

Freitag 20. Oktober 2017

11:00-11:30

TLS-basiertes Geomonitoring am Schartlaskogel (Ötztal)

Mag. Patrick Fritzmann¹, Mag. Petra Nittel-Gärtner², Dipl. Ing. Johannes Anegg¹

¹Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Geoinformation, Herrengasse 1-3, 6020 Innsbruck

²Amt der Tiroler Landesregierung, Allgemeine Bauangelegenheiten, Fachbereich Landesgeologie, Herrengasse 1-3, 6020 Innsbruck

Abstract

In the Pollestal, a small side-valley of the Ötztal, Tyrol, a rockfall event took place in the afternoon of 02.10.2015. The Department of Geoinformation was commissioned by the Department of Geology to calculate the volume of the rockfall event and for the monitoring of changes and deformations respectively occurring in the active zone by the use of a terrestrial laser scanner (TLS). Since then two field campaigns, one in 2016 and one in 2017, have been conducted.

In the following, first results are shown, including the volume calculation of the rockfall, localization of displacement events in the accumulation area after the event and the calculation of height differences in the displacement and the accumulation area.

Einleitung

Seit dem Frühjahr 2016 wird in der Abteilung Geoinformation ein terrestrischer Laserscanner eingesetzt. Dieser Scanner wird prinzipiell wie ein herkömmliches Vermessungsgerät verwendet und kann bis zu 4 km weit entfernte Ziele erfassen (Long-Range-Scanner). Der Einsatz von Terrestrischen Laserscan-Systemen eignet sich besonders zur flächenhaften geodätischen Aufnahme detailreicher Objekte.

Der Felssturz im Pollestal, einem Seitental des Ötztals, ereignete sich am 2. Oktober 2015. Die Ausbruchsstelle befindet sich direkt im Gipfelbereich des Schartlaskogel (2789m). Die Sturzbahn erstreckt sich über ca. 1000HM, der ca. 300m breite Schuttkegel weist eine Mächtigkeit von mehreren Metern auf.

Die Abteilung Geoinformation wurde seitens der Landesgeologie mit der genauen Kubaturermittlung des ausgebrochenen und abgelagerten Volumens und einem laufenden Monitoring beauftragt. Seit dem Sturzereignis wurden zwei terrestrische Aufnahmen (August 2016 und August 2017) durchgeführt. Zur Ermittlung der Sturzkubatur wurde als Referenz ein Airborne Laserscan aus dem Jahr 2010 verwendet.

1. Einleitung

1.1. Technologie TLS

Terrestrisches Laserscanning hat sich mittlerweile als eine geodätische Messtechnik etabliert und eignet sich besonders zur Aufnahme großflächiger und detailreicher Objekte. Der Vergleich von Laserscanaufnahmen und daraus abgeleiteter Modelle verschiedener Epochen ermöglicht die detaillierte Erfassung von Änderungen an Objekten oder des Geländes. Diese bilden die Grundlage für Deformationsanalysen und Kubaturermittlungen (Wujanz 2016).

Ähnlich dem Airborne Laserscanning (ALS) erfolgt die Aufnahme der Objekte über einen Laserstrahl, welcher über einen oszillierenden oder rotierenden Spiegel abgelenkt und ausgesendet wird. Der

Laserstrahl wandert schrittweise (meist vertikal) über die zu erfassende Oberfläche. Sobald eine vertikale Scanlinie komplett erfasst wurde, wird die Horizontalrichtung um einen Schritt erhöht und eine neue Scanlinie wird begonnen. Das von der Objektoberfläche reflektierte Signal wird von einem im Gerät verbauten Detektor aufgezeichnet. Das Ergebnis einer TLS-Messung ist eine hochgenaue 3D-Punktwolke (Kraus, 1997).

Der verwendete Scanner (Riegl VZ-4000) kann bis zu 4 km entfernte Ziele reflektorlos messen (Long-Range-Scanner). Die Messrate beträgt bis zu 147.000 Messungen pro Sekunde, wobei je nach Distanz zum aufzunehmenden Objekt bzw. Gelände, verschiedene Messraten-Programme geeignet sind. Die Nivellierung des Scanners erfolgt über hochpräzise Neigungssensoren, mit einer Genauigkeit von $\pm 0.008^\circ$, die im Gerät verbaut sind. Ein eingebauter magnetischer Kompass liefert die Nordrichtung mit einer maximalen Abweichung von $0,5^\circ$. Die Deklination, also die Abweichung von magnetisch Nord zu geographisch Nord, wird ebenfalls berücksichtigt.

Auf dem Laserscanner kann ein differenzielles GPS bzw. D-GNSS installiert werden, mit dem die genaue Scan-Position bei entsprechender Internet- bzw. Handyverbindung bestimmt werden kann. Diese Information kann später in der Datenprozessierung zur Registrierung der Scan-Positionen und der 3D-Punktwolken verwendet werden.

Zur Registrierung der verschiedenen Scan-Positionen aufeinander oder zur Georeferenzierung, der Überführung der gesamten Daten in ein globales Koordinatensystem, werden derzeit hauptsächlich zwei Methoden verwendet:

- Über Zielmarken (z.B. Reflektortafeln, Prismen oder Kugeln) mit bekannten bzw. per Tachymeter eingemessenen Koordinaten.
- Über Referenzdatensätze und Algorithmen bei denen die verschiedenen Punktwolken, anhand korrespondierender Flächen oder Punktabstände, aufeinander angepasst werden (z.B. Iterative Closest Point, Multi Station Adjustment).

Firma / Model	Riegl VZ-4000
Messbereich	5 – 4000 m bei Zielreflektivität 90%
	5 – 2300 m bei Zielreflektivität 20%
Laserstrahl Divergenz	0.15 mrad
Mehrzielfähigkeit	ja
Messrate	bis zu 147.000 Messungen/Sekunde
Scanbereich	-30° bis + 30° vertikal
	0° bis 360° horizontal
Laserklasse	Klasse 1, nahes Infrarot (1550 nm)
Stromversorgung	Akku & Strom; 11-32 V DC, 75W
Temperatur	Betrieb: 0 bis 40°C, Lagerung: -10 bis +50°C
Abmessungen / Gewicht	ca. 236 × 226,5 × 450 mm / 14,5 kg

Tabelle 3: Technische Daten des Riegl VZ4000 (Quelle: Riegl Manual VZ-4000)

1.2. Felssturz am Scharlaskogel

Der Felssturz im Pollestal, ereignete sich am 2. Oktober 2015. Das Ereignis konnte an 17 Messstationen in Österreich und den benachbarten Ländern seismisch registriert werden. Die mit einem Erdbeben vergleichbare Magnitude betrug $M_l=1.3$ und die Ereignisdauer wird auf 40 Sekunden geschätzt. Des Weiteren konnte das Ereignisdatum „Freitag den 2. Oktober 2015 um 17:59h Ortszeit“ genau festgestellt werden.

Aus der geologischen Beurteilung von Mag. Nittel-Gärtner vom 8.10.2015:

Die Ausbruchsstelle befindet sich direkt im Gipfelbereich des Scharlaskogels in ca. 2784m Sh ü.A., der aus Eklogit aufgebaut ist, auf der orographisch rechten Talseite des Pollestals. Die Sturzmasse hat im Bereich des Talbodens den bestehenden und durchgehend bewachsenen Schuttkegel überdeckt und einen neuen Schuttkegel gebildet. Dieser ca. 300m breite Sturzkegel weist mehrere Meter Höhe auf und hat den Bach verlegt. Das Gerinne wurde taleinwärtig leicht gestaut und bis zum Almweg gedrückt, sodass es teilweise über den Weg abfließt und talauswärts wieder in sein altes Bachbett zurückrinnt. Zum Zeitpunkt des Lokalausgleichs war laufend aktiver Steinschlag und Blocksturz zu vermerken, der im Bereich des neu entstandenen Sturzkegels liegen blieb. Durch das Ereignis ist es offensichtlich zu einer Druckwelle gekommen, die sowohl das Wasser des Baches, als auch den Staub weit bis auf die andere Talseite hinauf gedrückt hat, sodass weite Bereiche mit Staub und Schlamm bedeckt sind. Dies betrifft auch die vordere Pollesalm, sowie das Stallgebäude.[...]

Der Ausbruchsbereich weist eine glatte talparallele steile Fläche auf, die die Gleitbahn des Sturzereignisses darstellt. Am östlichen Randbereich befindet sich ein kleiner Felsgrat, der extreme Auflösung zeigt, sowie aufgelockertes lose lagerndes Blockmaterial, das jederzeit abstürzen kann. Weiters konnten kleine Wasserausritte festgesellt werden. Auch im benachbarten talauswärtigen Graben ist es zu einer Abplatzung eines Felsbereichs gekommen, der ebenfalls Spuren von Wasser aufweist.

Als Ursache für das Ereignis ist einerseits die Witterung der vorangegangenen Tage mit starken Tagestemperaturschwankungen zu sehen und andererseits die Ausbildung der steilen talparallelen Trennflächen, die offensichtlich auch eisführend waren.

Das momentan laufende, einmal jährlich durchgeführte Geomonitoring mittels terrestrischem Laserscan hat zum Ziel Veränderungen bzw. Deformationen am Scharlaskogel zu detektieren und gegebenenfalls entsprechend zu reagieren. Neben den Setzungen und Umlagerungsprozessen nach dem Sturzereignis in der Sturzbahn und auf dem Schuttkegel ist vor allem das Verhalten des oben angesprochenen Blockmaterials von hohem Interesse.



Abb. 5: Rot eingekreist = Felsgrat mit lose lagerndem Blockmaterial; Blauer Pfeil = Wasseraustritte auf Trennfläche

2. Methode

2.1. Geländekampagnen

Bei der Planung der Geländekampagne und Modellierung der Standpunkte wurde bereits vorab festgestellt, dass es aufgrund der extremen Höhenunterschiede im zu erfassenden Gebiet nötig ist das Gebiet in zwei Schritten aufzunehmen: Aufgrund des Öffnungswinkels des Laserscanners und Abschattungseffekten konnte vom Talboden aus (auf ca. 1770m) nicht die komplette Sturzbahn und der Gipfelbereich erfasst werden. Deshalb wurden weitere Scan-Standpunkte am Grat unterhalb des Wartkogel gegenüber des Schartlaskogels geplant (zwischen 2100m und 2500m).

Die Datenerfassung fand jeweils an zwei aufeinanderfolgende Tagen statt: die Datenerfassung des Schuttkegels im Talbereich am ersten Tag, die Erfassung des Gipfelbereichs und der Sturzbahn am folgenden Tag.

Name	Datum	Datenvolumen	Erfassungsmethode
ALS 2010 (Referenz)*	13.10.2010	3 GB	Airborne Laserscanning
TLS 2016 (Nullmessung)**	23/24.08.2016	10 GB	Terrestrisches Laserscanning
TLS 2017 (1. Folgemessung)	22/23.08.2017	7 GB	Terrestrisches Laserscanning

Tabelle 4: Übersicht der TLS- und der ALS-Messungen. * Bildet die Grundlage für die Auswertungen bezüglich des Felssturzes; ** Bildet die Grundlage für das laufende Geomonitoring.

Das stark zerklüftete Gelände und die feinen Strukturen im Fels erfordern mehr Scanpositionen als üblich, um Scanabschattungen möglichst zu minimieren. Aufgrund der Gefährdung durch Steinschlag können im Bereich des Schuttkegels keine Reflektoren angebracht werden. Ebenso ist es unmöglich in der Sturzbahn und im Gipfelbereich des Schartlaskogels Reflektoren anzubringen. Es wurde daher ein reflektorloser Ansatz zur Datenerfassung gewählt: Die Scan-Positionen wurden so gut wie möglich in Lage und Höhe über das Gebiet verteilt. Die 10 Standpunkte (siehe Abbildung 2) wurden, soweit Handy- bzw. Internetempfang verfügbar war, mittels D-GNSS exakt eingemessen und bei der Auswertung zur Registrierung der Scans aufeinander verwendet.

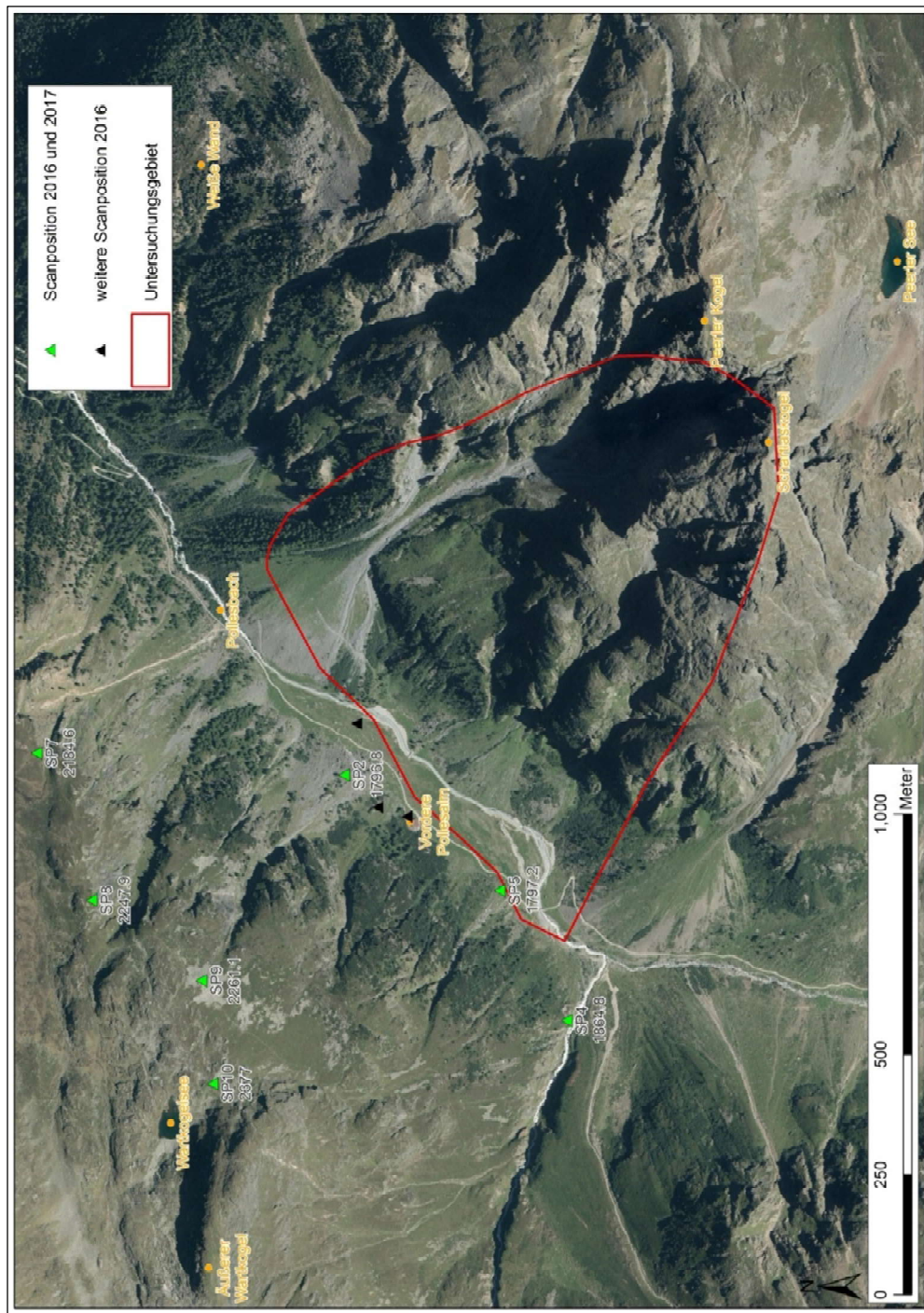


Abb. 6: Untersuchungsgebiet Schartlaskogel im Polleestal mit Scanpositionen (inkl. Höhe der Scanposition mSH.), Hintergrund Orthophoto 2015.

2.2. Datenprozessierung

Die komplette Datenprozessierung (Filterung, Registrierung und Georeferenzierung) der rohen Punktwolken von jedem Standpunkt bis hin zu einer kompletten, georeferenzierten Punktwolke erfolgte mit der Software RiScan Pro der Firma Riegl.

In einem ersten Schritt wurde die Punktwolke jeder Scanposition gefiltert. Dabei wurden nicht benötigte Bereiche gelöscht und redundante Daten eliminiert um einen qualitativ hochwertigen, performanten Datensatz zu generieren, der die Grundlage für weitere Bearbeitungsschritte bildet. Die Grobregistrierung wurde mit Hilfe der im Scanner verbauten Neigungssensoren sowie Kompass und der per D-GNSS exakt eingemessenen Scan-Standpunkte durchgeführt. Die Fein-Registrierung erfolgte mittels Multi Station Adjustment (MSA). Anstelle der Registrierung über Reflektoren/Messmarken wird bei dem Riegl Software-Modul MSA ein modifizierter ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point Algorithm) verwendet, dessen Berechnung auf der Auswertung der Lage korrespondierender ebener Flächen beruht (Gaisecker 2012). Die Georeferenzierung der gesamten 3D-Scandaten einer Epoche erfolgte ebenfalls unter Verwendung des MSA-Verfahrens. Als Referenz-Datensatz hierfür dient die Punktwolke des Airborne Laserscan aus dem Jahr 2010.

Im Prinzip wurde der Datensatz aus der Messkampagne 2017 analog zum Datensatz aus 2016 prozessiert. Im Zuge der Datenprozessierung der Daten aus der Messkampagne 2016 stellte sich jedoch heraus, dass 7 Standpunkte zur Erfassung des Gebiets ausreichend sind und so das Datenvolumen und die Messzeit der Kampagne 2017 erheblich reduziert werden konnte (siehe Abbildung 2).

Abschließend wurden je zwei Punktwolken generiert: eine 3D-Punktwolke in der die Bodenpunkte (Fels, Stein, Wiesenflächen) enthalten sind und eine Gesamt-3D-Punktwolke (Bodenpunkte inklusive Vegetation, Bäume, Brücke und anderen Objekten). Aus den Punktwolken ALS 2010, TLS 2016 und TLS 2017 der Bodenpunkte wurde jeweils ein Digitales Geländemodell (DGM) mit einer Auflösung von 1m x 1m gerechnet.

Aus den Digitalen Geländemodellen wurden in der Software Global Mapper Differenzmodelle gerechnet; die Kubaturermittlungen, Profilerstellungen und die Berechnung von 3D-Distanzen erfolgte in RiScan Pro. Karten und Grafiken wurden mit der Software ArcGIS erstellt.

Das Ergebnis der Datenprozessierung aus dem Jahr 2016 wird in Abbildung 3 dargestellt.

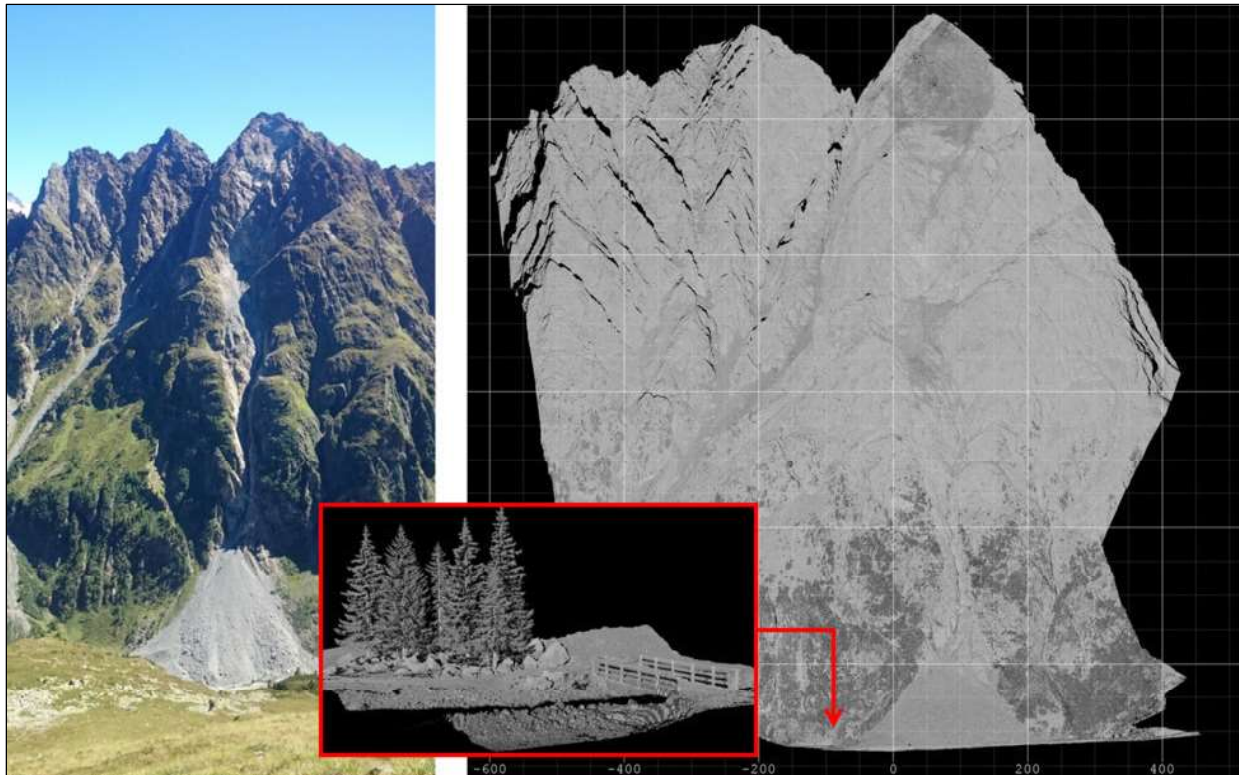


Abb. 7: Übersichtsphoto und georeferenzierte 3D-Punktwolke (eingefärbt nach Reflektivität) aus dem Jahr 2016 (inkl. Detailansicht).

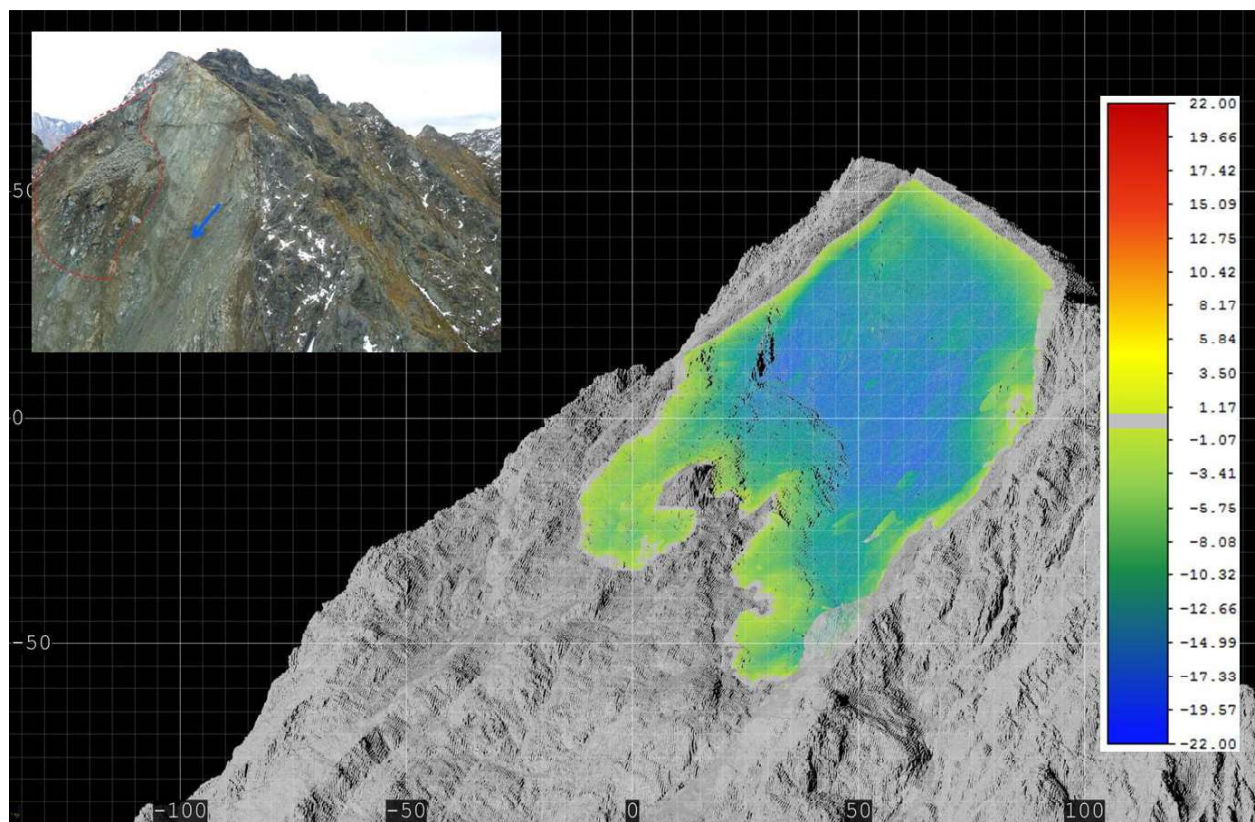


Abb. 8: 3D Darstellung des Ausbruchsbereich am Gipfel des Scharlaskogel; Eingefärbt nach Reflektivität und 3D-Distanzen (in Meter) vor dem Ausbruch 2010 zum Stand 2016.

3. Ergebnis und Auswertung

3.1. Kubaturermittlung des ausgebrochenen Materials

In Abbildung 4 wird der Ausbruchsbereich am Gipfel des Scharlaskogel dargestellt. Die Einfärbung entspricht den 3D-Distanzen aus dem Jahr 2016 zur Referenzmessung (ALS 2010) vor dem Sturzereignis in Meter. Je mehr die Einfärbung Richtung Blau geht desto mehr Material wurde abgetragen. Deutlich zu erkennen ist auch die Trennfläche und das Blockmaterial.

Die Differenzbildung zwischen den Digitalen Geländemodellen aus 2010 (vor Sturzereignis) und 2016 zeigt, dass das meiste ausgebrochene Material direkt in die Sturzbahn unterhalb des Gipfels nach Südwesten gestürzt ist (Hauptsturzbahn), ein Teil jedoch auch in die nördlich liegende Rinne und somit auf den nördlich gelegenen Schuttkegel zum Liegen kam (Nebensturzbahn, vgl. Abbildung 5).

Die Mächtigkeit der ausgebrochenen Steinmassen beträgt in weiten Teilen des Ausbruchsbereichs ca. 20 m, das etwa elliptische Ausbruchsbereich ist ca. 250 m lang (etwa 175 HM) und 180 m breit.

Die Kubaturermittlung ergab, dass am Gipfel etwa 169000 m³ Steinmaterial ausgebrochen ist. Dies deckt sich auch mit dem ermittelten Volumen im Akkumulationsgebiet des Schuttkegels, sofern man die Umlagerungsprozesse innerhalb der Sturzbahnen und die Auflockerung des abgelagerten Materials mit berücksichtigt.

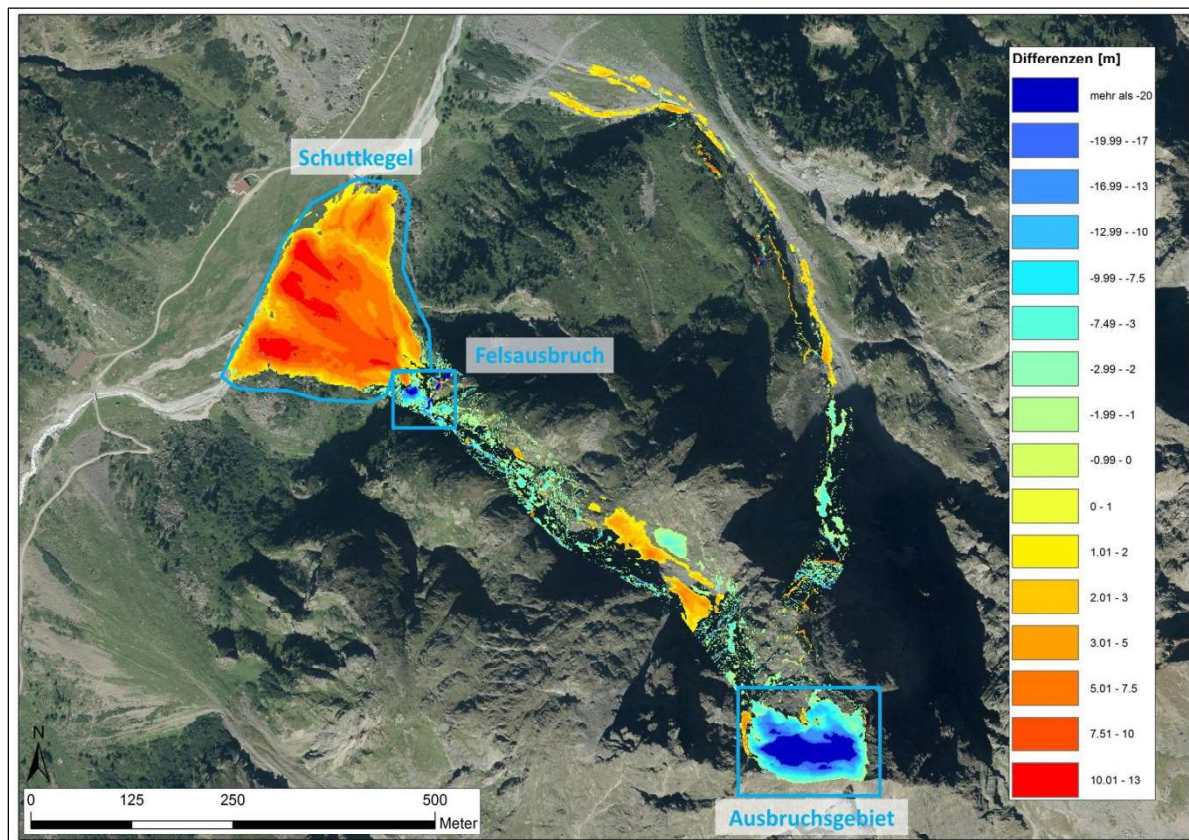


Abb. 9: Höhendifferenzen der Geländemodelle ALS 2010 und TLS 2016 in Meter. Hintergrund: Orthophoto 27. August 2015.

3.2. Gipfelbereich seit dem Sturzereignis

Abbildung 3 zeigt die georeferenzierte Punktwolke aller Scanpositionen, nebst einem korrespondierenden Übersichtsbild und einer Detailansicht des Scans aus dem Jahr 2016. Die Punktwolke wurde nach

Reflektivität eingefärbt, einem Wert der sich an der Intensität des am Detektor des Scanners empfangenen Lasersignals orientiert. Die Intensität des reflektierten Laserstrahls wird stark von der Oberflächenbeschaffenheit und vom Oberflächenmaterial beeinflusst. So erscheinen feuchte Gesteinsflächen meist dunkler als trockene. Betrachtet man die Reflektivitäts-Werte im Ausbruchsgebiet in Abbildung 3, so fällt auf, dass sich diese von der Umgebung deutlich abheben. Auch in den Daten aus dem Jahr 2017 hebt sich die dunklere Färbung im Ausbruchsgebiet deutlich von der Umgebung ab, was ein Hinweis auf feuchtes Gestein sein könnte.

Veränderungen an dem im Gipfelbereich lagernden Blockmaterial sind erst durch die 1.Folgemessung feststellbar, da der Blockkörper zuvor größtenteils von dem abgestürzten Material überdeckt war und erst nach dem Ereignis die Trennfläche sichtbar wurde. Erste Auswertungen der Messkampagne 2017 und Vergleiche mit den Messungen aus dem Vorjahr zeigen jedoch keine messbaren und signifikanten Veränderungen. Jedoch konnte das Volumen des am Gipfel lagernden Blockmaterials abgeschätzt werden. Hierfür wurde entlang der Trennfläche eine der Neigung der Trennfläche entsprechende Ebene generiert und so das Volumen des darüber lagernden Blockmaterials berechnet. Das Volumen beträgt etwa 35000 m³ auf einer Fläche von 10260 m².

3.3. Ablagerungen auf dem Schuttkegel

Die Mächtigkeit der Ablagerungen auf dem Schuttkegel (Vergleich von 2010 auf 2016) beträgt größtenteils über 7 m und reicht bis zu maximal 13 m (vgl. Abbildung 5.). Die Kubatur der Ablagerung beläuft sich auf 232000 m³. Dieses Volumen übersteigt das am Gipfel ausgebrochene Material, ist jedoch durch zusätzliche mehrere Felsausbrüche und Umlagerungen innerhalb der Sturzbahn und durch Materialauflockerung zu erklären. Besonders zu betonen ist ein großer Felsausbruch direkt oberhalb des Schuttkegels, der eine Mächtigkeit von etwa 60m Höhe und ein Volumen von 6800 m³ besitzt, und vermutlich im Zuge des Ausbruchs am Gipfel von herabstürzendem Material mitgerissen wurde (siehe Abbildung 5).

Die Profilansicht (ein 1m breiter Querschnitt durch den Schuttkegel) in Abbildung 6 verdeutlicht nochmals die Menge des abgelagerten Materials. Ebenso kann man das neue Bachbett, welches um mehr als 25 m nach Nordwesten verlagert wurde, erkennen. Vergleicht man die Messung aus dem Jahr 2016 (gelbe Profillinie) mit der Messung aus 2017 (blaue Profillinie) so zeigt sich im oberen Teil des Schuttkegels eine deutliche Veränderung von etwa 4 m Höhe, welche auf Umlagerungsprozesse hindeutet. Dieser Prozess wird noch deutlicher, wenn man die komplette Ablagerungsfläche der beiden Jahre gegenüberstellt.

Wie in Abbildung 7 ersichtlich, haben im Bereich der Ablagerung auf dem Schuttkegel zwischen 2016 und 2017 mehrere Umlagerungsprozesse bzw. Setzungsprozesse stattgefunden. Diese treten vermehrt auf der orographisch rechten Seite der Sturzbahn bzw. des Schuttkörpers auf. Höchstwahrscheinlich handelt es sich hierbei um einen fluvialen Umlagerungsprozess, bei dem im oberen Bereich des Schuttkegels Material erodiert (grüne bis bläuliche Färbung) und am Hangfuß, im Auslauf des Schuttkegels, akkumuliert wurde (gelbe bis rötliche Färbung).



Abb. 10: Profilansicht des Schuttkegels (Querschnitt durch 3D-Punktwolke mit 1m Breite). Pink = Stand 2010 (vor Sturzereignis), gelb = Stand 2016, blau = Stand 2017. Einheit in Meter.

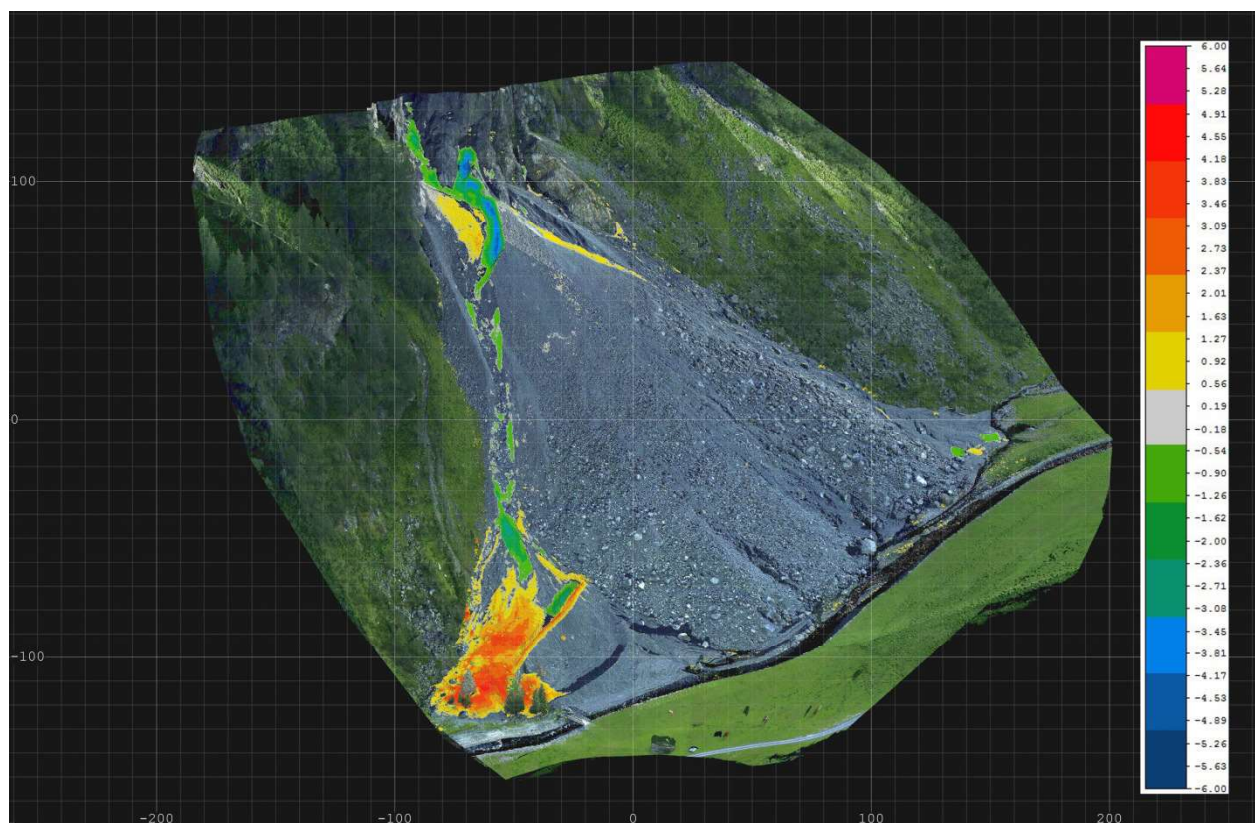


Abb. 11: Umlagerungsprozesse auf dem Schuttkegel zwischen 2016 und 2017. Seitliche 3D-Ansicht der eingefärbten Punktwolke und Höhenänderungen (3D-Distanzen) in Meter.

4. Zusammenfassung

Das TLS-basierte Geomonitoring am Scharthlaskogel lieferte bisher folgende Erkenntnisse:

1. Anhand des Vergleichs der verschiedenen Epochen (vor und nach dem Ereignis) konnte die Kubatur des am Gipfel ausgebrochenen Materials exakt bestimmt werden (169000 m³). Als Referenz diente eine ALS-Punktwolke aus dem Jahr 2010.
2. Es konnte aufgrund der Differenzen der Geländemodelle vor und nach dem Sturzereignis festgestellt werden wo und wieviel Material innerhalb der Sturzbahnen erodiert bzw. abgelagert wurde.
3. Im Untersuchungsgebiet finden auch nach dem Sturzereignis fortwährend Veränderungsprozesse statt. Diese Veränderungen können anhand der Folgemessungen genau lokalisiert und bemessen werden.
4. Das Volumen des auf der Trennfläche lagernden Blockmaterials konnte bestimmt werden (35000 m³).
5. Beide Messungen zeigen im Bereich des Ausbruchs deutlich dunklere Reflektivitäts-Werte, was vermuten lässt, dass das Gestein durchfeuchtet ist.
6. Eine signifikante Änderung im Bereich des Gipfels konnte bisher nicht festgestellt werden.

Das TLS-basierte Geomonitoring am Scharthlaskogel zeigt, dass das terrestrische Laserscanning eine effektive Methode zur Deformationsmessung und Kubaturermittlung zwischen verschiedenen Epochen darstellt. Die so gewonnenen Informationen können eine wichtige Grundlage für Bewertungen im Bereich des Naturgefahrenmanagements oder zur konkreten Beurteilung der Gefährdungssituation von Siedlungsraum und Infrastruktur bilden. Generell kann das TLS-Monitoringsystem im Bedarfsfall (z. B. nach einem Ereignisfall) rasch eingesetzt und Auswertungen binnen kurzer Zeit zur Verfügung gestellt werden. Jedoch hängt es von den lokalen Gegebenheiten und dem zu erfassenden Objekt bzw. Prozess ab, ob der Einsatz eines TLS-Systems zielführend ist.

Literatur:

- Gaisecker T., Pfennigbauer M., Sevcik C., Studnicka N. (2012): Terrestrisches Laser Scanning in den Alpen mit dem Riegl VZ-4000 – für Geländeerfassung, Hangrutschungsüberwachung und Gletschermonitoring, 1/2012, S. 45-52, VGI-Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation, Wien.
- Kraus K. (1997): Photogrammetry, Volume 2: Advanced Methods and Applications (4. Überarbeitung) - 466 Seiten, Dümmler, Bonn.
- Nittel-Gärtner P. (2015): Stellungnahme des AS für Geologie, Hydrogeologie, alpine Naturgefahren und für den Schutz vor Erosion, Felssturz Pollestal, Geologische Beurteilung.
- Riegl RiScan Pro Manual, Version 03/09, Stand 30.11.2015.
- Wujanz D. (2016): Terrestrial laser scanning for geodetic deformation monitoring, Dissertation, 163 Seiten, TU Berlin.