

FACT SHEET

DAS AKTUELLE WISSEN
ZUM THEMA:

Eisschilde

Was ist Stand der Forschung?

Veränderungen in der Masse polarer Eisschilde sind von erheblicher Bedeutung für die Gesellschaft, da sie den Meeresspiegel und die Bedingungen im Ozean beeinflussen. Sie sind eine Folge der internen Dynamik des Eises und eine Antwort des Systems „Eisschild“ auf externe Veränderungen wie zum Beispiel jene des Ozeans und der Atmosphäre.

Es ist heute nachgewiesen, dass die Eisschilde und Gletscher weltweit an Masse verlieren. Der Trend dieses Massenverlusts ist eindeutig und zeigt, dass in den Jahren 2005 bis 2010 die Eismassen für mehr als die Hälfte des jährlichen Meeresspiegelanstieges verantwortlich sind (siehe Tabelle 1). In Zahlen gesprochen betrug der Anteil grönländischer und antarktischer Eisschilde am globalen Meeresspiegelanstieg circa 1 Millimeter pro Jahr. Wie groß der Beitrag der Eisschilde zum Meeresspiegel ist, wird mithilfe von drei verschiedenen, unabhängigen Methoden untersucht: Sie alle ergeben das gleiche Bild.

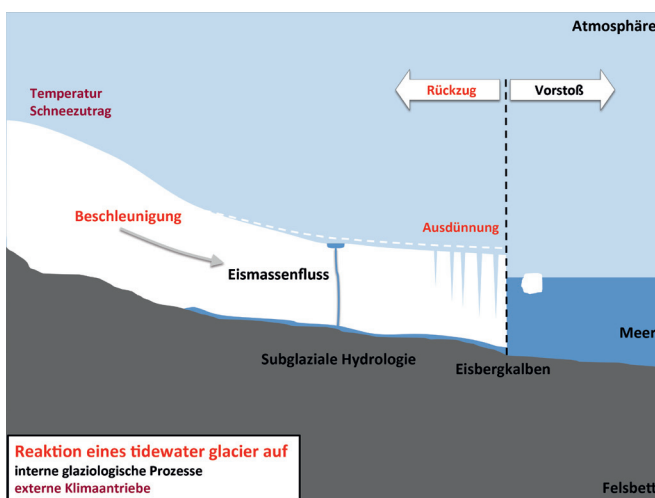
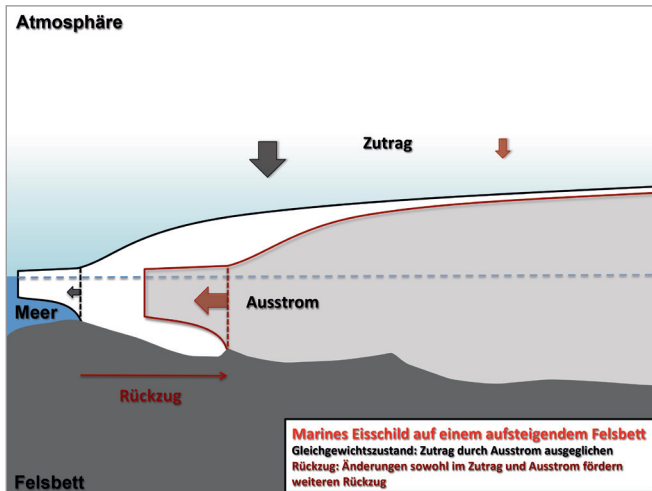
Fakt ist auch, dass die Gletscher in den Randregionen Grönlands und der Antarktis ihr Fließtempo deutlich erhöht haben. Ein Beispiel: Floss der Jakobshavn Isbrae an der Westküste Grönlands in den 1990er Jahren mit einem Tempo von 5 bis 6 Kilometern pro Jahr, verdreifachte er im Jahr 2012 sein Tempo auf nahezu 16 Kilometer pro

	1992-2000 Gt/a	2000-2011 Gt/a	2005-2010 Gt/a	2005-2010 mm/a SLE
Grönland	-51 ± 65	-211 ± 37	-263 ± 30	+0.73 ± 0.08
Antarktis	-48 ± 65	-87 ± 43	-81 ± 37	+0.23 ± 0.10
Antarktische Halbinsel	-8 ± 17	-29 ± 12	-36 ± 10	+0.10 ± 0.03
Westantarktis	-38 ± 32	-85 ± 22	-102 ± 18	+0.28 ± 0.05
Ostantarktis	-2 ± 54	26 ± 36	58 ± 31	-0.16 ± 0.09
Grönland + Antarktis	-100 ± 92	-298 ± 58	-344 ± 48	0.96 ± 0.13
Gletscher & Eiskappen				0.72 ± 0.18 (1.02 ± 0.14)

Tabelle 1: Übersicht über die Massenverluste der Eisschilde in Grönland und der Antarktis. Alle Angaben sind in Gigatonnen pro Jahr und beziehen sich auf die jeweils im Tabellenkopf genannten Zeiträume. (Tabelle: A. Humbert, AWI, Datenbasis: Shepherd et al., 2012 und Oerlemans, pers. comm.)

Jahr. Gletscher wie er transportieren aus diesem Grund mehr Eis in den angrenzenden Ozean und tragen damit zunehmend zum Meeresspiegelanstieg bei. Neben der Beschleunigung müssen bei der Frage des Massenverlustes aber auch Veränderungen in der Schneeakkumulation berücksichtigt werden. In Grönland beispielsweise ist der Massenverlust an der Oberfläche der Eisschilde aufgrund des erhöhten Schmelzwasserabflusses besonders ausgeprägt.

Große Veränderungen der Eisschilde werden angetrieben durch Wechselwirkungen mit dem Ozeanwasser an

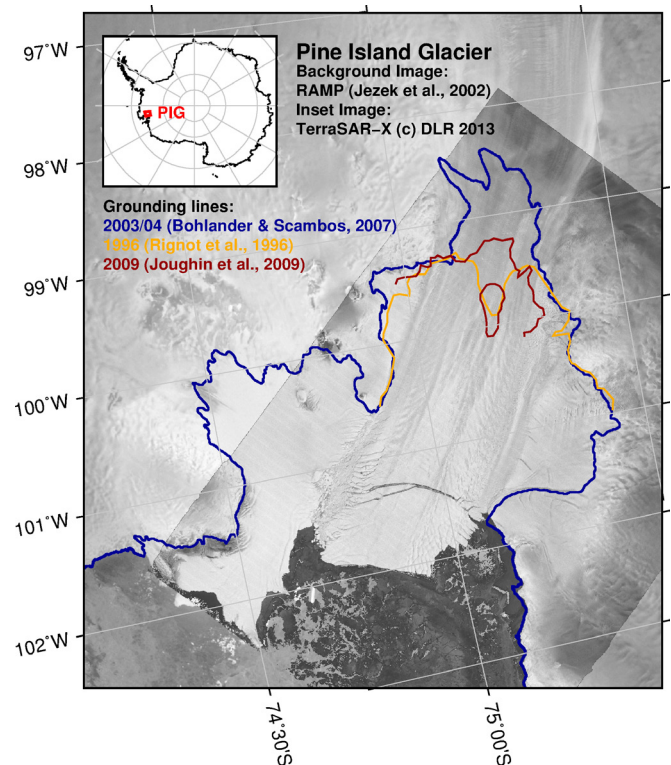


Diese zwei Grafiken zeigen die gegenwärtigen Veränderungen der Eisschilde in Grönland und der Antarktis. Als „tidewater glacier“ werden große Auslassgletscher bezeichnet, die direkt ins Meer fließen und an deren Front Eisberge kalben. Man geht davon aus, dass sie ein zyklisches Fließverhalten aufweisen, welches auf interne Prozesse der Eisdynamik zurückzuführen ist und das auf kurzen Zeitskalen nicht oder nur schwach an das Klima gekoppelt ist. Auf längeren Zeitskalen wird die Zukunft der Gletscher jedoch immer vom Klima beeinflusst. Daher ist es wichtig, die eisdynamischen von den klimabedingten Veränderungen zu unterscheiden, um Aussagen über die Stabilität dieser Gletscher und deren Beiträge zur Massenbilanz und damit zum Meeresspiegel treffen zu können. Bisher ist die Dynamik dieser Gletscher noch wenig verstanden. Wichtige Prozesse wie das basale Gleiten und die damit in Verbindung stehende Hydrologie sowie die Prozesse, die das Kalben von Eisbergen verursachen, sind daher Inhalt aktueller wissenschaftlicher Arbeit. (Grafiken: AWI)

der Unterseite der frei schwimmenden Eismassen, den Schelfeisen. Höhere Schmelzraten, verursacht durch Veränderungen in der Ozeandynamik, können die Schelfeise ausdünnen. In der Folge nimmt deren Rückhaltekraft auf die sie speisenden Gletscher ab, wodurch die Gletscher dann beschleunigen und mehr Eis in den Ozean transportieren. Vor allem in jenen Regionen Grönlands und der Antarktis, in denen sich die Gletscher beschleunigen, konnte der Strom warmer Wassermassen unter



Diese TerraSAR-X-Satellitenaufnahme zeigt, wie weit sich die Kalbungsfront des westgrönländischen Gletschers Jakobshavn Isbrae im Zeitraum der Jahre 1875 bis 2012 zurückgezogen hat. Der Gletscher fließt durch ein schmales Tal in den Ozean und zählt deshalb zu den sogenannten Auslassgletschern. (Abbildung: DLR/AWI)



Diese TerraSAR-X-Satellitenaufnahmen des Pine Island Gletschers in der Westantarktis enthält farblich eingezeichnet die Positionen der Aufsetzlinie des Gletschers. Die Aufsetzlinie ist der Übergang vom gegründeten Inlandeis zum schwimmenden Schelfeis. Der Pine Island Gletscher zeigt momentan sehr hohe Ausdünnungsraten, die weit bis ins Inlandeis wirken. Ein Beispiel: Im Zeitraum 2003 bis 2007 wurden an seiner Aufsetzlinie Ausdünnungsraten von bis zu 6 Meter/Jahr gemessen. (Abbildung: DLR/RAMP/AWI)

die Schelfeise nachgewiesen werden. Ebenso wurde das Ausdünnen der Schelfeise an Orten beobachtet, wo warme Wassermassen auf den Kontinentalschelf strömen. In der Westantarktis findet der Massenverlust in der

Amundsensee und entlang der Antarktischen Halbinsel statt. Nachdem die Gletscher an der Antarktischen Halbinsel während der 1990er Jahre noch weitgehend im Gleichgewicht waren/schienen, beschleunigen sich diese nun durch den Aufbruch einzelner Schelfeise und den Rückzug der Kalbungsfronten. Die Gletscher verlieren also signifikant an Masse. Obwohl die Fläche der Gletscher an der Antarktischen Halbinsel nur einen kleinen Teil des antarktischen Kontinents ausmacht (etwa 4 Prozent), tragen sie heute mit etwa 25 Prozent zum gesamten Massenverlust der Antarktis bei.

Der größte Teil des Massenverlustes in der Antarktis wird durch wenige Gletscher in der Amundsensee verursacht, die sich stark beschleunigen (zum Beispiel der Pine Island Gletscher, siehe Abbildung links). Leichte Massenzunahmen in der Ostantarktis sind zum Teil auf ungewöhnlich hohe Niederschläge (z.B. Dronning Maud Land) zurückzuführen.



Blick auf die Kante des Filchner-Ronne-Schelfeises im Weddellmeer, Antarktis
(Foto: R. Timmermann, AWI)

Was wissen wir noch nicht?

An vielen Stellen fehlen uns zur Zeit Schlüsselgrößen, um die Dynamik des heutigen Systems zu verstehen und zukünftige Änderungen bewerten zu können. Ein Beispiel dafür sind die Schmelzraten an der Unterseite der Schelfeise und schwimmenden Zungen von Auslassgletschern Grönlands (Wenn Eisschilde an ihrem Rand durch enge Täler Richtung Meer fließen, bezeichnet man diese Gletscher als Auslassgletscher).

Eine der großen Unbekannten in der Frage nach dem Beitrag der Eisschilde zum zukünftigen Meeresspiegel ist die Stabilität mariner Eisschilde und damit verbunden die Rückzugsrate der Aufsetzlinie. Als sol-

che bezeichnet man jene Linie, an der das auf dem Untergrund aufliegende Inlandeis in schwimmendes Schelfeis übergeht. In manchen Regionen liegen große Bereiche des Felsbetts unterhalb des Meeresspiegels (marin) und sind in Richtung Inlandeis geneigt. Wir wissen, dass diese Voraussetzungen das Potenzial bergen, dass die Eisschilde instabil werden. Für einzelne Systeme, wie zum Beispiel das Westantarktische Eisschild, können wir aber nicht sagen, ob sie derzeit stabil sind oder aber ob die aktuellen Veränderungen zu instabilen Verhältnissen führen.

Die Prozesse direkt an der Aufsetzlinie sind von großer Bedeutung für die Dynamik der marinen Eisschilde und deren Beitrag zum Meeresspiegel. Neben der Beobachtung dieser Entwicklungen ist es daher für unsere numerischen Modelle sehr wichtig, die Prozesse an der Aufsetzlinie und deren zeitliches Verhalten möglichst genau abzubilden. Aktuelle Studien zeigen einerseits, dass dazu eine Modellauflösung in der Größenordnung von etwa 1 Kilometer und darunter benötigt wird. Andererseits wird deutlich, dass Modelle, die auf Näherungslösungen der Impulsbilanz basieren, die Physik auf diesen Skalen nicht adäquat abbilden.

Die Modelle, welche bisher zur Bestimmung der zukünftigen Massenbilanz der Eisschilde eingesetzt wurden, basierten zum größten Teil auf solchen Näherungslösungen. Sie nutzten grobe Gitter und konnten bisher eine korrekte Behandlung der Aufsetzzone nicht nachweisen. Deshalb gilt: Diese und andere Modelle müssen stark verbessert werden, um künftig das Ausmaß des Meeresspiegelanstieges exakter prognostizieren zu können.

Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass Simulationen der beteiligten physikalischen Prozesse (<1km) auch die Kenntnis der Topographie des Felsbettes erfordern, auf dem sich die Eisschilde befinden – und das möglichst in der entsprechend hohen Auflösung. Diese Informationen aber stehen heute nur aus wenigen Regionen der Antarktis zur Verfügung. Zudem ist weitgehend unbekannt, wo das Eis auf Fels und wo auf Sediment aufliegt. Die Menge des Schmelzwassers und dessen räumliche Verteilung hängen zudem vom thermischen Zustand des Eises an seiner Basis ab. Diese basalen Eigenschaften bestimmen das Gleiten des Eises auf dem Untergrund. Das Gleiten ist damit neben dem Kalben eines der großen ungelösten Probleme der Eisschild- und Gletscherforschung. Das Eisbergkalben spielt bei Schelfeisen der Antarktis und bei der Dynamik der grönländischen Auslass-

gletscher eine essentielle Rolle. In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass es hier eine Verbindung zweier Prozesse gibt: (1) Wasser aus den Seen, die sich an der Oberfläche des Eisschildes bilden, sickert über Schmelzkanäle durch das Eis, gelangt an dessen Unterseite und von dort bis an die Aufsetzlinie dieser Gletscher. (2) Dort angekommen, steigt das Schmelzwasser auf und führt zu Schmelzvorgängen an der Unterseite des schwimmenden Eises – ein Prozess, der wiederum das Kalben beeinflusst.

Was müssen wir tun, um diese Abläufe in Modellen abzubilden? Wir Eismodellierer stehen vor der großen Herausforderung, innerhalb des nächsten Jahrzehnts, Wege zu finden, mit denen es uns gelingt, die Bildung der Schmelzkanäle und die sich anschließenden Schmelzprozesse in unseren Modellen abzubilden. Gleichzeitig brauchen wir ein Kalbungsgesetz, das diesen Prozess mit einschließt. Nur so werden wir die Beschleunigung der Gletscher in Modellen abbilden können und so zu Prognosen gelangen, die verlässlich und genau sind.

Mit welchen Methoden wollen wir die Lücken füllen?

Wir brauchen zwei unterschiedliche Herangehensweisen: die eine ist die Beobachtung von Prozessen und Elementen des Systems (z.B. subglaziale Schmelzkanäle) auf einer Skala, die für uns heute nicht erschließbar ist. Wir werden nur bedingt die heutigen Methoden in ihrer räumlichen Auflösung verfeinern können. Hier bedarf es neuer Ansätze. Gleichzeitig werden wir in umfangreichen Messprogrammen die modernsten Forschungsgeräte und Messinstrumente einsetzen, um zum Beispiel die Eisdicke und damit auch die Felsbettgeometrie detaillierter zu bestimmen.

Von gleicher Wichtigkeit ist es, durch die Beobachtung verschiedener glaziologischer Größen eine Basis zu bilden, die es uns ermöglicht, die heutige Dynamik der Eisschilde zu verstehen und sie auch als Referenz für die Bewertung zukünftiger Veränderungen zu nutzen. Dazu müssen wir Schlüsselregionen definieren, in denen wir repräsentative Auslassgletscher, Eisströme und Schelfeise überwachen, um Veränderungen frühzeitig zu erkennen.

Die zweite Methode liegt in einem neuen Ansatz der numerischen Modellierung. Numerische Modelle unterschiedlicher Komplexität können in verschiedenen räumlichen Auflösungen betrieben werden, um so die Auswirkungen der physikalischen Prozesse auf die Be-

wegung des Eises und damit den Massenverlust von Eisströmen und Gletschern zu quantifizieren.

(Stand: September 2013)

Publikationen

Bamber, J. L., Riva, R. E. M., Vermeersen, B. L. A., and Le-Brocq, A. M.: Re-assessment of the Potential Sea-Level Rise from a Collapse of the West Antarctic Ice Sheet, *Science*, 324, 901-903, doi:10.1126/science.1169335, 2009.

Bindschadler, R. A. et al.: Ice-sheet model sensitivities to environmental forcing and their use in projecting future sea level (the SeaRISE project), *Journal of Glaciology*, 59, 195-224, doi:10.3189/2013JoG12J125, 2013.

Gardner, A. S., Moholdt, G., Cogley, J. G., Wouters, B., Arendt, A. A., Wahr, J., Berthier, E., Hock, R., Pfeffer, W. T., Kaser, G., Ligtenberg, S. R. M., Bolch, T., Sharp, M. J., Hagen, J. O., van den Broeke, M. R., and Paul, F.: A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009, *Science*, 340, 852-857, doi:10.1126/science.1234532, 2013.

Pattyn, F. et al: Grounding-line migration in plan-view marine ice-sheet models: results of the ice2sea MIS-MIP3d intercomparison, *Journal of Glaciology*, 59, 410-422, doi: 10.3189/2013JoG12J129, 2013.

Pritchard, H. D., Arthern, R. J., Vaughan, D. G., and Edwards, L. A.: Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets, *Nature*, 461, 447-558, doi:10.1038/nature08471, 2009.

Shepherd, A. et al.: A Reconciled Estimate of Ice-Sheet Mass Balance, *Science*, 338, 1183-1189, doi:10.1126/science.1228102, 2012.

Kontakt zu den AWI-Experten



Prof. Dr. Angelika Humbert

Tel: 0471 4831-1834

E-Mail: Angelika.Humbert@awi.de