

Tschadinhorn Blockgletscher, Schobergruppe, Hohe Tauern – ein Beitrag zur aktuellen Kinematik

Viktor Kaufmann, Kevin ROTH und Gernot Seier

Zusammenfassung

Die Fließgeschwindigkeit von Blockgletschern wird im hohen Maße durch die Temperatur beeinflusst. Es wird angenommen, dass die an vielen Blockgletschern z. B. im Alpenraum beobachtete beschleunigte Bewegung ihre Ursache im globalen Klimawandel (atmosphärische Erwärmung) hat. In diesem Beitrag wird die Ermittlung der Kinematik des Tschadinhorn Blockgletschers für den Zeitraum 2002-2016 mithilfe von flugzeuggestützten Methoden (konventionelle Luftbildbefliegung, Airborne Laserscanning, UAV-Befliegung) und terrestrischen Messungen (RTK-GNSS) beschrieben. Die erzielten Ergebnisse bestätigen auch für diesen Blockgletscher eine stark beschleunigte Bewegung mit einer Zunahme der mittleren Jahresbewegung von 0,78 auf 3,01 m/Jahr (Betrachtungszeitraum 2006-2015).

1 Einleitung

1.1 Hochgebirgspermafrost

Permafrost ist gefrorener Boden, der über mindestens zwei aufeinander folgende Jahre hinweg Temperaturen unter 0 °C aufweist (IPA 2017). Permafrost kommt nicht nur in den arktischen und subarktischen Regionen vor, sondern auch in den kalten Regionen hoher Berge. Hochgebirgspermafrost findet man z. B. in den Alpen, den Rocky Mountains, den Anden und in der Himalaya-Region. Permafrost kann kontinuierlich, diskontinuierlich, sporadisch und isoliert sein. Eine exakte Kartierung der unter Permafrost stehenden Bereiche im Hochgebirge ist – da nicht direkt sichtbar – schwer möglich und kann nur durch entsprechende Modellrechnung in Form einer potenziellen Permafrostverteilung abgeschätzt werden (z. B. BOECKLI et al. 2012 für den Alpenraum).

In allen europäischen Ländern mit Permafrostgebieten (Schweiz, Italien, Österreich, Frankreich, Deutschland, Slowenien, und Liechtenstein; die beiden letzten nur marginal) ist die unter Permafrost stehende Fläche stets größer als die vergletscherte Fläche des betreffenden Landes (BOECKLI et al. 2012). Die potenzielle Permafrostfläche in Österreich beträgt ca. 484 km² (Index $\geq 0,9$); 415,5 km² sind Gletscherflächen (FISCHER et al. 2015).

1.2 Blockgletscher

Blockgletscher sind Kriechphänomene des diskontinuierlichen Permafrosts im Hochgebirge. Sie sind ein Gemenge aus Lockermaterial (Schutt) und Eis und sind im Gelände als charakteristische, lavaartige Fließstrukturen gut erkennbar. Aktive Blockgletscher bewegen sich

aufgrund der internen Deformation des Eises der Schwerkraft folgend langsam hang- bzw. talabwärts (BARSCH 1996). Die Bewegungsraten liegen im Bereich von wenigen Zentimetern bis mehreren Metern pro Jahr. Die Gesamtbewegung kann sich aus einer Kriech- und/oder Gleitkomponente in einem oder mehreren Tiefenhorizonten zusammensetzen. Blockgletscher können intakt oder reliktsch (fossil) sein. Intakte Blockgletscher stehen unter Permafrosteinfluss, müssen sich aber nicht unbedingt bewegen. Eine zeitweise Inaktivität kann aus klimatischen oder auch topographisch-morphologischen Gründen hervorgerufen sein (BARSCH 1996). Die Entstehung von Blockgletschern wird kontrovers diskutiert (BERTHLING 2011).

1.3 Blockgletscher als Klimaindikatoren

Das im Blockgletscher gebundene Eis ist ursächlich für die Bewegung bzw. i. Allg. für die Deformation des Permafrostkörpers verantwortlich. Über die Temperatur wird das plastische Verhalten des Eises maßgeblich beeinflusst (MÜLLER et al. 2016). Ist das im Blockgletscher enthaltene Eis vollkommen abgeschmolzen, stoppt die Blockgletscherbewegung vollends durch die interne Reibung der sonstigen festen Bestandteile (Lockermaterial in verschiedenen Korngrößen) des Blockgletschers. Aus der vertikalen Verteilung der reliktschen/fossilen Blockgletscher und einer Altersabschätzung können Beiträge zur Rekonstruktion der lokalen/regionalen Klimageschichte erarbeitet werden. Eine Altersabschätzung reliktscher bzw. auch intakter Blockgletscher ist oft nicht leicht und kann morphologisch, durch die Schmidt-Hammer Methode und auch bei aktiven Blockgletschern durch die Fließgeschwindigkeit (grob) erfolgen.

Studien wie z. B. KELLERER-PIRKLBAUER & KAUFMANN (2012) belegen, dass die Blockgletscherbewegung stark mit der Temperatur (Lufttemperatur, Bodentemperatur) korreliert. Die Erwärmung der Atmosphäre als Auswirkung des globalen Wandels hat zu einer beschleunigten Bewegung bei vielen Blockgletschern nicht nur in Europa, sondern auch in anderen Gebirgen der Erde geführt. Die damit einhergehende Permafrostdegradation kann Ursache für Naturgefahren, wie Steinschlag und Murgänge, sein (SCHOENEICH et al. 2015). Die Gefährdung von besiedeltem Raum ist jedoch nur in den seltensten Fällen gegeben. Die Reaktionszeit der Blockgletscherbewegung auf eine Temperaturänderung kann unterschiedlich lang sein.

1.4 Permafrost- und Blockgletscherforschung in Österreich

Erste Hinweise zur Blockgletscherforschung in Europa stammen aus der Schweiz (CHAIX 1923). Darauf beziehend starteten 1923/24 erste Bewegungsmessungen an einem Blockgletscher in Österreich. Eine Zusammenfassung der Forschungsaktivitäten über Permafrost und Blockgletscher in Österreich geben KRAINER et al. (2012). Seit 1998 ist Österreich Mitglied der Internationalen Permafrost Association (IPA). Besonderes Interesse in Österreich galt und gilt weiterhin der Bewegungsmessung an Blockgletschern. Der Blockgletscher im Äußeren Hohebenkar, Ötztaler Alpen, Tirol, ist weltweit einer der wenigen Blockgletscher mit einer besonders langen Messreihe. Erste Bewegungsmessungen wurden bereits 1938 durchgeführt (KRAINER et al. 2012).

2 Tschadinhorn Blockgletscher

2.1 Geographische Lage und Beschreibung

Der Tschadinhorn Blockgletscher ($12^{\circ}41'47''$ E, $46^{\circ}59'38''$ N) liegt im Bereich der Tschadinalm im Ködnitztal, Schobergruppe, Hohe Tauern, Osttirol. Der Blockgletscher ist in einem NWW-orientierten Kar eingebettet und erstreckt sich höhenmäßig zwischen ca. 2.800 und 2.575 m (Abb. 1). Die im Gelände nicht zu übersehende Blockgletscherzunge ist ca. 550 m lang und zw. 80 und 100 m breit. Sie schiebt sich aus einem flacheren Wurzelbereich über eine markante Geländekante in einen Steilbereich und danach wieder in flacheres Gelände (Abb. 2). Durch das starke Vorrücken der Blockgletscherstirn wurde die dort befindliche Grasnarbe sichtbar aufgeschoben (vgl. Abb. 2). Der Tschadinhorn Blockgletscher hat die Indexnummer is186 im Blockgletscherinventar der östlichen österreichischen Alpen (KELLERER-PIRKLBAUER et al. 2012). Im NW des Blockgletschers befindet sich ein weiterer Blockgletscher (is185). Bodenkriechen und ähnliche kleinräumige Phänomene sind in der Karumrahmung zu erkennen. Der Tschadinhorn Blockgletscher selbst wurde erstmals durch BUCHENAUER (1990, 206 f.) erforscht.

2.2 Ist der Blockgletscher aktiv?

BUCHENAUER (1990) hat den Tschadinhorn Blockgletscher aufgrund von Geländebefunden und geophysikalischen Messungen (Hammerschlagseismik) als aktiv eingestuft. In einer ersten Vorstudie zum gegenständlichen Projekt, noch bevor eine Feldbegehung in Erwägung gezogen wurde, konnte unter Verwendung der beiden virtuellen Globen Microsoft Virtual Earth (jetzt Bing Maps) und Google Maps eine erste quantitative Abschätzung der Fließgeschwindigkeit des Blockgletschers vorgenommen werden (KAUFMANN 2010). Idealerweise zeigten beide Internet-Globen jeweils Orthophotos unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte (2002, 2006). Die im Blockgletscherbereich vorhandenen Bildparallaxen konnten nicht nur stereoskopisch am Bildschirm direkt wahrgenommen, sondern auch mit dem im Abschnitt 3.3 noch zu beschreibenden Korrelationsansatz flächendeckend quantifiziert werden. Es ergaben sich maximale Bewegungsraten von bis zu 1,24 m/Jahr, typische Werte für hoch aktive Blockgletscher. Dies veranlasste die Autoren den genannten Blockgletscher in seiner Kinematik näher zu untersuchen.

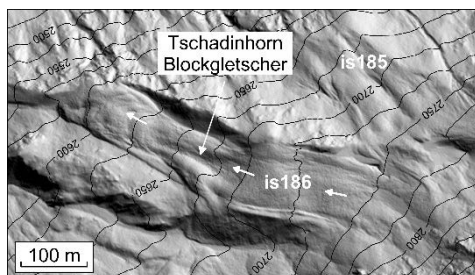


Abb. 1: Relief des Tschadinhorn Blockgletschers. ALS-Daten, 1 m $\times$ 1 m Raster, 20.8.2009
© Land Tirol (TIRIS)

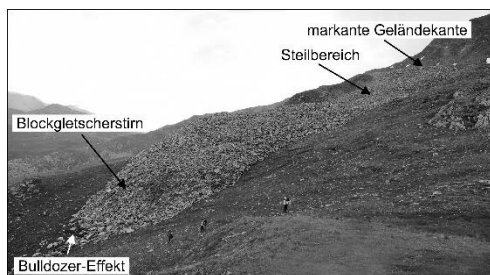


Abb. 2: Zunge des Tschadinhorn Blockgletschers. Im Vordergrund sind drei Personen zu sehen
(Foto: KAUFMANN, 26.07.2016)

3 Grundlagen

3.1 Methoden der geometrischen Blockgletscherbeobachtung

Das Methodenspektrum zur Untersuchung (Geometrie, Eisgehalt und -verteilung, Hydrogeologie) von Blockgletschern ist mannigfaltig. Die geometrische Veränderung eines Blockgletschers (Oberflächendeformation und interne Deformation) kann durch unterschiedliche Beobachtungs- und Auswerteverfahren erfasst werden (ARENSEN et al. 2016).

3.2 GNSS-gestützte Einzelpunktmessung

In parallel laufenden Projekten (Monitoring von Dösener Blockgletscher, Hinteres Langtarkar Blockgletscher, Weissenkar Blockgletscher) wurden bis zum Jahr 2013 alljährlich ausgewählte Messpunkte der Blockgletscheroberfläche mittels Totalstation in einem lokalen geodätischen Beobachtungsnetz eingemessen. RTK-GNSS mit einer lokalen Basisstation löste das traditionelle, jedoch personal- und arbeitsintensive Messverfahren ab. Im Fall des Tschadinhorn Blockgletschers ist aufgrund der örtlichen Nähe (direkte Sicht) zu Kals ein guter, stabiler GSM-Empfang gegeben, was die Nutzung eines RTK-Positionierungsdienstes (APOS) ermöglicht. Somit kann der Umfang der geodätischen Messausrüstung (Leica GNSS Smart-Rover) auf ein Minimum reduziert werden.

Am Tschadinhorn Blockgletscher werden alljährlich zwischen 2014 und 2016 (Mitte August) 14 mit Messingbolzen auf großen Felsblöcken stabilisierte Messpunkte mittels RTK-GNSS eingemessen. Als lokaler Bezugsrahmen dienen vier stabilisierte Stützpunkte im anstehenden Gestein. Die ermittelten ETRF89-Koordinaten werden mittels geeigneter lokaler Transformationsparameter in das Zielkoordinatensystem MGI (Ferro)/Austria GK Central Zone transformiert. Die gemessenen ellipsoidischen Höhen werden in Gebrauchshöhen umgerechnet. Somit ist über diese Koordinatenreferenz eine Verknüpfung mit amtlichen ALS-Daten, aber auch mit amtlichen Photogrammetriedaten (Elemente der äußeren Orientierung) in Lage und Höhe möglich. Die Berechnung der 3D-Bewegungsvektoren erfolgt durch einfache Differenzbildung der Koordinatenwerte der Messepochen. Jahreswerte werden durch entsprechende Normierung auf ein volles Jahr (365,25 Tage) berechnet.

Von besonderem Interesse für weitere prozess- und klimakundliche Untersuchungen ist die Fließgeschwindigkeit, welche aus der horizontalen Bewegungskomponente abzuleiten ist. Für die Analyse des Bewegungsverhaltens des Blockgletschers über die Zeit kann ein repräsentativer Jahresmittelwert über alle oder auch nur ausgewählte Messpunkte gerechnet oder auch nur der Maximalwert herangezogen werden. Die vertikale Bewegungskomponente kann nur unter Kenntnis der Rheologie, welche i. Allg. jedoch unbekannt ist, sinnvoll interpretiert werden. Von weiterem Interesse wäre hier die Berechnung der Geländehöhenänderung zufolge der gegebenen Permafrostdegradation. Aufgrund der thermalen Trägheit des Permafrostkörpers ist eine etwaige Dickenänderung nur im einstelligen Zentimeterbereich zu erwarten. Die Eisdickenänderung bei „Gletschern aus Eis“ ist hier vergleichsweise um den Faktor 10 bis 100 größer. Gesicherte Informationen über eine Permafrostdegradation kann man über die Volumenänderung (Massenbilanz) des gesamten Permafrostkörpers inklusive des ihn umrahmenden Karraumes erhalten. Hierfür werden hochgenaue digitale Geländemodelle (DGM) benötigt bzw. die Beobachtungszeiträume müssen bei verminderter DGM-Genauigkeit entsprechend lang sein.

3.3 Luftbild-gestützte Deformationsmessung

Für die großräumige, flächendeckende Detektion von Geländedeformationen der Erdoberfläche kann die Luftbildphotogrammetrie effizient eingesetzt werden. Durch Zeitreihenaufnahmen kann die raumzeitliche Änderung der Geländeoberfläche mit einem hohen Detailierungsgrad erfasst werden. Durch Epochenvergleich können 3D-Verschiebungsvektoren, Geländehöhenänderungen sowie Volumenänderungen flächendeckend erfasst werden. Die methodischen Grundlagen hierfür werden z. B. in ARENSON et al. (2016) mitgeteilt.

KAUFMANN & LADSTÄDTER (2004) haben ein spezielles Verfahren zur Berechnung von 3D-Verschiebungsvektoren aus bi-temporalen Stereomodellen unter Verwendung von näherungsweisen Orthophotos (Pseudo-Orthophotos) entwickelt. Pseudo-Orthophotos entstehen durch Differenzialentzerrung der orientierten Luftbilder unter Verwendung näherungsweiser, grob-auflösender digitaler Geländemodelle. Die digitale Bildzuordnung (*image matching*) erfolgt durch *least-squares-matching* (LSM). Die erzielte Lösung ist aus geometrischer Sicht streng.

Im Rahmen dieses Projekts wurde jedoch ein vereinfachtes Verfahren unter Verwendung geometrisch exakter Orthophotos angewandt. Die multitemporalen Orthophotos werden mit den jeweils aktuellen digitalen Geländemodellen gerechnet. Somit reicht es vollständig aus, je ein Orthophoto (linker oder rechter Stereopartner) pro Epoche auszuwählen und miteinander auf Bewegungsparallaxen hin zu untersuchen. Zweidimensionale (horizontale) Verschiebungsvektoren können sehr dicht über Interest-Punkte bzw. in Form eines regelmäßigen Rasters ermittelt werden. Die Höhenänderung ergibt sich über Differenzbildung der entsprechenden digitalen Geländemodelle. Die praktische Durchführung erfolgt mittels Matlab. Als Ähnlichkeitsmaß für die Bildzuordnung wurde der normalisierte Kreuzkorrelationskoeffizient (*normalized cross-correlation coefficient*) implementiert. Subpixelgenauigkeit wird durch Interpolation einer Parabel erzielt. Grob fehlerhafte Messungen werden automatisch durch Zurückverfolgung (*back matching*) und über Annahme von Glattheitseigenschaften (Betrag, Richtung) des berechneten Vektorfeldes eliminiert. Zusätzlich kann die Horizontalrichtung der ermittelten Verschiebungsvektoren mit jener der aus dem jeweiligen DGM abgeleiteten Falllinien auf Konsistenz überprüft werden. Räumlich isolierte Einzelmessungen werden ebenfalls eliminiert. Statistische Angaben zur Genauigkeit des ermittelten Vektorfeldes können aus den Messungen in den stabilen Bereichen um den Blockgletscher abgeleitet werden. Etwaige Systematiken in der Lageregistrierung können im Nachhinein an den Verschiebungsvektoren als Korrekturen angebracht werden. Die ermittelte Kinematik kann entweder in einer Vektordarstellung oder als Isotachenplot visualisiert werden.

3.4 DGM-basierte Deformationsanalyse

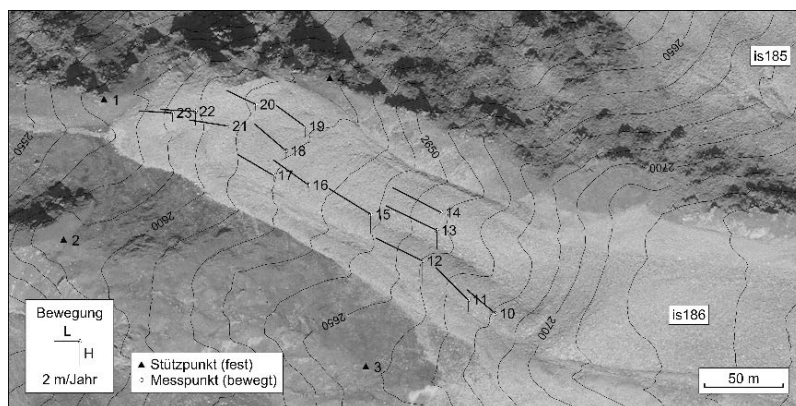
Die Kinematik einer Massenbewegung kann im Rahmen einer Deformationsanalyse auch über den Vergleich der multitemporalen Geländeoberflächen abgeleitet werden. Dabei ist es unerheblich, mit welchem Messverfahren (bildgestützt, ALS, TLS, Interferometrie) die digitalen Geländemodelle erfasst wurden. Erste erfolgreiche Versuche bei Blockgletschern (Ötztal, Tirol) sind in BOLLMANN et al. (2012) beschrieben. Für die Ermittlung der 2D/3D-Deformationsvektoren müssen homologe Oberflächenformen passgenau zugeordnet werden. In Abhängigkeit der Datengrundlage (Punktwolke, Rastermodell) gibt es unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten. Im Rahmen dieses Projekts wurde aus Zweckmäßigkeitsgründen auf die bereits vorhandenen Rastermodelle zurückgegriffen. Die Deformationsanalyse ist in diesem

Fall eine Eins-zu-eins-Umsetzung der vorhin besprochenen bildgestützten Analyse, wobei sinngemäß die Orthophoto-Bildmatrizen durch Matrizen der Höhenwerte zu ersetzen sind. Auch hier ist die Qualität der Zuordnung homologer Regionen vom Krümmungsverhalten (2. Ableitung) der diskreten Ortsfunktionen (Höhenwerte) abhängig. Die Wahl der Größe der Mustermatrix hängt im Wesentlichen bei gegebener DGM-Rasterweite von der Oberflächenmorphologie/-rauigkeit (glatt, kupiert etc.) ab. Dekorrelation der Oberflächengeometrie ist ursächlich der Oberflächendeformation geschuldet und erschwert die eindeutige Verfolgung, zumal das gewählte Zuordnungsverfahren nur für Blockverschiebungen der Oberflächenformen sensitiv ist.

4 Durchführung

4.1 Jährliche Bewegungsmessungen

Am 02.08.2014 wurde im unteren Zungenbereich des Tschadinhorn Blockgletschers ein Punktfeld, bestehend aus 14 Messpunkten im aktiven Blockgletscherbereich und weiteren 4 stabilen Stützpunkten außerhalb des Blockgletschers, eingerichtet. Die Punkte sind mittels Messingbolzen auf großen Felsblöcken und im anstehenden Fels dauerhaft stabilisiert (Abb. 3). Die Punkte sind im Gelände mit roter Signalfarbe markiert. Geodätische Vermessungen dieser Punkte erfolgten mittels RTK-GNSS-Verfahren (Positionierungsdienst APOS) in der Null-Epoche 2014 und in den zwei darauf folgenden Jahren. Aufgrund von Wiederholungsmessungen kann die Einzelpunktmessgenauigkeit in der Lage mit $\pm 2\text{--}3\text{ cm}$ und in der Höhe mit $\pm 3\text{ cm}$ im Landeskoordinatensystem abgeschätzt werden. Abbildung 3 zeigt die jährliche Bewegungs-/Fließkomponente der Messpunkte 10-23 getrennt in Lage und Höhe für den Beobachtungszeitraum 2014-2015.



4.2 Luftbild-gestützte Deformationsmessung

4.2.1 Bewegungsmessungen mittels Orthophotos

Da die beiden digitalen Globen hochauflösende Luftbilder des Bundesamts für Eich- und Vermessungsmessungen (BEV) verwendet haben, war es naheliegend, die originalen digitalen Orthophotos für eine vergleichsweise genauere Bewegungsanalyse heranzuziehen. Die Analyse wurde auf weitere Epochen (2009, 2012 und 2015) erweitert. Die Daten wurden von den Länderbehörden TIRIS (Tirol) und KAGIS (Kärnten) zur Verfügung gestellt. In einer erweiterten Studie wurde ein insgesamt 125 km² großer Geländebereich im nordwestlichen Bereich der Schobergruppe, welcher auch den Tschadinhorn Blockgletscher umfasst, nach schnell fließenden Blockgletschern ($v_{\min} \geq 30$ cm/Jahr) untersucht. Aus speichertechnischen Gründen und in Vermeidung einer Blockzerlegung/Kachelung wurde die Auflösung der Orthophotos auf 50 cm Bodenauflösung reduziert. Für die Berechnung der Verschiebungsvektoren wurde ein regelmäßiger Punktraster mit einem Abstand von 12,5 m und die Mustermatrixgröße mit 31 px × 31 px (15,5 m × 15,5 m) gewählt. Das frei erhältliche TIRIS-ALS-DGM mit 10 m Rasterweite wurde zur groben Abschätzung der gravitativ hervorgerufenen Hauptfließrichtung herangezogen. Abbildung 4 zeigt in einer kartographischen Darstellung die mittlere jährliche Fließgeschwindigkeit exemplarisch für den Beobachtungszeitraum 2012–2015 für alle Blockgletscher (intakt, reliktisch) des Untersuchungsgebietes. Abbildung 5 zeigt im Detail, jedoch für 20 cm Bodenauflösung gerechnet, die diesbezüglichen Bewegungsvektoren für den Bereich Tschadinhorn Blockgletscher.

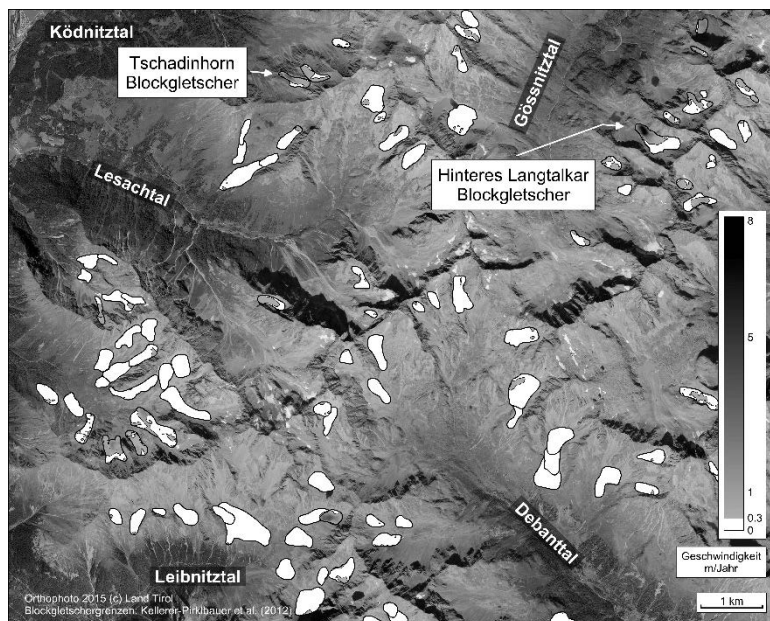


Abb. 4: Detektion schnell fließender Blockgletscher im nordöstlichen Teil der Schobergruppe. $v_{\min} \geq 30$ cm/Jahr (3σ -Schranke). Es wurden maximale Fließgeschwindigkeiten von bis zu 7,98 m/Jahr (Hinteres Langtalkar Blockgletscher) gemessen. Blockgletscherränder aus KELLERER-PIRKLBAUER et al. (2012).

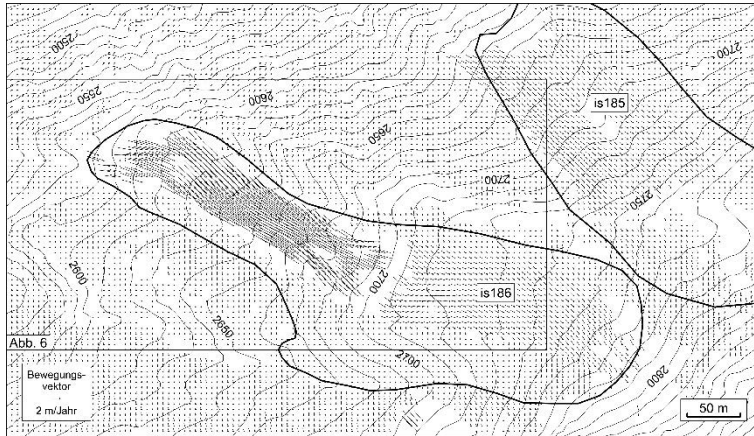


Abb. 5: Tschadinhorn Blockgletscher: Bewegungsvektorfeld für den Beobachtungszeitraum 2012-2015. Die größte gemessene horizontale Bewegungsrate beträgt 3,72 m/Jahr. Die 1σ -Schranke liegt bei ± 10 cm/Jahr und wurde über stabilem Gelände ermittelt. Blockgletscherränder aus KELLERER-PIRKLBAUER et al. (2012).

4.2.2 Exakte 3D-Deformationsmessung mittels groß- und kleinformatiger Luftbilder

Durch eigenständige, unabhängige Neuberechnung der Orthophotos aus den Originalluftbildern mit den jeweils aktuellen digitalen Geländemodellen konnte eine wesentliche Genauigkeitssteigerung in der Berechnung des Oberflächengeschwindigkeitsfeldes erzielt werden. Diese Vorgangsweise ist aus Zweckmäßigkeitsgründen klarerweise vorerst nur auf ausgewählte Blockgletscher wie z. B. den Tschadinhorn Blockgletscher beschränkt. Durchführung und Ergebnisse für die älteren Epochen (2002, 2006, 2009, 2012) können in zwei Bakkalaureatsarbeiten (Institut für Geodäsie, TU Graz) nachgelesen werden.

Um die raumzeitliche Analyse von 2015 (letztmalige Luftbildbefliegung durch das BEV) in das aktuelle Jahr 2016 fortsetzen zu können, wurde im eigenen Wirkungsbereich eine UAV-Befliegung des Tschadinhorn Blockgletschers mit einem Hexakopter (twinHEX v3.0) durchgeführt. Die Befliegung fand am 26.07.2016 statt. Aufgrund gerätetechnischer Schwierigkeiten konnte jedoch das geplante Flugmuster mit den vorgesehenen Wegpunkten nicht eingehalten werden. Zwei Teilbefliegungen lieferten auswertbares Bildmaterial. Die Auswertung der zweiten Teilbefliegung, welche den unteren Teil des Blockgletschers überdeckt, ist in diesem Beitrag beschrieben. Die andere und erste Teilbefliegung deckt den Steilbereich östlich des zweiten Teilbereichs ab und kann nicht ohne zusätzliche Passpunkte, welche aus den Luftbildern 2015 abzuleiten sind, photogrammetrisch ausgewertet werden. Für die Auswertung der UAV-Aufnahmen wurden 15 Passpunktsignale ($\varnothing$ 60 cm) ausgelegt und mittels RTK-GNSS-Messung geodätisch eingemessen. Zur unabhängigen Genauigkeitsbeurteilung der photogrammetrischen Bewegungsmessung 2015-2016 wurden auch alle Messpunkte am Blockgletscher geodätisch eingemessen. Die Befliegung von 2015 fand zufälligerweise genau am Tag (28.08.) der geodätischen Jahresmessung statt. Die UltraCam-Aufnahmen von 2015 wurden auf einer photogrammetrischen Arbeitsstation von Intergraph aufgesetzt (vorhandene Aerotriangulation, BEV) und stereophotogrammetrisch ausgewertet. Die UAV-Aufnahmen (13 Photos) hingegen wurden mit dem Programmpaket Agisoft PhotoScan mit

Methoden der Structure-from-Motion(SfM)-Technologie ausgewertet. Für beide Epochen wurden hochauflösende digitale Geländemodelle (2015: 2-m-Raster, 2016: 0,1-m-Raster) sowie digitale Orthophotos berechnet.

Die Berechnung der Bewegungsvektoren erfolgte auf Basis von Orthophotos mit 10 cm Bodenauflösung. Eine unabhängige Kontrolle der photogrammetrischen Bewegungsmessung erfolgte mit den zeitgleich durchgeführten geodätischen Bewegungsmessungen.

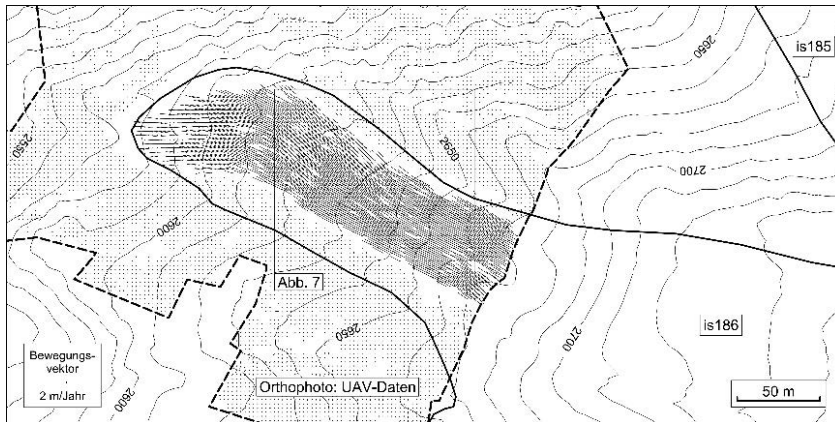


Abb. 6: Tschadinhorn Blockgletscher: Bewegungsvektorfeld für den Beobachtungszeitraum 2015-2016. Die größte gemessene horizontale Bewegungsrate beträgt 3,56 m/Jahr. Die 1σ -Schranke liegt bei ± 6 cm/Jahr und wurde über stabilem Gelände ermittelt.

4.3 DGM-basierte Deformationsmessung

Die UAV-Auswertung lieferte ein hoch aufgelöstes digitales Geländemodell mit einer Rasterweite von 10 cm. Für die DGM-basierte Deformationsanalyse wurde ein ALS-basiertes Oberflächenmodell mit 1 m Rasterweite aus 2009 (TIRIS, Aufnahmedatum 20.08.2009) herangezogen, da die anderen photogrammetrisch erstellten Geländemodelle nur eine verminderte Auflösung von 2 m oder geringer aufwiesen. Die Geländehöhenunterschiede zwischen den Epochen 2009 (ALS-Befliegung) und 2016 (UAV-Befliegung) können mit einer Genauigkeit von ± 0.14 cm (1σ -Schranke) angegeben werden. Für die Differenzbildung wurde das UAV-Geländemodell auf ALS-Rasterweite von 1 m umgerechnet. Aufgrund der starken geometrischen Oberflächenveränderung zwischen 2009 und 2016 und der mangelnden Detailauflösung der 1-m-Geländemodelle ist ein Oberflächen-Matching nur bedingt und auch nur mit großer Apertur (Korrelationsfenster $31 \text{ m} \times 31 \text{ m}$) möglich. D. h., für den Bereich des Blockgletschers können nur einige wenige unkorrelierte Messungen gemacht werden. Für die stabilen Bereiche im Umgebungsbereich des Blockgletschers wurde an Identpunkten eine Einpassgenauigkeit von ± 0.42 m (relativer Lagefehler) ermittelt, was umgerechnet auf die verstrichene Zeitspanne eine Genauigkeit der abgeleiteten Fließgeschwindigkeit von ± 6 cm/Jahr (1σ -Schranke) ergäbe.

5 Ergebnisse

5.1 GNSS-gestützte Einzelpunktmessung

Die wesentlichen Ergebnisse der jährlichen geodätischen Wiederholungsmessungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Horizontale Fließgeschwindigkeit der 14 Messpunkte am Tschadinhorn Blockgletscher für den Zeitraum 2014-2016

	Horizontale Fließgeschwindigkeit (m/Jahr)			
Zeitraum	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	Änderung
2014-2015	2,40	4,23	3,18	
2015-2016	2,23	3,47	2,78	–13 %

5.2 Photogrammetrische Messungen

5.2.1 Horizontale Fließbewegung

Die raumzeitliche Entwicklung der horizontalen Fließkomponente des Tschadinhorn Blockgletschers kann aus den vorliegenden photogrammetrischen Messungen sehr gut rekonstruiert werden (vgl. Isotachendarstellung in Abb. 7). Tabelle 2 hält das Fließverhalten des Blockgletschers für den Zeitraum 2002-2016 in Zahlen fest.

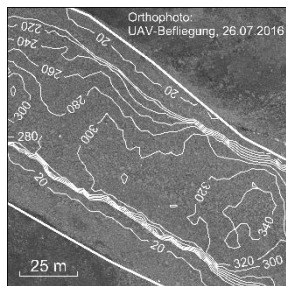


Abb. 7:

Tschadinhorn Blockgletscher: Horizontale Fließgeschwindigkeit (cm/Jahr) aus photogrammetrischen Messungen für den Zeitraum 2015-2016

Tabelle 2: Horizontale Fließgeschwindigkeit (Flächenmittel über 7,535 m²) am Tschadinhorn Blockgletscher für den Zeitraum 2002-2016

	Horizontale Fließgeschwindigkeit (m/Jahr)			
Zeitraum	Minimalwert	Maximalwert	Mittelwert	Änderung
2002-2006	0,68	1,23	0,97	
2006-2009	0,49	1,04	0,78	–20 %
2009-2012	1,02	1,97	1,62	+109 %
2012-2015	1,73	3,72	3,01	+86 %
2015-2016	3,13	3,56	2,91	–3 %

5.2.2 Geländehöhenänderung

Die für den Zeitraum 2009-2015 festgestellten Geländehöhenänderungen, wie z. B. 6,11 m im Stirnbereich und -3,04 m im Steilbereich, weisen ebenfalls auf eine hohe Morphodynamik hin. Die Volumenänderung des Blockgletschers für diesen Zeitraum errechnet sich mit 1.595 m^3 . Dieser Wert ist jedoch nicht signifikant (3σ -Schranke) von null verschieden.

5.3 Computeranimation

Die Morphodynamik des Blockgletschers kann in Zeitrafferdarstellungen (geschummertes Geländere relief, Orthophotos) sehr gut sichtbar gemacht werden (KAUFMANN 2017).

6 Diskussion

Die Kinematik des Tschadinhorn Blockgletschers konnte mit dem beschriebenen Methoden-vorrat sehr gut erfasst werden. Die Auswerteergebnisse zeigen im Wesentlichen, dass die Fließbewegung des Blockgletschers im Beobachtungszeitraum markant um ca. 200 % zugenommen hat. Ein Bewegungsmaximum mit bis zu 4,23 m/Jahr wurde im Zeitraum 2014-2015 festgestellt. Die erzielten Ergebnisse können nun in die Permafrost- und Klimafor-schung einfließen.

7 Ausblick

Das geodätische Monitoring (RTK-GNSS-Messungen) am Tschadinhorn Blockgletscher soll in Zukunft fortgesetzt werden. In weiterer Folge ist geplant, die Kinematik des Blockglet-schers mit Klimaparametern wie z. B. der Lufttemperatur zu korrelieren. Optimal wäre es, eine automatische Klimastation vor Ort aufzustellen und auch Oberflächentemperaturen am Blockgletscher permanent zu messen. Um das raumzeitliche Fließverhalten des Blockglet-schers besser im Jahreslauf zu verstehen, ist es angedacht, ein Wireless-Sensornetzwerk (WSN) mit unterschiedlichen Sensoren, wie z.B. GNSS, Temperaturfühler, Neigungsmesser, einzurichten. Im Rahmen der hoheitlichen Vermessung sind Luftbildbefliegungen im 3-Jah-resintervall vorgesehen. Zusätzliche Luftbilder der dazwischen liegenden Jahre könnten kos-teneffizient mittels UAV-Befliegung gewonnen werden. Um eine gesicherte Antwort auf die Frage der Permafrostdegradation geben zu können, müssten genaue multitemporale Gelän-demodelle des gesamten Karraums erstellt werden, etwa für den Zeitraum 1954-2015.

Dank

Das gegenständliche Projekt wurde durch die Nationalparkverwaltung Hohe Tauern Kärnten finanziell unterstützt. Andreas Kellerer-Pirklbauer vom Institut für Geographie und Raum-forschung der Karl-Franzens-Universität Graz danken die Autoren herzlich für die kritische Durchsicht einer Vorversion des vorliegenden Beitrags.

Literatur

- ARENSEN, L. U., KÄÄB, A. & O'SULLIVAN, A. (2016): Detection and Analysis of Ground Deformation in Permafrost Environments. In: *Permafrost and Periglacial Processes*, 27 (4), S. 339-351.
- BARSCHE, D. (1996): *Rock Glaciers: Indicators for the Present and Former Geocology in High Mountain Environments*. Springer Series in Physical Environment, 16, Springer, Berlin/Heidelberg. 331 S.
- BERTHLING, B. (2011): Beyond confusion: Rock glaciers as cryo-conditioned landforms. In: *Geomorphology*, 131 (3-4), S. 98-106.
- BOECKLI, L., BRENNING, A., GRUBER, S. & NOETZLI, J. (2012): Permafrost distribution in the European Alps: calculation and evaluation of an index map and summary statistics. In: *The Cryosphere*, 6, S. 807-820.
- BOLLMANN, E., GIRSTMAIR, A., MITTERER, S., KRAINER, K., SAILER, R. & STÖTTER, J. (2014): A Rock Glacier Activity Index Based on Rock Glacier Thickness Changes and Displacement Rates Derived From Airborne Laser Scanning. In: *Permafrost and Periglacial Processes*, 26 (4), S. 347-359.
- BUCHENAUER, H. W. (1990): *Gletscher- und Blockgletschergeschichte der westlichen Schobergruppe (Osttirol)*. Marburger Geographische Schriften, 117. 276 S.
- CHAIX, A. (1923): Les coulées de blocs du Parc National Suisse d'Engadine (Note préliminaire). In: *Le Globe, Mémoires*, 62, S. 1-35.
- FISCHER, A. et al. (2015): Tracing glacier changes in Austria from the Little Ice Age to the present using a lidar-based high-resolution glacier inventory in Austria. In: *The Cryosphere*, 9, S. 753-766.
- IPA (2017): <http://ipa.arcticportal.org/publications/occasional-publications/what-is-permafrost> (10.02.2017).
- KAUFMANN, V. (2010): Measurement of surface flow velocity of active rock glaciers using orthophotos of virtual globes. In: *Geographia Technica, Special Issue*, 2010, Cluj University Press, S. 68-81.
- KAUFMANN, V. (2017): https://www.staff.tugraz.at/viktor.kaufmann/animations.html-#Tschadinhorn_rock_glacier (10.02.2017).
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R. (2004): Documentation of the movement of the Hinteres Langtalkar rock glacier. In: *IAPRS*, Vol. 35, Part B7, S. 893-898.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. & KAUFMANN, V. (2012): About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. In: *AJES*, 105 (2), S. 94-112.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A., LIEB, G. K. & KLEINFERCHNER, H. (2012): A new rock glacier inventory of the eastern European Alps. In: *AJES*, 105 (2), S. 78-93.
- KRAINER, K., KELLERER-PIRKLBAUER, A., KAUFMANN, V., LIEB, G. K., SCHROTT, L. & HAUSMANN, H. (2012): Permafrost research in Austria: History and recent advances. In: *Austrian Journal of Earth Sciences (AJES)*, 105 (2), S. 2-11.
- MÜLLER, J., VIELI, A. & GÄRTNER-ROER, I. (2016): Rock glaciers on the run – understanding rock glacier landform evolution and recent changes from numerical flow modeling. In: *The Cryosphere*, 10, S. 2865-2886.
- SCHOENEICH, P., BODIN, X., ECHELARD, T., KAUFMANN, V., KELLERER-PIRKLBAUER, A., KRYSIECKI, J.-M. & LIEB, G. K. (2015): Velocity Change of Rock Glaciers and Induced Hazards. In: LOLLINO, G. et al. (Eds.): *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 1*. Springer International Publishing Switzerland 2015, S. 223-227.