
Monitoring der Großhangbewegung Reissenschuh (Schmirntal, Tirol) mit TLS und UAV-basiertem Laserscanning

Magnus BREMER^{1,2}, Thomas ZIEHER², Jan PFEIFFER^{1,2}, Frederic PETRINI-MONTEFERRI³, Volker WICHMANN³

¹Institut für Geographie, Universität Innsbruck, Innsbruck, Magnus.Bremer@uibk.ac.at

²Inst. f. Interdisziplinäre Gebirgsforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Innsbruck

³LASERDATA GmbH, Innsbruck

Zusammenfassung

Die Detektion und Analyse von Massenbewegungen spielt vor dem Hintergrund des Klimawandels und des sich ausbreitenden Siedlungsraumes im Alpenraum eine zentrale Rolle. Der Bergsturz am Piz Cengalo im August 2017 oder der Felssturz im Tiroler Valsertal Weihnachten 2017 führen das Gefährdungspotenzial für die Bevölkerung hochaktuell vor Augen.

Multitemporales Laserscanning hat sich als kosteneffiziente Methode für flächenhaftes Monitoring von Massenbewegungen etabliert. Mit Hilfe des aktiven Messverfahrens können wiederholt räumlich hoch aufgelöste, präzise 3D Punktwolken aufgenommen werden, die die Geländeoberflächen der Massenbewegungen beschreiben. Finden zwischen den Aufnahmezeitpunkten Veränderungen im abgebildeten Gebiet statt, welche die Messgenauigkeit übersteigen, können diese flächenhaft dargestellt und quantifiziert werden. Neben flugzeuggestütztem (ALS) und terrestrischem Laserscanning (TLS) kommen vermehrt unbemannte Luftfahrzeuge (unmanned aerial vehicles; UAV) als Plattform für Laserscanner (UAV-LS) zum Einsatz. Es handelt sich bei den UAV-LS-Systemen um sehr leichte, vollwertige ALS Systeme, die einen kinematischen Laserscanner mit einer Inertial Measurement Unit (IMU) und einem globalen Navigationssatellitensystem (GNSS) kombinieren und dabei von einer UAV getragen werden können. Laserscanning wird für das Monitoring von Massenbewegungen in der Regel mit anderen bodengestützten Messverfahren (z.B. differenzielles globales Navigationssatellitensystem; DGNSS) kombiniert angewendet. Durch die anschließende Datenintegration können die Stärken der eingesetzten Verfahren genutzt werden, um die jeweiligen Schwächen auszugleichen (ZIEHER et al. 2018).

An einer tiefgründigen Massenbewegung unterhalb des Reissenschuhs im Schmirntal (Tirol, Österreich) werden seit 2016 verschiedene Verfahren zur Quantifizierung der Hangbewegungen angewendet (PFEIFFER et al. 2018). Neben periodischen Punktmessungen mittels DGNSS und der Analyse bestehender Orthophotoserien werden wiederholte TLS Messungen für das Tracking von Oberflächenelementen verwendet, um daraus Bewegungsvektoren abzuleiten. Im Oktober 2018 wurde der aktive Teilbereich der Massenbewegung erstmals mit UAV-LS detailliert aufgenommen. In diesem Beitrag werden ein im Juni 2017 aufgenommener TLS Datensatz und der 2018 aufgenommene UAV-LS Datensatz verwendet, um zwischenzeitliche Veränderungen der Großhangbewegung Reissenschuh zu quantifizieren. Dabei wird vor allem auf Vor- und Nachteile der beiden Plattformen eingegangen.

1 Großhangbewegung Reissenschuh

Die Großhangbewegung Reissenschuh liegt an einer nach Süden ausgerichteten Talflanke des Ost-West streichenden Schmirntales zwischen den Ortschaften Schmirn und Toldern in Tirol, Österreich. Der Massenbewegungskörper reicht von 1700 m bis 2300 m ü. Adria und wird nach Westen, Norden und Osten von bis zu 2600 m ü. Adria hohen Gipfeln umgeben. Im Bereich der Massenbewegung sind Gesteine der subpenninischen Decke des Tauernfensters zu finden. Diese sind an den Nordhängen des Schmirntales durch kalkarme Bünderschiefer im Liegenden und kalkreiche Bünderschiefer im Hangenden vertreten (FRISCH 1979). Quarzmarmore und Karbonatquarzite werden hier von instabilen und kalkfreien Schwarzphylliten unterbrochen. Überlagert werden diese Serien schließlich von Dezimeter bis Meter mächtigen gebankten Kalkmarmoren (ROCKENSCHAUB et al. 2003). Ein gut ausgebildetes Set von Trennflächen ist durch das generelle Einfallen der Schieferung mit etwa 30° nach Norden und durch subvertikale und meist Ost-West streichende Klüfte zu beobachten.

Der mittlere jährliche Niederschlag, gemessen an der Wetterstation in Toldern (1461 m ü. Adria) liegt bei etwa 1000 mm. Während der Sommermonate verdoppelt sich die Niederschlagsmenge gegenüber den Wintermonaten, wobei hier aufgrund der Höhenlage mit einer vermehrten Schneeakkumulation zu rechnen ist. Die Schneeschmelze im Frühjahr und ein damit verbundener Anstieg des Porenwasserdruckes durch Infiltration könnte die Aktivität der Massenbewegung maßgeblich beeinflussen.

2 Methoden

2.1 Terrestrisches Laserscanning

Das terrestrische Laserscanning (TLS) ist ein stationäres Verfahren, bei dem der Scanner an einem fixen Standort von einem Stativ aus betrieben wird. Der Scanner sendet Laserpulse aus, die durch einen Spiegel in verschiedene Richtungen abgelenkt werden. Die Richtungen werden dabei durch ein vordefiniertes Raster an Horizontal- und Vertikalwinkeln bestimmt und ermöglichen die Abtastung eines definierten Sichtfensters vom Scannerstandort aus (Abb. 1a). Die rückgestrahlten Laserechos lassen sich über Laufzeitmessung einer Distanz zuordnen. Durch die zusätzliche Zuordnung von Horizontal- und Vertikalwinkel bei der Aussendung resultiert eine Punktwolke, die in einem lokalen (Scanner-) Koordinatensystem vorliegt und anschließend georeferenziert werden muss. Das Monitoring von Massenbewegungen durch TLS, z.B. vom Gegenhang aus, kann in flexiblen Intervallen erfolgen. Die so gewonnenen Datensätze weisen aber aufgrund der flachen Perspektive in Kombination mit hervorstehenden Geländeformen oder Gebäuden/Bauwerken vielfach Abschattungen zwischen Sensor und Objekt auf.

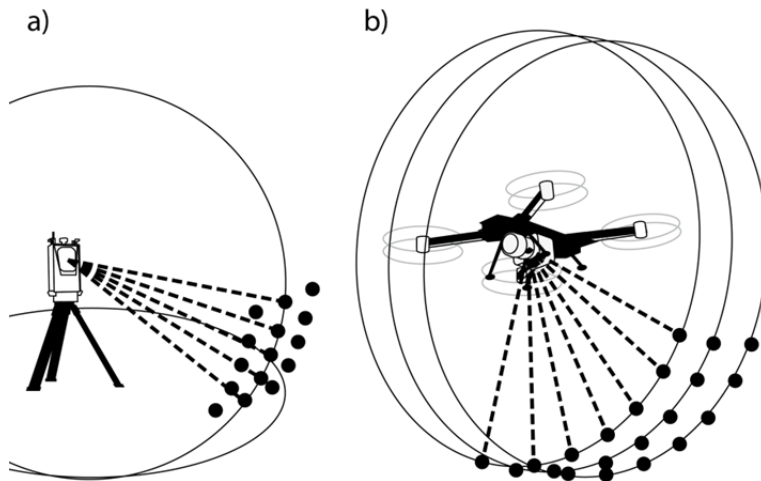


Abb. 1: Vergleich der Messsysteme; a) TLS und b) UAV-LS

Die Großhangbewegung am Reissenschuh wurde bereits mehrfach mit einem Riegl VZ-6000 Ultra Long Range Scanner vom Gegenhang aus aufgenommen. Das Instrument arbeitet bei einer Wellenlänge von 1064 nm mit einer Strahldivergenz von 0,12 mrad. Zusätzlich wird es mit einer GNSS-Antenne und eingebautem Kompass betrieben, so dass eine initiale grobe Georeferenzierung bereits gegeben ist.

Bei der Aufnahme im Juni 2017 wurde mit einer horizontalen bzw. vertikalen Winkelauflösung von 0.003° bzw. 0.004° gescannt. Somit konnte eine Punktwolke von 395 Millionen Punkten und mittleren 2D Punktabständen von 5 cm generiert werden. Die Scanposition (Abb. 2) wurde aus zuvor durchgeführten Sichtbarkeitsanalysen basierend auf einem digitalen Oberflächenmodell (DOM) so ausgewählt, dass eine gute Abdeckung der Massenbewegung gewährleistet ist.

2.2 UAV-basiertes Laserscanning

UAV-basiertes Laserscanning (UAV-LS) ist ein dynamisches Verfahren, bei dem der Scanner auf einer UAV montiert ist und zusammen mit einer IMU und einer GNSS Einheit betrieben wird. Der Scanner sendet Laserpulse aus, die durch einen rotierenden Spiegel senkrecht zur Flugrichtung abgelenkt werden und somit ein sich immer wiederholendes 360° Profil um die Längsachse des Fluggeräts herum abgetastet wird (Abb. 1b). Die Winkelauflösung des Profils wird dabei je nach Projektgebiet vordefiniert. Der dadurch definierte Punktabstand quer zur Flugrichtung (across track) wird dabei durch die Flughöhe und die Winkelauflösung definiert. Durch die Vorwärtsbewegung des Fluggeräts, die mit Hilfe des integrierten DGNSS Systems aufgezeichnet wird (Flugtrajektorie), ergibt sich durch die dauerhafte Pulsausendung senkrecht zur Längsachse eine spiralförmige Abtastung der Umgebung entlang der Flugbahn. Der Punktabstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Scanlinien (along track) wird dabei durch die Fluggeschwindigkeit und die verwendete Pulswiederholrate bestimmt.

Die Durchführung von UAV-basierten Laserscanning-Aufnahmen vereinigt die Vorteile des klassischen ALS (und flächenhafter Geländeeinsicht aus der Luft) mit den Vorteilen

des TLS (und höherer Flexibilität, sowie Auflösungsgenauigkeit). So erlauben sie beliebig wählbare zeitliche Aufnahmeintervalle, sowie räumlich hochaufgelöste 3D Punktwolken, die beispielsweise für eine geologische Strukturanalyse geeignet sind.

Die Verarbeitung höchstaufgelöster Punktwolkendaten stellt neue Herausforderungen an die für die Auswertung eingesetzten Softwarepakete. Während flugzeuggestützte Laserscanning-Daten in Tirol laut Ausschreibung im Jahr 2013 eine Punktdichte von 8 Punkten pro Quadratmeter aufweisen mussten, beträgt die Punktdichte bei UAV-gestützten Laserscanning-Daten mehrere hundert bis mehrere 1000 Punkte pro Quadratmeter. Die Algorithmen und Auswertestrategien müssen an diese hohen Punktdichten angepasst werden. Durch die geringe Flughöhe bei UAV-Befliegungen und den eingesetzten Scanner wird ein neuer Detailgrad erreicht, der es ermöglicht viel kleinere Objekte und Strukturen zu erkennen. Diese neue Maßstabebene muss bei der Parameterwahl der eingesetzten Softwarepakete berücksichtigt werden. So ergeben sich neue Auswertepotentiale wie z.B. die Parametrisierung von Oberflächenrauigkeiten für die Modellierung von Massenbewegungen. Lokale Änderungen der Geländeneigung und -wölbung, sowie Oberflächenveränderungen sind viel detaillierter erfassbar.

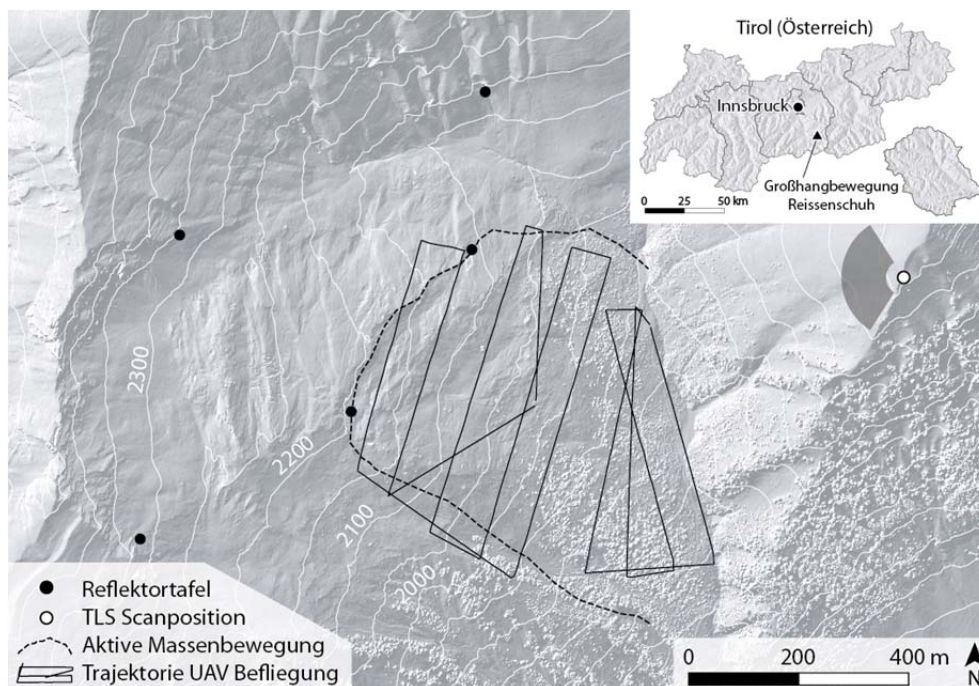


Abb. 2: Lage des Untersuchungsgebiets, TLS Standort und Flugtrajektorie

Im Oktober 2018 wurde die Großhangbewegung am Reissenschuh erstmals detailliert mit UAV-basiertem Laserscanning aufgenommen. Dazu wurde der Riegl RiCopter mit einem Riegl VUX-1LR Laserscanner, einer Applanix AP20 IMU und zwei oblique ausgerichteten Sony Alpha 6000 Kameras genutzt. Der Octocopter besitzt eine Tragfähigkeit von 16 kg (Sensoren und Stromversorgung) und bei Maximallast eine Höchstflugdauer von 30 min.

Der VUX-1LR Long Range Scanner ist ein sehr leichter und kompakter Scanner mit hoher Messgenauigkeit (15 mm) und einem Sichtfeld von 330°. Das Instrument arbeitet im nahen Infrarot (1550nm) mit einer Strahldivergenz von 0.5 mrad. Die für die Verortung benötigte Sensorlage und -position (Flugtrajektorie) werden mittels IMU/GNSS aufgezeichnet.

Aufgrund des steilen und unzugänglichen Geländes wurde eine detaillierte Flugplanung mit der Flugplanungssoftware UgCS (UGCS 2018) durchgeführt. Zunächst stand hier die Berücksichtigung in Österreich geltender rechtlicher und sicherheitsrelevanter Grenzwerte im Fokus. Diese beinhalteten das Einhalten der maximal zulässigen Distanz vom Piloten zum Fluggerät von 500 m und der maximalen Flughöhe von 150 m über Grund. Zudem wurden mit Hilfe des für Tirol landesweit verfügbaren Digitalen Oberflächenmodells (DOM) und eigens entwickelter Software-Tools detaillierte 3D Abstandsberechnungen von geplanter Flugroute zur Oberfläche vorgenommen, sowie Sichtbarkeitsanalysen durchgeführt. Bei letzteren handelte es sich um die Projektion des Geländes und der Flugroute in ein am Startpunkt aufgehängtes Kugelpanorama. Damit kann die Flugroute des Copters aus der Perspektive des Piloten digital reproduziert werden und ist intuitiv erfassbar, was eine wichtige Grundlage zur Gewährleistung der „Visual Line of Sight“ (VLOS) im Gebirge darstellt. Nach der Berücksichtigung dieser sicherheitsrelevanten Fragestellungen wurde der Flugplan weiter angepasst um optimale Punktdichten erzielen zu können. Dazu wurde ein eigens entwickelter Punktwolkensimulator verwendet, welcher den Anstellwinkel des Copters, die Winkelauflösung des Scanners, die Pulswiederholrate (PRR) und die Fluggeschwindigkeit nutzt, um mittels Raytracing auf einem DOM Punktabdeckungen zu prognostizieren.

Aufgrund der beschriebenen Sensorbestückung, der damit verbundenen Maximum Takeoff Masse von 24,9 kg und der komplexen topographischen Rahmenbedingungen, bestand der Flugplan aus zwei höhengestaffelten Teilen, um inkludierte Steig- und Sinkflüge möglichst effizient zu nutzen: Der erste Teil wurde mit einem 10-minütigen Scanflug realisiert und deckte einen Höhenbereich zwischen 1900 m und 2200 m ü. Adria ab. Dabei wurde mit einer durchschnittlichen Flughöhe von 70 m befliegen. Für eine verbesserte Effizienz wurden die unteren Bereiche mit einer Flughöhe von ca. 140 m und die oberen mit ca. 50 m befliegen. Dies reduzierte zusätzlich den für den Copter zu bewältigenden Höhengradienten. Der zweite Teil deckte den Höhenbereich zwischen 1600 m und 1900 m ü. Adria mit einem 10-minütigen Flug ab. Die Flughöhe über Grund wurde nach dem gleichen Prinzip wie beim ersten Teil konzipiert. Aufgrund eines Höhengradienten von insgesamt 600 m konnten keine durchgängigen Stabilisierungstreifen realisiert werden.

Die Flüge wurden bei einem durchschnittlichen Luftdruck von 780 hPa und einer durchschnittlichen Temperatur von 17°C durchgeführt. Damit wurden acht 29 Zoll Propeller für den Ricopter verwendet. Beflogen wurden die Flugpfade mit einer Horizontalgeschwindigkeit von 8 m/s einer PRR von 820 kHz und einer Winkelauflösung von 0.036°. Dabei wurde ein Winkelbereich von 12 bis 348° aufgenommen. Die Horizontalgeschwindigkeit bei den Steig und Sinkflügen betrug 3.5 m/s bei gleichen Scansettings.

2.3 Datenaufbereitung und -prozessierung

Die aufgenommenen TLS-Daten wurden zunächst mit der Software RiScan Pro (RIEGL LMS 2018) verarbeitet und Mehrfachechos (multiple time around; MTA) rückgerechnet. Alle weiteren Prozessierungsschritte erfolgten mit der Software SAGA (CONRAD et al. 2018) und der Erweiterung LIS Pro 3D (LASERDATA 2018, siehe auch Abb. 3). Die Registrierung und Georeferenzierung der Punktwolke erfolgte mit Hilfe von fünf retroreflektie-

renden Tafeln, die verteilt im stabilen Fels rund um die aktive Massenbewegung eingebohrt wurden. Zudem wurden die jeweils neu aufgenommenen Daten mit Hilfe der bestehenden Punktwolken fein registriert. Um eine möglichst effiziente Datenverarbeitung zu garantieren, wurde der Datensatz in kleinere quadratische Teile mit 100 m Seitenlänge und 10 m Überlappung aufgeteilt und eine virtuelle Punktwolke (XML-basierte Beschreibung der Datensätze für blattschnittfreien Zugriff) erstellt. Mit diesen kleineren Datensätzen wurde eine Bodenfilterung mit dem Progressive TIN Densification Algorithmus nach AXELSSON (2000) durchgeführt. Anschließend konnten digitale Gelände- (DGM) und Oberflächenmodelle (DOM) mit einer räumlichen Auflösung von 10 cm erstellt und Schummerungen mit dem Ambient Occlusion Algorithmus nach TARINI et al. (2006) berechnet werden.

Die aufgenommenen Daten der UAV-LS Befliegung wurden mit den Softwarepaketen RiProcess und RiPrecision (RIEGL LMS 2018) aufbereitet. Im Gegensatz zum eingesetzten Laserscanner Riegl VZ-6000, der die Laufzeit der ausgesendeten Pulse während des Scanvorgangs berechnet, wird diese im Fall des VUX-11R Systems erst nachträglich bestimmt. Zuvor müssen die IMU/GNNS-Daten der Flugtrajektorie mithilfe von Referenzdaten differenziell korrigiert werden. Die Korrektur wurde mit der Software POSPAC und mit Daten der STPOS-Basisstation Sterzing durchgeführt. Mit der korrigierten Flugtrajektorie wurden anschließend die Scannerdaten mit der Software RiProcess ausgewertet, und Punktkoordinaten extrahiert und georeferenziert. Zudem wurde eine Streifenanpassung mit Hilfe des Softwarepaketes RiPrecision durchgeführt, um Abweichungen zwischen den einzelnen Flugstreifen bzw. den beiden Flügen zu minimieren. Letztere führte zu einer geschätzten Positionsabweichung in der Ergebnispunktwolke von 0,0014 m (abs. Mittelwert), 0,0020 m (RMS), -0,0047 m (Maximum) und zu einer Winkelabweichung von 0.00354° (abs. Mittelwert), $0,00452^\circ$ (RMS) und 0.00937° (Maximum). Die resultierende Punktwolke wurde mit der Software LIS Pro 3D anhand stabiler Felsflächen oberhalb der aktiven Massenbewegung mit Hilfe des Iterative Closest Point Algorithmus (ICP; BESL & MCKAY, 1992) auf die TLS-Daten fein registriert. Analog zu den TLS-Daten wurde ein gekacheltes Datenmanagement gewählt und eine Bodenfilterung mit dem Progressive TIN Densification Algorithmus nach AXELSSON (2000) durchgeführt. Anschließend wurden ebenfalls DGM und DOM mit einer räumlichen Auflösung von 10 cm erstellt und Schummerungen mit dem Ambient Occlusion Algorithmus nach TARINI et al. (2006) berechnet.

Für die Interpretation von Veränderungen, die in der Zeit zwischen den beiden Aufnahmen durch die Großhangbewegung stattfanden, wurden (i) die erstellten Geländemodelle voneinander subtrahiert und (ii) eine weiterentwickelte Version eines Bildkorrelationsverfahrens (IMCORR; FAHNESTOCK et al. 1992) basierend auf den erstellten Schummerungen und den DGMs angewendet (IMCORR-DEM, FEY et al. 2015). Mittels Mustererkennung werden dabei Start- und Endpunkt verlagerter Geländeoberflächen einander zugeordnet und folglich die zurückgelegte Distanz und Richtung der Bewegung quantifiziert. Zudem wird der Höhenunterschied zwischen Start- und Endpunkt aus den eingehenden DGMs berücksichtigt. Für die Veränderungsanalyse mittels Bildkorrelationsverfahren muss die Oberflächenmorphologie der Rutschmasse weitgehend intakt bleiben, was im Fall der Großhangbewegung Reissenschuh gegeben ist.

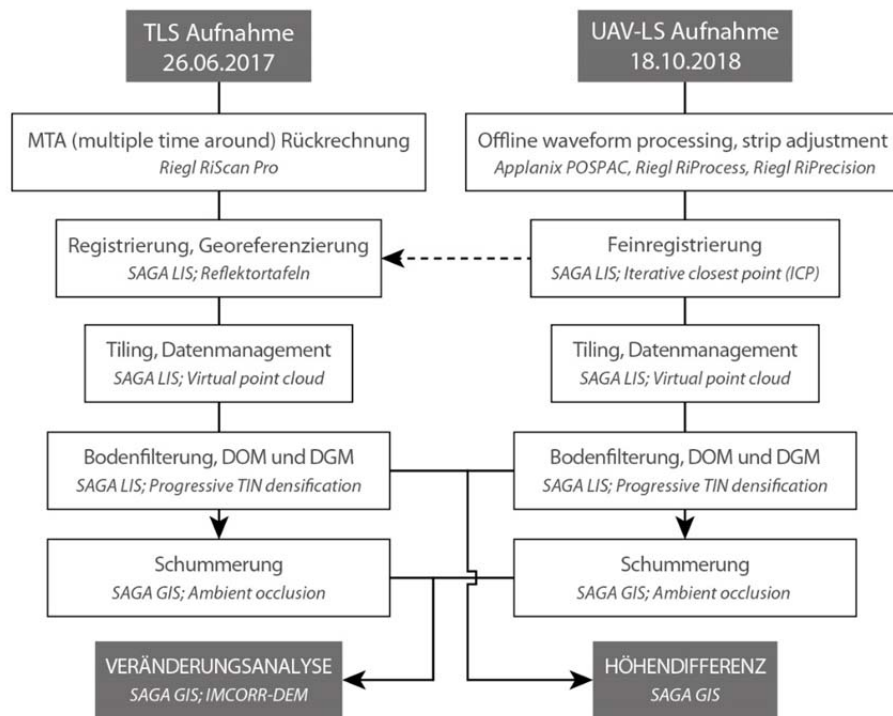


Abb. 3: Diagramm der durchgeführten Arbeitsschritte und der angewendeten Software bzw. der angewendeten Algorithmen

3 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse des Vergleichs der resultierenden Datensätze nach der Durchführung der in Punkt 2.3 beschriebenen Prozessierungsschritte. Anhand der Subtraktion der beiden Geländemodelle kann zunächst der aktive Bereich der Großhangbewegung abgegrenzt werden (Abb. 4a). Zudem sind Bereiche mit Massenverlust (Absenkung der Geländeoberfläche) und Massengewinn (Erhöhung der Geländeoberfläche) erkennbar. Im obersten Bereich der aktiven Massenbewegung senkte sich die Oberfläche innerhalb von knapp 16 Monaten um 0.43 m (± 0.28 m, 1 Standardabweichung) ab. Innerhalb des aktiven Teilbereichs kommt es zudem zu Sekundärprozessen (z.B. Felsstürze, Muren, flachgründige Rutschungen), deren Massenbilanz aus dem Vergleich der erstellten Geländemodelle abgeschätzt werden kann. Im mittleren Bereich der aktiven Massenbewegung ereignete sich zwischen den beiden Aufnahmen ein Felssturz, wobei etwa 33 m³ mobilisiert wurden (Abb. 4c).

Die Ergebnisse des Bildkorrelationsverfahrens zeigen ein räumlich differenziertes Bewegungsmuster (Abb. 4b). Im mittleren Bereich der aktiven Massenbewegung auf etwa 2050 m ü. Adria wurden die größten Bewegungen mit >1 m abgeleitet. Nach oben und unten hin nimmt die zurückgelegte Distanz ab. Im oberen Teil bewegt sich die Massenbe-

wegung nach Osten. Nach unten hin zeigen die abgeleiteten Bewegungsvektoren zusehends nach Südost. Das Bewegungsmuster stimmt generell mit den Ergebnissen von PFEIFFER et al. (2018) überein.

Die Variabilität der Bewegung und deren Richtung lässt sich mit Hilfe der hochaufgelösten Schummerungen kleinräumig gut nachvollziehen (Abb. 4d). Die unvollständige räumliche Abdeckung der Bewegungsvektoren kann einerseits auf Datenlücken zurückzuführen sein, bedingt durch Objektschatten - vor allem bei der TLS-Aufnahme - oder durch die Bodenfilterung. Andererseits könnte sich die Oberfläche zu stark verändert haben, wodurch keine korrelierenden Muster in den multitemporalen Daten gefunden werden können. Ausreißer, die vor allem im stabilen Bereich oberhalb der Massenbewegung auftreten, hängen mit der geringeren Punktdichte zusammen, wodurch die Repräsentation der Topographie in den generierten Schummerungen zunehmend beliebig wird.

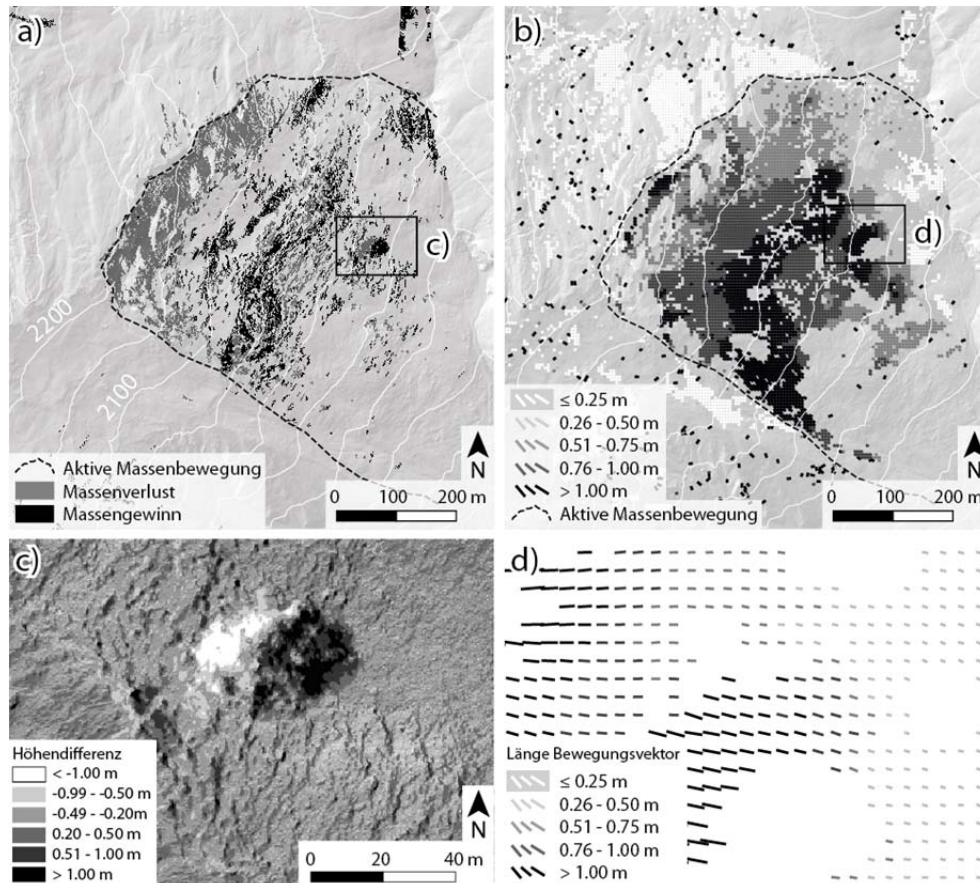


Abb. 4: Ergebnisse des Vergleichs beider Aufnahmezeitpunkte (TLS- und UAV-LS-Aufnahme). (a) Differenz der erstellten Geländemodelle mit (c) Detailansicht und (b) abgeleitete Bewegungsvektoren mit (d) Detailansicht

Für das Monitoring der Großhangbewegung Reissenschuh weisen beide Aufnahmeverfahren Vor- und Nachteile auf. Genauigkeit und Punktdichte der mit TLS aufgenommenen Punktwolke nehmen mit zunehmender Distanz zum Scanner ab. Zudem entstehen durch Objekte, Vegetation und dem unruhigen Relief Datenlücken. Aufgrund der großen Reichweite des Riegl VZ-6000 Scanners von bis zu 6000 m konnte das Untersuchungsgebiet und umliegende Bereiche von der Kammumrahmung bis zur Talsohle aufgenommen werden. Damit wird die Registrierung mit bestehenden terrestrisch und flugzeug-gestützt aufgenommenen Laserscanning-Daten anhand stabiler Flächen erleichtert. Die Aufnahme mit UAV-LS konzentrierte sich dagegen auf den aktiven Bereich der Massenbewegung. Innerhalb des beflogenen Gebiets liegen beinahe lückenlose Daten mit weitgehend konstanter Punktdichte vor.

Die Ergebnisse zeigen, dass die beiden eingesetzten Verfahren grundsätzlich kombinierbar sind. Die Auswertungen sind allerdings in Bereichen mit Datenlücken in den TLS-Daten unvollständig. Für die Quantifizierung geringerer Bewegungen (z.B. langsamere Massenbewegung, kürzerer zeitlicher Abstand zwischen den Datenaufnahmen) könnte zudem die distanzabhängige Genauigkeit der TLS-Daten limitierend wirken.

Aufgrund der aufwändigen Planung, Aufnahme und Prozessierung der Daten, ist vor allem UAV-LS nicht für ein zeitlich hochaufgelöstes Monitoring (z.B. tägliche Auflösung) geeignet. Für solche Anwendungsfälle können permanent installierte Laserscanner eingesetzt werden. Eine Voraussetzung ist allerdings eine automatisierte Prozessierungskette zur Verarbeitung und Auswertung der großen Datenmengen.

4 Fazit

Laserscanning eignet sich generell gut für episodisches, flächenhaftes Monitoring von Massenbewegungen. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Messgenauigkeit der eingesetzten Plattformen und Scanner signifikant größer ist als die zu detektierenden Bewegungen. Vor allem UAV-LS ist daher sehr gut geeignet, da im Gegensatz zu TLS die Scandistanz über das Untersuchungsgebiet hinweg mehr oder weniger konstant gehalten werden kann. Die resultierende Punktwolke weist dadurch auch eine räumlich weitgehend konstante Punktdichte und Genauigkeit auf.

Aufgrund der Vorteile von UAV-LS (hochaufgelöste, lückenlose und gleichmäßige Punktwolken) können nach mehrmaliger Befliegung objektbasierte Ansätze zur Ableitung von Bewegungsvektoren entwickelt werden. Damit könnte in Zukunft neben dem Versatz auch die Deformation der Geländeoberfläche und der darauf befindlichen Objekte quantifiziert werden.

Literatur

- AXELSSON, P. (2000): DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33 (part B4), 110-117.
- BESL, P. J. & MCKAY, N. D. (1992): A method for registration of 3-D shapes. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, 239-256.

- CONRAD, O., BECHTEL, B., BOCK, M., DIETRICH, H., FISCHER, E., GERLITZ, L., WEHBERG, J., WICHMANN, V. & BÖHNER, J. (2015): System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. In: *Geosci Model Dev*, 8, 1991-2007, <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.
- FAHNESTOCK, M. A., SCAMBOS, T. A., & BINDSCHADLER, R. A. (1992): Semi-automated ice velocity determination from satellite imagery. In: *Eos*, 73, 4-93.
- FEY, C., RUTZINGER, M., WICHMANN, V., PRAGER, C., BREMER, M. & ZANGERL, C. (2015): Deriving 3D displacement vectors from multi-temporal airborne laser scanning data for landslide activity analyses. In: *GIScience & Remote Sensing*, 52, 437-461.
- FRISCH, W. (1979): Bericht 1978 über geologische Aufnahmen im Tauernfenster auf Blatt 148, Brenner. In: *Verh. Geol. B.-A. Wien*, 2-3, A 131- A 133.
- LASERDATA (2018): LIS Pro 3D software package, www.laserdata.at/software.html (22.11.2018).
- PFEIFFER, J., ZIEHER, T., BREMER, M., WICHMANN, V. & RUTZINGER, M. (2018): Derivation of Three-Dimensional Displacement Vectors from Multi-Temporal Long-Range Terrestrial Laser Scanning at the Reissenschuh Landslide (Tyrol, Austria). In: *Remote Sens.*, 10, 1688.
- RIEGL LMS (2018): www.riegl.com (22.11.2018).
- ROCKENSCHAUB, M.; KOLENPRAT, B. & NOWOTNY, A. (2003): Das westliche Tauernfenster. In: *Arbeitstagung 2003, Blatt 148 Brenner*, Geologische Bundesanstalt, Wien, Austria.
- TARINI, M., CIGNONI, P. & MONTANI, C. (2006): Ambient Occlusion and Edge Cueing for Enhancing Real Time Molecular Visualization. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 12, no. 5, 1237-1244.
- UGCS (2018): www.ugcs.com (22.11.2018).
- ZIEHER, T., TOSCHI, I., REMONDINO, F., RUTZINGER, M., KOFLER, CH., MEJIA-AGUILAR, A. & SCHLÖGEL, R. (2018): Sensor- and Scene-Guided Intergration Of TLS And Photogrammetric Point Clouds For Landslide Monitoring. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, 1243-1250, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-1243-2018>.