

Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =
Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Herausgeber: geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und
Landmanagement

Band: 109 (2011)

Heft: 9: Sonderheft

Artikel: Airborne Laser Scanning im Einsatz der Glaziologie am
Findelengletscher

Autor: Joerg, P.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-236816>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Airborne Laser Scanning im Einsatz der Glaziologie am Findelengletscher

Die Massenbilanz von Gletschern wird normalerweise auf der Gletscheroberfläche mittels Messpeglern gemessen und auf die gesamte Gletscherfläche extrapoliert. Zur Vermeidung systematischer Fehler bei dieser direkt glaziologisch genannten Methode wird zur Kontrolle die Volumenänderung des Gletschers über mehrere Jahre untersucht. Das Geographische Institut der Universität Zürich verwendet am Findelengletscher im Kanton Wallis zu diesem Zweck Höhenmodelldifferenzen aus Airborne Laser Scanning (ALS) Daten. Damit die aus diesen Methoden errechneten Massenbilanzen verglichen werden können, bedarf es jedoch einer sorgfältigen Genauigkeitsanalyse. Erste Resultate zeigen, dass der Schwund des Findelengletschers mit Hilfe dieser geodätischen Methode präzise gemessen werden kann.

Le bilan de masse des glaciers est normalement établi à la surface du glacier à l'aide de cônes de mesurage puis extrapolé sur l'ensemble de la surface du glacier. Afin d'éviter des erreurs systématiques de cette méthode dite directement glaciologique on examine à titre de contrôle pendant plusieurs années la modification du volume du glacier. A cet effet l'Institut de géographie de l' Université de Zurich utilise au glacier du Findelen dans le canton du Valais des différences de modèles d'altitude provenant de données Airborne Laser Scanning (ALS). Pour comparer les bilans de masse calculés avec cette méthode il faut cependant analyser soigneusement les précisions. Des premiers résultats montrent que la diminution du glacier du Findelen peut être mesurée de façon précise avec cette méthode géodésique.

Il bilancio delle masse dei ghiacciai è solitamente misurato sulla loro superficie, tramite dei misuratori di livello, e in seguito viene estrapolato su tutta la superficie del ghiacciaio. Per evitare errori sistematici di questo metodo glaciologico, per il controllo della modifica del volume del ghiacciai si osservano i cambiamenti volumetrici che intervengono col passare degli anni. A questo scopo l'Istituto Geografico dell'Università di Zurigo utilizza sul ghiacciaio vallesano di Findelen delle differenze di modello d'altezza ricavate da dati Airborne Laser Scanning (ALS). Per riuscire a confrontare i bilanci delle masse ottenute con questo sistema è necessaria un'accurata analisi di precisione. I primi risultati dimostrano che il ritiro del ghiacciaio di Findelen può essere misurato con precisione, grazie all'aiuto di questo metodo geodetico.

Ph. Joerg

Hintergrund

Die Schweiz blickt auf eine lange Tradition in der Gletscherforschung zurück. Die erfassten Gletscheränderungen stellen wertvolle Indikatoren der Klimaänderung dar. Durch die Anpassung von Form und Volumen suchen Gletscher immer ihr Gleichgewicht, welches vor allem dominiert wird durch die Temperatur- und Nie-

derschlagsveränderung. Während sich der Niederschlag in der Schweiz in den letzten 150 Jahren nicht substanzial verändert hat, zeigt der generelle Verlauf der Jahresmitteltemperatur in dieser Periode einen starken Anstieg, besonders präsent in den letzten drei Jahrzehnten. Durch die daraus folgende verstärkte Gletscherschmelze sind in der Schweiz eine Vielzahl von Auswirkungen zu erwarten. Beispiele dafür sind die Verfügbarkeit von Wasser zur Gewinnung von Energie, Trinkwasser und der Bewässerung sowie

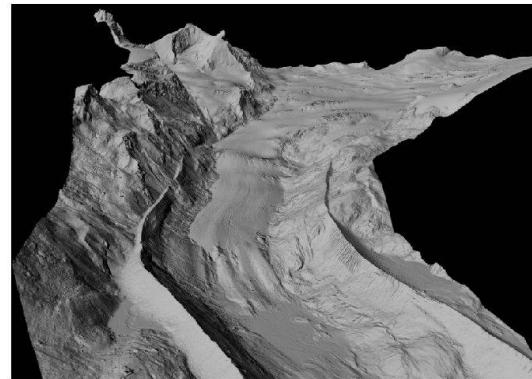


Abb. 1: Schattiertes 3D-Höhenmodell des Untersuchungsgebiets Findelengletscher. Der Gletscher (Bildmitte) erstreckt sich über eine Fläche von über 13 km² und eine Länge von knapp 7 km. Gut erkennbar sind die Seitenmoränen vom letzten Höchststand vor ca. 150 Jahren. Die Nordrichtung weist im Bild nach links.

der touristische Aspekt des «Ewigen Eises» als Sinnbild unberührter Natur. Nicht unterschätzt werden darf auch das Gefahrenpotenzial sich zurückziehender Gletscher, zum Beispiel durch Ausbrüche von durch Lockergestein gestauten Gletscherrandseen, die sich nach dem Rückzug bilden könnten.

Seit 2004 finden auf dem Findelengletscher bei Zermatt im Kanton Wallis (Abb. 1) Messungen der jährlichen Massenänderung, der sogenannten Massenbilanz statt. Diese Messungen werden direkt auf dem Gletscher durchgeführt und ergeben an über den Gletscher verteilten Messpeglern Schmelz-, respektive Akkumulationswerte. Da die Massenbilanz jedoch die Änderung über der gesamten Gletscherfläche beschreibt, müssen diese Punktmessungen in die Gesamtfläche extrapoliert werden. Zur Vermeidung von systematischen Fehlern in der so errechneten direkten glaziologischen Massenbilanz wird deshalb unabhängig von diesen Messungen die Volumenänderung des Gletschers über die Zeitspanne von mehreren Jahren untersucht. Im Falle des Findelengletschers setzt das Geographische Institut der Universität Zürich (GIUZ) auf Höhenmodell-Vergleiche aus Airborne Laser Scanning Daten. Aus diesen Volu-

menänderungen wird dann ebenfalls die Massenbilanz berechnet und mit den Daten der Feldmethode verglichen. Ziel dieses Artikels ist, einen Einblick in die verwendeten geodätischen Methoden zu geben und den Umgang mit Unsicherheiten zu erläutern.

Verwendung von Höhenmodellen in der Glaziologie

Um die direkt glaziologischen Feldmessungen und Extrapolationen zu überprüfen, werden Volumenunterschiede aus zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen Höhenmodellen benutzt und mittels einer Eisdichteannahme auf Massenbilanzwerte (Einheit: Meter Wasseräquivalent) umgerechnet. Zur Bestimmung der Volumenänderung eines Gletschers werden üblicherweise Höhenmodelle mittels photogrammetrischer Autokorrelation erzeugt. Diese Technik hat jedoch den Nachteil, dass in kontrastarmen Bildregionen weniger korrespondierende Punkte gefunden werden, was zu einer Verringerung der Genauigkeit des Höhenmodells in diesen Regionen führt. Das GIUZ nutzt deshalb die neue Massenbilanzmessreihe am Findelengletscher, um Airborne Laser Scanning als Methode in der Gletscherbeobachtung zu testen. Diese etabliert sich momentan als Quelle von hochgenauen Höhenmodellen mit der Fähigkeit, unabhängig von externer Beleuchtung und auf radiometrisch homogenen Oberflächen (z.B. Neuschnee) und ohne aufwendige Passpunkt-Netze präzise topographische Informationen zu generieren.

Airborne Laser Scanning-Kampagnen am Findelengletscher

Die Messungen der jährlichen Massenbilanz finden typischerweise am Ende des hydrologischen Haushaltsjahres bei maximaler Ausaperung des Gletschers Ende September statt. Möglichst zeitnah zu den Feldmessungen wurden im Oktober 2005, Oktober 2009 und September

Aufnahmedaten	28.–29. Oktober 2005	4. Oktober 2009	29. September 2010
Sensortyp	ALTM 3100	ALTM 3100	ALTM Gemini
Pulsrepetitionsrate	71-100 kHz	71 kHz	71 kHz
Scanwinkel	+/- 23 Grad	+/- 15 Grad	+/- 15 Grad
Scanrate	40-50 Hz	39 Hz	39 Hz
Flughöhe über Grund	1500 m	1000 m	1000 m
Querüberlappung	55%	50%	50%
Mittlere Punktdichte	1.1 Pt./m ²	7.6 Pt./m ²	14.3 Pt./m ²
Strahldivergenz	0.30 mrad (1/e)	0.30 mrad (1/e)	0.25 mrad (1/e)
Lagegenauigkeit	0.75 m	0.50 m	0.18 m
Höhengenauigkeit	< 0.20 m (1 σ)	< 0.15 m (1 σ)	< 0.10 m (1 σ)

Tab. 1: Spezifikationen der verwendeten Scannersysteme während den einzelnen Kampagnen.

2010 Flugkampagnen mit einem Airborne Laser Scanner durchgeführt. Dazu kamen die Systeme Optech ALTM 3100 und ALTM Gemini der BSF Swissphoto zum Einsatz. Die verwendeten Aufnahmeparameter und vom Hersteller spezifizierten Genauigkeiten sind in der Tabelle 1 aufgeführt.

Die einzelnen Punktwolken wurden dann mit am GIUZ entwickelten Programmen prozessiert, um verarbeitungsbedingte Unterschiede zu vermeiden und vollständige Transparenz in jedem Verarbeitungsschritt zu erhalten. Zur Verarbeitungskette gehören beispielsweise die Interpolation der Punkte in ein 1 x 1 m Raster, eine physikalisch basierte Korrektur der Intensitätsdaten oder statistische Methoden zur Auswertung der räumlichen Unsicherheiten der digitalen Geländemodelle.

Genauigkeitsanalyse von Airborne Laser Scanning

Damit die ALS-Höhenunterschiede zur Kontrolle der Massenbilanz aus den direkt glaziologischen Messungen herangezogen werden dürfen, muss eine Genauigkeitsabschätzung dieser Daten erfolgen. Um die Genauigkeit der Position des ALS-Flugzeugs während der Aufnahme so hoch wie möglich zu halten, hat das GIUZ eine GNSS Basisstation auf dem Gornergletscher (3130 m ü.M.) betrieben, welche in vertikaler und horizontaler Distanz mög-

lichst nah bei den Flugpfaden des Trägerflugzeugs war (maximale Basislinien-Länge ca. 10 km). Diese Daten wurden dann zur differentiellen Korrektur der Position des Trägerflugzeugs verwendet.

Die Genauigkeitsabschätzung der resultierenden Laser-Bodenpunkte wurde auf zwei Arten durchgeführt. Zur direkten Messung der Abweichungen von Laserpunkten zur Realität wurden Giebeldächer von Gebäuden im Untersuchungsperimeter geodätisch vermessen. Danach wurden die Abweichungen der einzelnen Laserpunkte zu den parametrisierten Dachflächen berechnet und statistisch ausgewertet. Zur Vermessung der Dachflächen wurden pro Objekt je zwei Stationen mittels statischem, differentiellem GPS zwangszentriert und lokal orientiert eingemessen, um darauf von den Standpunkten aus mittels (z.T. reflektorloser) Tachymetrie die Dachcheckpunkte einzumessen. Durch die Verwendung von geneigten Referenzflächen ist es möglich, neben vertikalen auch horizontale Verschiebungen in den Punktwolken zu detektieren. Auf Grund des hochalpinen Untersuchungsgebiets beschränkten sich die homogenen Referenzflächen auf tiefer gelegene Gebiete unterhalb der Gletscherzunge. Zusätzlich stehen im Untersuchungsperimeter elf alte Lagefixpunkte zur Verfügung. Deren exponierte Lage auf Graten und Gipfeln führt jedoch dazu, dass der jeweils nächste Laser-Punkt oftmals unterhalb des Vermessungs-

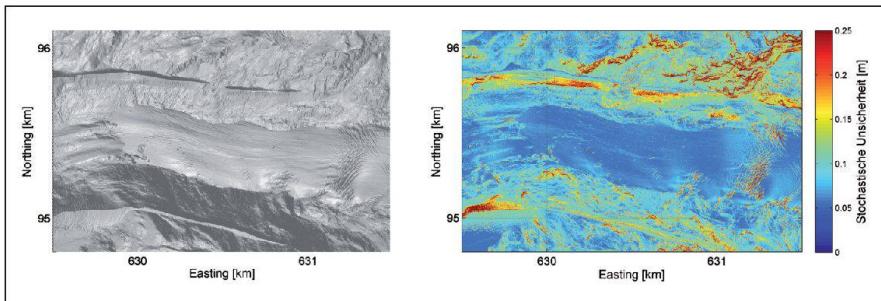


Abb. 2: Hillshade des Gebiets der Gletscherzung aus dem ALS-Höhenmodell 2010 (links) und Repräsentation der stochastischen Unsicherheit aus der Fehlerfortpflanzung. Durch das geringe Gefälle ist die Unsicherheit auf dem Gletscher im Verhältnis zu steilen Flanken tief.

punktes zu liegen kommt. Dies macht eine eindeutige Aussage über die lokale Genauigkeit des ALS-Höhenmodells schwierig. Folglich können diese Lagefixpunkte nur bedingt zur Genauigkeitsanalyse herangezogen werden.

Zusätzlich variiert die Genauigkeit eines Laser-Höhenmodells über einem Gebiet, abhängig beispielsweise vom lokalen Einfallswinkel des Lasers auf die Geländeoberfläche («local angle of incidence») oder der Messpräzision des Inertialnavigationssystems (IMU). Deshalb versucht ein zweiter Ansatz mittels Fehlerfortpflanzung der Messunsicherheiten der einzelnen Systemkomponenten eine Fehlerabschätzung jeder einzelnen aus der Punktewolke interpolierten Rasterzelle durchzuführen. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie unabhängig von Referenzflächen funktioniert und sich ausschliesslich systembedingter Messunsicherheiten und topographischen Informationen bedient. Somit ist eine Fehlerabschätzung an jedem Punkt eines Höhenmodells möglich (Abb. 2).

Obwohl diese Methode den stochastischen Fehler in jeder Rasterzelle abschätzen kann, bleibt zur Vermeidung systematischer Fehler (z.B. der Koordinatentransformation) die Überprüfung der Genauigkeit an unabhängig erhobenen Referenzflächen unumgänglich. Der Standort dieser Flächen ist dann jedoch von sekundärer Bedeutung.

Die über dem vergletscherten Gebiet errechneten systematischen und stochastischen Unsicherheiten werden summiert, respektive mittels Fehlerfortpflanzung be-

handelt, um eine Aussage über die Genauigkeit des gesamten digitalen Höhenmodells zu erhalten.

Berechnung der Massenbilanz

In einem nächsten Schritt wird die geodätische Massenbilanz berechnet. Der Volumenunterschied über die gesamte Gletscherfläche (siehe Ausschnitt in Abb. 3) muss mit der Dichteannahme des geänderten Volumens multipliziert werden. Für die Periode 2005–2010 ergibt dies einen durchschnittlichen jährlichen Volumenverlust von 8.6 Millionen Kubikmetern, umgerechnet in die Massenbilanz sind dies ca. -0.56 m Wasseräquivalent pro Jahr über die gesamte Gletscherfläche. Die Annahme einer Dichte (für diese Rechnung wurde eine Dichte von 850 kg/m^3 verwendet) führt neben den stochastischen Unsicherheiten der einzelnen Geländemodelle zu einer weiteren Erhö-

hung des möglichen Fehlers in der geodätischen Massenbilanz, der berücksichtigt werden muss.

Abschliessend müssen auch die Unsicherheiten aus der direkt glaziologischen Methode errechnet werden, um einen Vergleich mit der geodätischen Massenbilanz zu erlauben. Im optimalen Fall überlappen sich die Massenbilanzen in ihren absoluten Werten respektive stochastischen Unsicherheiten, statistisch besteht dann kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Massenbilanzen. Sollten sich die Fehlerbereiche nirgends decken, sind nicht alle Fehler hinreichend berücksichtigt worden und erfordern eine Überarbeitung der Fehlerrechnung oder gar die Anpassung der Massenbilanzwerte einer Methode.

Evaluation des Nutzens von Airborne Laser Scanning in der Glaziologie

Basierend auf beiden erwähnten Genauigkeitsabschätzungen zeigt sich, dass Airborne Laser Scanning sehr gut zur hochgenauen Erfassung von digitalen Höhenmodellen im Hochgebirge geeignet ist. Die errechnete stochastische Genauigkeit jedes Höhenmodells ist über dem vergletscherten Gebiet sogar besser als der vom Hersteller gegebene Bereich. Die Erfassung von Oberflächenpunkten funktioniert auf dem Gletscher sehr gut, allerdings kann Absorption und spekulare Reflexion des Lasers auf Wasserflächen zu

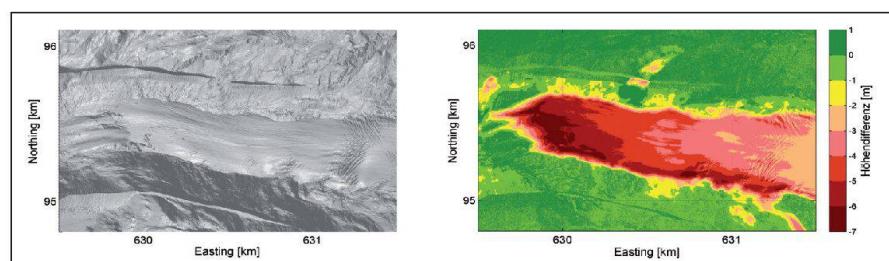


Abb. 3: Hillshade des ALS-Höhenmodells 2010 (links) und mittlere jährliche Höhenänderung 2005–2010. Die Gletscherzung sticht hervor mit grossen Dickenänderungen. Man beachte, dass aus graphischen Gründen die Skala Werte ausserhalb des verwendeten Wertebereichs auf die nächstliegende Farbe reduziert bzw. erhöht; die kollabierende Moräne in der Bildmitte nördlich der Gletscherzung zeigt beispielsweise eine höhere Deposition als 1 m.

Lücken im Höhenmodell führen. Um solche Lücken auf dem Gletscher zu vermeiden, wurde daher möglichst frühmorgens geflogen, um minimale Schmelzwassermengen auf der Gletscherzunge zu gewährleisten. Zusätzlich zeigte ein Test, dass die Wahl der Wellenlänge des verwendeten Lasers eminent wichtig ist: während die Befliegungen mit 1064 nm Wellenlänge (Optech ALTM 3100 und Gemini) zu einem vollständigen Geländemodell des Gletschers geführt haben, resultierte ein Testflug mit 1560 nm Wellenlänge in einem nahezu kompletten Ausfalls des Höhenmodells auf dem vergletscherten Gebiet.

Konklusion und Ausblick

Erste Resultate zeigen, dass der Volumenschwund des Findelengletschers mit Airborne Laser Scanning zuverlässig er-

fasst werden kann. Die erreichte Genauigkeit der einzelnen Höhenmodelle erlaubt die Validierung und möglicherweise notwendige Kalibrierung der direkt glaziologischen Massenbilanz.

Ein weiteres Forschungsziel in diesem Projekt liegt in der flächenhaften Erfassung der Winterakkumulation. Dazu wurde zusätzlich zu den in Tabelle 1 erwähnten Kampagnen im April 2010 bei maximaler Schneehöhe ein ALS Höhenmodell im Findelengebiet geflogen und gleichzeitig Schneehöhenmessungen verteilt über dem Gletscher durchgeführt.

Philip Claudio Joerg
Geographisches Institut
Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190
CH-8057 Zürich
philip.joerg@geo.uzh.ch

Gletscher Laserscanning Experiment Oberwallis

Das Forschungsprojekt «Gletscher Laserscanning Experiment Oberwallis» ist eine Kooperation der Abteilungen Glaziologie und Fernerkundung des Geographischen Instituts der Universität Zürich. Es läuft noch bis 2012 und wird vom Schweizer Energieunternehmen Axpo gefördert. Die Laserbefliegungen wurden in Zusammenarbeit mit der BSF Swissphoto durchgeführt, die Feldmessungen am Findelengletscher werden gemeinsam mit der Universität Fribourg erhoben.



Online Shop
www.allnav.com

allnav ag
Ch. de la Charrière 3
CH-1891 Vérossaz
www.allnav.com
Tel. 024 550 22 15
Fax 024 550 22 16
romandie@allnav.com
Hauptsitz Schweiz: CH-5504 Othmarsingen
Geschäftsstelle Deutschland: D-71522 Backnang



NOUVEAU! Trimble Tablet
Avec des fonctionnalités DAO et caméra intégrée



Trimble Access software interface showing Esquisses, DAO, and Volumes. The DAO (Digital AutoCAD) interface displays a map with red lines and labels. The Volumes interface displays a 3D surface model with a color gradient.

Trimble logo