

Änderungsdetektion in photogrammetrischen Punktwolken für das Monitoring hochalpiner, gravitativer Massenbewegungen – Beispiel Hochvogel

AGNES R. DINKEL¹, LUDWIG HOEGNER¹, ADRIAN EMMERT¹, LUKAS RAFFL¹ & UWE STILLA¹

Zusammenfassung: Im Zentrum der Untersuchung steht die Evaluierung der photogrammetrischen Messmethode zur Änderungsdetektion von gravitativen Massenbewegungen in hochalpinen Gebieten am Beispiel des Hochvogel (2592 m, Allgäuer Alpen). Hierfür wurden mehrere Epochen des Gipfelbereichs aufgenommen und über ein Festpunktfeld orientiert. Zur besseren Verknüpfung wurden für jede Epoche zusätzliche Marken angebracht. Die im Rahmen einer Bündelausgleichung mit anschließendem Dense-Matching erzeugte photogrammetrische Punktwolke wird sowohl mit punktuellen Tachymetermessungen als auch einem für einen Teilabschnitt durchgeführten terrestrischen Laserscan verglichen. Anschließend wird über die M3C2-Distanz zwischen den Punktwolken der verschiedenen Epochen die Veränderung im Gipfelbereich bestimmt. Die hieraus abgeleiteten Bewegungen decken sich sowohl mit den Messungen von Tachymeter und Laserscanner als auch den Messdaten der Geologie.

1 Einleitung

Der Klimawandel und die damit verbundenen Folgen sind im letzten Jahr stark ins öffentliche Interesse gerückt. So verursacht die Klimaerwärmung auch das Abtauen des Permafrosts in den hochalpinen Lagen. Dies, oft in Wechselwirkung mit den ebenfalls Klimawandel-bedingten extremen Wetterlagen v. a. Starkregeneignissen, führt zu vermehrten gravitativen Massenbewegungen in den alpinen Regionen wie Bergstürze oder Hangrutschungen. Wesentlich für das Verständnis und die Beurteilung der Hangbewegungen ist das Feststellen des Bewegungstyps bzw. deren Klassifikation. Dabei werden fünf unterschiedliche Bewegungstypen unterschieden: Fallen, Kippen, Rutschen, Ausbreiten und Fließen (HUNGR et al. 2014). Um aber diese Klassifikation durchzuführen, ist eine genaue Beobachtung von Bewegungen notwendig. Dabei ist die alleinige Feststellung von Bewegungsraten bzw. -strecken eines einzelnen Abstands über feste Zeiträume nicht ausreichend. Vielmehr ist es notwendig unterschiedliche Distanzen im dreidimensionalen Raum über einen längeren Zeitraum zu überwachen, um die Klassifikation und die anschließende Analyse des Befunds vornehmen zu können. Zu diesem Zweck werden unterschiedliche Überwachungsmethoden verwendet. Neben komplexen Konfigurationen geologischer Messgeräte wie beispielsweise von Extensometern (MALET et al. 2002; MASSEY et al. 2013) finden auch geodätische Messungen mit Tachymeter, GNSS-Antennen (SQUARZONI et al. 2005), Radarinterferometrie oder Laserscanner Anwendung (ROBERTI et al. 2018; OPIKOFER et al. 2009). Diese Systeme sind alle teuer in der Anschaffung und müssen durch fachlich versiertes Personal bedient werden. Eine flächendeckende Überwachung ist auf diese Art kaum möglich. Kameras auf der anderen Seite

¹ Technische Universität München, Arcisstraße 21, D-80333 München,
E-Mail: [Agnes.Dinkel, Ludwig.Hoegner, Adrian.Emmert, Lukas.Raffl, Stilla]@tum.de

sind vergleichsweise günstig und mobil und können so leicht eingesetzt werden. Eine flächendeckende Überwachung möglicher Gefährdungen ist dann durch Laien möglich (ROMEO et al. 2019; MAYR et al. 2019; PEPPA et al. 2019; KROMER et al. 2019; ESPOSITO et al. 2017; WARRICK et al. 2016; PIERMATTEI et al. 2016; ELTNER et al. 2016; STUMPF et al. 2015). In diesem Beitrag werden die erreichten Genauigkeiten der Punktbestimmung sowie der Änderungsdetektion in photogrammetrischen Punktwolken im Rahmen des AlpSenseBench Modellprojekts (ALPSENSEBENCH 2018) im Gipfelbereich des Hochvogels mit den durch die Ingenieurvermessung erhobenen Daten verglichen.

2 Beschreibung der Mess- und Auswerteverfahren

Entscheidend für den Einsatz der Photogrammetrie, unter welchen Bedingungen photogrammetrisch erzeugte Punktwolken die erforderlichen Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten insbesondere im Hinblick auf eine Änderungsdetektion erreichen können. Die Untersuchung gliedert sich daher in zwei Teile: i) Genauigkeit und Dichte der erfassten Punktwolke und ii) Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Änderungsdetektion zwischen zwei Punktwolken.

Es wird für die späteren Versuche davon ausgegangen, dass ein lokales Festpunktfeld vorliegt, das über die Epochen hinweg stabil ist und für jede einzelne Epoche um weitere Messmarken ergänzt wird, die der Orientierung und Verknüpfung der Bilder dienen. Außerdem wird die Kamera als geometrisch kalibriert mit Festbrennweite und Fixfokus angenommen. Exemplarisch wird eine Aufnahmekonfiguration für die Überwachung einer Felsspalte modelliert.

2.1 Photogrammetrische 3D Rekonstruktion

Die photogrammetrischen Messungen beruhen auf einer Bündelblock-Ausgleichung zur Bestimmung der Bildorientierungen gefolgt von einem Semi-Global Matching (HIRSCHMÜLLER 2008) zur Erzeugung einer dichten Punktwolke. Für Messungen an breiten Spalten und Abbrüchen, die nur von einer Seite aus zugänglich sind, wird eine Bildüberdeckung von ca. 80% angestrebt. Dafür wird die Kamera in kurzen Abständen (ca. 0,5 m) parallel zur Spalte versetzt. Dabei werden für die Aufnahme der Bilder zwei Messkonfigurationen verwendet:

- Doppelkanten-Konfiguration: Entlang der Spalte werden Aufnahmen der Spalte angefertigt, die beide Außenkanten der Spalte enthalten. Die Aufnahmepositionen verschieben sich dabei parallel mit dem Verlauf der Spalte.
- Spalten-Konfiguration: Um mehr Daten aus dem Spalteninneren zu sammeln, wird in dieser Konfiguration die Kamera über die Spalte geneigt. Dabei enthalten die Bilder zumeist nicht die eigentlichen Oberkanten des Geländes. Auch diese Aufnahmen folgen dem Verlauf der Spalte.

Für kleinere, von beiden Seiten frei begehbar Spalten werden Bilder aus verschiedenen Perspektiven ebenfalls mit hohem Überlapp aufgenommen.

Bestandteil der Bündelausgleichung sind auch die Punkte des lokalen Festpunktnetzes sowie zusätzliche zum Teil ebenfalls eingemessene photogrammetrische Marken. Diese Passpunkte werden verwendet, um für Bilder die Näherungswerte der äußeren Orientierung zu bestimmen. Bei mindestens sechs sichtbaren Passpunkten wird eine Direkte Lineare Transformation (DLT) (LUHMANN 2018) durchgeführt. Mit mindestens drei bis maximal fünf sichtbaren Passpunkten

wird die äußere Orientierung nach dem "Minimale-Objekt-Information"-Verfahren (MOI-Verfahren) (LUHMANN 2018) geschätzt. Sind in einem Bild mehr als die drei nötigen Passpunkte vorhanden, so werden diejenigen ausgewählt, die die größte Dreiecksfläche im Bild aufspannen. Dies soll die Zahl an falsch zugeordneten homologen Bildpunkten reduzieren. Zusätzlich wird eine Varianzkomponentenschätzung verwendet, um die unterschiedlichen Genauigkeiten der gemessenen Passpunkte und der Bildpunkte abbilden zu können. Außerdem wird für die Ausgleichung das Ransac-Verfahren (FISCHLER & BOLLES 1984) eingesetzt, um fehlerhafte Punktzuordnungen zu entfernen. Als Ergebnis der Bündelausgleichung werden die verbliebenen Restfehler und geschätzten Genauigkeiten der Orientierungen, Bild- und Objektpunkte bestimmt.

2.2 Änderungsdetektion und Deformationsanalyse

Die Änderungsdetektion in Punktwolken lässt sich grob in drei Arbeitsschritte unterteilen: i) Koregistrierung, ii) Bestimmung des Rauschens, iii) Detektion signifikanter Änderungen. Auf Grund des vorhandenen Passpunktenetzes wird davon ausgegangen, dass eine erneute Koregistrierung nicht notwendig ist. Damit verbleiben die Bestimmung des Rauschniveaus und die eigentliche Änderungsdetektion.

Für die Bestimmung des Rauschens werden zwei Messungen mit zeitlichem Abstand am selben Tag wiederholt unter der Annahme, dass es in dieser kurzen Zeit keine geometrischen Veränderungen gegeben hat. Unterschiede in den beiden erzeugten Punktwolken beider Epochen desselben Tages rühren daher überwiegend aus Lichtveränderungen, Schatten, sowie der Szenenabtastung durch den Sensor und die Kameraorientierungen. Diese Unterschiede sollen als Rauschen ermittelt werden, um eine untere Grenze für die Detektion von Änderungen festzulegen. Als Basis für die Änderungen wird zu jedem Punkt von Punktwolke 1 der nächste korrespondierende Punkt aus Punktwolke 2 gesucht. Dies geschieht auf Basis des (Multiscale-Model-to-Model-Cloud Verfahrens (M3C2) (LAGUE et al. 2013). Aus dem Histogramm der kürzesten Abstände wird ein Schwellwert für das Rauschen ermittelt.

3 Untersuchung am Beispiel Hochvogel

Der auf der deutsch-österreichischen Grenze nahe Obersdorf gelegene Berg Hochvogel stellt mit seinen 2592 m den höchsten Berg der Allgäuer Alpen dar und zeichnet sich durch eine starke Erosion, eine intensive Verwitterung des Gesteins und große Spannungen durch übersteile, hohe Felswände in Kombination mit dem brüchigen Gestein aus (SCHOLZ & SCHOLZ 1981; JACOBSHAGEN et al. 2014). Diese geologischen Charakteristika bilden zugleich die Ursache für die umfangreichen Bewegungsprozesse und die zahlreichen Felsstürze in diesem Areal (DAV DONAUWÖRTH 2017). Der Gipfelbereich des Berges ist heutzutage geprägt von einer großen, den gesamten Berg durchziehenden Spalte geprägt, die knapp südlich des Gipfelkreuzes von Nordosten nach Südwesten verläuft (Abb. 1). Daneben haben sich noch weitere kleinere Risse vor allem im südlichen Bereich des Gipfels gebildet, die nahezu im rechten Winkel zu der Hauptspalte, von Südost nach Nordwesten, verlaufen. Der von der Spalte abgetrennte Teil des Gipfels befindet sich in einer gravitativen Rutschbewegung nach Süden (LEINAUER et al. 2019). Die genaue, dreidimensionale Beschreibung dieser Bewegung bildet das Ziel der Messungen.

Neben dem Festpunktfeld der Ingenieurgeodäsie werden für die photogrammetrischen Messungen zusätzliche Passmarken als Passpunkte und Verknüpfungspunkte verwendet. Die Aufnahme erfolgt während der drei Messkampagnen (09.07.2018, 27.09.2018 und 19.07.2019) mittels Stangenstativ, Kamera (Sony Alpha7 RII) mit Weitwinkelobjektiv und einem Endgerät (Laptop/ Smartphone), das mittels WiFi-Verbindung die Kamera steuert (Abb. 2). Die Aufnahme der Spalte erfolgt dem Verlauf der Spalte folgend in mehreren Bahnen mit hoher seitlicher Überlappung (ca. 80 %).



Abb. 1: Gipfelbereich des Hochvogel mit markanter von Nordosten nach Südwesten verlaufenden Spalte (Foto von HEIBEL & FIGL 2014)



Abb. 2: Photogrammetrische Vermessung der Spalten im Gipfelbereich des Hochvogels mit Stangenstativ, Kamera und WiFi-Steuerung

Wie die Daten in Tabelle 1 zeigen, sind eine hohe Zahl an Bildern und zahlreiche Passpunkte aufgenommen worden. Bei der Auswertung mit einer photogrammetrischen Standardsoftware (Pix4D) ergeben sich jedoch Probleme, die dazu führen, dass nur ein Teil der Bilder verwendet werden können, zusätzliche manuelle Verknüpfungspunkte angelegt und eine hohe Zahl an Bildmessungen durchgeführt werden müssen. Zum einen führen starke Licht-Schatten-Wechsel in Kombination mit dem Wandern der Schatten über die gesamte Messperiode, die sich durch das anspruchsvolle Gelände in die Länge zieht, zu falschen Verknüpfungen und Problemen beim Matching von Punkten. Starke Windböen und Schwierigkeiten beim ruhigen Positionieren des Stativs führen darüber hinaus zu unscharfen Bildern. Zudem kann sich auch das Gelände während der Messung selbst verändern, da sich aufgrund der witterungstechnisch stark zeitlich eingeschränkten und begrenzten Möglichkeiten, Messungen am Gipfel durchzuführen, meist mehrere Messtrupps zugleich im Gelände befinden und arbeiten (Abb. 3) oder Besucher den Gipfel frequentieren. Letztlich führen auch die räumlich eng begrenzten Bewegungsmöglichkeiten am Gipfel „um“ das beobachtete Objekt zu schlechten, sehr eingeschränkten Beobachtungsgeometrien und schleifenden Schnitten. Dies führt dazu, dass bei photogrammetrischen Vermessungen im hochalpinen Bereich nicht mit den gleichen Genauigkeiten zu rechnen ist, wie sie im Labor möglich sind.

Tab. 1: Übersicht über die photogrammetrischen Messungen am Hochvogel 2018/19

Kampagne	Bilder	Bilder verwendet	Passpunkte	manuelle Verknüpfungspunkte	Bildmessungen
09.07.2018	1057	407	32	20	2215
27.09.2018	1277	645	55	47	4910
19.07.2019	1243	510	74	55	4055



a)



b)

Abb. 3: Arbeiten am Hochvogel: Herausforderungen durch parallele Arbeiten verschiedener Messtrupps
a) geringer Platz – b) Veränderungen während der Messarbeiten

4 Auswertung der Punktwolken

Die einzelnen, mittels des Festpunktfeldes georeferenzierten Punktwolken werden in CloudCompare zunächst von Störungen befreit (manuell oder mittels SOR-Algorithmus) und im Anschluss mittels M3C2-Algorithmus miteinander Verglichen. Es erfolgt keine Koregistrierung über den ICP-Algorithmus.

Um die Ergebnisse einordnen zu können, wird hierbei zunächst die Genauigkeit der photogrammetrischen Messungen untersucht. Dabei ist die innere Genauigkeit der Bündelausgleichung im Subpixelbereich nicht aussagekräftig für die absolute Genauigkeit einzelner 3D Punkte. Da die Aufnahmegeometrie mit konstanter Blickrichtung und Versatz in einer Richtung dem Stereo-Normalfall ähnelt, kann aus diesem für die vorhandenen Daten eine Genauigkeit in der Entfernung von ca. 2 mm für die photogrammetrische Messmethode angenommen werden. Diese Größenordnung wird auch durch den Vergleich der photogrammetrischen Punktwolke mit der TLS-Punktwolke (Messgenauigkeit ca. 2 mm) (WUNDERLICH et al. 2019) der gleichen Messkampagne bestätigt (Abb. 4), die beide über dieselben Festpunkte georeferenziert werden. Der Mittelwert der Distanzen zwischen den Punktwolken liegt bei 0,94 mm und einer Standardabweichung von 5,6 mm. Abweichung finden sich primär in Bereichen des Felsen, in denen sich lockeres Gestein befindet. In Bereichen aus zusammenhängenden, blanken Felsstrukturen ist dagegen die Deckungsgenauigkeit besonders ausgeprägt.

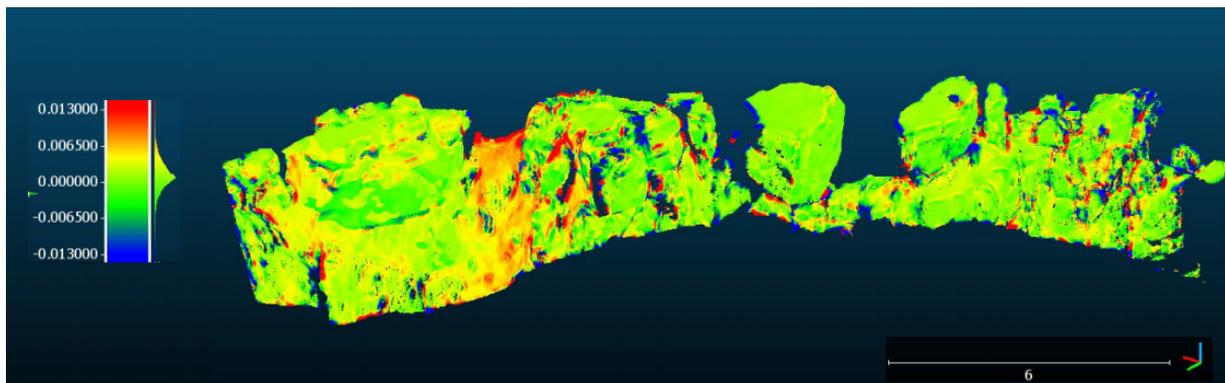


Abb. 4: Vergleich der photogrammetrischen Punktwolke der Rutschmasse am Gipfel des Hochvogel mit zeitgleicher TLS-Punktwolke (grün = höchste Deckungsgenauigkeit)

Daraus ergibt sich, dass Veränderungen signifikant festgestellt werden können, die eine Größenordnung von 8,2 bis 13,2 mm (95 % Zuverlässigkeit) bzw. 11,6 bis 18,6 mm (99 % Zuverlässigkeit) besitzen. Erst durch diese Abschätzung können die Ergebnisse des Vergleichs von Punktwolken unterschiedlicher Messepochen eingeordnet werden. Besonders aussagekräftig ist hierbei die Betrachtung des Vergleichs der georeferenzierten Punktwolken der Rutschmasse von September 2018 und Juli 2019 (Abb. 5). Wie die Verteilung im Histogramm der Distanzen zeigt, lassen sich in ihr mehrere Peaks bei 1,4, 8 und 1,6 mm ablesen. Trennt man die Vertreter der jeweiligen Peaks auf, so scheinen sie zu unterschiedlichen Bereichen mit klarer Charakteristik zu gehören: der erste Peak (-1,4 mm) tritt in Bereichen auf, die sich unten innen an der Rutschmasse befinden. Der Peak von 8 mm findet sich nahezu ausschließlich an horizontalen Fläche, wogegen der Peak von 1,6 mm sich bei vergleichsweise vertikal zum Beobachter stehenden Flächen findet. Damit umschreiben

diese Bewegungen, die sich an der Rutschmasse vollziehen. Es scheint Abschnitte zu geben, die sich zurück in die Spalte entwickeln (-1,4 mm), dagegen scheinen andere Bewegungen sich wiederum von der Spalte weg zu entwickeln, wobei 8 mm eine Abwärts- und 1,6 mm eine Wegbewegung zu beschreiben scheint.

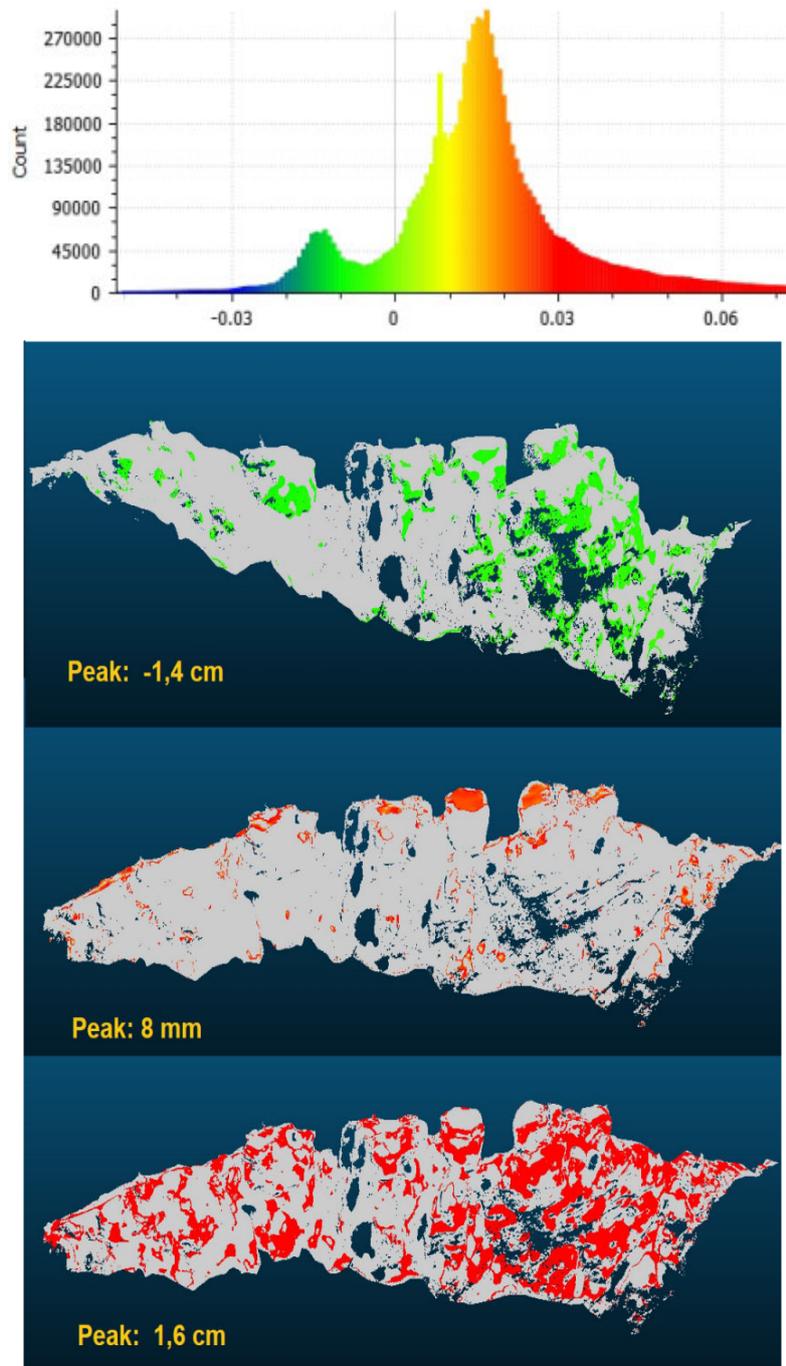


Abb. 5: Vergleich der Punktwolken von September 2018 und Juli 2019: Histogramm der Distanzen zwischen den Punktwolken (oben) und Auflösung der Distanzpunkte nach den Peaks im Histogramm (unten)

Es zeigt sich, dass die Masse keineswegs einheitlich als homogener Block zu rutschen scheint, sondern auch unterschiedliche Bereiche sich unterschiedlich stark zu bewegen scheinen. Darüber hinaus scheinen Flächen senkrecht zu Teilrichtungen der Bewegung und die dort ablesbaren Veränderungen als Zerlegung der Gesamtbewegung der Rutschmasse und somit als Indikatoren für die Rutschbewegung dienen zu können.

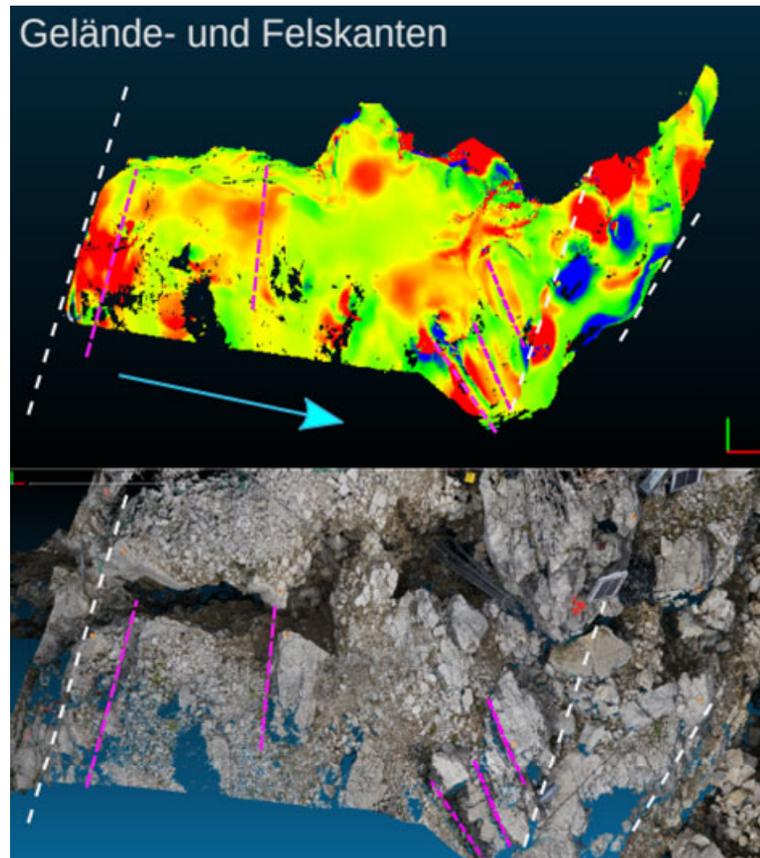


Abb. 6: Vergleich der Punktwolken von September 2018 und Juli 2019 im Bereich einer Nebenspalte am Gipfel des Hochvogel: Beobachtung von Kantenkonstellationen

Verfolgt man diese Beobachtung weiter, so muss um eine dreidimensionale Bewegung beschreiben zu können, nicht die gesamte Masse flächig beobachtet werden. Es müssen signifikante Kanten und Flächen oder noch besser Konstellationen von diesen und deren Veränderung über die verschiedenen Messepochen beobachtet werden. Aus der Summe dieser Teilbewegungen ergibt sich die Gesamtbewegung der Rutschmasse. Eine Kante ist dabei stets nur signifikant für die Richtung zu der sie orthogonal steht. Diese These lässt sich an den Nebenspalten des Gipfels überprüfen (Abb. 6) und scheint sich dort zu bestätigen. Kanten die orthogonal zu der Bewegungsrichtung stehen, fallen im Vergleich der Punktwolken besonders auf.

5 Fazit

Für den Hochvogel lässt sich auf diese Weise eine Bewegung für die Rutschmasse beschreiben, die sich aus einem weg- und abwärtsdriften, sowie einem zurücksacken zusammensetzt. Damit beschreiben die Richtungsvektoren eine klassische Rutschbewegung. Die Detektion von einzelnen Flächen und Kanten bzw. Kantenkonstellationen zur Beschreibung von dreidimensionalen Bewegungen scheint ein erfolversprechender Ansatz zu sein, für den noch ein allgemein anwendbares Instrumentarium und Methodiken entwickelt werden müssen. Um die hier paraphrasierten Ergebnisse vom Hochvogel auf andere Rutschmassen zu übertragen und verallgemeinern zu können, ist es allerdings notwendig, diese Thesen an weiteren Beispielen zu überprüfen, zu verifizieren und zu verbessern.

6 Literaturverzeichnis

- ALPSENSEBENCH, 2018: AlpSenseBench Studie. Professur für Hangbewegung, TU München. <https://www.bgu.tum.de/landslides/alpsensebench/projekt/>, Stand 21.12.2019.
- DAV DONAUWÖRTH, 2017: Sperrung Bäumenheimer Weg. Gutachten der Landesgeologie Tirol 2014, 2015 und 2017. <http://www.dav-donauwoerth.de/index.php/3-gutachten-2017>, last visited: 2019-09-09.
- ELTNER, A., SCHNEIDER, D. & MAAS, H.-G., 2016: Integrated processing of high resolution topographic data for soil erosion assessment considering data acquisition schemes and surface properties. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* **41**(B5), 813-819.
- ESPOSITO, G., MASTROROCCHO, G., SALVINI, R., OLIVETI, M. & STARITA, P., 2017: Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. *Environmental Earth Sciences* **76**(3), 103.
- Fischler, M.A. & Bolles, R.C., 1981: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM* **24**(6), 381-395.
- HEIBEL, G. & FIGL, T., 2014: Gemeinde Hinterhornbach – Hochvogel; Abklärung der aktuellen Steinschlag-, Blocksturz und Felssturzsituation; Stellungnahme der Landesgeologie. Amt der Tiroler Landesregierung.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **30**(2), 328-341.
- HUNGR, O., LEROUÉIL, S. & PICARELLI, L., 2014: The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* **11**(2), 167-194.
- JACOBSHAGEN, V., SCHWERD, K. & HORNING, T., 2014: Geologische Karte von Bayern 1:25000. Erläuterungen zum Blatt 8628 Hochvogel. Landesamt für Umwelt.
- KROMER, R., WALTON, G., GRAY, B. & HUTCHINSON, J., 2019: Lower cost fixed installation photogrammetry rockfall monitoring. In *Geophysical Research Abstracts* **21**.
- LAGUE, D., BRODU, N. & LEROUX, J., 2013: Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (NZ). *ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **82**, 10-26.

- LEINAUER, J., JACOBS, B. & FRIEDRICH, B., 2019: Process dynamics and early warning strategies for a preparing highmagnitude rock slope failure at the Hochvogel (Allgäu Alps). In: EGU General Assembly Conference Abstracts, **21**, 2196.
- LUHMANN, T., 2018: Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen-Methoden-Beispiele. Wichmann, 2018.
- 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.
- MAYR, A., RUTZINGER, M. & GEITNER, C., 2019: Object-Based Point Cloud Analysis for Landslide and Erosion Monitoring. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **85**(6), 455-462.
- OPPIKOFER, T., JABOYEDOFF, M., BLIKRA, L. & METZGER, R., 2009: Characterization and monitoring of the Åknes rockslide using terrestrial laser scanning. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **9**(3), 1003.
- PEPPA, M. V., MILLS, J. P., MOORE, P., MILLER, P. E. & CHAMBERS, J. E., 2019: Automated co-registration and calibration in SfM photogrammetry for landslide change detection. *Earth Surface Processes and Landforms* **44**(1), 287-303.
- PIERMATTEI, L., CARTURAN, L. & GUARNIERI, A., 2015: Use of terrestrial photogrammetry based on structure-from-motion for mass balance estimation of a small glacier in the Italian alps. *Earth Surface Processes and Landforms* **40**(13), 1791-1802.
- 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.
- ROMEO, S., DI MATTEO, L., KIEFFER, D. S., TOSI, G., STOPPINI, A. & RADICIONI, F., 2019: The use of gigapixel photogrammetry for the understanding of landslide processes in alpine terrain. *Geosciences* **9**(2), 99.
- SCHOLZ, H. & SCHOLZ, U., 1981: Das Werden der Allgäuer Landschaft. Eine kleine Erdgeschichte des Allgäus. Verlag für Heimatpflege, Kempten.
- SQUARZONI, C., DELACOURT, C. & ALLEMAND, P., 2005: Differential single-frequency GPS monitoring of the La Valette landslide (French Alps). *Engineering Geology* **79**(3-4), 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.
- WARRICK, J. A., RITCHIE, A. C., ADELMAN, G., ADELMAN, K. & LIMBER, P. W., 2017: New techniques to measure cliff change from historical oblique aerial photographs and structure-from-motion photogrammetry. *Journal of Coastal Research* **33**(1), 39-55.
- WUNDERLICH, T., RAFFL, L. & WIEDEMANN, W., 2019: Wiedererkennung – zwei Lösungen für die strenge Deformationsanalyse flächenhafter Beobachtungen der Ingenieurgeodäsie. In: Hanke K, Weinold T (eds) 20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019, “Arbeitskreis Rutschung, Setzung, Deformation”, 264-273.