

Kapitel 7 | Blockgletscherbewegung im Äußeren Hochebenkar 1953–2010 – eine Methodenkombination aus digitaler Photogrammetrie und Airborne Laserscanning

Christoph Klug

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Studie ist es, die Veränderungen der Oberflächengeometrie des Blockgletschers Äußeres Hochebenkar über einen Zeitraum von 57 Jahren darzustellen. Die Quantifizierung der Oberflächenveränderungen basiert auf dem Vergleich von multitemporalen digitalen Geländemodellen (DGM) und Orthophotos. Zur Ableitung der Veränderungen wurden aus digitalen, multitemporalen, historischen Luftbildern und aus Airborne (flugzeuggestützten) Laserscanningdaten (ALS) DGM abgeleitet. Durch Subtraktion konnten die vertikalen Änderungen über mehrere Perioden abgeleitet werden. Zusätzlich wurde mit Bildkorrelationsprogrammen sowohl aus den generierten Orthophotos, als auch aus den Schummerungen der ALS-DGM die horizontale Oberflächenbewegung berechnet. Zur Validierung wurden die Ergebnisse mit den jährlich durchgeführten dGNSS-Messungen (differentielles Global Navigation Satellite System) verglichen. Für verschiedene Zeiträume von 1953–2010 konnte somit das Fließverhalten an der Blockgletscheroberfläche rekonstruiert und analysiert werden.

Abstract

The aim of this study is the quantification of vertical and horizontal surface changes of the rock glacier Äußeres Hochebenkar over a period of 57 years. The quantification of the surface changes is based on the comparison of multitemporal digital surface models (DSM) and orthoimages. For the calculation of the vertical and horizontal changes, DSM were generated from aerial photographs and airborne laserscanning (ALS) data. The vertical changes were derived through subtraction of the multitemporal DSM over the different periods. Additionally, the horizontal flow velocity was computed by applying an image correlation program to the orthophoto and DSM. For validation, the results were compared with dGNSS-measured flow velocities. For different periods within 1953–2010, the surface displacements of the well investigated rock glacier Äußeres Hochebenkar are reconstructed and analysed.

1. Einleitung

Mit dem steigenden Interesse der Öffentlichkeit an der Diskussion über den Klimawandel und dessen Auswirkungen treten die Hochgebirge in den letzten Jahren verstärkt als sensible Schlüsselgebiete zur Erforschung des dadurch induzierten globalen Umweltwandels hervor. Besonders am Schwund der Gletscher ist gut zu erkennen, dass die Hochgebirge zu Recht in weltweiten Programmen zur Klima-beobachtung als Paradeuntersuchungsgebiete gelten, welche das Schlüsselsignal „steigende Temperatur in der Atmosphäre“ und damit die Zunahme des Energiegehalts des gesamten Klimasystems widerspiegeln (Lemke et al. 2007). Die enormen klimatischen Gegensätze liegen in Hochgebirgen auf engstem Raum beieinander, weshalb bereits geringste Änderungen der klimatischen Bedingungen früh Auswirkungen zeigen. Innerhalb der Hochgebirgssysteme werden Landschaftsräume oder ökologische Grenzen (z.B. Untergrenze des Auftretens von Permafrost, Baumgrenze) systematisch beobachtet und dienen als wichtige Indikatoren für Umweltänderungen (Lemke et al. 2007). Während die Sensitivität der periglazialen Landschaftsräume sowohl in den hohen Breiten als auch in Hochgebirgen in vielen wissenschaftlichen Publikationen berücksichtigt wird (z.B. Lachenbruch & Marshall 1986, Anisimov & Nelson 1996), wurde die Bedeutung von Blockgletschern in diesem Kontext erst seit kurzem hervorgehoben (Harris & Haeberli 2003, Nyenhuis 2005). Blockgletscher sind beeindruckende Elemente

der Hochgebirgslandschaft und werden oft als Leitform des alpinen Permafrosts bezeichnet. Vor allem aktive Blockgletscher sind gute Indikatoren für die Untergrenze diskontinuierlichen Permafrosts und dadurch indirekt für sich ändernde klimatische Verhältnisse.

Für aktive Blockgletscher lassen sich durchschnittliche Oberflächengeschwindigkeiten von wenigen Zentimetern (Minimum) bis 1–2 Metern (Maximum) pro Jahr (m/a) feststellen (Krainer & Mostler 2006), wobei im Gebiet der Alpen auch höhere Geschwindigkeiten (> 2 m/a) beobachtet wurden (Roer 2005, Haeberli et al. 2006, Avian et al. 2009). Die größten Fließgeschwindigkeiten in den Alpen (bis zu 6,6 m/a) sind am hier präsentierten Äußeren Hochebenkar Blockgletscher gemessen worden (Schneider & Schneider 2001).

In den vergangenen 20 Jahren wurden bei einigen alpinen Blockgletschern steigende Fließgeschwindigkeiten festgestellt (Roer et al. 2005). Es kann von einem Zusammenhang mit der globalen Erwärmung ausgegangen werden. Dazu sind laut Käab & Vollmer (2000) Langzeitstudien zu Veränderungen der Blockgletscheroberflächengeschwindigkeiten in Kombination mit terrestrischen Punktmessungen enorm wichtig für ein besseres Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse. Dennoch sind Langzeitmessungen von Fließgeschwindigkeiten bei aktiven Blockgletschern selten.

Während der letzten Jahrzehnte sind eine Reihe von Methoden für die Quantifizierung von Blockgletscherbewegungen entwickelt worden. Die ersten Ansätze verwendeten zu-

sätzlich zu den zeitintensiven Feldbeobachtungen geodätische Vermessungstechniken (Pillewizer 1957). In jüngster Zeit wurde das differentielle GNSS (dGNSS, differentielles Global Navigation Satellite System) als eine effektive Methode zur Erforschung des Blockgletscherfließens (Lambiel & Delaloye 2004) entdeckt. Der größte Nachteil dieser Methode ist jedoch das Fehlen von flächendeckender Information.

Satelliten- bzw. flugzeuggestützte Fernerkundungstechniken (z.B. Luftbildphotogrammetrie, ALS) erlauben hingegen eine flächendeckende Datenaquise, wodurch Langzeitbeobachtungen der Blockgletschergeometrien sowie vertikaler und horizontaler Oberflächenänderungen (Kääb et al. 1997) erleichtert werden. In letzter Zeit wurden Techniken wie satellitengestützte differentielle Radar-Interferometrie (DInSAR) (Nagler et al. 2001, Strozzi et al. 2004) sowie terrestrisches Laserscanning (TLS) zur Beobachtung und Messung der Morphodynamik von Blockgletschern eingesetzt (Bauer et al. 2003, Bollmann et al. 2012).

Ziel der Untersuchung im Äußeren Hochebenkar ist die Rekonstruktion und Analyse der vertikalen und horizontalen Oberflächenveränderungen des aktiven Blockgletschers mittels Luftbildphotogrammetrie und ALS im Zeitraum von 1953–2010. Der neue Ansatz der Verwendung von ALS-Daten, speziell für die Auswertung der photogrammetrisch abgeleiteten DGM, soll dabei besonders hervorgehoben werden.

2. Untersuchungsgebiet

Das Äußere Hochebenkar (N46°50', O11°00') ist zungenförmig und liegt 4,3 km südsüdwestlich von Obergurgl (Ötztaler Alpen; nähere Standortsbeschreibung siehe Kapitel 3 in diesem Buch).

In Luftbilddaufnahmen ist deutlich zu sehen, dass der Hochebenkar Blockgletscher aus zwei Loben besteht. Nach Schneider & Schneider (2001) weist die jüngere, orographisch linke Lobe durch ständige Schuttfzufuhr vom Hochebenkamm starke Aktivität auf, wohingegen die ältere, orographisch rechte Lobe kaum mehr Aktivität zeigt. Auf etwa 2.580 m Seehöhe befindet sich eine Geländekante, über die sich der Blockgletscher ins Tal der Gurgler Ache vorschiebt.

Im Gegensatz zum gleichmäßigen Permafrostkriechen oberhalb der Geländekante treten im gesamten Zungenbereich unterhalb davon Rutschungen auf, die durch die stark übersteilte Stirn ($> 40^\circ$) zusätzlich gefördert werden. Durch die dabei auftretenden hohen Zugspannungen wurde die Oberfläche des Blockgletschers stark geprägt und der darunterliegende Permafrost teilweise sichtbar (Haberli & Patzelt 1982). Bedingt durch diese besondere topographische Situation wurden immer wieder außergewöhnlich hohe Bewegungsraten gemessen. Laut Schneider & Schneider (2001) wurden in den 1960er Jahren die größten Bewegungsraten ($\sim 6,6$ m pro Jahr) an dieser Geländekante gemessen. Eine detaillierte Charakterisierung der Physiogno-

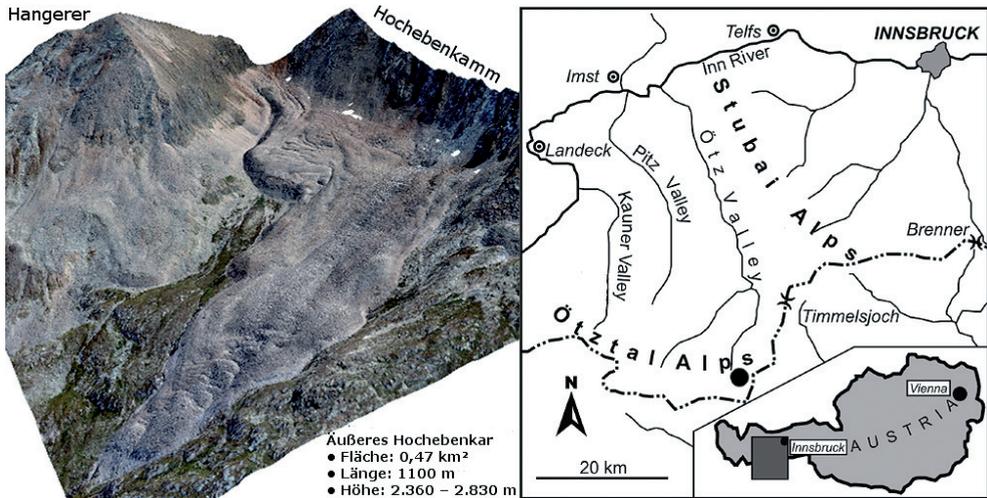


Abb. 1: Untersuchungsgebiet Äußeres Hochebenkar verändert nach Schneider (1999). Foto L. Rieg, August 2010

mie des Äußeren Hochebenkars ist Vietoris (1972) und Haerberli & Patzelt (1982) zu entnehmen.

Geschichte der Bewegungsmessungen im Äußeren Hochebenkar

Der Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar zählt zu den am längsten untersuchten Blockgletschern Österreichs. Bereits 1938 wurden von Pillewizer mit Hilfe terrestrisch photogrammetrischer Methoden (Kaufmann 1996) Bewegungsmessungen durchgeführt. Ab 1951 begann L. Vietoris mit geodätischen Messungen (Vietoris 1972). Diese Messungen wurden ab 1972 von H. Schneider fortgeführt, sodass nun bereits eine über 70-jährige Messreihe vorliegt. Neben diesen terrestrisch-photogrammetrischen Messungen war der

Blockgletscher noch Gegenstand weiterer Forschungsaktivitäten. In den Jahren 1986, 1995 und 1999 wurden ausgehend vom Institut für Angewandte Geodäsie der TU Graz unter der Leitung von R. Kostka und V. Kaufmann drei terrestrisch-photogrammetrische Vergleichsaufnahmen durchgeführt, mit dem Ziel das aktuelle Fließverhalten im unteren, stärker bewegten Teil des Blockgletschers in Form von 3D-Verschiebungsvektoren zu erfassen (Kaufmann 1996). Weitere Arbeiten zur Morphodynamik des Blockgletschers im Äußeren Hochebenkar sind Untersuchungen mittels differentieller Radar-Interferometrie (DInSAR) (Nagler et al. 2001) sowie mittels Luftbildphotogrammetrie (Kaufmann & Ladstädter 2002).

3. Daten

Die Basisdaten, welche für die Auswertung herangezogen wurden (Tab. 1), sind gescannte schwarz-weiß Luftbilder (~3600 dpi) vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) Österreich in Maßstäben zwischen 1:18.000 und 1:43.000, sowie die dazugehörigen Kalibrierungsprotokolle. Für das Untersuchungsgebiet Äußeres Hochebenkar sind Stereobildpaare aus den Jahren 1953, 1969, 1971, 1973, 1977, 1990 und 1997 verfügbar. Um die Zielsetzung bestmöglich verfolgen zu können, ist der Zeitpunkt der Aufnahme sehr wichtig, da sich das Äußere Hochebenkar in

einer Höhe von 2.360–2.830 m befindet und das Gebiet zur DGM-Generierung deshalb schneefrei sein sollte. Ein weiteres Problem, das eine Geländemodellableitung erschwert, ist die durch die Topographie verursachte Abschattung. Von den verwendeten Luftbildern waren allerdings lediglich die Stereobildpaare der Befliegung aus dem Jahr 1973 für eine weiterführende Analyse unbrauchbar (Abschattung über dem ganzen Kar, sowie Schnee).

Zusätzlich wurden aus ALS Daten der Jahre 2006, 2009 und 2010 weiter DGM generiert und vom Land Tirol hochaufgelöste Orthophotos aus den Jahren 2003, 2009 und 2010 zur Verfügung gestellt (Tab. 1).

Tab. 1: Zusammenstellung der Datengrundlagen und Prozessierung. Ortho = Orthophoto; ALS = Airborne Laserscanning

Aufnahme Jahr	Datenquelle	Durchschnittliche Aufnahmehöhe [m]	Maßstab	DGM [Auflösung in m]	Orthophoto [Auflösung in m]
1953	Luftbild	4.500	1:18.000	Ja [1 m]	Ja [0,25 m]
1969	Luftbild	7.000	1:43.000	Ja [1 m]	Ja [0,25 m]
1971	Luftbild	4.800	1:18.500	Ja [1 m]	Ja [0,25 m]
1973	Luftbild	4.800	1:18.500	Nein	Nein
1977	Luftbild	5.200	1:21.000	Ja [1 m]	Ja [0,25 m]
1990	Luftbild	6.000	1:25.000	Ja [1 m]	Ja [0,25 m]
1997	Luftbild	4.300	1:22.000	Ja [1 m]	Ja [0,25 m]
2003	Ortho	–	–	Nein	Ja [0,25 m]
2006	ALS	800	–	Ja [1 m]	Nein
2009	ALS + Ortho	1.000	–	Ja [1 m]	Ja [0,25 m]
2010	ALS + Ortho	1.000	–	Ja [1 m]	Ja [0,25 m]

4. Methoden

Photogrammetrie

Mit Hilfe von Photogrammetrie ist es möglich, geometrische Informationen über Objekte und Prozesse aus analogen oder digitalen Bilddaten zu gewinnen. Dabei wird die mathematisch-geometrische Information von sich überlappenden Photographien zur Erfassung der Topographie ausgenutzt (Käab 2005). Aufgrund ihres hohen Potenzials, die an der Erdoberfläche sichtbaren Erscheinungen zu interpretieren und deren absolute Geometrie zu bestimmen, ist diese Fernerkundungsmethode aus den Geowissenschaften nicht mehr wegzudenken. Bis Ende der 1990er Jahre galt die Photogrammetrie als die klassische Methode zur Erfassung von Oberflächen, wobei besonders die Aerophotogrammetrie mit der Analyse von Luftbildern eine wichtige Rolle spielte.

Das Grundprinzip der Photogrammetrie basiert auf der Tatsache, dass es für jeden Objektpunkt eines Stereobildpaares möglich ist, die dreidimensionalen Geländekoordinaten zu berechnen. Für eine detaillierte Beschreibung der angewandten photogrammetrischen Methoden siehe Baltsavias et al. (2001), Käab (2010) und Klug et al. (2012). Basierend auf diesen Prinzipien können mit Hilfe kommerzieller Softwareprodukte sowohl digitale Geländemodelle als auch Orthophotos mit höchstmöglicher Auflösung aus den monotemporalen Stereobildpaaren generiert werden (vgl. Abb. 2). Die Kontrolle durch

den Bearbeiter ist dabei ein wesentlicher Bearbeitungsschritt, um qualitativ bestmögliche DGM bzw. Orthophotos zu erhalten.

Airborne Laserscanning

In den letzten Jahren hat sich die Fernerkundungsmethode des Airborne Laserscanning (ALS) zu einer der wichtigsten Standardmethoden entwickelt. Ihre Leistungsstärke liegt vor allem in der automatisierten Datenaufzeichnung und Prozessierung, sowie der großen Bandbreite der Anwendung (Geist 2005). Mit Hilfe von ALS können hochgenaue detaillierte Informationen über Geländehöhen, Oberflächeneigenschaften oder Oberflächendynamik der Geländeoberfläche gewonnen werden, was vor allem in entlegenen Gebieten ein großer Vorteil ist. Im Gegensatz zur Photogrammetrie handelt es sich beim ALS um eine aktive Fernerkundungsmethode. Das Grundprinzip liegt darin, dass ein an einem Flugobjekt installierter Laserscanner einen Impuls aussendet und das von der Erdoberfläche reflektierte Signal wieder aufzeichnet. Um die absolute Höhe jedes gemessenen Laserpunktes zu bestimmen wird die Distanz zwischen abgetasteter Oberfläche und dem Flugobjekt gemessen. Die Position des erfassten Bodenpunktes kann dabei mit Hilfe der räumlichen Orientierung des Flugzeuges für jeden Laserpunkt zugeordnet werden. Der GPS-Empfänger zeichnet die exakte Position des reflektierten Signals in einem 3D-Koordinatensystem auf. Zeitgleich nimmt ein Inertiales Navigationssystem (INS) die Flughöhe und Fluggeschwindigkeit sowie

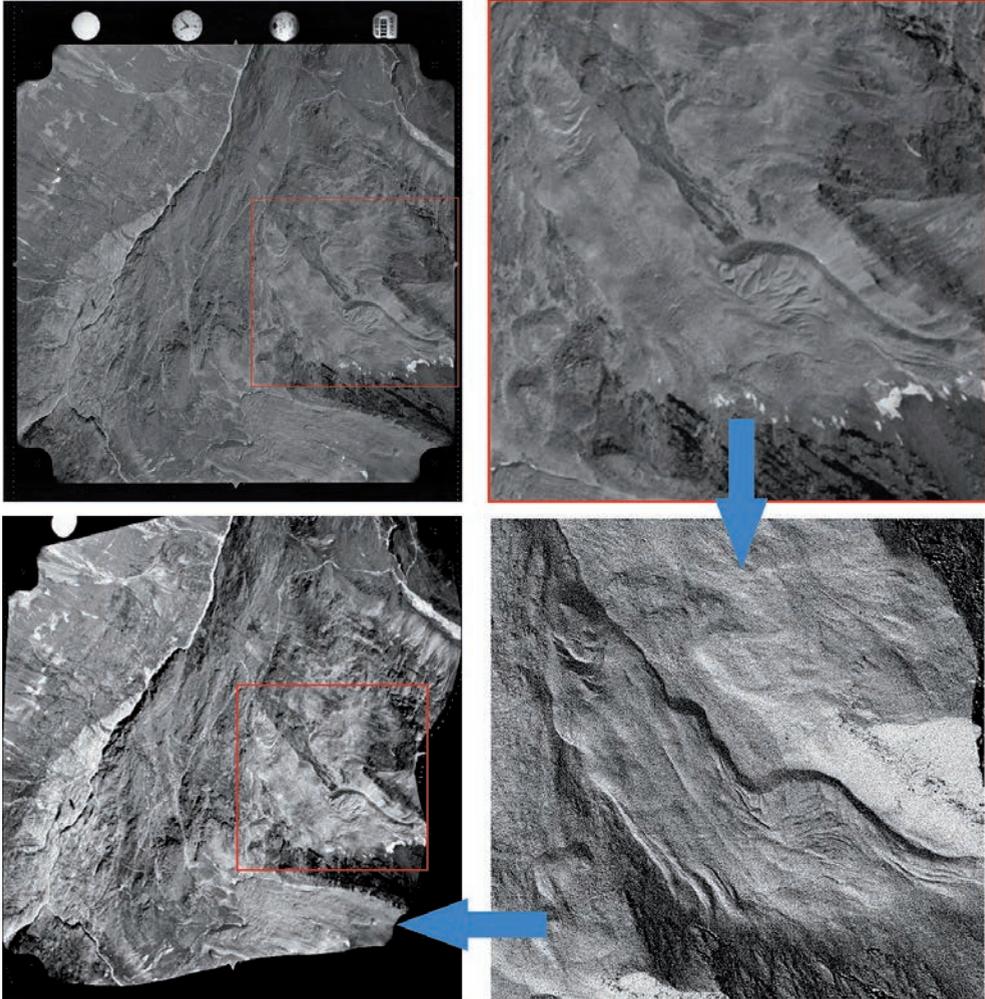


Abb. 2: Vom Luftbild zum digitalen Geländemodell (DGM) und zum Orthophoto. Beispiel aus dem Jahr 1977 für das Äußere Hochebenkar. Unten rechts Schummerung des erstellten DGM und unten links entzerrtes Orthophoto

Quer- und Längsneigung und Kantung des Flugobjekts auf.

Ein großer Vorteil liegt in der beleuchtungsunabhängigen Aufnahmemöglichkeit. ALS ist nicht an das Tageslicht gebunden, wodurch auch beschattete und strukturlose Flächen (Gletscher, Schnee) aufgenommen werden

können. Einzig Wolken, Nebel oder Niederschlag können die Aufnahmequalität negativ beeinflussen (Wagner et al. 2003).

Genauigkeitsanalyse der verwendeten Daten

Um die Oberflächenänderungen zu bestimmen ist es unabdingbar eine Genauigkeitsanalyse der herangezogenen Daten durchzuführen. Eine Grundvoraussetzung für das Ableiten von Geländemodellen aus Luftbildern sind möglichst genaue Passpunkte, sog. Ground Control Points (GCPs). Diese stammen aus dGPS-Messkampagnen, topographischen Karten und Orthophotos in Kombination mit einem hochaufgelösten DGM aus Laserscandaten. Als erstes Kriterium wurden die verwendeten GCPs herangezogen, wobei deren Genauigkeit für das Hochebenkar im Subzentimeterbereich liegt (Niederwald 2009). Das größte Problem bei der Gelände-

modellableitung stellt – neben den teilweise starken Schatten – vor allem das extrem steile Relief dar. Aus diesem Grund wurde bei der Genauigkeitsanalyse der generierten DGM nur auf den unmittelbaren Blockgletscher-randbereich Rücksicht genommen, da sich die Fehler in den steilen Flanken ($> 45^\circ$) auf teilweise mehr als 300 m in Vertikaldistanz belaufen. Diese Bereiche sind jedoch für die Fragestellung nicht relevant. In den Randbereichen (bis max. 40°) konnten die generierten Geländemodelle einer guten Qualitätsanalyse unterzogen werden. Für einen effektiven Vergleich wurden die semi-automatisch generierten DGM mit den hochaufgelösten DGM der ALS-Befliegung verglichen, deren Genauigkeit (Tab. 2) mit Hilfe von 11 Fixpunkten aus den jährlichen dGPS-Bewegungsmessungen

Tab. 2: Berechnete mittlere quadratische Abweichungen (RMS) der generierten DGM zum Referenzgeländemodell (ref.) 2009. Zusätzlich wurden noch die Abweichungen zu den 11 Fixpunkten angegeben. Das Luftbild von 1973 konnte auf Grund von Schnee und Abschattungen nicht bearbeitet werden.

DGM	RMS (stabile Gebiete / Fixpunkte)
2010 (ALS)	0,11 m / 0,09 m
2009 (ALS)	ref. / 0,09 m
2006 (ALS)	0,10 m / 0,15 m
1997	0,41 m
1990	0,42 m
1977	0,25 m
1973	–
1971	0,55 m
1969	0,29 m
1953	0,58 m

(Schneider & Schneider 2001) im Äußeren Hochebenkar validiert wurde.

In einem zweiten Schritt wurden durch Subtraktion der ALS-DGM 2006 von 2010 mehrere Gebiete identifiziert, die keine Oberflächenänderung aufweisen und den Oberflächenstrukturen (Hangneigung, Exposition und Höhe) des Blockgletschers sehr nahe kommen. Durch Vergleich dieser stabilen Gebiete mit den hochaufgelösten ALS-DGM konnten so die Genauigkeiten der photogrammetrisch erzeugten DGM ermittelt werden. Im Großen und Ganzen stellt die durchgeführte Analyse eine relativ gute Abschätzung des vertikalen Fehlers dar. Die Ergebnisse zeigen eine mittlere quadratische Abweichung (= RMS-Fehler) von 0,25–0,6 m und maximale Unterschiede von 1,2 m (Tab. 2).

Für die Ableitung der horizontalen Bewegungen ist eine hohe relative Genauigkeit zwischen den multitemporalen Daten viel wichtiger als die absolute Position der Bilder zueinander (Kääb 2010). Deshalb wurden die erstellten Orthophotos über zusätzliche Kontrollpunkte in unbewegten Gebieten auf das Orthophoto von 2009 co-registriert (Klug et al. 2012). Die maximalen Unterschiede zwischen den multitemporalen Orthophotos betragen nach Bearbeitung nur mehr knapp 20 cm in ruhenden Gebieten, wobei die Richtung der Verschiebung durch die relativ langen Vergleichszeiträume im Vergleich zu den zu messenden Bewegungen irrelevant ist (Klug et al. 2012).

Vertikale Oberflächenänderung

Für die Quantifizierung der vertikalen Änderungen der Blockgletscher Oberflächengeometrie wurden die generierten DGM verglichen. Kumulierte Änderungsraten der Oberfläche wurden dabei durch die Subtraktion der multitemporalen DGM zwischen den Messperioden berechnet (Abb. 3). Die zuvor erwähnte Genauigkeitsanalyse der verwendeten DGM gilt gleichzeitig für die Berechnungen der vertikalen Änderungen. Damit kann die Genauigkeit der erzielten vertikalen Änderungen mit Bezug auf die errechneten RMS-Werte (Tab. 2) abgeschätzt werden. Ableitungsfehler in den DGM, wie z.B. in Steilwänden oder durch Schneebedeckung, führen sehr oft zu außergewöhnlich hohen Änderungswerten in diesen Regionen. Aus diesem Grund wurden diese Bereiche bei der Analyse nicht berücksichtigt.

Horizontale Oberflächenänderung

Die horizontalen Bewegungsraten des Blockgletschers wurden aus Orthophotos und Schummerungen der ALS-DGM mit Hilfe der Software Correlation Image Analysis (CIAS, Kääb & Vollmer 2000) und Image Correlation (Imcorr, Scambos et al. 1992) berechnet. CIAS und Imcorr wurden bereits für eine Vielzahl von Analysen verwendet, bei denen Bewegungsraten für Gletscher und Blockgletscher auf Basis von Orthophotos oder Satellitenaufnahmen berechnet wurden (vgl. z.B. Kääb 2005).

Die Softwareprodukte berechnen Bewegungsraten über eine Korrelations-Funktion, welche die Grauwerte der Bilder als Eingangswert verwendet (Kääb 2010). Der Korrelationsalgorithmus sucht mittels Block Matching eine Sequenz aus Grauwerten (Referenz-Gebiet) aus dem Bild des ersten Zeitraums (t_1) in einem vordefinierten Gebiet (Such-Gebiet) des Bildes des zweiten Zeitraums (t_2). Wenn der Referenz-Block erfolgreich im Bild t_2 wiedergefunden wurde, ergibt die euklidische Distanz der Koordinaten der zentralen Pixel die horizontale Bewegung im Zeitraum zwischen t_1 und t_2 . Die Datei mit dem Ergebnis besteht aus den x- und y-Koordinaten des Referenz-Blocks sowie der Distanz, der Richtung und

dem Korrelationskoeffizienten. Zuordnungsfehler können durch Analyse der Korrelationskoeffizienten sowie der erwarteten Richtung und Distanz der Bewegung erkannt und eliminiert werden. Aufgrund der unterschiedlichen Dauer der Beobachtungsperioden zwischen den Luftbildaufnahmen wurden CIAS und Imcorr mit verschiedenen Parameterkombinationen (Größe der Referenz-Blocks und Search Areas) verwendet. Detaillierte Informationen zu den hier verwendeten Korrelationsprogrammen sind in Kääb & Vollmer (2000) sowie auf der Homepage des NSIDC (2006) und in Scambos et al. (1992) zu finden.

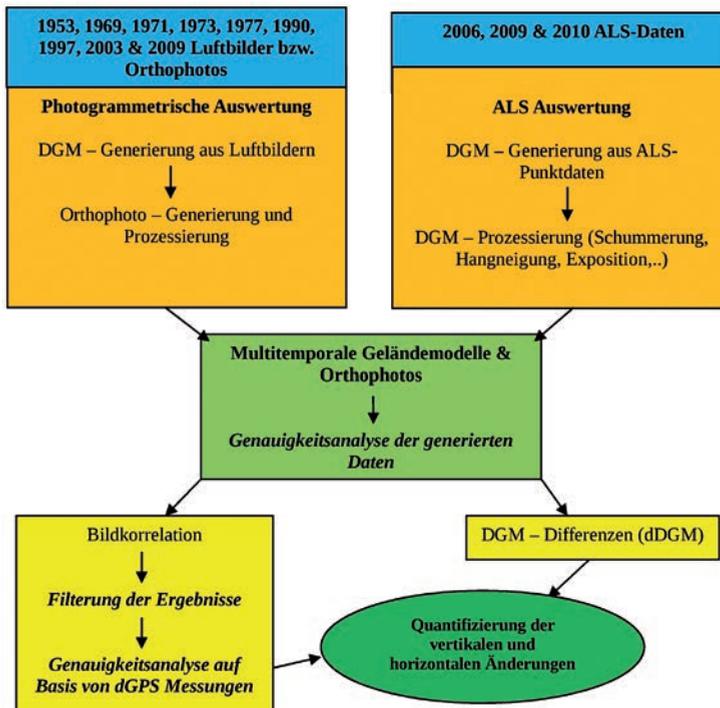


Abb. 3: Überblick der Prozessschritte für die Ableitung der Oberflächenänderungen

5. Ergebnisse und Diskussion

Horizontale Oberflächenänderung

Die horizontale Bewegung des Blockgletschers Äußeres Hochebenkar weist Geschwindigkeitsraten von mehreren Metern pro Jahr auf, die sich zwischen 1953 und 2010 periodisch immer wieder verändert haben (Tab. 3). Auf Basis der Ergebnisse im Äußeren Hochebenkar können zwei zeitlich verschiedene Bewegungsdynamiken unterschieden werden, wie sie auch Schneider & Schneider (2001) bereits beschrieben haben.

In allen Messperioden weist die Wurzelzone relativ geringe Bewegungsraten zwischen 0,02 und 0,25 m pro Jahr auf (Abb. 4). Auffallend ist, dass die Bewegung immer von der Wurzelzone bis zur Stirn zunimmt und eine Art „zonale“ Gliederung zeigt. Im Anschluss an die Wurzelzone schließt sich ein Bereich mit Geschwindigkeiten von 0,25 bis 0,5 m pro Jahr an. An den Rändern des Blockgletschers werden ebenfalls kaum höhere Bewegungsraten erreicht, als sie in diesen zwei Bereichen repräsentiert sind.

Im Mittelbereich schließt sich eine Zone mit Geschwindigkeiten zwischen 0,5 und 0,75 m/a an, deren Ausdehnung sich in den einzelnen Perioden unterschiedlich stark aus-

Tab. 3: Horizontale Geschwindigkeiten v (Durchschnitt, Maximum & Beschleunigung dv in %) am Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar. Der Blockgletscher wurde in drei Zonen eingeteilt (Wurzelzone, Übergangszone und Zunge), in jeder Zone wurde die mittlere jährliche Geschwindigkeit berechnet und anschließend aus den Zonen ein Wert über die Fläche gemittelt.

Hochebenkar				
Periode	Anzahl Blöcke zur Quantifizierung	durchschnittl. v [m/a]	max. v [m/a]	dv [%]
1953–1969	2.438	0,84	5,2	–
1969–1971	2.479	0,64	6,9 (?)	-23,8
1971–1977	2.711	0,42	4,1	-34,4
1977–1990	2.283	0,54	1,85	+28,6
1990–1997	2.865	0,63	1,7	+16,7
1997–2003	2.308	0,77	2,3	+22,2
2003–2009	2.439	0,86	2,5	+11,7
2006–2009	12.200	0,81	2,3	-5,8
2009–2010	13.499	0,82	2,49	+1,2

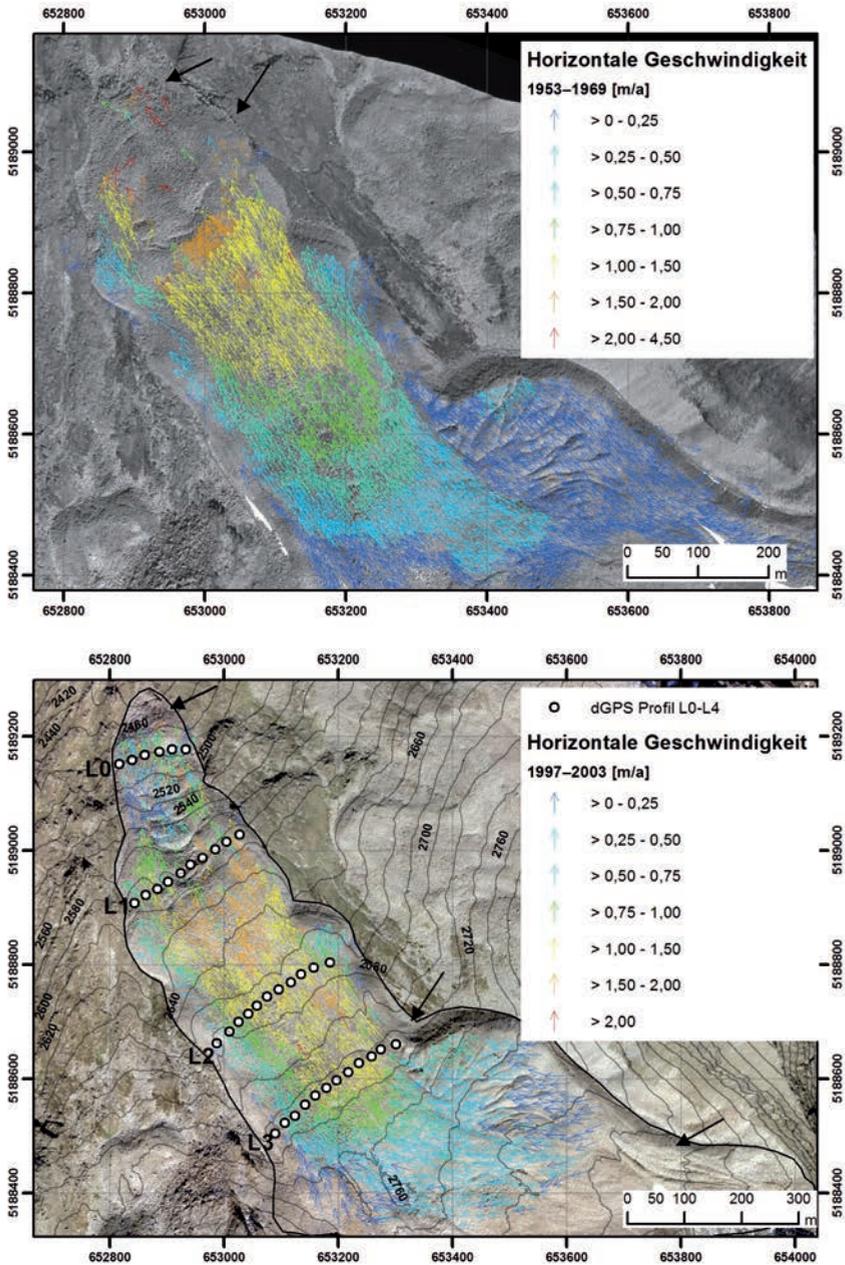
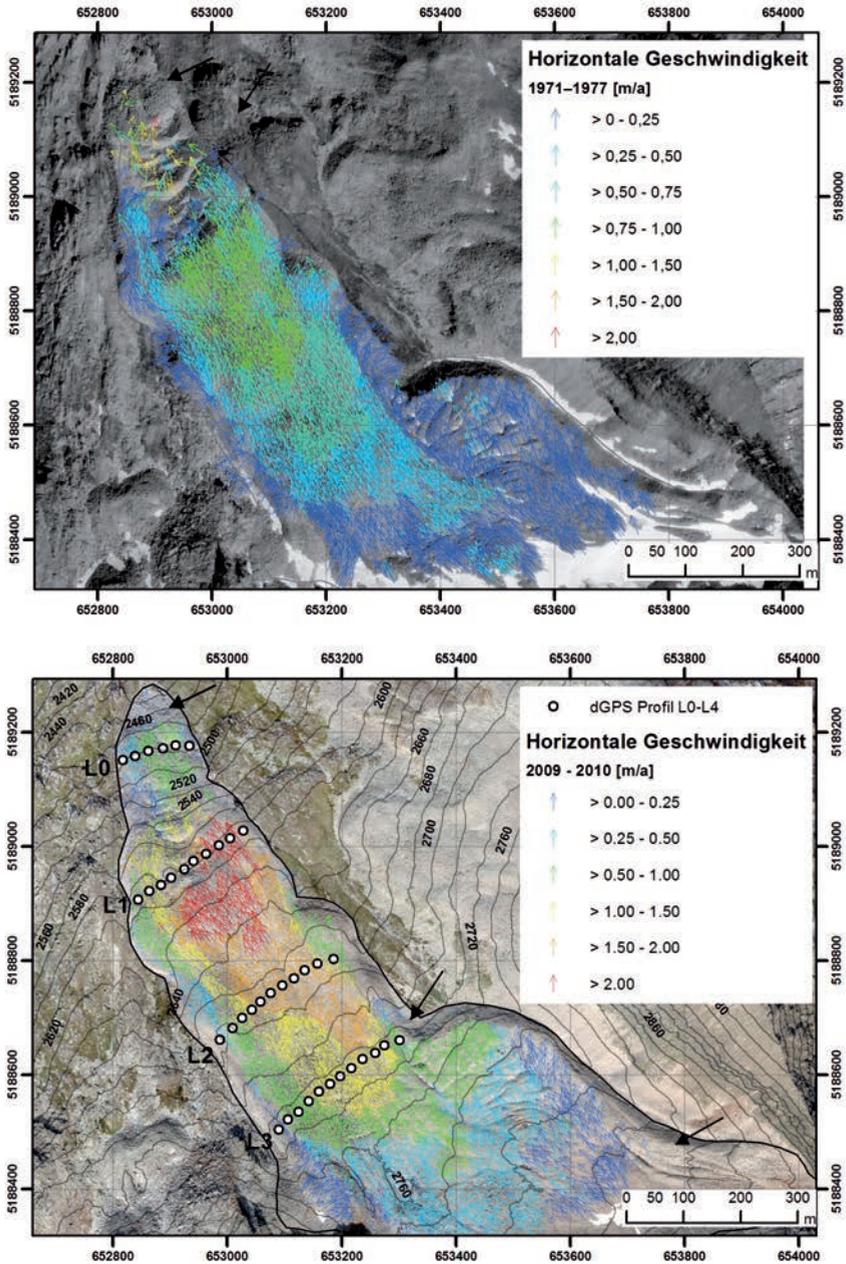


Abb. 4: Beispiele für mittlere jährliche horizontale Geschwindigkeitsableitungen am Äußeren Hochebenkar von 1953–1969 (links oben), 1971–1977 (rechts oben), 1997–2003 (links unten) und 2009–2010 (rechts unten). Die geringeren Fließgeschwindigkeiten in der Periode 1971–1977 im Vergleich zu den anderen

Kapitel 7 | Blockgletscherbewegung im Äußeren Hochebenkar 1953–2010



Messreihen sind deutlich zu erkennen. Schwarze Pfeile zeigen Bereiche, die keine Korrelation zulassen, aufgrund von schlechter Kontrastierung oder Abschattung.

prägt. Zwischen 1997 und 2003 zieht sich der Geschwindigkeitsbereich 0,5–0,75 m/a relativ weit zurück. In einer Höhe von 2.550 m befindet sich eine Zone, die sich mit 0,75–1 m/a bewegt. Sowohl in der Periode 1953–1969, als auch 1997–2003, 2003–2009 und 2009–2010 sind hier allerdings die Bewegungsraten auf 1 bis 1,5 m/a erhöht, was die erhöhte Dynamik in diesen Zeiträumen zeigt (Abb. 4). Am Übergang zur Geländekante werden die höchsten Geschwindigkeiten erzielt (1,5–2 m/a). Ab 2003 wurden hier Geschwindigkeiten über 2 m/a abgeleitet (Abb. 4). Grundsätzlich erreicht der Blockgletscher an der orographisch rechten Seite höhere Geschwindigkeiten.

Im Bereich der Zunge konnten wenige Blöcke identifiziert werden, da diese durch den großen Höhenunterschied und ihre Steilheit sehr oft im Schatten lag. Die höchsten Geschwindigkeiten mit bis zu 6,9 m/a wurden in der Periode 1969–1971 detektiert, wobei sich diese im Bereich der Zunge befanden und sich eher durch Rutschung als durch Permafrostkriechen erklären lassen (Schneider & Schneider 2001). Betrachtet man die gemessenen Maximalwerte sowie die mittleren Bewegungsraten, so war der Zeitraum zwischen 1977 und 1990 mit knapp 1,7 m/a die mit Abstand am wenigsten aktive Zeit. Im Gegensatz dazu zeigen die Perioden 1953–1969, 2003/2006–2009 und 2009–2010 die höchsten Geschwindigkeiten.

Im Äußeren Hochebenkar zeigen sich an der Oberfläche des Blockgletschers zahlreiche Strukturen, an denen die Bewegung gut abgelesen werden kann. So zeigen sich im Wur-

zelbereich an der orographisch rechten Seite markante Rücken und Gräben, die durch kompressives Fließen entstehen und sich quer zur Fließrichtung anordnen. Am Übergang zur Geländekante sind ebenfalls zahlreiche Querspalten zu sehen, wobei diese je nach Bewegungsdynamik unterschiedlich ausgeprägt sind.

Vertikale Oberflächenänderungen

Die kumulierten vertikalen Änderungen wurden durch Vergleich der multitemporalen DGM quantifiziert. Im Wurzelbereich bis auf eine Höhe von knapp 2.700 m zeigen sich über die Perioden 1953–1969 und 1969–1971 Änderungen im Bereich von +0,25 bis +2 m (+0,1 bis +0,3 m/a, Abb. 5). Im Frontbereich sind in derselben Periode starke vertikale Änderungen zu erkennen, die auf das Abrutschen der unteren Zungenpartie des Blockgletschers zurückzuführen sind. Allerdings war die DGM-Generierung in diesem Bereich über alle Messperioden sehr schwierig, da hier durch die starke Geländeneigung Abschattungseffekte auftraten. Von 1971 bis 1977 zeigt sich im Wurzelbereich eine vertikale Änderung von -1 bis -0,5 m (-0,1 bis -0,2 m/a), wobei auch im Frontbereich die Änderungen im Vergleich zur Periode 1953–1969 abgenommen haben. Dies ist ein Hinweis darauf, dass das Abrutschen der Zungenpartie bereits Anfang 1970 abgeschlossen war.

In der Periode 1977–1990 zeigt sich über weite Teile wieder eine vertikale Zunahme von ca. 1 m (0,07 m/a), wobei dies mit der

in dieser Periode relativ geringen Bewegungsdynamik übereinstimmt.

Dynamik

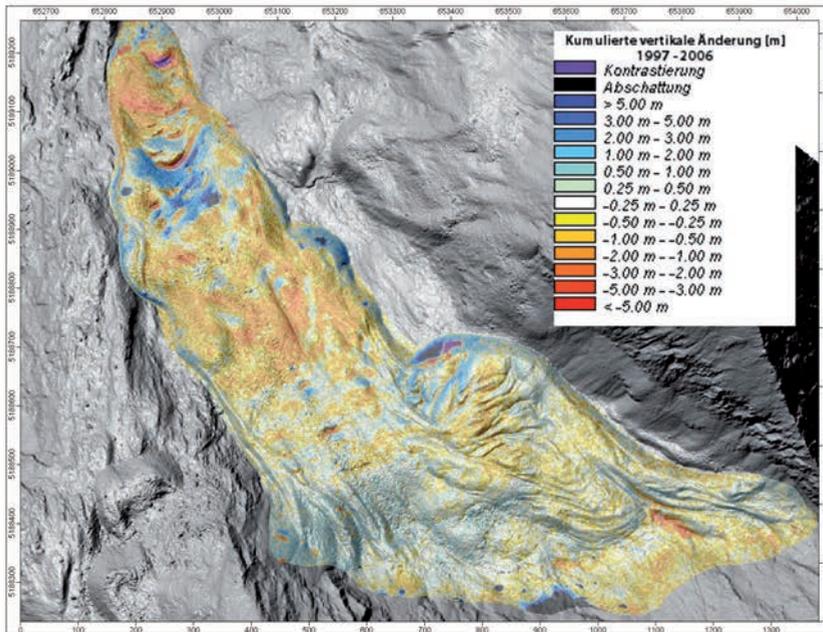
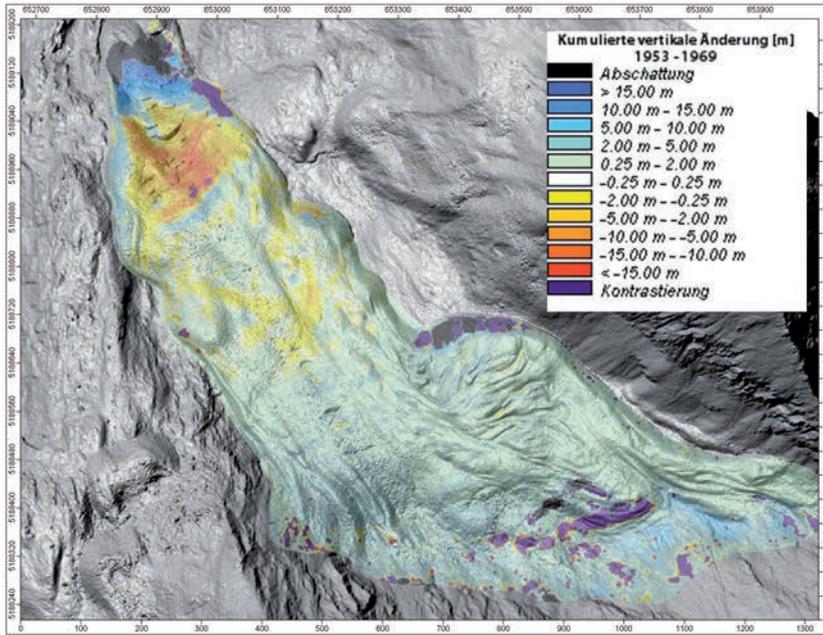
In den Perioden 1990–1997, 1997–2006 und 2006–2009 zeigt sich mit Ausnahme der Zunge ein Massenverlust über die Fläche des Blockgletschers. Die Änderungen im Äußeren Hochebenkar sind zeitgleich uneinheitlicher geworden, mit Höhenverlusten und -gewinnen an verschiedenen Stellen des Blockgletschers. Viele dieser Änderungen werden durch sich bewegende Oberflächenstrukturen erzeugt, vor allem jene Bewegungen an der Stirn. Im Bereich der Blockgletscherfront konnten durch die Abschattung der zum Teil sehr steilen Strukturen nur vage Ergebnisse erzielt werden. Grundsätzlich zeigt die Zungenpartie über alle Messperioden große Massengewinne von teilweise mehr als 15 m (~ 1 m/a). Diese starken Änderungen können auch durch die einzelnen Oberflächenstrukturen beobachtet werden. Am Übergang zur steilen Zungenpartie tritt eine unterschiedlich stark ausgeprägte Querspalte auf, in deren Umgebung in rutschungsaktiven Perioden große Massenverluste angezeigt werden (Abb. 5).

In der Periode 1953–1969 weist das Äußere Hochebenkar im unteren Abschnitt relativ hohe Bewegungsraten (1 bis 2,5 m/a) auf, die durch das Überfahren der Geländekante zustande gekommen sind. Dabei löste sich die untere Zungenpartie vom übrigen Blockgletscher, wodurch ab den 1970er Jahren der Blockgletscher in eine Art Ruhephase mit re-

lativ geringen mittleren jährlichen Geschwindigkeitsraten trat (Tab. 3).

Ab den 1990er Jahren nehmen die Bewegungsraten wieder zu, was Schneider & Schneider (2001) zu der Annahme veranlasste, dass sich der Blockgletscher vom Ablösen der alten Zunge erholt hat. Somit kann die errechnete Geschwindigkeitszunahme in den letzten 19 Jahren ebenfalls wieder verstärkt mit dem Abrutschen im steilen Gelände unterhalb der Geländekante in Zusammenhang stehen. In Tab. 3 sind für jede Messperiode die mittlere und maximale Geschwindigkeit eingetragen, sowie deren prozentuale Beschleunigung.

Zur Validierung der berechneten horizontalen Geschwindigkeiten wurden die dGPS Bewegungsmessungen der Jahre 2006 bis 2010 herangezogen, welche im Äußeren Hochebenkar an 4 Profilen (L0–L3) durchgeführt wurden (Abb. 6). Auf Basis dieser Messungen wurden die mit Imcorr bzw. CIAS abgeleiteten horizontalen Geschwindigkeiten an diesen Punkten durch Extrapolation der ermittelten Bewegungsraten überprüft. Dabei ergab sich eine relativ gute Korrelation, wobei die mittlere Abweichung der horizontalen Fließraten und der dGPS-Ergebnisse zwischen 0,08 und 0,19 m liegt. Diese niedrigen Werte sind ein Indikator, dass es zu keiner systematischen Über- bzw. Unterschätzung der Geschwindigkeitsableitung kam. Zur Genauigkeitsabschätzung in dieser Studie wurde die Standardabweichung herangezogen, wobei für die Periode 2009–2010 Abweichungen von über 0,30 m und für die Periode 2006–2010 von über 0,50 m zur statistischen Analyse herangezogen wurden (Tab. 4).



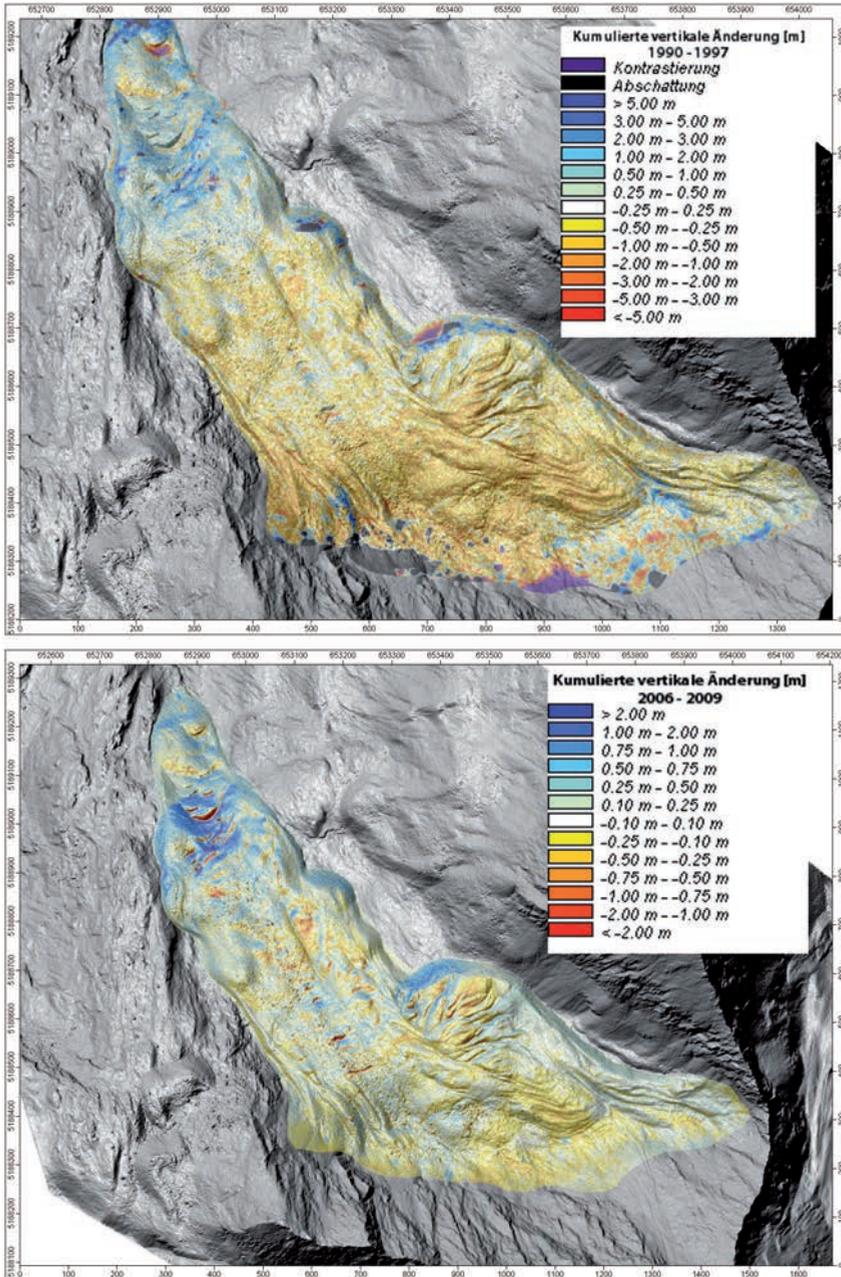


Abb. 5: Beispiele für kumulierte vertikale Oberflächenänderungen am Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar von 1953–1969 (links oben), 1990–1997 (rechts oben), 1997–2006 (links unten) und 2006–2010 (rechts unten)

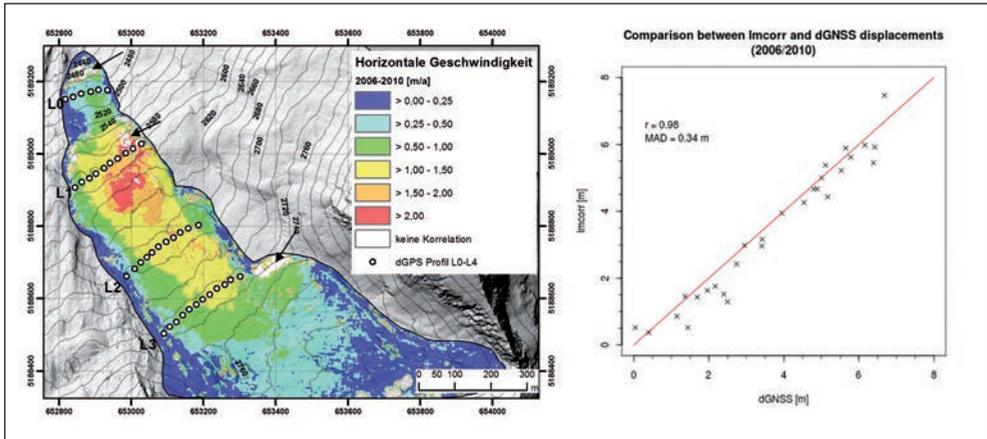


Abb. 6: Vergleich der gemittelten gemessenen mit Imcorr abgeleiteten horizontalen Bewegungen (2006–2010) mit den dGPS Messungen.

Tab. 4: Vergleich zwischen den Geschwindigkeitsableitungen mit Imcorr/CIAS und dGPS-Messungen. Mean: Mittlere Abweichung zwischen dGPS und Imcorr bzw. CIAS; Std: Standardabweichung; Max / Min: Maximum/Minimum-Abweichung; RMS: mittlerer quadratischer Fehler; R²: Korrelationskoeffizient.

Imcorr /CIAS – dGPS	Mean [m]	Std. [m]	Max. [m]	Min. [m]	RMS [m]	R ²
Imcorr Pkt. 09–10	-0,10	0,36	0,96	-1,28	0,37	0,92
Imcorr Raster 09–10	-0,08	0,30	0,52	-0,91	0,30	0,94
CIAS Pkt.09–10	-0,12	0,36	1,18	-0,81	0,40	0,91
CIAS Raster 09–10	-0,09	0,32	0,86	-0,71	0,34	0,94
Imcorr Pkt. 06–10	-0,19	0,51	1,09	-1,11	0,54	0,97
Imcorr Raster 06–10	-0,12	0,50	1,27	-1,15	0,50	0,98

Die Analyse zeigt, dass die Genauigkeiten der Fließraten für die Periode 2009–2010 besser sind als für die Periode 2006–2010, wobei dies mit Sicherheit durch den längeren Betrachtungszeitraum und den dadurch erhöhten Einfluss der vertikalen Komponente auf

die Bewegungsrate bewirkt wird. Darüber hinaus führte die Interpolation der Punktdaten zu einer Verbesserung der Genauigkeiten, was wiederum der Tatsache zuzuschreiben ist, dass Fehlableitungen bei der Interpolation eliminiert werden (Bollmann et al. 2012).

Bewegungsmuster

Im Äußeren Hochebenkar können die vertikalen Änderungen nicht leicht mit den horizontalen Bewegungsraten korreliert werden. Bei der vergleichenden Betrachtung der Längsprofile wird deutlich, dass oberhalb der Geländekante bei 2.570 m Seehöhe die vertikalen Änderungen minimal sind. Unterhalb dieser ist die Oberfläche allerdings teilweise stark eingesunken. Zwischen 1953 und 1969 verliert hier der Blockgletscher die meiste Masse, was auf die topographisch bedingten hohen Bewegungsraten zurückzuführen ist. In den 1970er Jahren kommt es zu einer weiteren Dickenabnahme an der Zunge (bis zu 15 m), die sich bis heute trotz weiterem Vorrücken fortsetzt. Zwischen 1977 und 2009 ist die Oberfläche im Bereich von 2.450 m Seehöhe nochmals stark eingesunken, was nach Schnei-

der & Schneider (2001) ein Anzeichen für das Ende des Abreißprozesses der Zunge ist. Der errechnete Maximalwert der vertikalen Änderung über die Gesamtperiode 1953–2010 liegt auf 2.510 m Seehöhe bei knapp 20 m. Waren in diesen Phasen die vertikalen Änderungen relativ einheitlich, so zeigt sich ab den 1990er Jahren ein inhomogeneres Bild. Höhenverluste und -gewinne an verschiedenen Stellen des Blockgletschers können zwar durch sich bewegende Oberflächenstrukturen erklärt werden (vor allem die Bewegungen an der Stirn), zahlreiche Bereiche lassen sich allerdings nur schwer erklären und würden einer genaueren geophysikalischen Untersuchung bedürfen.

Aus den erzeugten DGM wurde über alle Messperioden entlang der Fließlinie ein Profil gelegt, anhand dessen die gesamte vertikale Änderung veranschaulicht wurde (Abb. 7).

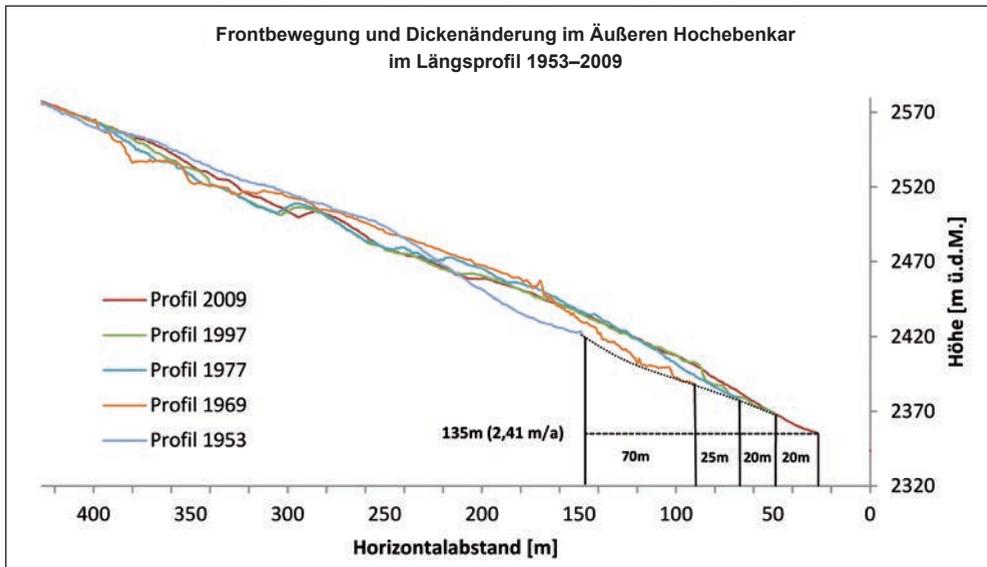


Abb. 7: Detailprofil der Blockgletscherfront im Äußeren Hochebenkar.

Zusätzlich wurde die Frontbewegung detailliert dargestellt.

Im Äußeren Hochebenkar bewegte sich die Stirn zwischen 1953 und 2009 um 135 m nach vorne. Dies entspricht einer Geschwindigkeit von 2,4 m/a. Seit 1969 haben die Vorrückbeträge allerdings stark abgenommen. Zurzeit rückt die Blockgletscherfront ungefähr 1,6 m im Jahr vor, im Vergleich zu 5 m pro Jahr zwischen 1953 und 1969. Zusätzlich ist aus der Graphik ersichtlich, dass sich der Übergang zwischen der Stirnböschung und der Blockgletscheroberfläche in den letzten Jahren immer wieder verändert hat (Abb. 7).

6. Schlussfolgerung

Das Ergebnis der gezeigten Arbeiten ist die flächendeckende Quantifizierung der horizontalen und vertikalen Bewegungen des Blockgletschers im Äußeren Hochebenkar für den Zeitraum von 1953–2010. Es konnte festgestellt werden, dass bei diesem Blockgletscher mit Ausnahme der Front Permafrostkriechen der wichtigste Faktor für die Oberflächenänderungen ist.

DGM, abgeleitet aus multitemporalen Laserdaten und Luftbildern, dienen als Grundlage zur Bestimmung der vertikalen Änderungen. Orthophotos und aus ALS-Daten generierte Hillshades bildeten die Basis für die Ableitung der horizontalen Geschwindigkeiten mit den Korrelationsprogrammen CIAS und Imcorr.

Um die Methoden zur Ableitung der Oberflächenänderungen optimal anwenden zu können, bedarf es einer guten Datengrundlage. Aus diesem Grund müssen die Luftbilder anfangs auf ihre Brauchbarkeit überprüft werden (Abschattungen, Schneefelder, Bewölkung, Kontrast, u.v.m.), um spätere Fehler zu vermeiden. Auch die Laserdaten müssen vorprozessiert werden, um eventuelle Probleme in den DGM zu vermeiden. Auf Basis guter Daten lassen sich räumliche Veränderungen an der Blockgletscheroberfläche berechnen und analysieren.

Zusammengefasst kann man sagen, dass die Luftbildphotogrammetrie ein breites Methodenspektrum zur Kartierung und Beobachtung von Blockgletschern, ihrer Topographie und Dynamik bietet. Die Information in Luftbildern ist sehr effizient gespeichert, da sie zu jeder Zeit abgerufen werden kann. Eines der größten Probleme bei der Generierung von DGM aus analog gescannten Luftbildern stellt der unzureichende radiometrische Kontrast (z.B. Abschattungen oder Neuschneeaufgabe) der Luftbilder dar, wodurch die Messung korrespondierender Geländepunkte in den Stereobildpaaren verhindert wird. Dieser Effekt beeinflusst die Qualität der DGM und schränkt die angewandte Methode zeitlich sehr ein, indem nur Bilder verwertbar sind, die zu bestimmten Tageszeitpunkten bzw. im Sommer entstanden sind (Käab 2010). Aus diesen genannten Gründen wird die ALS-Technologie immer wichtiger, da sie vor allem durch Abschattung viel weniger beeinflusst wird. Zudem kann eine Kombination von digitaler Photogrammetrie und ALS, wie in

dieser Arbeit bewiesen, durchaus relevante Daten für periglaziale und glaziale Untersuchungen bereitstellen (Kraus 2002). So können geometrisch und radiometrisch präzise Bilddaten mit einem präzisen DGM für weiterführende Analysen kombiniert werden. Auch wenn die photogrammetrische Bearbeitung analoger Filme durch digitale Aufnahmegерäte ersetzt wird, so spielt die Analyse historischer Luftbilddaten noch immer eine wichtige Rolle in der Analyse von Oberflächenänderungen, da die oft langen Zeitreihen von Fernerkundungsdaten gerade in der Kryosphärenforschung einen unschätzbaren Wert für die Rekonstruktion von Oberflächengeometrien besitzen (Kääb 2010).

Die angewandte Methode bzw. die damit erzielten Ergebnisse können eine profunde Grundlage für weitere wissenschaftliche Untersuchungen bilden. Das flächendeckende Fließverhalten der Blockgletscher dient als wertvolle Information für eine mögliche Modellierung der Blockgletscherdynamik. Mit Hilfe der abgeleiteten Daten können diese Modelle kalibriert werden bzw. als Vergleichswerte zu modellierten Fließraten herangezogen werden.

Gleichzeitig könnten die gewonnenen Resultate einer räumlich-statistischen Analyse unterzogen werden. So könnten Geländeparameter aus den DGM abgeleitet werden und zur statistischen Erklärung der Blockgletscherbewegung herangezogen werden. Dadurch können die rheologischen Mechanismen, die durch eine Änderung der Antriebsfaktoren beeinflusst werden, besser verstanden werden. Aus den errechneten multitemporalen Ände-

rungsraten können Rückschlüsse auf eventuelle Antriebsfaktoren gezogen werden. Um eine detailliertere Analyse der Blockgletscherdynamik zu erhalten, müssen Daten über die interne Struktur, Temperaturen und Geschwindigkeiten sowie klimatische Änderungen verstärkt über einen längeren Zeitraum überwacht bzw. erhoben werden.

Viele Untersuchungen konzentrieren sich auf einen einzelnen Blockgletscher. Aus diesem Grund ist das Wissen um mesoskalige Blockgletscher- und Permafrostentwicklung nur limitiert. Die angewandte Methode, speziell das ALS, bietet nun eine gute Möglichkeit, ausgewählte repräsentative Blockgletscher über einen längeren Zeitraum und einen größeren Maßstab als den lokalen, zu untersuchen.

Die in dieser Studie vorgenommenen Berechnungen zur Morphodynamik des Blockgletschers im Äußeren Hochebenkar bestätigen zusammenfassend die Eigenschaften, die aus den detaillierten Beschreibungen der bisherigen 60jährigen Messergebnisse (Schneider & Schneider 2001) abgeleitet wurden.

1. Der Blockgletscher im Äußeren Hochebenkar zeigt im Vergleich zu anderen Blockgletscher auffallend hohe Bewegungsraten.
2. Die Bewegungsraten nehmen seit den 1990er Jahren wieder signifikant zu.
3. Die Bewegungsraten sind über die Jahre immer wieder Geschwindigkeitsschwankungen ausgesetzt.
4. Die hohe Bewegungsdynamik ist von der Reliefsituation beeinflusst.

Literatur

- Anisimov, O.A. & Nelson, F.E. (1996) Permafrost distribution in the northern hemisphere under scenarios of climate change. *Global and Planetary Change* 14: 59-72.
- Avian, M., Kellerer-Pirklbauer, A. & Bauer, A. (2009) LiDAR for monitoring mass movements in permafrost environments at the cirque Hinteres Langtal, Austria, between 2000 and 2008. *Natural Hazards and Earth System Sciences, Special Issue: LIDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization*.
- Baltsavias, E.P., Favey, E., Bauder, A., Boesch, H. & Pateraki, M. (2001) Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring. *Photogrammetric Record* 17(98): 243-273.
- Bauer, A., Paar, G. & Kaufmann, V. (2003) Terrestrial laser scanning for rock glacier monitoring. In: Phillips, M., Springman, S.M. & Arenson, L.U. (eds), *Proceedings of the 8th international conference on permafrost*. Swets and Zeitlinger, Lisse, 1, 55-60.
- Bollmann, E., Abermann, J., Klug, C., Sailer, R. & Stötter, J. (2012) Quantifying rockglacier creep using airborne laser-scanning. A case study from two rockglaciers in the Austrian Alps. *Proceedings of the tenth International Conference on Permafrost*, Tyumen, Russia.
- Geist, T. (2005) Application of airborne laser scanning technology in glacier research. Dissertation, Institut für Geographie, Innsbruck.
- Haerberli, W. & Patzelt, G. (1982) Permafrostkartierung im Gebiet der Hochebenkar-Blockgletscher. *Obergurgl, Ötztaler Alpen. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie* 18(2): 127-150.
- Haerberli, W., Hallet, B., Arenson, L., Elconin, R., Humlum, O., Käab, A., Kaufmann, V., Ladanyi, B., Matsuoka, N. & Vonder Mühll, D. (2006) Permafrost creep and rock glacier dynamics. *Permafrost and Periglacial Processes* 17 (3): 189-214.
- Harris, C. & Haerberli, W. (2003) Warming permafrost in the mountains of Europe. *Bulletin of the World Meteorological Organization* 52(3): 1-6.
- Käab, A. (2005) Mountain glaciers and permafrost creep. Research perspectives from earth observation technologies and geoinformatics. Habilitation, Department of Geography, ETH Zürich.
- Käab, A. (2010) Aerial photogrammetry in glacier studies. In: Pellikka, P. & Rees, W.G. (eds), *Remote sensing of glaciers. Techniques for topographic, spatial and thematic mapping of glaciers*. CRC Press/Balkema, Leiden, 115-136.
- Käab, A., Haerberli, W. & Gudmundsson, H. (1997) Analysing the creep of mountain permafrost using high precision aerial photogrammetry: 25 years of monitoring Gruben rock glacier, Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 8: 409-426.

- Kääb, A. & Vollmer, M. (2000) Surface geometry, thickness changes and flowfields on creeping mountain permafrost: automatic extraction by digital image analysis. *Permafrost and Periglacial Processes* 11(4): 315-326.
- Kaufmann, V. (1996) Geomorphometric monitoring of active rock glaciers in the Austrian Alps. 4th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography.
- Kaufmann, V. & Ladstädter, R. (2002) Monitoring of active rock glaciers by means of digital photogrammetry. ISPRS Commission III, Symposium "Photogrammetric Computer Vision". Austria, Graz.
- Klug, C., Bollmann, E., Sailer, R., Stötter, J., Krainer, K. & Kääb, A. (2012) Monitoring of permafrost creep on two rock-glaciers in the Austrian Eastern Alps – Combination of aerophotogrammetry and airborne laserscanning. *Proceedings of the tenth International Conference on Permafrost, Salekhard, Russia, 2012*: 210-215.
- Krainer, K. & Mostler, W. (2006) Flow velocities of active rock glaciers in the Austrian Alps. *Geografiska Annaler* 88(a): 267-280.
- Kraus, K. (2002) Laser-Scanning ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. *Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik* 100(10): 620-624.
- Lachenbruch, A.H. & Marshall, B.V. (1986) Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic. *Science* 234: 689-696.
- Lambiel, C. & Delaloye, R. (2004) Contribution of real-time kinematic GPS in the study of creeping mountain permafrost: examples from the Western Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes* 15: 229-241.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R. & Zhang, T. (2007) Observations: Changes in snow, ice and frozen ground. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (eds), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Nagler, T., Mayer, Ch. & Rott, H. (2001) Feasibility of DINSAR for mapping complex motion fields of Alpine ice- and rock-glaciers. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*, Sheffield, UK, 11–14 September 2001.
- Niederwald, T. (2009) Festpunktbestimmung mit GPS für Gletscher – Monitoring – Projekte in den Öztaler Alpen (Tirol). Diplomarbeit, Fakultät für Geoinformation, Hochschule für angewandte Wissenschaften, FH München.
- NSIDC (2006) IMCORR Software. <https://nsidc.org/data/velmap/imcorr.html> (13.02. 2011).

- Nyenhuis, M. (2005) Permafrost und Sedimenthaushalt in einem alpinen Geosystem. Dissertation, Geographisches Institut, Universität Bonn.
- Pillewizer, W. (1957) Untersuchungen an Blockströmen der Öztaler Alpen. Abhandlungen des Geographischen Institutes der Freien Universität Berlin 5: 37-50.
- Roer, I. (2005) Rockglacier kinematics in a high mountain geosystem. Dissertation, Geographisches Institut, Universität Bonn. http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online/math_nat_fak/2005/roer_isabelle
- Roer, I., Käab, A. & Dikau, R. (2005) Rockglacier kinematics derived from small-scale aerial photography and digital airborne pushbroom imagery. Zeitschrift für Geomorphologie 49(1): 73-87.
- Scambos, T.A., Dutkiewitz, M.J., Wilson, J.C. & Bindschadler, R.A. (1992) Application of image cross-correlation software to the measurement of glacier velocity using satellite data. Remote Sensing of Environment 42: 177-186.
- Schneider, B. (1999) Die Bewegungsmessungen am Blockgletscher im äußeren Hochebenkar. Diplomarbeit, Universität Innsbruck.
- Schneider, B. & Schneider, H. (2001) Zur 60jährigen Messreihe der kurzfristigen Geschwindigkeitsschwankungen am Blockgletscher im Äusseren Hochebenkar, Öztaler Alpen, Tirol. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 37(1): 1-33.
- Strozzi, T., Käab, A. & Frauenfelder, R. (2004) Detecting and quantifying mountain permafrost creep from in-situ, airborne and spaceborne remote sensing methods. International Journal of Remote Sensing 25(15): 2919-2931.
- Vietoris, L. (1972) Über die Blockgletscher des Äußeren Hochebenkars. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialogie 8: 169-188.
- Wagner, W., Ullrich, A. & Briese, C. (2003) Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation 4: 223-235.

Verzeichnis des Autors:

Christoph Klug
Universität Innsbruck
Institut für Geographie
Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich
Christoph.Klug@uibk.ac.at