

## **Nachvollziehbar messen statt subjektiv schätzen – neue methodische Ansätze zur Quantifizierung von Klimafolgen im Hochgebirge – Teil 1: Kryosphäre**

*Rudolf Sailer & Johann Stötter*

*rudolf.sailer@uibk.ac.at, Institut für Geographie, Universität Innsbruck, 6020 Innsbruck*

*johann.stoetter@uibk.ac.at, Institut für Geographie, Universität Innsbruck, 6020 Innsbruck*

Der Titel „Objektiv messen statt subjektiv schätzen – neue methodische Ansätze zur nachvollziehbaren Quantifizierung von Klimafolgen im Hochgebirge“ ist weit gefasst. Die Ursache dafür liegt in der Tatsache begründet, dass am Institut für Geographie der Universität Innsbruck seit einigen Jahren intensiv an Fragestellungen zur Quantifizierung von klimabedingten Prozessfolgen gearbeitet wird und damit zusammenhängend ein weltweit einzigartiger ALS (Airborne Laserscanning) Datensatz aufgebaut wurde. Ein regionaler Schwerpunkt liegt dabei in der Erforschung von Klimafolgen im Hochgebirge und speziell in den von Gletschern und Permafrost eingenommenen Gebieten – der Kryosphäre. Im ersten von drei Beiträgen werden neben einem allgemeinen Statement zum Klimawandel und dessen Folgen im Hochgebirge auch die Grundlagen des ALS, gefolgt von Anwendungsbeispielen (Öztaler Alpen) aus der Kryosphärenforschung, präsentiert. Im zweiten Beitrag werden Relief prägende Folgen von Prozessen analysiert und quantifiziert, die randglaziale Gebiete und Gletschervorfelder dominieren. Flächenänderungen in den Almregionen des Bregenzerwaldes werden in Beitrag drei dargestellt. Dabei werden zur Quantifizierung der Flächenänderungen neben ALS Daten auch herkömmliche Orthophotodaten und hochauflösende Ultracam Daten verwendet.

### **1 Klimawandel und Folgen im Hochgebirge**

Gebirgsräume sind überdurchschnittlich durch die Auswirkungen des Globalen Klimawandels betroffen (Becker & Bugmann 1997, 2001). Der Grund hierfür liegt zum einen in der komplexen Topographie der Gebirge und der daraus resultierenden hohen räumlichen Variabilität, zum anderen in der hohen Spezialisierung natürlicher Ökosysteme sowie von Mensch-Umwelt-Systemen. Es gehört folglich zur speziellen Charakteristik von Gebirgen, dass die Naturausstattung, z. B. die meteorologischen, hydrologischen, biologischen, ökologischen oder geomorphologischen Bedingungen, sich kleinräumig relativ stark ändert. Im Sinne des Prinzips der ökologischen Potenz liegen Grenzsäume nicht weit von den Bereichen, in welchen optimale Bedingungen für das System herrschen, räumliche Alternativen fehlen oftmals gänzlich. Da Höhengrenzen in der Regel energetisch determiniert werden und folglich Wärmemangelgrenzen sind, wirkt sich die Tatsache, dass in vielen Gebirgsräumen die Temperaturzunahme höher als im Umland ist (z. B. in den Alpen, Böhm 2009; Giorgi et al. 1997; Matulla et al. 2004), besonders aus. Infolge des generellen Erwärmungstrends und einer sich verändernden Niederschlagscharakteristik verlagern sich die Grenzen bzw. Grenzsäume zwischen den landschaftlichen Raumeinheiten drastisch und es kommt dadurch zu außer-

gewöhnlichen räumlichen Veränderungen bei den natürlichen Ressourcen. Für die hoch spezialisierten Gesellschaften in den Gebirgen folgen daraus Herausforderungen, für die es in der Geschichte kein Äquivalent gibt (siehe Stötter & Coy 2008).

Aufgrund ihrer relativ direkten Kopplung an die thermischen Rahmenbedingungen reagieren die Elemente der Kryosphäre in besonders gut sichtbarer Weise auf die Folgen des intensivierten Klimawandels im Gebirge (Lemke et al. 2007; UNEP & WGMS 2008). Die Schneedecke und Gletscher sind deshalb perfekte Indikatoren für den Klimawandel. Auf den ersten Blick gilt dies nicht für den Gebirgspermafrost, ist er doch generell ein Phänomen, dessen Vorkommen durch indirekte Methoden nachgewiesen wird.

Da Gebirge Ressourcen, wie z. B. Wasser (siehe Beniston 2003; Viviroli & Weingartner 2004) und andere Ökosystemdienstleistungen, für die halbe Weltbevölkerung zur Verfügung stellen (Becker & Bugmann 2001; Hassan et al. 2005), haben sie globale Relevanz. Die in Folge der zunehmenden Erwärmung schrumpfenden Wasserspeicher der Kryosphäre resultieren in drastischen Veränderungen der Abflussregime sowie der Abflussmenge in den Gebirgsflüssen selbst, aber vor allem auch in den angrenzenden Vorländern (Viviroli et al. 2007; Bates et al. 2008; Kaser et al. 2010). Daneben wirkt das Abschmelzen der Gletscher (Haeberli & Beniston 1998; Lamprecht & Kuhn 2007; UNEP & WGMS 2008) und das Ausschmelzen des Permafrosts (Stötter et al. 1996; Haeberli et al. 2006; Kääb et al. 2008) destabilisierend auf Lockermaterialköper und führt somit zu erhöhter Gefährdung für die vorwiegend in den Tälern liegenden Lebensräume (Stoffel et al. 2005).

Auch wenn sich in allen Gebirgen weltweit gemeinsame Muster aus den Herausforderungen des Globalen Klimawandels ergeben (z. B. Schmelzen der Kryosphäre oder Zunahme der Naturgefahrensituationen), sind doch Vulnerabilität bzw. Resilienz oder Kapazität in Abhängigkeit von der gesellschaftlichen Entwicklung stark unterschiedlich. Während in den Alpen Anpassung in vielen Regionen in Richtung einer Weiterführung der auf Tourismus basierenden Wirtschafts- und Lebensweise zielt (siehe z. B. Breiling et al. 1997; Abegg et al. 2007; Steiger 2008), geht es in Gebirgen wie den Anden oder dem Himalaya aufgrund der wachsenden Wasserknappheit um das reine Überleben (siehe z. B. Viviroli et al. 2007; Bates et al. 2008).



Abbildung 1: Fokussierung auf Gebirgsregionen als vulnerable Mensch-Umwelt-Systeme (Stötter et al. 2011)

## 2 Grundlagen der Airborne Laser Scanning Technologie

Laser scanning ist eine aktive, sowohl terrestrisch (Terrestrial Laser Scanning = TLS) als auch flugzeuggestützt (Airborne Laser Scanning = ALS) eingesetzte Fernerkundungsmethode, die auf die Erfassung von dreidimensionalen Koordinaten der aufgenommenen Oberfläche abzielt. Als synonyme Begriff wird hierfür auch LiDAR (= Light Detection And Ranging) verwendet, bei dem die Energiequelle und die Entfernungsmessung terminologisch berücksichtigt wird.

Neben Stereophotogrammetrie ist die ALS-Technologie inzwischen zu einer Standardmethode zur Gewinnung topographischer Daten geworden. Im Vergleich beider Methoden liegen klare Vorteile von ALS darin, dass diese Technologie

- auch Information über die gescannte Oberfläche unter Wald erlaubt,
- von der Datenakquisition bis hin zur Erzeugung digitaler Geländemodelle (DGM) hoch automatisiert abläuft,
- die Oberfläche aufgrund der hohen Punktdichte ( $\geq 1$  Punkt/m<sup>2</sup> als Standard) sowie der guten vertikalen Genauigkeit extrem gut repräsentiert und
- als aktives System auch hinreichende Daten liefern kann, wenn die Geländeoberflächen keinen entsprechenden Kontrast oder Texturen aufweisen (z. B. bei Schneebedeckung).

Ein ALS-System besteht aus folgenden zeitsynchronisierten Komponenten:

1. Laser Scanner
2. INS (Inertial Navigation System, auch IMU (Inertial Measurement Unit))
3. GPS-Empfänger zur Bestimmung der absoluten Position (x, y, z) der Sensorplattform (Messfrequenz z. B. 1 Hz)
4. Referenzstationen zur differentiellen Korrektur der GPS-Signale.

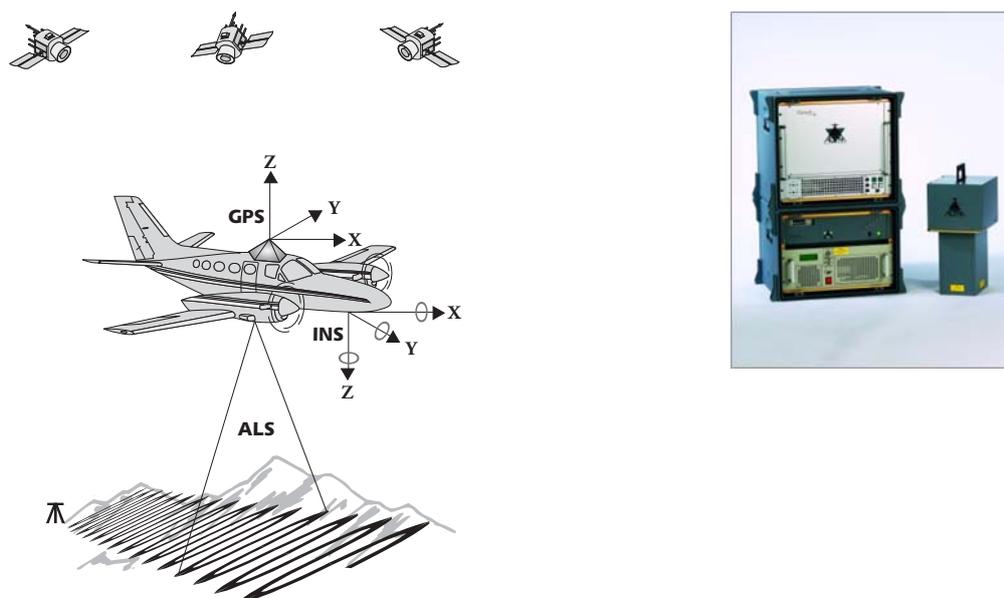


Abbildung 2: ALS-Systemkomponenten, schematisch (links) und ALS-Konfiguration (rechts)

Die Position der Plattform resultiert aus den GPS und INS (oft auch als INS bezeichnet, siehe Abbildung 2) Werten. Die Messfrequenz beträgt in der Regel bei den GPS Messungen 1 Hz und im Falle der INS Messungen 1 kHz. Die aktuellsten Systeme erlauben Flughöhen von 5 000 m über Grund, mit Lasermessfrequenzen bis zu 150 kHz. Detaillierte Informationen über Laserscannintechologien geben Wehr & Lohr (1999), Baltsavias (1999), Rees (2001), Shan & Toth (2009) und Vosselmann & Maas (2010).

Die gebräuchlichsten Laserscansysteme senden einen gepulsten Laserstrahl aus, der von der Erdoberfläche bzw. von Objekten (z. B. Gebäude, Bäume) reflektiert wird. Aus der Zeit, die der Laserstrahl für den Weg vom Flugzeug zur reflektierenden Oberfläche und retour benötigt, wird die Entfernung zwischen Flugzeug und reflektierender Oberfläche hochgenau (Details siehe Kapitel 4) ermittelt. Auf dem Weg durch die Atmosphäre ist das Lasersignal gewissen Umwelteinflüssen ausgesetzt, die im ungünstigsten Fall entweder zu einer Absorption oder spiegelnden Reflexion führen können. In beiden Fällen, wie dies beispielsweise bei Nebel, Schneefall und Regen oder über Wasser auftritt, ist mit einem Verlust der Information zu rechnen. Für die meisten Oberflächen kann jedoch eine diffuse Reflexion (Lambertsche Strahlung) angenommen werden, bei der die Strahlungsdichte in allen Richtungen konstant ist und – unabhängig von der Strahlrichtung – eine Entfernungsmessung nach oben beschriebenem Prinzip möglich ist. Die rückgestrahlte Energie des ausgesandten Echos ist sehr von der ausgesandten Wellenlänge und damit von den radiometrischen Eigenschaften der abgetasteten Oberfläche abhängig. Die meisten ALS Systeme arbeiten im nahen Infrarotbereich. Die gängigsten Wellenlängen sind 905 nm, 1 064 nm und 1 560 nm. Insbesondere die beiden erstgenannten Wellenlängen eignen sich aufgrund ihrer Rückstrahleigenschaften auf Schnee und Eis besonders für die Detektion von Oberflächen und deren Veränderungen in glazial und nival geprägten Gebirgsregionen.

Standardmäßig werden Laserscanning Systeme verwendet, die zwei Reflexionen (first echo, last echo) pro ausgestrahltem Signal verarbeiten können. Werden die Echos, wie dies in bewaldeten Gebieten durchaus der Fall sein kann, von zwei unterschiedlichen Oberflächenniveaus reflektiert, ist eine spätere Trennung in Boden- und Nichtbodenpunkte (z. B. Baumkrone) möglich. Der neueste Trend geht in Richtung multi-echo- und Full-waveform-Anwendungen und Datenanalysen. Letztgenannte Systeme liefern Informationen über die Form des rückgestrahlten Echos (Echobreite, Echomagnitude) und damit verbunden auch Informationen über die Rauigkeit der Oberfläche, die vom sogenannten footprint des betreffenden Laserstrahls erfasst wird (Wagner et al. 2006). Die Analyse von Full-waveform-Daten befindet sich derzeit in einem experimentellen Stadium.

Generell liefern Laserscanning-Missionen georeferenzierte punktgenaue Informationen über die Höhe und Beschaffenheit (repräsentiert durch die rückgestrahlte Energie/Intensität) der Erdoberfläche bzw. eines Objektes. Der durchschnittliche Horizontalabstand der einzelnen Punkte in der sogenannten Punktwolke hängt von mehreren Faktoren ab. Neben der Scanfrequenz sind die Fluggeschwindigkeit, die Streifenbreite, die Flughöhe über Grund und die Aufnahmegeometrie entscheidend verantwortlich dafür, welche Punktdichten erzielt werden können. Wie bereits mehrfach erwähnt, liefern moderne Laserscanning Verfahren nicht nur Informationen über die Geometrie, sondern auch über die Charakteristik der erfassten Oberflächen. Insbesondere diese Eigenschaft lässt visuelle Interpretationen und vielfach eine automatisierte Klassifizierung von Oberflächenstrukturen zu.

Die hochgenaue, räumlich umfassend und trotzdem sehr dichte Vermessung der Erdoberfläche ist wohl die prägendste Eigenschaft moderner ALS-Technologien. Nach verschiedenen mathematischen Filter- und Interpolationsalgorithmen liefern die ALS-Punktdaten ein digitales Abbild der erfassten Oberfläche in Form von georeferenzierten Gelände- und Oberflächenmodellen. Jede der darin regelmäßig angeordneten Gitterzellen repräsentiert die Höhe bzw. Oberflächeneigenschaft der von ihr bedeckten Fläche der Erdoberfläche. Das digitale Oberflächenmodell (DOM, engl. DSM für Digital Surface Model) beinhaltet die höchsten gemessenen Punkte einer Messkampagne und bilden neben natürlichen Oberflächen (Boden, Vegetation) auch Gebäude und andere technisch erzeugte Objekte (Brücken) ab. Demgegenüber repräsentiert ein digitales Geländemodell (DGM, engl. DTM für Digital Terrain Model) die Erdoberfläche – auch dort, wo Objekte den Boden überragen. Spezielle Filteralgorithmen und eine intensive manuelle Bearbeitung der Rohdaten sind für die Erzeugung eines DGM notwendig. In offenem Gelände, wie dies im Hochgebirge häufig der Fall ist, sind DGM und DOM ident. Detaillierte Informationen zur Erstellung von DGM und DOM sind in Sithole & Vosselman (2004), Shan & Toth (2009) und Vosselman & Maas (2010) zu finden.

### **3 Untersuchungsgebiet und Daten**

Am Institut für Geographie der Universität Innsbruck liegt mittlerweile ein weltweit einzigartiger ALS-Datensatz vor (siehe Abbildung 3). Beginnend mit dem Jahr 2001 bis zum Ende des ALS-X Projektes wurden insgesamt 18 ALS-Befliegungen an Hintereis- und Kesselwandferner durchgeführt (mindestens eine Aufnahme pro Jahr). In Rahmen von ALS-X selbst wurden vier ALS-Befliegungen jeweils zu glaziologisch relevanten Zeitpunkten durchgeführt. Eine Liste der Befliegungen mit entsprechenden Informationen über Fördergeber, Zeitpunkt der Aufnahme und verwendete Instrumentierung kann Sailer et al. (2011) entnommen werden. Inzwischen wurde im Jahr 2010 das Gebiet des Hintereisferners im Rahmen eines Projekts des alpS – Centre for Climate Change Adaptation Technologies erneut befliegen, so dass in Summe 19 ALS-Flüge für wissenschaftliche Analysen zur Verfügung stehen. Auch die Finanzierung des 20. ALS-Fluges ist durch das Projekt C4AUSTRIA (Climate Change Consequences for the Cryosphere) sichergestellt.

Der Datensatz ist nicht nur aufgrund der zeitlichen Dimension bemerkenswert, auch die Verwendung einer konsistenten Messanordnung, einheitlicher Projektionsparameter und Referenzflächen trägt zur Einzigartigkeit und Qualität der gesamten Datenreihe bei. Der hohe Qualitätsstandard spiegelt sich unter anderem i) in der sehr guten absoluten Genauigkeit und ii) in einem sehr geringen (neigungsabhängigen) Fehler wider (siehe Kap. 4). Da ein Teil der älteren Befliegungsdaten in einem Format vorliegt, welches keine Intensitätskorrektur erlaubt, wurde im Rahmen des ALS-X Projekts die Nachführung von vier wichtigen Herbstbefliegungen beauftragt. Durch diese Vorgangsweise wird die Datenbasis für intensitätsbasierte ALS-Analysen erweitert.

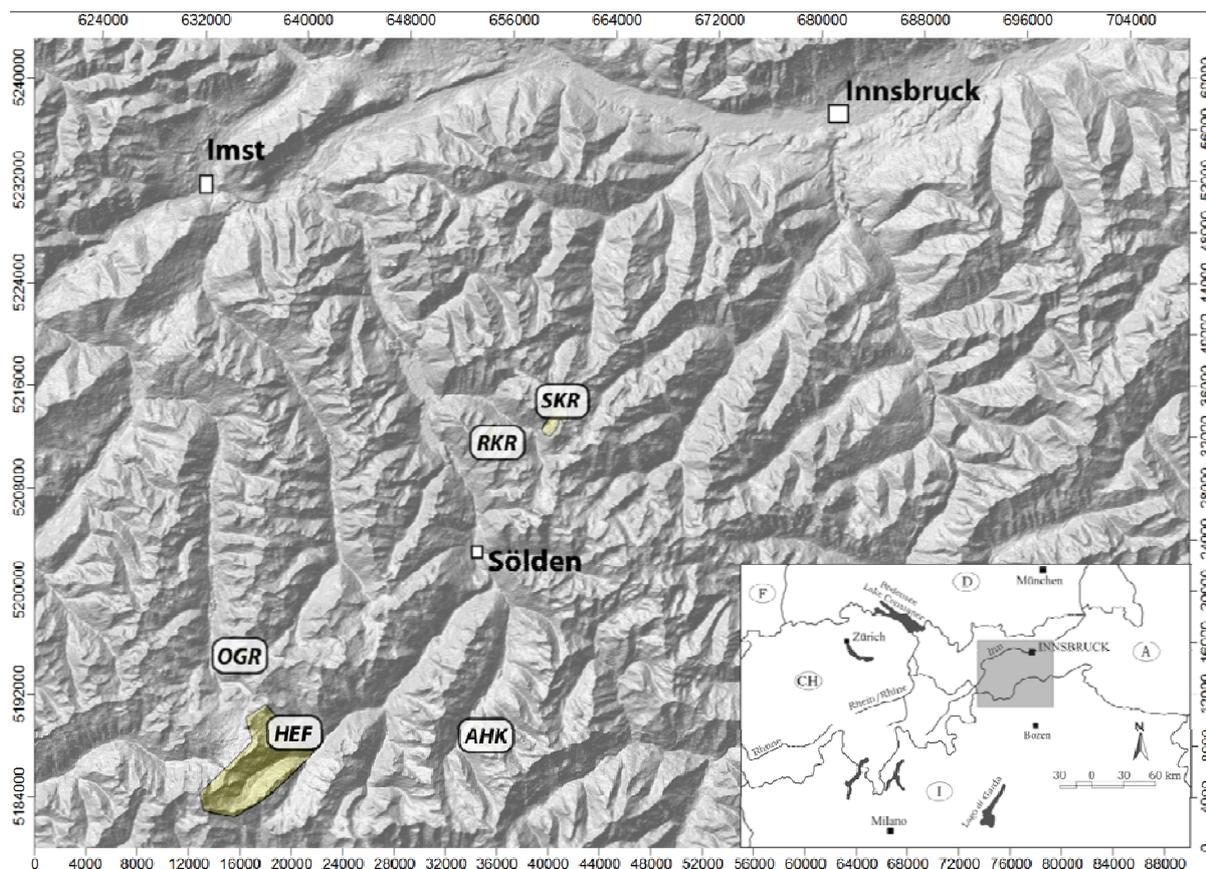


Abbildung 3: Das Untersuchungsgebiet mit Hintereisferner (HEF) sowie den Blockgletschern Ölgrube (OGR), Äußeres Hochebenkar (AHK), Reichenkar (RKR) und Schrankar (SKR); Koordinatenangaben in UTM Zone 32N.

## 4 Genauigkeit der Messungen

Zur Interpretation der Ergebnisse, die aus ALS-Daten gewonnen werden, ist das Wissen um deren Genauigkeit und Präzision von entscheidender Bedeutung. Erste Genauigkeitsanalysen der Laserpunkte werden bereits von der Befliegungsfirma (Topscan GmbH) durchgeführt. Zur weiteren Überprüfung der Genauigkeit von ALS-Daten können verschiedene Verfahren herangezogen werden, von denen zwei hier vorgestellt werden.

### 4.1 Absolute Höhengenaugkeit – Vergleich mit differentiellen GPS Höhen

Nahezu zeitgleich zur Befliegung im Jahr 2008 wurden dGPS-Messungen in drei Gebieten auf der Gletscherzunge des Hintereisferners durchgeführt, wobei etwas mehr als 1 000 GPS Punkte mit einer Höhengenaugkeit von  $\pm 0,017$  m aufgenommen wurden. Der Höhenvergleich der ALS-Punkte mit diesen hochgenauen Referenzdaten zeigt eine äußerst gute Übereinstimmung. Die ALS-Daten weichen im Mittel nur  $\pm 0,07$  m von den GPS Referenzdaten ab. Die Fehlerstreuung ist mit einer Standardabweichung von 0,07 m ebenfalls sehr gering und spricht für die hohe Verlässlichkeit der ALS-Punktdaten.

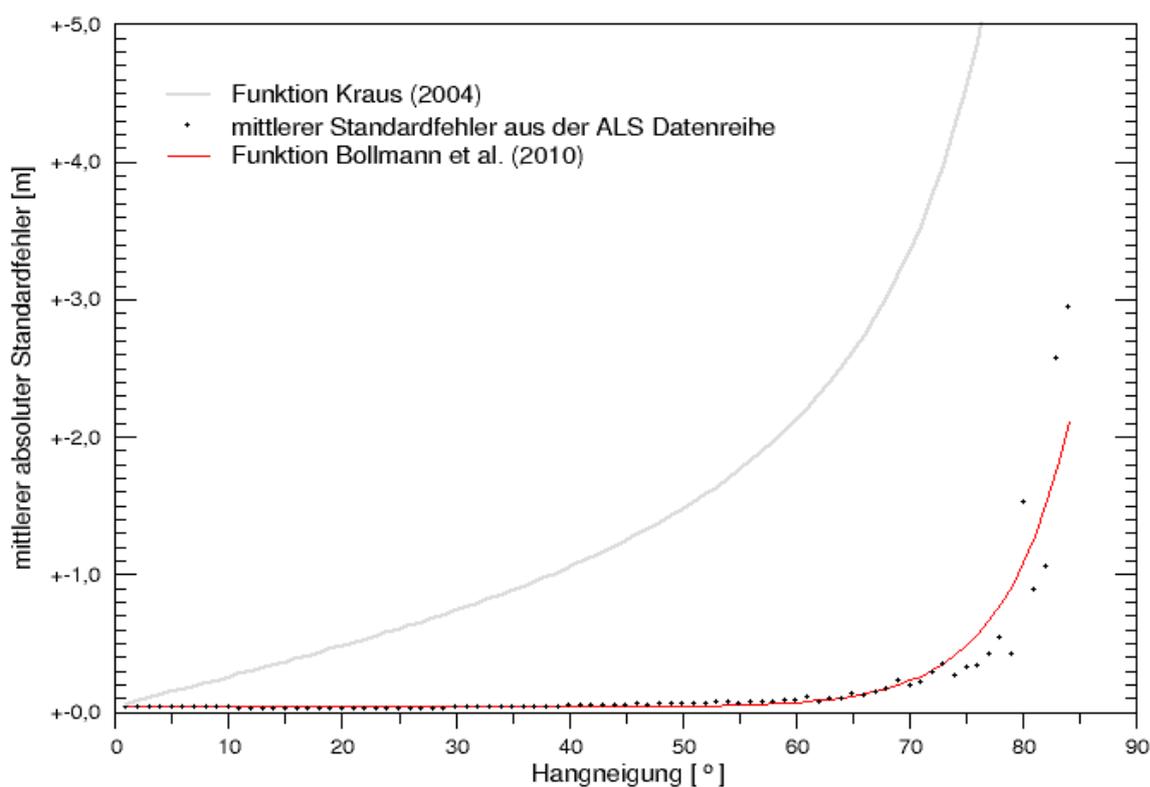


Abbildung 4: Absoluter mittlerer Standardfehler pro Hangneigungsklasse, die dazugehörige Funktion aus der Hintereisferner ALS-Datenreihe und die von Kraus (2004) veröffentlichte Fehlerkurve (Sailer et al. 2011).

## 4.2 Multitemporale Fehlerrechnung

Der Vergleich mit dGPS-Messungen wurde für Bereiche mit relativ flacher Neigung ( $<15^\circ$ ) auf der Gletscherzunge des Hintereisferners durchgeführt. Kraus (2004) zeigt, dass für ALS-Daten ein neigungsabhängiger Fehler vorhanden ist. Der hier vorgestellte Datensatz eignet sich besonders gut für die statistische Analyse der neigungsabhängigen Höheninformationen der ALS-Daten. Für diese Auswertung werden nur jene Daten herangezogen, für welche sichergestellt werden kann, dass keine Veränderung der Oberfläche durch Akkumulation oder Schmelzen von Schnee oder Eis bzw. durch geomorphodynamische Prozesse stattgefunden hat. Unter Berücksichtigung dieser Ausschlusskriterien bleiben bis zum Herbst 2008 zwölf Flüge übrig, die eine Fehleranalyse zulassen (Bollmann 2010). Der daraus ermittelte absolute Standardfehler für Hangneigungen unter  $35^\circ$  beträgt lediglich  $\pm 0,04$  m (siehe Abb. 4). Bei Neigungen über  $35^\circ$  nimmt der Fehler zunächst mäßig (bis  $\pm 0,10$  m) und ab einer Hangneigung von  $> 60^\circ$  exponentiell zu (Details siehe: Bollmann 2010; Bollmann et al. in Druck). Das Wissen um diese Fehler und die Berücksichtigung der Interpolationsfehler bei Konvertierungen von Punkt- zu Rasterformat ist Grundvoraussetzung für die Interpretation aller aus ALS-Daten gewonnenen Ergebnisse.

## 5 Kryosphäre

### 5.1 Gletscher

Die Zeitreihe von ALS-Messungen am Hintereisferner (vgl. Tabelle 1) stellt die ideale Basis für multitemporale Analysen dar, die ALS-Daten ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ -Koordinaten und Intensitätswerte) nutzen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen wurden. Die generierten Oberflächenmodelle lassen sich sowohl hinsichtlich der Flächen- ( $\Delta x$ ,  $\Delta y/\Delta t$ ) als auch der Volumenänderungen ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z/\Delta t$ ) analysieren. Die Laserintensitätswerte kommen vor allem bei der Klassifizierung der Gletscheroberfläche zum Einsatz und ermöglichen eine Verbesserung der mittels ALS-Daten erstellten Massenbilanz eines Gletschers (zur Theorie siehe z. B. Anonym 1969; Hoinkes 1968). Eine Zusammenfassung zur Geschichte der Massenbilanzmessungen am Hintereisferner geben Span et al. (1997) und Kuhn et al. (1999); Geist & Stötter (2007) diskutieren die Potentiale von ALS-basierten Methoden zur Ermittlung von Gletschermassenbilanzen am Hintereis- und Kesselwandferner. Die Ermittlung ALS-basierter Massenbilanzen stellt eine Weiterführung und vor allem auch eine Verbesserung (hinsichtlich Automatisierung und hoher räumlicher Auflösung und ausgezeichneter Höhengenaugigkeit) der klassischen geodätischen Methode dar. Nachfolgend wird erläutert, wie Volumenänderungen auf Basis multitemporaler Daten ermittelt werden können und wie Intensitätsraster zur Verbesserung von ALS-Massenbilanzen beitragen können.

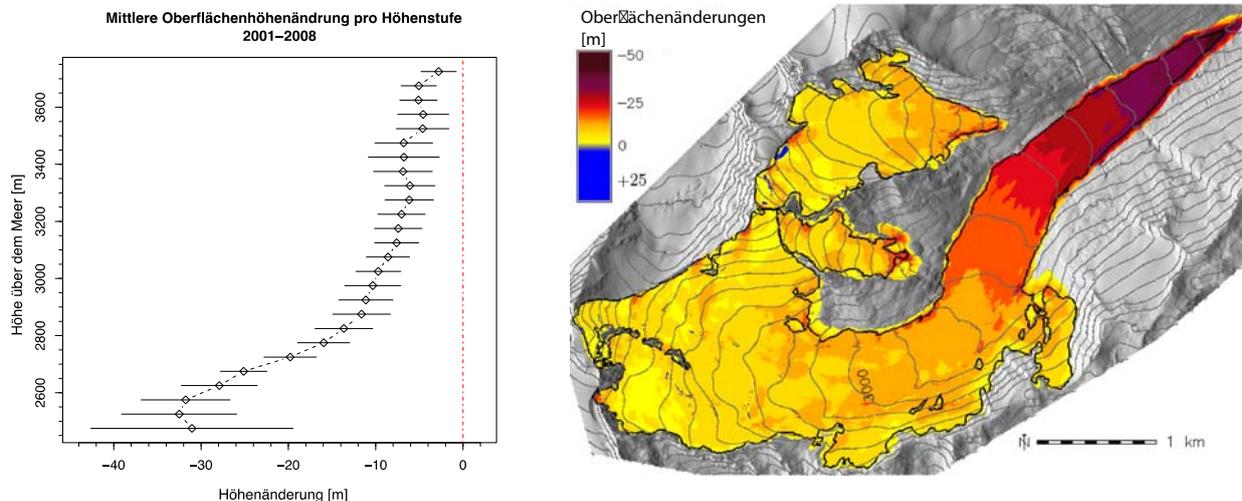


Abbildung 5: Durchschnittliche Oberflächenhöhenänderung mit Standardabweichung (Höhenintervall 50 m) und Karte der Höhenänderung am Hintereisferner von 2001 bis 2008 (verändert nach Sailer et al. 2010).

#### Differenzmodelle

Die Differenzbildung (Änderung der absoluten Höhe der (Gletscher-)Oberfläche) folgt einem relativ einfachen Prinzip. Infolge von Veränderungen im Massenhaushalt ergibt sich aus den ALS-Messungen eine Oberflächendifferenz zwischen der absoluten Höhe eines Oberflächenpunktes bzw. integriert der gesamten Gletscheroberfläche zum Zeitpunkt  $t_1$  (Befliegung 1) und dem korrespondierendem Punkt oder der Fläche zum Zeitpunkt  $t_2$  (Abbildung 5, rechts). Zur Ermittlung

des Massenbilanz werden die Veränderungen in spezifischen Höhenstufen (Höhenintervall 50 m) untersucht und ähnlich einem vertikalen Massenbilanzprofil dargestellt (siehe Abbildung 5, links). Die geodätische Massenbilanz ergibt sich aus der Multiplikation der ALS-basierten Volumenänderungen des Gletschers mit einer angenommenen Gletschereisdichte von  $0,9 \text{ gcm}^{-3}$ . Ein Vergleich mit der direkten glaziologischen Methode zeigt, dass teils große Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Methoden auftreten, welche in einem Bereich zwischen  $-37,6 \%$  und  $+82,1 \%$  liegen (Tab. 1).

Tabelle 1: Kumulative Gesamtmassenbilanz 2001 bis 2008. Vergleich zwischen geodätischer und direkter glaziologischer Methode. Die geodätischen Massenbilanzwerte ergeben sich aus einer Multiplikation der Volumenänderung des Gletschers mit einer angenommenen Gletschereisdichte von  $0,9 \text{ gcm}^{-3}$  (Sailer et al. 2010).

Bilanzjahr	Geodätische Methode mit $0,09 \text{ gcm}^{-3}$	Direkte glaziologische Methode	Differenz	
			[Mio. $\text{m}^3$ ]	%
2001–2002	-8,19	-5,11	3,08	60,2
2001–2003	-34,17	-19,29	14,88	77,1
2001–2004	-38,09	-24,30	13,79	56,8
2001–2005	-43,09	-32,23	10,87	33,7
2001–2006	-62,23	-43,45	18,79	43,2
2001–2007	-72,93	-56,40	16,53	29,3
2001–2008	-83,31	-65,17	18,14	27,8

Neben den Massenbilanzen für die einzelnen Bilanzjahre wurden auch die aufsummierten Ergebnisse beider Methoden über den Gesamtzeitraum betrachtet (siehe Tab. 1). Es zeigt sich eine Tendenz von abnehmenden Differenzen zwischen beiden Methoden. Für den Untersuchungszeitraum von 2001 bis 2008 bleibt aber immer noch eine Differenz von 27 %, die zeigt, dass die geodätische Methode größere Ablationswerte als die direkte glaziologische Methode liefert. Da diese Differenzen nicht durch Messungenauigkeiten des ALS-Systems erklärt werden können, ergibt sich die Notwendigkeit, über die Interpolationsalgorithmen bei der auf wenigen, als repräsentativ interpretierten Messpunkten basierten glaziologischen Methode nachzudenken. Wenn man die Massenverluste im Untersuchungszeitraum mit den Vorstellungen zur Eisdicke bzw. zum Eisvolumen des Hintereisferners (siehe Kuhn 2007) vergleicht, wird festgestellt, dass der Hintereisferner im Zeitraum von sieben Jahren ca. 18 % seiner Masse verloren hat. Der Großteil dieses Massenverlusts muss durch Eisablation stattgefunden haben. Daher ist eine Eisdichteannahme von  $0,9 \text{ gcm}^{-3}$  zur Umrechnung von Volumenänderungen zu Massenänderungen eine realistische Größe und sollte in realistischen Werten resultieren.

Aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass die beiden glaziologischen Jahre 2002/03 und 2005/06 (kursiv) die größten Differenzen aufweisen. Gerade diese beiden Jahre sind gekennzeichnet durch besonders große Ablationsraten. Es liegt daher nahe, eines dieser beiden Jahre genauer zu untersuchen und dabei besonderes Augenmerk auf die Dichteverhältnisse zu legen (siehe Abb. 6).

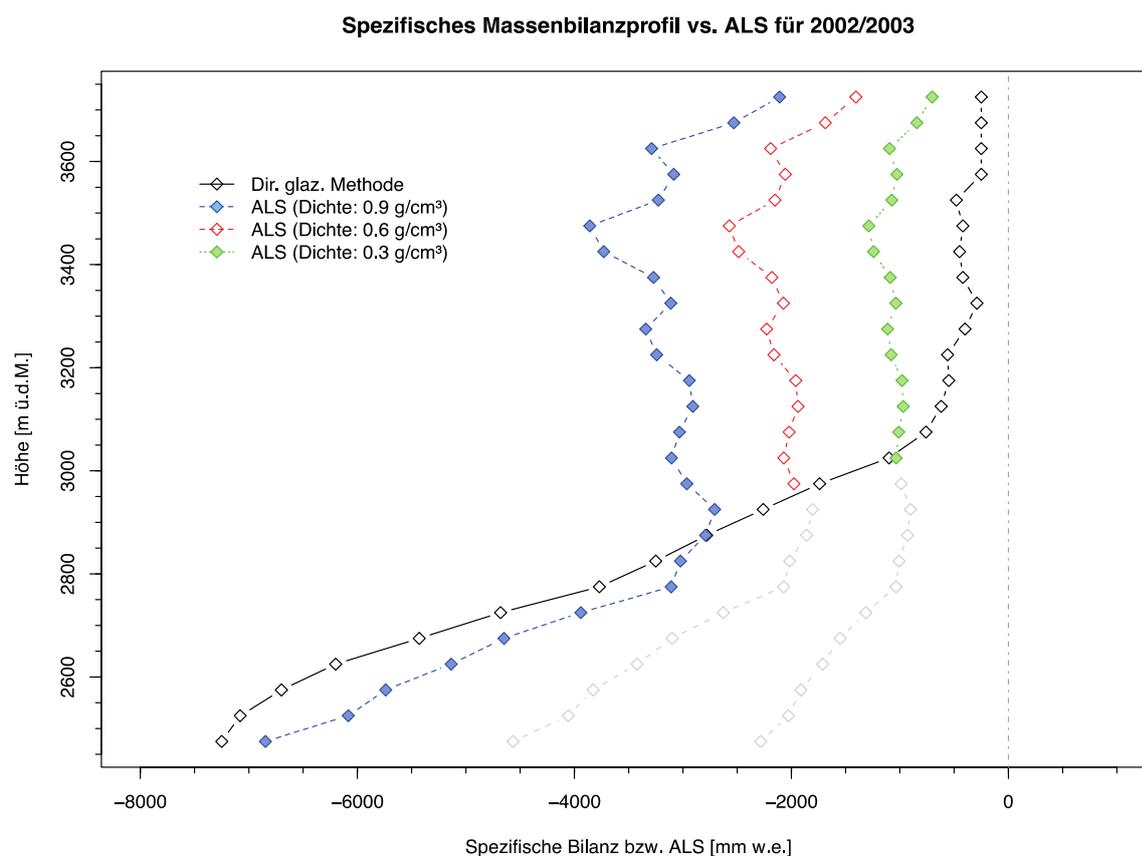


Abbildung 6: Vertikales Massenbilanzprofil für das glaziologische Jahr 2002–2003. Ergebnisse der direkten glaziologischen Methode werden mit den Ergebnissen der geodätischen Massenbilanzwerten verglichen. Die geodätische Massenbilanz wurde mit verschiedenen Dichteannahmen gerechnet (verändert nach Sailer et al. 2011).

### Intensitätsklassifikation

Vorangegangene Studien sprechen der Intensität des reflektierten Laserstrahls ein großes Potential zur Oberflächenklassifizierung zu. Da die Intensitätswerte verschiedenen Einflussfaktoren unterliegen, wie etwa dem Zustand der Atmosphäre oder topographischen Einflüssen, müssen sie in einem vorangestellten Schritt korrigiert werden (Höfle und Pfeifer 2007). Hierzu kommt im Projekt ALS-X ein spezielles Modul zur Intensitätskorrektur zur Anwendung. Dabei basiert die Oberflächenklassifikation der Intensitätsraster auf einem relativ simplen Reklassifizierungsansatz, bei dem für jede Oberflächenklasse Schwellenwerte (Maxima und Minima) bestimmt und ausgewählte Intensitätsraster der verschiedenen Jahre anschließend mit Hilfe dieser Werte klassifiziert werden (siehe: Fritzmann 2010; Fritzmann et al. in Druck).

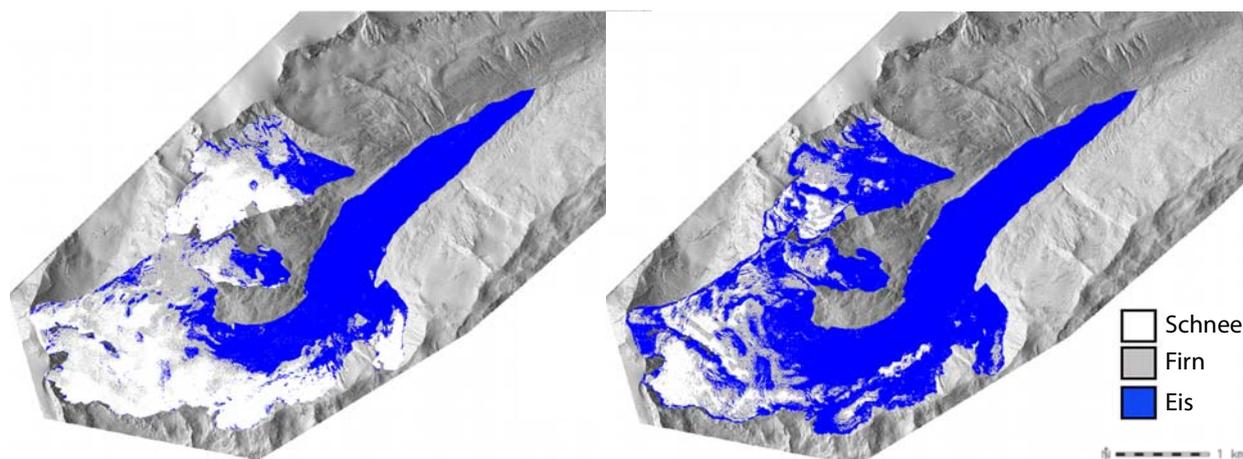


Abbildung 7: Hintereisferner Gletscheroberflächenklassifikation (Schnee, Firn, Eis) aus ALS Intensitätswerten (links: 2002, rechts: 2003, verändert nach Fritzmann et al., in Druck).

Die Annahme realitätsnaher Dichtewerte ist wesentliche Voraussetzung für plausible Ergebnisse mit der geodätischen Methode auf Jahresbasis. Auf Intensitätswerten basierende Klassifikationen der Gletscheroberfläche bieten die Möglichkeit, Dichtewerte besser abschätzen zu können. In Abbildung 7 sind Oberflächenklassifikationen der Befliegungen 2002 und 2003 dargestellt. Eine *change detection*-Analyse erlaubt, die Übergänge zwischen den drei Oberflächenklassen (Schnee, Firn, Eis) im zeitlichen Verlauf zu erkennen und daraus verbesserte Dichteannahmen abzuleiten. Wird beispielsweise in den zwei Befliegungen eine Fläche jeweils als Gletschereis klassifiziert, so muss davon ausgegangen werden, dass im Jahresverlauf an dieser Stelle nur Eis abgeschmolzen ist und folglich mit einer Dichte von  $0,9 \text{ gcm}^{-3}$  zur Bestimmung der Massenbilanz gerechnet werden kann. Jedem möglichen Klassenübergang zwischen 2002 und 2003 kann so ein durchschnittlicher Dichtewert zugewiesen werden, der in die Berechnung der Gesamtmassenbilanz einfließt. Für das glaziologische Jahr 2002–2003 errechnet sich auf Basis dieses Ansatzes ein reduzierter Massenverlust von rund 22 Mio.  $\text{m}^3$  im Vergleich zu etwa 26 Mio.  $\text{m}^3$  bei Annahme einer reinen Eisdichte.

## 5.2 Permafrost

Das Phänomen des Dauerfrostbodens ist zuerst in Bereichen der sub- und hochpolaren Klimazone erkannt worden. Bereits im 17. Jahrhundert wurde Permafrost in Sibirien und im 18. Jahrhundert in Kanada beschrieben. Dies erklärt auch seine in die wissenschaftliche Literatur eingegangenen regionalen Synonyma, wie 'perenne tjäle' (schwedisch) oder 'Merslota' (russisch). Der Begriff "Permafrost" wurde von Müller (1945) geprägt. Bis in die 1960er Jahre beschränkte sich die Erforschung des Permafrostes und der damit verbundenen Phänomene rein auf Gebiete hoher Breiten. Es gab zwar schon in den 1950/60er Jahren vereinzelte Hinweise auf das Vorkommen von Permafrost im Alpenraum (Campell 1954; Furrer 1955; Jäckli 1957; Elsasser 1968), aber erst als Folgeerscheinung der Errichtung der Seilbahn auf den Corvatsch (Oberengadin) in 2 700–3 300 m ü. d. M. wurde man auf das Vorhandensein von Permafrost auch in Hochgebirgen aufmerksam (Barsch 1969).

Seit der ursprünglichen Definition von Müller (1945: 3) "... thickness of soil or other superficial deposits, or even of bedrock, at a variable depth beneath the surface of the earth in which a temperature below freezing has existed continually for a long time." hat das Begriffsverständnis nur einen unwesentlichen Wandel erfahren. Wichtig ist, dass sich diese Definition auf den Frost in der Lithosphäre beschränkt (siehe z. B. Washburn 1979). Blockgletscher können als Leitform des alpinen Permafrostes bezeichnet werden. Sie sind nach Barsch (1988: 72) "lobate or tongue-shaped bodies of frozen debris with interstitial ice and ice lenses, which move downslope or downvalley by deformation of the ice within them". Die innere Zusammensetzung aus einem ungleichmäßigen Gemisch von Gesteinsschutt unterschiedlicher Korngröße und Eis erklärt auch die im Vergleich zum plastischen Fließen der Gletscher äußerst langsame Bewegung der Blockgletscher. Die Schwankungsbreite der Bewegungsgeschwindigkeit von Blockgletschern reicht von 1 dm/a bis zu einigen Metern pro Jahr (Whalley & Martin 1992; Krainer & Mostler 2000; Kaufmann & Ladstätter 2002). Neue Arbeiten im Kontext der Blockgletscherforschung sind auf die Kinematik (Roer 2007; Delaloye et al. 2010), die innere Zusammensetzung von Blockgletschern (beispielsweise Haerberli et al. 2006) und auf die praktische Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse konzentriert (Kääb et al. 2005; Kääb et al. 2007; Nyenhuis 2006). Verschiedenste Autoren haben sich intensiv mit fernerkundlichen Aspekten der Detektion und Analyse von Permafrostkörpern im Allgemeinen und Blockgletschern im Speziellen beschäftigt (siehe unter anderem Kääb 2005, 2008).

Flächen- oder gar Volumenangaben zur Verbreitung des Permafrosts sind äußerst problematisch: Da dieses Phänomen nur an wenigen Stellen direkt beobachtet werden kann und auch für den indirekten Nachweis nur vereinzelte, punktuelle Messungen vorliegen, schwanken die Aussagen beträchtlich. Demgegenüber ist es nun auf Basis des schon erwähnten einzigartigen ALS-Datensatzes möglich, flächenhafte Quantifizierungen von Veränderungen der Erdoberfläche in Permafrostgebieten durchzuführen. Insbesondere aktive Blockgletscher, das bedeutet Blockgletscher mit einem ausreichend großen Eisanteil und teils hohen Bewegungsraten, eignen sich aufgrund ihres Kriechverhaltens ausgezeichnet für ALS-basierte Analysen. Höhen- und damit Volumenänderungen können ebenso erfasst werden, wie Bewegungsraten. Da aufgrund der äußerst exakten Höhenbestimmung auch relativ geringe Oberflächenänderungen gemessen werden können, sind ALS-Daten ein äußerst hilfreiches Instrument zur Analyse und Quantifizierung des Eisverlustes in Blockgletschern, die einen Eiskern aber keine oder nur mehr äußerst geringe Bewegungsraten aufweisen – den sogenannten inaktiven Blockgletschern.

Der Reichenkar-Blockgletscher ist ein idealtypischer aktiver Blockgletscher, der obgleich schwer erreichbar, doch relativ intensiv untersucht wird (Chesi et al. 1999; Krainer & Mostler 2000). Neben zahlreichen in-situ Beobachtungen (Geschwindigkeitsmessungen, etc.) sind für diesen Blockgletscher neben der tirolweiten ALS-Aufnahme (Jahr 2006) drei weitere ALS-Befliegungen (2007, 2009, 2010) durchgeführt worden. Eine weitere Befliegung ist für das Jahr 2011 geplant. In Abbildung 8 sind die ALS-Differenzen zwischen den Jahren 2006 und 2009 dargestellt. Es zeigt sich, dass – außer in jenen Bereichen, die dynamisch durch Vorwärtsbewegungen geprägt sind und dadurch positive Werte erreichen – eine generelle Höhenabnahme dominiert. Die Bewegungsraten liegen im Schnitt bei 0,7 m pro Jahr. Dieser Wert entstammt einer kombinierten Orthophoto- / ALS-Analyse, die den Zeitraum von 1954 bis 2009 umfasst. Die einzelnen Bewegungsmuster der Blockgletscher Stirn und der Stirnbasis können Abbildung 9 entnommen werden.

In Abbildung 10 werden Oberflächenänderungen (dabei handelt es sich durchwegs um Höhenverluste) im Schrankar (Stubai Alpen) zwischen 2006 und 2009 dargestellt, die auf drei unterschiedliche Entstehungsmechanismen zurückzuführen sind. Die Messungen beweisen, dass insbesondere der Südliche Schrankarferner sehr viel an Masse verliert. Dies hat mitunter dazu geführt, dass die Gletscherzunge, die noch in den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts weit über die Felsbarriere hinuntergereicht hat, den Kontakt zum Gletscher verloren hat und keinen dynamischen Eisnachschieb mehr erhält. Das Ausschmelzen des Eises führt zu einer Schuttkonzentration an der Oberfläche der ehemaligen Gletscherzunge, die in weiterer Folge den Eiskörper zunehmend vor thermischen Umwelteinflüssen schützt. Es hat sich ein sogenannter Toteiskörper ausgebildet, der wie die ALS-Messungen zeigen, immer noch beachtlichen Massenverlusten unterliegt. Nordwestlich und südwestlich dieses Toteisbereiches zeigen die ALS-Differenzbilder geringere Höhenabnahmen. Es handelt sich dabei um Permafrostkörper mit einem erheblichen Anteil von Gesteinsmaterial, teils mit blockgletscherartigen Formelementen. Aktuelle Analysen zeigen, dass die Oberflächenstrukturen keinen Hinweis auf Bewegungen zulassen. Dies erlaubt den Schluss, dass sich zumindest in Teilbereichen des Areals inaktive Blockgletscher (Eis-Schuttkörper ohne Horizontalbewegung) entwickelt haben.

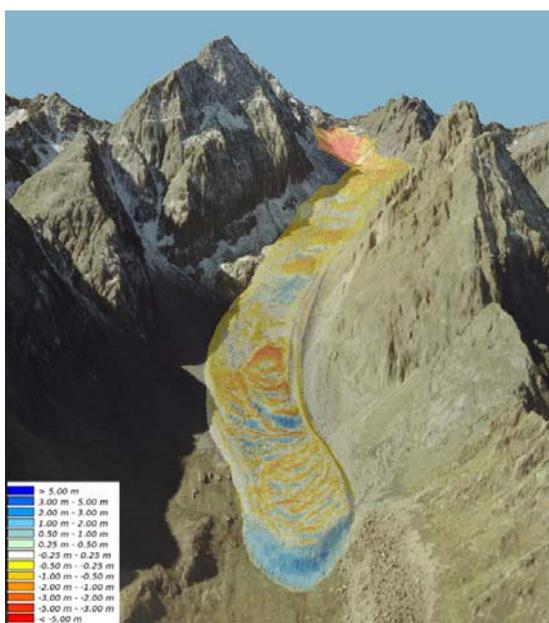


Abbildung 8: Reichenkar-Blockgletscher (Blickrichtung: Süd) – ALS-Differenzen zwischen Herbst 2006 und Herbst 2009; helle/rote Flächen zeigen einen Höhenverlust, dunkle/blau Flächen einen Höhengewinn an.

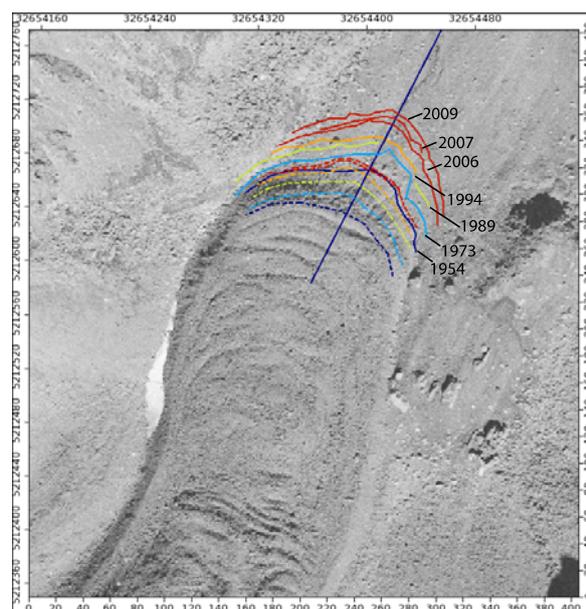


Abbildung 9: Reichenkar Blockgletscher (Stubai Alpen) – Kennzeichnung der Stirn (strichlierte Linien) bzw. der Stirnbasis (durchgezogene Linien); Hintergrund: Orthophoto des Jahres 1954.

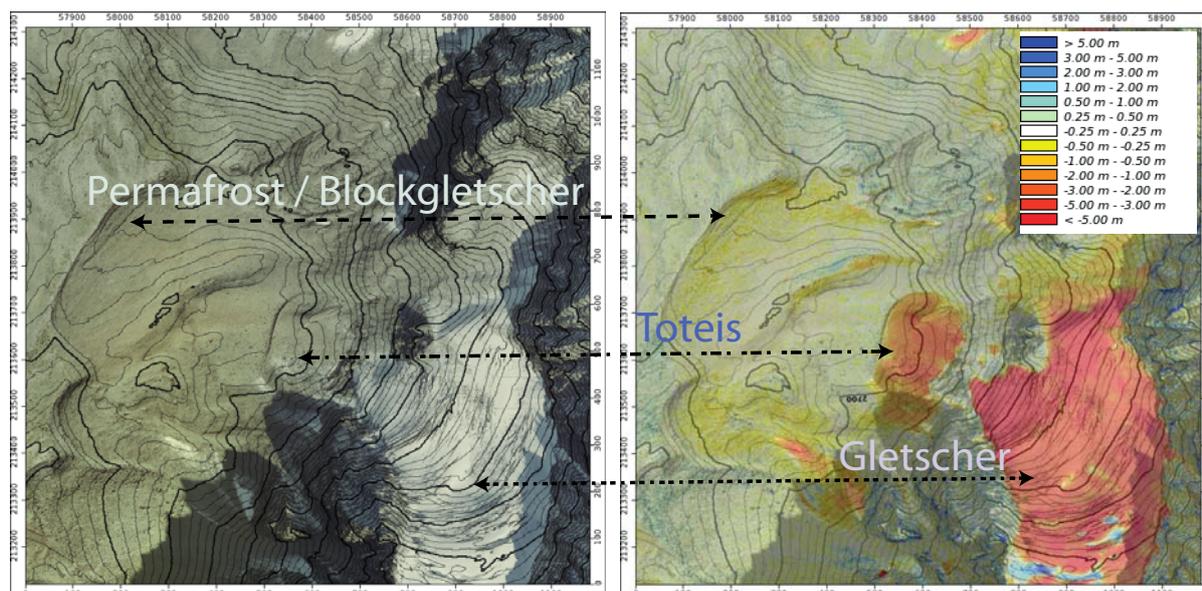


Abbildung 10: Schrankar (Stubai Alpen) mit Oberflächenänderungen von 2006 auf 2009, welchen drei unterschiedlichen Entstehungsmechanismen – Gletscher, Toteis und Permafrost / Blockgletscher – zugrunde liegen.

## 6 Zusammenfassung Teil1: Kryosphäre

Die hier vorgestellten Anwendungsbeispiele zeigen die Stärken einer ALS-basierten Quantifizierung von Hochgebirgsprozessen. Neben den Volumenänderungen von Gletschern, wie sie hier am Beispiel des Hintereisferners dargestellt sind, können ALS-Daten auch dazu herangezogen werden, weniger augenscheinliche Oberflächenänderungen zu messen. Insbesondere der Detektion und Quantifizierung von Permafrost und von Permafrost-Degradationserscheinungen kommt besondere Bedeutung zu. Damit eröffnen sich Forscherinnen und Forschern unterschiedlicher Fachrichtungen neue Dimensionen in der Betrachtung und Analyse von (klimabedingten) Veränderungen der Hochgebirgslandschaft.

## 7 Ausblick auf Teil 2: Reliefsphäre

Der zweite Teil der Arbeit, die sich aus dem Titel „Objektiv messen statt subjektiv schätzen – neue methodische Ansätze zur nachvollziehbaren Quantifizierung von Klimafolgen im Hochgebirge“ ergeben, wird sich in erster Linie mit der flächenhaften Analyse von periglazialen Prozessfolgen beschäftigen. Im Detail werden jene Folgen analysiert, die durch fluviale und/oder gravitative Prozesse ausgelöst wurden. In verstärktem Maße kommen dabei die Vorteile von multi-temporalen ALS-Datensätzen zur Geltung. Methodisch wird auf ein Verfahren zur Analyse von ALS-Daten zurückgegriffen, das sich rein auf die Werte der ursprünglichen Punktdaten bezieht und keine Datenaggregation/-interpolation, wie sie bei der Rastergenerierung notwendig ist, erfordert. Besonders Augenmerk bei den Betrachtungen der Reliefsphäre wird auf multi-prozessuale Entwicklungen gelegt. Auch hier bietet ALS ideale Voraussetzungen zur Analyse von Prozesskaskaden im Hochgebirge.

## 8 Dank

Als Autoren des vorliegenden Artikels bedanken wir uns bei allen jenen, die zum Gelingen des Artikels direkt und indirekt beigetragen haben. Ein besonderer Dank gilt auch allen Institutionen, welche die ALS Kampagnen ermöglicht haben (EU 5. Rahmenprogramm, Tiroler Wissenschaftsfonds, FFG im Rahmen von asap und dem Österreichischen Klima- und Energiefonds im Rahmen des ACRP). Entscheidend für den erfolgreichen Verlauf von Forschungsprojekten ist die Kooperation mit den einzelnen Projektpartnern und deren Institutionen.

## 9 Literatur

- Abegg, B., S. Agrawala, F. Crick & A. de Montfalcon (2007): Climate change impacts and adaptation in winter tourism. In: Agrawala, S. (ed.): *Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management*, OECD, Paris, 25-60.
- Anonym (1969): Mass Balance Terms. In: *Journal of Glaciology*, 8, 3-7.
- Baltsavias, E. (1999): Airborne laser scanning: basic relations and formulas. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2/3), 199-214.
- Barsch, D. (1969): Permafrost in der oberen subnivalen Stufe der Alpen. In: *Geographica Helvetica*, 24(I), 10-12, Zürich.
- Barsch, D. (1988): Rockglaciers. In: Clark, M.J. (Hrsg.): *Advances in Periglacial Geomorphology*, 69-90, Chichester.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu & J.P. Palutikof (eds.) (2008): *Climate Change and Water: Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC Secretariat)*, Geneva.
- Becker, A., & H. Bugmann (Hrsg.) (1997): *Predicting Global Change Impacts on Mountain Hydrology and Ecology: Integrated Catchment Hydrology/Altitudinal Gradient Studies*, International Geosphere.
- Becker, A. & H. Bugmann (eds.) (2001): *Global Change in Mountain Regions*, International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) Report 49, Stockholm.
- Beniston, M. (2003): Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. In: *Climatic Change* 59: 1.
- Böhm, R. (2009): Klimarekonstruktion in der instrumentellen Periode – Probleme und Lösungen für den Großraum Alpen. In: Psenner R., R. Lackner & A. Borsdorf (eds.): *alpine space – man & environment*, Innsbruck: IUP.
- Bollmann, E. (2010): *Airborne Laser Scanning Glacier Mass Balance*. Diplomarbeit, Universität Innsbruck, Institut für Geographie, 112 S.
- Bollmann, E., Sailer, R., Briese, Ch., Stötter, J. & P. Fritzmann (in Druck): Potential of airborne laser scanning for geomorphologic feature and process detection and quantifications in high alpine mountains. In: Special Volume on "Laser Scanning Applications in Geomorphology", *Zeitschrift für Geomorphologie*.
- Breiling, M., P. Charamza & O. Skage (1997): *Klimasensibilität österreichischer Bezirke mit besonderer Berücksichtigung des Wintertourismus, Rapport 1*, Alnarp.
- Campell, E. (1954): Eigenschaften und Erstellung von Trockenmauerwerk. In: *Bündnerwald*, 4, 7, Chur.
- Chesi, G., Krainer, K., Mostler, W. und Weinold, T. (1999): Bewegungsmessungen am aktiven Blockgletscher Inneres Reichenkar mit der GPS-Methode. In: X. Int. Geodätische Woche Obergurgl, 223-227.
- Delaloye, R., Lambiel, C. & I. Gärtner-Roer (2010): Overview of rock glacier kinematics research in the Swiss Alps. Seasonal rhythm, interannual variations and trends over several decades. In: *Geographica Helvetica* 65 (2): 135-145.
- Elsasser, H. (1968): *Untersuchungen an Strukturböden im Kanton Graubünden*. -Dissertation, Zürich.
- Fritzmann, P. (2010): *Surface Classification of High Mountain Environment*. Diplomarbeit, Universität Innsbruck, Institut für Geographie, 103 S.
- Fritzmann, P., Höfle, B., Vetter, M., Sailer, R., Stötter, J. & E. Bollmann (in Druck): Surface classification based on multi-temporal airborne LiDAR intensity data in high mountain environments. A case study from Hintereisferner, Austria. In: Special Volume on "Laser Scanning Applications in Geomorphology", *Zeitschrift für Geomorphologie*.
- Furrer, G. (1955): Die Strukturbodenformen der Alpen. In: *Geographica Helvetica*, 4, 193-213, Zürich.

- Geist, T. & J. Stötter (2007): Documentation of glacier surface elevation change with multi-temporal airborne laser scanner data – case study: Hintereisferner and Kesselwandferner, Tyrol, Austria. In: *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*; 41, 77-106.
- Giorgi, F., J. W. Hurrell, M.R. Marinucci & M. Beniston, 1997: Elevation signal in surface climate change: A model study. In: *Journal of Climate*, 10, 288-296.
- Haeberli, W. & M. Beniston (1998): Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. In: *Ambio*, 27, 258-265.
- Haeberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Kääb, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Matsuoka, N., Springman, S., und D. von der Mühll (2006): Permafrost creep and rock glacier dynamics. In: *Permafrost and Periglacial Processes*, 17(3), 189-214.
- Hassan, R., Scholes, R. & Ash, N. (eds.) (2005): *Ecosystems and human well-being: current state and trends: findings of the Condition and Trends Working Group*. Washington.
- Hoinkes, H. (1968). *Glaciology in the international hydrological decade*. In: *IASH Publication*, 79, 7–16.
- Höfle, B. und N. Pfeifer (2007): Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, 415–433.
- Jäckli, H. (1957): *Gegenwartsgeologie des bündnerischen Rheingebietes*. In: *Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie*, 36, Zürich.
- Kääb, A., M. Charle, B. Raup & C. Schneider (2007): Climate change impacts on mountain glaciers and permafrost. In: *Global and Planetary Change*, 56, vi-ix.
- Kääb, A., Huggel, C., Fischer, L., Guex, S., Paul, F., Roer, I., Salzmann, N., Schläefli, S., Schmutz, K., Schneider, D., Strozzi, T., & Weidmann, Y. (2005): Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5(4), 527-554.
- Kääb, A. (2008): Remote sensing of permafrost-related problems and hazards. In: *Permafrost and Periglacial Processes*, 19(2), 107-136.
- Kaser, G., Grosshauser, M., & B. Marzeion (2010): Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. [online] <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1008162107> (Zugegriffen November 11, 2010).
- Kaufmann, V. & Ladstätter, R. (2002): Spatio-temporal analysis of the dynamic behaviour of the Hohebenkar rock glaciers (Oetztal Alps, Austria) by means of digital photogrammetric methods. In: *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung* 37: 119-140.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2000): Reichenkar Rock Glacier: a Glacier Derived Debris-Ice System in the Western Stubai Alps, Austria. In: *Permafrost and Periglacial Processes* 11: 267-275.
- Kuhn, M., Dreiseitl, E., Hofinger, S., Markl, G., Span, N., & G. Kaser (1999): Measurements and models of the mass balance of hintereisferner. In: *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*, 81(4), 659–670.
- Kuhn, M. (2007): OMEGA: using glaciers as indicators of climatic change. In: *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*; 41, 7-28.
- Lambrech, A. & M. Kuhn (2007): Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory. In: *Annals of Glaciology*, 46, 177-184.
- Lemke, P.J., R. Ren, B. Alley, I. Allison, J. Carrasco, G. Flato, Y. Fujii, G. Kaser, P.W. Mote, R.H. Thomas & T. Zhang (2007): Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. In: Solomon, S.D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (eds.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel Climate Change*, Cambridge, 337-383.
- Matulla, C., H. Formayer, P. Haas & H. Kromp-Kolb (2004): Mögliche Klimatrends in Österreich in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts. In: *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 1-2, 6, 1-9; 0945-358X
- Müller, S.W. (1945): Permafrost or permanent frozen ground and related engineering problems. In: *U.S. Engineers' Office (Hrsg.): Strategic Engineering Study Special Report*, 62, Washington.
- Nyenhuis, M. (2006): Permafrost und Sedimenthaushalt in einem alpinen Geosystem. *Bonner Geographische Abhandlungen*, 116, 142 S.
- Rees, W.G. (2001). *Physical principles of remote sensing*. Cambridge university press. 372 S.
- Roer, I. (2007): Rockglacier kinematics in a high mountain geosystem. *Bonner Geographische Abhandlungen* 117, 217 S.
- Shan, J. & Toth, Ch. K., (2009): *Topographic Laser Ranging and Scanning. Principles and Processing*. In: CRC Press, 590 p.

- Sailer, R., J. Stötter, E. Bollmann, P. Fritzmann, Ch. Georges & T. Geist (2011): ALS-X – Kombination und Bewertung von flugzeuggestützten Laserscannerdaten und TerraSAR-X Daten für glaziologische Fragestellungen. In: Innsbrucker Geographische Gesellschaft, Innsbrucker Jahresbericht 2008-2010, 174-187.
- Sithole, G., Vosselman, G. (2004): Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. In: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 59 1-2 (August 2004) 85-101.
- Span, N., Kuhn, M., & H. Schneider (1997): 100 years of ice dynamics of Hintereisferner, Central Alps, Austria, 1894-1994. In: Annals of Glaciology, 24, 297-302.
- Steiger, R. (2008): The impact of poor winter seasons on ski tourism and the role of snowmaking as an adaptation strategy. In: Borsdorf, A., J. Stötter & E. Vuillet (Hrsg.): Managing Alpine Future. Proceedings of the Innsbruck Conference 15-17 October 2007, (IGF-Forschungsberichte 3), Wien, 95-102.
- Stoffel, M., Lièvre, I., Conus, D., Grisching, M.A., Raetzo, H., Gärtner, H.W., & Monbaron, M. (2005): 400 years of debris flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland. In: Arctic, Antarctic and Alpine Research, 37, 387-395.
- Stötter, J. & M. Coy (2008): Forschungsschwerpunkt Globaler Wandel – regionale Nachhaltigkeit. In: Innsbrucker Geographischen Gesellschaft: Innsbrucker Jahresbericht 2003-2007, 219-240.
- Stötter, J., Maukisch, M., Simstich, J. & Belitz, K. (1996): Auswirkungen des zeitlich/räumlichen Wandels der Permafrostverteilung im Suldental (Ortlergebiet) auf das Gefährdungspotential durch Erosionsprozesse im Lockermaterial, Interpraevent, 1, Klagenfurt, 447-457.
- UNEP & WGMS (2008): Global Glacier Changes: facts and figures.
- Viviroli, D & R. Weingartner (2004): The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. In: Hydrology and Earth System Sciences, 8(6), 1017-1030.
- Viviroli D., H.H. Dürr, B. Messerli, M. Meybeck & R. Weingartner (2007): Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. In: Water Resources Research, 43(7), 1-13.
- Vosselmann, G. & Maas, H.-G., 2010 (Hrsg.). Airborne and terrestrial laser scanning, 2010. Whittles Publishing, 318 S.
- W. Wagner, Ulrich, V. Ducic, T. Melzer, & N. Studnicka (2006): Gaussian Decomposition and Calibration of a Novel Small-Footprint Full-Waveform Digitising Airborne Laser Scanner. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 60 (2006), 2; 100-112.
- Washburn, A.L. (1979): Geocryology. London.
- Wehr, A. & U. Lohr (1999): Airborne laser scanning – an introduction and overview. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 54, 68-82.
- Whalley, W.B. & Martin, H.E. (1992): Rock Glaciers. Part 2: Models and Mechanics. In: Progress in Physical Geography, 16, 2, 127-186, Sevenoaks.