



Dreißig Jahre Eishöhenänderungen am Swiss Camp (Grönland)

Manfred Stober¹, Thomas Hitziger², Luisa Näke³, Johanna Heim⁴, and Jörg Hepperle¹

¹Hochschule für Technik Stuttgart, 70174 Stuttgart, Deutschland

²Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 03046 Cottbus, Deutschland

³Technische Universität von Dänemark, 2800 Lyngby, Dänemark

⁴independent researcher: 96135 Stegaurach, Deutschland

Correspondence: Manfred Stober (manfred.stober@hft-stuttgart.de)

Received: 17 April 2023 – Revised: 25 October 2023 – Accepted: 6 November 2023 – Published: 4 December 2023

Kurzfassung. Seit 1991 betreibt der Erstautor ein Projekt zur Untersuchung der Eishöhenänderung, Fließgeschwindigkeit und Deformation mittels GNSS Bodenmessungen am Swiss Camp in der Nähe der Gleichgewichtslinie im westlichen Randbereich des Grönländischen Inlandeises. Die bisherigen Daten stammen aus 12 Kampagnen im Zeitraum 1991 bis 2014, also im Durchschnitt alle zwei Jahre.

Neuerdings haben im Rahmen des Projektes „Spurensuche“ verschiedene Gruppen mit Schlitten das Grönländische Inlandeis von Ost nach West überquert und dabei auch die Oberflächenhöhen bestimmt. In den Jahren 2015 und 2021 konnte auch das Gebiet Swiss Camp mit GNSS vermessen werden. Mit deren Ergebnissen konnten nun die Höhenänderungen auf nunmehr 30 Jahre ausgedehnt werden und stellen somit ein einmaliges Langzeitprojekt dar

Vor 2014 ergab sich eine stark beschleunigte Höhenabnahme. Auch die Höhenänderungen seit 2014 bis 2021 zeigen weiterhin eine deutliche Höhenabnahme, jedoch weniger schnell als in den Jahren zuvor. Diese zeitlichen Variationen der Höhenabnahmeraten stehen im Zusammenhang mit der Lufttemperatur im Sommer, die bis etwa 2012 einem ansteigenden Trend folgte, um in den anschließenden Jahren auf etwas niedrigerem Niveau zu bleiben. Ebenso war die Albedo in den Sommermonaten nach 2012 etwas höher als zuvor, so dass beide Effekte für geringere Schmelzenergie gesorgt haben. Diese lokalen Höhenänderungen stimmen überein mit großräumigen Befunden in ganz Grönland, die mit Schwerefelddaten der satellitengestützten Mission GRACE abgeleitet wurden.

Insgesamt hat in den 30 Jahren die Eisoberfläche am Swiss Camp um etwa 20 m abgenommen, das sind ca. 1.7 % der dortigen Eismächtigkeit.

Abstract. Since 1991, the first author has been running a project to study ice height change, flow velocity and deformation using GNSS ground measurements at Swiss Camp near the equilibrium line in the western margin of the Greenland Ice Sheet. The data so far came from 12 campaigns in the period 1991 to 2014, i.e. on average every two years.

Recently, as part of the “Spurensuche” project, various groups have crossed the Greenland Ice Sheet from east to west with sleds and also determined the surface heights. In 2015 and 2021, it was also possible to measure the Swiss Camp area. The measurements in 2021 were made using kinematic GNSS at one-second intervals, which were evaluated using the Precise Point Positioning (PPP) method.

With their results, it was now possible to extend the height change to 30 years and thus form a unique long-term time series.

Before 2014, there was a strongly accelerated decrease in altitude. From 2014 to 2021 the altitude continued to decrease, but less rapidly than in the preceding years. These variations in the rate of elevation decrease are related to summer air temperature, which followed an increasing trend until about 2012 but remained at a somewhat lower level in the subsequent years. Similarly, the albedo during summer was slightly higher after 2012 than before. Both effects resulted in lower melt energy after 2012. These local elevation changes are consistent with large-scale findings over the whole of Greenland derived with gravity data from the satellite gravimetric mission GRACE.

In total, the ice surface at Swiss Camp has decreased by about 20 m in the last 30 years, which is about 1.7 % of the ice thickness there.

1 Vorgeschichte und Lage der Messgebiete

Veränderungen des grönländischen Inlandeises, insbesondere Höhen- bzw. Massenänderungen und Fließgeschwindigkeit sowie deren Beitrag zum Meeresspiegelanstieg sind wichtige Indikatoren zum Studium des Klimawandels.

Um diese Effekte zu beobachten, betreibt der Erstautor ein Langzeitprojekt auf dem westlichen Randbereich des Grönländischen Inlandeises. Es gibt zwei Messgebiete, das sogenannte „Swiss Camp“ (SWC) in einer Höhenlage von ca. 1100 m und das tiefer gelegene Gebiet „ST2“ in einer Höhe von ca. 900 m (geographische Lage siehe Abb. 1). Das Swiss Camp wurde 1991 als klimatologische Forschungsstation von Konrad (Koni) Steffen gegründet. Der Erstautor hatte damals die Chance mit dem glazial-geodätischen Forschungsprojekt zu beginnen. Das Gebiet „ST2“ wurde 2004 eingerichtet mit dem Ziel, die Untersuchungsergebnisse in verschiedenen Höhenlagen zu vergleichen. Der Name sollte an „STOBER-2“ erinnern, weil ursprünglich ein weiteres Gebiet „ST1“ geplant war, welches aber wegen der starken Spalten dort nicht realisiert werden konnte. Beide Gebiete wurden mit Pegeln vermarktet, jeweils ein Dreieck mit einem Zentralpunkt, somit 4 Pegel pro Netz. Diese Pegel wurden in der Zeit von 1991 (SWC) bzw. 2004 (ST2) bis 2014 mittels GNSS (Global Navigation Satellite System) vermessen, so dass Lage und Höhen verfügbar sind. Hierbei wurden in allen Messkampagnen sowohl an der aktuellen Lage der Pegel gemessen als auch an allen Lagen, an denen sich die Pegel zur Zeit der vorherigen Kampagnen befanden. So konnten sowohl die Fließgeschwindigkeit des Eises als auch die Höhenänderung an identischen Positionen ermittelt werden. Über die Ergebnisse 1991 bis 2014 hat der Erstverfasser bereits eine umfassende Publikation veröffentlicht (Stober und Hepperle, 2018).

Seit 2002 findet auf einer ca. 700 km langen Traverse von der Ost- zur Westküste Südgrönlands das Projekt „Spurensuche“ statt. Diese Traverse kreuzt das Messgebiet SWC. In den Jahren nach 2014 durchquerten im Rahmen des Projektes „Spurensuche“ drei Expeditionen – 2015 unter der Leitung von Wilfried Korth, 2020 unter der Leitung von Frank Polte (hier wurde das Messgebiet SWC nicht erreicht) und 2021 die Heim-Expedition – auf Skiern das Inlandeis, beginnend vom Johan Petersen Fjord im Osten zum Gletscher Eqip Sermia im Westen (siehe Korth und Hitziger, 2019; Hitziger et al., 2022). Mit auf dem Schlitten fest montiertem GNSS-Instrument wurde kinematisch jede Sekunde die dreidimensionale Position in Form der Navigationslösung in Echtzeit erfasst und gespeichert.

Ihre Route (Abb. 2) führte 2015 und 2021 auch über das Messgebiet SWC, welches 2021 durch die HEIM-Gruppe in zwei Tagen komplett vermessen wurde. Mit diesen letzten Messungen 2015 und 2021 des Gebietes SWC konnte dieses für Bodenmessungen einzigartige Langzeitprojekt auf den Zeitraum 1991 bis 2021 auf 30 Jahre verlängert werden.

2 Die Messungen und Daten am Swiss Camp 2021

Die Gruppe Heim, bestehend aus 3 Personen, überquerte das Inlandeis mit selbst gezogenen Schlitten, teilweise unterstützt vom Segeln mit Windkraft. Damit konnten Streckenleistungen bis zu ca. 100 km pro Tag erreicht werden. Auf einem Schlitten war die GNSS-Ausrüstung (Trimble R12) montiert. Die Stromversorgung erfolgte über ein Solarpanel (Abb. 3 und 4). Am Swiss Camp wurde im Prinzip ähnlich gearbeitet.

Das Punktfeld am SWC (Abb. 5) erstreckt sich über die 4 Netzpunkte (Punktnummern 106, 120, 121 und 122) mit ehemaligen Positionen der 12 Kampagnen 1991 bis 2014, somit $4 \times 12 = 48$ identische Punkte (siehe Abb. 5), die infolge der Fließbewegung des Eises von ca. 117 m a^{-1} ein Gebiet von etwa $4 \times 1 \text{ km}^2$ überstreichen.

Gemessen wurde von der HEIM-Gruppe am 30. und 31. Mai 2021 (Expeditionstagebuch 2021 bei: <https://www.facebook.com/iceploration/>, letzter Zugriff: 30.11.2023). Die Verarbeitung der GNSS-Daten erfolgte über den Positionierungsdienst Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning (CSRS-PPP) von National Resources Canada unter Verwendung des Verfahrens Precise Point Positioning (PPP). Das CSRS-PPP ist eine online-Anwendung für GNSS im Post-Processing. Bei PPP wird die atmosphärische Korrektur der Troposphäre über Modelle im Programmablauf geschätzt, während mit der ionosphären-freien Linearkombination der Trägerphasen die Position geschätzt wird. Für Mehrdeutigkeitslösungen werden zusätzliche Informationen zur Ionosphäre genutzt. Das Verfahren eignet sich besonders für GNSS-Messungen ohne eigene Referenzstation.

Zur Verfügung stehen die 3D-Positionen im Gebiet SWC der HEIM-Gruppe vom Frühjahr 2021. Im Sekundentakt gemessen, ergeben sich über alle Laufwege zu den ehemaligen Positionen der Pegel von 1991 bis 2014 aus 14 Kampagnen ca. 70 000 kinematisch gemessene 3D-Positionen und $12 \times 4 = 48$ konkret definierte Pegelpunkte in einem globalen Koordinatensystem, das durch den internationalen terrestrischen Referenzrahmen ITRF2014 mit der speziellen Form IGB14 festgelegt ist. Die erreichte Höhengenaugigkeit der Pegelstationen liegt bei 3–5 cm, abgeschätzt aus der Streuung der Höhen im Sekundentakt. Als Korrekturen wurden die geometrischen Exzentrizitäten für die Antenne des Trimble R12 über dem Schneehorizont berücksichtigt.

Zum Vergleich mit früheren Darstellungen wurden alle Punkte in ein lokales ebenes Koordinatensystem mit Nullpunkt im Pegelort 106-99 (Pegel im Jahr 1999) transformiert. Alle hier präsentierten Darstellungen beziehen sich auf dieses Koordinatensystem.

Die Höhen wurden auf den ursprünglichen Festpunkt EUREF-NO-0112 in Jakobshavn/Ilulissat bezogen, welcher 1990 während der EUREF-Nord-Kampagne installiert worden war. Der Erstautor hatte damals an der glazial-geodätischen Grönland-Expedition des Instituts für Vermessungskunde der TU Braunschweig unter der Leitung

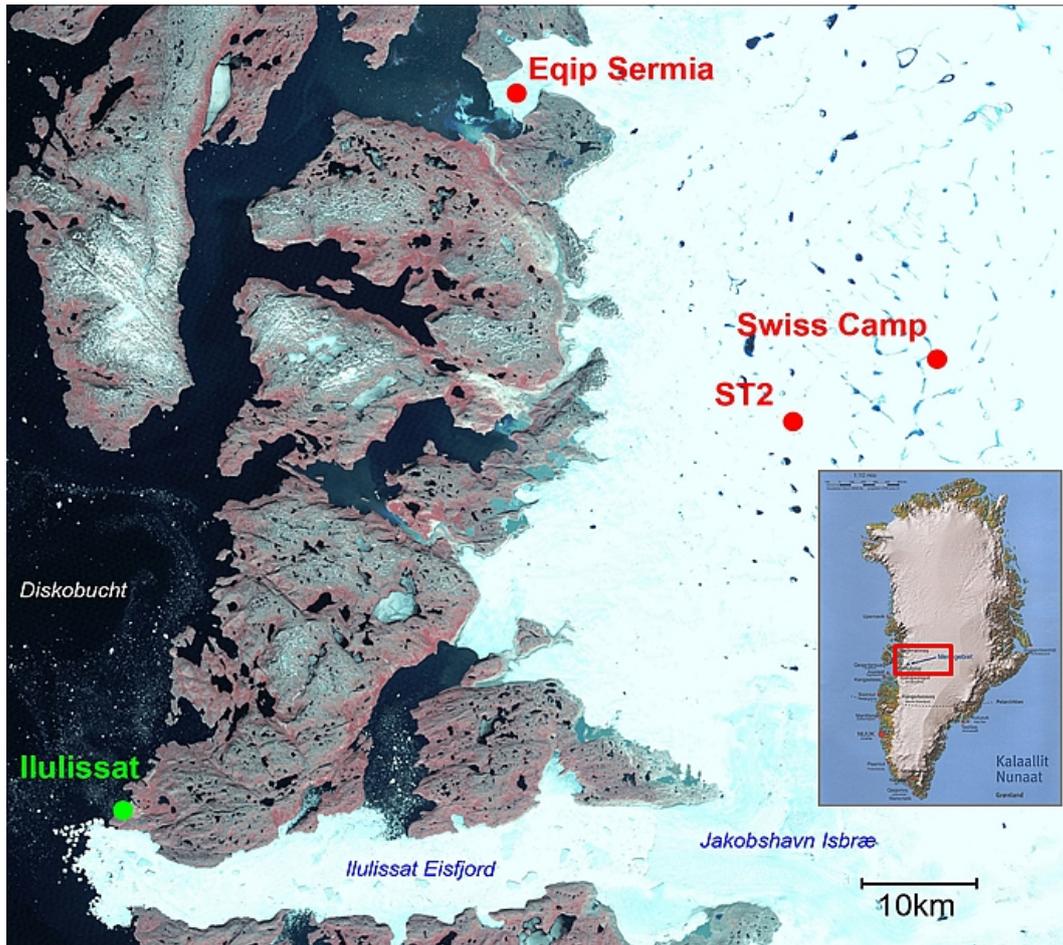


Abb. 1. Lage der Messgebiete Swiss Camp und ST2 auf dem Inlandeis in Westgrönland. Das Gebiet liegt ca. 80 km vom Kstenort Ilulissat entfernt. Die Messgebiete befinden sich im Einzugsgebiet des Jakobshavn-Gletschers (Hintergrundbild: Landsat, 7. Juli 2001).

von Prof. Dr.-Ing. Dietrich Mller teilgenommen und die Referenzstation in Jakobshavn betreut (Stober, 1991). Direkt anschließend fand vom 23.07.1990 bis 1.08.1990 eine GPS-Kampagne zur Bestimmung von Punkten im Europäischen Referenzrahmen (EUREF) statt, bei welcher der GPS-Punkt JAKOBHAVN (EUREF-NO-0112) ebenfalls durch den Verfasser beobachtet wurde. Noch vor der Auswertung des EUREF-Netzes durch das Astronomische Institut der Universität Bern wurde für uns aus 36 Sessions mit Einzelpunktlosungen die mittlere Höhe zu $72,65 \pm 2,07$ m ermittelt und für alle unsere Messungen von 1991 bis 2021 beibehalten. Diese Höhen unterscheiden sich von den aktuellen ITRF-Höhen um $\text{EUREF-ITRF} = +1,08$ m.

Das so entstandene Punktfeld ist in Abb. 6 dargestellt. Etliche Pegelpositionen wurden sogar mehrfach angelaufen. Im direkten Umfeld der Sollpositionen wurde in dichtem räumlichem Abstand gemessen. Hierdurch entstand eine sehr gute lagemäßige Näherung an den Soll-Punkt, und die Möglichkeit im Umkreis von ca. 10 m viele Geländepunkte aufzu-

nehmen und einer Hhenmittelung mit Genauigkeitsanalyse zuzuführen.

Nach Vergleich der Lage-Sollkoordinaten mit den tatsächlich im Feld angelaufenen und mittels PPP ermittelten Koordinaten ergab sich im Durchschnitt der 48 Pegelorte die erreichte Lagegenauigkeit im Feld zu 0,47 m zum Sollpunkt. In Anbetracht der unregelmäßigen Oberfläche ist diese Genauigkeit absolut ausreichend für die Höhenbestimmung.

Als weitere Reduktion wurden die Oberflchenhhen von Schnee auf den Eishorizont umgerechnet. Hierzu wurde von der HEIM-Gruppe im Feld an allen Punkten die Schneetiefe über dem Eishorizont mittels einer mechanischen Sonde gemessen. An einigen Stellen wurde zur Kontrolle ein Schneeschacht gegraben (Abb. 7).

Die Schneeauflage konnte damit über das gesamte Messgebiet ermittelt werden. Sie beträgt im Durchschnitt $1,42 \pm 0,03$ m (Einzelwert $\pm 0,19$ m) mit beträchtlichen Variationen von minimal 0,80 m bis maximal 2,10 m. Der Mittelwert ist vergleichbar mit Erfahrungen aus den Jahren 1991–1994, als ebenfalls im Mai eine ähnliche Schnee-



Abb. 2. Route der Heim-Expedition 2021. Dieselbe Traverse wurde auch von Korth 2015 gemessen (Plangrundlage: Johanna Heim).



Abb. 3. Messausrüstung für kinematisches GNSS während der Traverse 2021 (Foto: Johanna Heim).



Abb. 4. Detail der Messausrüstung am Schlitten mit Stromversorgung (Foto: Johanna Heim).

aufgabe vorhanden war. Er ist auch bestätigt durch die Oberflächen-Höhenänderung, wie sie durch die Automatische Wetterstation (AWS) des GC-Net (Greenland Climate Network) am Swiss Camp 2021 gemessen wurde (siehe Abb. 8) Näheres zum GC-Net siehe im Abschnitt 4.

Trotz der teilweise stark unterschiedlichen Schneetiefen wird zum Vergleich mit früheren Höhen im Folgenden mit den tatsächlich sondierten Werten gerechnet. Damit ergeben sich allerdings örtlich recht unterschiedliche Eishöhen. Sie können verfälscht sein, weil durch zwischenzeitliches Tauen und Wiedergefrieren Eislinsen entstehen können, welche die Tiefe des Eishorizontes vortäuschen.

Mit allen Laufwegen wurde das digitale Geländemodell in der Umgebung von Swiss Camp erstellt. Leider enthielt dieses einige grobe Datenfehler, die nicht aufgedeckt werden konnten. Stattdessen wird das Geländemodell auf der Grundlage der Pegelpositionen dargestellt (Abb. 9) Es zeigt die stetige Steigung des Gebietes oberhalb SWC mit einem tiefen Trog ähnlichen Gelände mit einer Tiefe von 6–8 m etwa an der Position des SWC um das Jahr 2011.

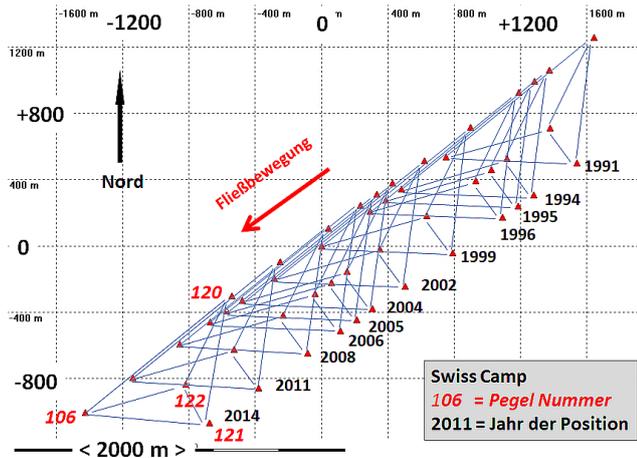


Abb. 5. Positionen des Punktfeldes (Dreieck mit Zentralpunkt) SWC von 1991 bis 2014.



Abb. 6. Laufwege am SWC 2021 mit Positionen im Sekundentakt. Lokale Koordinaten in Meter, Ursprung bei Position Pegel 106 im Jahr 1999.

3 Höhenänderungen zu früheren Kampagnen

Folgende Höhen stehen für Hhenvergleiche im Messgebiet Swiss Camp zur Verfügung:

- Höhen von Korth 2015
- Höhen von Heim 2021
- Höhen von Stober im Zeitraum 1991–2014

3.1 Höhen von Korth 2015

Nach der letzten Messung von Manfred Stober im Jahr 2014 wurde das Gebiet SWC von Wilfried Korth anlässlich einer Grnland-Traverse im Jahr 2015 wiederholt. Diese Höhen (Wilfried Korth: pers. Mitteilung) wurden Anfang September 2015, also recht spät im Jahr und nur im einzigen Geländeprofil des Pegels 106 vermessen. Die Messausrüstung war ähnlich wie 2021, nur dass die alten Punktlagen mit Garmin



Abb. 7. Messung der Schneetiefe an jedem ehemaligen Pegelort. Hier zusätzliche Kontrolle über einen Schneeschacht (Foto: Johanna Heim).

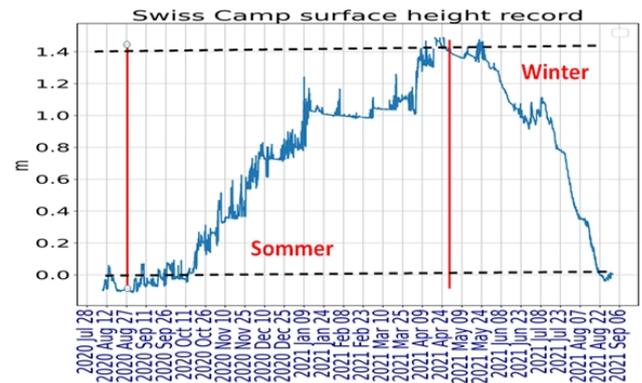


Abb. 8. Oberflchenhhennderung in den Jahren 2020/2021 am Swiss Camp (in Meter) . Die roten Linien markieren die Zeiten für Sommer- und Winterzustand der Schneeoberfläche. (Quelle: GC-Net, Bild: Jason Box, pers. Mitteilung, 2022).

hand-held Navigation aufgesucht wurden und somit nur eine Lagegenauigkeit von ca. 10 m haben. Damit und wegen der geringeren Zahl von Vergleichspunkten ist die Höhen-genauigkeit 2015 geringer als bei allen anderen Kampagnen. Dennoch dienen sie als wertvolle Ergänzung zum Verlauf der

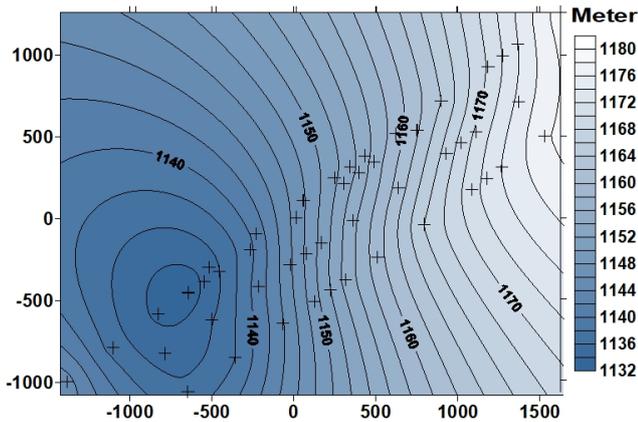


Abb. 9. Topographie der Eisoberfläche im Gebiet Swiss Camp 2021. Die Kreuzsymbole markieren die ehemaligen Pegelpositionen 1991 bis 2014. Die Höhenlinien weit außerhalb der Pegelpositionen (im NW und SO) können verfälscht sein, weil ohne Stützpunkte.

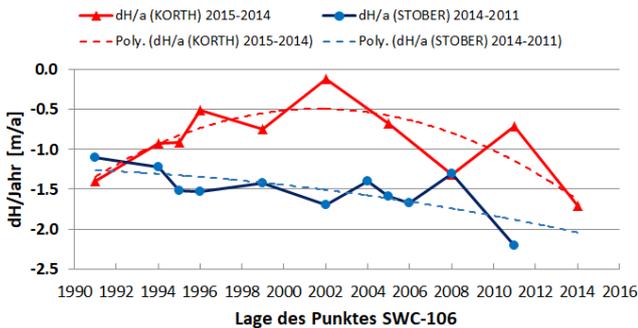


Abb. 10. Höhenänderungen 2015–2014 (rot) und 2014–2011 (blau) im Profil SWC 106. Die horizontale x -Achse bezeichnet die Position (Lage) des Pegels 106 in den verschiedenen Jahren, bedingt durch die Fließbewegung des Eises.

Höhenänderungen seit der letzten Messung von STOBER im Jahr 2014 (Stober und Hepperle, 2018).

In Abb. 10 ist gut zu erkennen, dass die Höhenänderungen von Wilfried Korth recht stark von Punkt zu Punkt variieren. Während 2014 bei STOBER die durchschnittliche Höhenänderung pro Jahr und deren Standardabweichung $-1,51 \pm 0,09 \text{ m a}^{-1}$ beträgt, sind die entsprechenden Werte bei Korth $-0,90 \pm 0,14 \text{ m a}^{-1}$. Die Streuung bei Korth ist fast doppelt so groß. Ein Polynom durch die Graphikpunkte lässt keine einheitliche Höhenänderung erkennen. Die Änderungsraten 2014–2011 hängen annähernd linear von der Position entlang der Flielinie ab (siehe angepasste ausgleichende Linie in blau in Abb. 10), mit stärker negativen Raten an der Position von 2011 (der jüngsten und damit am tiefsten liegenden Position) als an der Position von 1990.

Wegen der größeren Streuung ist dieser Effekt bei Korth (2015) nicht erkennbar.

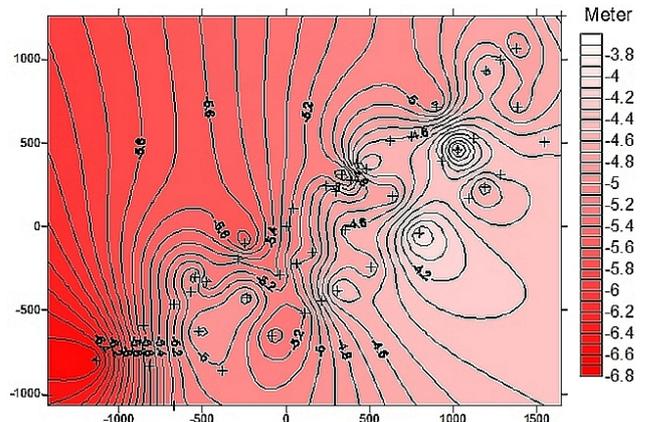


Abb. 11. Höhenänderungen Swiss Camp 2021–2014, unter Verwendung der an jeder Pegellage 2021 individuell gemessenen Eishhe unter der Schneedecke. Die Kreuzsymbole zeigen die verwendeten Pegelpositionen. Auch hier sind die Bereiche im NW und SO wegen fehlender Datenpunkte nicht gesichert.

3.2 Höhen von Heim (pers. Mitteilung, 2021)

Die Messungen von der HEIM-Gruppe erfolgten am 30. und 31. Mai 2021. In dieser Jahreszeit liegt noch eine dicke Schneedecke über dem Eis, was die Höhengenaugigkeit negativ beeinflusst. Wie erwähnt, wurde durch Sondierung eine durchschnittliche Schneehöhe im Durchschnitt $1,42 \pm 0,03 \text{ m}$ gemessen. Alle Hhenergebnisse wurden jedoch auf den individuellen lokal ermittelten Eishorizont bezogen.

Damit werden zunächst die Höhenänderung zu 2014 berechnet und in einem digitalen Hhennderungsmodell dargestellt. Wie schon wegen der teilweise stark unterschiedlichen Schneehöhen zu erwarten, zeigt die Abbildung der Höhenänderungen 2021–2014 ebenfalls große lokale Unterschiede (Abb. 11), aber insgesamt eine deutlich Abnahme. Die Höhenänderungen 2021–2014 variieren zwischen $-3,88$ und $-6,71 \text{ m}$ bei einem Durchschnittswert von $-4,93 \pm 0,57 \text{ m}$. Die entsprechenden Beträge pro Jahr lauten $-0,72 \pm 0,08 \text{ m a}^{-1}$.

3.3 Höhenänderung im Gesamtzeitraum 1991 bis 2021

In der Publikation Stober und Hepperle (2018) wurden die Ergebnisse der 12 Kampagnen von 1991 bis 2014 beschrieben. Ergänzt mit den Daten von Korth 2015 und Heim (pers. Mitteilung, 2021) ergibt sich damit eine einmalige Messreihe welche auf bodengestützten Eishöhen beruht. Abbildung 12 zeigt diese vollständigen Höhenänderungen 1991–2021. Berechnet sind die Höhenänderungen für das Gesamtgebiet SWC gemittelt aus allen früheren Pegelpositionen, wobei die Höhenänderungen zwischen 2021 und 2014 sich jeweils auf die Vorgngermessung beziehen. Damit sind die Höhenänderungen an allen Positionen gleichgewichtig. Die (geringe) Ortsabhängigkeit der Höhenänderung, wie sie in

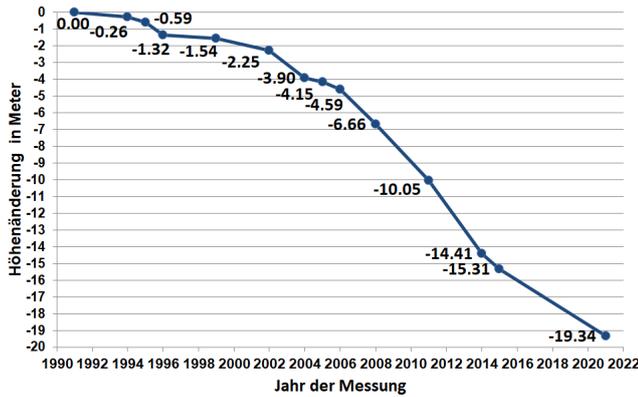


Abb. 12. Kumulierte, also aufsummierte, Eishöhenänderung im Gebiet Swiss Camp von 1991 bis 2021.

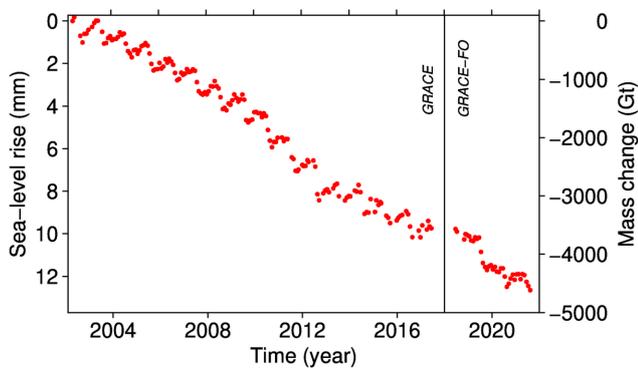


Abb. 13. Massenbilanz von Grönland und Änderung des Meeresspiegels aus Satellitendaten von GRACE bzw. GRACE-FO (Quelle: <http://polarportal.dk/en/greenland/mass-and-height-change/>, letzter Zugriff: 27.11.2023).

Abb. 10 angedeutet wurde, ist also hierbei ausgemittelt und nicht darstellbar. Festzustellen ist, dass seit 2014 die Höhenabnahme abgeschwächt ist. Sie erreicht neuerdings etwa die Situation wie 2004–2006. Dies ist erstaunlich, weil die allgemeine und in der Arktis sogar verstärkte Klimaerwärmung eher erwarten lässt, dass sich die Höhenabnahme weiter verstärkt. Allerdings ist dieser Trend exakt auch aus Satellitenbeobachtungen (GRACE, GRACE-FO) zu erkennen (siehe Abb. 13). Auch hier entspricht die Massenabnahme der letzten Jahre (ab ca. 2012) den Werten vor 2008 mit steilerem Abfall zwischen 2008 und 2012.

Betrachtet man den gesamten Grönländischen Eisschild so zeigen sowohl die beiden Datensätze aus GRACE/GRACE-FO (Abb. 13) als auch die von Sasgen et al. (2020) gezeigte Oberflächenmassenbilanz aus den Modellen MARv3.10 (Fettweis et al., 2017) und RACMO2.3p2 (Noël et al., 2018) monatlich eine beschleunigte Massenabnahme bis 2013, danach aber abgeschwächte Werte mit besonders geringem Massenverlust in den Jahren 2017 und 2018. Ursache waren zwei anomal kalte Sommer in Westgrönland. Erst 2020 findet wieder eine stärkere Abnahme statt.

Zum Vergleich mit unseren lokalen Eishöhenänderungen können die Daten von GRACE/GRACE-FO einer Aufgliederung nach Einzugsgebieten (Zwally et al., 2012) unterzogen werden (Döhne et al., 2023). Die Eismassenänderung im zutreffenden Becken Nr. 7 zeigt allerdings im Prinzip denselben Verlauf wie Gesamtgrönland (TU Dresden, https://data1.geo.tu-dresden.de/gis_gmb/index.html, letzter Zugriff: 28.11.2023).

4 Höhenänderung und meteorologische Daten

Meteorologische Daten von Grönland sind erhältlich vom Greenland Climate Network (GC-Net). Hierbei handelt es sich um ein Netz von automatischen Wetterstationen (AWS), welches ursprünglich von Konrad (Koni) Steffen am Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences (CIRES, Boulder/USA) eingerichtet wurde. Die erste Station war das ETH-CU camp 1991 (das heutige Swiss Camp). Das Netz wurde danach um etliche Stationen über ganz Grönland erweitert. In Jahr 1991 fand auch die erste geodätische Messung des Erstautors statt. Das GC-Net wird nach dem Ableben von Konrad Steffen neuerdings vom Geological Survey of Denmark and Greenland (GEUS) unter der Leitung von Jason Box in Kopenhagen betrieben (<https://eng.geus.dk/about/news/news-archive/2020/december/geus-takes-over-american-climate-stations-on-the-greenland-ice-sheet>, letzter Zugriff: 28.11.2023). Die neuen Daten werden von der Webseite PROMICE (Programme for Monitoring of the Greenland Ice Sheet & Greenland Climate Network) unter <https://www.promice.org> (letzter Zugriff: 28.11.2023) verteilt.

Die in dieser Publikation verwendeten Daten sind die Lufttemperatur. Diese Temperaturdaten vom SWC wurden dem Erstautor durch persönliche Kommunikation von Koni Steffen und Jason Box übermittelt. Abgeleitete Größen sind die pdd-Werte (Positive degree day-Werte). Der Grundgedanke ist, dass die tägliche Ablation proportional der Temperatur ist, solange diese über dem Schmelzpunkt (0°C) liegt (Braithwaite, 1995). Zur Berechnung von pdd gibt es verschiedene Methoden. Nach der ursprünglichen Definition werden die Tage im Monat mit positiven Temperaturen gezählt und daraus jahreszeitliche oder jährliche Gradtagsummen gebildet. Dabei können die positiven Temperaturen täglich stundenweise oder als Tagesmittel vorliegen und werden dann zu Monatsmitteln oder -summen zusammengefasst. Wegen dieser unterschiedlichen Summationsbereiche ist der Begriff „day/Tag“ nicht immer zutreffend. Weitere hier benutzte Daten sind Albedo-Werte, welche die Reflektivität der Schnee- und Eis-Oberfläche angeben, also das Verhältnis zwischen eingestrahelter und reflektierter Strahlung der Oberfläche. Je mehr Strahlung reflektiert wird (größere Albedo), desto kleiner ist die Schmelzenergie. Auch die Albedo-Werte stammen aus persönlichen Kontakten zu Jason Box.

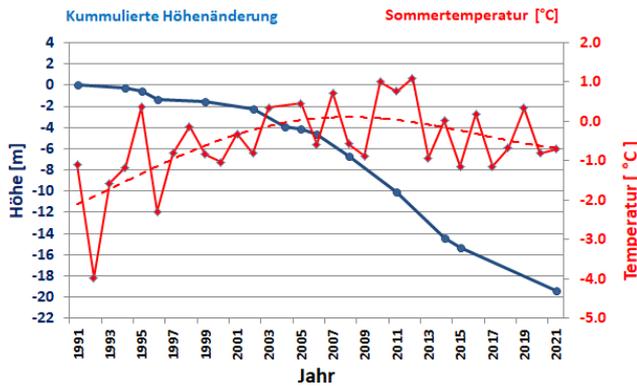


Abb. 14. Kumulierte, also aufsummierte, Höhenänderung SWC (blau) und Sommertemperaturen Juni, Juli, August (rot) (Quelle: GC-Net, pers. Mitteilung Konrad Steffen und Jason Box).

Der Verlauf der kumulierten Höhenänderungen hat nach 2014 eine abgeschwächte Höhenabnahme ergeben (vgl. Abb. 14). Dies ist mit einer Änderung der Sommertemperatur zu erklären. Denn während die Sommertemperatur im Zeitraum 1991 bis 2012 noch um $+0,094\text{ }^{\circ}\text{C a}^{-1}$ zunahm, ist sie danach um ca. $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ niedriger und bleibt fast konstant. Die Trendlinie der Temperatur gibt diese Entwicklung deutlich wieder.

Die Abhängigkeiten lassen sich durch Berechnung des Korrelationskoeffizienten zwischen Hhennderungsraten dH a^{-1} von geodätischen Kampagnen und der Sommertemperatur beschreiben. Der Korrelationskoeffizient (R) im Zeitraum 1991–2014 ergibt sich für den Zeitraum 1991–2014 zu $R = -0,34$ (negative Höhenänderung bei positiver Temperaturänderung). Im Zeitraum 2014–2021 ist die Korrelation mit $R = -0,75$ wegen nur drei Höhenwerten leider nicht aussagekräftig.

Wie eingangs dieses Kapitels schon erwähnt, können auch pdd-Werte ein Maß für den klimatischen Einfluss auf Ablation und somit Höhenänderungen sein. Eine entsprechende Darstellung für Daten jeweils zwischen geodätischen Kampagnen zeigt Abb. 15, wo der Verlauf von Lufttemperatur, Summe pdd a^{-1} und Höhenänderung zwischen Kampagnen pro Jahr gemeinsam dargestellt sind. Niedrigere Temperatur (rot) sowie pdd (grün) korrelieren nach 2014 mit Abschwächung der negativen Höhenänderung (blau). Im Zeitraum ab 2014 ist die Temperatur niedriger und deshalb die Höhenabnahme pro Jahr auch geringer.

Einen detaillierten Einblick in den Verlauf von Monatsmittelwerten für pdd und Sommertemperatur für den Zeitraum 2010–2021 zeigt Abb. 16. Positive Lufttemperaturen kommen im Monatsmittel (rot in Abb. 16) nur an wenigen Monaten im Jahr vor, meist Juni, Juli und August. Hohe tageweise berechnete Positive Summen von pdd-Werten (blau in Abb. 16) sind dagegen häufiger und können auch an einzelnen Tagen und Monaten zum Schmelzen beitragen. Diese Entwicklung ist ab 2010 in Abb. 16 dargestellt und ermög-

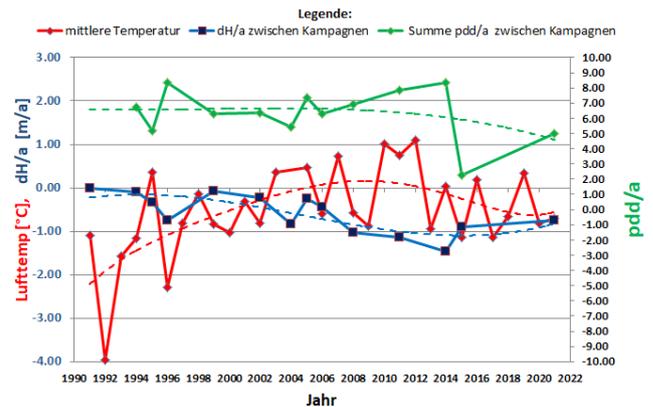


Abb. 15. Meteorologische Daten und Hhennderungsraten zwischen geodätischen Kampagnen am Swiss Camp 1991–2021. Die Lufttemperaturen beziehen sich auf das Mittel der Sommermonate Juni–Juli–August. Die gestrichelten Linien stellen ausgleichende Polynome dar (Quelle: Meteo-Daten: GC-Net, pers. Mitteilung Konrad Steffen und Jason Box).

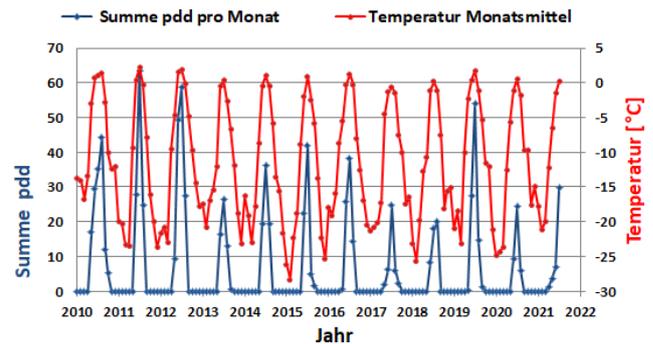


Abb. 16. Vergleich Lufttemperatur und pdd im Zeitraum 2010–2021 (Quelle: GC-Net, pers. Mitteilung Jason Box).

licht Vergleiche zur Höhenabnahme vor und nach 2014, was als Wendepunkt der Höhenentwicklung festgestellt wurde.

Aus Abb. 16 ist abzulesen, dass die Summe pdd aus Tageswerten (blaue Kurve) vor 2013 höhere Werte aufweist als danach. Mit Ausnahme des warmen Jahres 2019 liegen alle pdd-Werte tiefer als vor 2013. Somit bestätigt sich auch aus pdd die geringere Schmelzenergie im Zeitraum 2014–2021, die zu einer Verringerung der Höhenabnahme geführt hat.

Besonders deutlich wird der Zusammenhang, wenn die pdd-Werte jeweils über die Zeiträume zwischen den Messkampagnen gemittelt werden (vgl. Abb. 15). Bis zu dem 2014 endenden Zeitraum waren die Werte deutlich größer als in den Zeiträumen bis 2015 und bis 2021.

Die Schmelzrate wird außer der Temperatur stark durch die Albedo der Schnee- bzw. Eisoberfläche beeinflusst. Vor allem in den Sommermonaten Juni, Juli und August sind diese Werte im Jahresverlauf am niedrigsten. Albedo-Werte liegen im Zeitraum 2000 bis 2021 vor (Abb. 17). In den Jahren 2000 bis 2012 ist die Albedo im Mittel etwas niedriger

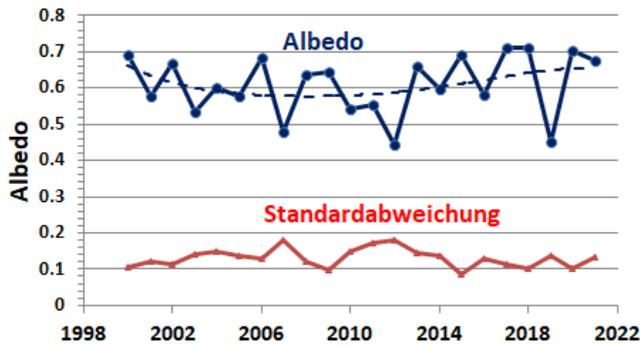


Abb. 17. Albedo-Werte am Swiss Camp in der Zeit 2000 bis 2021. Dargestellt sind die Mittelwerte aus den Sommermonaten Juni, Juli und August. Die Standardabweichung stellt die Variabilität innerhalb der Mittelwerte dar (Quelle GC-Net, Jason Box, pers. Mitteilung, 2021).

als in den folgenden Jahren. Auch dies spricht für eine abgeschwächte Höhenabnahme in den Jahren nach 2012.

5 Zusammenfassung

Während der Überquerung von Grnland in den Jahren 2015 durch Wilfried Korth und vor allem 2021 durch die HEIM-Gruppe konnten die bisherigen 12 Messungen von Manfred Stober 1991–2014 um eine beträchtliche Zeitspanne verlängert werden. Die Eisoberflchenhhen liegen im Gebiet Swiss Camp nunmehr im Gesamtzeitraum 1991 bis 2021 vor. Es handelt sich damit um ein einzigartiges Material an langfristigen Bodenmessungen. Zusammen mit meteorologischen Daten (Lufttemperatur, Albedo) können damit die Einflüsse des Klimawandels auf das grönländische Inlandeis beobachtet werden. Vor allem im Zeitabschnitt von 1991 bis 2014 zeigt sich eine stetige und beschleunigte Höhenabnahme. Danach ist die Höhenabnahme zwar immer noch deutlich sichtbar, jedoch weniger stark aufgrund mäßiger Temperaturen und stärkerer Albedo.

Höhenänderungen sind nicht nur auf klimatische Faktoren zurück zu führen. Dynamische Effekte, wie die Fließgeschwindigkeit und die Verformung der Eisoberfläche (Strain) beeinflussen ebenfalls das Hhenverhalten. Leider wurden ab 2014 (Stober und Hepperle, 2018) die Pegelstandorte nicht mehr mit Pegeln vermarktet. Deshalb gibt es seit 2014 keine bodengestützte Daten über die Eisdynamik, so dass dieser Effekt nicht untersucht werden kann.

Datenverfügbarkeit. Die Daten bis 2014 wurden bereits in die Datenbank PANGAEA beim Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) eingepflegt: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.900785> (Stober, 2019) bzw. https://store.pangaea.de/Publications/Stober_2019/ST2_SWISS_SWC_data.zip (letzter Zugriff: 28.11.2023).

Gleichermaßen wurden die neuen Daten dort hinterlegt.

Autor:innenmitwirkung. MS ist seit 1991 der Leiter dieses glazial-geodätischen Projektes am Swiss Camp. Alle Vergleiche mit älteren Daten sowie die textliche Ausarbeitung stammen von ihm.

TH war für die Bereitstellung der GNSS-Technologie zuständig. Er hat mit seiner Erfahrung aus früheren Traversen viel zum Erfolg der HEIM-Expedition 2021 beigetragen.

LN hat die Umsetzung der Rohdaten 2021 mittels des Precise Point Positioning Service und die 3D-Koordinaten in ITRF bereitgestellt.

JoH war während der Expedition 2021 für die Datenerfassung zuständig. Zusammen mit ihren Familienmitgliedern Ruppert und Franziska Heim führten sie zu dritt die Überquerung des Inlandeises als Gruppe erfolgreich durch.

JÄH (HFT Stuttgart) hat die ITRF-Koordinaten in das lokale ebene Koordinatensystem transformiert.

Alle Graphiken (außer Abb. 8) wurden vom Erstautor angefertigt.

Interessenkonflikt. Die Autor:innen erklären, dass kein Interessenkonflikt besteht.

Haftungsausschluss. Anmerkung des Verlags: Copernicus Publications bleibt in Bezug auf gerichtliche Ansprüche in veröffentlichten Karten und institutionellen Zugehörigkeiten neutral.

Danksagung. Die Firma Allterra Deutschland stellte leihweise die GNSS-Ausrüstung zur Verfügung. Die Kontakte zur Firma Allterra gehen zurück auf Manfred Stober zum früheren Grnland-Mitarbeiter Steffen Lutz bei Firma Trimble.

Wir danken den beiden Gutachtern Martin Horwath und Christof Vlksen für die wertvollen Hinweise, die viel zur besseren Darstellung beigetragen haben.

Weiter danken wir Anja Wendt für die Mithilfe bei der redaktionellen Bearbeitung.

Darüber hinaus danken wir allen Spendern und Unterstützern des Vereins iceploration e.V. für ihre Zuwendungen und finanziellen Beiträge.

Begutachtung. This paper was edited by Anja Wendt and reviewed by Martin Horwath and Christof Vlksen.

Literatur

- Braithwaite, R.: Positive degree-day factors for ablation on the Greenland ice sheet studied by energy-balance modelling, *J. Glaciol.*, 41, 153–160, <https://doi.org/10.3189/S0022143000017846>, 1995.
- Dhne, T., Horwath, M., Groh, A., und Buchta, E.: The sensitivity kernel perspective on GRACE mass change estimates, *J. Geodesy*, 97, 11, <https://doi.org/10.1007/s00190-022-01697-8>, 2023.
- Fettweis, X., Box, J. E., Agosta, C., Amory, C., Kittel, C., Lang, C., van As, D., Machguth, H., and Galle, H.: Reconstructions of the 1900–2015 Greenland ice sheet surface mass balance using the

- regional climate MAR model, *The Cryosphere*, 11, 1015–1033, <https://doi.org/10.5194/tc-11-1015-2017>, 2017.
- Heim, J., Heim, F., und Heim, R.: Projekt Grnlanddurchquerung 2021, <https://iceploration.de/category/gronlanddurchquerung/heim-expedition> (letzter Zugriff: 28.11.2023), 2021.
- Hitziger, T., Nke, L., und Pavelka, K.: Ice Elevation Change Based on GNSS Measurements along the Korth-Traverse in Southern Greenland, *Appl. Sci.*, 12, 12066, <https://doi.org/10.3390/app122312066>, 2022.
- Korth, W. und Hitziger, T.: Geodatisches Monitoring des Klimawandels in Grönland, *FORUM – Zeitschrift des Bundes der ffentlich bestellten Vermessungsingenieure e. V.*, 45, 28–37, ISSN 0342-6165, 2019.
- Nol, B., van de Berg, W. J., van Wessem, J. M., van Meijgaard, E., van As, D., Lenaerts, J. T. M., Lhermitte, S., Kuipers Munneke, P., Smeets, C. J. P. P., van Uft, L. H., van de Wal, R. S. W., and van den Broeke, M. R.: Modelling the climate and surface mass balance of polar ice sheets using RACMO2 – Part 1: Greenland (1958–2016), *The Cryosphere*, 12, 811–831, <https://doi.org/10.5194/tc-12-811-2018>, 2018.
- Sasgen, I., Wouters, B., Gardner, A.S., King, M.D., Tedesco, M., Landerer, F. W., Dahle, C., Save, H., und Fettweis, X.: Return to rapid ice loss in Greenland and record loss in 2019 detected by the GRACE-FO satellites, *Commun. Earth Environ.*, 1, 8, <https://doi.org/10.1038/s43247-020-0010-1>, 2020.
- Stober, M.: Hhenbestimmung im westlichen Randbereich des grnlndischen Inlandeises, *Polarforschung*, 61, 163–170, 1991.
- Stober, M.: Glacial-geodetic long-term (1991–2014) measurements on elevation change, ice surface deformation, and ice flow velocity in the Swiss Camp area on the Greenland ice sheet, PANGAEA [data set], <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.900785>, 2019.
- Stober, M. und Hepperle, J.: Glacial-geodetic long-term study on mass balance and ice dynamics near the equilibrium line of the Greenland ice sheet, *Polarforschung*, 88, 99–123, <https://doi.org/10.2312/polarforschung.88.2.99>, 2018.
- Zwally, H., Giovinetto, M., Beckley, M., and Saba, J.: Antarctic and Greenland drainage systems, NASA, Goddard Space Flight Center, Cryospheric Sciences Laboratory, http://icesat4.gsfc.nasa.gov/cryo_data/ant_grn_drainage_systems.php (letzter Zugriff: 27.11.2023), 2012.