



Wie schnell schmilzt Grönlands Eis?

Hohe Dynamik am Rand des Eisschildes im Nordatlantik

Das Abschmelzen des grönländischen Eisschildes ist ein entscheidender Faktor für das Ausmass des zukünftigen Meeresspiegelanstiegs. Zur Zeit ist der Beitrag von Grönland zum Meeresspiegelanstieg noch relativ gering, betrug in den letzten paar Jahren aber doch schon 10–20%. In Zukunft könnte er noch deutlich ansteigen. Wie rasch der Eisschild in Grönland schmelzen wird, hängt von dynamischen Vorgängen ab, die den Eisabbau stark beschleunigen können. Für diese Prozesse gibt es noch keine verlässlichen Prognosen für die Zukunft. Aktuelle Beobachtungen, sowohl in Grönland als auch in der Antarktis, zeigen so hohe Schwankungen in der Eisdynamik, dass sich daraus keine klaren Trends ablesen lassen. Dies führt zu relativ grossen Unsicherheiten bezüglich des Meeresspiegelanstiegs, vor allem in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts. Ein Anstieg im Bereich zwischen einem halben und zwei Metern bis 2100 scheint möglich.

Der grönländische Eisschild ist nach der Antarktis die zweitgrösste Eismasse auf der Erde. Er enthält eine Masse, die als Wasser für eine Erhöhung des weltweiten Meeresspiegels um rund 7 Meter ausreichen würde. Doch diese riesige Eismasse ist eigentlich nur ein Relikt aus der letzten Eiszeit, die vor über 10'000 Jahren endete. Seine Existenz unter heutigen Klimabedingungen verdankt er seiner grossen Masse und der auf bis zu 3000 Metern hoch gelegenen zentralen Fläche, wo durch die dort herrschenden kalten

Temperaturen der Niederschlag als Schnee fällt. Aus Beobachtungen aus der Vergangenheit und anhand von Modellrechnungen lässt sich ableiten, dass unter den heutigen Klimabedingungen in Grönland kein vergleichbar grosser Eisschild entstehen würde, wenn es ihn nicht schon gäbe. Daraus lässt sich bereits der Schluss ziehen, dass ein allfälliges Abschmelzen des Eisschildes für lange Zeit irreversibel wäre.

Der Schmelzprozess verstärkt sich selbst

Da die Temperatur in der Atmosphäre mit abnehmender Höhe zunimmt, kann eine Verminderung der Eisdicke zu einem sich selbst beschleunigenden Prozess führen: Wenn die Dicke des Eisschildes abnimmt, liegt dadurch die Eisoberfläche in geringerer Höhe und ist damit höheren Temperaturen ausgesetzt. Diese höheren Temperaturen beschleunigen das Abschmelzen, die Dicke nimmt weiter ab und die Temperaturen weiter zu, usw. Dies zeigt, dass es sich hier zwar zu Beginn um einen langsamen Vorgang handelt, der jedoch mit der Zeit immer schneller wird.

Dieser Höhen-Temperatur-Effekt ist nicht der einzige Teufelskreis, in den die Eismasse geraten kann. Eis ist nicht eine feste Masse, sondern fliesst wie ein zähflüssiger Pudding, der sich auf alle Seiten ausbreitet, soweit er nicht durch Hindernisse gestoppt wird. Die Eismasse schmilzt vor allem am Rand, dort wo das Eis in tiefen Lagen liegt und die Temperaturen relativ hoch sind. Schmilzt am Rand Eis weg, so fliesst Eis aus den höher gelege-

nen Gebieten nach. Solange die Schneefälle im Zentrum des Eisschildes die Schmelze ausgleichen, verändert sich die Eisdicke nicht. Überwiegt hingegen die Schmelze am Rand, verringert sich dort die Eisdicke, und der Eisfluss aus dem Inneren des Eisschildes nimmt aufgrund der steileren Oberfläche zu. Auf diese Weise kann sich die Eisoberfläche in grossen Gebieten absenken. Das Schmelzgebiet wird damit immer grösser. Dieser Vorgang ist anfänglich langsam, verstärkt sich aber selbst und kann zu einer Reduktion oder zum Verschwinden des Eisschildes in einigen tausend Jahren führen.

Beschleunigter Eisabfluss ins Meer

Ein beträchtlicher Teil des im Inneren des Eisschildes gebildeten Eises wird durch riesige Ausflussgletscher direkt ins Meer transportiert, wo es als Eisberge grosse Strecken zurücklegt und langsam schmilzt. Nun hat sich in den letzten zehn Jahren die Fliessgeschwindigkeit vieler Ausflussgletscher stark erhöht, bei einigen Gletschern bis auf das Doppelte. Der grösste unter ihnen, der Jakobshavn Isbrae, beschleunigte von 7 km pro Jahr auf nun 13 km pro Jahr, womit natürlich auch der Abfluss von Eis aus dem Eisschild entsprechend zunahm. Beobachtungen zeigen, dass die Gletscher sowohl an der Ost- wie an der Westküste fast zur gleichen Zeit Teile ihrer im Meer schwimmenden Zungen verloren haben und ihr Eisfluss sich beschleunigt hat. Ursprünglich wurde vermutet, dass die stark zunehmende Schmelze an der Gletscheroberfläche die Ursache sei: Vermehrter Zufluss von Oberflächen-Schmelzwasser durch Spalten und Höhlen zum Gletscheruntergrund wirkt dort wie ein Schmiermittel, so dass die Reibung ab-, und die Fliessgeschwindigkeit zunimmt. Diesen Prozess kennt man von den Alpengletschern sehr gut. Es wurden auch kleinere Änderungen der Fliessgeschwindigkeit gemessen, die durch das Abfliessen von kilometergrossen Schmelzwasserseen verursacht werden. Das Wasser solcher Seen kann sich in kurzer Zeit einen Weg ans Gletscherbett bahnen, mit Abflussmengen in der Grössenordnung der Niagarafälle. Die grossen Eisströme scheinen jedoch nicht sehr stark auf die erhöhte Schmelzwasserzufuhr zu reagieren.

Inzwischen nimmt man aufgrund von Beobachtungen und Modellrechnungen an, dass die Beschleunigung der Ausflussgletscher auf erhöhte Ozeantemperaturen zurückzuführen ist.¹ Durch

das wärmere Wasser schmelzen die schwimmenden Gletscherzungen, werden dünner und zerbrechen schliesslich ganz. Dadurch werden die Druckverhältnisse im Gletscher so verändert, dass das Eis schneller ins Meer fliesst und auch schneller abbricht. Durch die Beschleunigung wird mehr Eis vom Inneren des Eisschildes wegtransportiert, und die Eisoberfläche senkt sich bis weit in den Eisschild hinein ab. Da der Jakobshavn Isbrae durch einen 80 km langen, bis 1500 Meter unter den Meeresspiegel reichenden Kanal fliesst, ist es möglich, dass ein weiterer schneller Rückzug der Abbruchfront bevorsteht, denn über die Stabilität der jetzigen Position der Abbruchfront weiss man zur Zeit zu wenig.²

Führt Eisdynamik zur Katastrophe?

In letzter Zeit wurde die Frage diskutiert, ob diese Dynamik des Eisflusses zu einer starken Beschleunigung des Abschmelzens des grönländischen Eisschildes und damit zu einem starken Meeresspiegelanstieg führen kann. Von einem Meeresspiegelanstieg von weit über einem Meter bis Ende dieses Jahrhunderts war zum Teil die Rede. Diese Frage ist zur Zeit sehr schwierig zu beantworten, denn es fehlen ganz einfach die Daten, um die in den letzten Jahren und Jahrzehnten abgelaufenen Prozesse genügend erfassen und interpretieren zu können. Die Fragezeichen rund um die Eisdynamik sind so gross, dass diese Frage in den Abschätzungen zum Meeresspiegelanstieg im jüngsten IPCC-Bericht ausgeklammert wurde. Dies hatte zur Folge, dass die neusten IPCC-Projektionen zum Meeresspiegelanstieg etwas geringer ausfielen als im letzten Bericht, allerdings eben nur aus dem Grund, dass die grönländische Eisdynamik ausgeklammert wurde.

Kann man aufgrund neuer Erkenntnisse mehr sagen, wenigstens über potenzielle Entwicklungen und Risiken? Bezüglich Katastrophenszenarien wurde kürzlich eine, wenn auch nicht sehr beruhigende, Obergrenze gesetzt: Die Menge des möglichen Eisabflusses durch die Ausflussgletscher ist begrenzt, da deren Zahl und Querschnitt beschränkt sind. Berechnungen zeigen, dass Ausflussgeschwindigkeiten, die zu einer Meeresspiegelerhöhung von über zwei Metern bis zum Ende dieses Jahrhunderts führen würden, physikalisch unwahrscheinlich sind.³ Die schlechte Nachricht: Ein Anstieg von bis zu zwei Metern kann nicht ganz ausgeschlossen werden. Auch

kleine Gletscher am Rand des Eisschildes, die nicht im Meer enden, verlieren zur Zeit stark an Masse. Dies trägt wesentlich zum Massenverlust des Eisschildes bei,⁴ doch wurde dies bisher nur regional begrenzt erfasst.

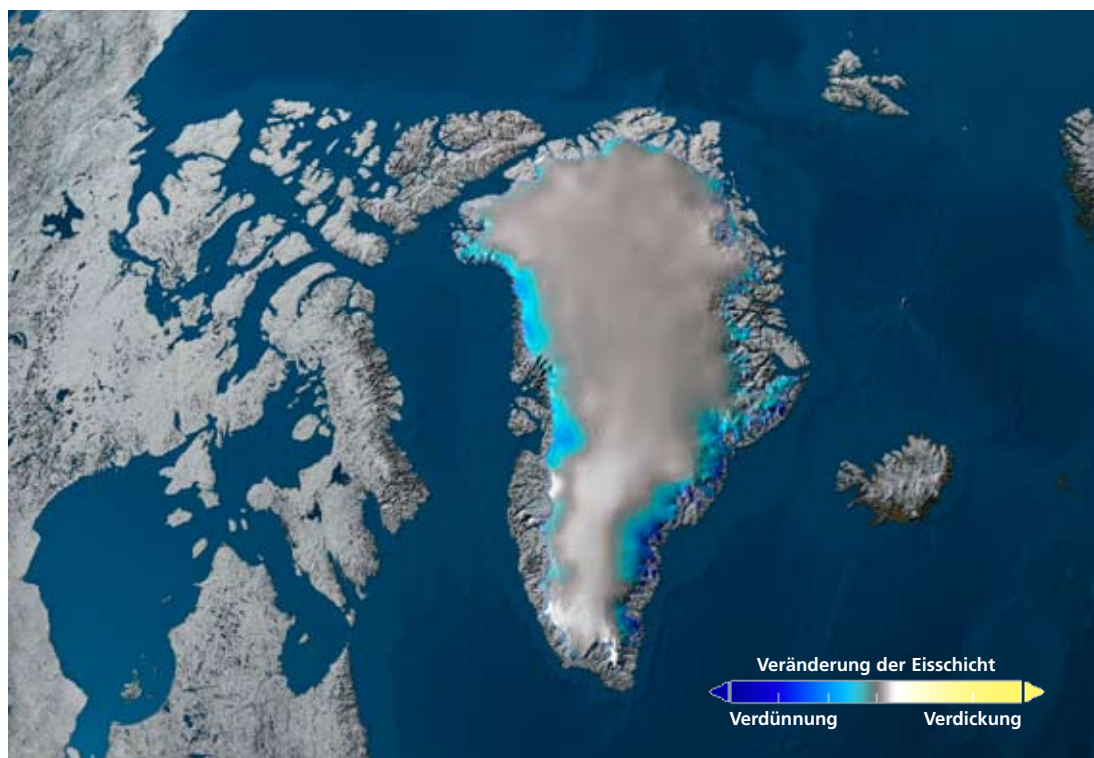
Rascher Meeresspiegelanstieg in der Vergangenheit

Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass sehr rasche Veränderungen möglich sind. In früheren Warmzeiten bzw. beim Übergang von Warmzeiten zu Eiszeiten waren zum Teil sehr rapide Veränderungen und rasche Anstiege des Meeresspiegels zu verzeichnen. In der letzten Warmzeit vor 125'000 Jahren waren die Temperaturen in Grönland rund 5 °C höher als heute, und der Meeresspiegel lag 4 bis 6 Meter über dem heutigen Niveau. Aufgrund der verstärkten Erwärmung in hohen Breiten sind solche Temperaturen bei lediglich 2.5 °C globaler Erwärmung zu erwarten. Vergleiche mit früheren Epochen mit starken Abschmelzvorgängen und Meeresspiegelanstiegen vor 125'000 oder 15'000 Jahren sind allerdings nur beschränkt

hilfreich, weil damals die Vergletscherung der Arktis anders aussah als heute und weitere grosse Eismassen vorhanden waren (z.B. der Laurentidische Eisschild, der das ganze heutige Kanada und Teile der USA bedeckte). Kürzlich veröffentlichte Untersuchungen zeigen immerhin, dass das Abschmelzen des Laurentide-Eisschildes anscheinend zu Meeresspiegelanstiegen von rund einem Meter pro Jahrhundert geführt hat. Obwohl Vergleiche schwierig sind, liegen die damaligen Verhältnisse in ähnlichen Grössenordnungen wie heute in Grönland.⁵

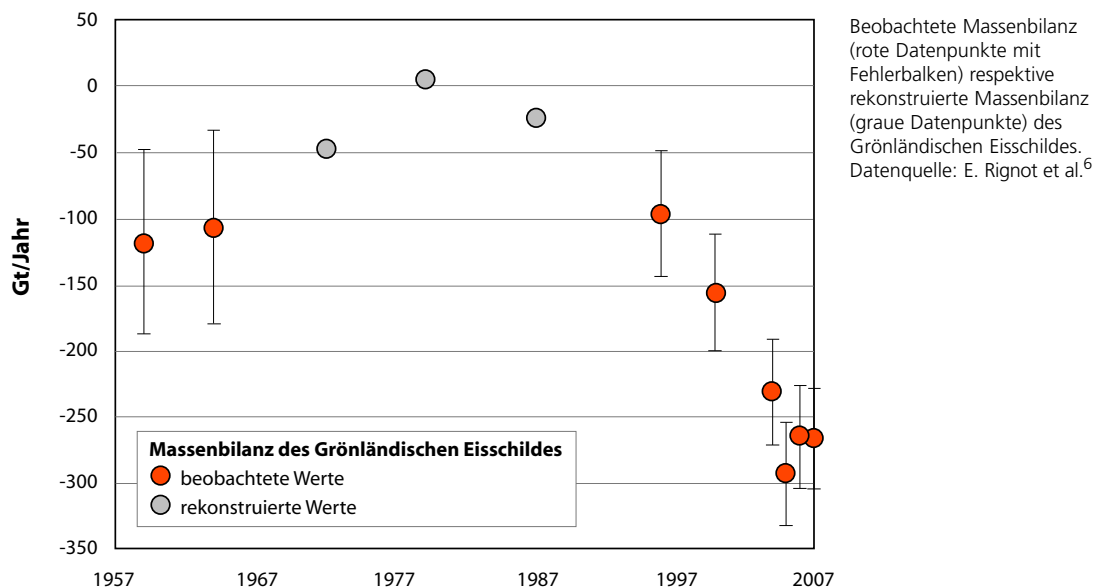
Beträchtliche Massenverluste

Wie eingangs erwähnt, liegt das Zentrum des Eisschildes in so grosser Höhe, dass Niederschlag häufig in Form von Schnee fällt. Da mit der Erwärmung auch die Niederschläge zunehmen, erfolgt im Zentrum des Eisschildes mindestens bei heutigen Verhältnissen eine Zunahme der Eismasse. Wie sieht nun die aktuelle Massenbilanz aus unter Berücksichtigung des Massengewinns im Winter und in der Höhe, des Abschmelzens im Sommer und des



Diese Abbildung von Grönland zeigt die Veränderung der Eisdicke Grönlands zwischen 2003 und 2006. Die Flächen in grau haben sich nicht verändert. Die weissen Gebiete zeigen eine geringe Verdickung der Eisschicht, die Blautöne eine Verdünnung der Eisschicht.

Quelle: NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio (<http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a003400/a003455/>)



Eisabflusses? Bei der Grösse des Eisschildes und den unterschiedlichen Prozessen ist aus lokalen Messungen eine Abschätzung der Massenbilanz kaum möglich. Deshalb wurden ausgeklügelte Messmethoden entwickelt, die flächendeckend angewendet werden können. Mit Satelliten wurden zum Beispiel feinste Änderungen in der Erdanziehung gemessen, die auf Veränderungen der darunter liegenden Masse schliessen lassen. Zwei unterschiedliche Auswertungen dieser Daten ergaben jährliche Netto-Massenverluste des grönländischen Eisschildes von rund 150 bzw. 200 Milliarden Tonnen Eis in den letzten Jahren. Neuste Berechnungen ergeben für 2007 bereits einen Verlust von rund 270 Milliarden Tonnen.⁶ Das ist rund vier mal der Inhalt des Bodensees. Diese grosse Masse entspricht jedoch nur einem Fünfzehntausendstel der Eismasse Grönlands. Nur sehr starke Beschleunigungsprozesse wür-

den dazu führen, dass diese Masse innerhalb weniger Jahrhunderte abschmelzen kann, doch grundsätzlich unmöglich ist dies nicht. In den letzten 10 Jahren wurde beinahe eine Verdreifachung des Massenverlustes pro Jahr beobachtet. Aber es besteht zur Zeit keine Möglichkeit, auch nur die Grössenordnung der zukünftigen Entwicklung abzuschätzen. Weitere Messungen wie Satelliten-Laser-Höhenmessungen, Radarmessungen von Eisflüssen oder die Bestimmung der Längenbewegung der Gletscher aus Satellitenbildern, sowie zeitlich hoch aufgelöste Messungen der Gletscherdynamik mit GPS und Vermessungsinstrumenten oder auch seismische Methoden sollen helfen, die Entwicklung und die Prozesse besser zu erfassen. Auch wurden an der Küste GPS-Messsysteme installiert, um die langsame Hebung der Erdkruste, die immer noch als Folge der Entlastung durch das

Arktisches Meereis

Im Unterschied zu den grossen Eisschilden in Grönland und der Antarktis, die auf Landmassen liegen, schwimmt das arktische Meereis auf dem Wasser. Das Abschmelzen des Meereises führt deshalb nicht zu einem Anstieg des Meeresspiegels. Der Rückgang des Meereises führt jedoch zu einer zusätzlichen Erwärmung der Region, da offenes Wasser viel mehr Sonnenstrahlung aufnimmt als Eis, welches die Strahlung zum grossen Teil reflektiert. Die Ausdehnung des arktischen Meereises im Sommer hat in den letzten 30 Jahren um rund 40% abgenommen – viel schneller, als die Klimamodelle berechnet haben. Auch die Dicke des Meereises ging stark zurück. Der Zeitpunkt, an dem die Arktis am Ende des Sommers praktisch eisfrei wird, könnte in nicht mehr grosser Ferne liegen (wenige Jahrzehnte, im Extremfall nur einige Jahre). Diese raschen Veränderungen in der Arktis verändern die globale Temperaturverteilung und können dadurch die atmosphärischen Strömungen in der ganzen Nordhemisphäre beeinflussen, so dass auch in Mitteleuropa spürbare Auswirkungen möglich sind.

Antarktis

Der antarktische Eisschild enthält Eismassen, die einem Anstieg des Meeresspiegels von rund 60 bis 70 Metern entsprechen. Mit einem Abschmelzen dieser ganzen Eismasse ist jedoch auch längerfristig nicht zu rechnen. Gefährdet ist hier im Wesentlichen der Westantarktische Eisschild, dessen Masse einem Meeresspiegelanstieg von rund 5 bis 6 Metern entspricht. Auch hier wird eine Beschleunigung des Eisabflusses beobachtet. Im Unterschied zu Grönland liegt jedoch ein wesentlicher Teil der Eismasse auf einem Untergrund, der bis zu 2500 Meter unter dem Meeresspiegel liegt. Wird die Eismasse durch Abschmelzen am Rand genügend dünn, hebt sie sich vom Untergrund ab. Bei verstärktem Schmelzvorgang verschiebt sich diese Linie immer weiter gegen das Landesinnere und zusätzliche Eismassen werden abgehoben. Dadurch wird auch ein immer grösserer Teil des Eises von Meerwasser umspült. Eine Erwärmung des Wassers trägt hier auch zum Abschmelzen bei.

Sehr spektakulär, aber auch beunruhigend, sind zur Zeit die Ereignisse auf der Antarktischen Halbinsel, dem nördlichsten und wärmsten Teil des Kontinentes: Viele grosse Eisschelfe, die auf dem Wasser schwimmen, brechen auseinander. Durch Abschmelzen primär von unten durch wärmeres Meerwasser wird die Eismasse dünner. Dies führt zu verstärkter Bildung von Brüchen und Spalten und gipfelt, wenn Spaltensysteme genügend dicht und verbunden sind, zum Auseinanderbrechen von riesigen Eisfeldern. Da diese Eisschelfe den Abfluss von Inlandeis zurückhalten, führt der Kollaps von Eisschelfen ebenfalls zu einer Verstärkung des Abflusses von Inlandeis. Auch diese dynamischen Prozesse in der Antarktis sind nur dem Prinzip nach verstanden, und deren zukünftige Entwicklung kann im heutigen Zeitpunkt kaum quantifiziert werden.

Abschmelzen der immensen Eismassen am Ende der letzten Eiszeit im Gange ist, genau zu erfassen. Diese Hebung muss bei der Bestimmung von Eismassenänderungen berücksichtigt werden.

Ein weiterer Unsicherheitsfaktor in der Entwicklung bildet der zur Zeit unerwartet rasche Rückgang der sommerlichen Eisbedeckung in der Arktis (siehe Kasten Arktisches Meereis). Es gibt keine Anhaltspunkte dafür, was ein sommerliches Schmelzen des Meereises an der Nordküste Grönlands für den Eisschild genau bedeuten würde. Einerseits führt die dadurch entstehende freie Wasseroberfläche zu einer verstärkten Erwärmung und verstärkten Schmelzprozessen, andererseits würde dadurch auch das Feuchtigkeitsangebot erhöht, was wiederum im Zentrum zu erhöhtem Schneefall und Eisbildung führen könnte. Zudem können sich damit auch die Luftströmungen verändern. Die Summe dieser Effekte ist nicht bezifferbar. Aber auch hier ist eine Beschleunigung des Abschmelzens durchaus möglich.

Viele offene Fragen zum Meeresspiegelanstieg

Nach wie vor gibt es also viele offene Fragen. Wir stehen hier einer weitgehend unbekanntem zukünftigen Entwicklung gegenüber. Und wir haben es in Bezug auf den Meeresspiegelanstieg ja nicht nur mit Grönland zu tun. Neben der Ausdehnung des Meerwassers aufgrund der Erwärmung darf man auch den Beitrag der Gletscher und Eiskappen (neben Grönland und Antarktis) nicht vergessen. Diese sind gefährdet,

bereits in diesem Jahrhundert grösstenteils abzuschmelzen, und tragen in ihrer Gesamtheit immerhin zwischen 50-70 cm zum Meeresspiegelanstieg bei. Zudem stehen wir in der Antarktis vor ähnlichen Ungewissheiten (siehe Kasten). Auch dort wurde in den letzten Jahren eine Beschleunigung von Eisabflüssen beobachtet, und auch dort gibt es riesige Eismassen, die unter dem Meeresspiegel aufliegen und beim Abschmelzen vom Boden weggehoben würden. Weil die Temperaturen am Südpol viel kälter sind als am Nordpol, spielt in der Antarktis weniger die Erwärmung der Luft als vielmehr die Erwärmung des Meerwassers eine entscheidende Rolle. Trotzdem lässt sich der mögliche Rahmen etwas einschränken. Eine katastrophal schnelle Entwicklung, die zu einem Meeresspiegelanstieg von über zwei Metern noch in diesem Jahrhundert führen würde, ist aufgrund der physikalischen und geographischen

Kontaktpersonen:

Dr. Martin Lüthi
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und
Glaziologie
ETH Zürich, Gloriastrasse 37/39, 8092 Zürich
Tel. 044 632 40 93
e-mail: luthi@vaw.baug.ethz.ch

Prof. Wilfried Haerberli
Geographisches Institut
Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190,
8057 Zürich
Tel. 044 635 51 20
e-mail: wilfried.haerberli@geo.uzh.ch

Bedingungen sehr unwahrscheinlich. Doch auch ein Meeresspiegelanstieg von nur einem Meter, was beim heutigen Kenntnisstand nicht unrealistisch scheint, ist bei der heutigen Bevölkerungsdichte an den Küsten kein Pappentier.

Abschmelzen unumkehrbar

Zu guter Letzt stellt sich noch die Frage der Irreversibilität, d.h. bei welcher globalen Erwärmung wird der Abschmelzprozess in Grönland aufgrund der Rückkopplungsprozesse irreversibel und kann weder aufgehalten noch rückgängig gemacht werden? Wie bereits erwähnt würde

nach vollständigem Abschmelzen des Eisschildes bei den heutigen Temperaturen kein Eisschild mehr entstehen. Wie stark müsste der Eisschild zurückgehen, damit z.B. aufgrund der geringeren Höhe der Eismasse ein Wiederaufbau unmöglich würde, und welche globale Erwärmung könnte zu einem solchen Rückgang führen? Die Schätzungen liegen etwa zwischen 1 und 2 °C globaler Erwärmung. Wir sind also wohl nicht mehr sehr weit von diesem Punkt entfernt, und es ist durchaus möglich, dass das allgemeine Stabilisierungsziel von plus 2 °C für den grönländischen Eisschild zu hoch liegt.

Literatur

- 1 D.M. Holland et al., Nature Geoscience, Vol. 1, 659ff (2008) <http://www.nature.com/ngeo/journal/v1/n10/abs/ngeo316.html>
- 2 F.M. Nick et al., Nature Geoscience, doi:10.1038/ngeo394 (online 11 Feb 2009) <http://www.nature.com/ngeo/journal/vaop/ncurrent/abs/ngeo394.html>
- 3 W.T. Pfeffer et al., Science 321: 1340ff (2008). <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/sci;321/5894/1340>
- 4 I.M. Howat et al., Geophysical Research Letters, Vol. 35: L17505 (2008). <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2008GL034496.shtml>
- 5 A.E. Carlson et al., Nature Geosciences 1: 620ff (2008). <http://www.nature.com/ngeo/journal/v1/n9/abs/ngeo285.html>
- 6 E. Rignot et al., Geophysical Research Letters, Vol. 35, L20502 (2008). <http://www.agu.org/pubs/crossref/2008/2008GL035417.shtml>