

VIKTOR KAUFMANN

Zur Kinematik der Massenbewegung im Talschluss des Blaubaches, Gemeinde Krimml

On the kinematics of the Blaubach mass movement, Community of Krimml

Zusammenfassung:

In vorliegendem Artikel werden sowohl fotogrammetrische als auch geodätische Methoden, welche zur quantitativen Erfassung der Morphodynamik der Massenbewegung im Talschluss des Blaubachgrabens, Gemeinde Krimml, zum Einsatz kamen, besprochen. Das dargestellte Methodenspektrum zielt darauf ab, einerseits mit Luftbildzeitreihen das Bewegungsmuster des Rutschhanges flächendeckend und zeitlich zurückblickend und andererseits die aktuelle Bewegung durch geodätische Einzelpunktbeobachtung zu erfassen. Ein diesbezügliches Monitoringprogramm wurde im Zuge von Sicherungs- und Sanierungsarbeiten im Blaubachgraben durch die WLW, Gebietsbauleitung Pinzgau, initiiert. Erste Ergebnisse in Hinblick auf Hangstabilisierung werden diskutiert.

Schlüsselwörter: Massenbewegung, Hangrutschung, Geomorphometrie, geodätisches und fotogrammetrisches Monitoring, Blaubachgraben

Summary:

This work describes, both photogrammetric and geodetic methods used for the quantitative detection of morphodynamic mass movement in the upper part of the catchment area of the "Blaubach" torrent in the community of Krimml. The described methods aim to provide basic information to reconstruct the morphodynamics of the landslide area using historical multi-temporal aerial photographs. The other, the present state of the current mass movement is observed by geodetic single-point surveying.

In the course of protective measurements a monitoring program has been initiated by the Oberpinzgau regional branch of the Austrian Forest Engineering Service of Torrent and Avalanche Control. First results in term of slope stabilization will be discussed.

Key words: mass movement, landslide, aerial photogrammetry, geodetic survey, change detection, deformation measurement, Torrent of Blaubach

1. Fotogrammetrische Messungen

Da zu Projektbeginn (2000/2001) keine quantitativen Angaben zum Bewegungsverhalten der Rutschung bekannt waren und aktive Bereiche vorerst nur durch Felderkundung (ZOBEL, 2001) abgegrenzt werden konnten, bot sich die Fotogrammetrie als kostengünstige und effiziente Methode zur flächenhaften Erfassung der zeitlich zurückliegenden Morphodynamik an. Insbesondere interessieren hier die flächenhafte Abgrenzung der aktiven Rutschungszonen und im Speziellen numerische Angaben zu Bewegungsraten, zur Geländehöhenänderung und Massenbilanz. Aus Kostengründen wurde auf eine neuerliche Luftbildaufnahme – im Jahre 1989 erfolgte bereits eine projektbezogene Befliegung – verzichtet. Aus dem Luftbildarchiv des Bundesamtes für Eich- und

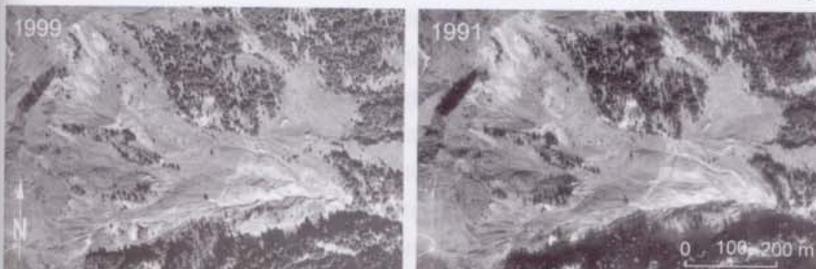


Abb.1: Orthofotos vom Rutschungsgebiet: linkes Bild vom 13.9.1999, rechtes Bild vom 11.10.1991. Die Bewegungsparallaxe wird bei stereoskopischer Betrachtung (mit Linsenstereoskop oder freiäugig) als 3D-Oberflächendeformation wahrgenommen. Die Hauptbewegungsrichtung der Massenbewegung muss parallel zur Betrachtungsbasis ausgerichtet sein. Verwendet man Bilder der sog. Revisionsflüge des BEV, so ist eine visuelle Bewegungsdetektion auch ohne Orthofotografie möglich. Luftbilder. © BEV-2001, Zl. 40708/01.

Fig. 1: Digital orthophotos (left, 13.9.1999; right, 11.10.1991) covering the landslide area. Image parallaxes introduced by surface movement can be recognized stereoscopically by means of a lens stereoscope or even with the naked eye. The main flow direction of the mass movement has to be orientated parallel to the observation baseline. The visual detection of surface movement (deformation) is directly possible using the multi-temporal photographs of the so called revision flights of the Austrian Federal Office of Metrology and Surveying (BEV), Vienna.

Vermessungswesen (BEV) in Wien wurde Luftbildmaterial von insgesamt 11 verschiedenen Epochen für den Zeitraum 1953-1999 für die angestrebte Geländedeformationsanalyse des Arbeitsgebietes ausgewählt. Mittlerweile wurde dieser Luftbildbestand durch eine weitere Befliegung aus dem Jahre 2004 ergänzt. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten fotogrammetrischen Arbeiten er-

folgten wahlweise am analytischen Plotter DSR-1 von Kern bzw. auf einer digital-fotogrammetrischen Arbeitsstation ISSK von Z/I Imaging. Mit Fortschreiten des Projektes wurde vollständig auf die digital-fotogrammetrische Auswerteschiene umgestellt.

1.1 Wandernde Gebäude und Bäume

Als Grundlage für die Erfassung der raum-zeitlichen Änderung der Geländeoberfläche im Untersuchungsgebiet erfolgte vorerst eine fotogrammetrische Orientierung aller vorhandenen Messbilder im übergeordneten Koordinatensystem der amtlichen Vermessung über stabile Stütz-(Einpass-)punkte, welche im näheren bzw. weiteren Umgebungsbereich der Rutschungszone ausgewählt wurden. Hierbei konnte bereits festgestellt werden, dass jene beiden Gebäude G1

und G2 (siehe Abb. 4), welche knapp außerhalb des stark aktiven Rutschungsbereiches liegen, einer hangabwärts gerichteten Bewegung unterliegen. Für den gesamten Beobachtungszeitraum 1953-2004 wurde eine mittlere horizontale Bewegungsrate der Gebäude von 4,4 cm/Jahr festgestellt. Die daraus ableitbare Kriechbe-

wegung des betroffenen Geländebereiches wurde in späterer Folge durch geodätische Messungen (vgl. Abschnitt 3) bestätigt.

Die visuelle Identifikation von innerhalb der aktiven Rutschungszone liegenden und über die Jahre hinweg unverändert bleibenden Strukturen (punktförmig, linienförmig) ist auf Grund der gegebenen Morphodynamik, der Geländestruk-

turierung und der almwirtschaftlichen Nutzung schwierig. Markante Objekte, wie z.B. Bauwerke oder ausgeprägte Geländekleinformen, fehlen. Als Alternative wurde die Ableitung von kinematischen Größen aus der Lageveränderung des den Rutschhang querenden Wanderweges und von im Rutschhang sich vereinzelt befindlichen Bäumen in Erwägung gezogen (vgl. Abb. 4). Eine gute Abschätzung der Bewegungsrate im Bereich des Wanderweges ist überall dort möglich, wo der Weg (Pfad) quer zur Hangbewegung verläuft. Die in Computeranimationen¹ gut erkennbare hangabwärts gerichtete Verlagerung des Wanderweges wurde jedoch nicht weiter messtechnisch erfasst, zumal eine durch den Menschen zusätzlich verursachte Änderung der Wegführung nicht völlig ausgeschlossen werden konnte.

Stattdessen wurde versucht, ausgewählte Einzelbäume (insgesamt 49) über den gesamten Beobachtungszeitraum zu verfolgen. Ausgewertet wurden 40 Bäume für den Zeitraum 1997-2004, 40 für 1991-1999, 40 für 1987-1991, 22 für 1987-1993, 40 für 1987-1989, 14 für 1962-1969, 12 für 1953-1962 bzw. 6 für 1953-2004. Die beiden Bäume B1 und B2 (siehe Abb. 4) haben sich im Zeitraum 1953-2004 um insgesamt 23,90 m (= 0,47 m/Jahr) bzw. 56,47 m (= 1,11 m/Jahr) in horizontaler Richtung hangabwärts bewegt. Auf Grund der natürlichen Fluktuation im Baumbestand durch Anwuchs und Absterben und weiters durch Verlust von Bäumen bei massiven Rutschereignissen konnten nur insgesamt 6 der 49 ausgewählten Bäume in allen Epochen zwischen 1953 und 2004 beobachtet werden. Insbesondere sind im Zeitraum 1953-1983 eine große Anzahl von Bäumen im nördlichen Randbereich durch verstärkte Rutschung (1,6 m/Jahr) und rückschreitende Erosion enturzelt worden. Aus der grafischen Darstellung der Bewegungsvektoren für die ein-

zelnen Beobachtungsintervalle lässt sich bereits sehr gut die raum-zeitliche Variabilität der Bewegungsraten für die orografisch linke Rutschungszone oberhalb der großen Abbruchkante bzw. für den Rutschungsbereich unterhalb des Gebäudes G1 erkennen. Messunsicherheiten ergeben sich maßstabsabhängig durch die unscharfe Definition der Baummitte (Stammmitte) über die Wipfelspitze der beobachteten Bäume (Fichten). Ferner kann es infolge der Morphodynamik des Geländes zu einer Schiefstellung von Bäumen kommen, womit auch eine Änderung der Wuchsrichtung einhergeht. Messungen an solchen Bäumen sind ebenfalls mit entsprechenden Unsicherheiten versehen. Auch können die Beleuchtungsverhältnisse (schattenplastische Wirkung) das Messergebnis entscheidend beeinflussen.

1.2 Geländehöhenänderung

Die durch Massenumlagerung bzw. -abtrag hervorgerufene Änderung der Topografie kann durch Differenzbildung von digitalen Geländemodellen (DGM) unterschiedlicher Epochen erfasst werden. Hochauflösende digitale Geländemodelle wurden vorerst für die Epochen 1953, 1989, 1997 und 2004 durch manuelle fotogrammetrische Auswertung gewonnen. Alle anderen digitalen Geländemodelle der übrigen Epochen wurden mit etwas verminderter Genauigkeit im Zuge der automatisierten digital-fotogrammetrischen Bewegungsmessung erfasst (vgl. nächster Abschnitt). Die vertikale Änderung der Geländeoberfläche wurde mit farbkodierten thematischen Karten grafisch dargestellt. Eine Ableitung von horizontalen Bewegungsraten durch Korrelation von identen Geländeformen wurde in dieser Studie nicht näher verfolgt. Die Morphodynamik der gesamten Y-förmigen Rutschungszone kommt gut in der erstellten Computeranimation, in der die Geländehöhenänderung von 1953-2004 dynamisch in Flächenfarben dargestellt wird, zur Geltung. In

¹ <http://www.geoimaging.tugraz.at/viktor.kaufmann/animations.html>

dieser Computeranimation erkennt man insbesondere die große Geländehöhenänderung (Maximalbeträge von bis zu -17 m innerhalb von 51 Jahren) unterhalb der großen Abbruchkante und die im Laufe der Zeit immer stärker werdende Erosion in der südlichen Rutschungszone unterhalb der Schmalscharte, dort wo der Blaubach seinen Ursprung hat. Die von der Massenbewegung beeinflussten bewaldeten Hangbereiche im S der Hangrutschungszone konnte nur unzureichend stereoskopisch erfasst werden. Dieser Geländeabschnitt könnte sicherlich durch flugzeuggestütztes Laserscanning besser erfasst werden. Für das örtlich eingegrenzte Untersuchungsgebiet wurden auf Basis der hochauflösenden Geländemodelle Massenbilanzen gerechnet. Obwohl die Fehlerangaben (8-13% Relativfehler) relativ hoch sind, können dennoch aussagekräftige Schlüsse gezogen werden: (1) Die Massenbilanzen sind für das Untersuchungsgebiet signifikant negativ. (2) Der Massenabtrag hat im Untersuchungszeitraum 1989-1997 (~12.300 m³/Jahr) signifikant gegenüber dem Beobachtungszeitraum 1953-1989 (~4.500 m³/Jahr) zugenommen.

1.3 Automatisierte Oberflächendeformationsmessung

In den beiden vorhin besprochenen Unterabschnitten erfolgte die fotogrammetrische Messung der Oberflächenänderung interaktiv durch einen geschulten Auswerter. Für die automatisierte Erfassung eines dichten Feldes von 3D-Verschiebungsvektoren müssen Methoden des maschinellen Sehens (KRAUS, 2004, 361 ff.) herangezogen werden. Im Rahmen des Projektes wurde die Software ADVM (Automatic Displacement Vector Measurement), welche am Institut für Fernerkundung und Fotogrammetrie der TU Graz ursprünglich für Deformationsmessungen von Blockgletschern – das sind Kriechphänomene des diskontinuierlichen Permafrosts – und Gletschern entwickelt wurde, eingesetzt (vgl. KAUFMANN

& LADSTÄDTER, 2004). Die Software basiert auf dem Konzept des multiphoto geometrically constrained matching (BALTSAVIAS, 1991). Für das least squares matching (LSM) werden jedoch vorentzerte Bilddaten, sog. Quasi-Orthofotos, verwendet. Der Vorteil der Quasi-Orthofotos liegt darin, dass die automatische Messung von homologen Bildpunkten in den multitemporalen Luftbildern, welche oftmals unterschiedliche Bildmaßstäbe und Orientierungen, sowie große Bildverzerrungen infolge ausgeprägter Geländehöhenunterschiede aufweisen können, erleichtert wird. Die Prozessierungskette kann wie folgt kurz beschreiben werden: (1) fotogrammetrische Bildorientierung, (2) Erstellung der Quasi-Orthofotos bzw. von Orthofotos bei Verwendung von korrekten digitalen Geländemodellen, (3) Extraktion von markanten Punkten in einem der Quasi-Orthofotos mithilfe des Förstner-Operators, (4) automatische Punktmessung in den übrigen

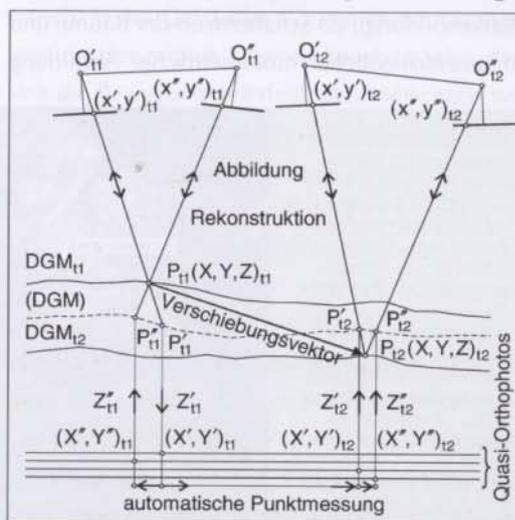


Abb. 2: Prinzipische Skizze der automatisierten Messung von 3D-Verschiebungsvektoren in multitemporalen Luftbildern (hier zwei Epochen mit jeweils einem Stereobildpaar). Die automatische Punktmessung (image matching) erfolgt in vorentzerten Luftbildern, den sog. Quasi-Orthofotos. Abbildung verändert nach KAUFMANN & LADSTÄDTER, 2004.

Fig. 2. Basic concept of the automatic measurement of 3-D displacement/flow vectors using multi-temporal quasi-orthophotos. Quasi-orthophotos are computed using a rough, preliminary digital terrain model. Drawing modified from KAUFMANN & LADSTÄDTER, 2004.

Quasi-Orthofotos und (5) fotogrammetrische Punktrekonstruktion in 3D (vgl. Abb. 2).

Das dargestellte Verfahren garantiert eine mathematisch strenge Bestimmung des gesuchten Verschiebungsvektors. Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Messung von 3D-Verschiebungsvektoren ist eine ausreichende und über den Beobachtungszeitraum gleich bleibende Fototextur der Geländeoberfläche. Dekorrelation der Fototextur führt zu mangelnder Rechenkonvergenz bzw. zu Fehlmessungen (Ausreißern). Das dargestellte Verfahren funktioniert überall dort gut, wo auch die stereoskopische Betrachtung einen der Bewegungsparallaxe entsprechenden Raumeffekt vermittelt (vgl. Abb. 1 mit Abb. 3). Bei der praktischen Umsetzung im Projekt ergaben sich u.a. Schwierigkeiten infolge (1) mangelnder Fototextur insbesondere im Bereich von unstrukturierten Wiesen, (2) starker Oberflächenveränderungen durch massive Rutschungsereignisse bzw. Erosion (Blaikenbildung), (3) Schattenwurf der Bäume und (4) unterschiedlicher radiometrischer Abbildung

von Vegetationsflächen in panchromatischen bzw. Farbinfrarotaufnahmen, d.h., die Grautonbilder waren nicht direkt über ihre Intensitätswerte miteinander vergleichbar. Es wurden insgesamt 15 verschiedene Zeiträume ausgewertet, wobei zwei ein sehr gutes und weitere zwei kein brauchbares Ergebnis lieferten. Im Mittel wurden pro Zeitraum etwa 30.600 Verschiebungsvektoren für das Untersuchungsgebiet bestimmt. Kein befriedigendes Ergebnis wurde erwartungsgemäß im bewaldeten Gebiet erzielt. Eine Kontrolle der so ermittelten 3D-Verschiebungsvektoren erfolgte in ausgewählten stabilen Geländeabschnitten außerhalb der Rutschungszone. Die dort festgestellten Verschiebungen wurden nach statistischen Gesichtspunkten zur Korrektur etwaiger systematischer Fehler bzw. zur Genauigkeitsabschätzung ausgewertet. Die Detektion von Fehlmessungen konnte nur interaktiv (semi-automatisch) zufriedenstellend gelöst werden. Für Vergleichszwecke wurden die ermittelten Bewegungsvektoren auf Einjahreswerte skaliert. Besonders anschaulich kann die Hori-

Abb.3: Orthofotokarte mit Darstellung des Vektorfeldes (Rasterweite 20 m) der mittleren jährlichen Horizontalbewegung des Rutschhanges Blaubachgraben für den Beobachtungszeitraum 1991-1999. Die maximale Bewegungsrate beträgt 1,3 m/Jahr. Die Oberflächendeformationsmessung erfolgte automatisiert mit der Software ADVM. Vergleiche dazu die Abb. 1. Das Luftbild wurde am 11. Oktober 1991 aufgenommen. Luftbild: © BEV-2001, Zi. 40708/01.

Fig. 3. Orthophoto map showing the mean annual horizontal displacement/flow vectors (grid spacing of 20 m) at Blaubach landslide for the time period 1991-1999. The maximum flow velocity amounts to 1,3 m/year. The measurement of the surface deformation (flow velocity of the landslide) was carried out using ADVM software. Aerial photograph taken on 11.10.1991. Compare this figure with Figure 1.





Abb. 4: Orthofotokarte mit Darstellung der mittleren jährlichen Horizontalbewegung der 41 Beobachtungspunkte des Rutschhanges Blaubachgraben für den Beobachtungszeitraum September 2004-2005. Die maximale Bewegungsrate beträgt 50 cm/Jahr. Die geodätische Beobachtung des Punktes im Nahbereich des Gebäudes G1 ergab eine Kriechrate von 6 cm/Jahr. Man beachte den doppelten Maßstab der Bewegungsvektoren im Vergleich zur Abb. 3. Das Luftbild wurde am 6. September 2004 aufgenommen. Luftbild: © BEV-2005.

Fig. 4: Orthophoto map showing the mean annual horizontal movement of the 41 observation points of the Blaubach landslide for the time period 2004-2005. The maximum flow velocity amounts to 0,5 m/year. The observation point closest to the building G1 displays a creeping rate of 6 cm/year. Displacement vectors were derived by means of geodetic measurements. Please note the double scale of the displacement vectors in comparison to Figure 3. Aerial photograph acquired on 6.9.2004.

maximum flow velocity amounts to 0,5 m/year. The observation point closest to the building G1 displays a creeping rate of 6 cm/year. Displacement vectors were derived by means of geodetic measurements. Please note the double scale of the displacement vectors in comparison to Figure 3. Aerial photograph acquired on 6.9.2004.

zontalbewegung mittels Vektorfeld (Abb. 3) bzw. Isoliniendarstellung visualisiert werden. Auf eine detaillierte Analyse der raum-zeitlichen Änderung der Kinematik des Rutschhanges basierend auf dem Auswertergebnis kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

Die Zeitreihe bestätigt, dass die Rutschung seit 1953 stets aktiv war. Das im Allgemeinen glatte Bewegungsmuster wurde im Laufe der Zeit immer wieder durch lokale Rutschungsereignisse gestört. Für den Zeitraum 1962-1969 konnte u.a. eine beschleunigte Bewegung der Rutschungszone unterhalb der Schmalscharte mit max. Bewegungsraten von bis zu 1,6 m/Jahr festgestellt werden. In den 60er- und frühen 70er-Jahren war die Bewegung im Bereich unterhalb der Breitscharte wesentlich geringer als im Bereich unterhalb der Schmalscharte. In den 90er-Jahren wurden max. Bewegungsbeträge von 1,3 m/Jahr gemessen, für Bereiche unmittelbar oberhalb der großen Abbruchkante ergaben sich mittlere Bewegungsraten von ca. 1 m/Jahr. Ähnlich große Geschwin-

digkeiten wurden auch für die Rutschungszone unterhalb des Gebäudes G1 gemessen. Die Auswertung der zeitlich jüngsten Epochen zeigt, dass sich die Bewegung unterhalb der Breitscharte wesentlich verstärkt hat. ADVM lieferte als Nebenprodukt auch digitale Geländemodelle zu allen Epochen (vgl. Abschnitt 2.2).

2. Geodätische Messungen

Um die aktuelle Bewegung des Rutschhanges und in weiterer Folge auch ihre zeitliche Änderung mit hoher Genauigkeit erfassen zu können, wurde ein geodätisches Monitoring eingerichtet. Die diesbezüglichen Arbeiten wurden vom Institut für Navigation und Satellitengeodäsie der TU Graz durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurde unter Beziehung eines Geologen (F. ZOBL) ein geodätisches Stütznetz, welches zu Messbeginn (2001) aus drei stabilen Punkten (S1-S3) bestand, installiert. 2003 wurde das Stütznetz durch einen

weiteren Punkt S4 auf der neu errichteten Konsolidierungssperre erweitert. Auf Grund der topografischen Gegebenheiten erfolgte die koordinative Bestimmung der Stützpunkte durch eine Kombination von geodätischer Netzmessung und GPS-Einzelpunktbestimmung. In einem zweiten Schritt wurden – basierend auf den bereits vorhandenen fotogrammetrischen Messergebnissen – insgesamt 41 Messpunkte so ausgewählt, dass diese die beiden Rutschungszonen unterhalb der Breit- und Schmalscharte und jenes Gebiet unterhalb des Gebäudes G1 gut erfassen. Die dauerhafte Stabilisierung dieser Punkte erfolgte durch 1 m lange Torstahlstangen, welche in den relativ weichen Untergrund geschlagen wurden (Abb. 5). Diese kostengünstige Vorgangsweise hat sich im Laufe des Projektes als zielführend herausgestellt.

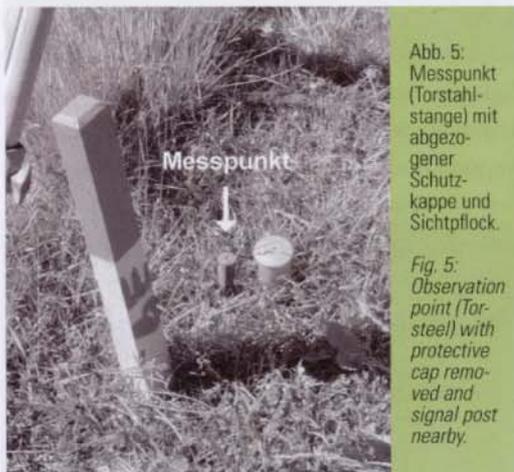


Abb. 5: Messpunkt (Torstahlstange) mit abgezogener Schutzkappe und Sichtpflock.

Fig. 5: Observation point (Torsteel) with protective cap removed and signal post nearby.

Die Einmessung der Messpunkte erfolgte stets durch mehrfache Polaraufnahme von den Stützpunkten aus. Die Nullmessung wurde im Juli 2001, die erste Wiederholungsmessung der Messpunkte noch im Oktober desselben Jahres durchgeführt. Weitere Wiederholungsmessungen erfolgten dann im Jahresrhythmus, jeweils Ende September bzw. Anfang Oktober (letztmalige Messung im Jahre 2007). Aus Kostengründen beschränkte sich die Überprüfung der Stabilität des Stütznetzes nur auf die jährlichen geodätischen

Messungen (kleine Netzmessung). 2006 wurde auch eine Überprüfung der Punktstabilität mittels GPS-Messungen durchgeführt.

Aus den ermittelten Verschiebungsvektoren der Messpunkte können durch Normierung Jahreswerte für die Horizontal- bzw. Vertikalbewegung abgeleitet werden (vgl. Abb. 4).

Anmerkung: Für einen Bereich in der Nähe des Stützpunktes S3 kann die aktuelle Bewegungsrate auch durch Direktmessung vor Ort (siehe Abb. 6) abgeschätzt werden.

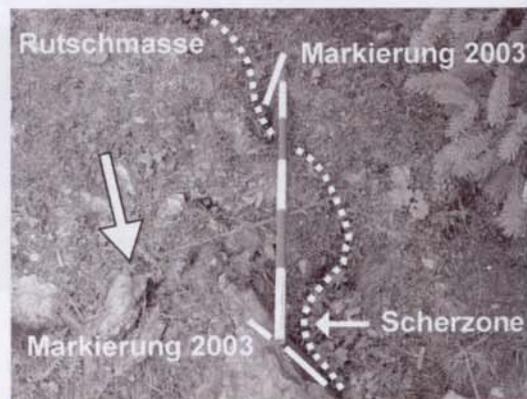


Abb. 6: Bestimmung der Bewegungsrate aus der Versetzung eines Messstriches, welcher im September 2003 quer über eine sichtbare Scherszone (Nähe Stützpunkt S3) angelegt wurde. Foto vom September 2005. Aus dem gemessenen Versatz kann eine mittlere Bewegungsrate von ca. 25 cm/Jahr abgeleitet werden.

Fig. 6: Estimation of the surface flow velocity derived from the displacement of a coloured marker line crossing the visible shear zone (close to the reference point S3). Photograph taken in September 2005. The displacement rate calculated amounts to approx. 0.25 m/year.

Für den Zeitraum 2004-2005 kann folgendes Bewegungsverhalten des Rutschhanges grob skizziert werden: Der Bereich um das Gebäude G1 bewegte sich – wie schon fotogrammetrisch abgeschätzt wurde – mit ca. 6 cm/Jahr in horizontaler Richtung hangabwärts. Die unterhalb liegende Rutschungszone bewegte sich im Mittel mit etwa 8 cm/Jahr (obere Einheit) bzw. mit 26 cm/Jahr (untere Einheit). In diesem unteren Geländeabschnitt wurden 2003 Drainageanlagen installiert. Im Beobachtungszeitraum 2001-2003 betrug hier die mittlere Horizontalbewegung 59

cm/Jahr. Im Zeitraum 1991-1999 lagen die fotogrammetrisch bestimmten Bewegungsraten noch bei 110 cm/Jahr. Unterhalb der Breitscharte nimmt die festgestellte Bewegung von oben (50 cm/Jahr) nach unten hin (12 cm/Jahr) ab. Die Punkte bei der großen Abbruchkante im nördlichen Rutschungsbereich bewegten sich im Mittel mit ca. 45 cm/Jahr. Im flacheren Bereich direkt unterhalb der Schmalscharte wurde eine (über die Jahre gleichbleibende) Bewegungsrate von ca. 6 cm/Jahr festgestellt.

Aus dem Vergleich der ermittelten Jahresbewegungen der Messpunkte geht hervor, dass es nicht nur zu signifikanten Änderungen der Bewegungsraten von Epoche zu Epoche, sondern auch zu unterschiedlichem Bewegungsverhalten zwischen den drei angesprochenen großen Rutschungszonen gekommen ist, wie z.B. für den Zeitraum 2002-2003, wo für beide Zonen oberhalb der Abbruchkante eine stark verminderte Bewegung (max. 14-15 cm/Jahr) festgestellt wurde, wohingegen es im unteren Bereich zu keiner signifikanten Änderung kam. Generell kann festgestellt werden, dass die Bewegungsraten im Vergleich zu den 90-er-Jahren insbesondere im Bereich oberhalb der Abbruchkante abgenommen haben, von über 100 cm/Jahr auf unter 50 cm/Jahr für den Beobachtungszeitraum 2001-2007.

Dank

Der Autor bedankt sich herzlichst bei G. KIENAST und R. LADSTÄDTER, beide TU Graz, für die maßgebliche Mithilfe bei den geodätischen und digital-fotogrammetrischen Arbeiten. Die praktische Realisierung des Projektes wäre ohne die tatkräftige Mithilfe von zahlreichen Studierenden der Studienrichtung Vermessungswesen und Geoinformation der TU Graz nicht möglich gewesen. Die Digitalisierung der analogen Luftbilder erfolgte durch freundliche Unterstützung der Firma Vexcel Imaging Austria.

Literatur/ References

- BALTSAVIAS, E.P. (1991):
Multiphoto geometrically constrained matching. Dissertation, Mitt. d. Inst. f. Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 49, 221 Seiten.
- KAUFMANN, V. & LADSTÄDTER, R. (2004):
Documentation of the Movement of the Hinteres Langtarkar Rock Glacier. IAPRS, Vol. XXXV, Part B7, Proceedings of the 20th Congress of ISPRS, Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004, 893-898.
- KAUFMANN, V. (2004):
Morphometric documentation and computer-based visualization of slope deformation and slope creep of the Blaubach landslide (Salzburg, Austria). Proceedings of the 7th International Symposium on High Mountain Remote Sensing Cartography, Bishkek, Kyrgyzstan, July 2002, Kartographische Bausteine, Band 28, Institute for Cartography, Dresden University of Technology, 99-107.
- KRAUS, K. (2004):
Photogrammetrie – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. Band 1, 7., vollst. bearb. u. erw. Aufl., de Gruyter Lehrbuch, 516 Seiten.
- ZOBL, F. (2001):
Abschätzung der Hangstabilitätsverhältnisse im Bereich des Einzugsgebietes der Krimmler Ache/Blaubach auf Basis einer geologisch-geomorphologischen Detailkartierung und GIS-Analyse. Unpubl. Diplomarbeit, Institut für Technische Geologie und Angewandte Mineralogie, UNI Graz und TU Graz, 164 Seiten.

Adresse der Verfasser/

Author's address:

Viktor Kaufmann
Institut für Geodäsie
Technische Universität Graz
Steyrergasse 30, A-8010 Graz, Austria
Tel.: +43 316 873-6336, Fax: +43 316 873-6337
e-mail: viktor.kaufmann@tugraz.at