

---

# *Eismassenänderungen im südlichen Grönland zwischen 1912 und 2012*

Wilfried KORTH & Uwe HOFMANN

## **Zusammenfassung**

Seit 2002 wird im südlichen Grönland ein Projekt zur Bestimmung von Eishöhenänderungen, die als spezifische Massenbilanzen interpretiert werden können, durchgeführt. Nach 2002 fanden 2006, 2010 und im vergangenen Sommer Feldarbeiten statt.

Logistisch wurden alle vier Feldkampagnen als kostengünstige Skiexpedition ohne Nutzung von teurer Transporttechnik, wie z.B. Hubschraubern, realisiert. Es wurden jeweils entlang einer etwa 700 km langen Traverse Höhenänderungen relativ zur Erstmessung bestimmt. Diese Höhenänderungen können als Bodenkontrolle ("ground truth") für Satellitenmissionen dienen, sind aber auch direkt als ein eigenständiger Datensatz über Massenbilanzen anzusehen.

Die Traverse folgt einer historischen Überquerungsrouten des schweizerischen Meteorologen A. de Quervain (1912). Damit war an einigen Punkten auch ein Höhenvergleich über ein Intervall von 100 Jahren möglich.

Die Höhenbestimmung erfolgte mit 12h-GNSS-Messungen an 35 Camps. Die Höhenänderungen konnten mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 2$  cm für die jährlichen Änderungen bestimmt werden.

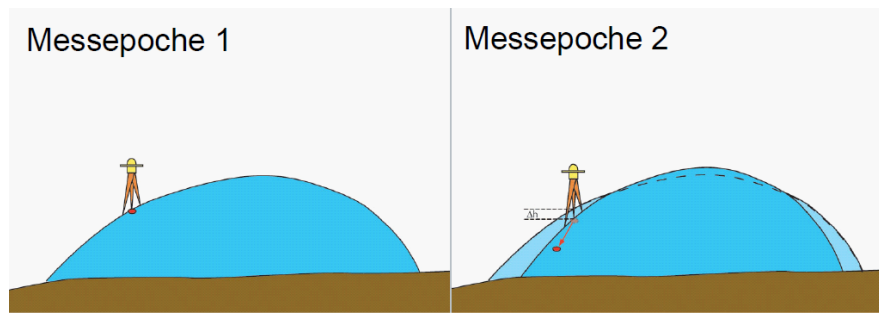
## **1 Das Projekt**

### **1.1 Bestimmung spezifischer Massenbilanzen**

Änderungen der Geometrie von Gletschern können als ein klimabedingtes Signal verstanden werden. Dafür ist die Bestimmung eines Höhenmodells ausreichend. Wenn aus Höhenänderungen direkt auf Massenänderungen geschlossen wird, spricht man von „spezifischen Massenbilanzen“.

Eine Möglichkeit der Bestimmung solcher Massenbilanzen ist die Satellitenaltimetrie. Im letzten Jahrzehnt hat es zwei entsprechende Satellitenmissionen gegeben: das amerikanische IceSat-Projekt und die europäische CryoSat2-Mission. Für beide sind Bodenkontrolldaten („ground truth“) zur Validierung und Kalibrierung erforderlich. Solche Bodenkontrolldaten können z.B. mittels Höhenmessungen an Punkten oder auf Profilen bzw. in Testgebieten gewonnen werden. Ein effektives Höhenbestimmungsverfahren ist die Nutzung geodätischer GNSS-Messungen. Dabei wird im gleichen Höhensystem gemessen, wie bei der Altimetrie. Die Genauigkeit von ca.  $\pm 5$  cm für die Höhen und  $\pm 2$  cm für die Höhenänderungen, wenn über mehrere Jahre gemittelt wird, ist dabei völlig ausreichend. Für die Ableitung von Massenänderungen muss an exakt den gleichen Positionen, die mit GPS problemlos abgesteckt werden können, mehrfach, möglichst mit mehreren Jahren Abstand und immer zur gleichen Jahreszeit, gemessen werden. Die günstigste Zeit ist dabei der Herbst, wenn die sommerlichen Schmelzprozesse dem Ende zugehen und die starken

Schneefälle des Winters noch nicht eingesetzt haben (vgl. KORTH u.a. 2008, KORTH & HOFMANN 2010).



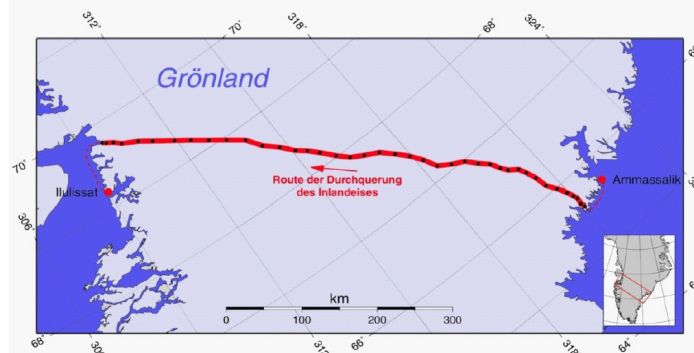
**Abb. 1:** Prinzip der Bestimmung spezifischer Massenbilanzen mit GNSS-Messungen.

Das Prinzip dieser Methode ist in Abbildung 1 veranschaulicht. Der Gletscher bewegt sich natürlich in der Zeit zwischen den Messungen weiter, so dass auch Eisbewegungen ermittelt werden können, wenn die Messpunkte vermarktet werden. Für die Massenbilanzbestimmung ist dies allerdings nicht nötig.

Es können sogar ohne Vermarkungen Eisbewegungen berechnet werden, wenn man die mehrstündigen Messungen kinematisch oder pseudokinematisch auswertet.

## 1.2 Die Route

Für die Überquerung des Inlandeises Grönlands bieten sich mehrere Routen an: die klassische Überquerungsstrecke von Nansen (1888), die heute oft begangene Strecke zwischen Tassilaq im Osten und Kangerlussuaq im Westen oder auch die historische Route von Alfred de Quervain zwischen Tassilaq und der Disko-Bucht (1912). Für die letzte Möglichkeit sprachen vor allem zwei Gründe: Einerseits war die schweizerische Expedition 1912 die erste geowissenschaftliche Überquerung und andererseits führt die Traverse durch Gebiete, in denen besonders große Höhenänderungen zu erwarten sind. Im Westen schneidet sie das Einzugsgebiet des Ilulissat Kangia (Ilulissat Icefjord), der zu den schnellsten Gletschern der Erde zählt und einen gewaltigen Teil des Eisausstoßes Grönlands produziert.



**Abb. 2:** 700 km Traverse über das Inlandeis. Die schwarzen Punkte sind die Camppositionen, an denen gemessen wurde.

### 1.3 Feldkampagnen

Die erste Feldkampagne fand 2002 unter der Leitung von Wieland Adler statt. Eine Gruppe von vier Teilnehmern überquerte das Eis in 39 Tagen. Wiederholungsmessungen erfolgten 2006 (sechs Teilnehmer), 2010 (drei Teilnehmer) und zum Teil 2012 (vier Teilnehmer). Der Erstautor war an allen vier Expeditionen beteiligt.

Im Sommer 2012 konnte die Traverse wegen technischer Probleme mit der Ausrüstung nicht vollständig realisiert werden. Es wurden nur die ersten 150 km des Profils gemessen. Dafür konnte aber auf dem Rückweg an die Ostküste einige der Messpunkte von 1912 nach 100 Jahren erneut gemessen werden.

### 1.4 Die Logistik

Eine Besonderheit der Feldarbeiten stellte die Wahl der logistischen Mittel dar. Es wurde weitestgehend auf teure und aufwändige Technik wie Motorschlitten oder Helikopter verzichtet. Stattdessen erfolgte die Fortbewegung auf Skiern mit selbstgezogenen Schlitten. Diese einfache Technik ermöglicht eine sichere und ausreichend schnelle Arbeit, auch in Spaltengebieten, in Bereichen mit Schmelzwasserflüssen und -seen oder auf stark angetauter, schliziger Schneeoberfläche.



**Abb. 3:** Fortbewegung auf dem Inlandeis mit Skiern und selbstgezogenen Schlitten.

## 2 Ergebnisse

Während aller vier Expeditionen wurden an den Camppositionen nachts mindestens 12-stündige GNSS-Messungen mit geodätischen Empfängern durchgeführt. Relativ zu Referenzstationen an den Küsten können daraus Positionen mit  $\pm 2\text{-}3$  cm und Höhen mit  $\pm 3\text{-}5$  cm Genauigkeit berechnet werden.

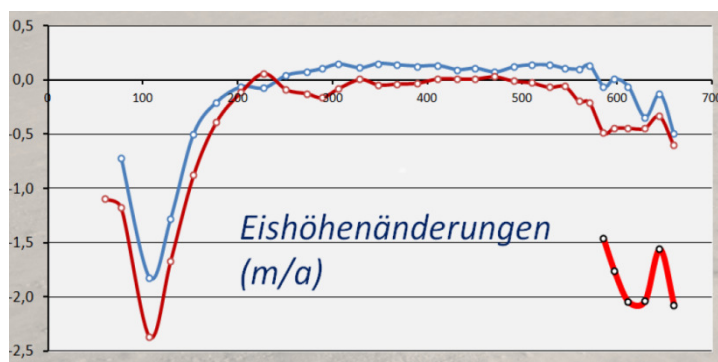
Es ist aber auch möglich, die Daten ohne Referenzstationen mit sogenanntem „Precise

Point Positioning“ (PPP) auszuwerten. Diese Methode wird von verschiedenen Institutionen, z.B. von der NASA, als Web-Dienst kostenfrei zur Verfügung gestellt.

## 2.1 Höhenänderungen

Es konnten jeweils zwischen den Messungsepochen Höhenänderungen berechnet werden. Daraus lassen sich dann Volumen- und Massenänderungen ableiten. Wenn von einem etwa gleichen vertikalen Dichteprofil des Gletschers ausgegangen wird, kann die Höhenänderung mit der Dichte von Eis direkt in Massenänderungen umgerechnet werden. Diese Annahme ist allerdings nur bedingt zutreffend, da mit den immer stärker werdenden Schmelzprozessen an der Gletscheroberfläche auch ein stärkeres Versickern und Wiedergefrieren von Wasser zu beobachten ist. Die Auswertung mehrerer bis zu 3m tiefen Firngruben hat gezeigt, dass es kaum noch möglich ist, die sommerlichen und winterlichen Schneelagen zu unterscheiden. Beide sind mit einer Vielzahl Eisschichten durchzogen. Nahe der Gleichgewichtslinie wird also das Ergebnis der Massenänderungen verfälscht sein.

In den sogenannten Blaueisbereichen, in denen es am Ende des Sommers keine Schneeeinlagerung mehr gibt und wo die größten Höhenänderungen auftreten, ist die Methode ohne diesen Systematischen Fehler.

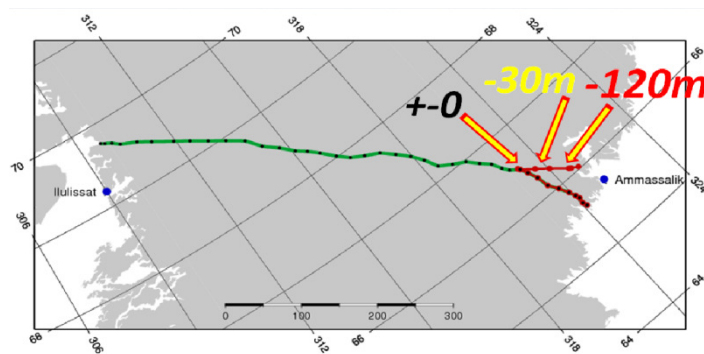


**Abb. 4:** Jährliche Eishöhenänderungen zwischen 2002 und 2006 (obere Kurve), 2006 und 2010 (darunter liegende Kurve) sowie 2010 und 2012 (Kurvenstück unten rechts).

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse der wiederholten Höhenbestimmungen. Beim Vergleich der ersten beiden Intervalle wird deutlich, dass der anfangs noch festzustellende Höhenzuwachs oberhalb von 2000 m verschwunden ist und die Volumenabnahme um etwa 20% zugenommen hat. Bemerkenswert ist, dass in den nur zwei folgenden Jahren bis 2012 der Höhenverlust sprunghaft auf den drei- bis vierfachen Betrag angewachsen ist. Umso bedauerlicher ist die Tatsache, dass 2012 keine vollständige Messung des Profils möglich war. Es kann davon ausgegangen werden, dass inzwischen ein starker Höhenverlust auf dem gesamten Profil zu beobachten ist und im westlichen Teil der Traverse (linker Abschnitt in Abb. 4) ein jährlicher Höhenverlust von 5-10 m zu verzeichnen sein dürfte. Genaue Zahlenwerte können erst nach einer weiteren Messung geliefert werden.

Es kann aber von einem exponentiellen Anstieg des Massenverlustes ausgegangen werden, den auch andere Autoren beobachtet haben (z.B. STÖBER, 2010).

Im Jahre 2012 konnten an insgesamt vier Zeltplätzen der Expedition von 1912 nochmals genaue Höhen bestimmt werden. Im Vergleich mit den Messungen von vor einhundert Jahren (DE QUERVAIN & MERCANTON 1920) ergaben sich überraschende Ergebnisse.



**Abb. 5:** Höhendifferenzen zwischen 1912 und 2012.

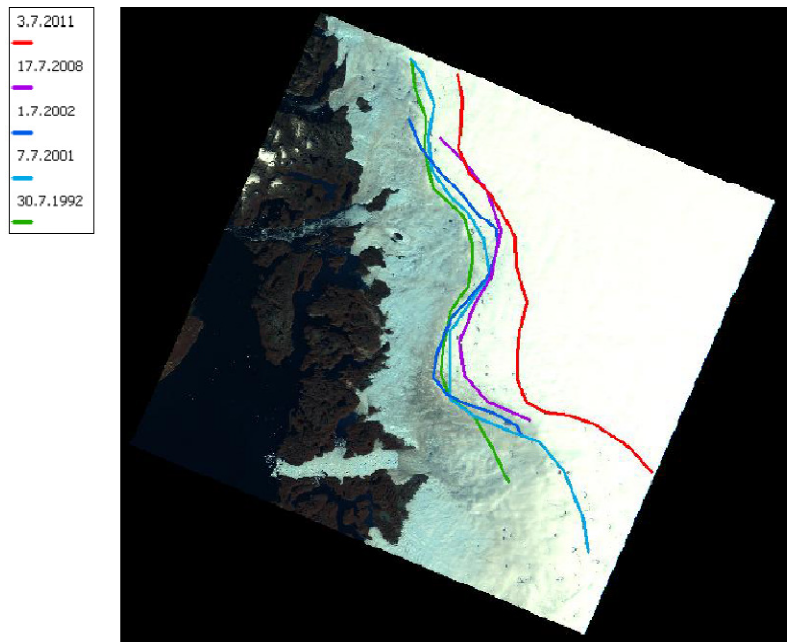
Am Zeltplatz 26 (1912) in ca. 1850 m Höhe ergab sich kein signifikanter Höhenunterschied. Etwa 40 km weiter zur Küste, in einer Höhe von 1460 m, betrug die Höhendifferenz -30m und weitere 40 km nach Osten in 1240 m Höhe bereits -130 m! Ein vierter Punkt direkt am Ende des Gletschers nahe einer Moräne lag 2012 ca. -70 m tiefer. Es konnte also ein Höhenverlust von durchschnittlich nahezu 100 m in einem Streifen von fast 100 km Breite festgestellt werden. Dabei kann angenommen werden, dass sich der größte Anteil dieses Höhenverlustes innerhalb der letzten 2-3 Jahrzehnte abgespielt hat. Es ist daher durchaus möglich, dass der Randbereich des südlichen Inlandeises in den nächsten 100 Jahren zwischen 300 und 600 m Höhe verlieren kann! Das ist mit einem Totkollaps des Eiskörpers gleichzusetzen!

## 2.2 Veränderungen der Größe der Ablationszone

Mit der weiter fortschreitenden Erwärmung des Klimas auf der Nordhalbkugel verstärken sich auch die sommerlichen Tauprozesse auf dem grönländischen Inlandeis. Infolgedessen verschiebt sich die maximale Lage der Gleichgewichtszone, also der Übergang von Eis zu Schnee, landeinwärts und in größere Höhen.

Anhand von Fernerkundungsdaten lässt sich diese Veränderung gut belegen. Eine visuelle Auswertung von Landsat-Daten aus dem Bereich der Disko-Bucht an der Westküste zeigt deutlich die Verschiebung der Gleichgewichtslinie und die Vergrößerung der Ablationszone in den letzten zwei Jahrzehnten (MUND, 2012).

In Abbildung 6 ist erkennbar, dass die Gleichgewichtslinie zwischen 1992 und 2002 im Rahmen von etwa 10 km lagestabil war. Im nachfolgenden Jahrzehnt hat sie sich ca. 30 km nach Osten, also landeinwärts und mehrere hundert Meter in höhere Lagen verschoben. Als Maßstabsvergleich kann dazu die Länge des Eisstroms (ca. 55 km) im unteren Bildteil dienen.



**Abb. 6:** Lageänderung der Gleichgewichtslinie (Übergang von Schnee zu Blankeis) am Ende des jeweiligen Sommers zwischen 1992 und 2011 im Einzugsgebiet des Ilulissat-Kangia.

### 3 Schlussbetrachtungen

Anhand der Ergebnisse von Messungen aus dem letzten Jahrzehnt zeigen sich eindrucksvoll die dramatischen Veränderungen der grönländischen Inlandeiskappe. Ohne dass hier auf die Ursachen dieser Umweltveränderungen eingegangen werden soll, sind die Folgen durchaus ebenfalls dramatisch: Ein derartiger Eismassenverlust wird in den nächsten Jahren zu einem Meeresspiegelanstieg von jährlich einigen Millimetern bis Zentimetern führen und damit den Betrag, der sich aus der thermischen Ausdehnung des Ozeanwasserkörpers ergibt, in naher Zukunft übersteigen.

Eine weitere Überwachung dieser Prozesse ist daher dringend geboten, sowohl mit den flächenhafte Informationen liefernden Satellitenverfahren, als auch mit bodengebundenen Vergleichsmessungen, wie hier beschrieben. Für letztere sollte ein Zeitintervall von vier Jahren nicht überschritten werden. Eine vollständige Profilmessung wäre daher im Jahre 2014 sinnvoll und wünschenswert.

### Literatur

DE QUERVAIN, A., P.-L. MERCANTON (1920): Ergebnisse der schweizerischen Grönlandexpedition. Druckschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft, Band LIII, 1920.

- KORTH, W., W. ADLER, U. HOFMANN, U. MÜNSTER, F. POLTE, M. RÜCKAMP (2008): Bestimmung von Eishöhenänderungen in Grönland. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 3/2008.
- KORTH, W., U. HOFMANN (2010): Grönlandexpedition 2010, erste Ergebnisse. Terra Nostra, Schriften der Alfred-Wegener-Stiftung 2010/1, Tagungsbeiträge der 24. Internationalen Polartagung der Deutschen für Polarforschung, Obergurgl 2010, ISSN 0946-8978.
- KORTH, W., U. HOFMANN (2011): Eishöhenänderungen im südlichen Grönland. Forum GeoBau, Band 1, S. 29-38, ISBN 978-3-8322-9775-6.
- MUND, S. (2012): Glaziologische Untersuchungen anhand von Fernerkundungsdaten. Bachelorarbeit, BeuthHS Berlin, Fachbereich III, Bauingenieur- und Geoinformationswesen, 2012
- STOBER, M. (2010): Aktuelle Tendenzen zur Veränderung des Inlandeises im Bereich des Swiss Camps (West Grönland) und zur Fließgeschwindigkeit des Equip Sermia Gletschers. Terra Nostra, Schriften der Alfred-Wegener-Stiftung 2010/5, 92, 2010.
- STOBER, M., J. HEPERLE (2010): Elevation Change and Flow Velocity at Swiss-Camp 1991-2008 and Recent Flow Velocity at the Equip Sermia. Outlet Glacier. Poster bei: International Glaciological Society Nordic Branch Meeting, 28.-30.10.2010, Kopenhagen.