Digitale Photogrammetrie zur Beobachtung alpiner Massenbewegungen

ANDREAS KÄÄB^{*}

Zusammenfassung: Digitale Standardphotogrammetrie erlaubt es, grossflächige DTM mit hoher Punktdichte automatisch zu erfassen. Liegen Befliegungen mehrerer Epochen vor, können mittels multitemporaler DTM Massenverluste bzw. Massengewinne erkannt werden. Sind neben den vertikalen Veränderungen auch die korrespondierenden horizontalen Geländeverschiebungen bekannt, dann liegen dreidimensionale Deformationen einer Geländeoberfläche vor. Zur Messung solcher horizontalen Verschiebungen wurde ein digitales Verfahren entwickelt, das durch den Vergleich multitemporaler Bilder Verschiebungsvektoren mit ähnlicher Dichte und Genauigkeit wie DTM-Basispunkte automatisch bestimmt. Diese vollständig digitale Bildverarbeitungskette zur Bestimmung der dreidimensionalen Oberflächendeformation wird hier an Hand dreier Typen von alpinen Massenbewegungen evaluiert: Gletscherfliessen, Permafrostkriechen und Rutschungen. Die vorgestellten Verfahren ermöglichen die wirksame Beobachtung von mit alpinen Massenbewegungen verbundenen Naturgefahren und erlaubt signifikante Verbesserungen im Verständnis der involvierten Bewegungsdynamik.

1 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 Massenverlagerungen oft auch massive Gefahren für Mensch und Infrastruktur verbunden (HAEBERLI ET AL., 1997; HAEBERLI ET AL., 1999). 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 signifikant.
- Entlastung und Freilegung der Talflanken durch Gletscherschwund kann zu Hangdestabilisierung und damit zu Rutschungen oder Sackungen führen.

Eine Vielzahl von morphologischen Indikatoren 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. 3-dimensionale 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 (KÄÄB, 1996; KÄÄB, 2000; KÄÄB ET AL. 2000). Gerade auch die digitale Photogrammetrie hat in diesem Zusammenhang wichtige neue Möglichkeiten eröffnet. Der Bildmessung ist jedoch jeweils nur die Geländeoberfläche zugänglich. Aussagen über Tiefenpro-

^{*} Dr. Andreas Kääb, Universität Zürich, Geographisches Institut, Winterthurer Straße 190, CH-8057 Zürich, internet: kaeaeb@geo.unizh.ch, http://www.geo.unizh.ch/~kaeaeb

zesse müssen über geophysikalische Untersuchungen und/oder numerische Modelle gewonnen werden. In diesem Beitrag werden zwei digitale photogrammetrische Verfahren kurz erläutert und dann an Hand einiger Fallbeispiele aus den Bereichen Gletscherfliessen, Permafrostkriechen und Hangrutschungen evaluiert.

2 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 der Eidgenössischen Vermessungsdirektion, zumeist im Rahmen der Gefahrenüberwachung (Hanginstabilitäten, Gletscherseen etc.) oder Klimabeobachtung (Gletscher, Permafrost) (KÄÄB, 1996). Zur Bestimmung der Geländegeometrie und ihrer temporalen Veränderungen wurden Standardverfahren der digitalen Photogrammetrie angewendet (vgl. z.B. BALTSAVIAS ET AL, 1996; FAVEY ET AL., 2000). 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 (KÄÄB & VOLLMER, 2000). 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 Geländeveränderungen extrahiert werden. Im Zusammenhang mit alpinen Massenbewegungen interessieren zumeist eher jene grossräumigen Veränderungen. (KÄÄB, 1996).



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

Zur Messung von horizontalen Bewegungen kommt eine Spezialsoftware zum Einsatz (CIAS: Correlation Image Analysis System; VOLLMER, 1999; KÄÄB & VOLLMER, 2000). Eingangsdaten sind digitale Orthophotos zweier verschiedener Zeitpunkte, wie sie mit digitaler photogrammetrischer Standardsoftware erstellt werden können (BALTSAVIAS, 1996). Zwischen diesen zwei georeferenzierten Orthophotos werden nun über Blockmatching 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 Stufe kann über Bildinterpolation Subpixelgenauigkeit erreicht werden. Hier soll aber darauf hingewiesen werden, dass die Definitionsunschärfen der Natur und kleinräumigste Geländedeformationen diese Genauigkeit oft übersteigen, also unnötig machen. Im schuttbedeckten Gelände mit sich ähnelnden Blöcken und Strukturen können durchaus Verwechslungen (mismatches) auftreten. Innerhalb CIAS werden diese überwiegend durch Schwellwerte des Korrelationskoeffizienten, automatische Analyse des Bewegungsfeldes und Tiefpassfilterung ausgeschaltet. (Für ähnliche Verfahren vgl. Ladstädter, 1999; Kaufmann & Ladstädter, 2000).

3 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 eines Gletschers. Diese Veränderungen sind einerseits ein weltweit anerkannter und beachteter Klimaindikator, und stehen andererseits hinter vielen hochalpinen Naturgefahren.

Die Bestimmung von Geometrieänderungen von Gletschern mit Hilfe digitaler Photogrammetrie ist ein bekanntes Standardverfahren, für das zahlreiche Beispiele existieren (BALTSAVIAS ET AL, 1996; FAVEY ET AL., 2000). Hier sollen daher keine weiteren angefügt werden. Vielmehr zeigt Abb. 2 das Bewegungsfeld einer überwiegend schuttbedeckten Gletscherzunge in den Schweizer Alpen. Die beobachteten Fliessgeschwindigkeiten reichen von 2.5 Metern pro Jahr (m/a) bis zu wenigen cm/a. 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 5 Jahren gewählt. Im nicht mehr abgebildeten oberen Teil der Gletscherzunge mit deutlich grösseren Bewegungen dagegen kann mit jährlichen Bildern gearbeitet werden. Das Beispiel Abb. 2 zeigt deutlich den Nachteil der Zeitbasis von 5 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. (KÄÄB, 1996)



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

4 Permafrostkriechen

Permafrost (Lithosphärenmaterial, das 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 langsam deformierende Zungen bilden, die Lawaströmen ähneln. Solche sogenannten Blockgletscher sind ein deutlich sichtbares Element alpiner Massenaustauschprozesse in trocken-kalten Gebirgen. Daneben können sie auch auf verschiedene Art und Weise an der Murgangbildung beteiligt sein (KÄÄB, 2000). 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 (KÄÄB & VOLLMER, 2000). Das Beispiel Abb. 3 – 5 zeigt jeweils den Blockgletscher im Val Muragl, Oberengadin, Schweiz. In Abb. 3 ist das aus Luftbildern von 1981 und 1994 gemessene Bewegungsfeld dargestellt. Die Oberflächengeschwindigkeiten weisen Beträge von bis zu 50 cm pro Jahr auf. Deutlich ist sichtbar, dass dieser Blockgletscher aus mehreren Kriechströmen besteht.



Abb. 3: Bewegungsfeld des Blockgletschers im Val Muragl, Engadin, Schweiz, aus Luftbildern von 1981 und 1994. Bewegungen in cm pro Jahr.



Abb. 4: Höhenunterschiede zwischen zwei DTMs des Blockgletschers im Val Muragl, Engadin, Schweiz, aus Luftbildern von 1981 und 1994. Höhenunterschiede in cm pro Jahr.

Die vertikalen Änderungen der Permafrostmächtigkeit (Abb. 4) zeigen ein ausgeglichenes Bild mit sowohl Senkungen als auch Hebungen im Bereich von ±10 cm/a. Diese Geometrieänderungen sind ein Resultat von thermischen (Eisschmelze, Frosthebung) und dynamischen Einflüssen (Stauchung durch kompressives Kriechen, Ausdünnung durch Extension). Im obersten Teil des Blockgletschers sind massive Senkungen festzustellen, die auf die Schmelze von Eisfeldern zurückzuführen ist. Die Schmelze solcher Eisflecken ist in vielen Bereichen der Alpen festzustellen (vgl. "Ötzi"), steht aber nicht im direkten Zusammenhang mit dem Verhalten von Blockgletschern.

Abbildung 5 schliesslich zeigt in einem Auschnitt des Blockgletschers eine hochauflösende Bewegungsmessung mit einer Rasterweite von 3 m. 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/a auf unter 20 cm/a innerhalb kurzer Distanz zu bemerken. Die für Blockgletscher typischen Querwülste dürften mit solchen Stauchungen zusammenhängen. Die in Abb. 5 gezeigten Vektoren stellen die ungefilterten Originalmessungen dar. Das gleichmässige Bewegungsfeld verdeutlicht die gute Konservierung der Oberfläche trotz 13 Jahren Deformation. (KÄÄB & VOLLMER, 2000).



Abb. 5: Hochaufgelöstes Bewegungsfeld des in Abb. 3 markierten Ausschnittes, ebenfalls 1981-1994. An den kleinen Quadraten 1-4 wurden geophysikalische Bohrungen durchgeführt.

5 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. Abb. 6 zeigt einen Ausschnitt einer automatischen photogrammetrischen Bewegungsmessung auf einer grossen Rutschung an der Zunge des Aletschgletschers, Wallis, Schweiz (rohe Messungen). Zwischen 1976 und 1995 traten dabei Verschiebungen von insgesamt bis zu 2 m auf. Aus Messungen mit höherer zeitlicher Auflösung ist bekannt, dass diese Beträge vor allem aus dem zweiten Teil der Beobachtungsperiode stammen. Auslöser der Rutschung ist der Rückzug des Aletschgletschers (Abb. 6, rechte untere Ecke), der einen Höhenverlust von 200-300 m im Bereich der Rutschung mit sich brachte und somit die betroffene Hangpartie massiv entlastete und destabilisierte (HAEBERLI ET AL., 1997). Im oberen Bereich der Rutschung wurden Senkungen, im unteren Bereich Hebungen festgestellt, beide in ähnlicher Grössenordnung wie die horizontalen Verschiebungen. (KÄÄB, 2000; KÄÄB ET AL., 2000).



Abb. 6: Ausschnitt des Verschiebungsfeldes auf einer Rutschung an der Zunge des Aletschgletschers, Schweiz.

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.

7 Dank

Die vorgestellten Luftbildanalysen wären nicht möglich gewesen ohne das hervorragende Luftbildmaterial des Flugdienstes der Eidgenössischen Vermessungsdirektion / Bundesamt für Landestopographie (Rolf Hübscher, Hans-Peter Gautschi and Daniel Lüscher). Wilfried Haeberli sei für die kontinuierliche Unterstützung der Arbeiten herzlich gedankt.

8 Literaturverzeichnis

- BALTSAVIAS, E.P., LI, H., STEFANIDIS, A. AND SINNING, M., 1996: Automatic DSMs by digital photogrammetry. Surveying World, 4(2): 18-21.
- BALTSAVIAS, E. P., 1996: Digital ortho-images a powerful tool for the extraction of spatialand geo-information. - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 51(2): 63-77.
- 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.
- HAEBERLI, W., WEGMANN, M. AND VONDER MÜHLL, D., 1997: Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. Eclogae Geologicae Helvetica, 90: 407-414.
- HAEBERLI, W., KÄÄB, A., HOELZLE, M., BÖSCH, H., FUNK, M., VONDER MÜHLL, D. UND KELLER, F., 1999: Eisschwund und Naturkatastrophen im Hochgebirge. Schlussbericht NFP31. -190 S. vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich.
- KÄÄB, A., 1996: Photogrammetrische Analyse zur Früherkennung gletscher- und permafrostbedingter Naturgefahren im Hochgebirge. - 182 S. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 145.
- KÄÄB, A., 2000: Photogrammetry for early recognition of high mountain hazards: new techniques and applications. - Physics and Chemistry of the Earth, 25(9): 765-770.
- KÄÄB, 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.
- KÄÄB, A., HUGGEL, C. UND PAUL, F., 2000: Früherkennung hochalpiner Naturgefahren mittels Fernerkundung. - Interpraevent 2000, 1: 49-60.
- 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.
- LADSTÄDTER, R., 1999: Automatisierte Messung von Geländemodellen und Fliessvektoren aus digitalen, multitemporalen Orthophotos – ein neuer Ansatz für das Blockgletscher-Monitoring. - 66 S. Diplomarbeit. Abteilung für Photogrammetrie und Fernerkundung. Technische Universität Graz.
- VOLLMER, M., 1999: Kriechender alpiner Permafrost: Digitale photogrammetrische Bewegungsmessung. 45 S. Diplomarbeit. Geographisches Institut. Universität Zürich.