
Klimabedingte Veränderungen des Inlandeises im südlichen Grönland

Wilfried KORTH¹, Thomas HITZIGER², Uwe HOFMANN¹, Tobias KÜCHENMEISTER¹, Karel PAWELKA³

¹Beuth Hochschule für Technik, Berlin, korth@beuth-hochschule.de

²BTU Cottbus-Senftenberg

³Technische Universität Prag

Zusammenfassung

Zwischen 2002 und 2015 wurden fünf Expeditionen in das südliche Grönland organisiert, um Veränderungen der Eiskappe zu erfassen. Im Ergebnis liegen für eine 700 km lange Traverse präzise Höhen und Höhenänderungen vor. Sie zeigen anschaulich die dramatischen Veränderungen der Eiskappe. Die insgesamt negative Bilanz resultiert aus extremen Eisverlusten in den Randzonen, sowohl im Westen, als auch im Osten der Eiskappe von mehreren Metern pro Jahr. Allerdings zeigt sich auch, dass die Beobachtungen einzelner Jahre stark vom Trend abweichen können. Trotzdem ist zu befürchten, dass die südliche Eiskappe in den nächsten Jahrhunderten zusammenbrechen könnte. Für belastbare Aussagen sind Messungen über lange Zeit, mindestens ein Jahrzehnt, besser deutlich mehr, erforderlich.

1 Einführung

Im Sommer 2002 ist unter wissenschaftlicher Leitung des Erstautors ein Klimaforschungsprojekt in Grönland begonnen worden. Ziel war vor allem die Bestimmung von Höhen und Höhenänderungen entlang eines Profils über das Inlandeis zwischen Tasiilaq an der Ostküste und Ilulissat an der Westküste Grönlands.

Diese Route wurde erstmals von Alfred de Quervain 1912 erfolgreich begangen. De Quervain war der erste Geowissenschaftler, der eine Grönlandüberquerung realisiert hat. Kurz danach waren auch Wegener und Koch erfolgreich. Die Vermessungsarbeiten hat 1912 der deutsche Architekt Roderich Fick, durchgeführt. Auch wenn die damaligen Höhenbestimmungen an den heutigen Möglichkeiten gemessen nur relativ ungenau waren, reizt natürlich die große Zeitdifferenz von über hundert Jahren zu einem Vergleich, der insbesondere im stark veränderlichen Randbereich der Eiskappe interessant ist.

Im Rahmen von inzwischen 5 Expeditionen in 13 Jahren wurde das ca. 700 km lange Profil fünfmal präzise vermessen. Damit stehen Oberflächenhöhen mit einer Genauigkeit von 3 bis 5 cm zur Verfügung, aus denen jährliche Höhenänderungen mit Zentimetergenauigkeit abgeleitet werden können.

An der Westseite des Inlandeises wird seit mehr als zwei Jahrzehnten von M. Stober ein Langzeit-Forschungsprojekt betrieben, das auf einen kleinen Bereich der Eiskappe fokus-

siert, hier aber sehr interessante Detailinformationen über Abschmelzen und Bewegung des Eises liefert (STOBER 2015). Die Kombination der Daten beider Projekte verspricht daher eine gegenseitige Befruchtung und bessere Interpretierbarkeit der Ergebnisse. Und nicht zuletzt ist der Vergleich mit den Ergebnissen von Satellitenmissionen wie z. B. IceSat außerordentlich interessant.

Bei den eigenen Expeditionen erfolgten zwischen Ende Juli und Anfang September durchschnittlich alle 20 km Höhenbestimmungen der Eisoberfläche. In dieser Zeit gehen die sommerlichen Tauprozesse zu Ende wohingegen die Schneefälle des Winters noch nicht begonnen haben. Es ist also die Zeit im Jahr, in der die saisonalen Schwankungen der Eishöhen ihr Minimum erreichen.

Den bisherigen Abschluss der Expeditionsreihe bildet die Eisüberquerung im Sommer 2015. Anders als in den Jahren zuvor wurden nicht nur die Profilpunkte bestimmt, sondern die Messungen wurden kontinuierlich auf der gesamten Strecke im Sekundentakt durchgeführt. Damit liegt erstmals ein Profil mit einem Punktabstand von weniger als 2 m (!) vor. Die Möglichkeiten des Vergleichs mit Satellitendaten sind damit enorm verbessert worden.

Im Laufe der 13 Jahre haben sich besonders auf der Westseite die Oberflächeneigenschaften stark verändert. Bereits in einer Höhe von fast 2000 m und mehr als 100 km Abstand vom Eisrand treten größere Schmelzwasserflüsse und –seen auf. Dies legte eine detaillierte Untersuchung der Veränderung dieser Erscheinungen aus Satellitendaten nahe.

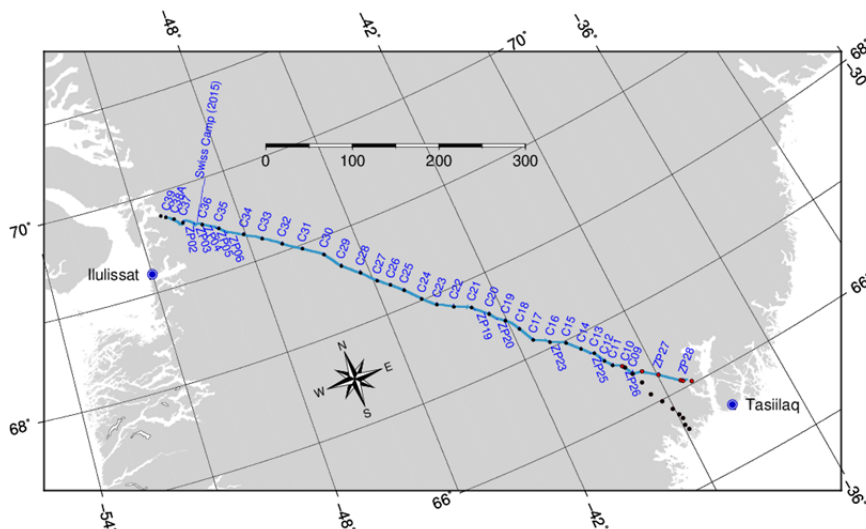


Abb. 1: Route der Expeditionen von Ost nach West. Die Punkte sind die Übernachtungsplätze, an denen gemessen wurde.

Messungen auf dem Inlandeis können mit den heutigen technischen Möglichkeiten auf sehr verschiedene Art und Weise durchgeführt werden. Es treten aber besonders in den Randbereichen Probleme auf, die zu Einschränkungen führen: Die Nutzung von (schweren) Motorschlitten ist wegen der zahlreichen oft zugeweerter Spalten kaum möglich. Das betrifft den besonders interessanten Randbereich, insgesamt etwa 20-30 % der Gesamtstrecke. Als Alternative wurden bei allen Expeditionen Skier und Pulken genutzt und die Strecken zu

Fuß zurückgelegt. Was auf den ersten Blick als Risikosteigerung erscheint, ist bei näherer Betrachtung ein Gewinn an Sicherheit. Die vergleichsweise geringe Reisegeschwindigkeit ist hingegen kein Problem, da möglichst geringe Abstände der Messpunkte gewollt sind. Natürlich erfordert diese Art der Expeditionsdurchführung die Bereitschaft der Teilnehmer, sich den physischen Anforderungen zu stellen. Das war aber in der gesamten Geschichte der Polarforschung, von den Expeditionen der Pioniere an bis heute, noch nie anders.

2 Das Messgebiet an der Westseite

Ca. 80 km von Ilulissat entfernt befindet sich auf dem Inlandeis im Bereich der Gleichgewichtszone das sogenannte „Swiss Camp“. Dieses Camp wurde von der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich im Frühjahr 1990 errichtet und wird heute durch das Corporate Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES) der University of Colorado, Boulder, betrieben¹ (siehe Abb. 1).

In den frühen neunziger Jahren ist durch STOBBER (2015) im Bereich des Swiss Camps ein geodätisch-glaziologisches Programm begonnen. Im Laufe von mehr als zwei Jahrzehnten wurden neben vielen anderen Messungen Langzeitbeobachtungen an Eispegeln durchgeführt. Aus diesen Daten lassen sich über einen längeren Zeitraum und mit einer deutlich höheren zeitlichen Auflösung Eishöhenänderungen bestimmen. Damit ist eine gute Stützung der Traversendaten hinsichtlich Zuverlässigkeit und Genauigkeit möglich. Nicht nur die Verringerung der Eishöhen, auch die Vergrößerung der Gletschergeschwindigkeit ist erkennbar.

Mit einem Partner von der TU Prag wurden 2015 erstmals im Untersuchungsgebiet an der Westseite SAR-Auswertungen zur Eisbewegungsbestimmung durchgeführt.

3 Die wichtigsten Messergebnisse 2015

In den letzten Jahren haben sich die Möglichkeiten der Nutzung von GNSS-Messungen nochmals deutlich verbessert. Es sind viele Satelliten der Systeme GLONASS, BeiDou und Galileo hinzugekommen und auch die Auswertemethoden haben sich verbessert.

Besonders interessant ist dabei die Datenauswertung im Precise-Point-Positioning-Modus (PPP). Dabei werden die Messungen nicht differentiell zwischen jeweils zwei Messpunkten ausgewertet, sondern die Koordinaten von Einzelpunkten werden direkt bestimmt. Voraussetzung dafür ist, dass präzise Bahndaten zur Verfügung stehen und troposphärische und ionosphärische Refraktion sowie weitere Fehlereinflüsse korrekt modelliert werden können. Wenn die Daten und Modelle des IGS im Postprocessing mit benutzt werden, sind diese beiden Forderungen erfüllbar.

¹ <http://cires.colorado.edu>

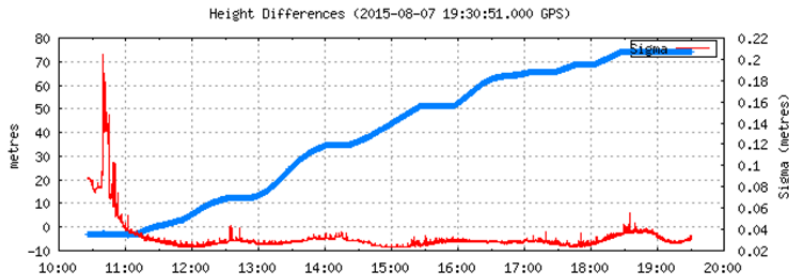


Abb. 2: Beispiel für eine PPP-Höhenauswertung auf der Traverse. Darstellung der relativen Höhen und der Genauigkeit. Die Standardabweichung beträgt nur 2-4 cm.

Es stehen eine Reihe von Diensten zur Verfügung, welche solche Auswertung übernehmen. Insbesondere der PPP-Dienst der Geodetic Survey Division des Canada Centre for Remote Sensing hat sich als besonders geeignet herausgestellt. Er erlaubt, auch kinematische Messungen stabil auszuwerten, wenn eine Mindestbeobachtungszeit von etwa einer Stunde erreicht wird.

3.1 GNSS-Messungen entlang der Traverse

Es wurden auf nahezu der gesamten Traverse mit einem Trimble R7 Empfänger Daten mit einer Messrate von 1 Hz aufgezeichnet. Lediglich die ersten 5 km und ein 20 km Abschnitt im letzten Drittel fehlen wegen technischer Probleme. Bei Bewegungsgeschwindigkeiten von minimal 2 und maximal 25 km/h ergeben sich Punktabstände zwischen 1 und 10 m, wobei die hohen Geschwindigkeiten nur selten unter Nutzung von Segeln erreicht wurden.

Die Genauigkeit der 3D-Koordinaten beträgt 2-3 cm für die Lage und 2-4 cm für die Höhenkomponente und ist etwas geringer als wenn an einem Punkt statisch über mehrere Stunden beobachtet wird (Abb. 2). Da die Höhenänderungen der Eisoberfläche mehrere Dezimeter bis Meter jährlich betragen, ist dies völlig ausreichend. Zur Kontrolle wurden an etwa der Hälfte der Übernachtungsplätze die genaueren statischen Messungen durchgeführt.

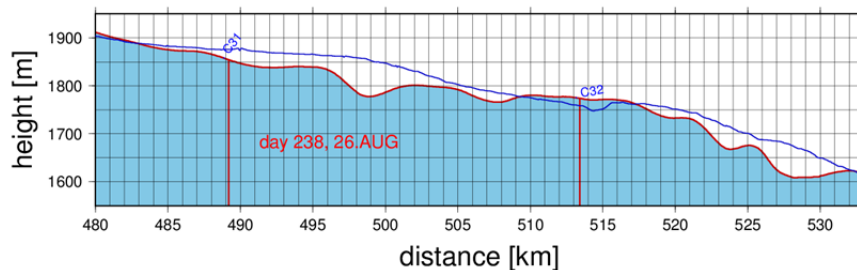


Abb. 3: Ausschnitt des Höhenprofils von der Westseite. C31 und C32 sind zwei der seit 2002 mehrfach gemessenen Punkte. Die Wellen im Oberflächenprofil mit Amplituden bis 20m sind gut erkennbar. Die blaue Linie zeigt die aus IceSat-Daten abgeleiteten Höhen.

Mit der kinematischen Messmethode braucht an den bisherigen Messpunkten nur kurz, für einige Minuten, gestoppt zu werden, um eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen. Damit wurde die Organisation und Logistik wesentlich flexibler und leichter zu realisieren.

3.2 Messungen mit GPS-Handheld Empfängern und barometrische Höhenbestimmung

Für die Navigation während der Expedition wurden Garmin-GPS-Empfänger eingesetzt. Damit ist es problemlos möglich jeden beliebigen Punkt auf der Eiskappe mit 3-5 m Genauigkeit zu erreichen und auch die Route auf weniger als 50 m einzuhalten. Letzteres ist lediglich im Spaltengebiet und an den zahlreichen Flüssen im Abstieg schwierig.

Diese Genauigkeit ist für Eishöhenbestimmungen auf den ersten Blick nicht ausreichend. Es treten viele Sprünge und auch grobe Abweichungen in den Daten auf. Allerdings ist die Nachbarschaftsgenauigkeit zweier aufeinander folgender Messungen i.a. deutlich höher. Wenn die Sprünge und Fehler herausgefiltert werden und die Tagesetappen am Anfang und Endpunkt mit exakten Höhen gestützt werden, können Oberflächenstrukturen zwischen den Stützpunkten erfasst werden. Die Genauigkeit der so „interpolierten“ Höhen beträgt 2-3 m, ist also deutlich höher, als die einfacher, normalerweise unbrauchbarer Navigationsdaten (TERLINDEN 2016). Das ist für die fehlenden Abschnitte aber auch für die Messungen aus früheren Jahren interessant.

Ergänzend können barometrisch bestimmte Höhenprofile untersucht werden. Dies ist unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die historischen Expeditionen diese Messmethode verwendet haben, wichtig.

4 Höhenänderungen der Eisoberfläche

Die glaziologische Bestimmung von Massenbilanzen stellt ein komplexes, nahezu unlösbares Problem dar. Volumenänderungen des Eiskörpers können alternativ als *sogenannte Spezifische Massenbilanzen* bestimmt werden. Die wichtigste Voraussetzung dafür ist ein gleichbleibendes vertikales Dichteprofil der oberflächennahen Schichten des Gletschers. Für das im Ablationsgebiet in Küstennähe Grönlands im Spätsommer vorherrschende Blau-eis ist diese Forderung weitgehend erfüllt. Das Schmelzwasser fließt hier nahezu ungehindert oberflächlich ab. Für die Bereiche mit Schneeauflage in größeren Höhenlagen (Akkumulationsgebiet) verhält es sich anders. Schmelzprozesse mit versickerndem Wasser würden die Ergebnisse verfälschen, da die Höhen sich verringern können ohne dass ein Massenverlust auftritt. Die größten Volumenänderungen treten allerdings in den zuerst erwähnten Randbereichen auf.

Die gleiche Idee liegt der Bestimmung von Massenänderungen der Gletscher mittels Satellitenaltimetrie zugrunde. Auch hierbei werden nur geometrische Parameter bestimmt. Veränderungen des Eiskörpers selbst werden nicht erfasst.

Die Altimetrie liefert Ergebnisse flächenhaft über große Gebiete. Messungen am Boden können nur profilhafte Daten bereitstellen, dafür aber mit einer wesentlich höheren Genauigkeit, weshalb sie sehr gut zu vergleichenden Betrachtungen herangezogen werden können.

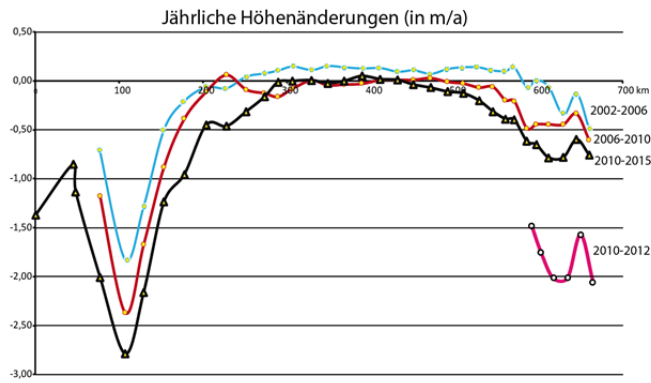


Abb. 4:
Höhenänderungen entlang
der Traverse

Die Kurven der Höhenänderungen zeigen eine stetige Beschleunigung der Abschmelzprozesse seit 2002. Im Osten, rechts im Bild, hat sich der Betrag von 20 bis 50 cm/a auf 50 bis 80 cm/a erhöht. An der Westseite, im Einzugsgebiet des Kangia Sermia bei Ilulissat, ist der maximale jährliche Eisverlust von 1,7 auf 2,7 m/a gestiegen. Insgesamt hat sich die Eishöhe etwa bei Profilkilometer 100 um mehr als 30 m seit 2002 verringert.

Die Höhenangaben wurden mit Genauigkeiten von ca. 2-3 cm bestimmt.

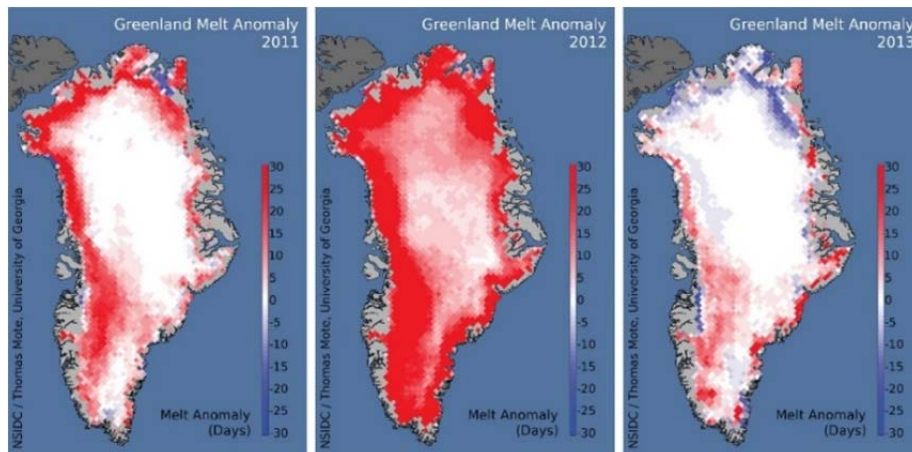


Abb. 5: Oberflächenschmelzanomalie in Grönland in Tagen. Dargestellt sind die Anzahl der Tage, an denen die Gletscheroberfläche im jeweiligen Jahr angetaut ist. (Quelle: NASA, Greenland: Annual accumulated days of melt. NASA Scientific Visualisation Studio. GSFC)

Interessant ist der extrem erscheinende Höhenverlust zwischen 2010 und 2012 an der Ostseite, der sich in den Folgejahren wieder etwas ausgeglichen hat. Die Ursache sind extreme Schmelzprozesse im Sommer 2012. In Abb. 5 sind die drei aufeinanderfolgenden Jahre 2011, 2012 und 2013 dargestellt. 2011 war ein „normales“ Jahr und 2013 ein relativ kaltes. 2012 traten außerordentlich ungewöhnlich lang anhaltende warme Temperaturen auf, die zu

Höhenverlusten im Ostteil der Traverse von mehr als 3 Metern in nur einer Saison geführt haben. Es zeigt sich also, dass für klimarelevante Aussagen immer Langzeitbeobachtungen und Mittelbildungen über mehrere Jahre (hier 4 bis 5) erforderlich sind. Ein einzelnes extremes Ereignis kann bei singulärer Betrachtung zu Fehlinterpretationen führen. Wenn sich die Prozesse von 2012 so für die ganze Eiskappe Grönlands fortgesetzt hätten, hätte das einen Totalkollaps des Eises in nur wenigen Jahrzehnten bedeutet.

Obwohl dies nicht eingetreten ist, muss man trotzdem von einem dramatischen Massenverlust im südlichen Grönland gesprochen werden. Bei einem Verlust von ca. 20 m Eishöhe in einem Jahrzehnt bei ansteigender Tendenz muss man mit einem Abschmelzen der Eiskappe im Südwesten der Insel in den nächsten 300-500 Jahren rechnen.

5 Vergleich mit anderen Daten

Die Aussage, die Satellitenaltimetrie liefert flächenhafte Informationen über die Eishöhen stimmt nur bedingt. Es treten mehrere Kilometer großen Lücken zwischen den Ground-Tracks auf. Ein direkter Vergleich der Traversendaten mit denen der Altimetrie ist nur an den Kreuzungspunkten möglich.

Werden die im Rahmen dieses Projektes 2015 gemessenen Profile mit einem aus IceSat-Daten abgeleiteten Höhenmodell verglichen, zeigt sich deutlich der qualitative Unterschied beider Datensätze. Das Höhenmodell weist wegen der unterschiedlichen räumlichen Auflösung erhebliche Abweichungen zu den Profilmessungen auf. In Abb. 3 ist zu den eigenen Messungen auch das IceSat-Höhenmodell eingetragen. Nur an den Kreuzungspunkten der Tracks mit dem Profil gibt es gute Übereinstimmungen.

An der Westseite, in etwa 50 km Küstenabstand, wird seit 1991 ein Langzeitprojekt zu Eishöhenänderungen durchgeführt (STOBER 2015). Er hat an die Höhenwerte ein Polynom 3. Grades angepasst, welches die Entwicklung in 24 Jahren sehr gut wiedergibt (Abb. 6).

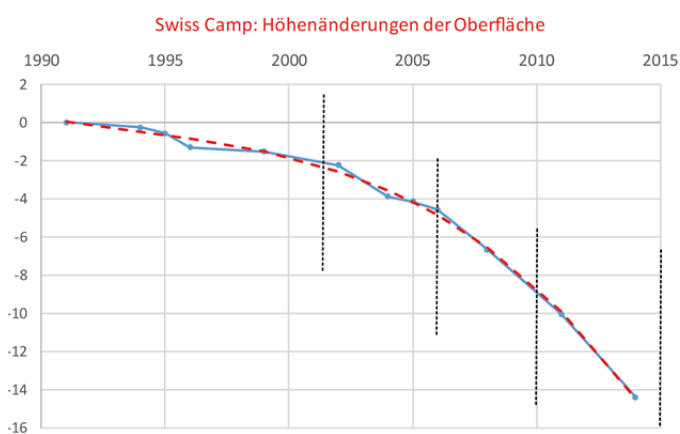


Abb. 6: Höhenänderungen am Swiss Camp und Polynom 3. Grades (gestrichelt), verändert nach Stober (2015). Die senkrechten punktierten Linien markieren die Messungsperioden der hier vorgestellten Untersuchung.

In einer Studie von KHAN u.a. (2015) wird der Massenverlust für das Grönlandeis zwischen 1992 und 2012 zusammengestellt. Es werden eine Vielzahl von veröffentlichten Werten der Massenänderungen einbezogen. Auch hier zeigt sich die Beschleunigung der Prozesse im letzten Jahrzehnt.

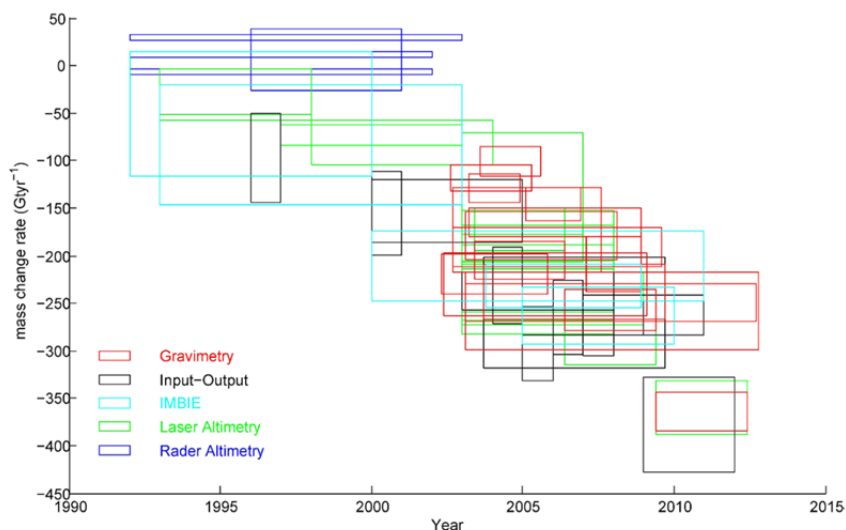


Abb. 7: Massenveränderungen zwischen 1992 und 2012. Die Größe der Rechtecke stellen die Ungenauigkeiten der Bestimmungsmethoden sowohl in der Zeit, als auch im Betrag dar (aus: KHAN u.a. 2015).

Aus der Darstellung in Abb. 7 würde normalerweise nicht verlässlich auf eine Beschleunigung des Massenverlustes geschlossen werden können. Die Unsicherheiten der einzelnen Werte sind dafür zu groß.

Werden aber Detailuntersuchungen, wie hier gezeigt, hinzugenommen, kann auf der weitere Verlauf der Kurve mit einiger Zuverlässigkeit extrapoliert werden. Der Massenverlust Grönlands könnte inzwischen die Größenordnung von -500 bis -600 Gt/a erreicht haben. MAYER und OERTER gingen in einer Analyse 2006 noch von -44 Gt/a aus, was für einen jährlichen Meeresspiegelanstieg von $0,13$ bis $0,18$ mm/a ausreicht. Wenn der heutige Massenverlust um mehr als den Faktor 10 größer ist, bedeutet das einen Beitrag des grönländischen Eises zum Meeresspiegelanstieg von $1,5$ bis 2 mm/a. Der mittlere Anstieg des Meeresspiegels betrug in den letzten 20 Jahren $3,2$ mm/a. Mit einer Vergrößerung dieses Betrages um 30% oder mehr muss gerechnet werden.

Zur Beurteilung der Veränderungen der Gletscheroberfläche können auch optische Fernerkundungsdaten herangezogen werden. In einer früheren Veröffentlichung haben die Autoren berichtet (KORTH u.a. 2013), dass sich neben der Höhenabnahme auch die Oberfläche extrem verändert. Der Bereich im Westen des Untersuchungsgebietes, in dem die Schneefuße im Sommer nahezu komplett abschmilzt, hatte sich zwischen 2002 und 2010 von ca. 30 auf fast 100 km Breite fast verdreifacht. Eine nicht mehr schneebedeckte Eisoberfläche absorbiert aber wesentlich stärker Sonnenenergie als die weiße Schneefuße,

wodurch sich die Schmelzprozesse für den Rest des jeweiligen Sommers erheblich beschleunigen. Es tritt also eine Rückkopplung auf.

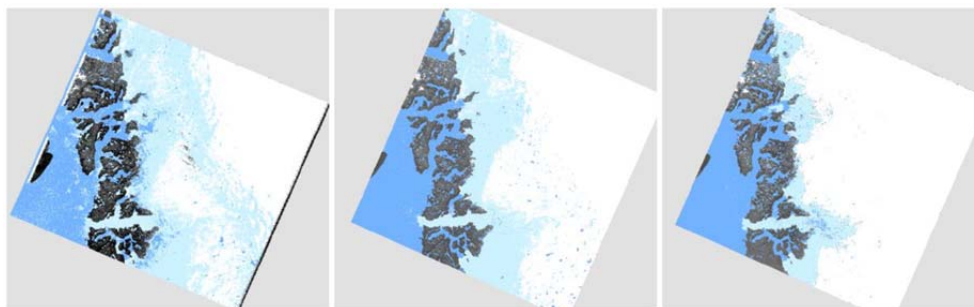


Abb. 8: Vergleich der Ergebnisse der NDSI-NDWI-Methode aus LANDSAT-Daten von 2010, 2014 und 2015 (von links nach rechts, aus STOLTZ 2016)

Eine Weiterführung dieser Untersuchungen, bei denen durch Kombination der LANDSAT-Aufnahmekanäle die Flächen mit Schnee, Eis, Wasser und Fels klar differenziert werden können (NDSI-NDWI-Methode, siehe Abb. 8), hat gezeigt, dass trotz der sich beschleunigenden Höhenabnahme auch scheinbar gegenläufige Tendenzen auftreten können. So wies die Blaueis-Fläche 2010 ein relatives Maximum auf, 2015 hatte sie wieder das Minimum von 2002 erreicht. Dabei ist aber zu beachten, dass 2010 im Vergleich ein sehr warmes Jahr war, 2014 ein eher normales und 2015 ein recht kaltes.

Auch hier zeigt sich wieder, dass aus einzelnen oder auch nur wenigen Daten keine Extrapolationen vorgenommen werden dürfen und für belastbare Aussagen lange Datenreihen, also ein echtes Monitoring, erforderlich sind.

6 Fazit und Ausblick

Geodätisch glaziologische Feldarbeiten zum Monitoring von Gletschern sind auch im Zeitalter der Satellitentechnik nötig, um einerseits die Satellitendaten zu verifizieren, andererseits liefern sie aber auch für sich genommen wichtige Ergebnisse. Entscheidend ist in jedem Fall, dass eine möglichst lange Zeitspanne von deutlich mehr als einem Jahrzehnt abgedeckt wird, um zuverlässige Aussagen treffen zu können.

Eine Fortsetzung der Arbeiten entlang der Traverse und zusätzlich verstärkt in den Randbereichen im Osten und Westen ist vorgesehen. Das Arbeitsprogramm und die eingesetzte Messtechnik soll erweitert werden. So sind verstärkt photogrammetrische Vermessungen, auch mit Drohnen, und flächenhafte Erfassungen interessanter Abschnitte der Eisoberfläche vorgesehen.

Literatur

KHAN S. A., A. ASCHWANDEN, A. A. BJØRK, J. WAHR, K. K. KJELDSSEN AND K. H. KJÆR (2015): Greenland ice sheet mass balance: a review. Rep. Prog. Phys. 78, 2015.

- KORTH, W., W. ADLER, U. HOFMANN, U. MÜNSTER, F. POLTE UND M. RÜCKAMP (2008): Bestimmung von Eishöhenänderungen in Grönland. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 3/2008
- KORTH, W. UND U. HOFMANN (2013): Eismassenänderungen im südlichen Grönland zwischen 1912 und 2012. 17. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2013, Wichmann Verlag Berlin, ISBN 978-3-87907-526-3, S. 261-266.
- MAYER, C. UND OERTER, H. (2006): Die Massenbilanzen des Antarktischen und Grönländischen Inlandeises und der Charakter ihrer Veränderungen , Warnsignale aus den Polarregionen : wissenschaftliche Fakten / Hrsg.: José L. Lozán . Hamburg : Büro "Wiss. Auswertungen", pp. 92-96.
- STOLTZ, A. (2016): Nutzung von optischen Satellitenfernerkundungsdaten für glaziologische Untersuchungen. Master-Arbeit, Beuth Hochschule für Technik Berlin, FB III, 2016.
- STOBER, M. (2015): Glazial-geodätische Langzeitstudie zur Massenbilanz und Fließgeschwindigkeit des grönländischen Inlandeises im Paakitsoq-Gebiet (West Grönland). DVW-Landesverein Baden Württemberg, Heft 2, S. 13-50, 2015.
- TERLINDEN, B. (2016): Verwendung von GPS-Navigationsempfängern für die Bestimmung von Geländeprofilen. Bachelor-Arbeit, Beuth Hochschule für Technik Berlin, FB III, 2016