

## **Semi-automatische Kartierung der Ablöse-Homogenbereiche von steinschlaggefährdeten Felswänden mittels UAS (Unmanned Aerial Systems)**

Anne Hormes <sup>1</sup>, Axel Hellman <sup>2</sup>, Christian Demmler <sup>1</sup>, Klaus Jöchler <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sky4geo e.U., Planötzenhofstrasse 29b, 6020 Innsbruck, ah@sky4geo.com

<sup>2</sup> Sweco, Gjörwellsgatan 22, 100 26 Stockholm, Schweden, axel.hellman@sweco.se

<sup>3</sup> Jöchler, Franz-Gastl-Weg 16, 6170 Zirl, klausjoechler@gmail.com

### **Abstract**

The mapping of detachment areas and determination of dimensioning block size is a challenge for inaccessible rock faces. Unmanned aerial systems (UAS) enable the measurement of joint systems, open fractures and block cubature in areas previously inaccessible and hazardous. We present an innovative approach for rock fall hazard zoning using UAS 'structure-from-motion photogrammetry' (SfM) for the detailed documentation of structural discontinuities. 3D point clouds generated by UAS constitute a new efficient method that provides unbiased and precise information for rock fall hazard assessment. Kinematic analysis for Engelswand in Tumpen, Ötztal, yield high admissibility for flexural toppling, but also significant critical intersections for wedge and planar sliding. Our developed method allows for targeted rock wall clearing operations.

Keywords: Unmanned Aerial Systems, 3D photogrammetry, rock fall hazard, kinematic analysis

### **Zusammenfassung**

Die Kartierung von Ablöse-Homogenbereichen und Bestimmung der Bemessungsblockgröße ist bei ausgesetzten Felswänden eine Herausforderung. Unbemannte Flugsysteme (UAS) ermöglichen die Messung von Trennflächen, offenen Kluftkörpern und Blockkubaturen in Bereichen, die bisher nicht zugänglich und gefährlich waren. Wir präsentieren einen innovativen Ansatz für die Steinschlag Gefahrenzonenkartierung mit UAS 'Struktur-durch-Bewegung Photogrammetrie' (SfM) für die detaillierte Beschreibung von strukturellen Diskontinuitäten. 3D-Punktwolken, die von UAS generiert werden, stellen eine neue effiziente Methode dar, die unvoreingenommene und präzise Informationen für die Bewertung von Steinschlaggefahren liefert. Die kinematische Analyse für Engelswand in Tumpen, Ötztal, ergibt eine hohe Anfälligkeit für Kippbewegung, aber auch signifikante kritische Gleitflächen für ebene und Keilausbrüche wurden ermittelt. Unsere entwickelte Methode ermöglicht gezielte Felsausräumungsarbeiten.

### **Einleitung und Problemstellung**

Die Entwicklung von Techniken und Sensoren von unbemannten Flugsystemen (Unmanned aerial systems – UAS) / Drohnen hat in den letzten Jahren einen exponentiellen Schub erfahren. Drohnen werden zunehmend für geotechnische und ingenieurgeologische Arbeiten eingesetzt, da die Genauigkeit der Systeme und Arbeitsabläufe ein enormes Potential darstellen. Wir stellen eine quantitative Beurteilungsmethode vor, die für die Beurteilung der Instabilität von Steinschlag-Auslösebereichen genutzt werden kann.

Wir haben im Sommer 2017 die bekannte Sportkletterwand Engelswand bei Tumpen im Ötztal befliegen um instabile Felspartien zu identifizieren und um die Genauigkeit der hier vorgestellten Methodik auf den Prüfstand zu stellen. Die Engelswand in Tumpen ist eine beliebte Sportkletterwand, die an Wochenenden viele Kletterer anzieht. An einem Samstag haben wir rund 70 Kletterer gezählt. Unser Gespräch mit der Wiesengemeinschaft hat ergeben, dass jedes Frühjahr zur Schmelzsaison kleinere und grössere Blöcke herunterfallen, ebenso nach Starkregen-Ereignissen. Diese Blöcke werden regelmässig von der Wiesengemeinschaft weggeräumt. Felsaufräumungsarbeiten werden eher unregelmässig durchgeführt und liegt im Bereich <5 Jahre.

Unsere hier vorgestellte Methode erlaubt im Vergleich zu herkömmlichen Methoden:

- Daten können an steilen, unzugänglichen und gefährlichen Felswänden aufgenommen werden
- Die Datenmenge entspricht einem Vielfachen von manuell aufgenommenen Strukturdaten und Scanlines und erlaubt daher eine bessere Statistik
- Räumliche und zeitliche Auflösung kann verbessert werden
- Datenerfassung kann in einer kurzen Zeit erfasst werden, normalerweise reicht ein Tag für die Befliegung inklusive der Einmessung von Ground Control Points (GCP)

### **Methodik**

Die UAS Industrie hat in den letzten Jahren einen enormen Wachstumsschub erfahren, allein in Österreich sind um die 100.000 Drohnen registriert (oeamtc.at, 2-September-2018). Das Marktpotential wird für Drohnenbenutzung bis zum Jahr 2035 auf jährlich EUR 10 Mill. geschätzt (SESAR, 2016). UAS-Fernerkundung bietet eine zunehmende Genauigkeit, mit kurzen Erfassungszeiten, die einen flexiblen Einsatz in potentiell gefährlichen Gebieten erlauben (Scaioni et al. 2014). Bereits 2012 wurde ein UAS erfolgreich für eine Massenbewegungsstudie verwendet (Niethammer et al. 2012). Die Genauigkeiten von digitalen Höhenmodellen (DHM) in UAS-Studien lag in den letzten Jahren zwischen 1- 5 cm (Turner et al. 2014, 2015, Harwin and Lucieer, 2012). Die neuesten Entwicklungen umfassen Algorithmen, die die automatische Erfassung von charakteristischen Merkmalen (feature-matching) von dichten 3D Punktwolken erlauben (Turner et al. 2014). Umfassende Literaturstudien von UAS für die Fernerkundung finden sich in Colomina und Molina (2014) und Nex und Remondino (2014).

Die UAS-Photographien werden photogrammetrisch analysiert um mit der Structure-from-Motion (SfM) Technik ein digitales Höhenmodell (DHM) zu erstellen, indem man eine ausreichende Anzahl von Photos in einer Software prozessiert, die wiederkehrende Punkte von Bild zu Bild miteinander vergleicht und somit 3D Punktwolken zusammensetzt. Eine detaillierte SfM benötigt Bilder aus verschiedenen Aufnahmewinkeln und -standorten. Wir haben die Software Agisoft Photoscan verwendet (Agisoft 2018).

Wir haben für diese Studie eine kommerzielle Drohne DJI Phantom 4 benutzt (Abb.1). Phantom 4 operiert mit einer integrierten, optischen Kamera mit einer Auflösung von 12MP.

Die Genauigkeit der DHM und 3D Punktwolken, die man mit UAS erzielt, hängt von folgenden Punkten ab:

- Anzahl der Bilder
- Verschiedene Aufnahmewinkel der Felswand
- % der Überlappung der Bilder

- Stereo-Winkel

Korrekte Georeferenzierung der 3D Punktwolken ist abhängig von:

- Anzahl und Dichte der GCP
- Messgenauigkeit der eingemessenen GCP (mit DGNSS)
- On-board RTK-GNSS UAS (Real-Time-Kinematics Global Navigation Satellite System)
- Entfernung zum Aufnahmeobjekt

In unserer Studie haben wir verschiedene Methoden der Einmessung von GCP verglichen: eine schnelle, kosteneffiziente Methode mit der Einmessung von GCP mit einem Garmin Montana 600 GPS, kombiniert mit Luftbildern mit einer 20 cm Auflösung, als auch eine Methode, bei der alle GCP mit einem Trimble R9 GNSS eingemessen wurden.



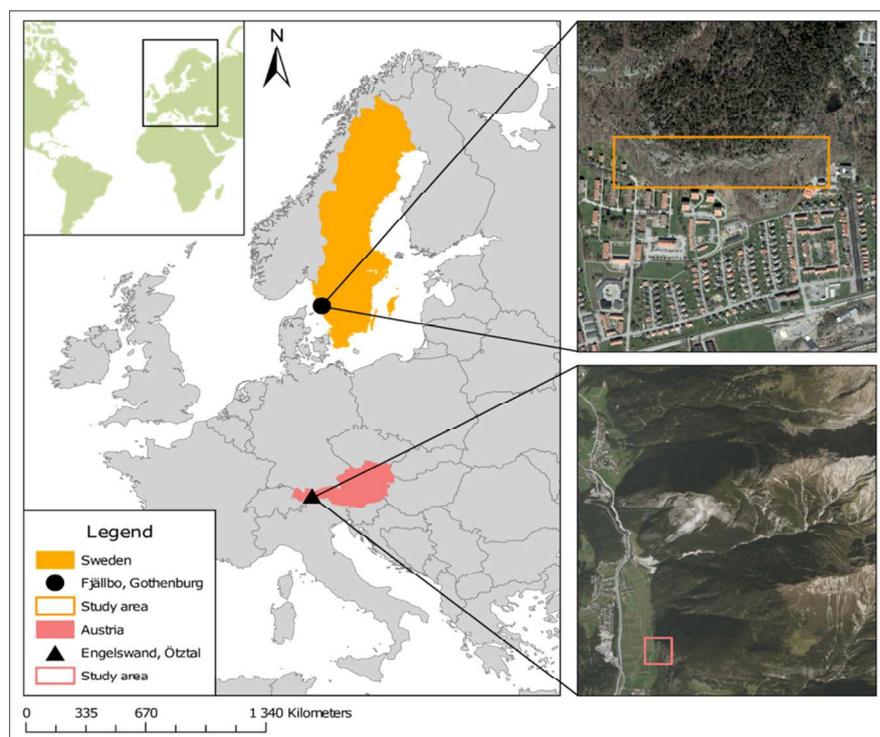
**Abb. 1:** Das in dieser Studie verwendete UAS Phantom 4 im Einsatz in Nord-Norwegen, Kåfjorden (Photo: Louise Vick)

Wir vergleichen in unserer Studie manuelle Strukturmessungen, die an 2 Tagen sowohl am Boden als auch in der oberen Felswand mit einem Geologenkompass aufgenommen wurden, mit semi-automatischen Strukturmessungen an unserer dichten 3D-Punktwolke, um instabile Felspartien zu erfassen. Semi-automatische Trennflächen wurden in der 3D Punktwolke mit dem CloudCompare q-facets Tool erfasst (Girardeau-Montaut, 2018). Das CloudCompare plugin qfacets detektiert und extrahiert die Orientation von planaren Diskontinuitäten in einer 3D Punktwolke (Dewez et al. 2016). Einfall und Einfallrichtung der Trennflächen werden für die individuellen Flächen aus den dem steilsten Azimut der Flächen errechnet. Wir haben an der Engelswand nur Trennflächen prozessiert, die mindestens aus 3000 Punkten bestanden.

Die strukturellen Trennflächen werden in Stereoplots dargestellt, die mit der Software Stereonet und Dips weiterverarbeitet und dargestellt wurden (Allmendinger, 2017, Rocscience, 2017)). Für die kinematische Analyse haben wir die Trennflächen auf die möglichen Bruchszszenarien Kippbewegung, Keilausbruch, Flächengleiten getestet und die seitlichen Grenzen wurden in Dips auf  $\pm 20-30^\circ$  gesetzt, während für Keilausbrüche  $30^\circ$  Grenzen und für Flächengleiten eine Grenze von  $20^\circ$  vorausgesetzt wurden (Wyllie und Mah, 2004). Wir haben den empfohlenen Reibungswinkel von  $23-35^\circ$  für Gneis/Granit verwendet.

### Fallbeispiel Engelswand zur semi-automatischen Erkennung von instabilen Felspartien an unzugänglichen Felsen

Eines unserer Fallbeispiele ist die Engelswand in Tumpen, Ötztal, Tirol (Abb.2)



**Abb. 2:** Übersichtskarte von zwei Fallbeispielen: Fjällbo in Göteborg, Schweden, und die Engelswand in Tumpen, Tirol

Die Engelswand besteht aus einem feinkörnigen Orthogneis, der eine Trennfläche parallel zur Schieferung aufweist (Abb. 3) Die Trennflächen sind glatt mit geringer Rauigkeit und stellenweiser Sandfüllung und

Chloritkrusten. Auf einigen nach Osten ausgerichteten Trennflächen finden sich auch Rutschharnische. Die Felswand ist nach Westen ( $275^\circ$ ) ausgerichtet mit einem Einfallswinkel von  $85^\circ$ .



**Abb. 3:** Orthogoneis der Engelswand mit Trennflächen und Oberflächen

5 GCP wurden an der Engelswand eingemessen und mit 20 cm aufgelösten Luftbildern nachkorrigiert. Die geographischen Fehler bei der Georeferenzierung wurden durch erkennbare und eindeutige Punkte in den Bildern mit Tiroler Luftbildern verglichen und Unterschiede der Azimute von Linien wurden abgeschätzt. Die Winkeltreue in unserem Fallbeispiel an der Engelswand liegt bei  $2^\circ$ , während die räumliche Genauigkeit einen Wert von 0.4 m erzielt (Abb. 4). Die 3D Punktwolke der Engelswand ist weder verzerrt noch rotiert, nur eine leichte Verschiebung hat stattgefunden.

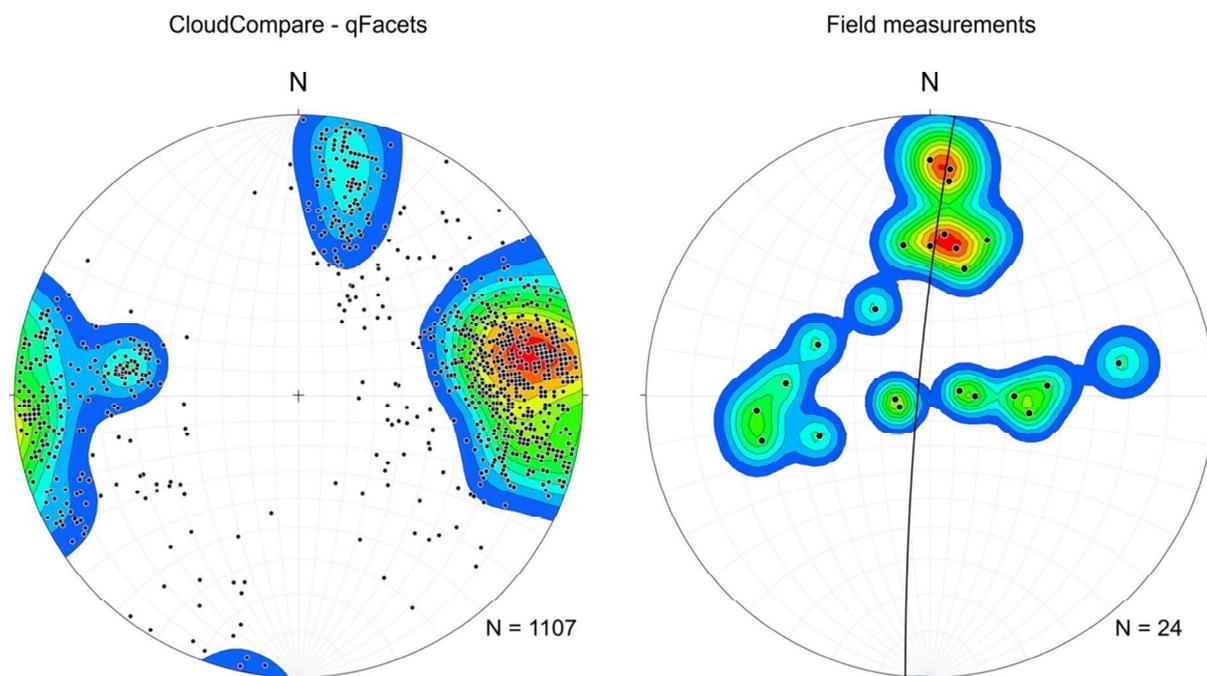


**Abb. 4:** Räumliche Genauigkeit des georeferenzierten 3D-Modells mit Angabe der Winkeltreue, basierend auf SfM von UAS-Photographien. Die räumliche Ungenauigkeit liegt bei 0.1-0.4 m. GCP wurden nur mit einem Garmin Montana 600 eingemessen und nicht mit einem DGNSS.

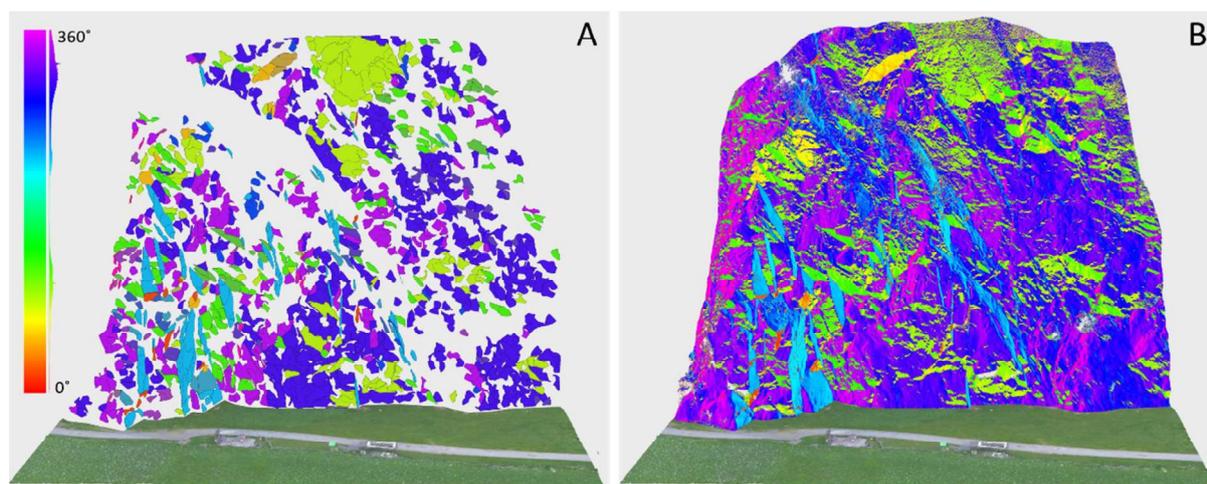
Das 3D Höhenmodell als auch die 3D Punktwolke besitzt genug Details und hohe Auflösung um es auch für eine Steinschlag-Simulation zu verwenden ( $<1\text{m}$  Genauigkeit) (Volkwein et al. 2011).

### Trennflächengefüge, Kinematische Analyse

Wir haben sowohl manuell im Feld, als auch mit qfacets 5 Trennflächen erfasst in den Einfallsrichtungen/  
Einfallswinkeln  $J_1=265/79$ ,  $J_2=192/74$ ,  $J_3=63/99$ ,  $J_4=297/44$ ,  $J_5=214/44$ .



**Abb. 5:** Vergleich von qFacets Trennflächengefügedaten und manuellen Trennflächengefügemessungen, Polkonzentrationen sind generalisiert und die Resultate sind auf der unteren Hemisphäre im rechtwinkligen Projektion abgebildet.



**Abb. 6:** A Trennflächendarstellung in qfacets unter CloudCompare. Grössere Flächen wurden vorab extrahiert, da diese mit Vegetation bedeckt ist. B Die Hauptmittelpunkte der Flächen sind hier mit ihrem Einfallswinkel im HSV Farbraum (0-360°) dargestellt. Blau-violette Farben entsprechen dem Trennflächengefüge  $J_1$ , türkis entspricht  $J_2$  und  $J_5$ , grün entspricht  $J_3$ .

QFacets resultiert häufig in tausenden von Trennflächen, viele davon unrepräsentativ und daher nicht von Bedeutung. Daher ist eine komplette Kalibration mit Feldbeobachtungen notwendig, jedoch reichen einige wenige manuelle Trennflächenmessungen, die zur Validierung der computergestützten Prozessierung verwendet werden können. Qfacets haben wir bisher nur an Graniten und Gneisen verwendet und ein Test an Kalksteinen wäre sicherlich interessant, da Verwitterungsprozesse das semi-automatische Erkennen

der Flächen sicherlich erschwert. Daher ist wichtig festzuhalten, dass eine 3D-Punktwolkenanalyse nur nach einer Feldbegehung durchgeführt werden kann (Dewez et al. 2016).

Die kinematische Analyse für die Engelswand zeigt ein 100% Potential für Kippbewegung für das Trennflächengefüge J3, 85% Wahrscheinlichkeit Keilbrüche für das Gefüge J4 und ebenso ein Felsgleiten Potential von 78% für J4.

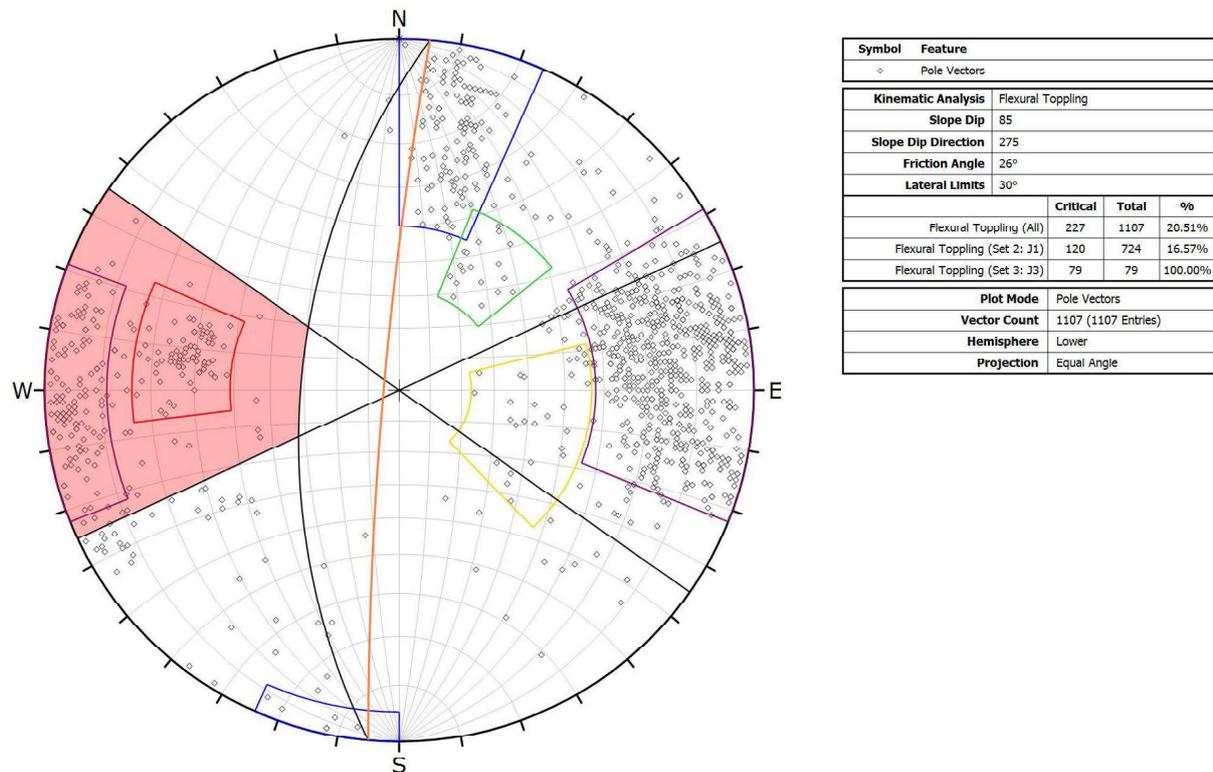


Abb. 7: Kinematische Analyse Resultat mit eine 100% Wahrscheinlichkeit für Kippbewegung für J3.

### Schlussfolgerung

UAS Photogrammetrie und unsere entwickelte Arbeitsweise zeigen ein weit grösseres Potential für die Steinschlag-Beurteilung von Klettersteigen, Wanderwegen, Mountainbike-Trails, als auch für die Gefahrenzonenkartierung.

Unsere entwickelten 3D Modelle können für eine detaillierte Gefahren-Beurteilung verwendet werden auf Grund der strukturellen und kinematischen Analyse, die wir in den 3D-Modellen durchführen können. Unzugängliche Felswände müssen nicht erst langwierig „beklettert“ werden und sehr instabile Felspartien können bei der Begutachtung vermieden werden, da wir diese risikoreichen Arbeiten mit der Drohne (UAS) durchführen.

### Ausblick und Vorstellung Sky4geo e.U. und Klaus Jöchler Felsausräumungsarbeiten

Die Firma Sky4geo e.U. wurde 2018 als Ingenieurbüro mit Sitz in Innsbruck gegründet. Sky4geo hat gemeinsam mit Masterstudenten der Universitäten Göteborg und Tromsø die hier vorgestellte Methode entwickelt um die Steinschlaggefährdung von steilen Felswänden semi-automatisch zu erfassen. Nach einer Drohnenbefliegung mit unseren in Österreich zertifizierten Drohnen (RO1) können wir sehr

detaillierte 3D-Modelle der teils unzugänglichen Felswände visualisieren und instabile Felsblöcke rechtzeitig erkennen. Mit unserer Partnerfirma Mag. Klaus Jöchler – seilunterstützte Arbeiten- können wir identifizierte instabile Felspartien vor Ort überprüfen und gezielte Felsausräumungsarbeiten einleiten. Wir führen Projekte jeglicher Größe durch: von kleineren Bauprojekten für private Bauherren und Tourismusverbände, bis hin zu Forschungsprojekten. Wir sind auf die Erstellung von Gefahrenkarten für gravitative Naturgefahren nach ÖROK-Empfehlung 193 spezialisiert. Wir erstellen je nach Kundenbedarf regionale (1:25.000), kommunale (1:25.000-1:5000) und Objekt-Massstab (<1:5000) Gefahrenkarten unter Einbezug neuester Empfehlungen (Mölk & Rieder 2017) und 3D-Steinschlagmodellierungen. Die Analyse von unzugänglichen Auslösebereichen erfährt durch unsere Methodik ein besonderes Augenmerk.

## Referenzen

- Agisoft (2018). Agisoft PhotoScan. St. Petersburg, Russia: Agisoft LLC. <http://www.agisoft.com/>
- Allmendiger, R.W. (2017). Stereonet. Stereonet 9.  
<http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/stereonet.html>
- Colomina, I., Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92: 79–97.
- Girardeau-Montaut, D. (2018). CloudCompare 3D point cloud and mesh processing software Open Source Project.  
<https://en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare>
- Dewez, T.J.B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., Rohmer, J. (2016). Facets: A cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3D point clouds. - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-799-2016>
- Harwin, S., Lucieer, A. (2012). Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-view Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. - Remote Sensing, 4: 1573-1599.
- Mölk, M., & Rieder, B. (2017). Rockfall hazard zones in Austria. Experience, problems and solutions in the development of a standardised procedure. Geomechanics and Tunneling, 10(1): 24–33.  
<https://doi.org/10.1002/geot.201600065>
- Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. Applied Geomatics 6: 1-15.
- Niethammer, U., James, M.R., Rothmund, S., Travelletti, J., Joswig, M. (2012). UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: evaluation and results. - Engineering Geology, 128: 2-11.
- Rocscience. (2018). DIPS 7.0 Tutorial Manual.  
[https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp7/pdf\\_files/tutorials/Tutorial\\_04\\_Toppling\\_Planar\\_and\\_Wedge\\_Sliding.pdf](https://www.rocscience.com/help/dips/webhelp7/pdf_files/tutorials/Tutorial_04_Toppling_Planar_and_Wedge_Sliding.pdf)
- Scaioni, M., Longoni, L., Melillo, V., Papini, M. (2014). Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of recent achievements and perspectives. - Remote sensing, 6: 1-53.
- SESAR, 2016. European Drones Outlook Study. Unlocking the value for Europe. Joint Undertaking report European Union and Eurocontrol, November 2016: 93 pp.
- Turner, D., Lucieer, A., de Jong, S., (2015). Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). - Remote Sensing 7: 1736.
- Turner, D., Lucieer, A., Watson, C. (2012). An automated technique for Generating Georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds. - Remote Sensing 4: 1392-1410.
- Wyllie, D., & Mah, C. (2004). *Rock Slope Engineering*. Spon Press.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., ... Jaboyedoff, M. (2011). Rockfall characterisation and structural protection - A review. - Natural Hazards and Earth System Science, 11(9): 2617–2651. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2617-2011>