

Geodätisch-photogrammetrische Untersuchungen zur Dynamik von Gletschern in West-Grönland

Reinhard Dietrich, Hans-Gerd Maas, Heiko Ewert, Ralf Rosenau, Axel Rülke und Ellen Schwalbe

Zusammenfassung

Für eine präzise Massenbilanz des grönländischen Eisschildes ist die Kenntnis über das dynamische Verhalten seiner großen Ausflussgletscher von entscheidender Bedeutung. Wir zeigen am Beispiel des Jakobshavn Isbræ, wie durch Kombination unterschiedlicher geodätischer und photogrammetrischer Verfahren wesentliche Fragen wie die nach Veränderungen von Frontlage, Geschwindigkeit und Oberflächenhöhe, aber auch die nach Wechselwirkungen mit dem Ozean und der festen Erde hochgenau beantwortet werden können. Geodäsie und Photogrammetrie erbringen auf diese Weise wertvolle Beiträge zur Erdsystemforschung.

Summary

A precise estimate of the present-day ice mass balance of the Greenland ice shield requires spatio-temporally resolved knowledge on the dynamic regime of its outlet glaciers. We demonstrate for the Jakobshavn Isbræ glacier, how a combination of different geodetic and photogrammetric techniques can be used to investigate specific phenomena of outlet glaciers like changes of the glacier front position, of the flow velocity and the ice surface height as well as the interactions of the ice with the ocean and the solid Earth. Providing this data at a high precision and reliability, geodesy and photogrammetry deliver a very valuable contribution to Earth system research.

Schlüsselwörter: Glaziologie, Bildsequenzanalyse, Laseraltimetrie, Erdkrustendeformation

1 Einleitung

Der grönländische Eisschild bildet die zweitgrößte zusammenhängende Eismasse der Erde und ist Gegenstand intensiver Forschung insbesondere hinsichtlich seines Beitrages zum globalen Meeresspiegelanstieg. Derzeit verliert der Eisschild durch Kalbung von Eisbergen und Abschmelzprozesse mehr Masse, als durch Akkumulation (Schneefall) gewonnen wird (Rignot et al. 2006). Untersuchungen zeigen, dass dadurch ein Eismassenverlust von jährlich etwa 205 km³ entsteht. Dies entspricht einem eustatischen Meeresspiegelanstieg von 0,51 mm/Jahr (Ewert et al. 2011).

Etwa die Hälfte des Massenverlustes wird über die zahlreichen Ausflussgletscher entlang der grönländischen Küste durch Kalbung von Eisbergen verursacht. Die andere Hälfte entfällt größtenteils auf oberflächiges Schmelzen mit Abfluss sowie Verdunsten in der sommer-

lichen Ablationsperiode. Während Modellberechnungen das Verhalten des Eisschildes gegenüber langfristigen klimatischen Veränderungen gut wiedergeben können, sind die beobachteten kurzfristigen Zustandsänderungen der Ausflussgletscher innerhalb weniger Jahre bzw. Jahrzehnte nur schwer modellierbar (Solomon et al. 2007). Diese meist kleinräumigen Veränderungen im Frontbereich, wie die Beschleunigung der Oberflächenfließgeschwindigkeit, die Höhenabnahme der Eisoberfläche im Mündungsbereich sowie der schnelle Rückzug der Gletscherfront, können eisdynamische Reaktionen auslösen und dadurch die Stabilität größerer Teile des gesamten Eisschildes beeinflussen.

Ein bedeutender Ausflussgletscher, an dem große Veränderungen in seinem glaziologischen Regime beobachtet wurden, ist der Jakobshavn Isbræ (Abb. 1). Der in der Disko-Bucht gelegene Gletscher ist mit Fließgeschwindigkeiten von nunmehr bis zu 40 m/Tag einer der größten und schnellsten Gletscher des grönländischen Eisschildes. Eine Besonderheit bildet die vorgelagerte, schwimmende Eiszunge, wie sie sonst hauptsächlich an großen antarktischen Eisströmen ausgebildet ist. Seit etwa 15 Jahren zeigt der Gletscher starke Veränderungen. Während sich die schwimmende Eiszunge über eine Länge von über 15 km nahezu vollständig zurückgezogen hat, verdoppelte sich die Fließgeschwindigkeit des Gletschers unter gleichzeitiger Höhenabnahme der Eisoberfläche von bis 15 m/Jahr (Maas et al. 2006, Thomas et al. 2003).

Zur Erforschung derartiger dynamischer Prozesse an Gletschern kommt daher ein weites Spektrum von Methoden aus Geodäsie, Photogrammetrie und Fernerkundung zur Anwendung. Gerade in der Photogrammetrie besitzt Deutschland auf diesem Gebiet eine lange Tradition, die sich bis zu Sebastian Finsterwalder zurückverfolgen lässt (Finsterwalder 1897). Im Folgenden werden Arbeiten der Technischen Universität Dresden in Grönland mit Fokus auf den Jakobshavn Isbræ vorgestellt, die auf der Auswertung von Satellitendaten sowie Daten aus drei Messkampagnen in den Jahren 2004, 2007 und 2010 basieren. Zunächst werden in Abschnitt 2 aus multi-temporalen Satellitenbilddaten abgeleitete Gletscherfrontlagen und Bewegungsgeschwindigkeitsfelder gezeigt. Abschnitt 3 beschreibt Verfahren der terrestrischen Photogrammetrie zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern im Bereich der Gletscherzunge mit sehr hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. In den Abschnitten 4 und 5 werden Eishöhenänderungen aus Satelliten-Laseraltimeterdaten sowie aus Eismassenänderungen resultierende Erdkrustendeformationen vorgestellt.

2 Variation der Frontlage und Geschwindigkeitsfelder aus Satellitenbilddaten

Aufgrund schwieriger Zugänglichkeit bieten sich Satellitenverfahren zur Beobachtung der grönländischen Gletscher an. Ein wertvolles und einzigartiges Archiv bilden die Daten der Landsat-Mission, die über einen Zeitraum von nunmehr ca. 40 Jahren und mit einer Bodenauf-

lagen vor 1999 (gerissene blaue Linien) zeigen sie den enormen Rückzug der Gletscherfront um etwa 40 km in 150 Jahren.

Mit Hilfe von automatischen Zuordnungsverfahren in Satellitenbildern kann die durchschnittliche Fließgeschwindigkeit eines Gletscherpunktes zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten bestimmt werden. Dazu wird ein kleiner Bildausschnitt der Gletscheroberfläche in einer

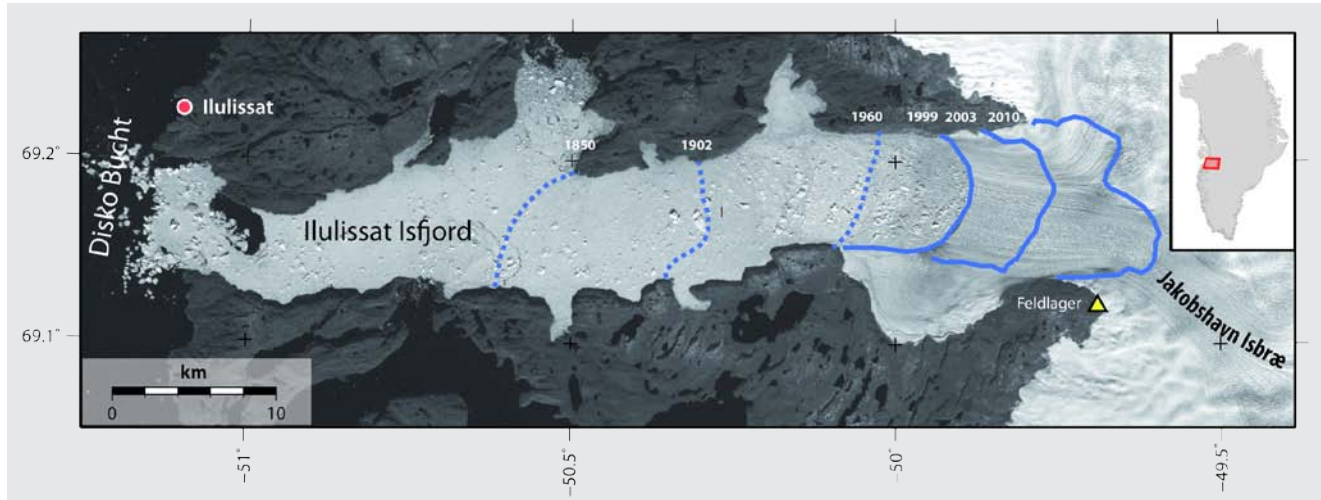


Abb. 1: Die Landsat7-Aufnahme vom 11. September 1999 zeigt den Frontbereich des Jakobshavn Isbræes und den Ilulissat Isfjord. Der Ilulissat Isfjord ist komplett mit einem Gemisch aus Meereis und Eisbergen bedeckt, das im Laufe der Zeit in die Disko-Bucht transportiert wird. Die ungefähren Frontlagepositionen (gerissene blaue Linie) zwischen 1850–1960 sind aus Weidick et al. (2007) entnommen. Das gelbe Dreieck kennzeichnet die Position des Feldlagers während der drei durchgeführten Messkampagnen 2004, 2007 und 2010. Der rote Rahmen in der Nebenkarte zeigt das Arbeitsgebiet in Grönland.

lösung von bis zu 15 m nahezu die gesamte Erdoberfläche kontinuierlich multi-spektral erfasst.

Aus multi-temporalen Satellitenbilddaten von Gletschern lässt sich die Veränderung der Lage der Gletscherfront dokumentieren. In Abb. 1 werden Ergebnisse der Frontlagendetektion des Jakobshavn Isbræ in Landsat-Aufnahmen (seit 1999) dargestellt. Zusammen mit Front-

Aufnahme ausgewählt und der korrespondierende Ausschnitt in der anderen Aufnahme gesucht. Als Korrespondenzkriterium wird ein Ähnlichkeitsmaß wie z.B. die Minimierung der Quadrate der Grauwertdifferenzen zwischen beiden Bildausschnitten gewählt. Aus der geometrischen Verschiebung der beiden Bildausschnitte kann über den Bildmaßstab und den Aufnahmezeitabstand die

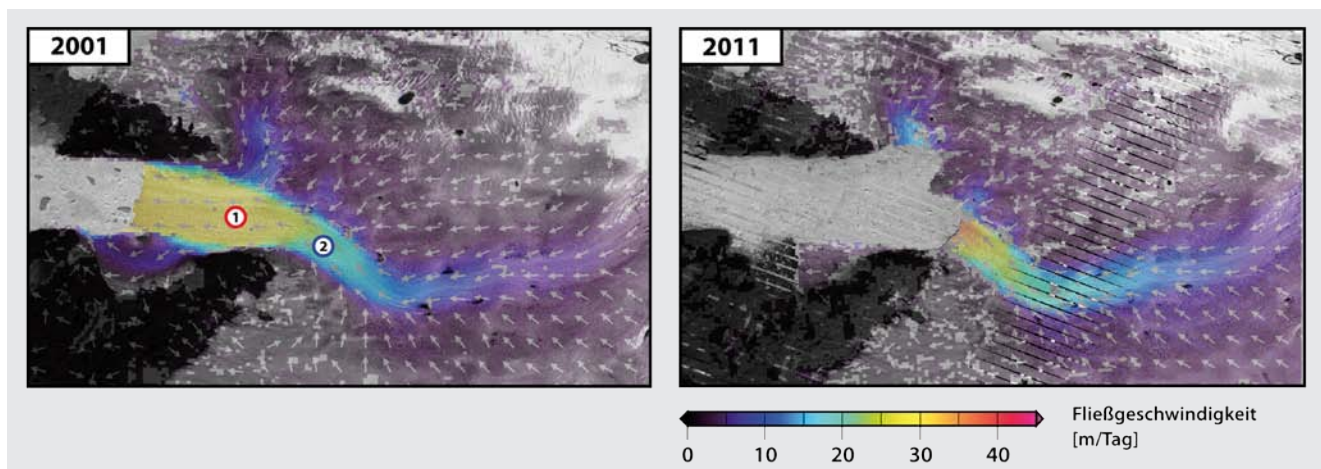


Abb. 2: Optische Landsat7-Aufnahme des Frontbereiches des Jakobshavn Isbræ vom 7. Juli 2001 und Landsat7-Aufnahme vom 26. Juni 2011 mit überlagertem Bewegungsgeschwindigkeitsfeld. Zwischen 2001 und 2011 zog sich die Gletscherfront um etwa 20 km zurück bei gleichzeitiger Verdoppelung der Fließgeschwindigkeit.

Fließgeschwindigkeit bestimmt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik, angewandt auf Satellitenbilddaten grönländischer Gletscher, findet sich bei Rosenau et al. (2012).

Im Bereich des Jakobshavn Isbræ wurden aus etwa 500 Landsat-Aufnahmen im Zeitraum zwischen 1999 und 2011 für alle Szenenpaare mit einer Zeitbasis von weniger als 80 Tagen Fließgeschwindigkeitsfelder berechnet (Rosenau et al. 2012). Zwei Beispiele für das Fließregime des Jakobshavn Isbræ zeigt Abb. 2: Die erste Abbildung veranschaulicht die Fließgeschwindigkeit im Sommer 2001. Die noch vorhandene, schwimmende Eiszunge des Gletschers weist Fließgeschwindigkeiten im Bereich von 25 bis 30 m/Tag auf. Im Vergleich dazu zeigt das Geschwindigkeitsfeld aus dem Jahre 2011 nach einem Rückgang der Gletscherfrontlage um ca. 15 km eine deutliche Beschleunigung sowohl im Frontbereich und entlang des Hauptstromes als auch im Bereich der beiden kleineren nördlichen Eisströme.

Neben dem langfristigen Trend der Fließgeschwindigkeit können auch saisonale Geschwindigkeitsvariationen erfasst werden (s. Abb. 3). Für zwei Positionen auf dem Gletscher (roter und blauer Kreis in Abb. 2) wurden die

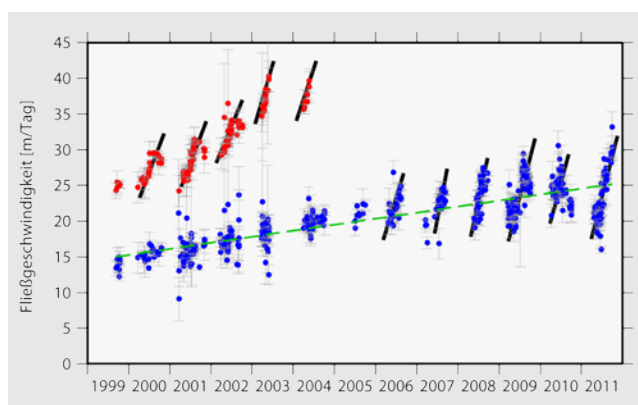


Abb. 3: Änderung der Fließgeschwindigkeit für eine Position auf der schwimmenden Eiszunge (roter Kreis in Abb. 2) vor 2003/04 und eine Position hinter der Frontlage von 2011 (blauer Kreis in Abb. 2). Der lineare Trend der Fließgeschwindigkeit ist als gerissene grüne Linie eingezeichnet. An beiden Positionen zeigt die Fließgeschwindigkeit große saisonale Variationen (durch schwarze Linie akzentuiert).

Fließgeschwindigkeiten zwischen 1999 und 2011 extrahiert. Die saisonalen Schwankungen während eines Jahres können bis zu 12 m/Tag betragen. Als Auslöser für die saisonale Beschleunigung wird einerseits die reduzierte subglaziale Reibung am Gletscherbett aufgrund im Sommer eindringenden Schmelzwassers und andererseits der Wegfall der winterlichen Meereisdecke im Eisfjord vermutet (Zwally et al. 2002a, Amundson et al. 2010).

3 Bestimmung spatio-temporaler Geschwindigkeitsfelder im frontnahen Gletscherbereich aus terrestrischen Bildsequenzen

Zur Bestimmung von räumlich und zeitlich sehr hoch aufgelösten Bewegungsvektorfeldern des Jakobshavn Isbræ wurden monokulare Bildsequenzen einer terrestrischen Kamera ausgewertet. Zwischen aufeinanderfolgenden Bildern der Sequenz wurden durch Zuordnungsverfahren die Translationsvektoren für Merkmale der Gletscheroberfläche bestimmt. Wenn Punkte über die gesamte Länge der Bildsequenz verfolgt werden können, ergibt sich eine Trajektorie. Über die Distanz zum Gletscherpunkt wird die im Bildraum gemessene Trajektorie skaliert. Die monokulare Bildsequenzanalyse erfordert deshalb die Bereitstellung eines (grobem) digitalen Geländemodells der Gletscheroberfläche. Die Tatsache, dass aus diesen monokularen Bildsequenzen zweidimensionale Geschwindigkeitsinformationen bestimmt werden (Längs- und Höhenkomponente des Geschwindigkeitsvektors), ist akzeptabel, da keine signifikanten Querkomponenten der Gletscherbewegung zu erwarten sind.

Abb. 4 skizziert die Aufnahmekonfiguration für die monokulare Bildsequenzanalyse. Von einem festen Standpunkt aus wurden mit einer hochauflösenden digitalen Kamera Bilder in einem Zeitintervall von 15 Minuten aufgenommen. Die Kamera befand sich auf einem Hügel etwa 1,5 km entfernt vom südlichen Rand der ca. 10 km breiten Gletscherzunge. Um durch Wind und Aufwärmefekte verursachte Eigenbewegungen der Kamera kompensieren zu können, wurden im Blickfeld der Sequenzkamera ortsstabile Zielmarken angebracht (Durchmesser ca. 25 cm). Zur Skalierung und Georeferenzierung der Messwerte wurde ein GPS-gestützter Bildverband aufgenommen. Die Lagerung des photogrammetrischen Netzes erfolgte auf die 3D-Koordinaten der Kamerastandpunkte des Bildverbandes, die von der Basislinie aus tachymetrisch gemessen wurden, sowie auf entfernte Höhenpasspunkte (Maas et al. 2008).

Die Auswertung der monokularen Bildsequenzen beinhaltet zwei wesentliche Aufgaben:

1. Messungen in den Bildsequenzen durch Punktzuordnung zwischen aufeinanderfolgenden Sequenzbildern.
2. Transformation der Trajektorien vom Bild- in den Objektraum.

Für die Messung von Bewegungskurven (Trajektorien) in den Bildsequenzen werden im ersten Bild einer Sequenz interessierende Einzelpunkte oder ein beliebig dichtes Punktraster definiert. Jeder einzelne Punkt wird mittels Least-Squares-Matching durch alle Bilder der Sequenz verfolgt (Abb. 5). Dabei werden in einem robusten Ansatz Schattenpixel, die die Messung verfälschen würden, eliminiert. Um die gemessenen Trajektorien überlagernde Eigenbewegung der Kamera (induziert durch Wind etc.) zu kompensieren, werden durch das Tracking ortsfester

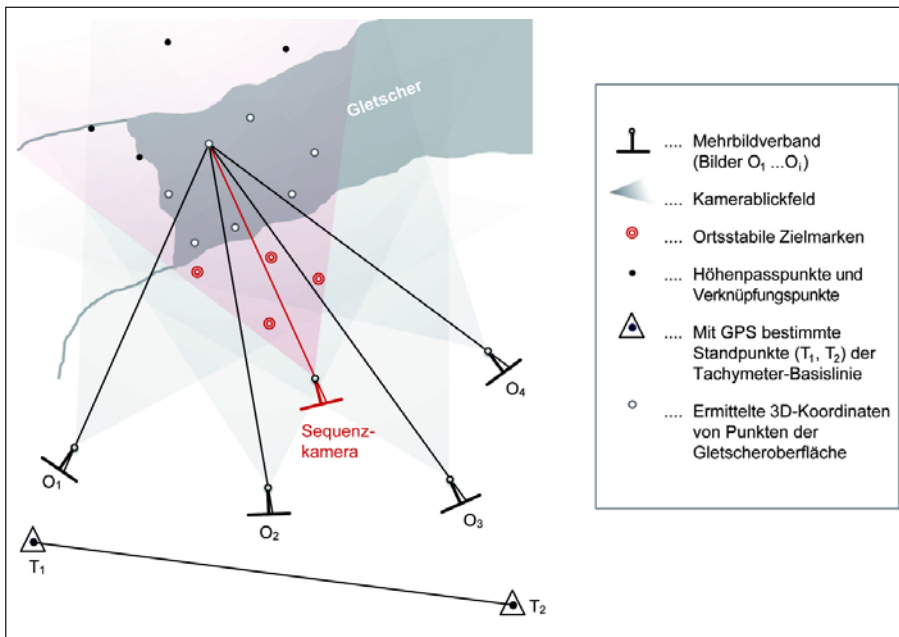


Abb. 4: Schema der Messkonfiguration für die Aufnahme monokularer Bildsequenzen. Die Bilder O_1 bis O_4 zeigen Kamerapositionen für die photogrammetrische Bestimmung der 3D-Koordinaten von Punkten auf der Gletscheroberfläche (beispielhaft dargestellt als weiße Punkte). Punkte auf unbewegtem bzw. weit entferntem Gelände dienen als Verknüpfungs- und Höhenpasspunkte (schwarze Punkte). Ortsfeste Zielmarken im Blickfeld der Kamera (rot) dienen der Kompensation der Eigenbewegung der Bildsequenzkamera.

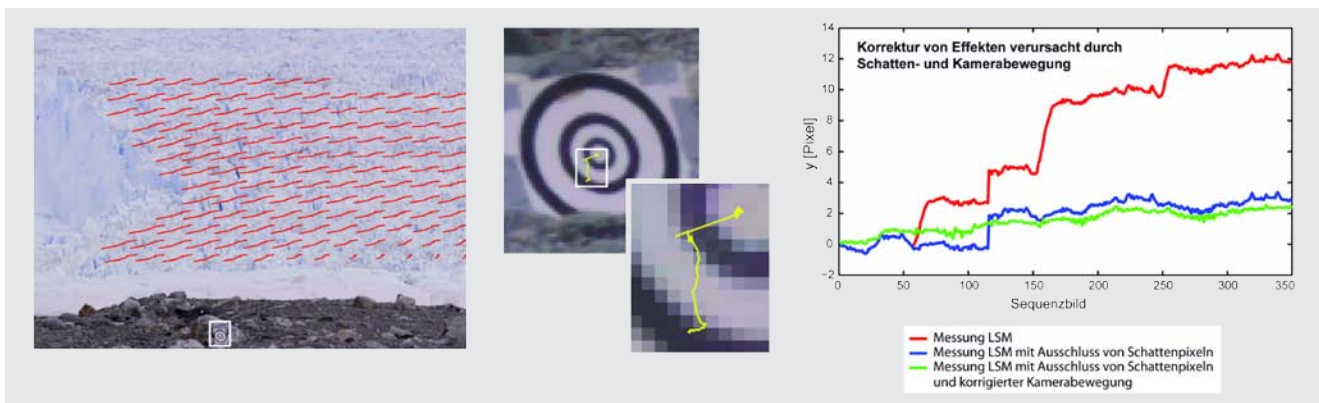


Abb. 5: Tracking (Beispiel: Jakobshavn Isbræ, August 2004). Die Abbildung zeigt die gemessenen Trajektorien (einem Sequenzbild überlagert, links) sowie die Trajektorie einer gemessenen ortsfesten Zielmarke (Mitte). Im Diagramm (rechts) wird am Beispiel einer einzelnen Trajektorie gezeigt, wie sich Effekte durch Schatten- und Kamerabewegungen auswirken.

Zielmarken (Abb. 5 Mitte) Korrekturwerte bestimmt und angebracht.

Zur Transformation der im Bildraum gemessenen Trajektorien in den Objektraum erfolgt eine Skalierung mittels zugehöriger Distanzwerte und ggf. eine Korrektur für eine nicht-orthogonale Blickrichtung. Die Distanzwerte und die Blickrichtung ergeben sich aus dem photogrammetrischen Netz (Abb. 4). Durch eine Triangulierung der berechneten Objektpunkte und Verschneidung des jeweiligen Bildstrahls der Sequenzkamera mit dem Oberflächenmodell kann jedem Pixel im Sequenzbild eine Entfernung zum Messobjekt und damit ein Maßstab zugeordnet werden.

Die terrestrische Bildsequenzanalyse bietet sich insbesondere zur detaillierten Untersuchung des Bewegungsverhaltens in Frontbereichen von Gletschern an. Die Messgebiete besitzen naturgemäß im Vergleich zu Messungen mittels Fernerkundungsverfahren eine geringe räumliche Ausdehnung. Der wesentliche Vorteil liegt

hier in der Tatsache, dass Bewegungsvektorfelder und -trajektorien mit fast beliebig hoher zeitlicher Auflösung erhoben werden können und dass auch Vertikalbewegungen der Gletscherzunge mit hoher Genauigkeit bestimmt werden können. Terrestrische Messungen bilden somit eine gute Ergänzung zu flugzeug- oder satellitengestützten Verfahren zur Untersuchung der frontnahen Bereiche schnellfließender Gletscher.

Anhand der gemessenen horizontalen Bewegungskomponenten für ein dichtes Raster von Gletscherpunkten im frontnahen Bereich des Jakobshavn Isbræ wurden für die Jahre 2004, 2007 und 2010 hochaufgelöste Geschwindigkeitsfelder bestimmt (Abb. 6 links). Aus der auffälligen vertikalen Bewegungskomponente der Trajektorien (Abb. 6 oben rechts) kann auf gezeiteninduzierte Vertikalbewegungen der Gletscherfront geschlossen werden. Der Vergleich der gemessenen Vertikalbewegung eines frontnahen Gletscherpunktes mit der Modellgezeitenkurve zeigt zunächst eine eis-mechanisch erklärte zeitliche

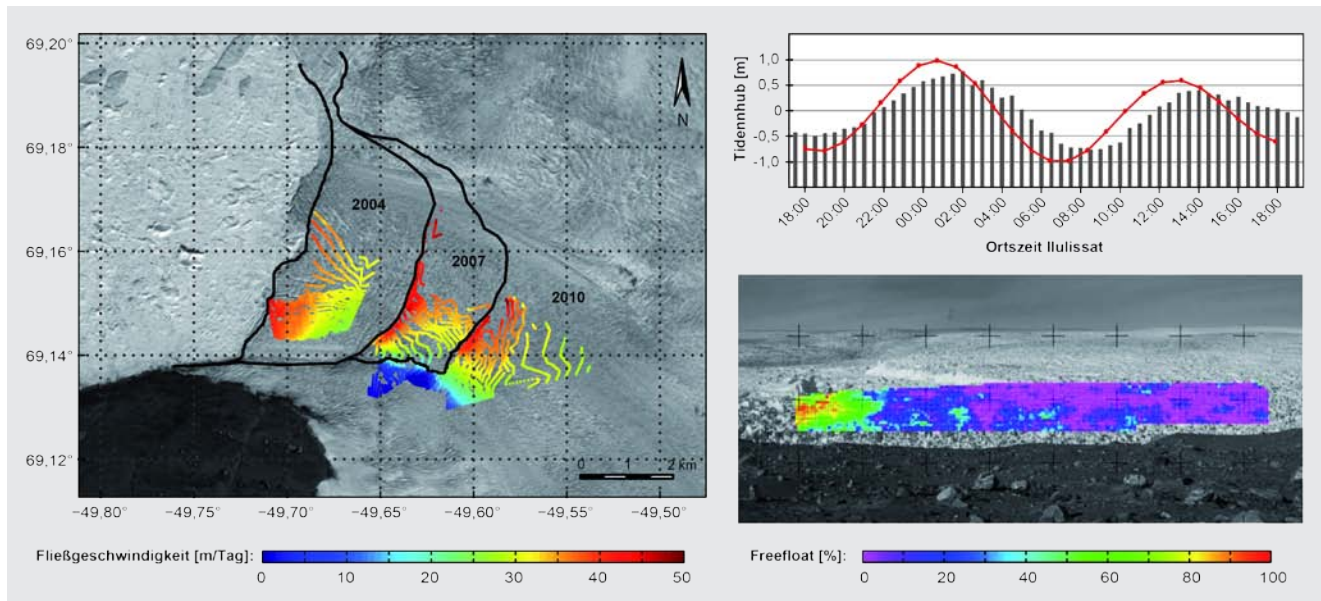


Abb. 6: Geschwindigkeitsfelder aus Bildsequenzmessungen am Jakobshavn Isbræ (links): Die Abbildung stellt Geschwindigkeitsfelder, die im August 2004, im Juli 2007 und im August 2010 gemessen wurden, als Überlagerung einer Landsat-Szene von 2004 dar. Schwarz dargestellt sind die Frontlagen der Gletscherzunge zu den jeweiligen Messzeitpunkten. Einfluss der Gezeiten auf die Gletscherbewegung (rechts): Im Diagramm (oben rechts) wird exemplarisch die gemessene Vertikalbewegung eines frontnahen Gletscherpunktes (graue Balken) im Vergleich zur Modellgezeitenkurve (rot) dargestellt. Aus entsprechenden Vergleichen kann flächenhaft der prozentuale Anteil der vertikalen Gletscherbewegung am Tidenhub (Freefloat) abgeleitet und so der schwimmende Bereich der Gletscherzunge bestimmt werden. Die als Freefloat bezeichneten Werte sind dem Messbild überlagert dargestellt (unten rechts, Dietrich et al. 2007).

Verzögerung und eine (geringe) Dämpfung. Die Abweichungen zwischen Messungen und Modellgezeitenkurve liegen bei gut messbaren Punkten bei 10 bis 20 cm (Dietrich et al. 2007) und stellen ein aussagekräftiges Genauigkeitsmaß dar. Die ermittelten Vertikalbewegungen dienen als Indikator für schwimmende Gletscherbereiche und können zur Ableitung der aktuellen Position der Aufsetzlinie des Gletschers verwendet werden (Dietrich et al. 2007): Während Punkte an der schwimmenden Gletscherfront zu 100% an den Gezeitenbewegungen teilnehmen, sinkt dieser »Freefloat« zur Aufsetzlinie hin auf Null. Für den Jakobshavn Isbræ konnte auf diese Weise eine Verlagerung der Aufsetzlinie von ca. 3,5 km ostwärts im Zeitraum von 2004 bis 2010 dokumentiert werden.

Aufgrund der autonomen Arbeitsweise der Kameras ist es möglich, Langzeitmessungen durchzuführen. Mit einer mehrwöchigen Bildsequenz wurden im Frühjahr 2010 mehrere Großkalbungseignisse am Jakobshavn Isbræ in einer zeitlichen Auflösung von 15 min erfasst. Die Analyse der Bildsequenz dokumentierte extreme Änderungen der Frontgeschwindigkeiten während der Kalbungseignisse und liefert damit einen Beitrag zum besseren Verständnis der einer Kalbung zugrundeliegenden eisdynamischen Prozesse.

4 Höhenänderung der Eisoberfläche

Die *Ice, Cloud and Land Elevation Satellite* (ICESat) Mission (02/2003–11/2009) war die erste erdgebundene Laseraltimetermission der Welt. Das *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) verwendete für die Messung Laserpulse mit einer Wellenlänge von 1064 nm. Diese sind, im Vergleich zu den Signalen von Radaraltimetern, mit einer Spotgröße von 65 bis 70 m wesentlich besser fokussierbar. Das GLAS arbeitete mit einer Messfrequenz von 40 Hz (Luthcke et al. 2005), der Messpunktabstand betrug 172 m. Damit lieferte ICESat Höhenprofile der Erdoberfläche zwischen 86° nördlicher und südlicher Breite mit bis dahin unerreichter Auflösung und Genauigkeit (Shuman et al. 2006). Das Hauptziel der Mission lag in der Überwachung des antarktischen und grönländischen Eisschildes (Zwally et al. 2002b). Vertiefende Informationen hinsichtlich weiterer Missionsziele sowie detailliertere Systemeigenschaften von ICESat können den Veröffentlichungen von Schutz et al. (2005) und Abshire et al. (2005) entnommen werden.

Eine wichtige Kenngröße in der Glaziologie stellt die Massenbilanz eines Eisschildes dar. Diese lässt sich aus Satellitenaltimeterdaten ableiten. Um dabei das gesamte Potential der hochaufgelösten ICESat-Höhenprofile zu nutzen, basieren die folgenden Ergebnisse auf einer sogenannten Wiederholspuranalyse. Hierbei werden korrespondierende Höhenmessungen entlang der Referenz-

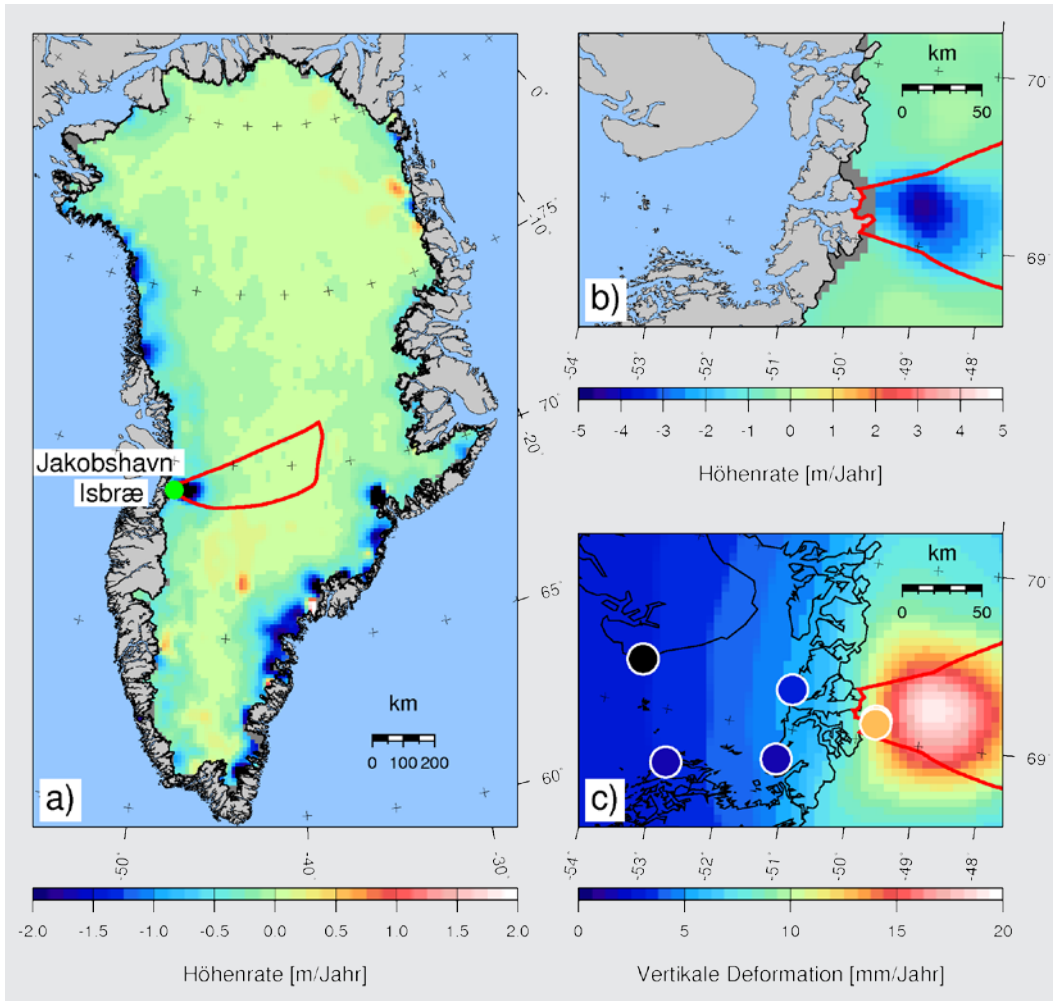


Abb. 7: (a) Ermittelte Höhenraten des grönländischen Eisschildes mit Darstellung des Einzugsgebietes des Jakobshavn Isbræ (rot); (b) Vergrößerter Kartenausschnitt des Ausflussbereichs des Jakobshavn Isbræ; (c) Vertikale Krustenverformungen: Modellierter elastischer Effekt (Hintergrund) und GPS-Messungen (Kreise)

spuren des 91-Tage-Wiederholerbits analysiert. Für die Analyse wurden alle Altimeterdaten des grönländischen Eisschildes verwendet, die im Zeitraum von Oktober 2003 bis März 2008 aufgezeichnet wurden. Eine detaillierte Beschreibung des Ansatzes zur Ermittlung von Höhenraten der Eisoberfläche kann aus Ewert et al. (2011) entnommen werden.

Abb. 7a zeigt die für das grönländische Eisschild ermittelten Höhenraten der Eisoberfläche. Sie variieren regional zwischen $-2,0$ und $+1,0$ m/Jahr. Als mittlere Höhenrate für das gesamte Eisschild wurde ein Wert von $-12,3 \pm 0,6$ cm/Jahr bestimmt. Dies entspricht einer Volumenabnahme des Eisschildes von $205,4 \pm 10,6$ km³/Jahr. Unter Annahme einer Dichte von $0,9$ g/cm³ für reines Eis ergibt sich hieraus eine Massenänderung von $-184,8 \pm 28,2$ Gigatonnen pro Jahr. Dies entspricht einem eustatischen Meeresspiegelanstieg von $+0,51 \pm 0,08$ mm/Jahr. Eine starke Abnahme der Eisoberflächenhöhe ist entlang der östlichen Küste zwischen 60° und 69° Nord zu verzeichnen. Dort befinden sich die beiden großen Gletscher Helheim und Kangerdlugssuaq. Eine weitere starke Abnahme ist ebenfalls entlang des westlichen Küstenbereichs zwischen 69° und 76° Nord zu erkennen.

Im Bereich des Jakobshavn Isbræ wurden Höhenänderungen der Eisoberfläche von bis zu $-5,0$ m/Jahr detektiert (Abb. 7b). Für das gesamte Einzugsgebiet des Jakobshavn Isbræ (Abb. 7a, rote Linie) wurde basierend auf den ICESat-Altimeterdaten eine mittlere Abnahme von $18,4 \pm 3,3$ cm/Jahr bestimmt. Hieraus ergibt sich eine Volumenänderung von $-12,9 \pm 2,3$ km³/Jahr sowie eine Massenänderung von $-11,6 \pm 4,5$ Gt/Jahr.

5 Glazialisostatische Erdkrustendeformationen

Eismassenänderungen rufen glazial-isostatische Krustendeformationen hervor. Für weite Bereiche entlang der südwestgrönländischen Küste wurden diese Vertikalbewegungen durch wiederholte GPS-Messungen auf Fels seit 1995 sehr präzise bestimmt (Dietrich et al. 2005). Die Vertikalbewegungen variieren und liegen bei Beträgen von wenigen mm/Jahr. Die gemessene Bewegung setzt sich stets aus zwei Anteilen zusammen: einer elastischen Sofortreaktion bei aktuellen Massenänderungen und einer Langzeitreaktion (viskoses Fließen im Erdmantel) aufgrund zurückliegender Eismassenänderungen. Bei vorgegebener Massenänderung lassen sich elastische

Reaktionen gut berechnen. Die in Abb. 7b dargestellten Höhenänderungen wurden in Massenänderungen umgerechnet und die daraus resultierende Hebung der Erdkruste berechnet (Abb. 7c). Dabei ergibt sich für das Zentrum des Massenverlustes eine Hebungsrate von +19 mm/Jahr, direkt neben der Gletscherfront von noch 9 mm/Jahr. Wiederholte Messungen in einem regionalen GPS-Netz, das 2004 parallel zu den photogrammetrischen Arbeiten angelegt wurde, zeigen klar dieses Signal (Abb. 7c). Während im Bereich der Disko-Bucht vertikale Krustendeformationen von nur wenigen mm/Jahr auftreten, konnte neben der Gletscherfront eine Hebungsrate von 13 mm/Jahr bestimmt werden.

6 Ausblick

Gletscher gelten als wichtige Indikatoren für Klimaveränderungen und erfahren daher im Zuge der aktuellen Diskussion zu Ausmaß und Folgen weltweiter Klimaänderungen besonderes wissenschaftliches Interesse. Der Massenausstoß der großen grönländischen Gletscher liefert einen wesentlichen Beitrag zum globalen Meeresspiegelanstieg. Für Prognosen ist daher das Verständnis von derzeit beobachteten Veränderungen der Ausdehnung und des Bewegungsverhaltens von Gletschern von besonderer Bedeutung. Diese Prozesse sind bisher kaum durch Modelle nachvollziehbar, so dass Prognosen extrem unsicher sind. Um zukünftige Modelle gut mit Daten stützen zu können, besteht daher ein großer Bedarf an geodätischen und photogrammetrischen Verfahren zur quantitativen Erfassung groß- und kleinräumiger lang-, mittel- und kurzfristiger Veränderungen an den Gletschern. Dies schließt sowohl spezielle Untersuchungen an ausgewählten Gletschern durch terrestrische Verfahren als auch Satellitenverfahren ein. Durch weitestgehend automatisierte Datenverarbeitungsketten ergibt sich die Möglichkeit der Auswertung von Massendaten, die eine räumlich und zeitlich vollständige Abdeckung erlaubt. Geodäsie, Photogrammetrie und Fernerkundung können damit wertvolle Grundlagen für die Glaziologie und die Klimaforschung schaffen.

Literatur

- Abshire J.B., Sun X., Riris H., Sirota J.M., McGarry J.F., Palm S., Yi D., Liiva P. (2005): Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission on-orbit measurement performance. *Geophys. Res. Lett.* 32, L21S02.
- Amundson J., Fahnestock M., Truffer M., Brown J., Lüthi M., Motyka R. (2010): Ice melange dynamics and implications for terminus stability, Jakobshavn Isbræ, Greenland. *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, F01005, doi: 10.1029/2009JF001405.
- Dietrich R., Maas H.-G., Bäßler M., Rülke A., Richter A., Schwalbe E., Westfeld P. (2007): Jakobshavn Isbræ, West Greenland: Flow velocities and tidal interaction of the front area from 2004 field observations. *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, F03S21, doi: 10.1029/2006JF000601.

- Dietrich R., Rülke A., Scheinert M. (2005): Present-day vertical crustal deformations in West Greenland from repeated GPS observations. *Geophysical Journal International* 163, pp. 865–874, doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02766.x.
- Ewert H., Groh A., Dietrich R. (2011): Volume and mass changes of the Greenland ice sheet inferred from ICESat and GRACE. *J. Geodyn.*, doi:10.1016/j.jog.2011.06.003.
- Finsterwalder S. (1897): Der Vernagtferner, seine Geschichte und seine Vermessung in den Jahren 1888 und 1889. *Ergänzungshefte Zeitschrift des Deutschen und Österreichischen Alpenvereins*, 1. Band, 1. Heft, Graz.
- Luthcke S.B., Rowlands D.D., Williams T.A., Sirota M. (2005): Reduction of ICESat systematic geolocation errors and the impact on ice sheet elevation change detection. *Geophys. Res. Lett.* 32, L21S05.
- Maas H.-G., Dietrich D., Schwalbe E., Bäßler M., Westfeld P. (2006): Analyse des Bewegungsverhaltens des Jakobshavn Isbræ Gletschers in Grönland durch monokulare Bildsequenzanalyse. *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, Heft 1/06, S. 93–102.
- Maas H.-G., Schwalbe E., Dietrich R., Bäßler M., Ewert H. (2008): Determination of spatio-temporal velocity fields on glaciers in West-Greenland by terrestrial image sequence analysis. *IAPRS Vol. XXXVII, Part B8*, pp. 1419–1424.
- Rignot E., Kanagaratnam P. (2006): Changes in the Velocity Structure of the Greenland Ice Sheet. *Science*, vol. 311, pp. 986–990, doi: 10.1126/science.1121381.
- Rosenau R., Baessler M., Dietrich R. (2012): Temporal flow variations of major outlet glaciers in Greenland using Landsat data. *IGARSS 2012*, 4 pp.
- Schutz B.E., Zwally H.J., Shuman C.A., Hanock D., DiMarzio J.P. (2005): Overview of the ICESat Mission. *Geophys. Res. Lett.* 32, L21S01.
- Shuman C.A., Zwally H.J., Schutz B.E., Brenner A.C., DiMarzio J.P., Suchdeo V.P., Fricker H.A. (2006): ICESat Antarctic elevation data: preliminary precision and accuracy assessment. *Geophys. Res. Lett.* 33, L07501.
- Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt B., Tignor M., Miller H.L. (2007): *Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge University Press.
- Thomas R., Abdalati W., Frederick E., Krabill W., Steffen K. (2003): Investigation of surface melting and dynamic thinning on Jakobshavn Isbræ, Greenland. *J. Glac.*, pp. 231–239, Vol. 49 (165).
- Weidick A., Bennike O. (2007): Quaternary Glaciation History and Glaciology of Jakobshavn Isbræ and the Disk Bugt Region, a Review. *Geological Survey of Denmark and Greenland, Bulletin* 14, 78 pp.
- Zwally H.J., Abdalati W., Herring T., Larson K., Saba J., Steffen K. (2002a): Surface Melt-Induced Acceleration of Greenland Ice-Sheet Flow. *Science*, vol. 297, pp. 218–222, doi: 10.1126/science.1072708.
- Zwally H.J., Schutz B., Abdalati W., Abshire J., Bentley C., Brenner A., Bufton J., Dezio J., Hancock D., Harding D., Herring T., Minsster B., Quinn K., Palm S., Spin-hirne J., Thomas R. (2002b): ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. *J. Geodyn.* 34, pp. 405–445.

Anschrift der Autoren

Reinhard Dietrich | Heiko Ewert | Ralf Rosenau
Institut für Planetare Geodäsie, TU Dresden
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden

Hans-Gerd Maas | Ellen Schwalbe
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden
hans-gerd.maas@tu-dresden.de

Axel Rülke,
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Außenstelle Leipzig