

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 99 (2001)

Heft: 8

Artikel: Digitale Photogrammetrie zur Deformationsanalyse von Massenbewegungen im Hochgebirge

Autor: Kääb, Andreas / Vollmer, Markus

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-235808>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 02.04.2025

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

Digitale Photogrammetrie zur Deformationsanalyse von Massenbewegungen im Hochgebirge

Liegen von einem Gelände Befliegungen mehrerer Epochen vor, können mittels multitemporaler DTM nicht nur Massenverlagerungen erkannt werden, sondern durch den Vergleich multitemporaler Orthophotos auch Verschiebungsvektoren automatisch bestimmt werden. Diese vollständig digitale Bildverarbeitungskette zur Messung der dreidimensionalen Oberflächendeformation wird hier an Hand von hochalpinen Massenbewegungen evaluiert: Gletscherfließen, Permafrostkriechen und Rutschungen. Die vorgestellten Verfahren ermöglichen die wirksame Beobachtung von mit alpinen Massenbewegungen verbundenen Naturgefahren und erlauben signifikante Verbesserungen im Verständnis der involvierten Prozesse.

Si d'un terrain des vols datent de plusieurs époques on ne peut pas seulement reconnaître à l'aide de DTM multitemporal des transpositions de masses, mais aussi déterminer automatiquement les vecteurs de transposition par la comparaison des orthophotos multitemporales. Cette chaîne de traitement d'images complètement digitale permettant la détermination de déformation de surfaces tridimensionnelles est évaluée ici à l'aide de translations de masse dans les Hautes Alpes: glissements de glaciers, mouvements lents dus au permafrost et glissements de terrain. Les procédés présentés permettent une observation efficace des dangers naturels liés aux mouvements de masse alpin et permettent une amélioration significative de la compréhension des processus observés.

Se tra i voli su un territorio è passato diverso tempo, gli spostamenti delle masse possono essere determinati non solo attraverso il DTM temporale, ma anche facendo il confronto multitemporale delle ortofoto per individuare i vettori di spostamento. Questa catena di elaborazione delle immagini, completamente digitalizzata, destinata a determinare la deformazione tridimensionale delle superfici, viene qui valutata in base ai movimenti delle masse alpine: scorrimento dei ghiacciai, avanzamento del permafrost e smottamenti. I processi presentati permettono delle osservazioni efficaci dei pericoli naturali, legati ai movimenti delle masse alpine, e consentono un miglioramento significativo nella comprensione dei processi coinvolti.

A. Kääh, M. Vollmer

Einführung

Massenverschiebungen sind ein typisches Resultat der hohen Reliefenergie von Hochgebirgen. Sie können sich in kontinuierlichen Systemen (z.B. Gletscher) äussern, aber auch in kurzzeitigen, katastrophalen Ereignissen ablaufen (z.B. Felsstürze). Gerade in stark besiedelten Gebirgen wie den europäischen Alpen sind mit diesen natürlichen Massenverla-

gerungen oft auch massive Gefahren für Mensch und Infrastruktur verbunden [4]. Zum Beispiel:

- Gletscher können Seen aufstauen oder zurücklassen, deren Ausbrüche regelmässig zu schweren Hochwassern und Murgängen führen.
- In jüngeren Untersuchungen erscheint ein Zusammenhang zwischen kriechendem Dauerfrostboden (Permafrost) und erhöhter Murgangaktivität als deutlich.
- Entlastung und Freilegung der Talflä-

ken durch Gletscherschwund kann zu Hangdestabilisierung und damit zu Rutschungen oder Murgängen führen.

Eine Vielzahl von morphologischen Feldindikatoren weist auf die involvierten Massenbewegungen hin, eine zuverlässige Beurteilung und Beobachtung sowie ein vertieftes physikalisches Verständnis erlaubt aber besonders die Kenntnis der Kinematik des jeweiligen Phänomens: Vertikale Veränderungen, also Geometrieänderungen eines Objektes, geben bereits wichtige Hinweise auf Massenverlagerungen im Untergrund. Horizontale bzw. dreidimensionale Verschiebungen schliesslich zeigen direkt die Massenbewegungen auf.

Wegen ihrer Flächenhaftigkeit und ihrer Berührungslosigkeit gehören photogrammetrische Techniken sicherlich zu den geeignetsten Methoden zur Beobachtung alpiner Massenbewegungen [5]. Gerade jedoch die digitale Photogrammetrie hat in diesem Zusammenhang wichtige neue Möglichkeiten eröffnet. Der Bildmessung ist allerdings jeweils nur die Geländeoberfläche zugänglich. Aussagen über Tiefenprozesse müssen über geophysikalische Untersuchungen und/oder numerische Modelle gewonnen werden. Die Genauigkeit und besonders die zeitliche Auflösung photogrammetrischer Methoden sind begrenzt. Für hochpräzise punktuelle Deformationsmessungen mit hoher zeitlicher Frequenz sind terrestrische Verfahren in der Regel vorzuziehen.

In diesem Beitrag werden zwei digitale photogrammetrische Verfahren kurz erläutert und dann an Hand einiger Fallbeispiele aus den Bereichen Gletscherfließen, Permafrostkriechen und Hangrutschungen evaluiert. Die vorgestellten photogrammetrischen Anwendungen stammen aus Forschungsprojekten des Geographischen Institutes der Universität Zürich (GIUZ) im Schwerpunktbereich «Glaziologie und Geomorphodynamik». Dieser Beitrag stellt zugleich auch eine Fortsetzung von [5] dar, wo Grundlagen zu Gletschern und Permafrost, sowie deren Beobachtung mit Hilfe analytischer Photogrammetrie dargelegt wurden.

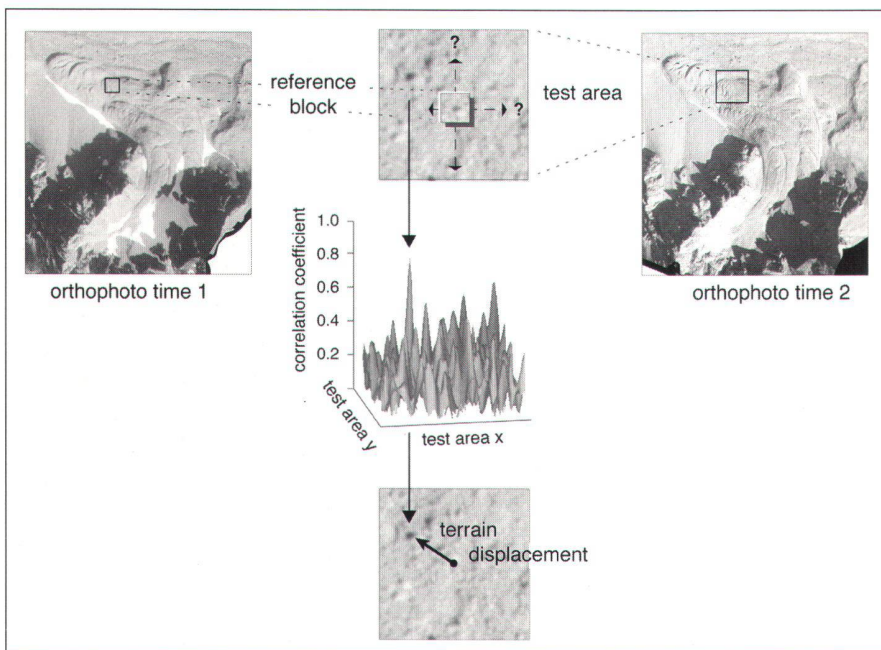


Abb. 1: Flächenhafte Bestimmung der horizontalen Geländedeformation durch Bildvergleich zwischen Orthophotos zweier verschiedener Epochen.

Methoden

Alle in den folgenden Kapiteln präsentierten Beispiele beruhen auf digitalisierten, tiefgeflogenen S/W-Luftbildern in Bildmassstäben von ca. 1:6000 bis 1:10 000. Durchgeführt wurden diese Befliegungen jeweils vom Flugdienst/KSL, Bundesamt für Landestopographie, zu meist im Rahmen der Gefahrenüberwachung (Hanginstabilitäten, Gletscherseen etc.) oder Klimabeobachtung (Gletscher, Permafrost) [4][5]. Zur Bestimmung der Geländegeometrie und ihrer temporalen Veränderungen wurden Standardverfahren der digitalen Photogrammetrie angewendet [1][3]. Digitale Terrainmodelle (DTM) und Orthophotos wurden jeweils mit der Software SOCET SET der Firma LH-Systems erstellt. Trotz des untersuchten hochalpinen Geländes mit steilen Hängen, scharfen Kanten, teilweise mangelndem optischen Kontrast u.ä. genügen die Ergebnisse mit einigen wenigen manuellen Editierungen den Genauigkeitsanforderungen [7]. Höhenänderungen des Geländes werden als Differenzen zwischen multitemporalen DTM bestimmt. Hierzu eignen sich besonders rasterförmige DTM, stellen sie doch eine zufällige Stichprobe der Geländegeometrie dar. Bewährt hat sich ferner eine Tiefpass-Filterung der erhaltenen vertikalen Bewegungen. So können die globalen Geometrievariationen besser aus dem Messrauschen und/oder kleinräumigen Gelände veränderungen extrahiert werden. Im Zusammenhang mit alpinen Mas-

senbewegungen interessieren zumeist eher jene grossräumigen Veränderungen. Zur Messung von horizontalen Bewegungen kommt eine Spezialsoftware zum Einsatz, die am GIUZ entwickelt wurde (CIAS:

Correlation Image Analysis System; [7]). Eingangsdaten sind digitale Orthophotos zweier verschiedener Zeitpunkte, wie sie mit digitaler photogrammetrischer Standardsoftware erstellt werden können [2]. Zwischen diesen zwei georeferenzierten Orthophotos werden nun über Block-matching beliebig viele identische Punkte bestimmt (Abb. 1). Die Koordinatenunterschiede zwischen den korrespondierenden Punkten zweier Epochen stellen bereits die gesuchten ebenen Verschiebungen dar. Die Suche identischer Punkte findet in wählbaren Stufen einer Bildpyramide mit Hilfe zweidimensionaler Kreuzkorrelation statt. Die Grössen der zur Suche verwendeten Bildblöcke werden der jeweiligen Geländecharakteristik und den zu erwartenden Verschiebungsbeträgen angepasst. Auf der untersten

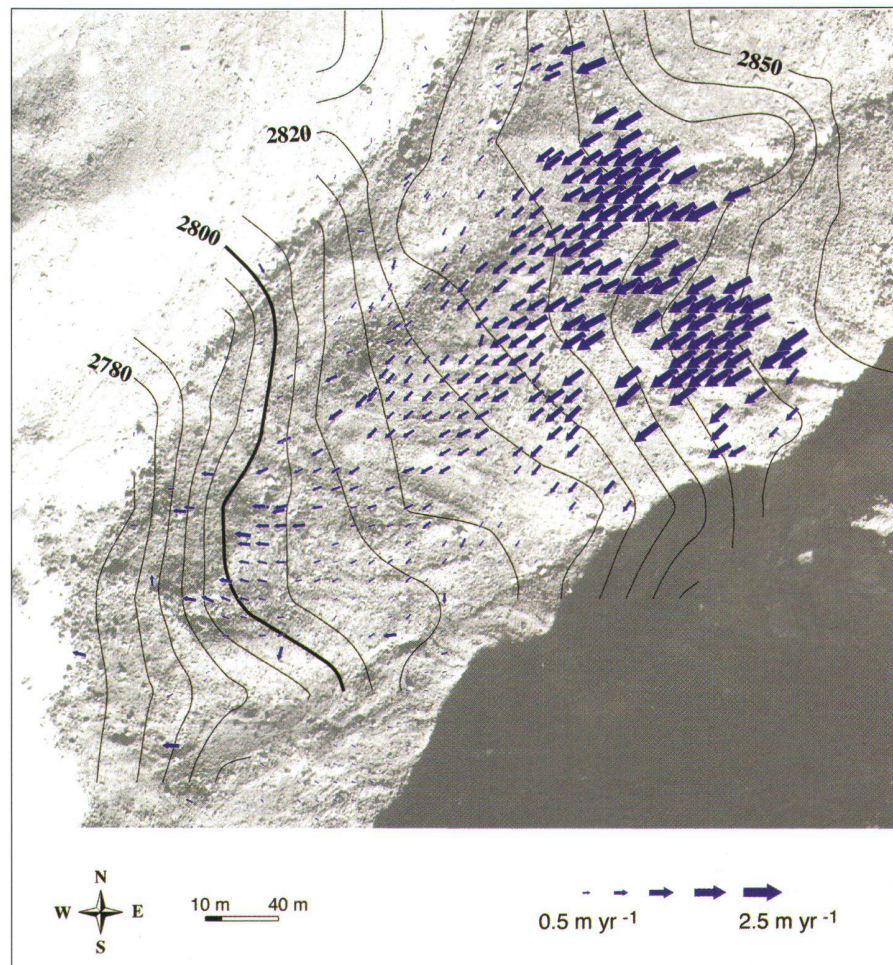


Abb. 2: Bewegungsfeld 1970–1975 auf der Zunge des Grubengletschers, Wallis, Schweizer Alpen, bestimmt durch digitalen Orthophotovergleich. Bewegungen in m/Jahr.

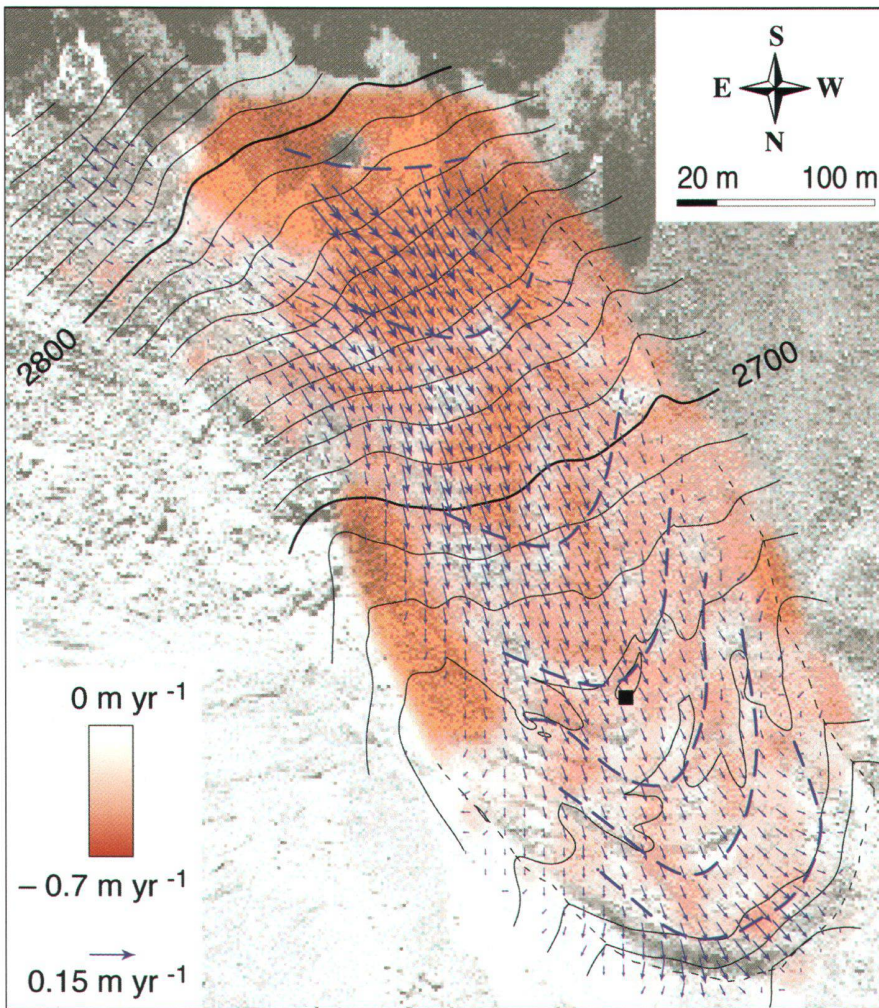


Abb. 3: Gemessenes Bewegungsfeld und Dickenänderungen 1986–1996 auf kriechendem Permafrost im Gebiet Murtèl Corvatsch, Oberengadin. Die gestrichelten Kurven stellen rekonstruierte Linien gleichen Alters dar. Ihr Abstand entspricht jeweils einem Altersunterschied von 1000 Jahren. Am Ort des schwarzen Rechteckes wird die Permafrosttemperatur und -deformation in einem Bohrloch überwacht.

Stufe kann über Bildinterpolation Subpixelgenauigkeit erreicht werden. Hier soll aber darauf hingewiesen werden, dass die Definitionsunschärfen unsignalisierten hochalpinen Geländes und kleinräumigste Geländedeformationen diese Genauigkeit oft übersteigen, also unnötig machen. So kann als grobe Faustregel von einer äusseren Genauigkeit eines Bildpixels ausgegangen werden. Im schuttbedeckten Gelände mit sich ähnelnden Blöcken und Strukturen können durchaus Verwechslungen (mismatches) auftreten. Innerhalb CIAS werden diese überwiegend durch Schwellwerte des Korrelati-

onskoeffizienten, automatische Analyse des Bewegungsfeldes und Tiefpassfilterung ausgeschaltet (vgl. auch [8]).

Gletscherfliessen

Gletschereis deformiert sich unter dem Einfluss der Schwerkraft. So kommt ein dynamisches System zustande, bei dem sich im Gleichgewichtszustand der Massennachschub (in erster Linie Schneefall) und der Massenverlust (Eisschmelze) die Waage halten. Verschiebt sich aus klimatischen Gründen dieses Gleichgewicht, ändern sich Kinematik und Geometrie ei-

nes Gletschers. Diese Veränderungen sind einerseits ein weltweit anerkannter und beachteter Klimaindikator, und stehen andererseits hinter vielen hochalpinen Naturgefahren [4] [6].

Die Bestimmung von Geometrieänderungen von Gletschern mit Hilfe digitaler Photogrammetrie ist ein bekanntes Standardverfahren, für das zahlreiche Beispiele existieren [1] [3]. Hier sollen daher keine weiteren angefügt werden. Vielmehr zeigt Abbildung 2 das Bewegungsfeld einer überwiegend schuttbedeckten Gletscherzunge in den Schweizer Alpen (Grubengletscher, siehe [5] für Details). Die beobachteten Fließgeschwindigkeiten reichen von 2,5 m/Jahr bis zu wenigen cm/Jahr. Diese ungewöhnlich geringen Beträge deuten auf einen weitgehend inaktiven Gletscherteil hin. Um die kleinen Deformationsbeträge signifikant bestimmen zu können, wurden Luftbilder mit einer Zeitbasis von fünf Jahren gewählt. Im nicht mehr abgebildeten oberen Teil der Gletscherzunge mit deutlich grösseren Bewegungen dagegen kann mit jährlichen Bildern gearbeitet werden. Das Beispiel Abbildung 2 zeigt deutlich den Nachteil der Zeitbasis von fünf Jahren: durch Eisschmelze wird die Oberfläche zum Teil so stark gestört bzw. zerstört, dass der digitale Bildvergleich keine korrespondierenden Punkte finden kann, bzw. die schlechten Korrelationskoeffizienten zur Entfernung der Messungen Anlass gaben. Markant schwieriger schliesslich werden die Messungen auf schuttfreiem Eis. Hier führt die stärkere Eisschmelze auch innerhalb eines Jahres zu grossen Oberflächenveränderungen und die ohnehin geringere Zahl optisch markanter Strukturen wird deutlich reduziert.

Permafrostkriechen

Permafrost (Untergrund, der ganzjährig Temperaturen unter 0 °C aufweist) kann einen erheblichen Eisanteil aufweisen. In Hochgebirgen kann solcherart gefrorener Schutt unter dem Einfluss der Schwerkraft zu kriechen beginnen und Schuttlagen bilden, die Lavaströmen ähneln und sich langsam deformieren. Solche sogenann-



Abb. 4: Blockgletscher im Val Muragl, Oberengadin. Foto: R. Frauenfelder.

im oberen und im in Fließrichtung rechten Teil. Diese sind auf die Schmelze von Eisfeldern zurückzuführen. Der massive Rückgang solcher Eisflecken ist in vielen Bereichen der Alpen festzustellen (vgl. Fund des «Ötzi»), und kann durchaus als deutliches Zeichen einer derzeitigen Klimaerwärmung verstanden werden. Des Weiteren sind in Abbildung 3 sogenannte Isochronen (Linien gleichen Alters) eingetragen, die aus dem Bewegungsfeld geschätzt werden können. Diese Interpolation rekonstruiert die Wanderung einzelner Steine auf dem Blockgletscher. Dabei beträgt in Abbildung 3 der Altersunterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Isochronen 1000 Jahre, der ganze Blockgletscher ist also klar viele Jahrtausende alt.

Das Beispiel Abbildungen 4 und 5 zeigt

ten Blockgletscher sind eine typische Hanginstabilität in trocken-kalten Gebirgen. Daneben können sie auch auf verschiedene Art und Weise an der Murgangbildung beteiligt sein [4][6]. Über die physikalischen Prozesse des Permafrostkriechens ist deutlich weniger bekannt als über das Gletscherfließen. Eine wichtige Rolle spielt bei der derzeitigen Forschung die Kinematik der Blockgletscher. Da diese Körper wegen der thermischen Stabilisierung durch den Permafrost auch über viele Jahre hinweg kohärent sich deformieren, weist die Oberfläche in multitemporalen Luftbildern jeweils grosse Ähnlichkeit auf. Weiter bieten die Blöcke auf der Oberfläche ausreichend Kontrast und Strukturen für digitale Bildvergleiche sowohl bei der automatischen Generierung von DTM als auch zur Bewegungsmessung [7].

Das Beispiel Abbildung 3 zeigt die Bewegungsvektoren und Höhenänderungen zwischen 1986 und 1996 auf dem Blockgletscher Murtèl unweit der Mittelstation der Corvatschbahn im Oberengadin. Die Kriechgeschwindigkeiten des gefrorenen Schuttes reichen von ca. 15 cm/Jahr bis zu ca. 5 cm/Jahr im unteren Teil. Die farb-kodierten Höhenänderungen über die Beobachtungsperiode von zehn Jahren hinweg zeigen vor allem starke Verluste

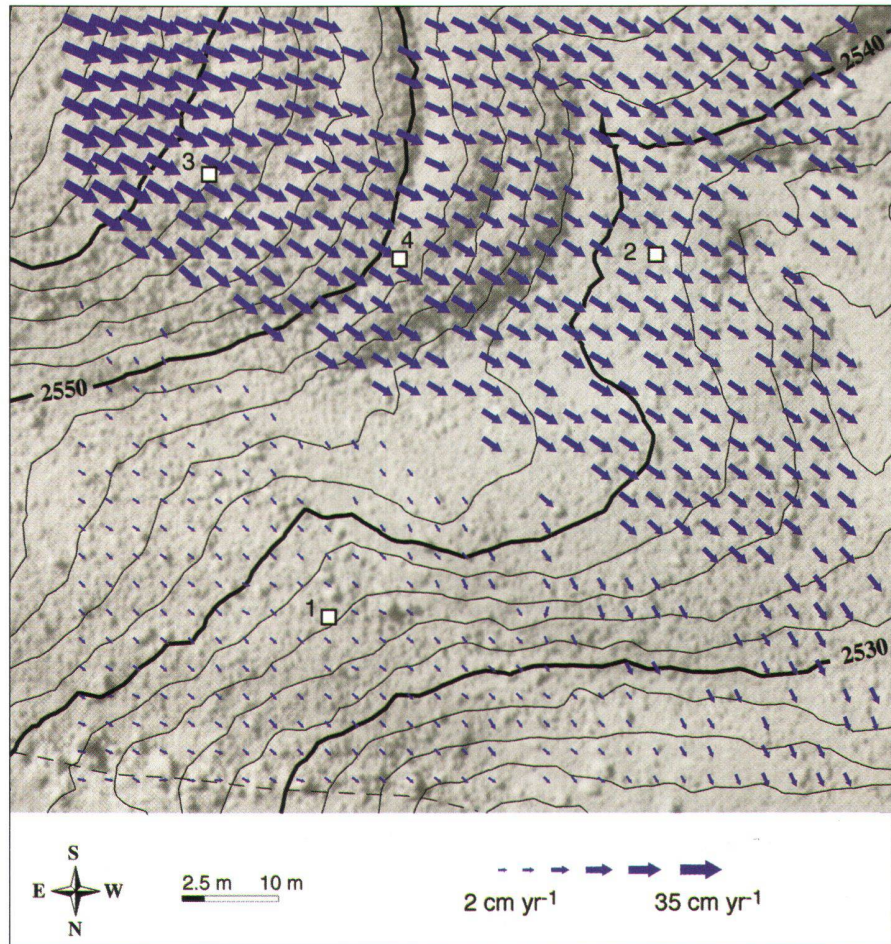


Abb. 5: Hochaufgelöstes Bewegungsfeld 1981–1994 des in Abb. 4 markierten Ausschnittes. An den kleinen Quadraten 1–4 wurden geophysikalische Sondierbohrungen durchgeführt.

jeweils den Blockgletscher im Val Muragl, Oberengadin, Schweiz (unweit der Bergbahn Muottas Muragl). In Abbildung 5 ist eine hochauflösende Bewegungsmessung mit einer Rasterweite von 2,5 m in einem Ausschnitt des Blockgletschers dargestellt (markiert in Abb. 4). Auffallend an dieser Messung ist die äusserst scharfe laterale Scherzone zwischen dem kriechenden und einem weitgehend inaktiven Teil des Blockgletschers. Ferner ist die Kompression des Kriechstromes von über 35 cm/Jahr auf unter 20 cm/Jahr innerhalb kurzer Distanz zu bemerken. Die für Blockgletscher typischen Querwülste dürften mit solchen Stauchungen zusammenhängen. Die in Abbildung 5 gezeigten Vektoren stellen die ungefilterten Originalmessungen dar. Das gleichmässige Bewegungsfeld verdeutlicht einerseits die gute Konservierung der Oberfläche trotz 13 Jahren Deformation, andererseits aber auch die grosse Robustheit der Messmethode [7].

Hangrutschungen

Obwohl andere Prozesse hinter hochalpinen Hangrutschungen stehen als hinter der Deformation eisreichen Permafrostes, ist deren digitale photogrammetrische Beobachtung doch in vielen Belangen vergleichbar. Da in Hangrutschungen kein spannungsübertragendes Medium wie Eis für kohärente Deformation sorgt, kommt es aber eher zu Zerstörung der Oberfläche und daraus resultierenden Problemen bei digitalen Bildvergleichen. Abbildung 6 zeigt eine automatische photogrammetrische Bewegungsmessung auf einer grossen Rutschung an der Zunge des Aletschgletschers, Wallis, gegenüber des bekannten Aletschwaldes gelegen (rohe Messungen mit CIAS). Vor Ort fällt die Rutschzone durch ein helles, kaum verwittertes Querband auf, das an der Oberkante der Sackung entstanden ist. Zwischen 1976 und 1995 traten Verschiebungen von insgesamt bis zu 2 m auf. Aus Messungen mit höherer zeitlicher Auflösung ist bekannt, dass diese Bewegungsbeträge vor allem aus dem zweiten Teil der Beobachtungsperiode stam-

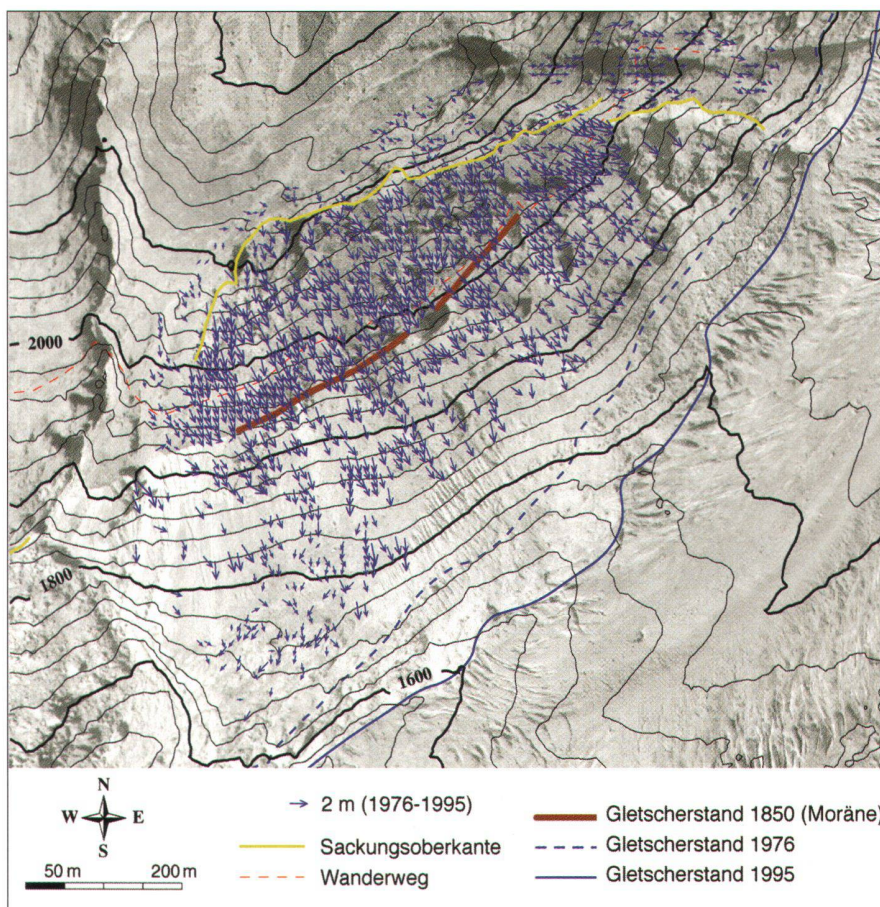


Abb. 6: Digital photogrammetrisch gemessenes Verschiebungsfeld 1976–1995 auf einer aktiven Rutschung an der Zunge des Aletschgletschers, Wallis.

men. Auslöser der Rutschung ist der Rückzug des Aletschgletschers (Abb. 6, rechts unten), der einen Höhenverlust von 200–300 m im Bereich der Rutschung mit sich brachte und somit die betroffene Hangpartie massiv entlastete und folglich destabilisierte. Im oberen Bereich der Rutschung wurden aus dem Vergleich digital photogrammetrisch erstellter DTM Senkungen, im unteren Bereich Hebungen festgestellt, beide in ähnlicher Grössenordnung wie die horizontalen Verschiebungen [6].

Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Studien belegen, dass multitemporale Verfahren der digitalen Photogrammetrie operationell und zuverlässig zur Beobachtung von kontinuierlichen Massenbewegungen eingesetzt werden können. In der Praxis dürften sich

die vorgestellten Verfahren flächenhafter Analyse vor allem zur Ergänzung und Extrapolation von punktuellen, z.B. präzisen geodätischen Deformationsmessungen, sowie zur grossräumigen Gefahrenabschätzung eignen. Besonders wertvoll können die vorgestellten photogrammetrischen Verfahren sein, wenn mit Hilfe von Luftbildern Deformationen rekonstruiert werden sollen, von denen keine terrestrischen Messungen existieren. Eine wirtschaftlich sinnvolle und erfolgversprechende Anwendung der Verfahren sehen die Autoren vor allem bei der Beobachtung von Hangrutschungen, wie sie in den Alpen regelmässig zur Gefährdung von Siedlungen und Infrastruktur führen.

Dank

Die vorgestellten Luftbildanalysen wären nicht möglich gewesen ohne das hervorragende Luftbildmaterial des Flugdienst-

tes/KSL, Bundesamt für Landestopographie (Rolf Hübscher, Hans-Peter Gautschi and Daniel Lüscher). Die Studien werden gefördert durch den Schweizerischen Nationalfonds und das Bundesamt für Bildung und Wissenschaft. Für ihre Unterstützung sei Wilfried Haerberli, Philippe Meuret, Bruno Weber und vielen MitarbeiterInnen und Studierenden des Geographischen Institutes der Universität Zürich gedankt.

Literatur:

- [1] Baltsavias, E.P., Li, H., Stefanidis, A. and Sinning, M. (1996): Automatic DSMs by digital photogrammetry. *Surveying World*, 4(2): 18–21.
- [2] Baltsavias, E.P. (1996): Digital ortho-images – a powerful tool for the extraction of spatial- and geo-information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 51(2): 63–77.
- [3] Favey, E., Pateraki, M., Baltsavias, E.P., Bauder, A. and Bösch, H. (2000): Surface modelling for alpine glacier monitoring by airborne laser scanning and digital photogrammetry. *Int'l Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XIXth ISPRS Congress, Amsterdam, vol. XXXIII (B4): 269–277.
- [4] Haerberli, W., Käab, A., Hoelzle, M., Bösch, H., Funk, M., Vonder Mühl, D. und Keller, F. (1999): Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. Schlussbericht NFP31. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich. 190 S.
- [5] Käab, A. (1996): Photogrammetrische Analyse von Gletschern und Permafrost. *VPK 12/96*: 639–644.
- [6] Käab, A. (2000): Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: new techniques and applications. – *Physics and Chemistry of the Earth*, 25(9): 765–770.
- [7] Käab, A. and Vollmer, M. (2000): Surface geometry, thickness changes and flow fields on creeping mountain permafrost: automatic extraction by digital image analysis. – *Permafrost and Periglacial Processes*, 11: 315–326.
- [8] Kaufmann, V. and Ladstädter, R. (2000): Spatio-temporal analysis of the dynamic behaviour of the Hochebenkar rock glaciers (Oetztal Alps, Austria) by means of digital photogrammetric methods. 6th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography 2000, Ethiopia, Kenya, Tanzania, 3–18 September 2000.

Dr. Andreas Käab
 Geographisches Institut
 Universität Zürich-Irchel
 Winterthurerstrasse 190
 CH-8057 Zürich
 kaeab@geo.unizh.ch
 www.geo.unizh.ch/~kaeab

Markus Vollmer
 Überwachungsgeschwader
 Ressort Luftaufklärung
 Militärflugplatz
 CH-8600 Dübendorf

INTERGEO®

*Kongress und Fachmesse der Geodäsie und Geoinformation
 19. bis 21. September 2001 • Messegelände Köln*



GEODÄSIE GEOINFORMATION *Landmanagement*

19. bis 21. September 2001

***Termin vormerken,
 Informationen anfordern!***

***Telefon ++49 (0) 721/9 31 33-0
 E-Mail: ofreier@hinte-messe.de
 Internet: www.intergeo.de***

Veranstalter:
 Örtlicher Vorbereitungsausschuss
INTERGEO® 2001
 Telefon ++49 (0) 22 41 / 308-120
 E-Mail: intergeo2001@t-online.de
 Internet: www.intergeo.de



Organisation:
**HINTE
 MESSE**
 Telefon ++49 (0) 721 / 9 31 33-0
 E-Mail: info@hinte-messe.de
 Internet: www.hinte-messe.de