Photogrammetrische und geodätische Dokumentation der Hangrutschung Blaubachgraben (Gemeinde Krimml, Salzburg) für den Zeitraum 1953-2006

Viktor KAUFMANN und Richard LADSTÄDTER

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt die photogrammetrischen und geodätischen Arbeiten zur Erfassung der Kinematik der Hangrutschung im Blaubachgraben (Gemeinde Krimml, Salzburg, Österreich) für den Zeitraum 1953 bis 2006. Das dargestellte Methodenspektrum zielt darauf ab, einerseits mit Luftbildzeitreihen das zeitlich zurückliegende Bewegungsverhalten des Rutschhanges flächendeckend und andererseits die aktuelle Bewegung durch geodätische Einzelpunktmessung zu erfassen.

Die diesbezüglichen Arbeiten wurden vom Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Gebietsbauleitung Pinzgau, Zell am See, Bundesland Salzburg in Auftrag gegeben. Die Durchführung oblag dem Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie (Projektleitung) und dem Institut für Navigation und Satellitengeodäsie, beide TU Graz.

1 Einleitung



Abb. 1: Lage des Studiengebietes.

Die Hangrutschung Blaubachgraben liegt im oberen Einzugsgebiet des Blaubaches (12°08' E, 47°13' N) westlich der Gerlos Alpenstraße (Abbildung 1). Über die Gefährdung des Ortes Krimml durch Geschiebematerial des Blaubaches wird bereits seit Jahrhunderten berichtet. Größere Schutzbauten wurden erstmals in den 50er-Jahren installiert, weitere bauliche Maßnahmen wie z. B. Konsolidierungssperren entlang des Baubaches wurden in jüngerer Zeit gesetzt. Die Y-förmige Rutschungszone (vgl. Abbildung 2) hat eine Längserstreckung von ca. 750 m und überstreicht einen Höhenbereich zw. 1.500

und 2.000 m. Im Hauptbereich der Massenbewegung stehen nur vereinzelt Bäume. Der westliche, obere Bereich des Rutschungsgebietes wird almwirtschaftlich genutzt, der östliche, untere Bereich ist aufgrund starker Erosion durch Blaikenbildung gekennzeichnet. Weiterführende Hinweise zur Hangrutschung aus geologischer und geomorphologischer Sicht gibt ZOBL 2001.



Abb. 2: Orthophotos 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 Orthophotoherstellung direkt möglich. Luftbilder: © BEV-2001, Zl. 40708/01.

2 Photogrammetrische Dokumentation

Da zu Projektbeginn (2000/2001) keine quantitativen Angaben zum Bewegungsverhalten der Hangrutschung bekannt waren und bewegungsaktive Bereiche vorerst nur durch Felderkundung (vgl. ZOBL 2001) abgegrenzt werden konnten, bot sich die Photogrammetrie als kostengünstige und effiziente Methode zur flächenhaften Erfassung der zeitlich zurückliegenden Kinematik des Rutschhanges an. Zur metrischen Dokumentation der Veränderungen der Geländeoberfläche im Rutschungsgebiet wurde eine Luftbild-Zeitreihe bestehend aus 12 verschiedenen Befliegungen (Luftbildarchiv des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen, Wien) des Zeitraumes 1953-2004 photogrammetrisch ausgewertet. Insbesondere konnten numerische Angaben zu Bewegungsraten, zur Geländehöhenänderung und Massenbilanz ermittelt werden. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten photogrammetrischen Arbeiten erfolgten wahlweise am analytischen Plotter DSR-1 von Kern bzw. auf einer digital-photogrammetrischen Arbeitsstation ISSK von Z/I Imaging. Mit Fortschreiten des Projektes wurde vollständig auf die digital-photogrammetrische Schiene umgestellt.

2.1 Wandernde Gebäude und Bäume

Als Grundlage für die Erfassung der raum-zeitlichen Änderung der Geländeoberfläche im Studiengebiet erfolgte vorerst eine photogrammetrische 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 Abbildung 4), welche knapp außerhalb der stark aktiven Rutschungsbereiches liegen, einer hangabwärts gerichteten Bewegung unterliegen. Für den Gesamtbeobachtungszeitraum 1953-2004 wurde eine mittlere horizontale Bewegungsrate der Gebäude von 4,4 cm/Jahr festgestellt. Die daraus ableitbare Kriechbewegung des be-

3

troffenen Geländebereiches wurde in späterer Folge durch geodätische Messungen bestätigt.

Für die Bestimmung von Bewegungsvektoren ist ein Verfolgen (Tracking) von identen Punkten unumgänglich. Dies ist jedoch in Rutschungsgebieten, wo nahezu keine künstlichen Baukörper – wie z. B. im gegenständlichen Fall – vorhanden sind, besonders erschwert (vgl. dazu BRÜCKL et al. 2006). Im Rahmen des Projektes bewährte sich jedoch die Messung von ausgewählten Einzelbäumen. Es wurden insgesamt 49 Bäume zur Ermittlung der horizontalen Bewegungskomponente herangezogen. 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 ausgewählten Bäume in allen Epochen beobachtet werden. Die beiden Bäume B1 und B2 (siehe Abbildung 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. Insbesonderes sind im Zeitraum 1953-1983 eine große Zahl von Bäumen im nördlichen Bereich der Rutschungszone durch verstärkte Bewegung (bis zu 1,6 m/Jahr) und auch rückschreitende Erosion entwurzelt worden.

2.2 Geländehöhenänderung

Die durch Massenumlagerung bzw. -abtrag hervorgerufene Änderung der Topographie kann durch Differenzbildung von digitalen Geländemodellen (DGM) unterschiedlicher Epochen erfasst werden (vgl. dazu auch BRÜCKL et al. 2006). Hochauflösende digitale Geländemodelle wurden vorerst für die Epochen 1953, 1989, 1997 und 2004 durch manuelle photogrammetrische Auswertung gewonnen. Alle anderen digitalen Geländemodelle der übrigen Epochen wurden mit etwas verminderter Genauigkeit im Zuge der automatisierten digital-photogrammetrischen Bewegungsmessung erfasst (vgl. nächster Abschnitt). Die vertikale Änderung der Geländeoberfläche wurde mit farbkodierten thematischen Karten graphisch dargestellt. Die Morphodynamik der gesamten Y-förmigen Rutschungszone kommt gut in einer Computeranimation¹, in der die Geländehöhenänderung von 1953-2004 dynamisch in Flächenfarben dargestellt wird, zur Geltung. In dieser Animation 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 Breitscharte, dort wo der Blaubach seinen Ursprung hat. Die von der Massenbewegung beeinflussten bewaldeten Hangbereiche im Süden der Hangrutschungszone konnten 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 http://www.geoimaging.tugraz.at/viktor.kaufmann/Blaubach_Landslide.html



Abb. 3: Orthophotokarte mit Darstellung des Vektorfeldes (Rasterweite 20 m) der mittleren j\u00e4hrlichen Horizontalbewegung des Rutschhanges Blaubachgraben f\u00fcr den Beobachtungszeitraum 1991-1999. Die maximale Bewegungsrate betr\u00e4gt 1,3 m/Jahr. Die Oberfl\u00e4chendeformationsmessung erfolgte automatisiert mit der Software ADVM. Vergleiche dazu die Abbildung 2. Luftbild: \u00c6 BEV-2001.

2.3 Automatisierte Oberflächendeformationsmessung

In den beiden vorhin besprochenen Unterabschnitten erfolgte die photogrammetrische Messung der Oberflächenänderung interaktiv durch einen geschulten Auswerter. Für die automatisierte Erfassung eines dichten Feldes von 3D Verschiebungsvektoren müssen Methoden des maschinellen Sehens herangezogen werden. Im Rahmen des Projektes wurde die Software ADVM (Automatic Displacement Vector Measurement), welche am Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie der TU Graz ursprünglich für Deformationsmessungen von Blockgletschern 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 vorentzerrte Bilddaten, sog. Quasi-Orthophotos, verwendet. Der Vorteil der Quasi-Orthophotos liegt darin, dass die automatische Messung von homologen Bildpunkten in den multitemporalen Luftbildern, welche oftmals unterschiedliche Bildmaßstäbe und Orientierungen, sowie große Bildverzerrungen zufolge ausgeprägter Geländehöhenunterschiede aufweisen können, erleichtert wird. Die Prozessierungskette kann wie folgt kurz beschrieben werden: (1) Photogrammetrische Bildorientierung, (2) Erstellung der Quasi-Orthophotos bzw. von Orthophotos bei Verwendung von korrekten digitalen Geländemodellen, (3) Extraktion von markanten Punkten in einem der Quasi-Orthophotos mit Hilfe

5

des Förstner-Operators, (4) automatische Punktmessung in den übrigen Quasi-Orthophotos und (5) photogrammetrische Punktrekonstruktion in 3D. Das dargestellte Verfahren garantiert eine mathematisch strenge Bestimmung des gesuchten Verschiebungsvektors. Das dargestellte Verfahren funktioniert überall dort gut, wo auch die stereoskopische Betrachtung einen der Bewegungsparallaxe entsprechenden Raumeffekt vermittelt (vgl. Abb. 2 mit Abb. 3). Bei der praktischen Umsetzung im Projekt ergaben sich u.a. Schwierigkeiten zufolge (1) mangelnder Phototextur 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. Es wurden insgesamt 15 verschiedene Zeiträume ausgewertet, wobei zwei ein sehr gutes (vgl. Abb. 3) 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 (vgl. dazu auch BRÜCKL et al. 2006).



Abb. 4: Orthophotokarte mit Darstellung der mittleren j\u00e4hrlichen Horizontalbewegung der 40 Messpunkte des Rutschhanges Blaubachgraben f\u00fcr den Beobachtungszeitraum 2001-2006. Die maximale Bewegungsrate betr\u00e4gt 49 cm/Jahr. Die geod\u00e4tische Beobachtung des Punktes im Nahbereich des Geb\u00e4udes G1 ergab eine Kriechrate von 5 cm/Jahr. Luftbild vom 6.9.2004, \u00fc BEV-2005.

3 Geodätische Dokumentation

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. In einem ersten Schritt wurde unter Beiziehung 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 Konsolidierungsperre erweitert. Auf Grund der topographischen Gegebenheiten erfolgte die koordinative Bestimmung der Stützpunkte durch eine Kombination von geodätischer Netzmessung und GPS-Einzelpunktbestimmung. In einem zweiten Schritt wurden insgesamt 40 Messpunkte so ausgewählt, dass diese die beiden Rutschungszonen unterhalb der Breit- und Schmalscharte und jenes Gebiet unterhalb des Gebäudes G1 gut erfassten. Die dauerhafte Stabilisierung dieser Punkte erfolgte durch 1 m lange Torstahlstangen, welche in den relativ weichen Untergrund geschlagen wurden. Diese kostengünstige Vorgangsweise hat sich im Laufe des Projektes als zielführend herausgestellt.

Die Einmessung der Messpunkte erfolgte stets durch mehrfache Polaraufnahme von den Stützpunkten aus. Die Nullmessung wurde im Oktober 2001 durchgeführt. Weitere Wiederholungsmessungen erfolgten dann im Jahresrhythmus (letztmalige Messung im Jahre 2006). Aus Kostengründen beschränkte sich die Überprüfung der Stabilität des Stütznetzes nur auf die jährlichen geodätischen Messungen (kleine Netzmessung). Für die Epoche 2006 war jedoch eine Überprüfung der Punktstabilität mittels GPS-Messungen geplant.

Aus der Analyse der nunmehr 5-jährigen Messreihe geht u. a. hervor, dass im Zeitraum 2005-2006 die bisher betragsmäßig größten Bewegungsraten mit bis zu 88 cm/Jahr gemessen wurden. Im Zeitraum 2002-2003 war die Bewegung hingegen stark vermindert.

Literatur

- Baltsavias, E. P. (1991): Multiphoto geometrically constrained matching. Dissertation, Mitt. d. Inst. f. Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, 49, 221 S.
- Brückl, E., F. K. Brunner & K. Kraus (2006): Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. Engineering Geology, doi:10.1016/j.enggeo.2006.09.004, 11 pages (in Druck).
- 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.
- Kaufmann, V. & R. Ladstädter (2004): Documentation of the Movement of the Hinteres Langtalkar Rock Glacier. IAPRS, Vol. XXXV, Part B7, Proceedings of the 20th Congress of ISPRS, Istanbul, Turkey, 12-23 July 2004, 893-898.
- 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.