

Einsatz der Photogrammetrie und Bildanalyse zur Quantifizierung von Blockgletscherbewegungen

Autor(en): **Staub, Benno / Vogel, Dragan / Budmiger, Klaus**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **113 (2015)**

Heft 9

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-513921>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Einsatz der Photogrammetrie und Bildanalyse zur Quantifizierung von Blockgletscherbewegungen

Permafrost tritt im Alpenraum ab ca. 2500 m ü.M. verbreitet auf. Als charakteristische Landformen des Permafrost haben aktive, eishaltige Blockgletscher einen grossen Einfluss auf den Sedimenttransport in hoch-alpinen Gebieten, doch ihre Bewegungsmechanismen sind nur ungenügend erforscht. Bewegungsmessungen in hoher räumlicher Auflösung sind erforderlich, um Stauchungs-, Dehnungs- und Scherzonen zu identifizieren. Mit hochauflösenden digitalen Sensoren und einer spezifisch auf das Permafrost-Monitoring ausgerichteten Flugplanung können heute Bewegungen ≥ 30 cm flächendeckend quantifiziert werden. Da sich viele Blockgletscher aktuell sehr schnell fortbewegen, eignet sich die Luftbildphotogrammetrie u.U. sogar für das jährliche Monitoring. Der Artikel beleuchtet den Einsatz der Photogrammetrie und der Methode des feature tracking (Bildkorrelation) zum Detektieren und Quantifizieren von Oberflächenbewegungen auf Blockgletschern am Beispiel eines Permafrost-Testgebiets nahe der Alten Gemmi.

En région alpine le permafrost est assez répandu au-dessus de 2500 d'altitude. En tant que forme de paysage caractéristique du permafrost des glaciers rocheux actifs ont une grande influence sur le transport de sédiments dans les régions des hautes Alpes; le mécanisme de leurs mouvements n'est cependant qu'insuffisamment exploré. Il est nécessaire d'avoir des mesures de mouvement à haute résolution afin d'identifier les zones de compression, extension et cisaillement. A l'aide de senseurs digitaux à haute résolution et d'un plan de vol spécifiquement adapté au monitoring du permafrost il est aujourd'hui possible de quantifier des mouvements de ≥ 30 cm ou plus de toute une région concernée. Du fait que beaucoup de glaciers rocheux se déplacent actuellement très rapidement la photogrammétrie aérienne se prête éventuellement même à un monitoring annuel. L'article met en lumière l'emploi de la photogrammétrie et de la méthode du feature tracking (corrélation d'images) afin de détecter et quantifier des mouvements à l'exemple d'un terrain-test de permafrost près de Alte Gemmi.

Il permafrost appare in forma estesa nello spazio alpino al di sopra approssimativamente dei 2500 m s.l.m. Quale forma tipica del permafrost, i ghiacciai rocciosi attivi e con ghiaccio interstiziale hanno un grande influsso sul trasporto dei sedimenti nelle zone di alta montagna. Ciononostante i meccanismi di movimento sono ancora troppo poco studiati. Si impongono delle misurazioni dei movimenti ad alta risoluzione spaziale per identificare le zone di compressione, dilatazione e fratturazione. Oggi con i sensori digitali ad alta risoluzione e una pianificazione dei voli improntata sul monitoraggio del permafrost è possibile quantificare su tutto il territorio dei movimenti ≥ 30 cm. L'aerofotogrammetria è ideale per il monitoraggio annuale, anche solo per il fatto che oggi molti ghiacciai rocciosi si muovono molto rapidamente. L'articolo seguente spiega l'impiego della fotogrammetria e del metodo del feature tracking (correlazione delle immagini) per individuare e quantificare i movimenti delle superfici sui ghiacciai rocciosi, partendo dall'esempio della zona di test del permafrost in prossimità dell'Alten Gemmi.

B. Staub, D. Vogel, K. Budmiger,
B. Krummenacher, R. Delaloye,
H. Kienholz

1. Einführung

1.1 Blockgletscher als Permafrostindikatoren und Teil der Sedimentkaskade

Permafrost, definiert als dauerhaft gefrorenes Substrat, ist an der Oberfläche meist nicht sichtbar [1]. Eine Ausnahme bilden aktive Blockgletscher, welche durch ihre Morphologie auf eine Übersättigung des Porenvolumens im Untergrund mit Eis hindeuten und daher oft zur Kartierung des Permafrostvorkommens verwendet werden [2]. Relativ grobblockiges, in Loben angeordnetes Lockermaterial sowie eine steile Stirn ($\geq 40^\circ$) sind charakteristisch für diese Landformen (Abb. 1). Die typische Form von Blockgletschern entsteht durch deren interne Deformation. An der Oberfläche betragen die jährlichen Bewegungen meist wenige dm bis einige m [3].

Etwa 5 % der Fläche der Schweiz liegt über Permafrost (ca. ab 2500 m ü.M.) und im gesamten Alpenraum gibt es mehrere Tausend aktive Blockgletscher [1]. Durch ihre Bewegungen haben aktive, eishaltige Blockgletscher einen Einfluss auf den Sedimenttransport von der alpinen Höhenstufe bis in tiefere Lagen. Markante Beschleunigungen einer Vielzahl von Blockgletschern, welche um 2003–04 sowie im Laufe der letzten Jahre beobachtet wurden, ziehen Veränderungen im Permafrost daher zunehmend in den Fokus von Ingenieuren und Naturgefahrenfachleuten [3].

1.2 Bewegungsmechanismen von Blockgletschern

Die Bewegungsmechanismen von Blockgletschern sind komplex und können je nach Situation und Entstehungsgeschichte im Einzelfall variieren. Aus Deformationsmessungen in Bohrlöchern ist bekannt, dass die Bewegung grösstenteils in einem relativ geringmächtigen Scherhorizont («shear horizon» [4]) stattfindet. Die Deformierbarkeit des Eis-Sedi-

ment-Gemischs nimmt mit gegen 0°C steigender Temperatur exponentiell zu und wird zudem durch die Auflast sowie den Porenwasserdruck beeinflusst [3,5,6]. Um die Bewegungsmechanismen im Inneren von Blockgletschern besser zu verstehen und den Sedimenttransport zu quantifizieren, sind Messmethoden hoher räumlicher Auflösung sowie detaillierte geomorphologische Studien erforderlich. Die Luftbildphotogrammetrie hat sich für diese Analysen bewährt [7,8]. Diese Technik ist besonders wertvoll, weil sie eine retrospektive Betrachtung bis Mitte des 20. Jahrhunderts ermöglicht, Jahrzehnte bevor die Pioniere der Schweizer Permafrostforschung ihre ersten Messreihen initiierten.



Abb. 1: Blockgletscher (Landform B in Abb. 2) typischer Morphologie mit grossen Blöcken und einer steilen, instabilen Front.

1.3 Beispiele aus dem Furggentälti bei der Alten Gemmi

Als eines der ersten Versuchsgelände der Permafrostforschung wurde im Furggentälti (Abb. 2) zwischen dem neuen und dem alten Passübergang an der Gemmi Anfang der 1990er Jahre von der Universität Bern ein Monitoring der Blockgletscherbewegungen eingerichtet [9]. Bereits im Laufe der ersten zehn Jahre zeigten die insgesamt drei, relativ kleinen Blockgletscher im Furggentälti markante Veränderungen der Oberflächengeschwindigkeiten und Geländemor-

phologie. Besonders schwierig für die photogrammetrische Analyse, aber typisch für die Verbreitung von Permafrost, ist die Lage der beiden Blockgletscher A und B im Schattenwurf steiler Felsflanken.

2. Methoden zur Quantifizierung von Blockgletscherbewegungen

Seit 1994 wird der Blockgletscher A am Taleingang (Abb. 2) jährlich terrestrisch vermessen. Zur Dokumentation der Block-

gletscher B und C und um die räumliche Auflösung der Messungen zu erhöhen, wurden regelmässig Bildflüge durchgeführt.

2.1 Erstellung eines lokalen Fixpunktenetzes

In Vorbereitung auf geodätische und photogrammetrische Vermessungsarbeiten wurde 1990 ein geodätisches, lokales Fixpunktenetz installiert [10] und 2003 erweitert (Abb. 2). Diese Fixpunkte sind im stabilen Gelände auf $\sim 1\text{--}2\text{ cm}$ genau

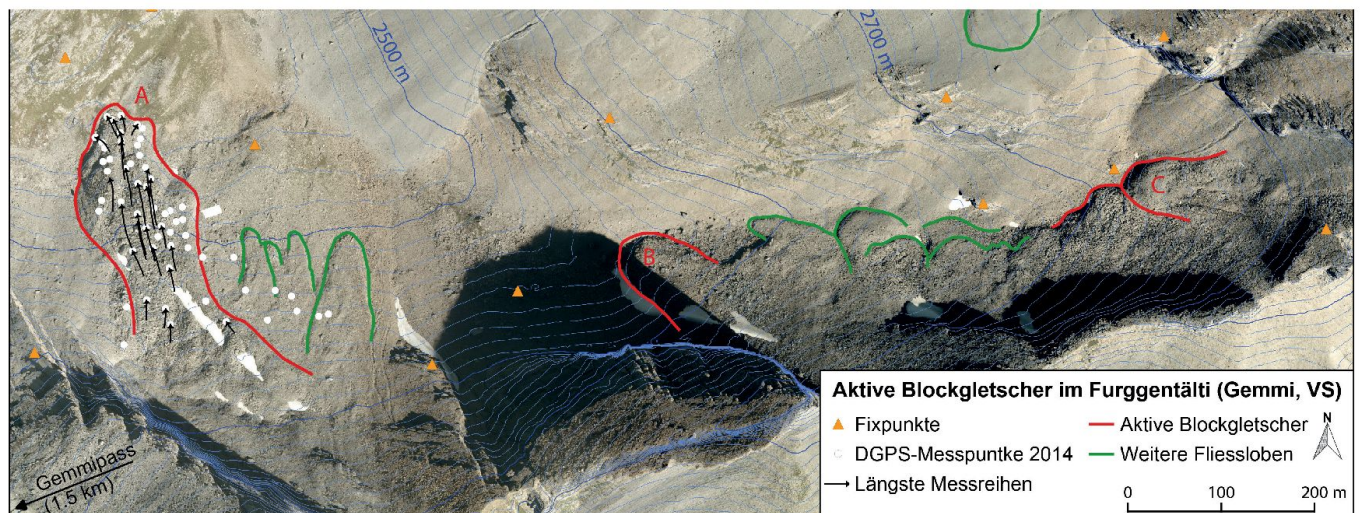


Abb. 2: Permafrost-Testgebiet im Furggentälti nahe des Alten Gemmipass. In rot die Umrandungen verschiedener Blockgletscher, in grüner Farbe markante Solifluktuationsloben. Orthophoto und Höhenlinien stammen vom Bildflug im September 2010 (Flotron AG).

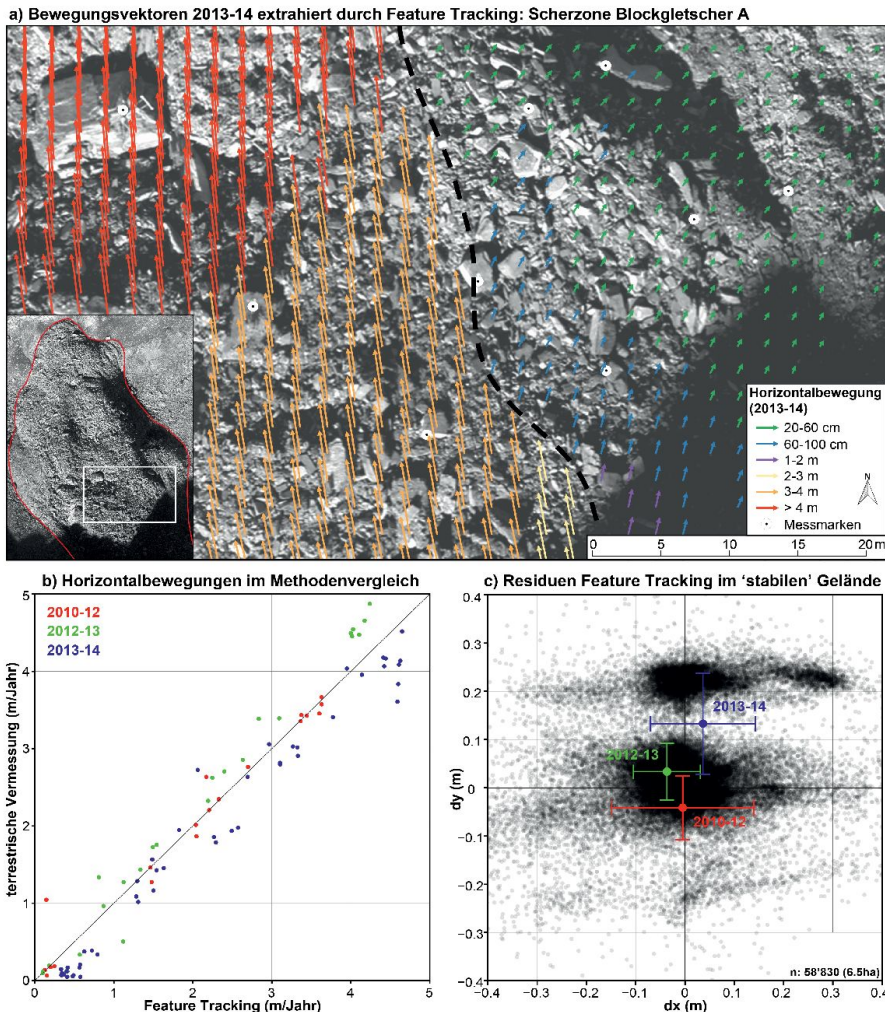


Abb. 3: Vergleich multitemporaler Orthophotos am Beispiel von Blockgletscher A: a) Bewegungsvektoren extrahiert mittels feature tracking im Bereich einer Scherzone (gestrichelt) neben einer sich stark verlangsamen Seitenlobe am Rand des Blockgletschers. b) Die Horizontalbewegungen 2010–14 im Methodenvergleich: Die systematischen Abweichungen für 2012–13 und 2013–14 sind mit den unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten (DGPS: August, Luftbilder: September) und grossen saisonalen Bewegungsschwankungen zu erklären. c) Analyse der mittels feature tracking erhobenen Bewegungsvektoren im (vermutlich) stabilen Gelände unmittelbar vor und neben den Blockgletschern. Die grossen Residuen für 2013–14 können mit dem sehr unterschiedlichen Schattenwurf erklärt werden.

eingemessen und dienen der Orientierung von Tachymetern, DGPS Basisstationen und als Referenzsystem für die Photogrammetrie. Als Passpunkte wurden auf grossen Steinen Markierungen angebracht, weil aber die Blöcke rotieren, umkippen oder seitlich von den Loben abstürzen können, mussten etliche dieser Markierungen im Laufe der Zeit ersetzt werden.

2.2 Geodätische Vermessung mit Tachymeter und DGPS

Wegen der grossen Südabschattung durch die Plattenhörner (Abb. 1) war der Einsatz von GPS lange nicht möglich. Erst seit 2012 wird mittels des Systems Leica Viva GNSS gearbeitet, welches zusätzlich GLONASS Satelliten empfängt und dadurch die angestrebte Genauigkeit von 1–2 cm in der Lage und 2–3 cm in der

Höhe erreicht. Mit fix installierten GPS-Sensoren könnte zudem die Messfrequenz erhöht werden [11], beispielsweise um an besonders interessanten Standorten kurzzeitige Geschwindigkeitsschwankungen zu analysieren. Dies wird auf anderen Blockgletschern teilweise gemacht [12]. Die Interpretation der hochfrequenten Signale erfordert jedoch viel Erfahrung, weil die Bewegungen einzelner Blöcke an der Oberfläche dominieren und das Verhältnis der Bewegungen zur Messgenauigkeit schlechter ist.

2.3 Luftbildphotogrammetrie

Photogrammetrische Analysen ermöglichen eine sehr hohe räumliche Auflösung. Bedingt durch das Intervall der vorhandenen Luftbilder ist jedoch die zeitliche Auflösung begrenzt und eine Verkürzung dieses Intervalls mit Kosten verbunden. Zudem sollten die untersuchten Bewegungen im Gelände die Unschärfe der Methodik um ein Mehrfaches übersteigen. Neue Sensoren sowie eine auf das Permafrostmonitoring abgestimmte Flugplanung (tiefe Fluglinie mit grosser Bildüberlappung zu Zeitpunkten geringer Schneebedeckung und kleinem Schattenwurf), ermöglichen heute auch in alpinem, grossflächig instabilem Gelände Messgenauigkeiten in der Grössenordnung von 10–20 cm innerhalb eines stabilen Fixpunktenetzes. Die Beschleunigung der Blockgletscherbewegungen an der Gemmi machte eine Verkürzung der Befliegungsintervalle notwendig, weshalb in den letzten Jahren explizit für das Projekt sogar jährlich Luftbilder mit einer hochauflösenden, digitalen Photogrammetrie-Kamera UltracamX gemacht wurden. Dies ermöglicht nun auch die Analyse jährlicher Bewegungen bei den Blockgletschern an der Alten Gemmi (B–C in Abb. 2), für welche bisher keine geodätischen Messungen vorliegen.

2.4 Quantifizierung der Bewegungen mittels photogrammetrischer Methoden

Grundlage für die Analyse der Oberflächenbewegungen sind horizontale sowie

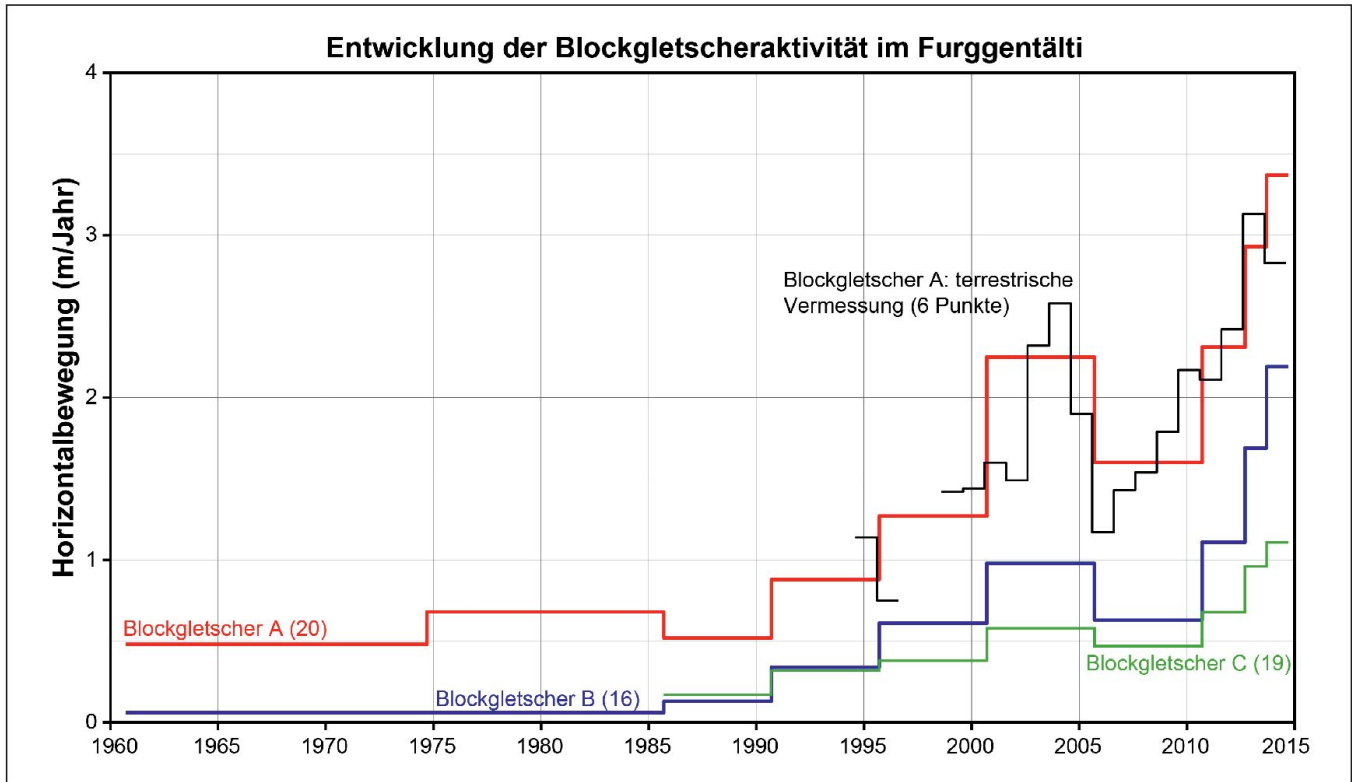


Abb. 4: Die zeitliche Entwicklung der mittleren Horizontalbewegungen der Blockgletscher A–C im Überblick. Nur sechs von aktuell 50 Messpunkten können über die ganze Messperiode (1994–2014) verfolgt werden. Daher und aufgrund leicht unterschiedlicher Messzeitpunkte zeigt die schwarze Linie teilweise einen anderen Verlauf als die photogrammetrisch gemessenen Bewegungen (in rot). Weitere, tief geflogene Bildserien von 2003 und 2007 sind erst für Blockgletscher A ausgewertet und deshalb hier nicht dargestellt.

dreidimensionale Bewegungsvektoren, die aus gemessenen Koordinatenpaaren verschiedener Zeitpunkte abgeleitet werden. Um aus den Luftbildern Bewegungsvektoren zu extrahieren, bieten sich einerseits der manuelle Einzelbildvergleich sowie die automatische Bildkorrelation an: Der manuelle Vergleich von Stereo- oder Mono-Bildpaaren eignet sich primär zum präzisen Einmessen einer geringen Anzahl Punkte. Die Erfahrung, Gebietskenntnis und das Stereosehen des Operators sowie die Bildqualität beeinflussen die Qualität des Endergebnisses. Eine interessante Alternative zur Beschleunigung dieses Prozesses ist die automatische Bildkorrelation (feature tracking). Dabei werden mittels schneller Fourier Transformation (FFT) Ausschnitte zweier Raster verschiedener Zeitpunkte systematisch miteinander verglichen und die Verschiebung bester Übereinstimmung als Bewegungsvektor vorgeschlagen

(Abb. 3a). Für diese Studie wurde das Modul IMCORR der Open-Source Software SAGA GIS (www.saga-gis.org) genutzt, welche auf dem Algorithmus von [13], [14] basiert. Mit Höhenmodellen der beiden Zeitpunkte lassen sich die horizontalen Bewegungen zudem in den Raum projizieren. Der grösste Vorteil des feature trackings ist nebst der Zeitersparnis die Reproduzierbarkeit und Objektivität der Methode, welche sogar in (gleichmässig) unterbelichteten Bildbereichen erstaunlich gut funktioniert. Zudem lassen sich so im stabilen Gelände die Residuen der Luftbilder quantifizieren. Feature tracking kann auch mit Höhenmodellen und Reliefschattierungen genutzt werden, z.B. mit Laserscanning-Daten [15]. Ein Nachteil des Orthophoto-basierten feature trackings ist jedoch, dass die vertikale Komponente nur indirekt über die Abtastung zweier Höhenmodelle in die Berechnung einfließt und daher we-

niger genau ist als bei der manuellen Stereoauswertung. Doch kann die räumliche Auflösung nahezu beliebig erhöht werden, was insgesamt ein repräsentativeres Bewegungsmuster ergibt. Schlecht oder ungleich belichtetes Bildmaterial reduziert ebenfalls die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Methode, wobei dies auch die manuelle Stereo-Auswertung erschwert. Im konkreten Anwendungsfall besonders problematisch sind geschlossene Schneeflächen, für welche sich gar keine Bewegungen quantifizieren lassen.

2.5 Quantifizierung der Messgenauigkeit

Die mit der UltracamX aufgezeichneten Luftbilderserien (2010, 2012, 2013 und 2014) wurden als Orthophotos in der Auflösung von 10 cm verwendet in Kombination mit auf 1 m gerasterten Höhenmodellen (basierend auf automatischer Stereokorrelation mit Racurs

PHOTOMOD 5.3, ca. 15 Punkte pro m²). Der RMSE der Bündelblockausgleichung der gesamten Bildstreifen lag für alle vier Bildserien um ± 15 cm. Die systematische Anwendung des feature trackings im stabilen Gelände bestätigt eine Lagegenauigkeit in dieser Grössenordnung (Abb. 3c), wobei die Residuen aufgrund unterschiedlicher Schattenwürfe sowie potenzieller Bewegungen auch im vermeintlich stabilen Gelände tendenziell überschätzt sein dürften. Bei den älteren, mit analogen Kameras (RC10, RC30) aufgenommenen Bildern war der RMSE ca. doppelt so hoch, bedingt durch die etwas gröbere Auflösung, dem nachträglichen Digitalisierungsvorgang sowie der geringeren Bildschärfe.

Mit der neuen Kameratechnologie haben bereits Bewegungen um 50 cm ein gutes Verhältnis zur Methoden-bedingten Ungenauigkeit und Bewegungen ab 30 cm heben sich deutlich vom Rauschen ab. Für Bewegungen von 1 m beziffert die Messungenauigkeit ca. 15 %. Entsprechend gut stimmen die per feature tracking erhobenen Bewegungsraten mit den geodätischen Messungen überein (Abb. 3b), obwohl sich die Zeitintervalle leicht unterscheiden.

3. Interpretation der Bewegungsmuster

Über längere Zeiträume betrachtet, befinden sich alle drei Blockgletscher an der Gemmi heute in einem anderen Modus der Bewegung mit deutlich grösseren Deformationsraten an der Oberfläche und teilweise stark veränderter Geländeform.

Besonders markant sind diese Veränderungen beim tiefstgelegenen Blockgletscher A (Abb. 2 und 4), der sich zunehmend destabilisiert und rutschungsähnliche Bewegungsmuster zeigt. Während die zentralen und oberen Bereiche aller Blockgletscher eine Beschleunigungstendenz aufweisen, verlangsamten sich einzelne Seitenloben (vgl. Scherzone in Abb. 3a). Bereiche hoher Eisgehalte reagieren besonders stark auf Änderungen der Bodentemperaturen [3] und

zeigten daher sehr grosse Bewegungsänderungen (Maxima 2003–04 sowie 2012–14, Minima 1995–96 und 2005–06). Alle drei Blockgletscher haben im Laufe der letzten 20 Jahre ihre Aktivität markant erhöht (um Faktor 2–4) und grössere morphologische Veränderungen sind in den nächsten Jahren sehr wahrscheinlich. Daher werden in einer nächsten Projektphase weiterhin jährlich Bildflüge gemacht und an ausgewählten Standorten hochfrequente Bewegungssensoren (fix installierte GPS, ggf. zusätzlich Accelerometer) installiert.

4. Nutzen der Photogrammetrie und Bildanalyse für die Permafrostforschung

Die Analysemöglichkeiten der Photogrammetrie sind für geomorphologische Studien sehr wertvoll. Mit der heute erreichten Genauigkeit kann sogar das jährliche Monitoring von Blockgletschern mithilfe der Photogrammetrie bewerkstelligt werden, was besonders in unzugänglichen Gebieten sowie wegen der hohen räumlichen Auflösung von Vorteil ist.

Ein präzises und gut markiertes Fixpunktenetz ist jedoch zwingende Voraussetzung für ein langfristiges Bewegungs-Monitoring und könnte auch für andere Methoden wie Laserscanning oder drohnenbasierte Photogrammetrie genutzt werden.

Dank

Diese Studie wurde vom Schweizerischen Nationalfonds (Sinergia Projekt TEMPS, CRSII2 136279), dem Schweizer Permafrost Monitoring Netzwerk PERMOS sowie vom Förderverein Pro Gemmi und den Universitäten Bern und Freiburg unterstützt. Die Flotron AG hat einen Grossanteil der Bilddaten zur Verfügung gestellt und massgeblich zur Erstellung und Weiterentwicklung des Monitoring-Systems beigetragen.

Herzlich gedankt sei auch den vielen Studierenden und Freiwilligen, welche bei den Vermessungsarbeiten im Furggentälti mitgeholfen haben.

Referenzen:

- [1] J. Noetzi und S. Gruber, «Alpiner Permafrost – ein Überblick», Lintzmeyer, K. (Ed.), *Jahrb. des Vereins zum Schutz der Bergwelt*, Selbstverlag, München, vol. 70, pp. 111–121, 2005.
- [2] E. Cremonese, S. Gruber, M. Phillips, P. Pogliotti, L. Boeckli, J. Noetzi, C. Suter, X. Bodin, A. Crepez, A. Kellerer-Pirklbauer, K. Lang, S. Letey, V. Mair, U. Morra di Cellia, L. Ravel, C. Scapozza, R. Seppi, and A. Zischg, «Brief Communication: 'An inventory of permafrost evidence for the European Alps'» *Cryosph.*, vol. 5, no. 3, pp. 651–657, Aug. 2011.
- [3] R. Delaloye, C. Lambiel, and I. Gärtner-Roer, «Overview of rock glacier kinematics research in the Swiss Alps: seasonal rhythm, interannual variations and trends over several decades», *Geogr. Helv.*, vol. 65, no. 2, pp. 135–145, 2010.
- [4] L. Arenson, M. Hoelzle, and S. Springman, «Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland», *Permafr. Periglac. Process.*, vol. 13, no. 2, pp. 117–135, Apr. 2002.
- [5] I. Roer, W. Haeberli, M. Avian, V. Kaufmann, R. Delaloye, C. Lambiel, and A. Käab, «Observations and considerations on destabilizing active rock glaciers in the European Alps», in *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost*, Fairbanks, Alaska, 2008, no. July, pp. 1505–1510.
- [6] K. Kannan and K. R. Rajagopal, «A model for the flow of rock glaciers», *Int. J. Non. Linear. Mech.*, vol. 48, pp. 59–64, 2013.
- [7] A. Käab, W. Haeberli, and G. H. Gudmundsson, «Analysing the creep of mountain permafrost using high precision aerial photogrammetry: 25 years of monitoring Gruben rock glacier, Swiss Alps», *Permafr. Periglac. Process.*, vol. 8, no. October, pp. 409–426, 1997.
- [8] R. Kenner, Y. Bühler, R. Delaloye, C. Ginzler, and M. Phillips, «Monitoring of high alpine mass movements combining laser scanning with digital airborne photogrammetry», *Geomorphology*, vol. 206, pp. 492–504, 2014.
- [9] B. Krummenacher, D. Mihajlovic, A. Nussbaum, and B. Staub, «20 Jahre Furggentälti – Permafrostuntersuchungen auf der Gemmi», *Geographica Bernensia*, Bern, 2008.

- [10] B. Krummenacher, K. Budmiger, D. Mihajlovic, und B. Blank, «Periglaziale Prozesse und Formen im Furggentälti, Gemipass», Mitteilungen SLF, vol. 56, p. 245 pp., 1998.
- [11] P.-H. Cattin et J. Brahier, «Géomonitorage par GPS avec des équipements à faible coût», Geomatik Schweiz, vol. 109, no. 6, 2011.
- [12] R. Mautz, D. Grimm, und P. Limpbach, «Bestimmung der Fließgeschwindigkeiten von Blockgletschern», Geomatik Schweiz, vol. 108, no. 6, pp. 264–268, 2010.
- [13] T. Scambos, M. J. Dutkiewicz, J. C. Willson, and R. A. Bindschadler, «Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data», Remote Sens. Environ., vol. 42, no. 3, pp. 177–186, 1992.

- [14] M. A. Fahnestock, T. A. Scambos, and R. A. Bindschadler, «Semi-automated ice velocity determination from satellite imagery», Eos (Washington. DC.), vol. 73, no. 439, 1992.
- [15] C. Fey, M. Rutzinger, V. Wichmann, C. Prager, M. Bremer, and C. Zangerl, «Deriving 3D displacement vectors from multi-temporal airborne laser scanning data for landslide activity analyses», GIScience Remote Sens., pp. 1–25, 2015.

Benno Staub
 Prof. Reynald Delaloye
 Universität Freiburg
 Geographisches Institut
 Ch. du Musée 4
 CH-1700 Fribourg
 benno.staub@unifr.ch

Dragan Vogel
 Klaus Budmiger
 Flotron AG Ingenieure
 Gemeindemattenstrasse 4
 CH-3860 Meiringen

Dr. Bernhard Krummenacher
 GEOTEST AG
 Birkenstrasse 15
 CH-3052 Zollikofen

Prof. em. Hans Kienholz
 KiNaRis
 Naturgefahren/Risikomanagement
 Gigonweg 10
 CH-3027 Bern

INTERGEO®
 Kongress und Fachmesse für Geodäsie,
 Geoinformation und Landmanagement
 15. – 17. September 2015 | Stuttgart
 www.intergeo.de

Gemeinsam mit
63. Deutscher Kartographentag

Veranstalter: DVW e.V.
 Ausrichter Kongress: DVW GmbH & DGfK e.V.
 Ausrichter Messe: HINTE GmbH

Sponsoren:
 esri Deutschland HEXAGON Trimble