* 112: 10019.
- Pfeffer, W T, J T Harper, and S O'Neel. 2008. "Kinematic Constraints on Glacier Contributions to 21st-Century Sea-Level Rise." *Science* 321: 1340–1343.
- Pollard, D, and R.~M. Deconto. 2009. "Modelling West Antarctic Ice Sheet Growth and Collapse through the Past Five Million Years." *Nature* 458: 329–332.
- Price, Stephen F, Antony J Payne, Ian M Howat, and Benjamin E Smith. 2011. "Committed Sea-Level Rise for the next Century from Greenland Ice Sheet Dynamics during the Past Decade." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 108 (22) (May 31): 8978–83. doi:10.1073/pnas.1017313108. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=3107304&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>.
- Pritchard, Hamish D, Robert J Arthern, David G Vaughan, and Laura a Edwards. 2009. "Extensive Dynamic Thinning on the Margins of the Greenland and Antarctic Ice Sheets." *Nature* 461 (7266) (October 15): 971–5. doi:10.1038/nature08471. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19776741>.
- Rignot, E, J Mouginot, and B Scheuchl. 2011. "Ice Flow of the Antarctic Ice Sheet." *Science* 333 (6048) (September 9): 1427–1430. doi:10.1126/science.1208336. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21852457>.

- Robinson, Alexander, Reinhard Calov, and Andrey Ganopolski. 2012. "Multistability and Critical Thresholds of the Greenland Ice Sheet." *Nature Climate Change* 2 (6) (March 11): 429–432. doi:10.1038/nclimate1449. <http://www.nature.com/doi/10.1038/nclimate1449>.
- Schoof, C. 2007a. "Marine Ice-Sheet Dynamics. Part 1. The Case of Rapid Sliding." *Journal of Fluid Mechanics* 573: 27–55.
- . 2007b. "Ice Sheet Grounding Line Dynamics: Steady States, Stability, and Hysteresis." *Journal of Geophysical Research* 112: F03S28.
- Shepherd, A., E. R. Ivins, A. Geruo, V. R. Barletta, M. J. Bentley, S. Bettadpur, K. H. Briggs, et al. 2012. "A Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance." *Science* 338 (6111) (November 29): 1183–1189. doi:10.1126/science.1228102. <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.1228102>.
- Strauss, Benjamin H. 2013a. "Rapid Accumulation of Committed Sea-Level Rise from Global Warming." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 (34) (July 29): 1–2. doi:10.1073/pnas.1312464110. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23898210>.
- . 2013b. "Rapid Accumulation of Committed Sea-Level Rise from Global Warming." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 (34) (July 29): 1–2. doi:10.1073/pnas.1312464110. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23898210>.
- Timmermann, Ralph, Q. Wang, and H.H. Hellmer. 2012. "Ice-Shelf Basal Melting in a Global Finite-Element Sea-Ice/ice-Shelf/ocean Model." *Annals of Glaciology* 53 (60) (November 1): 303–314. doi:10.3189/2012AoG60A156. <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0260-3055&volume=53&issue=60&spage=303>.
- Timmermann, Ralph., and Hartmut H. Hellmer. 2013. "Southern Ocean Warming and Increased Ice Shelf Basal Melting in the Twenty-First and Twenty-Second Centuries Based on Coupled Ice-Ocean Finite-Element Modelling." *Ocean Dynamics* 63 (9-10) (August 9): 1011–1026. doi:10.1007/s10236-013-0642-0. <http://link.springer.com/10.1007/s10236-013-0642-0>.
- Van den Broeke, Michiel R., Jonathan Bamber, Jan Lenaerts, and Eric Rignot. 2011. "Ice Sheets and Sea Level: Thinking Outside the Box." *Surveys in Geophysics* 32 (4-5) (June 22): 495–505. doi:10.1007/s10712-011-9137-z. <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s10712-011-9137-z>.