
Einfluss der lokalen Eistopographie auf die Qualität von Oberflächenhöhen aus Satellitendaten

Thomas HITZIGER¹ & Wilfried KORTH²

¹ BTU Cottbus-Senftenberg, Cottbus · Thomas.Hitziger@b-tu.de

² Beuth Hochschule für Technik, Berlin · Korth@beuth-hochschule.de

Zusammenfassung

Im Sommer 2017 wurde eine Feldbeoberkungskampagne zur Ableitung von Daten über die lokale Eistopographie und deren Veränderung im Einzugsgebiet des Johan Pedersen Fjords (Ostgrönland) von den Autoren durchgeführt.

Das Gebiet nahe dem Rand des Inlandeises verändert sich sehr schnell. Im Jahr 2017 wurden viele neue oder größere Gletscherspalten, komplett veränderte lokale Merkmale und einige neue oder viel größere Nunataks gefunden.

Mittels kinematischem GNSS war es möglich, ein Wiederholungsprofil über die Eisoberfläche nach dem Jahr 2015 zu messen. Die Höhen sind signifikant niedriger, aber die Oberflächenstruktur ist mehr oder weniger stabil. Daher kann das dichte (kinematische) Profil verwendet werden, um ältere punktuelle Messungen zu interpolieren, die seit 2002 in dieser Region durchgeführt wurden.

Eine wesentliche Ausnahme bildet das lokale Oberflächenverhalten um eine Gruppe von Nunataks, die 2002 erstmals von der Expeditionsmannschaft erreicht wurde. Damals war es mehr oder weniger ein einziger Felsvorsprung an einem Gletscherhang. Heute kann man drei markante Nunataks finden. Die größte erreicht eine Höhe von mehr als 60 Metern über der Eisfläche. Dieser Höhenunterschied ist etwa doppelt so groß wie die Höhenänderung in der Umgebung.

Eishöhenänderungen in Grönland können heute sehr effektiv aus Satellitendaten, wie z.B. der Laseraltimetrie, bestimmt werden. Im Randbereich treten allerdings starke Wechsel der Oberflächenneigungen und Höhenvariationen auf, welche die Interpretation von Altimetermessungen erschweren.

1 Das Langzeitprojekt „Spurensuche“ in Grönland

1.1 Bisherige Expeditionen

Im Jahr 1912 wurde das Inlandeis Grönland durch eine Schweizerische Expedition unter Leitung von Alfred de Quervain durchquert. Es war die erste rein geowissenschaftliche Expedition, bei der auch ein Höhenprofil der Eiskappe angefertigt wurde. Auch wenn die Genauigkeit der damals durchgeführten barometrischen Höhenmessungen von de Quervain viel zu optimistisch eingeschätzt wurde, lagen geodätisch-glaziologische Untersuchungen auf dieser Traverse nahe. Es gibt nur wenige historische Daten aus der Zeit des Beginns der rasanten Industrialisierung.

Seit 2002 wurden auf der Traverse von 1912 insgesamt 6 Expeditionen realisiert. Vier davon decken das gesamte Profil ab, die Expeditionen 2012 und 2017 fanden nur an der Ostseite der Eiskappe statt. Es gibt verschiedene geeignete Verfahren zur Bestimmung von Höhen, die sich hinsichtlich ihrer Genauigkeit aber vor allem auch hinsichtlich der Art der Höhen und des Höhenbezuges unterscheiden. Insofern ist ein direkter Bezug zu den Höhendaten von 1912 schwierig, weil das damals verwendete Höhensystem nicht ganz klar ist.

Werden allerdings wiederholt gleichartige Höhenbestimmungen durchgeführt, lassen sich Änderungen von Höhen weitgehend ohne systematische Verfälschung bestimmen. Daher sind auch GNSS-Messungen für die Ableitung von Höhenänderungen geeignet. Ein Vergleich mit den alten Höhen von 1912 ist nur unter Hinzunahme eines Geoidmodells möglich.

Tabelle 1: Übersicht der geowissenschaftlichen Expeditionen auf der Route von 1912

| Jahr 1 | Leitung 2 | Teilnehmer 3 | Messmethode der Höhenbestimmung 4 | Bemerkungen 5 |
|-----------|----------------|-----------------|---|--|
| 1912 | A. de Quervain | 4 | barometrisch | 39 „Zeltplätze“ Genauigkeit der Höhen im Randbereich $\pm 3\text{-}5\text{ m}$ |
| 2002 | W. Adler | 4 | GPS statisch | 34 Punkte $\pm 3\text{ cm}$ |
| 2006 | W. Adler | 6 (+2) | GPS statisch | 34 Punkte $\pm 3\text{ cm}$ |
| 2010 | W. Korth | 3 | GNSS statisch | 34 Punkte $\pm 2\text{ cm}$ |
| 2012 | W. Korth | 4 | GNSS statisch | nur Ostküste 17 Punkte $\pm 2\text{ cm}$ |
| 2015 | W. Korth | 4 (+2) | GNSS kinematisch und barometrisch | kontinuierliches Profil Punktabstand 2-6 m 700 km, $\pm 3\text{ cm}$ |
| 2017 | W. Korth | 3 | GNSS kinematisch | kontinuierliches Profil Punktabstand 2-6 m ca. 180 km, $\pm 3\text{ cm}$ |
| 2019 | (W. Korth) | 5 (+x) | (GNSS kinematisch) (glaziologische Arbeiten) | (gesamtes Profil, in Vorbereitung) |

1.2 Die Feldkampagne 2017

Die bisher letzte Expedition in das Arbeitsgebiet an der Ostküste Grönlands fand im Sommer 2017 statt. Ziel war eine spezielle Untersuchung des Einzugsgebietes des Helheimgletschers. Dieser Gletscher ist einer der schnellsten Grönlands, dessen Geschwindigkeit in jüngster Vergangenheit stark angestiegen ist ($>25\text{ m/a}$) und der außerdem auch noch saisonale Geschwindigkeitsvariationen aufweist (VOYTENKO U. A. 2015). Es konnte eine kontinuierliche Profilmessung mittels kinematischem GNSS realisiert werden, die genau der Messung von 2012 und 2015 folgt. Damit konnten sowohl die historischen Daten von 1912

eingebunden werden, als auch ein Teil des kinematischen Profils von 2015 exakt wiederholt werden.

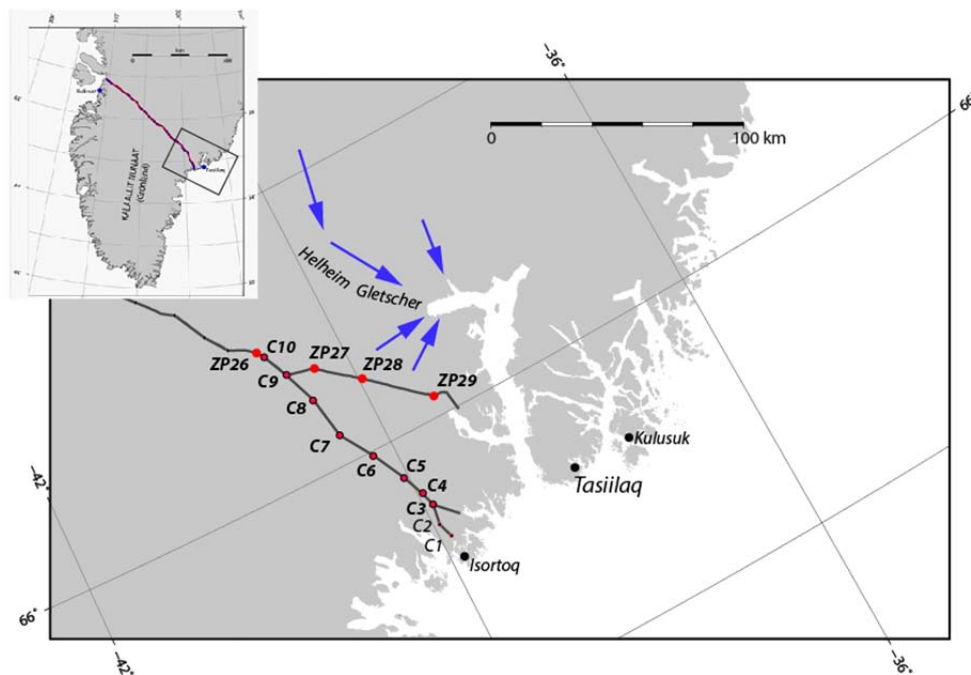


Abb. 1: Karte des Arbeitsgebietes in Ostgrönland mit Darstellung der Routen der Expeditionen (C1-C10: Camppositionen ab 2002, ZP26-ZP29: Zeltplätze 1912). Die blauen Pfeile stellen schematisch die Fließrichtungen im Einzugsgebiet des Helheim Gletschers dar.

2 Ergebnisse der geodätisch-glaziologischen Messungen

Die Ergebnisse für die Höhenänderungen der Eisoberfläche aus den früheren Expeditionen sind bereits an anderer Stelle veröffentlicht worden. Sie beziehen sich auf ein Profil von 34 Einzelpunkten, die einen Abstand von ca. 20 km haben (KORTH U. A. 2008, KORTH & HOFMANN 2010, KORTH & HOFMANN 2013, KORTH U.A. 2017).

Während der Expedition 2015 wurde erstmals die Beobachtungsmethode mit GNSS verändert. Es wurden nicht mehr mehrstündige Beobachtungen auf einzelnen Punkten, sondern kontinuierliche Messungen mit einer Messrate von 1s auf einem bewegten Schlitten tagsüber durchgeführt. Damit war es möglich, ein durchgehendes Profil mit einem Punktabstand von ca. 2m zu bestimmen. Die Genauigkeit der Höhen liegt bei $\pm 3\text{cm}$. Möglich ist eine solche Auswertung mittels sog. Precise Point Positioning (PPP) wobei präzise Bahndaten und eine hochgenaue Modellierung der atmosphärischen Einflüsse erforderlich sind.

Es ist in Abb. 2 deutlich erkennbar, dass es sich nicht um eine gleichförmig ansteigende Eiskappe handelt. Die Oberflächenhöhen steigen von Ost nach West entlang der Traverse nicht stetig an, sondern es treten mehrere Kilometer lange „Bodenwellen“ von bis zu 20 m

„Amplitude“ auf, die durch die Untergrundtopographie und das Fließverhalten des Helheim Gletschers verursacht sein müssen. Es treten auf relativ kleinem Raum Gefälleunterschiede oder sogar -wechsel auf, die eine Approximation der Lokalen Oberfläche durch Ebenen nur sehr kleinräumig erlauben. Für Flächen bis einige hundert Meter Durchmesser ist dies, mit Anpassungsgenauigkeiten von <3-5 cm möglich, für größere nicht (KORTH U.A. 2008).

Die Messungen 2017 erfolgten für einen knapp 70 km langen Abschnitt möglichst exakt auf der Route von 2015. Dies stellte eine schwierige, aber lösbare Aufgabe dar. Für den Höhenvergleich der beiden Jahre wurden dann nur solche Werte verwendet, deren horizontaler Abstand kleiner 10 m war.

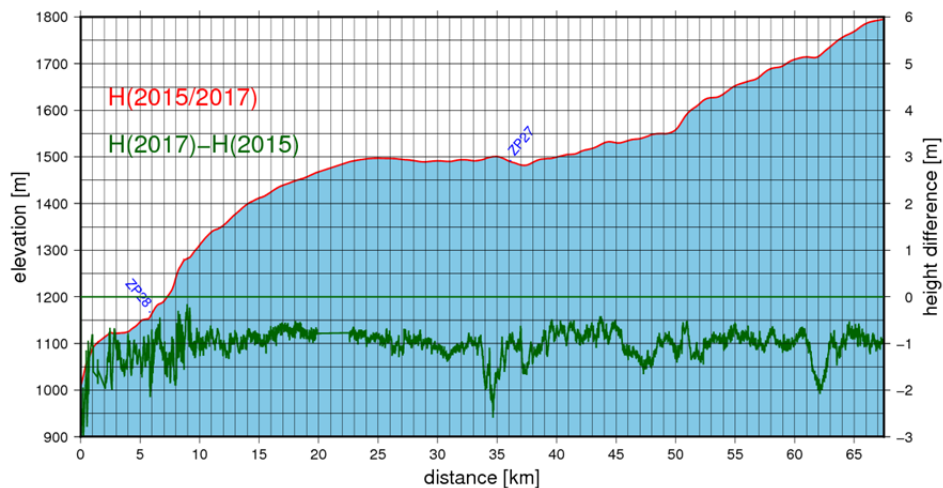


Abb. 2: Darstellung des Höhenprofils an der Ostküste (rote Linie, Skalierung links) und der Höhendifferenzen (grüne Linie, Skalierung rechts). Diskussion im Text

Es ist deutlich erkennbar, dass für Eishöhen von 1300 m und darüber die Höhendifferenzen nahezu gleichförmig etwa 0,5 m/a betragen. Nur im unmittelbaren Randbereich steigen die Werte der Differenzen auf den doppelten Betrag an. Etwa bei Kilometer 35-40 sind ebenfalls größere Höhenänderungen zu beobachten. Hier kreuzt die Traverse einen Gletscherzufluss im Einzugsgebiet des Helheim Gletschers. Dies zeigte sich bereits in einer etwa 20 m großen Depression der Oberfläche am Zeltplatz 27 von 1912.

Für weitere deutliche Abweichungen der Höhendifferenz vom Mittelwert bei Kilometer 43-52 und Kilometer 62 muss von ähnlichen Ursachen ausgegangen werden. Auch hier sind an der Oberfläche wellenartige Senken zu erkennen, die mit dem Drainagesystem des Helheim Gletschers zusammenhängen könnten. Geschwindigkeits- und/oder Eisdickenmessungen liegen den Autoren bisher nicht vor.

Dass die Höhenänderungen über einen so großen Bereich sehr konstant verlaufen, ermöglicht aber eine weitere Nutzung dieser Daten: Sie können zur Interpolation der Höhen zwischen den bei früheren Expeditionen bestimmten Höhenwerten an den Camppositionen (Abstand 10-20 km) verwendet werden. So kann für alle Jahre ein Höhenprofil erstellt werden, welches eine Genauigkeit von ca. 0,1 m aufweist. Lediglich im Randbereich und in

einzelnen kritischen Bereichen, z.B. in größeren Senken, ist diese Vorgehensweise nicht möglich.

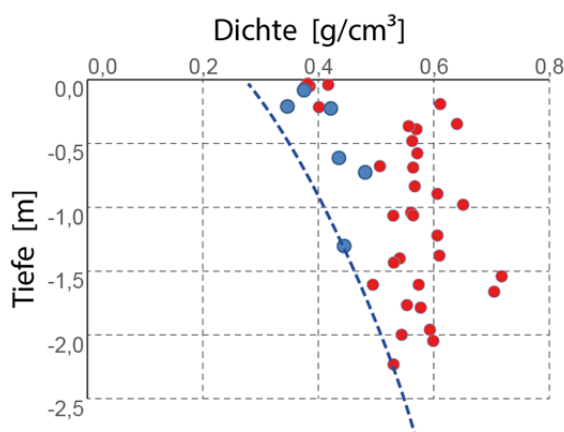


Abb. 3: Oberflächennahe Dichtebestimmungen des Firms. Messwerte 2006: blaue Punkte, Messwerte 2017: rote Punkte, theoretische Werte: gestrichelte Linie

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Bewertung von Höhenänderungen der Eisoberfläche ist die Frage, inwieweit das vertikale Dichteprofil des Firms zeitlich nahezu konstant bleibt. Nur wenn das so ist, können Höhenänderungen in Massenänderungen umgerechnet werden. Wenn Schmelzwasser versickert und wieder gefriert, sinkt die Oberflächenhöhe, ohne dass Massenverluste auftreten.

In Abb. 3 sind gemessene Dichtewerte für oberflächennahe Firmschichten für fünf Probenstellen in Höhen zwischen 1000 und 1300 m dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Dichtewerte in den letzten 10 Jahren erhöht haben. Die Massenverluste, die im südlichen Grönland auftreten, sind also geringer, als es die Höhenänderungen zeigen.

3 Höhen- und Massenbestimmungen mit Satellitenmethoden

3.1 Höhen aus ICESat Laseraltimetrie

Die ICESat-Mission wurde im Zeitraum von Februar 2003 bis Oktober 2008 realisiert. Eine Bestimmung von Höhenänderungen kann am einfachsten über eine Kreuzungspunktanalyse erfolgen. Allerdings bleiben dann relativ große Gebiete ohne Information (vgl. Abb. 4). Es ist auch möglich, die lokale Topographie im Modellansatz mit zu berücksichtigen. Einen solchen Ansatz hat GROH (2016) realisiert, indem er an den Spuren Geländeneigungen geschätzt hat. Inwieweit dies möglich ist oder an Grenzen stößt, kann mit den im hier vorgestellten Projekt gewonnenen Daten verifiziert werden (vgl. vorhergehenden Abschnitt).

Werden die wiederholten Überflüge des Satelliten für die Ableitung von Höhenänderungen mit einem Ansatz, wie GROH ihn benutzt, verwendet, muss sichergestellt sein, dass keine größeren Änderungen der lokalen Oberflächenneigungen zwischen den Spuren auftreten.

Die einzelnen Bodenspuren von ICESat liegen normalerweise wenige hundert Meter, im Einzelfall mehrere Kilometer, auseinander (vgl. Abb. 5, Umgebung von Camp C10). Genaue Berechnungen von Höhenänderungen sind daher nur an den Kreuzungspunkten der Spuren oder in den Bereichen der Eiskappe, in denen die beschriebenen Wellen nicht auf-

treten, möglich. Das ist im südlichen Grönland oberhalb von 2000 m Höhe bzw. 150 km Abstand vom Eisrand der Fall.

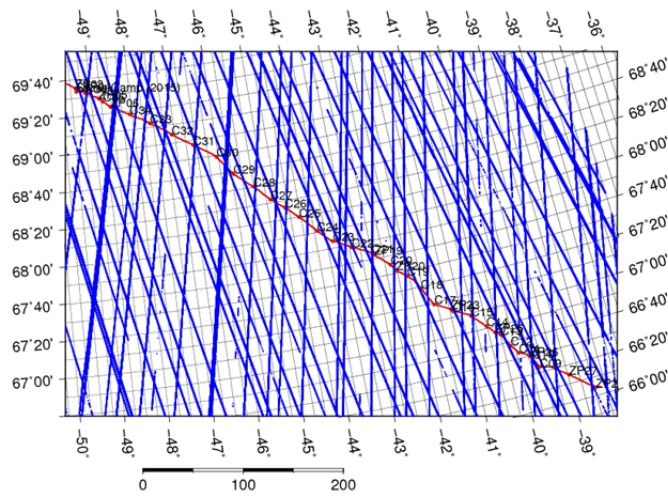


Abb. 4: ICESat Bodenspuren im Untersuchungsgebiet (blau) und Traverse (rot).

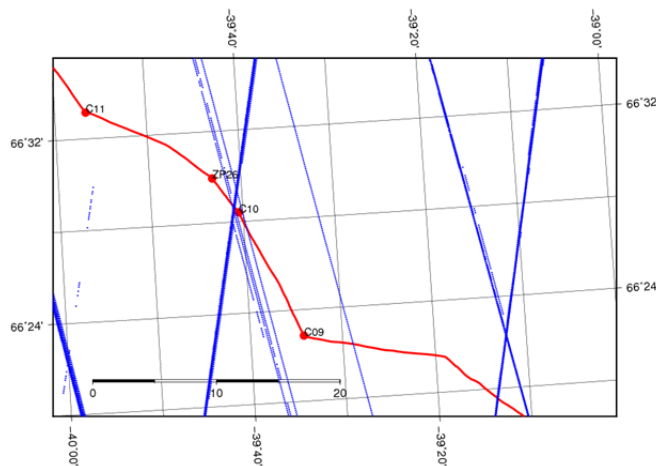


Abb. 5: ICESat Bodenspuren in der Umgebung von Camp C09 und Camp C10.

3.2 Massenänderungen aus GRACE Satellitengradiometrie

Mit der GRACE-Mission (Gravity Recovery and Climate Experiment, 2002-2016) wurden keine Höhen und Höhenänderungen bestimmt, sondern es wurde die gravitative Änderung infolge von Massenänderungen auf der Erde gemessen. Daraus können dann die Massenänderungen selbst bestimmt werden.

Solche Massenänderungen entstehen z.B. durch Grundwasserschwankungen oder die gigantischen Schmelzprozesse in Grönland oder der Antarktis. Es handelt sich also um ein

zur Altimetrie völlig alternatives Verfahren, das nicht von systematischen Effekten des Schmelzens und Wiedergefrierens in tieferen Schichten verfälscht ist. Eine Auswertung der Massenänderungen für den Grönländischen Eisschild haben GROH & HOWATH (2016) veröffentlicht welche auch online interaktiv abrufbar ist (Abb. 6).

(siehe: data1.geo.tu-dresden.de/gis_gmb/index.html)

Das Grönlandeis verliert jährlich 246 ± 15 Gt Masse, wobei eine Beschleunigung dieses negativen Trends nicht erkennbar ist (vgl. Abb. 3). Eine exponentielle Steigerung der Eisverluste Grönlands scheint sich in den Höhenänderungen zu zeigen. Die gravitativen Änderungen verlaufen dagegen, mit saisonalen Schwankungen überlagert, nahezu linear. Das bedeutet, dass es Änderungen des oberflächennahen Dichteprofiles auf nahezu der gesamten Eiskappe geben muss und bestätigt damit die eigenen Beobachtungen im Untersuchungsgebiet.

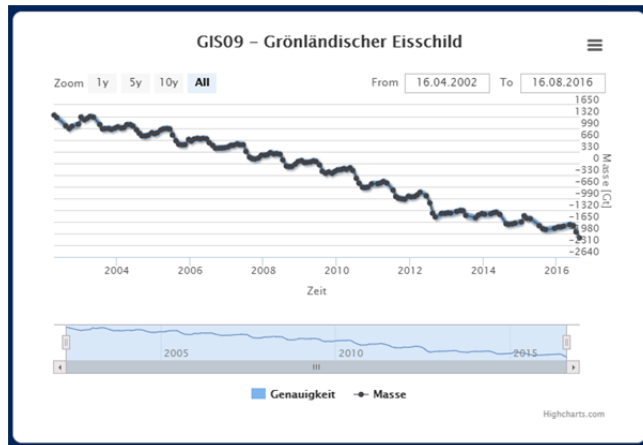


Abb. 6: Massenabnahme des Grönländischen Eisschildes aus GRACE-Daten. (Datenportal TU Dresden)

4 Ausblick

Die Umweltveränderungen in Grönland, insbesondere im Bereich der Eiskappe, vollziehen sich außerordentlich schnell. Ein Monitoring dieser Veränderungen ist vor dem Hintergrund der aktuellen Diskussionen zum Klimawandel unumgänglich. Dabei sind sowohl die aufwändigen Satellitenmissionen, als auch Bodenmessungen erforderlich.

Das vorgestellte Projekt soll daher in den kommenden Jahren fortgesetzt werden. Zusätzlich zu den bisherigen vor allem geometrischen Messungen mittels GNSS ist eine Erweiterung der Untersuchungsmethoden auf physikalische Parameter geplant. So sollen die Dichteprofile über die gesamte Eiskappe gemessen werden und auch in größere Tiefen bis zu 10 m reichen. Darüber hinaus ist der Einsatz eines Radarsystems zur Untersuchung der oberflächennahen Schichten geplant.

Die nächste Feldkampagne ist für den Sommer 2019 vorgesehen.

Literatur

- EWERT, H. (2013): Auswertung von ICESat-Laseraltimeterdaten zur Untersuchung glaziologischer Fragestellungen in polaren Gebieten. Dissertation, Technische Universität Dresden.
- GROH, A. & HORVATH, M. (2016): The method of tailored sensitivity kernels for GRACE mass change estimates. *Geophysical Research Abstracts*, 18, EGU2016-12065.
- KORTH, W., ADLER, W., HOFMANN, U., MÜNSTER, U., POLTE, F. & RÜCKAMP, M. (2008): Bestimmung von Eishöhenänderungen in Grönland. *Zeitschrift für Vermessungswesen ZfV*, Heft 3/2008.
- KORTH, W. & HOFMANN, U. (2010): Grönlandexpedition 2010, erste Ergebnisse. In: *Terra Nostra*, Schriften der Alfred-Wegener-Stiftung 2010/1, Tagungsbeiträge der 24. Internationalen Polartagung der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung, Obergurgl 2010, ISSN 0946-8978.
- KORTH, W. & HOFMANN, U. (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.
- KORTH, W., HITZIGER, T., KÜCHENMEISTER, T., HOFMANN, U. & PAWELKA, K. (2017): Klimabedingte Veränderungen des Inlandeises in Grönland. 19. Internationale geodätische Woche, Obergurgl 2017, Wichmann Verlag, Berlin, ISBN 978-3-87907-624-6, S. 164-173.
- PAWELKA, K., SEDINA, J., MATOUSKOVA, E., HLAVACOVA, I. & KORTH, W. (2018): Examples of different techniques for glaciers motion monitoring using InSAR and RPAS. *European Journal of Remote Sensing*, (in Druck).
- QUERVAIN, A. de (1912): *Quer durchs Grönlandeis. Die Expeditionen 1909 und 1912/13.* Reprint, Neue Zürcher Zeitung, Zürich, 1998.
- VOYTENKO, D., STERN, A., HOLLAND, D.M. & DIXON, T.H., (2015): Tidally driven ice speed variation at Helheim Glacier, Greenland, observed with terrestrial radar interferometry. *Journal of Glaciology*, Volume 61, Issue 226, 2015, pp. 301-308.