
Photogrammetrische Beobachtung von gravitativen Massenbewegungen im Hochgebirge

Adrian EMMERT, Ludwig HOEGNER, Agnes DINKEL, Uwe STILLA

Technische Universität München, Photogrammetrie und Fernerkundung ·
adrian.emmert@tum.de, ludwig.hoegner@tum.de, stilla@tum.de

Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden Genauigkeiten bei der photogrammetrischen Erfassung von Bewegungen in abbruchgefährdeten Felsbereichen untersucht. Dabei geht es sowohl um die Genauigkeit der erzeugten 3D-Punkte und ihr Rauschen, als auch um die Genauigkeit der Registrierung von zwei Punktwolken verschiedener Aufnahmezeitpunkte. Es wird davon ausgegangen, dass die Punktwolken über Passpunkte im selben Koordinatensystem vorliegen, wobei nicht zwingend dieselben Passpunkte zu beiden Zeitpunkten vorhanden sein müssen. Eine genaue Koregistrierung ist Voraussetzung für die Änderungsdetektion zur späteren Abschätzung von Massebewegungen. Das Rauschen wird anhand zweier am gleichen Tag mit wenigen Stunden Abstand aufgenommenen Bildserien untersucht. Durch die begrenzte Messgenauigkeit der Passpunktkoordinaten ist eine Feinregistrierung notwendig. Um Fehlzuordnungen zu vermeiden, wird ein iteratives Verfahren vorgestellt, um über ein Konfidenzintervall stabile von nicht-stabilen Punkten zu trennen und die Koregistrierung dann nur auf Basis der stabilen Punkte durchzuführen. Aus diesem Vorgehen ergibt sich direkt aus den nicht-stabilen Punkten die Änderungsdetektion. Die vorgeschlagene Methode wird an einem Fallbeispiel mit zwei Messepochen (Juli 2018 und September 2018) untersucht. Hierbei konnte das Rauschniveau ermittelt und eine Änderungsdetektion durchgeführt werden. Die erhobenen Daten entsprechen dabei den zeitgleich aufgenommenen Daten der Tachymetermessung. In Übereinstimmung mit Ergebnissen komplementär durchgeführter Messungen wird festgestellt, dass über den Untersuchungszeitraum noch keine signifikanten Bewegungen festgestellt werden können.

1 Motivation

Alpine Massenbewegungen von Festgestein stellen eine große Gefahr für Bevölkerung und Infrastruktur in Gebirgsgebieten dar. Bekannte Beispiele hierfür sind der Felssturz in Stein an der Traun 2010 (Thuro and Bundschuh, 2012) oder der Bergsturz am Piz Cengalo 2011 (Amann et al., 2018), bei denen jeweils Todesopfer zu beklagen waren. Auch am 2592m hohen Hochvogel in den Allgäuer Alpen sind tiefe Risse sichtbar, die als Anzeichen eines zukünftigen Sturzereignisses betrachtet werden (Abb. 1). Kleinere Massenbewegungen führten bereits vor Jahren zur Sperrung eines Wanderwegs (Landesregierung, 2017). Zur Erforschung von Frühwarnsystemen vor einem drohenden Ereignis wurde 2017 das interdisziplinäre Projekt AlpSenseBench gestartet (AlpSenseBench, 2018). Im Rahmen des Projekts werden verschiedene geologische, geodätische und photogrammetrische Verfahren zur Untersuchung alpiner Naturgefahren angewendet und gegenübergestellt. Verschiedene

Arbeitsgruppen (Abb. 2) wurden auf Grund des hohen Materialaufwandes (Tachymeter, Gravimetrie, mehrere Kameras, Teleskopausleger) zur Installation der Geräte auf den Gipfel geflogen.



Abb. 1: Untersuchungsgebiet Hochvogel. Blick auf Hauptspalte am Gipfel und sich durch den Gipfelaufbau ziehenden Riss.



Abb. 2: Anflug auf den Hochvogel. Die erste Gruppe wartet am Felsvorsprung auf das Ausladen des Materials.

Um das Volumen der sich bewegenden Felsmasse abschätzen zu können, muss die Art der Massenbewegung bestimmt werden, die wiederum durch die Untersuchung von Bewegungsmustern bestimmt werden kann (Brunetti et al., 2009; Cruden and Varnes, 1996; Hungr et al., 2014). Häufig angewendete Verfahren sind Untersuchungen mit GNSS und direkte Bewegungsmessungen mit Extensometern (Malet et al., 2002; Massey et al., 2013; Squarzoni et al., 2005). Diese liefern jedoch nur Punktinformationen. Flächenhafte Ergebnisse, wie sie hingegen durch Laserscanning oder Radarinterferometrie erreicht werden, erlauben die Bestimmung hochgenauer und komplexerer 3-D Bewegungsmuster, erfordern jedoch einen vergleichsweise hohen Material- und Arbeitsaufwand (Delacourt et al., 2007; Kasperski et al., 2010; Oppikofer et al., 2009).

Die Anwendung photogrammetrischer Verfahren ist heute Standard für viele geowissenschaftliche Fragestellungen (Eltner et al., 2016; Westoby et al., 2012). In Hochgebirgsumgebungen, wo im steilen Gelände nur eine begrenzte Anzahl von Kamerapositionen verwirklicht werden kann, werden mittels photogrammetrischer Verfahren beispielsweise Hangstabilitäten oder die Bewegungen von Lockermaterial wie Rutschungen oder Blockgletschern untersucht (Hendrickx et al., 2019; Kääh et al., 2014; Piermattei et al., 2016; Stumpf et al., 2015). Dank einer vergleichsweise einfachen Datenaufnahme und leicht verfügbarer, ausgereifter Software erlauben vor allem Ansätze, die Structure-from-Motion (SfM) und Multi-View Stereo (MVS) Techniken benutzen, die Anwendung photogrammetrischer Verfahren durch angeleitete Nutzer (Favalli et al., 2012; Micheletti et al., 2015). Oberflächenänderungen im Festgestein mit deutlich langsameren Bewegungen werden seltener hinsichtlich Bewegungsmustern, sondern vor allem hinsichtlich Volumenänderungen untersucht, wobei mit Laserscanning gearbeitet wird (Darmawan et al., 2018; Esposito et al., 2017; Roberti et al., 2018; Warrick et al., 2016).

Ziel dieser Arbeit ist die Darstellung eines Versuchsaufbaus zur Untersuchung einer bevorstehenden Massenbewegung mittels durch terrestrische Photogrammetrie erstellter Punktwolken. Dieser Versuchsaufbau soll das Erkennen von flächenhaften dreidimensionalen Bewegungsmustern ermöglichen und ohne größeren Aufwand, wie er beispielsweise durch die Verwendung von UAVs entsteht, durch geschulte Laien (z.B. Alpenvereinsmitglieder) durchgeführt werden können. Daher wird einer besonderen Praxisnähe und den speziellen Anforderungen eines herausfordernden Untersuchungsumfelds Rechnung getragen

2 Untersuchungsgebiet und Datenaufnahme

Der Gipfel des Hochvogels, ca. 120km südwestlich von München auf der deutsch-österreichischen Grenze gelegen, ist aus stark zerklüftetem Hauptdolomit der Lechtal-Decke aufgebaut (Müller-Wolfskeil and Zacher, 1984). Markant ist eine ca. 40m lange und bis zu ca. 6m breite Spalte, die nach Augenzeugenberichten seit über 50 Jahren besteht und sich ständig öffnet. Es wird davon ausgegangen, dass sich der südöstliche Teil des Gipfels vom stabilen nordwestlichen Teil des Gipfels entfernt. Neben der markanten Hauptspalte existieren weitere, sich tief durch den Gipfelaufbau ziehende Risse (Abb. 3). Zur Datenaufnahme wurden Fotos mit einer Überlappung von ca. 80% von Positionen auf dem stabilen nordwestlichen Gipfelteil entlang des nordwestlichen Spaltenrandes mit Blick auf den instabilen Gipfelteil und die Spalte aufgenommen. Eine Aufnahme von der instabilen Seite aus war ohne Sicherung nicht möglich. Um flexible Aufnahmepositionen und Bilder ins

Innere der Spalte zu ermöglichen, wurde die verwendete Kamera (Sony A7R II, 25mm Festbrennweiten-Objektiv) auf ein Teleskop-Hochstativ gesetzt und mittels Smartphone gesteuert. An zwei Aufnahmetagen, 09.07.2018 (A-Datensätze) und 24.09.2018 (B-Datensatz), wurden Bilder für mehrere Datensätze aufgenommen (siehe Tabelle 1).



Abb.3: Datenaufnahme in die Hauptspalte mit auf Hochstativ montierter Kamera. Es wird davon ausgegangen, dass sich der südöstliche Teil, auf dem sich die Messkugeln (rechtes Bild) befinden, vom stabilen nordwestlichen Teil mit dem Gipfelkreuz (linkes Bild) entfernt. Eine Datenaufnahme ist nur vom nordwestlichen Teil möglich.

Tabelle 1: Details zu den erstellten Punktwolken

Aufnahmetag	09.07.2018			24.09.2018
Punktwolke	A01	A02	A	B
Anzahl Bilder	183	106	424	491
Anzahl Punkte	18.479.496	12.020.888	26.327.802	36.255.518
Mittlere Punktdichte [$1/m^3$]	$6.0 \cdot 10^6$	$4.1 \cdot 10^6$	$1.5 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^7$
RMS Fehler Georeferenzierung [m]	$-3 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
Innerer Reproduktionsfehler [pixel]	0.105	0.104	0.118	0.112

Aus zwei, in einem zeitlichen Abstand von zwei Stunden nahezu deckungsgleich aufgenommenen Bildserien des ersten Aufnahmetags, wurden zwei unabhängige Punktwolken generiert (A01, A02). Ein Vergleich dieser beiden Punktwolken wird zur Untersuchung des Rauschens benutzt. Zusammen mit weiteren Bildern des ersten Aufnahmetags wurde zudem eine Gesamtpunktwolke des ersten Aufnahmetags (A) erstellt. Aus den Bildern aller am zweiten Aufnahmetag aufgenommenen Bilder wurde eine Vergleichspunktwolke erstellt (B), welche mit der Punktwolke aus den Bildern des ersten Aufnahmetags (A) verglichen wird. Alle Punktwolken wurden mit der Software Pix4Dmapper Pro (Pix4D, Version 4.1.24) generiert. Zur Georeferenzierung der Punktwolken wurden auf der stabilen nord-westlichen Spaltenseite verteilte Messmarken mit tachymetrisch bestimmter Position (Genauigkeit: 0.003m) verwendet. Abbildung 4 zeigt ein Einzelbild aus einer Aufnahmeserie der Teleskopkamera. Dort sind neben den schwarz-weißen Messmarken, die als Verknüpfungspunkte und Passpunkte für eine Aufnahmeepoche dienen auch die dauerhaft installierten orangenen Festpunktkugeln zu sehen, deren Bewegungen mittels Tachymeter erfasst werden. Die Messmarken wurden in den aufgenommenen Bildern detektiert und den Bildpunkten entsprechende Koordinaten zugeordnet. An beiden Aufnahmetagen wurden unterschiedliche Messmarken benutzt. Ergänzend zu den photogrammetrisch erstellten Punktwolken wurden innerhalb des Gesamtprojekts tachymetrische Messungen und Laserscanning durchgeführt, die hier als Referenz dienen.

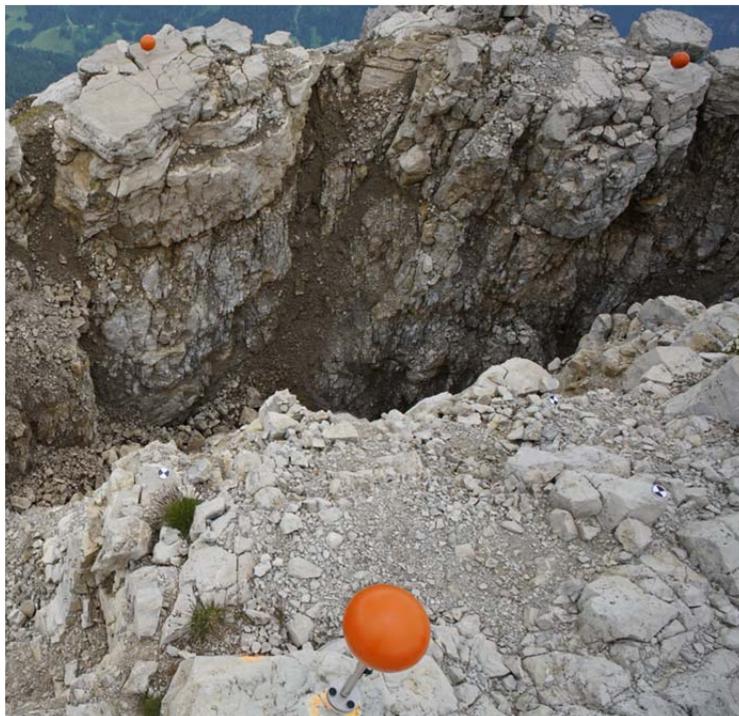


Abb. 4: Einzelbild der Teleskopkamera mit Messmarken (schwarz/weiß) und Festpunkten (orangene Kugeln).

3. Analysen und Ergebnisse

3.1. Abschätzung des Rauschens

Zur Untersuchung des Rauschens und zur Abschätzung wie genau eine Bestimmung von Felsbewegungen mit dem dargestellten Versuchsaufbau möglich ist, werden die beiden nahezu deckungsgleichen Punktwolken A01 und A02 mittels eines in CloudCompare (Version 2.9.1) implementierten ICP-Algorithmus (Besl & McKay, 1992) registriert. Anschließend werden auf Punktebene die Abweichungen zwischen den Punktwolken mittels eines in CloudCompare implementierten M3C2 Ansatzes (Lague et al. 2013) quantifiziert. Die Abweichungen sind normalverteilt um einen Mittelwert von $-5.35 \cdot 10^{-4}$ m. Die Standardabweichung beträgt 0.013 m.

3.2 Registrierung

Durch die Installation technischer Geräte am Gipfel, sowie durch das Herausbrechen einzelner Steine aus gefestigten Verbänden existieren starke punktuelle Oberflächenveränderungen zwischen den beiden Untersuchungszeitpunkten (Abb. 5). Diese erschweren die Registrierung der Datensätze A und B durch einen ICP-Algorithmus. Für die Verteilung der Distanzen ergibt sich ein Mittelwert von $-6.8 \cdot 10^{-4}$ m und eine Standardabweichung von 0.045 m.



Abb. 5: Beispiel für manuelle Verlagerung einzelner Steine durch die Installation eines Kabels (grüne Linie). Durchgezogene Linien markieren zum zweiten Aufnahmetag hinzugekommene Steine, die gestrichelte Linie die ehemalige Position eines weggenommenen Steins. Punkte in Rot oder Blau zeigen qualitativ die durch die Verlagerung entstandenen Distanzen zwischen den Punktwolken. Kabeldicke ca. 0.02 m.

Um die von diesen punktuellen Veränderungen betroffenen Bereiche zu identifizieren und die entsprechenden Punkte aus der Punktwolke B zu entfernen, wird ein iteratives Verfahren angewendet (Abb. 6). Dazu werden die Distanzen zwischen den Punktwolken A und B mittels eines M3C2 Verfahrens ermittelt und die Punkte mit den betragsmäßig größten Distanzen aus Punktwolke B entfernt. Hierfür werden die Datenpunkte nach der Größe der Abweichung sortiert und so viele Punkte entfernt, dass die Anzahl der Datenpunkte der neuen Punktwolke einem vorher festgelegten Prozentsatz der Anzahl der ursprünglichen Datenpunkte entspricht. Anschließend wird die ausgedünnte Punktwolke mittels eines ICP-Algorithmus auf die Punktwolke A registriert und erneut die Distanzen zwischen den Punktwolken bestimmt. Das Vorgehen wird exemplarisch für fünf Iterationsschritte wiederholt.

Es werden verschiedene Schwellwerte t genutzt um die Anzahl der zu entfernenden Datenpunkte zu bestimmen. In Ansatz 1 bleiben zwischen den Iterationsschritten 99% der Datenpunkte erhalten. In Ansatz 2 liegt der Wert bei 95% und bei Ansatz 3 bei 60%. Ein Vergleich der Ansätze zeigt, dass es durch Ansatz 1 nur langsam gelingt die Genauigkeit der Registrierung zu verbessern, während die Kurven für Ansatz 2 und Ansatz 3, bereits früh stark absinken.

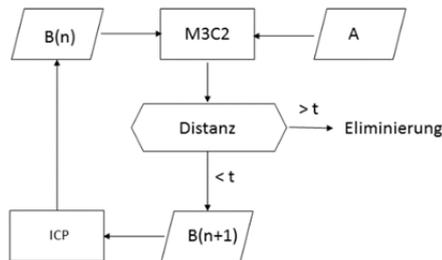


Abb. 6: Flussdiagramm zum im Text beschriebenen iterativen Vorgehen. A, B, B(n), B(n+1) repräsentieren die verschiedenen Punktwolken, t gibt einen Schwellwert an, dessen Überschreitung zur Entfernung des Datenpunkts führt.

Alle Kurven (Abb. 7) erreichen unterschiedlich schnell ein Niveau ab dem sich die Standardabweichung der Verteilung der Distanzen nur noch leicht ändert. Dieses Niveau liegt zwischen 0.008 bei Ansatz 1 und 0.002 bei Ansatz 2. Als ein angestrebtes Ziel für die Minimierung der Standardabweichung der Verteilung der Distanzen im stabilen Teil des Gipfels zwischen den Punktwolken A und B(n) wird ein Wert von 0.013 angegeben. Dies entspricht der Standardabweichung der Verteilung der Distanzen zwischen den Punktwolken A01 und A02. Dieses angestrebte Niveau wird in Ansatz 1 im vierten Iterationsschritt erreicht, bei Ansatz 2 bereits deutlich schneller, nach dem ersten Iterationsschritt. Auch Ansatz 3 zeigt ein Erreichen des Zielwerts nach dem ersten Iterationsschritt, verkleinert die Punktwolke jedoch sehr stark.

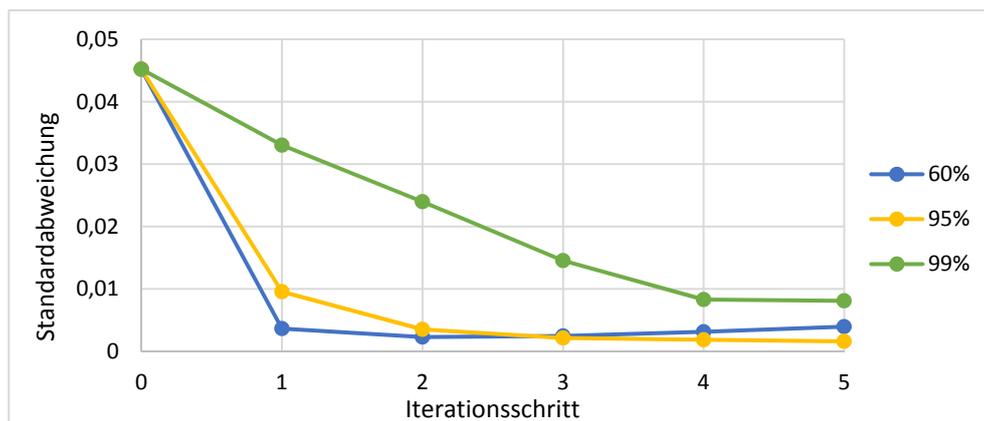


Abb. 7: Entwicklung der Standardabweichung der Verteilungsfunktionen der Distanzen im stabilen Teil des Gipfels über die Inversionsschritte des vorgestellten Verfahrens. Iterationsschritt 0 markiert den gemeinsamen Startpunkt für die Distanzen aus den kompletten Punktwolken. Eine Standardabweichung von 0.013m entspricht dem Wert für das Messrauschen, das durch den Vergleich der Punktwolken A01 und A02 ermittelt wurde.

3.3. Analyse Massenbewegung

Für die Untersuchung des Bewegungsmusters der Massenbewegung wurde die ausgedünnte Punktwolke nach dem fünften Iterationsschritt des Ansatzes 2 verwendet (B(5)). Die durch das M3C2 Verfahren ermittelten Distanzen zwischen den Punktwolken A und B⁵ zeigen, dass im vermeintlich instabilen Gipfelteil keine systematische Bewegung detektiert werden kann. Die Verteilungsfunktion der Distanzen ist normalverteilt um einen Mittelwert von $-9.5 \cdot 10^{-5}$ und zeigt eine Standardabweichung von 0.0015. Dies ähnelt den Werten die für die Verteilungsfunktionen der Distanzen im stabilen Gipfelteil sowie der Distanzen zwischen den Punktwolken A01 und A02 ermittelt wurde und als Messrauschen angenommen wird. Das Ergebnis deckt sich mit Ergebnissen aus zeitgleich durchgeführtem Laserscanning und Tachymeter-Messungen.

4. Ausblick

Angesichts der nur geringen beobachteten Veränderungen zwischen Juli 2018 und September 2018 muss davon ausgegangen werden, dass Schmelzwasser-induzierte Prozesse sowie häufige Tau-Gefrier-Zyklen die Massenbewegung dominieren. Die dadurch verursachte Saisonalität in den Bewegungsraten erschwert die Detektion von Veränderungen mittels Photogrammetrie, da diese auf schneefreie Bedingungen angewiesen ist. Die Methode sowie der vorgestellte Ansatz eignen sich dennoch zur Dokumentation mehrjähriger Veränderungen im Untersuchungsgebiet. Weiter wird angenommen, dass der vorgestellte Ansatz auf andere Forschungsgebiete übertragbar ist, die sich durch (i) länger schneefreie Bedingungen oder (ii) höhere Bewegungsraten auszeichnen. Das vorgestellte Verfahren zur Optimierung der Registrierung zeigt, wie sich negative Effekte von punktuellen Geländeänderungen auf die Registrierung robust ausschließen lassen (Abb.8).

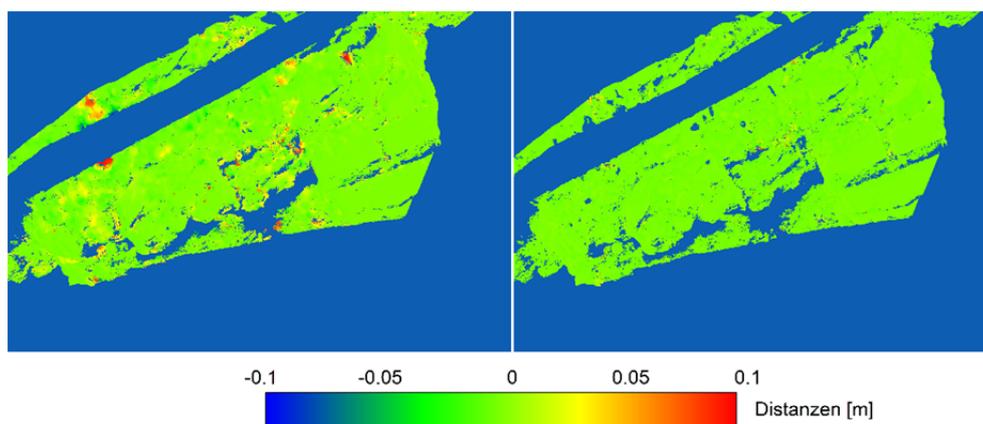


Abb. 8: Darstellung der Auswirkung des vorgestellten iterativen Verfahrens. Linkes Bild: Die initiale Punktwolke B0 (Ausschnitt) zeigt deutlich die Punktuellen Geländeänderungen. Rechtes Bild: Die Punktwolke nach dem ersten Iterationsschritt B1 zeigt die Bereinigung der größten Abweichungen.

Danksagung

Wir bedanken uns für die Unterstützung durch unseren Kollegen Richard Boerner und das Team von AlpSenseBench. Das Forschungsprojekt AlpSenseBench wird vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie gefördert. Für die Unterstützung der geodätischen Messungen danken wir dem Lehrstuhl für Geodäsie, Prof. Wunderlich und seinen Mitarbeitern.



Literatur

- AlpSenseBench, 2018. <https://www.landslides.geo.tum.de/de/alpsensebench/projekt/>
- Amann, F., Kos, A., Phillips, M., Kenner, R., 2018. The Piz Cengalo Bergsturz and subsequent debris flows, EGU General Assembly Conference Abstracts, pp. 14700.
- Besl, P.J., McKay, N.D., 1992. Method for registration of 3-D shapes, Proc. SPIE 1611, Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures; doi: 10.1117/12.57955
- Brunetti, M., Guzzetti, F., Rossi, M., 2009. Probability distributions of landslide volumes. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 16(2), 179.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslide types and processes. Special Report - Transportation Research Board, National Research Council, 36-75.
- Darmawan, H., Walter, T.R., Brotospito, K.S., Nandaka, I.G.M.A., 2018. Morphological and structural changes at the Merapi lava dome monitored in 2012–15 using unmanned aerial vehicles (UAVs). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349, 256-267.
- Delacourt, C., Allemand, P., Berthier, E., Raucoules, D., Casson, B., Grandjean, P., Pambrun, C., Varel, E., 2007. Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: a review. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178(2), 89-100.
- Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., Abellán, A., 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry—merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics*, 4(2), 359-389.
- Esposito, G., Salvini, R., Matano, F., Sacchi, M., Danzi, M., Somma, R., Troise, C., 2017. Multitemporal monitoring of a coastal landslide through SfM-derived point cloud comparison. *The Photogrammetric Record*, 32(160), 459-479.
- Favalli, M., Fornaciai, A., Isola, I., Tarquini, S., Nannipieri, L., 2012. Multiview 3D reconstruction in geosciences. *Computers & Geosciences*, 44, 168-176.
- Hendrickx, H., Vivero, S., De Cock, L., De Wit, B., De Maeyer, P., Lambiel, C., Delaloye, R., Nyssen, J., Frankl, A., 2019. The reproducibility of SfM algorithms to produce detailed Digital Surface Models: the example of PhotoScan applied to a high-alpine rock glacier. *Remote Sensing Letters*, 10(1), 11-20.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- Kääb, A., Girod, L.M.R., Berthling, I.T., 2014. Surface kinematics of periglacial sorted circles using structure-from-motion technology.

- Kasperski, J., Delacourt, C., Allemand, P., Potherat, P., Jaud, M., Varrel, E., 2010. Application of a terrestrial laser scanner (TLS) to the study of the S echilienne Landslide (Is ere, France). *Remote Sensing*, 2(12), 2785-2802.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner. Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–26. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009
- Landesregierung, A.d.T., 2017. Stellungnahme der Amtssachverst andigen f ur Geologie, Hydrogeologie und technische Geologie, sowie f ur den Schutz vor Erosion und vor alpinen geogenen Naturgefahren.
- Malet, J.-P., Maquaire, O., Calais, E., 2002. The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides: application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43(1-2), 33-54.
- Massey, C.I., Petley, D.N., McSaveney, M.J., 2013. Patterns of movement in reactivated landslides. *Engineering Geology*, 159, 1-19.
- Micheletti, N., Chandler, J.H., Lane, S.N., 2015. Structure from motion (SfM) photogrammetry.
- M uller-Wolfskeil, P., Zacher, W., 1984. Neue Ergebnisse zur Tektonik der Allg auer und Vilser Alpen. *Geologische Rundschau*, 73(1), 321-335.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Blikra, L., Derron, M.-H., Metzger, R., 2009. Characterization and monitoring of the  knes rockslide using terrestrial laser scanning. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(3), 1003-1019.
- Piermattei, L., Carturan, L., Blasi, F.d., Tarolli, P., Dalla Fontana, G., Vettore, A., Pfeifer, N., 2016. Suitability of ground-based SfM–MVS for monitoring glacial and periglacial processes. *Earth Surface Dynamics*, 4(2), 425-443.
- Roberti, G., Ward, B., de Vries, B.v.W., Friele, P., Perotti, L., Clague, J.J., Giardino, M., 2018. Precursory slope distress prior to the 2010 Mount Meager landslide, British Columbia. *Landslides*, 15(4), 637-647.
- Squarzoni, C., Delacourt, C., Allemand, P., 2005. Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps). *Engineering Geology*, 79(3), 215-229.
- Stumpf, A., Malet, J.-P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, M., Skupinski, G., 2015. Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology*, 231, 130-145.
- Thuro, K., Bundschuh, M., 2012. The 2010 rockfall event in Stein an der Traun–causes and triggers/Das Felssturzereignis in Stein an der Traun 2010–Ursachen und Ausl oser. *Geomechanics and Tunneling*, 5(4), 329-338.
- Warrick, J.A., Ritchie, A.C., Adelman, G., Adelman, K., Limber, P.W., 2016. New techniques to measure cliff change from historical oblique aerial photographs and structure-from-motion photogrammetry. *Journal of Coastal Research*, 33(1), 39-55.
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., Reynolds, J., 2012. ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300-314.