

Bestimmung von Eishöhenänderungen in Grönland

Wilfried Korth, Wieland Adler, Uwe Hofmann, Ulrich Münster, Frank Polte und Martin Rückamp

Zusammenfassung

Im Sommer 2006 fand unter wissenschaftlicher Leitung des Erstautors zum zweiten Mal eine Grönlanddurchquerung statt, deren Ziel in der Bestimmung von Gletschermassenbilanzen entlang eines 700 km langen Profils über das Inlandeis hinweg bestand. Im Vergleich zu den Messungen von 2002 konnte ein durchschnittlicher Rückgang der Eishöhe von mehr als 0,5 m/a festgestellt werden. Die Ergebnisse können direkt zur Validierung von Fernerkundungsdaten wie den Ergebnissen der ICESat-Mission genutzt werden. Eine Besonderheit der Expedition stellte die ausschließliche Nutzung von moderner Sportlogistik dar: ein echtes Abenteuer Wissenschaft.

Abstract

An expedition to the Greenland ice sheet took place in summer 2006 for the second time. The aim was to determine mass balances of the glacier at a profile of 700 km length. An average retreat of glacier heights of more than 0.5 m/y was detected. The results can directly be used for the validation of remote sensing techniques like ICESat. The use of modern sport logistics only was a specific feature of the crossing of the inland ice: a real scientific adventure.

1 Einleitung

Veränderungen des Klimas der Erde und die Frage, welchen Anteil der Mensch daran hat, werden derzeit in den Medien viel und häufig sehr polemisch diskutiert. Dass sich gravierende Veränderungen des Klimas und der daran gekoppelten Ökosysteme vollziehen, ist aber unstrittig.

Die Klimaentwicklung auf der Erde lässt sich nicht mit wenigen Worten erklären, da es sich um ein außerordentlich komplexes System von Einzelprozessen handelt. Neben der zentralen Frage, wie stark der Einfluss des anthropogenen CO₂-Ausstoßes auf die globale Erwärmung tatsächlich ist, sind für das Verständnis des Gesamtsystems weitere Forschungen zur Klimageschichte, Modellierungen und Überwachungen der aktuellen Veränderungen klimasensitiver Indikatoren nötig (Rahmstorf und Schellnhuber 2007). Einen solchen Indikator stellen die großen Eismassen der Antarktis und Grönlands sowie in den Hochgebirgen der Erde dar. Gletscher reagieren sehr empfindlich auf langfristige Veränderungen der mittleren Jahrestemperaturen. Wenn Schneezuwachs und Abschmelzen nicht mehr im Gleichgewicht sind, stößt der Gletscher entweder vor und gewinnt an Höhe oder er zieht sich zurück und verliert an Höhe.

Massen- bzw. Volumenveränderungen der polaren Eismassen stellen eine unmittelbare Reaktion auf Temperaturänderungen dar und sind gleichzeitig eine wichtige

Einflussgröße für den globalen Meeresspiegelanstieg. Der antarktische Eisschild reagiert wegen seiner isolierten polaren Lage und dem daraus resultierenden sehr kalten Klima geringer auf die Temperaturerhöhung als die Gletscher in der Westantarktis und in Grönland. Besonders starke Veränderungen sind an den kleineren alpinen Gletschern zu beobachten. Der Rückgang der großen Eismassen, wie der in Grönland, stellt wiederum einen erheblichen Einflussfaktor auf das Klimasystem der Erde dar. Er liefert einen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg und kann zu Temperaturveränderungen in den Ozeanen und damit zu Beeinflussungen der Meeresströmungen führen.

2 Geodätische Bestimmung von Gletschermassenbilanzen

Für die Bestimmung von Massenänderungen der grönländischen Eiskappe gibt es verschiedene Möglichkeiten. Einerseits können alle massenrelevanten Prozesse wie Niederschlagsakkumulation, Abschmelzen, Sublimation, Eisbergausstoß u. a. erfasst werden. Daraus ließe sich dann theoretisch eine Gesamtbilanz aufstellen. Praktisch stößt das aber auf ein grundsätzliches Problem: die Dimension der Eiskappe. Die vollständige Erfassung aller dieser Prozesse an allen Orten ist schlicht unmöglich.

Es ist aber andererseits möglich, die Geometrie des Eiskörpers zu vermessen und zeitlich zu überwachen (Bind-schadler 1998, Reeh 1999). Dafür stehen verschiedene Messverfahren zur Verfügung: klassisch-geodätische Messungen, photogrammetrische Methoden, Altimetermessungen aus dem Flugzeug oder die Satellitenaltimetrie. Neben der direkten Messung der Geometrie können auch Veränderungen des Gravitationsfeldes infolge der Massenverlagerungen beobachtet werden. Erste derartige Ergebnisse aus der *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) Mission liegen vor (Velicogna u. a. 2005, Luthcke u. a. 2006).

Klassische Messverfahren können meist nur punkt- oder profilweise Daten liefern. Für eine vollständige Erfassung der Geometrie der Eisoberfläche kommt wegen der Größe der Eiskappe die Altimetrie in Frage, wobei sowohl Radar- als auch Laseraltimeter eingesetzt werden können. Eine derzeit laufende Satellitenmission nutzt den am 16.1.2003 gestarteten ICESat (*Ice, Cloud and Land Elevation Satellite*) der NASA (Schutz 1998). Wie alle Fernerkundungsverfahren benötigt die Altimetrie Bodenkontrollwerte zur Kalibrierung des Systems. Außerdem ist es immer sinnvoll und nötig, die Ergebnisse von Messungen, egal ob es um Fernerkundung oder ein anderes Verfahren geht, unabhängig zu kontrollieren.

Geodätisch bestimmte Höhen und Höhenänderungen können direkt als Bodenkontrollwerte und auch zur unabhängigen, nachträglichen Validierung der Ergebnisse der Altimetrie verwendet werden. Wenn mittels Höhenvergleich Massenbilanzen abgeleitet werden, spricht man von sogenannten »spezifischen Massenbilanzen«. Es wird dabei vorausgesetzt, dass sich das oberflächennahe vertikale Dichteprofil des Eises nicht ändert. Auch wenn diese Forderung nicht vollständig erfüllt sein wird, ist der sich daraus ergebende Fehler sehr klein.

Als Messverfahren für punktweise Höhenbestimmungen der Eisoberfläche kommen heute vor allem satellitengeodätische Verfahren, z.B. Messungen mit *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS), in Frage. Zwar können auch klassische Vermessungsmethoden eingesetzt werden, aber der zeitliche und logistische Aufwand wäre deutlich höher. Praktiziert wurde dies in Grönland im Rahmen der EGIG-Expeditionen (*Expédition Glaciologique Internationale au Groenland*). Dort wurde zwischen 1959 und 1993 wiederholt ein Profil über das Inlandeis mit klassischen Methoden vermessen (Möller 1996). Soll von klassischen Methoden auf GNSS-Messungen übergegangen werden, müssen wenigstens zu einer Epoche beide Verfahren parallel eingesetzt werden (Korth 1998). Mit GNSS lassen sich Einzelpunkte relativ zu einem Referenzempfänger mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern bestimmen. Die Messzeit muss der Entfernung zum Referenzpunkt angepasst werden. Bis 300 km Distanz reichen minimal etwa zwölf Stunden Daten aus, die im Gerät gespeichert werden können, um dann später im sogenannten »Postprocessing« ausgewertet zu werden.

3 Das Grönlandprojekt

Die Grundidee des Projektes bestand darin, die Eiskappe Grönlands entlang eines Profils zu überschreiten und dabei mit geodätischen GPS-Empfängern Höhen von Einzelpunkten zu bestimmen. Eine kinematische Erfassung

des gesamten Profils war wegen der großen Entfernungen zu den Referenzstationen an den Küsten nicht möglich. Die Fortbewegung über das Inlandeis sollte ohne technische Hilfsmittel, wie Motorschlitten oder Hubschrauber, nur auf Skiern mit von Hand gezogenen Schlitten erfolgen. Eine erste solche Grönlandüberquerung wurde 2002 von vier Teilnehmern erfolgreich absolviert. Neben dem sportlichen Ehrgeiz sprachen vor allem die geringen Kosten für diese Methode. Die Risiken ließen sich dagegen relativ gut kalkulieren und durch eine gewissenhafte Vorbereitung minimieren. Erst während der Expedition und besonders bei der Wiederholung 2006 wurde klar, dass die Fortbewegung auf Skiern zwar langsam, aber nahezu optimal ist. Die im Sommer stark angetaute Eisoberfläche Südgrönlands ist mit schwerer Technik kaum befahrbar. Einzig Fluglogistik, z.B. der Einsatz von Helikoptern, wäre möglich, ist aber unvergleichlich teuer. Die geringe Geschwindigkeit auf Skiern von im Durchschnitt nur 20 km pro Tag ist dagegen kein Nachteil, da sich dadurch ein gewollt geringer Profilpunktabstand ergab.

Die Expedition führte entlang einer historischen Route, die 1912 vom schweizerischen Meteorologen Alfred de Quervain und drei Mitstreitern mit Hundeschlitten bewältigt wurde. Es war damals die erste geowissenschaftliche Überschreitung des Grönlandeises überhaupt, bei der auch ein Höhenprofil aufgenommen wurde, allerdings mit der relativ ungenauen barometrischen Methode (Quervain 1998).

Die Expedition 2006 erhielt den Namen »SPURENSUCHE«, da sie sich auf den Spuren von de Quervain und auf den eigenen von 2002 bewegte.

Da Höhenänderungen bestimmt werden sollten, war es wichtig, dass bei der Wiederholung exakt die gleichen Positionen der Messpunkte wieder erreicht wurden. Das Eis war in der Zwischenzeit natürlich weitergeflossen. Diese Vorgehensweise ist mit Pegelmessungen an Gewässern vergleichbar. Auch hier ist die momentane Höhe der Oberfläche interessant, unabhängig vom Fließen des Wassers. Technisch ist die mehrfache Messung gleicher

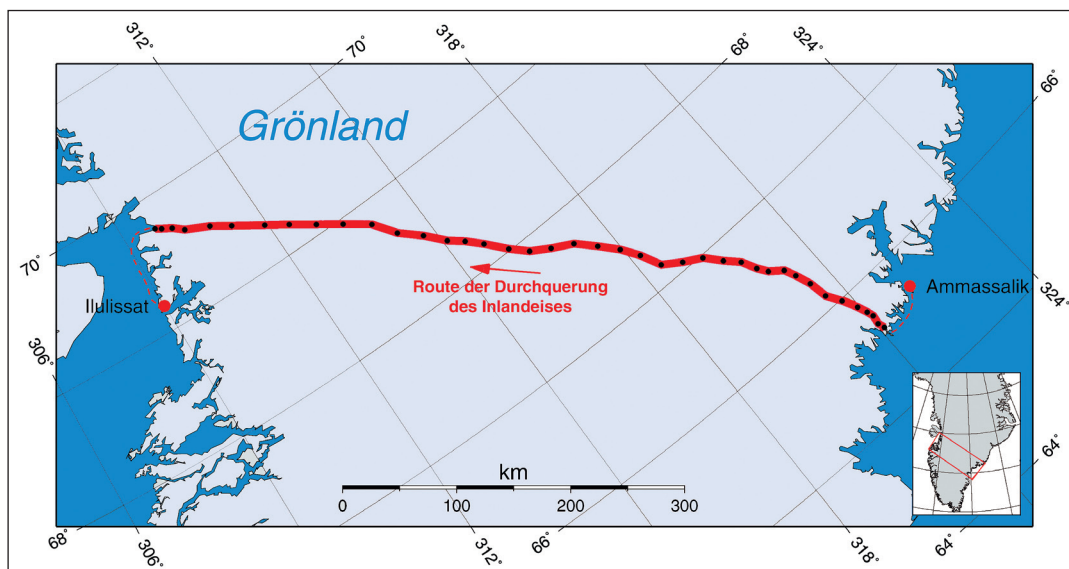


Abb. 1:
Expeditionsroute
der Grönland-
überquerungen
2002 und 2006
mit den Camp-
positionen

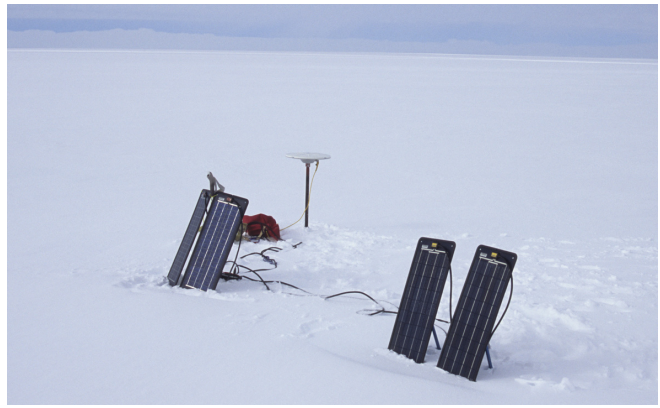


Abb. 2: Fortbewegung der Expeditionsgruppe auf dem Inlandeis (li.). GPS-Messtechnik mit Solarstromversorgung (re.).

Positionen keine besondere Herausforderung, da ein bestimmter Ort ebenfalls mit Hilfe des GPS in Echtzeit auf wenige Meter genau erreicht werden kann. Der Zwang, 2006 unabhängig von Schnee- und Wetterbedingungen genau die gleichen Tagesetappen zu schaffen wie 2002, stellte sich allerdings als eine hohe psychische Belastung des gesamten Teams heraus. Der zeitliche Spielraum war mit wenigen Tagen Reserve relativ gering.

Umso bemerkenswerter ist die Tatsache, dass es gelungen ist, bei beiden Expeditionen genau den gleichen Zeitplan einzuhalten. Die einzelnen Messpunkte wurden um nur ein bis zwei Tage versetzt nach vier Jahren wieder erreicht. Die Messung zur gleichen Zeit im Jahr dient dazu, saisonale Effekte möglichst auszuschalten.

Tagsüber legte die Expeditionsgruppe die Etappen zwischen den Lagerplätzen zurück und in den Nachtstunden konnten die Messungen zur Koordinaten- und Höhenbestimmung erfolgen. Außerdem war ausreichend Zeit, zusätzliche Messungen durchzuführen und die Suche nach den Vermarkungen der Messpunkte von 2002, die sich in der Zwischenzeit bis zu mehr als einem Kilometer weiterbewegt hatten, zu realisieren (Abb. 2).

4 Die Messungen

Wie bereits beschrieben, wurden an den Lagerplätzen, mit Ausnahme derer im unmittelbaren Aufstiegs- und Abstiegsbereich, mindestens zwölfstündige GPS-Messungen an genau der Position durchgeführt, an der auch 2002 gemessen wurde. Die Absteckung des Messpunktes ist mit einer Genauigkeit von besser 10 m möglich. Es wurden Daten mit einem geodätischen Zweifrequenzempfänger (Trimble 5700) mit einer Aufzeichnungsrate von 15 s aufgezeichnet. Wegen des geringen Stromverbrauches von ca. 0,3 A bei 12 V, war die Energieversorgung mit einer 30 W-Solaranlage möglich. Auch bei geringer Sonneneinstrahlung und bedecktem Wetter war es möglich, tagsüber die Akkus wieder aufzuladen.

Um eventuelle Höhenfehler durch die Geländeneigung beim Vergleich mit den Ergebnissen von 2002 zu vermeiden, wurden in einem Abstand von bis zu 100 m in der Umgebung des Messpunktes 4–6 weitere Punkte mit einem

zweiten GPS-Gerät gemessen. Aus diesen Daten lassen sich die Hangneigung und deren Richtung bestimmen. Dazu wurde eine Ebene als Anpassung an die Geländeoberfläche in die gemessenen Punkte gelegt. Die Ebenenanpassung war mit Höhenabweichungen von weniger als 2 cm an die Einzelpunkte möglich. Mit dieser Genauigkeit konnten auch die Höhen der beiden Messungen 2002 und 2006 aufeinander bezogen werden. Die Berechnung der Koordinaten erfolgte mit einer Genauigkeit von 1–3 cm für die Lage und 2–4 cm für die Höhe relativ zu einem Referenzempfänger, der von zwei Studenten der TFH Berlin zuerst an der Ostküste in Tassilaq und später an der Westküste in Ilulissat betrieben wurde. Der Abstand zu diesen Referenzpunkten betrug maximal 350 km.

Bereits aus den nächtlichen Messungen von 2002 wurden die Eisbewegungen abgeschätzt. Da sich die Antenne während der 12-Stunden-Messung mit dem Eis bewegt hatte, konnte deren Bewegung aus den Daten geschätzt werden, wenn der Gesamtbetrag etwa 5 cm überstieg. Das bedeutet eine Gesamtbewegung von mindestens 35 m pro Jahr. Geringere Bewegungen lassen sich mit obiger Methode nicht sicher bestimmen. Allerdings können die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Profilverpunkten zur Interpolation der Bewegungsbeträge herangezogen werden. Sowohl Richtungen als auch Beträge von Eisbewegungen unterliegen im Inneren Grönlands keinen extremen örtlichen Schwankungen.

Die Messpunkte waren 2002 mit Dauermagneten von 45 mm Durchmesser, 9 mm Dicke und einem bekannten magnetischen Moment vermarktet worden. Über den Zeitraum von 2002 bis 2006 hatte der Magnet infolge von Eisbewegung und Akkumulation eine neue Tiefenlage erreicht. Mit Hilfe eines Magnetometers konnte dann die erzeugte Anomalie des Magneten an der Oberfläche gemessen werden. 2002 wurden die Magneten so orientiert, dass das Maximum der magnetischen Anomalie direkt senkrecht über dem Magneten lag und somit als Indikator für die Position des Markers diente. Je nach Tiefenlage des Magneten variiert jedoch die Stärke des Maximums an der Oberfläche, bei größeren Tiefen ist sie schwächer ausgeprägt als bei geringeren Tiefen.

Aus theoretischen Abschätzungen konnte vorab die maximale Tiefe ermittelt werden, in der der Magnet

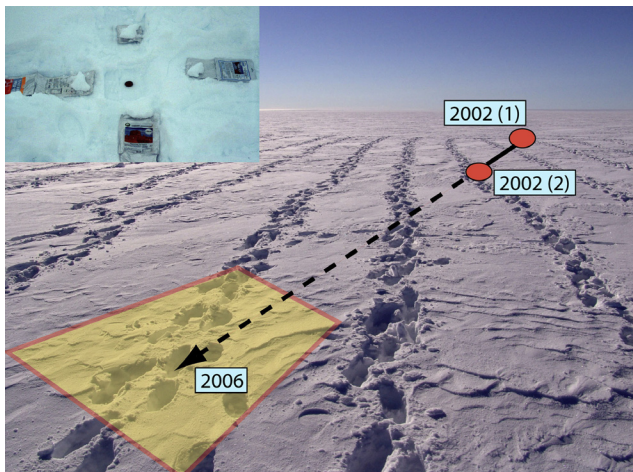


Abb. 3: Prinzip der Suche der Magnete: Aus den Daten von 2002 wurde der Suchraum bestimmt und dann in Profilen mit dem Magnetometer abgesucht. Oben links ist eine der Vermarkungen zu sehen, wie sie 2002 eingebracht wurde.

noch »gesehen« werden kann (Telford u.a. 1990). Hierbei spielen sowohl die Wahl des Magnetometers als auch das magnetische Moment eine wichtige Rolle. Im vorliegenden Fall beträgt diese Maximaltiefe ca. 5 m.

Da das Maximum der Anomalie zu größeren Tiefenlagen hin schwächer wird und somit schwerer zu detektieren ist, wurde für den Rasterabstand im Suchfeld ein maximaler Wert von 3 m festgelegt. Um das Suchfeld möglichst klein zu halten, war die Berücksichtigung der vorab abgeschätzten Eisbewegungen erforderlich. Trotzdem waren für die Suche bis zu drei Stunden nötig. Wurde ein Magnet gefunden, entsprach die Position des Maximums des gemessenen Momentes der des Magneten. Hierbei wurde vorausgesetzt, dass der Magnet die Orientierung von 2002 beibehalten hat und nicht verkippt war, was eine Verschiebung des Maximums der magnetischen Anomalie an der Eisoberseite zur Folge gehabt hätte.

Weiterhin kann generell aus der Form der durch die Vermarkung erzeugten magnetischen Anomalie die Tiefenlage bestimmt werden, ohne die Magnete auszugraben. Die Tiefe entspricht der Halbwertsbreite der Anomalie. Aus den ermittelten Positionen der Magnete von 2002 und 2006 und der bekannten Zeitdifferenz ließen sich daher die genaue Eisbewegung und aus der Tiefenlage die jährliche Akkumulation berechnen.

Zur Kontrolle wurde einer der Magnete freigelegt, was für zwei Personen mehr als sechs Stunden Arbeit in An-

spruch nahm. Aus den Magnetometerdaten war eine Tiefe von 4,1 m unter der Oberfläche bestimmt worden. Die tatsächliche Tiefe betrug 4,12 m! Auch der Positionsfehler war mit weniger als 30 cm außerordentlich klein, wenn man bedenkt, dass eine leichte Verkipfung des Magneten eine große Verschiebung der Anomalie an der Oberfläche verursacht hätte.

5 Die Ergebnisse

Aus der Tiefenlage der Marker lässt sich die jährliche Nettobilanz aus Akkumulation und Ablation berechnen (Tab. 1). Über das Dichteprofil in den oberen Schichten der Schneedecke ist keine Aussage möglich. Die zur Westküste hin abnehmenden Beträge müssen nicht auf geringere Niederschläge hindeuten. Es ist wahrscheinlich, dass stärkere Schmelzprozesse stattfinden, das Schmelzwasser wieder im Schnee versickert und dort gefriert. Dadurch ergibt sich eine höhere Dichte in den oberflächennahen Schichten als in größeren Höhen. Während der Expedition wurden vielfach sulzige Schneeschichten an der Oberfläche beobachtet und durch Schnee gruben an einigen Messpunkten auch für aufeinander folgende Jahre in Form von dicken Eishorizonten bestätigt.

Das wichtigste Ergebnis der Expedition 2006 bestand in der Bestimmung der Höhenänderungen für das gesamte Profil. Dazu wurden die auf eine gemeinsame Position zentrierten Höhen beider Expeditionen miteinander verglichen. Die Genauigkeit der Höhenbestimmung lag bei 2–3 cm, je nach Abstand von der Referenzstation. In beiden Messungsepochen wurde an nächstgelegenen IGS-Stationen und damit an das globale Referenzsystem ITRF2000 angeschlossen. Eventuelle Höhenänderungen der IGS-Stationen können hierbei vernachlässigt werden. Es ergibt sich eine Genauigkeit der jährlichen Höhenänderung von etwa 1 cm.

Die in Abb. 4 dargestellten Höhenänderungen beziehen sich auf die vier Jahre Zeitdifferenz.

Im küstennahen Bereich im Osten ist ein Höhenrückgang von mehr als einem Meter pro Jahr (1 m/a) zu verzeichnen. Der hellrote Bereich stellt eine Schätzung dar, da hier keine Messungen erfolgt sind. Es kann aber mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass der Massenverlust mindestens so groß ist wie am ersten Messpunkt (Camp 5).

Tab. 1: Ergebnisse für die jährlichen Akkumulationsbeträge an den Fundstellen der Magnetmarker

Messpunkt/Camp	20	21	24	25	26	27	28	31
Traversen-Kilometer	280	302	362	384	402	418	439	513
Höhe [m]	2555	2525	2350	2285	2275	2190	2060	1840
Tiefenlage [m]	4,8	3,9	4,1	4,1	4,0	3,8	3,8	2,9
Kontrolle [m]			4,12					
Akkumulation [m/a]	+1,20	+0,98	+1,03	+1,03	+1,00	+0,95	+0,95	+0,73

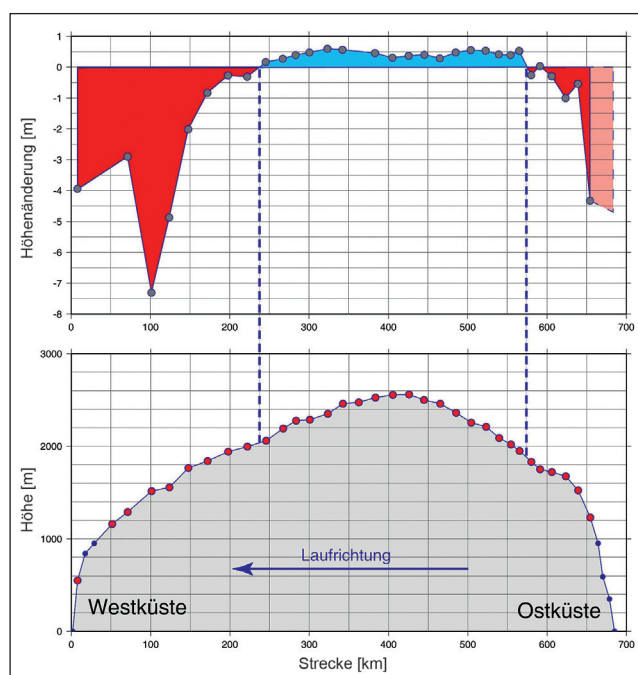


Abb. 4: Höhenänderungen entlang der Expeditionsroute (Erläuterungen im Text)

Im anschließenden Bereich des Profils unterhalb von 2000 m Höhe ist der jährliche Massenverlust mit ca. 0,1 bis 0,2 m/a geringer. Oberhalb von 2000 m Höhe kommt es zu einem Massenzuwachs. Dies steht nicht im Widerspruch zur erwarteten Tendenz. Die höheren globalen Temperaturen führen zu stärkerer Verdunstung über den Ozeanen und damit zu höheren Niederschlagsbeträgen. Die höheren Niederschläge führen im Zentralbereich des Inlandeises zu einem Anwachsen der Eiskappe von etwa 0,1 m/a. Im Abstiegsbereich kommt es wiederum zu Massenverlusten von 1 m/a infolge starker Schmelzprozesse.

Die Route führt durch das Einzugsgebiet des Jakobshavn Isbrae, des schnellsten Gletschers der Welt, der seine Geschwindigkeit in den vergangenen Jahren von 20 m/d auf mehr als 40 m/d verdoppelt hat (Maas u. a. 2006). Dies führt zu einer zusätzlichen Verringerung der Oberflächenhöhen, die sich im Messprofil mit fast 2 m/a deutlich zeigt.

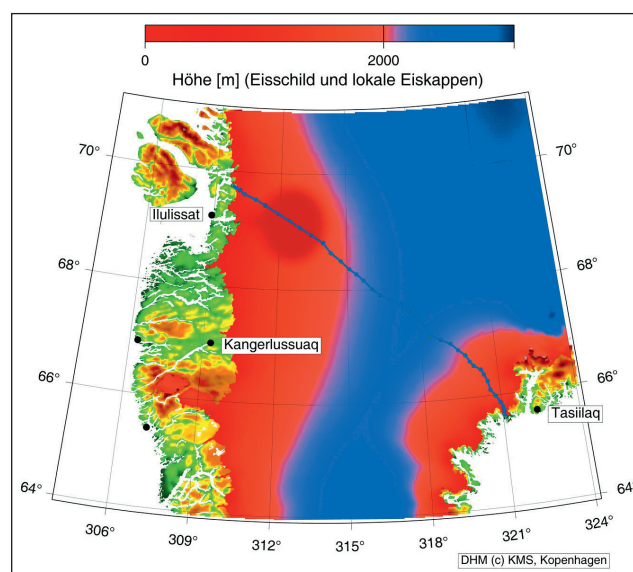


Abb. 5: Flächenhafte, schematische Darstellung der Gebiete unterhalb 2000 m Höhe mit negativer (rot) und oberhalb 2000 m Höhe mit positiver (blau) Massenbilanz. Das unmittelbare Einzugsgebiet des Jakobshavn Isbrae, durch das die Traverse verläuft, ist dunkelrot angedeutet.

Insgesamt überwiegt der Massenverlust in den küstennahen Gebieten den Massengewinn im Zentralbereich des südlichen Grönlands. Noch deutlicher wird dies, wenn die Veränderungen flächenhaft dargestellt werden. Die Fläche oberhalb von 2000 m Höhe – mit Massengewinn – ist kleiner als die niedriger liegenden Gebiete mit Massenverlust. Das Verhältnis der Höhenänderungen beider Flächen ist etwa 10:1. Es kann also für das gesamte südliche Grönland, d. h. südlich der gemessenen Traverse (vgl. Abb. 5), von einem durchschnittlichen jährlichen Massenverlust von 0,5 m/a ausgegangen werden. Rechnet man diesen Wert mit der Fläche hoch, ergibt sich ein Massenverlust von ca. 70 km³/a. Dieser Wert liegt in der gleichen Größenordnung wie die Ergebnisse anderer Verfahren, z. B. der Laseraltimetrie mit ICESat (–80 bis –100 Gt/a) oder der Schwerefeldmission GRACE (>150 Gt/a) (vgl. Tab. 2). Eine solche Abschätzung von Höhen- bzw. Massenänderungen für ein großes Gebiet ist relativ unsicher. Der Wert

Tab. 2: Ergebnisse der Bestimmung von Massenbilanzen für das Inlandeis Grönlands mit verschiedenen Verfahren. In der letzten Spalte ist der Anteil am globalen Meeresspiegelanstieg angegeben.

Quelle	Massenänderung (Gt/a)	Methode	Zeitspanne	Beitrag zum Meeresspiegelanstieg (mm/a)
Krabill u. a. 2000	–47	Flugzeugvermessungen	1994 – 1999	
Velicogna u. a. 2005	–200 bis –260	GRACE	2002 – 2005	0,8
Luthcke u. a. 2006	–145 bis –175	GRACE	2003 – 2006	0,5
Zwally u. a. 2005, und http://earthobservatory.nasa.gov	–80 bis –100	ICESat	2003 – 2005	0,3
Projekt Spurensuche nur Südgrönland! (dieser Beitrag)	–70	GPS	2002 – 2006	0,25

der im Rahmen des dargestellten Projektes gewonnenen Ergebnisse besteht vor allem in der unabhängigen Bodenkontrolle für die aus den Satellitendatenauswertungen gewonnenen Höhenänderungen. Sie stellen eine punktweise unabhängige Produktvalidierung dar. Systematische Fehler des einen oder des anderen Verfahrens fallen bei der Differenzbildung der Epochen weitgehend heraus.

Interessant ist vor dem Hintergrund der globalen Klimaänderungen, ob sich diese Tendenz beschleunigt. Zur Klärung dieser Frage sind allerdings die beiden Messepochen nicht ausreichend. Es müssen in der Zukunft weitere Messungen erfolgen, nötigenfalls auch in dichtem Abstand von nur einem Jahr. Die Beschleunigung des Massenrückgangs in den küstennahen Bereichen Grönlands zeigt sich bereits in den Ergebnissen der oben genannten anderen Methoden (Krabill u. a. 2004).

6 Schlussfolgerungen

Die beiden Grönlandüberquerungen 2002 und 2006 können sowohl wissenschaftlich als auch logistisch/sportlich als außerordentlich erfolgreich bewertet werden. Es ist gelungen, mit preiswerten sportlichen Mitteln wertvolle wissenschaftliche Ergebnisse zu erhalten. Expeditionen mit hohem technischem Aufwand haben in den meisten Fällen ihre Berechtigung, sind für den Erfolg aber nicht immer nötig. Mitunter können mit leichter Technik interessante Gebiete besser erreicht werden. Die moderne Messtechnik erlaubt es, wegen des geringen Gewichts und Stromverbrauchs, auf teure Transporttechnologien wie Helikopter zu verzichten. Im Falle der Grönlandüberquerungen 2002 und besonders 2006 wäre die Messung des Höhenprofils wegen der zahlreichen Rinnen, Spalten und Wasserläufe im Aufstiegsgebiet und der stark angetauten Schneedecke im Plateaubereich mit schwerer Technik nicht möglich gewesen.

Die Eismächtigkeit Südgrönlands (südlich 72° Nord) geht derzeit mit mehr als 0,5 m/a zurück. Dies entspricht einer Wassermasse von mindestens 80 km³. Allein dies ergibt einen Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg von 0,25 mm/a, das sind etwa 10% des mittleren Anstiegsbetrages in den letzten 15 Jahren (Cazenave und Nerem 2004, Wiss. Beirat 2006). Es muss allerdings davon ausgegangen werden, dass das massive Abschmelzen des Grönlandeises erst in den letzten Jahren nach 2000 begonnen hat und eine steigende Tendenz aufweist. Daher ist es erforderlich, die Veränderungen der Eiskappe weiter zu überwachen!

Eine Gesamtmassenbilanz des Inlandeises Grönlands kann nur mit Hilfe von Verfahren, die flächenhaft arbeiten, wie z. B. der Satelliten- oder Flugzeugaltimetrie oder Schwerefeldmissionen, bestimmt werden. Es ist durchaus möglich, dass sich in Nordgrönland – wie auch auf dem Profil in den Höhen oberhalb von 2000 m – ein Anstieg der Eishöhe vollzieht und dem negativen Trend entgegenwirkt.

Literatur

- Bindenschadler, R.: Monitoring ice sheet behaviour from space. *Reviews of Geophysics* 36,1, 79–104, 1998.
- Cazenave, A., Nerem, R.: Present-day sea level change: observations and causes. *Reviews of Geophysics* 42 (3), 139–150, 2004.
- Korth, W.: Bestimmung von Oberflächengeometrie, Punktbewegungen und Geoid in einer Region der Antarktis. Dissertation. DGK, Reihe C, Heft 505, 1998.
- Krabill, W., Abdalati, W., Frederick, E., Manizade, S., Martin, C., Sonntag, J., Swift, R., Thomas, R., Wright, W., Yungel, J.: Greenland Ice Sheet: high-elevation balance and peripheral thinning. *Science*, 289(5478), 428–430. doi: 10.1126/science.289.5478.428, 2000.
- Krabill, W., Hanna, E., Huybrechts, P., Abdalati, W., Cappelen, J., Csatho, B., Frederick, E., Manizade, S., Martin, C., Sonntag, J., Swift, R., Thomas, R., Yungel, J.: Greenland Ice Sheet: Increased coastal thinning. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, No. 24, L24402 10.1029/2004GL021533, 2004.
- Luthcke, S., Zwally, H., Abdalati, W., Rowlands, D., Ray, R., Nerem, R., Lemoine, F., McCarthy, J., Chinn, D.: Recent Greenland ice mass loss by drainage system from satellite gravity observations. *Science*, 314(5803), 1286–1289. doi: 10.1126/science.1130776, 2006.
- Maas, H.-G., Dietrich, R., Schwalbe, E., Bäßler, M., Westfeld, P.: Analyse des Bewegungsverhaltens des Jakobshavn Isbrae Gletschers in Grönland durch monokulare Bildsequenzanalyse. *Photogrammetrie • Fernerkundung • Geoinformation* 2/2006, S. 93–102, 2006.
- Möller, D. (Hrsg.): Die Weiterführung der geodätischen Arbeiten der Internationalen Glaziologischen Grönland-Expedition (EGIG) durch das Institut für Vermessungskunde der TU Braunschweig 1987–1993, Veröffentlichung DGK, Reihe B, Heft 303, München 1996.
- Quervain, A. de: Quer durchs Grönlandeis. Die Expeditionen 1909 und 1912/13. *Neue Zürcher Zeitung*, 1998.
- Rahmstorf, S., Schellnhuber, H. J.: *Der Klimawandel*. Verlag C. H. Beck, 4. Auflage, 2007.
- Reeh, N.: Mass balance of the Greenland ice sheet: Can modern observation methods reduce uncertainty? *Geografiska Annaler Series A*, Vol. 81 A, Number 4, 735–742, 1999.
- Schutz, B. E.: Spaceborne laser altimetry: 2001 and beyond. In: Plag, H. P. (ed.), *Book of Extended Abstracts, WEGENER-98*, Norwegian Mapping Authority, Hønefoss, Norway 1998.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E.: *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, 2. Auflage, 1990.
- Velicogna, I., Wahr, J.: Ice mass balance in Greenland from GRACE. *Geophysical Research Letters*, 32(18), L18505. doi: 10.1029/2005GL023955, 2005.
- Zwally, H., Giovinetto, M., Li, J., Cornejo, H., Beckley, M., Brenner, A., Saba, J., Yi, D.: Mass changes of the Greenland and Antarctic ice sheets and shelves and contributions to sea-level rise: 1992–2002. *Journal of Glaciology*, 51(175), 509–527, 2005.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen: *Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer*, Sondergutachten, Berlin, S. 33; www.wbgu.de/wbgu_sn2006.pdf, 2006.

<http://earthobservatory.nasa.gov/Study/Greenland/greenland.html>

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Wilfried Korth
Technische Fachhochschule Berlin
FB III, Bau- und Geoinformationswesen
Luxemburger Straße 11, 13353 Berlin
korth@tfh-berlin.de

Dipl.-Ing. Wieland Adler
Gutsweg 1, 01328 Dresden, OT Rossendorf

Dipl.-Ing. (FH) Uwe Hofmann
Hannostraße 5, 07318 Saalfeld

Dipl.-Ing. Ulrich Münster
Hauptstraße 4, 04938 Wiederau

Dipl.-Ing. (FH) Frank Polte
Stephensonstraße 15, 01257 Dresden

Dipl.-Geophys. Martin Rückamp
Silberbrink 73, 48167 Münster