

Wie Schneemessungen auf dem Grossen Aletschgletscher helfen, weltweite Satellitendaten besser zu verstehen

Die Satellitenfernerkundung ist ein wichtiges Instrument, um global Gletscheränderungen zu beobachten und besser zu verstehen. Die TanDEM-X Satellitenmission liefert hochaufgelöste, digitale Höhenmodelle, welche benötigt werden, um die Höhen- und Volumenänderung der Gletscher zu bestimmen. Allerdings kann das Radarsignal in die Schneeoberfläche des Gletschers eindringen, was einen Fehler in den resultierenden Daten verursachen kann. Die aktuelle Studie schätzt das Ausmass der Radarpenetration ab, indem Feldmessungen auf dem Grossen Aletschgletscher mit zeitgleichen Aufnahmen von TanDEM-X und optischen Satellitendaten verglichen werden. Dieser Vergleich zeigt, wo und weshalb das Radarsignal in die Schneedecke eindringt. Die Feldarbeiten umfassten Schneedichtemessungen sowie differentielle GNSS- und Bodenradarmessungen im März 2021. Die Resultate dieser Studie helfen, Abschätzungen der globalen Gletscheränderungen mittels TanDEM-X Daten zu verbessern.

La télédétection par satellite est un outil important pour observer globalement et mieux comprendre les changements des glaciers. La mission satellitaire TanDEM-X fournit des modèles altimétriques numériques à haute résolution nécessaires pour déterminer les variations d'altitudes et volumétriques des glaciers. Toutefois le signal radar peut pénétrer la couche de neige ce qui peut induire des erreurs dans les données récoltées. La présente étude évalue l'ampleur de la pénétration radar en comparant des mesures terrestres sur le Glacier d'Aletsch avec des prises de vues simultanées de TanDEM-X et des données optiques satellitaires. Cette comparaison montre où et pourquoi le signal radar pénètre la couche de neige. Les travaux de terrain ont compris des mesures de densité de neige ainsi que des mesures différentielles GNSS et radar de surface du sol en mars 2021. Les résultats de cette étude aident à améliorer les évaluations des changements globaux des glaciers au moyen de données TanDEM-X.

Il telerilevamento satellitare rappresenta uno strumento fondamentale per l'osservazione e la migliore comprensione dei cambiamenti globali nei ghiacciai. La missione dei satelliti TanDEM-X fornisce modelli altimetrici digitali ad alta risoluzione che vengono utilizzati per determinare i cambiamenti legati all'altezza e al volume dei ghiacciai. Tuttavia, il segnale radar penetra nella superficie della neve del ghiacciaio e questo può generare un errore dei dati ottenuti. Questo progetto analizza l'entità della penetrazione del radar, confrontando le misure sul terreno del grande ghiacciaio dell'Aletsch con le riprese in contemporanea di TanDEM-X e i dati dei satelliti ottici. Questo confronto illustra dove e perché il segnale radar penetra nella coltre nevosa. Le misurazioni sul terreno del marzo 2021 hanno preso in considerazione le misurazioni dello spessore del manto nevoso, le misurazioni differenziali GNSS e quelle con il georadar. I risultati di questo studio aiuteranno a migliorare le stime dei cambiamenti globali dei ghiacciai tramite i dati TanDEM-X.

J. Bannwart

Einleitung

Gletscher auf der ganzen Welt schmelzen rasant, und es wird erwartet, dass sich dieser Trend in Zukunft fortsetzen wird, sogar unabhängig von den globalen Temperaturänderungen. Denn die derzeitigen Gletscherausdehnungen stehen nicht mit den aktuellen klimatischen Bedingungen im Einklang [1, 2]. Seit einigen Jahren ist es möglich, mittels der Satellitenfernerkundung Gletscheränderungen grossräumig zu beobachten und das Ausmass besser abzuschätzen. Bei der sogenannten geodätischen Methode werden digitale Höhenmodellen (DHMs) von mindestens zwei Zeitpunkten voneinander abgezogen. Dadurch können Höhen-, Volumen- und Massenänderungen der Gletscher sowie der entsprechende Beitrag zum Meeresspiegelanstieg bestimmt werden. Die DHMs der Radarsatellitenmission TanDEM-X (**Terra SAR-X-Add-on for Digital Elevation Measurements**, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) liefern ein hochgenaues, dreidimensionales Abbild der Erde [3]. Somit haben diese Daten das Potenzial, globale Gletscheränderungen zu erfassen. TanDEM-X ist eine deutsche Zwillingsatellitenmission, die mit Radargeräten und der Methodik der Radarinterferometrie die Erdoberfläche abtastet. Allerdings kommt es bei der Verwendung von TanDEM-X-Daten für die Beobachtung von Gletscheränderungen zu Ungenauigkeiten: Je nach Beschaffenheit der Schneeoberfläche kann das Radarsignal (X-Band) bis zu mehreren Metern in die Schneeoberfläche eindringen, was zu einer Verschiebung der gemessenen gegenüber der realen Höhe führt [4, 5]. Dies sollte bei der Verwendung von TanDEM-X DHMs berücksichtigt werden, um systematische Fehler zu verhindern.

In einer Studie, welche Teil meiner Doktorarbeit ist, werden TanDEM-X-Fernerkundungsdaten mit DHMs von hochauflösenden, optischen Satellitendaten sowie mit Feldmessungen vom Grossen

Aletschgletscher verglichen. Damit soll das Ausmass der Radarpenetration in die Gletscheroberfläche zu einem bestimmten Zeitpunkt abgeschätzt und so das Verständnis der zugrundeliegenden Prozesse verbessert werden.

Methoden

Im Grunde möchten wir die reale Oberfläche des Grossen Aletschgletschers genau erfassen und diese mit der vom TanDEM-X-Satelliten gemessenen Oberfläche vergleichen, um die Eindringtiefe des Radarsignals zu identifizieren. Differentielle GNSS (DGNSS, global navigation satellite system) Messungen im Feld, als auch ein hochaufgelöstes DHM vom optischen Satelliten Pléiades (keine Eindringung des Signals in die Oberfläche) [6], stellen die reale Oberfläche sehr genau dar. Durch Messungen der Schneestruktur (z. B. Schichten, Dichte etc.) wird versucht zu erklären, welche Schneeeigenschaften das Eindringen des Signals begünstigen oder es reflektieren. Neben punktuellen Messungen in Schneeschächten und Schneekernbohrungen kam zusätzlich ein Bodenradar (engl. Ground Penetrating Radar, GPR) zum Einsatz, um verschiedene vertikale Schneeschichten aufgrund von Schneedichteänderungen entlang eines horizontalen Profils sichtbar zu machen.

Da die Schneestruktur räumlich und zeitlich stark variiert, gehen ich davon aus, dass auch dieser Effekt räumlich und zeitlich stark variieren kann. Daher war es wichtig, die Feldkampagne zeitgleich mit den Aufnahmen beider Satelliten (TanDEM-X und Pléiades) durchzuführen. Zudem wurde ein Ort benötigt mit Winterbedingungen, da Eis und Schneeschmelze das Eindringen des Radarsignals verhindert.

Feldmessungen

In einer früheren Studie haben wir mittels eines TanDEM-X DHMs die Dickenänderung von ca. 1500 Gletschern in Grönland berechnet [7]. Um bei dieser Studie anzuschliessen, war der ursprüngliche Plan, diese Studie und die Feldkampagne in



Abb. 1: Bohrung und Analyse eines Schneekerns bis 9 m Tiefe auf dem Ewigschneefeld. Alle 20 cm wurden Schneedichte und Temperatur bestimmt (Foto: M. Zemp).

Grönland durchzuführen. Allerdings wurde die Feldarbeit durch die COVID-19-Pandemie verunmöglicht. Glücklicherweise fanden wir mit dem Grossen Aletschgletscher eine angemessene Alternative, um diese Studie dennoch durchführen zu können.

Ende März 2021 fand somit die Feldkampagne auf dem Grossen Aletschgletscher statt: Während vier Tagen haben meine Kollegen und ich die verschiedenen Feldmessungen durchgeführt, während die beiden Satelliten innerhalb von 24 Stunden das Gebiet ebenfalls erfasst haben. Dank perfekten Wetterbedingungen konnten alle Messungen wie geplant durchgeführt werden, bestehend aus zwei Schneeschächten von ca. 3 m Tiefe, vier Schneekernbohrungen bis zu 9 m Tiefe sowie mehrere Kilometer lange GPR und DGNSS Profile (Abb. 1–3). Die Abbildung 4 visualisiert die Lage der verschiedenen Messungen und zeigt zudem einen Ausschnitt des am 31. März 2021 aufgenommenen Pléiades-Stereobildes, auf dem erkennbar ist, wie wir gerade einen der beiden Schneeschächte graben. Um weder Eis noch Schmelzbedingungen vorzufinden, fanden alle Messungen im Akkumulationsgebiet des Gletschers zwischen 3300 und 3600 Metern über Meer statt, was die Messungen zu physisch anstrengender Arbeit

machte. Umso dankbarer waren wir, dass wir in der SAC Hütte «Mönchsjoehütte» die Abende und Nächte verbringen konnten, wo wir vom gastfreundlichen Hütten- team bewirtet und logistisch unterstützt wurden.

Zu Feldarbeiten gehört auch das Thema Sicherheit, welches immer an oberster



Abb. 2: Schneeschacht, 3 m tief, nahe des Jungfrauochs. Alle 20 cm wurden Schneedichte und Temperatur bestimmt. Dies ist im Vergleich zu den Bohrungen viel aufwändiger, jedoch lassen sich Schichten im Schnee besser identifizieren (Foto: M. Zemp).



Abb. 3: Mit einem Schlitten werden die DGNSS-Antenne und das GPR über die Gletscheroberfläche gezogen. In der Mitte des Bildes ist eine Akkumulationsstange abgebildet, welche dort für andere Messzwecke permanent installiert ist (Foto: J. Schindler).

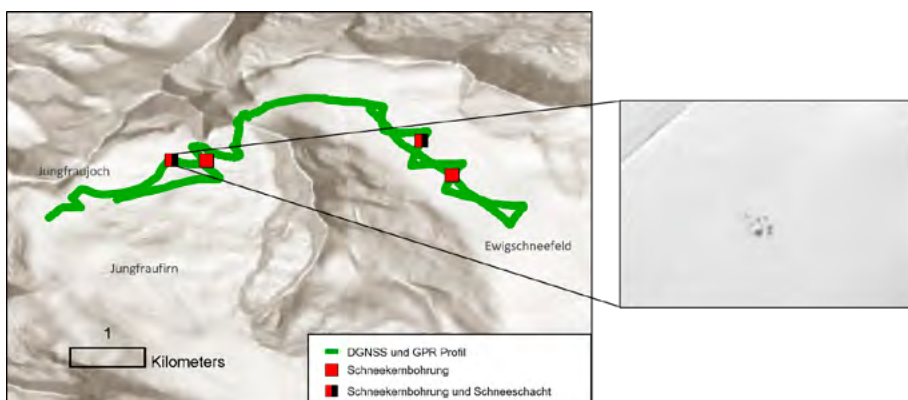


Abb. 4: Übersicht der Messungen auf dem Akkumulationsgebiet des Grossen Aletschgletschers. Das Bild rechts zeigt einen Ausschnitt des Pléiades Stereobildes, auf dem zu erkennen ist, wie wir gerade den Schneeschacht graben (Quelle: © CNES 2021, Distribution Airbus D&S).

Stelle steht. Die grössten Risiken im Untersuchungsgebiet stellen Gletscherspalten sowie mögliche Eisabbrüche von der Südseite des Mönchs dar. Diese Risiken liessen sich jedoch minimieren mit Anseilen, Sondieren und grossräumigem Meiden von Gefahrenzonen (sichtbare Gletscherspalten, Eisabbruchstellen). Zudem gehörte auch ein COVID-Schutzkonzept dazu, welches Schnelltests für alle Beteiligten sowie das Einhalten des Schutzkonzeptes der SAC Hütte beinhaltet hat.

Datenverarbeitung, -analyse und erste Resultate

Nach der Feldkampagne begann die eigentliche Arbeit: Die Daten aus dem Feld müssen nachbearbeitet und zusammengetragen werden. Die Satellitenaufnahmen mussten vom zuständigen Institut zuerst verarbeitet und das finale DHM produziert werden. Im Falle vom TANDEM-X DHM dauerte dies mehrere Wochen, da der Satellit die Daten an die

Bodenstation in O'Higgins, Antarktis, geschickt hat, welche dann auf physischen Tapes zum Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Verarbeitung gelangen mussten, bevor dann schlussendlich das DHM produziert werden konnte.

Ein wichtiger erster Schritt beim Vergleichen von zwei oder mehr DHMs des gleichen Erdoberflächenausschnitts, ist die sogenannte Co-Registrierung. Dabei werden potenzielle horizontale und vertikale Verschiebungen der beiden Höhenmodelle gegeneinander behoben [8]. Denn die Höhenmodelle müssen in X, Y, und Z-Richtung genau gleich positioniert und ausgerichtet sein. Für diesen Verarbeitungsschritt muss in unserem Fall schnee- und eisfreies, stabiles Gelände rund um den Gletscher lokalisiert werden. Da unser Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt der Aufnahme aber grösstenteils mit Schnee bedeckt war, ist dies nicht ganz trivial und daher ist die Co-Registrierung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig abgeschlossen. Würde man die DHMs ohne Co-Registrierung voneinander subtrahieren, wären die Unterschiede zwischen den beiden Höhenmodellen zumindest teilweise verursacht durch eine Verschiebung der Höhenmodelle gegeneinander und nicht durch die Radarpenetration. Um diesen Fehler zu beheben und die Unterschiede ausschliesslich aufgrund der Radarpenetration zu identifizieren, ist dieser Schritt der Co-Registrierung äusserst wichtig und unerlässlich. Erst danach können die DHMs subtrahiert, mit den Feldmessungen kombiniert und analysiert werden. Das finale Differenzbild der beiden Höhenmodelle zeigt uns dann, wo und wie tief das Radarsignal in die Gletscheroberfläche eindringt.

Als nächsten Schritt kann man die Differenz der DHMs ($\hat{=}$ Eindringtiefe des Radarsignals) zum Beispiel entlang des GPR Profils extrahieren. Diese Eindringtiefe kann dann über das entsprechende GPR Profil gelegt werden. Abbildung 4 zeigt ein GRP Profil, welches die unterschiedlichen Reflektoren in der Tiefe (Y-Achse) in der Schneedecke in Laufrichtung (X-Ach-

se) zeigt. Diese Reflektoren widerspiegeln Schneeschichten mit unterschiedlicher Schneedichte. In Kombination mit den Dichtemessungen von den beiden Schneeschichten und den vier Schneekernbohrungen kann man herausfinden, ob die Schneedichte die Radarpenetration erklären kann. Im Idealfall kann man schlussendlich aussagen, bei welcher Schneedichte das Radarsignal reflektiert wird.

Ausblick und Fazit

Die Schweiz mit ihren Gletschern, wie dem Grossen Aletschgletscher, bietet hervorragende Möglichkeiten wissenschaftliche Fragen zu untersuchen, welche wie hier Fernerkundung, Schnee- und Gletscherkunde vereinen und nicht nur für die Schweiz, sondern für die ganze Welt relevant sind. Dennoch, die Gewinnung, Verarbeitung und Analyse von so vielen verschiedenen Arten von Daten ist oft anstrengend, anspruchsvoll und benötigt einige Zeit. Zudem widerspiegeln diese Messungen die Gegebenheiten zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort. Gerade das Medium Schnee ist räumlich und zeitlich sehr variabel. Daher wird es nötig sein, solche Analysen räumlich (z. B. in Polregionen, in maritimen Klimata etc.) und zeitlich (Sommer, Herbst) auszudehnen, um die Repräsentativität zu erhöhen.

Ungeachtet dessen, die im Rahmen dieser Studie erhobenen Feld- und Satellitendaten haben das Potenzial, einzigartige Informationen über die Radarpenetration

zu liefern, sodass die Abschätzungen der globalen Gletscherveränderungen mittels TanDEM-X Daten noch genauer werden. Die Gletscherforschung in der Schweiz kann hier dank der hervorragenden Infrastruktur, der verfügbaren Daten und der guten Zusammenarbeit der Universitäten einen wichtigen Beitrag zur globalen Erdbeobachtung leisten.

Danksagung

Diese Feldarbeit und somit auch diese Studie war und ist nur möglich dank den vielen HelferInnen im Feld, der Unterstützung unter anderem bezüglich der Messinstrumente, der Daten, der Wahl des Untersuchungsgebietes etc. sowie dank der finanziellen Unterstützung. Daher möchte ich mich ganz herzlich bei den vielen Personen und Institutionen bedanken, welche mich bis zum jetzigen Punkt bei dieser Studie unterstützt haben (alphabetische Reihenfolge): A. Bauder, E. Bertier, Y. Bühler, P. Brotzer, T. Busche, I. Dussailant, D. Floricioiu, A. Kneib-Walter, L. Krieger, S. Leinss, G. Leysinger-Vieli, H. Machguth, E. Meier, K. Naegeli, S. Nussbaumer, L. Piermattei, C. Rössli, Y. Roulet, J. Schindler, A. Vieli, D. Wasser, M. Zemp, die Internationale Stiftung Hochalpine Forschungsstationen Jungfrauoch und Gornegrat (HFSJG), die Jungfrauochbahn, die Schweizerische Gesellschaft für Schnee, Eis und Permafrost (SEP) sowie das Swiss Polar Institute (SPI) und BNP Paribas Swiss Foundation.

Literatur:

- [1] Marzeion, B., Kaser, G., Maussion, F., & Champollion, N. (2018). Limited influence of climate change mitigation on short-term glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(4), 305–308.
- [2] Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., Barandun, M., Machguth, H., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Thomson, L., Paul, F., Maussion, F., Kutuzov, S. & Cogley, J. G. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382–386.
- [3] Bartusch, M., Miller D. & Zink, M. (2010). TanDEM-X: Mission Overview and Status. 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 1–4.
- [4] Zhao, J., & Floricioiu, D. (2017). The penetration effects on TanDEM-X elevation using the GNSS and laser altimetry measurements in Antarctica. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42(W7), 1593–1600.
- [5] Lambrecht, A., Mayer, C., Wendt, A., Floricioiu, D., & Völksen, C. (2018). Elevation change of Fedchenko Glacier, Pamir Mountains, from GNSS field measurements and TanDEM-X elevation models, with a focus on the upper glacier. *Journal of Glaciology*, 64(246), 637–648.
- [6] Berthier, E., Vincent, C., Magnússon, E., Gunnlaugsson, Á. Þ., Pitte, P., Le Meur, E., Masiokas, M., Ruiz, L., Pálsson, F., Belart, J. M. C., & Wagnon, P. (2014). Glacier topography and elevation changes derived from Pléiades sub-meter stereo images, *The Cryosphere*, 8, 2275–2291.
- [7] Huber, J., McNabb, R., & Zemp, M. (2020). Elevation Changes of West-Central Greenland Glaciers From 1985 to 2012 From Remote Sensing. *Frontiers in Earth Science*, 8, 35.
- [8] Nuth, C. & Kääb, A. (2011). Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change, *The Cryosphere*, 5, 271–290.

Jacqueline Bannwart
 Universität Zürich
 Geographisches Institut
 Winterthurerstrasse 190
 CH-8057 Zürich
 jacqueline.bannwart@geo.uzh.ch

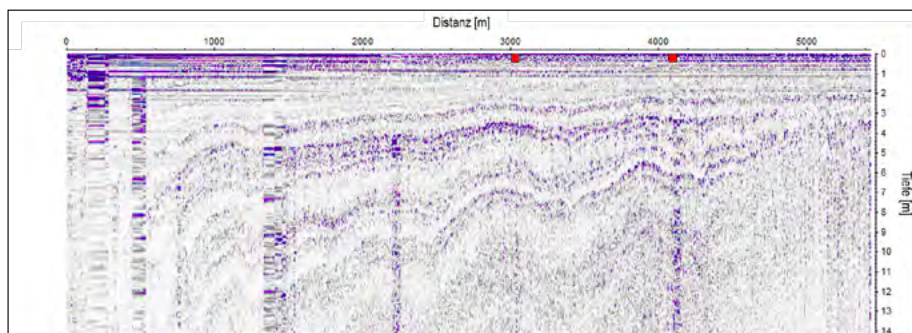


Abb. 5: Das GPR-Profil zeigt individuelle Reflektoren ($\hat{=}$ Schneeschichten mit unterschiedlichen Dichten) in der Schneedecke im Akkumulationsgebiet des Grossen Aletschgletschers. Die roten Quadrate stehen für Orte, wo Schneedichtemessungen gemacht wurden.