SANDRA MELZNER, GREGOR SCHILLER

Laserscanning und Photogrammetrie in der Geologie – Chancen und Herausforderungen

Laser scanning and photogrammetry in the geology – opportunities and challenges

Zusammenfassung:

Das Laserscanning und die Photogrammmetrie haben sich in den letzten 20 Jahren einen festen Platz im Vermessungswesen erarbeitet. Obwohl das zu Grunde liegende technologische und geometrische Prinzip den heute üblichen Tachymetern teilweise sehr ähnlich ist, unterscheidet sich die grundsätzliche Aufnahme und Datencharakteristik sehr deutlich von der klassischen Vermessung. Dies eröffnet Anwendungsbereiche in den Geowissenschaften, in denen eine derartig detaillierte geodätische 3D-Datenerfassung bisher nicht oder nur unter großen Umständen möglich war. Die scheinbare Leichtigkeit der Aufnahme kann aber auch dazu führen, dass durch ungenügend geschultes Personal wesentliche geodätische Grundsätze außer Acht gelassen werden, was im schlimmsten Fall zu einer völligen Unbrauchbarkeit der Daten führen kann. Ziel dieser Arbeit ist es, anhand einiger Anwendungsbeispiele die Chancen und Herausforderungen einer Vermessung mittels Laserscanning und Photogrammetrie zu erläutern.

Abstract:

Stichwörter: ALS, TLS, Photogrammmetrie, Datentypen, Datenqualität, Anwendungen

Keywords: ALS, TLS, photogrammetry, data types, quality of data, applications

Laser scanning and photogrammetry have gained a firm place in terrestrial surveying over the last 20 years. Although the underlying technological and geometric principle is very similar to today's common total stations, the basic recording and data characteristics are very different from classical surveying. This opens up areas of application in the geosciences in which such detailed geodetic 3D data acquisition was previously not possible, or only under great circumstances. However, the apparent ease of recording can also lead to essential geodetic principles being disregarded by insufficiently trained personnel, which in the worst case can lead to the data being completely unusable. The aim of this paper is to explain the opportunities and challenges of laser scanning and photogrammetric surveys by means of some application examples in the geosciences.

Einleitung

Das Laserscanning und die Photogrammmetrie haben sich in den letzten 20 Jahren einen festen Platz im Vermessungswesen erarbeitet. Obwohl das zu Grunde liegende technologische und geometrische Prinzip den heute üblichen Tachymetern teilweise sehr ähnlich ist, unterscheidet sich die grundsätzliche Aufnahme und Datencharakteristik sehr deutlich von der klassischen Vermessung. Dies eröffnet Anwendungsbereiche in den unterschiedlichsten Disziplinen in denen eine derartig detaillierte geodätische 3D-Datenerfassung bisher nicht oder nur unter großen Umständen möglich war. In der Praxis werden diese Methoden für unterschiedlichste Zwecke eingesetzt, u.a. von der Erstellung geologischer und geomorphologischer Daten, bis hin zu detaillierten ingenieurgeologischen Untersuchungen in Hangbereichen. Besonders in abgelegenen und/ oder stark exponierten (z.B. gefährdeten) Gebieten werden solche Methoden verwendet.

In Abhängigkeit von der Zielsetzung, den gebietsspezifischen Eigenschaften (Geologie, Topographie, Vegetationsbedeckung, etc.) und den verfügbaren Mitteln (Finanzen, Personal) wird eine Bearbeitungsstrategie entwickelt (Abb. 1) und entschieden, ob/was für eine Vermessungskampagne sinnvoll ist und in welcher Weise sie durchgeführt werden soll. Neben der Entscheidung für die Messmethode hat auch die Wahl der Trägerplattform einen großen Einfluss auf die Abwicklung der Messkampagne, Datenauswertung und Nutzbarkeit der Messdaten für bestimmte Zwecke. Beispielsweise weisen vom Boden aufgenommene LIDAR Daten eine andere Charakteristik auf, als LIDAR Daten von einer luftgestützten Plattform (z.B. UAV).



Abbildung 1: Entwicklung einer Bearbeitungsstrategie im Hinblick zu den Projektzielen, der Gebietsgröße und den verfügbaren Basisdaten (Melzner et al., 2011, Melzner, 2017).

Figure 1: Development of an assessment strategy with regard to the project objectives, the study area size and the available basic data.

Theoretische Grundlagen

Jede geodätische Messung benötigt ein Bezugskoordinatensystem (Abb. 2A). Um mehrere Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Epochen) vergleichen zu können, muss entweder im selben Bezugskoordinatensystem gemessen worden sein (Abb. 2B) oder eine Transformation zwischen den jeweiligen Bezugssystemen bekannt sein (Abb. 2C).

Zu Beginn einer Messkampagne ist es daher ratsam, ein übergeordnetes Bezugssystem einzurichten, um die Datenverarbeitung zeiteffektiv und in hoher Qualität durchführen zu können. Die Realisierung des Bezugssystems kann physisch durch Messpfeiler und/oder amtliche Festpunkte erfolgen, oder virtuell durch einen GPS-Korrekturdienst mit virtuellen Referenzstationen (z.B. APOS, EPOSA, etc. und geeigneten Transformationssets). Die Wahl der Aufnahmemethodik, (airborne, terrestrisch, statisch, Stop-and-Go, kinematisch), die Festlegung der Scanparameter (Punktdichte, Streifenüberlappung, Sichtachsen), Festlegung der Scanpositionen oder des Flugplanes sowie die Festlegung der Passpunkte/ Reflektoren entsprechend der Planung der Georeferenzierung sind, genauso wie die Wahl des geeigneten Scanners, weitere wichtige Schritte in der Planung einer LIDAR Vermessungskampagne.

Der wesentlichste Unterschied des Laserscanners zur herkömmlichen Vermessung ist die Tatsache, dass nicht genau angezielte Einzelpunkte, die die geometrische Struktur des Objektes beschreiben (z.B. Ecken), sondern eine große Anzahl wahllos auf der Oberfläche verteilter Punkte gemessen werden. Die Genauigkeit der Beschreibung des Objektes ist daher nicht mehr durch seine Repräsentation eines generalisierten Grundkörpers (Polyeder), sondern durch die Punktdichte am Objekt abhängig (Abb. 3). Da dadurch jedes Objekt im Sichtbereich des Scanners erfasst wird, ist eine nachfolgende Klassifizierung der Punktwolke erforderlich, um für die Fragestellung relevante Informationen aus der Punktwolke zu extrahieren.







Rot/Grün Punkte: Abtastung vom Scanner

Gelbe Punkte: Gezielte Messung mit Tachymeter

Abbildung 3: Messcharakteristik: Tachymeter versus Laserscanner. Mittels eines Laserscanners ist eine exaktere Darstellung des Felsens trotz geringerer Einzelpunktgenauigkeit möglich (Quelle: Schiller und Melzner, 2017).

Figure 3: Measurement characteristics: total station versus laser scanner. By means of a laser scanner, a more exact representation of the rock is possible despite lower single point accuracy (Source: Schiller und Melzner, 2017).

Für natürliche (Fels)Oberflächen bietet der Scanner eine ideale Erfassungsmöglichkeit. Die Charakteristik der Punktwolke (Punktverteilung, Punktdichte, Aufnahmerichtung Scanschatten, etc.) hat einen direkten Einfluss auf die Qualität der daraus abgeleiteten Aussage. Generell gilt, dass die Genauigkeit der Einzelmessung bei der klassischen Vermessung mittels Tachymeter immer besser sein wird als beim Scanner, weil unabhängig von der Gerätespezifikation die Interpretations-/Interpolationsunsicherheit der Punktwolke wegfällt. Dennoch kann die Qualität der Aussage der Laserscan-Daten höher sein, da die Aufnahmegeneralisierung weitestgehend entfällt. Der wesentliche Vorteil einer LIDAR Vermessung gegenüber einer photogrammetrischen Bildaufnahme (Abb. 4) ist, dass ein Laserscanner die Vegetation durchdringen kann.



Abbildung 4: Ein fotorealistisches 3D Modell generiert unter Verwendung des 3D Bildmesssystems ShapeMetriX-UAV mit einer Kamera Sony A7R (Quelle: Gaich, 2019).

Figure 4: A photorealistic 3D model generated using a ShapeMetriX-UAV 3D imaging system with a Sony A7R camera (Source: Gaich, 2019).

Im Rahmen einer LIDAR Erhebung können je Laserpuls folgende LIDAR-Punktattribute erfasst werden: X-, Y- und Z-Positionswert, Intensität, Rückgabenummer, Anzahl der Rückgaben, Punktklassifizierungswerte, Punkte am Rand des Flugweges, RGB-Werte (rot, grün und blau), GPS-Zeit, Abtastwinkel und Abtastrichtung. Zusätzlich können bei moderneren Geräten Parameter über die Form der rückkehrenden Signale erfasst werden. Je weniger Informationen pro ausgesendetem Laserpuls aufgenommen werden, desto geringer ist die Aufnahmezeit im Gelände und die Datenmenge. Je nachdem was der geplante Verwendungszweck ist, können aus den Laserdaten die Punktwolken oder andere Datenformate (Abb. 5) erzeugt werden.

Bei einer photogrammetrischen Vermessung werden während einer/mehrerer (Flug-) kampagnen vom Boden oder mit UAV viele stark überlappende Bilder gemacht (Abb. 4), die für die Berechnung eines 3D Modells verwendet werden können. Vor der Berechnung des 3D-Modells müssen die Bilder mittels eines Bündelblockausgleichs georeferenziert werden. Das bedeutet, dass sie in ein einheitliches Bezugssystem gebracht werden. Dabei wird auch die Kalibrierung und Bildverzerrung der Kamera soweit wie möglich korrigiert.



Ein Mesh ist eine vernetzte Oberfläche (Abb. 5B), das an einer gegebenen X-Y-Koordinate mehrere Z-Koordinaten besitzen kann. Dieses Format eigAbbildung 5: Datentypen (A) Punktwolke, (B) Mesh, (C) TIN und (D) Raster (Quelle: Melzner and Schwarz, 2019).

Figure 5: Data types (A) point cloud, (B) mesh, (C) TIN and (D) raster (Source: Melzner and Schwarz, 2019).

net sich daher für die 3D Oberflächendarstellungen von komplexen und überhängenden Felswandbereichen. Ein TIN ist eine Art von Mesh. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass es nur an einer Lageposition einen Höhenwert besitzen kann. Überhänge sind in diesem Datenformat also nicht darstellbar. In einem Raster (Abb. 5D und Abb. 6) liegen Punkte in einer Ebene eindeutig nebeneinander (z.B.: in der

Horizontalebene), diese können aber dazu auch Werte in der verbleibenden Koordinatenrichtung (z.B.: Höhe) haben (Abb. 6).





Abbildung 6: Berechnung eines Rasterwertes mittels "Mittelwert"- (= Mittelwert der Seehöhe) und "Maximum"- Aggregierung" (= Maximum der Seehöhe) aus einer Punktwolke und Aggregierung zu einer gröberen Auflösung (Quelle: Melzner and Schwarz, 2019).

Figure 6: Calculation of a raster values by means of "mean- and maximum aggregation and aggregation to a coarser resolution (Source: Melzner and Schwarz, 2019).

Punktlücken werden bei einer Aggregierung im ArcGIS über eine lineare Interpolation aufgefüllt. Bei der Aggregierung zu einer gröberen Rasterauflösung stehen unterschiedliche Funktionen für die Aggregierung zur Verfügung (Abb. 6).

Beispiel 1: LIDAR Vermessung - Kalkgestein

Ziel der LIDAR Vermessung war die Erstellung eines TLS von den steilen Talflanken eines alpinen Trogtals in Kalkgestein, um eine flächendeckende strukturgeologische Kartierung durchzuführen.

Als Aufnahmemethode wurde eine mobile Stop-and-Go Methode mit geländegängigem Fahrzeug, TLS Scanner (Riegl LMS- 420i) und D-GPS Ausrüstung verwendet (s. Abb. 7). Damit konnten sehr kurze Messzeiten erreicht werden, da alle ergänzenden Messungen in einem Standpunkt simultan durchgeführt wurden. Ein temporärer GPS-Referenzpunkt für TLS wurde in Fahrzeugumgebung eingerichtet, der leicht erreichbar und eine gute GPS-Eignung (Anbindung an VR Bezugssystem) hatte. Ein temporärer Verknüpfungspunkt im Interessensgebiet wurde zur näherungsweisen Verbindung der Scans einer Kampagne ausgewählt, wodurch kein Betreten der exponierten Hänge erforderlich war. So konnten innerhalb eines Tages 32 Scans von 15 verschiedenen Positionen mit Distanzen von bis zu 1000 m vom Zielobjekt aufgenommen werden. Zwischen den Standpunkten entstehen nur sehr kurze Umstellungszeiten

Bei der Datenprozessierung wird die geometrisch ungünstige Konfiguration der Anschlusspunkte durch die spezielle Auswertemethode im Postprocessing berücksichtigt. Durch Verbindung der Scans mit Verknüpfungsobjekten und Naturpunkten werden im Rahmen eines Multi-Station-Ausgleichs die Scans zu einem homogenen Block verbunden. Dabei werden auch die GPS-Anschlusspunkte der einzelnen Scanpositionen zu einer gemeinsamen Messbasis verbunden, die dadurch eine Ausdehnung über den gesamten Talboden erreicht. Damit ist die Voraussetzung für eine genaue Georeferenzierung wieder gegeben.



Abbildung 7: Vermessung einer Kalksteinwand mittels TLS im Stop-and-Go Verfahren auf einem Geländefahrzeug (Melzner at al., 2013).

Figure 7: Scanning of a limestone wall using TLS in the stop and go procedure on an off-road vehicle (Melzner et al., 2013).

Die Kombination der TLS Punktwolken mit den ALS Daten ermöglichte den höchsten Abdeckungsgrad der steilen Talflanken, da die ALS- und TLS-Daten unterschiedliche Bereiche abdecken. Beim Vergleich zweier ALS Epochen fällt auf, dass die älteren ALS Daten gröber gefiltert sind, was einen großen Einfluss auf Rauigkeit hat (Abb. 10 in Melzner et al., 2013).

Hinsichtlich der Erhebungsmethode lässt sich zusammenfassen, dass sie eine zeitsparende und flexible Methodik zur Erfassung von TLS-Daten darstellt. Es war möglich, Scans mit hoher Punktdichte bei großer Reichweite zu erstellen. Gebietsspezifische Charakteristika (z. B. Geologie, Hydrogeologie, Exposition, Vegetationsbedeckung) beeinflussen die resultierenden Scans erheblich. Die Klassifizierung von Punktwolken ist schwierig und zeitaufwendig. Bislang gibt es keine Standardmethoden zur Validierung der Qualität der Klassifizierung. Ältere ALS Daten müssen überprüft und ggf. neu klassifiziert/georeferenziert werden. Die Qualität der klassifizierten TLS- und ALS-Daten hängt von dem Aufwand für die Datenverarbeitung ab. Exponierte Geländesituationen erfordern einen höheren Aufwand für die manuelle Klassifizierung.

Eine höhere Anzahl von Scanpositionen mit niedriger Auflösung (=kürzere Scanzeit) minimiert die Datenlücken und hält eine hohe Punktdichte aufrecht. Vollständige Rohdaten (unklassifizierte Daten) sollten dem Kunden zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht eine spätere Nachbearbeitung und Analyse der Punktwolken. Eine hierarchische, zielgerichtete Klassifizierungsstrategie wird empfohlen. Ein höherer Aufwand für die manuelle Bearbeitung führt zu einer höheren Datenqualität und einem höheren Wert des Endprodukts. ALS-Daten werden oft für große Flächen und/oder kleinräumige Forschungsfragen aufbereitet. Daten müssen für großräumige Detailauswertungen überprüft/angepasst werden. Informationen über die Methoden und das Ziel der Datenerhebung und -aufbereitung müssen dem Kunden zur Verfügung gestellt werden.

Die geotechnische Analyse der 3D-Punktwolken wurde mittels der Software "I-Site Studio" durchgeführt. Die Software hat eine benutzerfreundliche Oberfläche, die eine zeiteffiziente Analyse von TLS & ALS Daten für verschiedene geologische und geotechnische Anwendungen ermöglicht.

Beispiel 2: LIDAR und photogrammetrische Vermessung- Kristallin Gestein

Ziel der Bearbeitung war ein Methodenvergleich von LIDAR und photogrammetrischer Vermessungsmethoden hinsichtlich der strukturellen und lithologischen Kartierung in Kristallingestein (Abb. 8).

Als Aufnahmemethode für die TLS Vermessung wurde seitens der Landesregierung Niederösterreich eine mobile Stop-and-Go Methode mit Stativ und einem Riegl VZ400 Laserscanner eingesetzt. Von der Firma 3GSM GmbH wurde eine hochauflösende photogrammetrische Vermessung unter Verwendung eines 3D Bildmesssystem ShapeMetriX-UAV mit einer Kamera Sony A7R durchgeführt. Von der Firma Riegl wurden ALS Punktwolken mittels einem RiCOPTER und einem terrestrial Laserscanner VUX-1 erhoben. Der Laserscanner wurde speziell für Drohnen entwickelt (Melzner et al., 2019).

Der TLS bietet eine ideale Ergänzung zu den vielerorts verfügbaren ALS, da er genau die besonders steilen Bereiche erfasst, die mittels einem Airborne Laserscanning nicht erfasst werden. Gegenüber der Erfassung mittels UAV entfällt beim TLS die Notwendigkeit für ein aufwendiges Inertialsystem (IMU) und eine entsprechend komplexe Scannerdatenauswertung. Für die Kartierung von Lithologien ist Farbinformation notwen-



Abbildung 8: Kleinräumige lithologische und strukturgeologische Wechsel. (A und B) migmatitischer Orthogneis und Amphibolit, (C) biotitreicher Granitaneis mit Boudins aus Amphibolit, (D) variszische Scherzone mit dextralem Schersinn (Melzner, 2019).

Figure 8: Small-scale lithological and structural geological changes. (A and B) migmatitic orthogneiss and amphibolite, (C) biotite-rich granite gneiss with boudins of amphibolite, (D) Variscan shear zone with dextral shear sense (Melzner, 2019).

dig. Im Falle der LIDAR Daten wird eine interne oder externe Digitalkamera für die Kodierung der Punktwolke mit Farbinformation benötigt, während die photogrammetrischen Punktwolken aus Farbbildern abgeleitet werden, mit den entsprechenden Einschränkungen photogrammetrischer Punktwolken (Durchdringung, geometrische Schärfen).

Die Filterung der Vegetation aus der Punktwolke wurde mittels der Open Source Software Cloud Compare (Brodu & Lague, 2012) durchgeführt, da diese Software im akademischen Bereich weit verbreitet ist und einen Quasistandard an den Unis darstellt. Die Filterung/Klassifizierung von Punktwolken ist im Allgemeinen sehr zeitaufwändig, insbesondere bei komplexer Topografie in Kombination mit dichter Vegetation und großen Datenlücken aufgrund von Abdeckungen (v.a. bei TSL vom Boden aus). Die Erzeugung eines qualitativen DHMs oder Meshs erfolgt in Cloud Compare (CC) mit Hilfe von Klassifizierungstools und einer Minimumfunktion (zur Identifikation der geringsten Höhe). Diese Vorgangsweise muss aber als nicht zufriedenstellend bezeichnet werden, da eine eindeutige Detektion des festen Untergrundes zumeist nicht möglich ist und dies in weiterer Folge eine manuelle Nachbearbeitung der Punktwolke erforderlich macht.

Die geologischen Auswertungen der LIDAR Daten wurden mit der Software Coltop (Jaboyedoff et al., 2007) durchgeführt. ShapeMetrix verfügt über eine sehr übersichtliche Benutzeroberfläche, mit der die 3D-Bilder strukturell einfach ausgewertet werden können. Besonders für die Überblickskartierung von dominanten Strukturen bzw. die Abgrenzung von strukturgeologischen Homogenbereichen ist diese Methodik besonders geeignet.

Beispiel 3: Auswertung geodätisches Festpunktnetz BEV und ALS Daten- Geologische Situation "Hart auf Weich"

Ziel der Bearbeitung war die Entwicklung einer multidisziplinären Bearbeitungsstrategie, um die geologische und geotechnische Grunddisposition am Plassen hinsichtlich des räumlich-zeitlich variablen Drift-, Rutsch- und Felssturzpotentials zu untersuchen.

Die Bearbeitungsstrategie beinhaltete Geländekartierungen, Probennahmen und Laboranalysen zwecks Bestimmung von Bodenkennwerten in aktiven Prozessbereichen, Kartierung der Lithologie und Beurteilung von Tiefenstrukturen mittels geophysikalischer Erkundungsmethoden (Aerogeophysik und Geoelektrik), Bestimmung relativer Bewegungsraten durch Präzisionsmaßbandmessungen, Bestimmung absoluter Bewegungsraten mittels geodätischer Vermessung, Ereignisdokumentation mittels Fotomonitoring, Kartierung und Zeugenbefragung (Melzner et al., 2017).

Der Plassen liegt als spröde Deckplatte aus Plassenkalk fast zur Gänze diskordant auf einem überwiegend weichen Sockel. Die im Wesentlichen durch das mechanische System "Hart auf Weich" verursachte plastische Deformation des Untergrundes und die laterale Driftbewegung führen zur Ausbildung markanter Bruchstrukturen in der spröden Deckplatte mit einer starken Zerlegung des Plassenkalks (Abb. 9). Die südexponierten Einhänge des Plassens weisen ein hohes Felssturz- bis Bergsturzpotential und die ostexponierten Einhänge ein großes Rutschungspotential auf. Eine relativ hohe Steinschlagaktivität ist quasi im gesamten Plassen Massiv vorhanden.

Die absoluten Bewegungsmessungen mittels geodätischer Festpunktvermessung zeigen (Abb. 10), dass die Bewegungen der Festpunkte



Abbildung 9: Bestimmung der Versagensmechanismen auf Basis strukturgeologischer und lithologischer Erhebungen im Gelände und auf Basis von ALS Daten (Melzner, 2016).

Figure 9: Determination of failure mechanisms based on structural geological and lithological conditions in the field and on the basis of ALS data (Melzner, 2016).

am Plassen/Lahngangkogel und der Wasserberg-Scholle teilweise bis mehrere Meter in den entsprechenden Messzeiträumen (vgl. Otter et al. 2017) betragen.

Die räumliche Ausrichtung der "Wasserberg-Scholle" (Abb. 9) und einer (rezenten) Abrisskante im darunterliegenden Bereich kennzeichnen eine Bewegungsrichtung nach NE (Abb. 10), was hinsichtlich einer Abschätzung eines potentiellen Geschiebeeintrags in den Mühlbach relevant sein könnte.

Auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse hinsichtlich potentiell instabiler Bereiche könnte ein punktuelles Monitoringsystem an neuralgischen Punkten implementiert werden, das kontinuierlich Daten aufzeichnet und automatisch verschickt. Für ein Monitoring mittels einer Terrestrial Laserscan Vermessung wäre die Einrichtung eines übergeordneten Bezugsystems sehr zu empfehlen (dies wurde von Götz, J. et al., Uni Salzburg, bei TLS Messungen Plassen verabsäumt). Hierzu ist eine detaillierte Planung von Scan- und Reflektor Standpunkten unter Berücksichtigung geologischer (z.B. bewegte Bereiche) und geodätischer Aspekte einer Netzplanung (Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Geometrie, Messmittel, Sichtverbindung) notwendig, um signifikante geometrische Veränderungen (Bewegungsraten, Kubaturen) langfristig detektieren zu können.



Abbildung 10: Bestimmung von Bewegungsraten anhand der Auswertung der Festpunkte des BEV (Otter et al., 2017). Figure 10: Determination of movement rates based on the evaluation of the control points of the BEV (Otter et al., 2017). seite 250

Ziel der Bearbeitung war die Modellierung einer Einzelbaumwaldkarte, um sie als Input für eine Steinschlagmodellierung zu verwenden.

Mithilfe der Software FINT ("Find individual trees", Dorren, 2014) wurde eine Einzelbaum-Waldkarte erstellt. FINT errechnet die Baumposition der dominanten und "co-dominanten" Bäume über ein moving window mit lokaler Maximumabfrage (15m Suchradius) des nDOM (normalisierten digitalen Oberflächenmodells). Der verwendete Laserscann wurde "leaf off" (winterkahl) gescannt, weshalb im Bereich der Laubbäume eine sehr heterogene Pixelverteilung (= starkes Rauschen) zu verzeichnen ist (Abb. 11).

Das Ergebnis der Modellierung mit dem nDOM zeigt eine realitätsnahe Abbildung der Nadelbäume (links) und eine unrealistische Abbildung der Laubbäume (rechts) mit zahlreichen Spitzen pro Baum. Dadurch wurde eine viel zu große Anzahl an Laubbäumen mit fragwürdigen Positionen modelliert, während die Nadelbaumanzahl und -positionen weitgehend zufriedenstellend waren (Melzner und Schwarz, 2019).



Abbildung 11: Modellierung einer Einzelbaumwaldkarte mittels Fint. Nadelbäume (links) und Laubbäume (rechts) (Melzner und Schwarz, 2019).

Figure 11: Modelling of a single-tree forest map using Fint. Conifers (left) and deciduous trees (right) (Melzner und Schwarz, 2019).



Abbildung 12: Mit Gauss`schem Tiefpassfilter (5x) geglättetes nDOM (1m) des Testgebietes, welches für die Modeliierung der Laubbäume (rechts) verwendet wurde. Rote Punkte = modellierte Baumpositionen (Melzner und Schwarz, 2019).

Figure 12: Gaussian low-pass filter (5x) smoothed nDOM (1m) of the study area used to model the broadleaf trees (right). Red dots = modelled tree positions (Melzner und Schwarz, 2019).

Dieser Herausforderung wurde nun dadurch begegnet, indem in einem Testgebiet auf das nDOM verschiedene Glättungsfilter (Mean-Filter, Tiefpassfilter) angewandt wurden (Abb. 12). Die Qualität der Filterungen wurde über Anzahl und Position der modellierten Bäume sowie die Realitätsnähe der Baumformen bewertet. Diese Berechnungen wurden für diese Baumartengruppen getrennt durchgeführt. Durch diese Maßnahmen konnte das Ergebnis v.a. im Laubwald noch deutlich verbessert werden.

Dieses Beispiel zeigt deutlich den Einfluss, den die Auslegung der Messkampagne auf die Nutzbarkeit des Ergebnisses hat.

Die Befliegung zur laubfreien Zeit hat einen erheblichen Einfluss auf die Charakteristik der resultierenden Punktewolke und die daraus abgeleiteten Produkte wie DHM oder DOM. Dadurch entsteht auch ein erheblicher Einfluss auf erforderliche Prozessierung und die ableitbaren Aussagen.

Um vergleichbare Resultate im Laubwald zu erhalten, wäre entweder der Befliegungszeitpunkt anders zu wählen oder bei der Berechnung des DOM durch Änderung der Berechnungsparameter bereits auf die spätere Nutzung Rücksicht zu nehmen gewesen.

Beide Alternativen sind im Hinblick auf den jeweiligen Verwendungszweck sorgfältig zu hinterfragen. So ist z.B. eine Befliegung während der Vegetationsperiode für die Erstellung der Einzelbaumwaldkarte vorteilhaft, jedoch sind die Daten für andere Auswertungen (z.B.: Bodenmodelle, etc.) erheblich schlechter geeignet. Eine Neuberechnung des DOM für die Anwendung wäre ein guter Kompromiss, setzt allerdings die Verfügbarkeit der (klassifizierten) Punktwolke voraus, sodass der DOM Raster neu abgeleitet werden kann. Die in diesem Fallbeispiel erforderlichen Nachbearbeitungen des DOM bergen im Gegensatz zu einer von vornherein angepassten Berechnung die Gefahr, sich durch die erforderlichen Ableitungen aus einem bereits abgeleiteten Produkt zu weit von den tatsächlichen Messwerten zu entfernen, sodass die gewonnenen Aussagen keinen ausreichenden Realitätsbezug mehr aufweisen. Ein unkonventioneller Ansatz wäre die Nutzung eines DOM Rasters aus photogrammetrischen Bildmatchingdaten. Durch die spezielle Charakteristik dieser Daten könnte der Analysealgorithmus der Software unterstützt werden. (ob der Ansatz durchführbar ist, müsste durch entsprechende Versuche noch verifiziert werden).

Qualitätsbewertung von den Fernerkundungsdaten

Die Qualität von Daten/Inventaren/Katalogen ist abhängig von: (i) den Gebietseigenschaften des Untersuchungsgebiets (z. B. Topografie, Geologie, Landnutzung, Waldbedeckung), (ii) der Genauigkeit der Basisdaten und thematischen Karten, (iii) den angewandten Methoden und Techniken, (iv) der/den Informationsquelle(n), (v) der für die Untersuchung zur Verfügung stehenden Zeit, (vi) der Erfahrung der Bearbeiter und (vii) den verfügbaren menschlichen, technischen und wirtschaftlichen Ressourcen (Melzner at al., 2020, Melzner et al., 2019).

1. LIDAR Punktwolken:

Die fragestellungsorientierte Eignung von Daten unterschiedlicher Fernerkundungsmethoden kann unter der Berücksichtigung der folgenden Kriterien bei LIDAR Daten erfolgen: (i) Datendichte/ Punktdichte/Abdeckungsgrad, (ii) Klassifizierung und Filterung der Daten/Punktwolke und (iii) Datenkonvertierung (Melzner und Schwarz, 2019) und Aufnahmezeitpunkt.

Die unterschiedliche Aufnahmemethodik hat einen Einfluss auf den Abdeckungsgrad der Daten (Abb. 13): Bei der statischen TLS-Vermessung werden vor allem die Felswände und die den Scanner umgebenden Bereiche und



Abbildung 13: Definition von Qualitätskriterien von Fernerkundungsdaten. Abdeckungsgrad von gefilterten LIDAR Daten, die mittels (A) TLS (statisch), (B) ALS (UAV) und (C) ALS (Flugzeug) erhoben wurden (Melzner und Schwarz, 2019).

Figure 13: Definition of quality criteria of remote sensing data. Coverage of filtered LIDAR data collected with (A) TLS (static), (B) ALS (UAV) and (C) ALS (airplane) (Melzner and Schwarz, 2019).

weniger die flacheren Hangbereiche erfasst, bei der LIDAR-Vermessung mittels UAV werden die Felswände und flachere Hangbereiche gleichermaßen abgedeckt und bei der ALS-Vermessung sind vorwiegend die flacheren Hänge und kaum die Felswände erfasst worden.

Aufnahmerichtung, Hangneigung, Exposition, Scanschatten, Anzahl der Scanner Positionen oder Distanz zum Scanner bedingen die Charakteristiken der LIDAR-Punktwolke, wie z.B. Punktverteilung und Punktdichte, die einen direkten Einfluss auf die Qualität der daraus abgeleiteten Aussage haben (Schiller & Melzner, 2017).

2. Photogrammetrie, Fotorealistische 3D Modelle:

Bei der photogrammetrischen Vermessung können mittels der (i) Formgenauigkeit und (ii) Verortungsgenauigkeit (Abb. 14) Aussagen über die Güte der Daten hinsichtlich eines Verwendungszwecks getroffen werden (Melzner und Schwarz, 2019, Melzner et al. 2019). Für die geologische Auswertung ist die Auflösung der Bilder (.jpg) besonders interessant, da kleinräumige lithologische Wechsel und engständige Trennflächenscharen identifiziert werden können. In diesem Projekt liegt die Bildauflösung bei 0,6 x 1.8 cm/Pixel, eine Erhöhung der Auflösung würde eine bedeutend höhere Rechnerleistung und Anforderung an die Graphikkarte bedingen.

In exponierten Geländen oder bei ungünstigen Flugbedingungen können Sichtlücken oder verzerrte Bereiche in den 3D Modellen auftreten (Abb. 14). Solche Lücken entstehen durch abgeschattete Bereiche, in denen die Oberflächenpunkte nicht in zumindest 2 Bildern identifiziert werden können und daher keine 3D Rekonstruktion erfolgt. Eine radiometrische Korrektur der Belichtung kann die Bildqualität verbessern, wenn nicht bei optimalen Lichtverhältnissen (z.B. starke Lichtkontraste bei Sonnenschein) geflogen wurde. Aufnahmezeitpunkt und Vegetationsperiode sind hinsichtlich der Fragestellung ebenfalls von Bedeutung. Beispielsweise kann bei einer Befliegung um die Mittagszeit aufgrund von fehlendem Schattenwurf die Auswertbarkeit der Bilder für bestimmte Objekte (Baumstandorte) eingeschränkt sein.



Abbildung 14: Formgenauigkeit (links) und Verortungsgenauigkeit (rechts) photogrammetrisch erhobener Daten (Melzner und Schwarz, 2019).

Figure 14: Shape accuracy (left) and location accuracy (right) of photogrammetrically collected data (Melzner and Schwarz, 2019).

Der Erstellung einer Punktwolke aus fotogrammetrischen Aufnahmen ist eine Ableitung aus 2D-Fotos. Hinzu kommt, dass im Gegensatz zum Laserscanner, der durch die Vegetationsbedeckung hindurch messen kann, bei der Photogrammmetrie nur die sichtbare Oberfläche aufgenommen wird. Unter der Vegetation bzw. abdeckenden Objekten existieren also keine Daten und würden bei der Filterung als Datenlöcher in der Punktwolke erscheinen. Generell ist eine Klassifizierung von Punktwolken aus Bildmatching Verfahren in natürlichem Gelände im Vergleich zu LIDAR Daten aufgrund der geringeren geometrischen Tiefe problematisch. Der optische Eindruck bei der Photogrammetrie ist jedoch sehr gut, daher lassen sich Bildinhalte sehr gut erkennen. Hinsichtlich der Formgenauigkeit und des Verwendungszwecks, z.B. Generierung eines Oberflächenmodells für die Reichweitenmodellierung, kann diese Methode nur bedingt verwendet werden.

3. Digitale Oberflächenmodelle:

Vorhandene digitale Oberflächenmodelle liegen oft in Form eines Rasterdatensatzes vor. Dabei ist zu beachten, dass ein Rasterelement immer nur einen Höhenwert haben kann. Speziell in steilem Gelände kann es dadurch zu erheblichen Differenzen zwischen dem berechneten Raster und den aufgenommenen Rohdaten kommen.

Die Konvertierung der Punktwolken in Raster hat gezeigt, dass die aus den ALS-, UAVund der kompilierten ALS-TLS-Punktwolke generierten Rasterdaten ähnlich sind, während jenes der TLS Punktwolke sich deutlich von diesen unterscheidet. Bei der Rasterbildung werden aufgrund der Horizontalprojektion steile Felswände

bzw. Überhänge nur auf ganz wenige Pixel komprimiert, sodass die Seehöhen in diesen Bereichen stark vereinfacht oder mitunter falsch (bei Überhängen) sind. Die Seehöhendifferenzen der DTM-Raster zeigen große Unterschiede zwischen TLS und den anderen Laserscan-Produkten (v.a. ALS), welche v.a. in Bereichen von großen Abschattungen und somit geringen Punktdichten im TLS (v.a. am Oberhang) auftreten. Die Unterschiede bleiben auch in den unterschiedlichen Auflösungen ähnlich hoch. Der ALS-, UAV- und der kompilierte Raster sind hingegen ähnlich, da ja die Horizontalprojektion des Rasters unsichere Bereiche im ALS (steile Wände) komprimiert. Große Unterschiede gibt es zwischen ALS-Raster und den anderen Laserscan-Produkten lokal im Bereich von Steilwänden und v.a. Überhängen. Daher ist in Steil- und Überhängen der ALS (Raster) für die Modellierung z.T. ungenügend und muss durch ergänzende Informationen gestützt werden. Weitere Unterschiede zwischen ALSund UAV-Raster sind v.a. auf die dort geringere Punktdichte im ALS zurückzuführen.

Die Veränderung der Auflösung der Raster mittels unterschiedlicher Berechnungsalgorithmen hat gezeigt, dass es mit zunehmender Mittelwert-Aggregierung in immer gröberen Auflösungen hinsichtlich der Hangneigung v.a. im steilen Ablösebereich zu massiven Veränderungen kommt, indem die steilen Hangbereiche stark geglättet werden (Abb. 15). Durch die Maximum-Aggregierung kommt es bei der Hangneigung und Seehöhe gegenüber dem jeweiligen Mittelwertaggregierten Raster in gleicher Auflösung zu einer ca. pixelbreiten Verschiebung des Kartenbildes in Richtung Tal, bei der Minimum-Aggregierung in Richtung hangaufwärts.



Abbildung 15: Vergleich der Hillshades und der Hangneigung eines TLS-Raster mit fortlaufender Mittelwert-Aggregierung: (A) mit 0,25m, (B) 0,5m, (C) 1m, (D) 2m und (E) 5m Auflösung (Melzner und Schwarz, 2019).

Figure 15: Comparison of the hillshades and the gradient of a TLS-pattern with continuous average aggregations: (A) with 0,25m, (B) 0,5m, (C) 1m, (D) 2m und (E) 5m resolution (Melzner and Schwarz, 2019).

Bei der Nutzung bestehender Modelle als Raster sind daher die genannten Effekte hinsichtlich ihrer Auswirkung auf das gewünschte Untersuchungsthema zu überprüfen. Speziell bei der weiteren Bearbeitung des Rasters ist zu bedenken, dass es sich dabei bereits um eine Ableitung aus den originalen Messdaten handelt und dadurch die Gefahr besteht, sich zu weit von der Realität zu entfernen. Empfehlenswert ist in den meisten Fällen die ergänzende Nutzung von originalen LIDAR Messdaten um einerseits Problemstellen im Raster zu erkennen und bearbeiten zu können und andererseits kann es sinnvoll sein, ein Rastermodell mit angepassten Parametern komplett neu abzuleiten, anstatt das bestehende Modell weiter zu überarbeiten.

Fazit

Der Einsatz von Laserscan und Photogrammmetrie bietet gegenüber der konventionellen Vermessung und/oder geologischen Kartierung viele Möglichkeiten:

- Flächendetaillierte 3D Infos zeiteffektiv erfassbar
- Generalisierung vor Ort entfällt, daher universelle Auswertemöglichkeiten
- TLS bietet eine ideale Ergänzung zu den vielerorts verfügbaren Airbornelaserdaten
- Deformationen der Oberfläche (Volumenverschiebungen) sind mittels Laserscanner-Messung detaillierter erfassbar, als durch die Messung diskreter Punkte mittels Tachymeter;

- Gegenüber mobiler- oder airborne-Erfassung (UAV) entfällt bei statischem TLS die Notwendigkeit für ein aufwendiges Inertialsystem (IMU) und eine entsprechend komplexe Scanner-Datenauswertung. Damit steigt auch die Zuverlässigkeit der
- In bewachsenen Bereichen bietet der Scan in vielen Fällen Vorteile gegenüber anderen Messmethoden, da durch die hohe Punktdichte eine relativ hohe Durchdringungswahrscheinlichkeit besteht. Photogrammetrisch ist dies kaum möglich. Klassische Messysteme nur mit hohem Aufwand für Einzelpunktmessungen.

Geometriedaten.

- Für die Vermessung ist ein Aufenthalt im unmittelbaren Zielgebiet nicht zwingend erforderlich (relevant bei akuter Gefährdung, z.B. durch Steinschlag/Felssturz).
- Die statische TLS-Vermessungsmethodik ist sehr gut für die Vermessung von Felswänden geeignet, da die Bearbeiter hinsichtlich flugtechnischer Aspekte unter keinem Zeitdruck stehen. Es ist schwierig, den IMU auch bei sehr langsamen Geschwindigkeiten des Fluggerätes auszugleichen.
- Bei Generierung eines hochqualitativen DTMs oder Meshs für die Reichweitensimulation wird daher die Kombination von ALS- und TLS-Punktwolke empfohlen, wobei im Vorfeld Lagedifferenzen zwischen beiden Punktwolken über eine entsprechende Transformation eliminiert werden müssen.
- Für die Unterstützung der Geländekartierungen eignet sich besonders die

photogrammetrische Software wie z.B. ShapeMetrix, da sie leicht anwendbar ist und die 3D-Daten einen guten Überblick über die geologische Situation bieten.

- Um einen Felswandbereich hinreichend zu erfassen, könnten zwei Flugkampagnen durchgeführt werden, bei denen einmal der Scanner nach unten und einmal schräg in Richtung der Felswände ausgerichtet wird.
- Die fotorealistischen 3D-Modelle kann man prinzipiell auch mit Laserdaten kombiniert erstellen. Technisch ist dies nichts anderes als ein texturiertes regelmäßiges 3D-Mesh.
- Die Aufnahmemethodik hat einen entscheidenden Einfluss auf den Abdeckungsgrad der Daten: bei der statischen TLS-Vermessung werden vor allem die Felswände und die den Scanner umgebenden Bereiche und weniger die flacheren Hangbereiche erfasst, bei der LIDAR-Vermessung mittels UAV werden die Felswände und flachere Hangbereiche gleichermaßen abgedeckt und bei der ALS-Vermessung aus bemannten Fluggeräten sind vorwiegend die flacheren Hänge und kaum die Felswände erfasst worden.

Folgende Faktoren sind zu beachten:

 Die Aufnahmekonfiguration ist in vielen Fällen fehlertheoretisch ungünstig mit sehr entfernten Zielobjekten und relativ nahen gemessenen Bezugspunkten (z.B. bei steilen Talflanken). Eine entsprechend sorgfältige Planung der absoluten und der relativen Georeferenzierung mit der Vernetzung mehrerer Standpunkte und gemeinsamem Multistations-Ausgleich ist daher Grundvoraussetzung für einen homogenen Datensatz.

- Die Realisierung eines übergeordneten Bezugssystems erfordert oft zusätzliche Messungen mit anderen Messmethoden (GPS, Tachymeter).
- Die Kalibrierung der Geräte ist entfernungsabhängig, die Kalibrierung der eingesetzten Scanner ist daher entsprechend der Aufnahmesituation zu prüfen und ggf. anzupassen.
- Die Gebietseigenschaften beeinflussen die Qualität des Messergebnisses (Feuchteverhältnisse der Oberflächen, Sonneneinstrahlung, Bewuchs, Topologie). Dies kann sogar dazu führen, dass ein Scan der Oberfläche unmöglich wird, da die Reflektivität des Objektes nicht ausreichend ist.
- Beim Scannen werden alle Objekte im Zielgebiet erfasst. Eine Prozessierung inkl. Klassifizierung der Punktwolke in Landnutzungsklassen ist erforderlich. Speziell in Steilwänden sind hier spezielle Methoden und kommerzielle Software notwendig.
- Nicht für alle Fragestellungen sind 3D-Punkte und interpolierte 3D-Modelle die beste Datengrundlage (z.B.: Erfassung genauer Bewegungsrichtungen signalisierter Einzelpunkte.). Hier liefern Ergänzungsmessungen mit klassischen Messmethoden oft die zuverlässigeren Ergebnisse.
- Das Klassifizieren von LIDAR Punktwolken/ Entfernen von Vegetation ist schwie-

rig, Standardprozesse liefern oft keine ausreichenden oder sogar fehlerhafte Ergebnisse. Mit nicht-kommerzieller Software (z.B. Cloud Compare) ist der Prozess sehr zeitaufwendig, da vorwiegend manuelle Bearbeitung erforderlich ist.

- Mittels der Software FINT konnte eine Waldkarte erzeugt werden, die im Nadelwald recht gute Ergebnisse zeigt, im Misch- und Laubwald jedoch trotz Verbesserung mittels Filterungen nur als zufriedenstellend bis z.T. fragwürdig angesehen werden muss. Letzteres liegt an den leaf-off gescannten ALS-Daten, mit denen aufgrund ihrer extrem heterogenen und unrealistischen Pixelverteilung wohl keine bessere Karte hergestellt werden kann.
- Neben der Aufnahmemethodik spielen auch Aufnahmedatum und Umgebungsbedingungen eine große Rolle für die Aussagekraft von Ergebnissen.
- Bei der Nutzung vorgefertigter abgeleiteter Datensätze (Bildmatching Punktewolken, DOM, DHM Raster) sind die Vorgaben der Ableitung zu berücksichtigen. Oftmals kann es sinnvoller sein, für andere Anwendungen die Datensätze aus den Original-Messdaten neu abzuleiten, als die bestehenden Daten weiter zu überarbeiten.
- Für die strukturelle Kartierung stellt die Fernerkundung eher eine konservative Methodik dar, da kleinräumige lithologische oder strukturelle Wechsel mit dieser Methodik schwer/nicht erfasst werden können und somit Kluftkörpergrößen beispielsweise überschätzt werden.

Danksagung

Die Daten und Untersuchungen wurden im Rahmen des Schwerpunktprogramms GEORIOS der Geologischen Bundesanstalt Österreich (GBA) und dem NoeTALUS Projekt (Auftraggeber NÖ Landesregierung) durchgeführt. Die Autoren danken allen Projektpartnern und Personen, die diese Untersuchungen unterstützt bzw. durchgeführt haben: Leonhard Schwarz, Filippo Vecchiotti und Michael Lotter (GBA); Jürgen Otter und Erich Imrek (BEV); Alexander Preh und Emanouil Fleris (TU Wien); Joachim Schweigl, Michael Bertagnoli, Gerhard Pfahler und Boris Stummer (Amt der Niederösterreichischen Landesregierung), Hannes Polt, Peter Muschawek und Philipp Amon (Firma Riegl GmbH); Andreas Gaich (3GSM GmbH); den Kollegen der WLV GBL Bad Ischl und den Gemeinden Hallstatt und Dürnstein.

Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

Dipl. Geogr. Sandra Melzner GEOCHANGE Consulting Ingenieurbüro, Technische Geologie Eppensteinerstrasse 4, Top 4, 9020 Klagenfurt www.geochange-consulting.com office@geochange-consulting.com

DI Gregor Schiller Vermessung Schmid ZT GmbH Inkustraße 1-7, 3400 Klosterneuburg www.geoserve.co.at g.schiller@geoserve.co.at

Literatur/References:

BRODU, N, LAGUE, D. (2012).

3D terrestrial lida data classification of complex natural scenes using a multiscale dimensionality criterion: applications in geomorphology. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 68, 121–134, Amsterdam. DORREN, L.K.A. (2014). FINT- Find individual trees. User manual. EcorisQ paper.

GAICH, A. (2018). Bericht über ShapeMetrix UAV, Befliegung und 3D Modell Dürnstein, November 2018, Graz.

JABOYEDOFF, M., METZGER, R., OPPIKOFER, T., COUTURE, R., DER-RON, M.-H., LOCAT, J., TURMEL, D, (2007).

New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. – In: EBERHARDT, E., STEAD, D. & MORRISON, T. (Eds.): Rock mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands, Volume 1, 61–68, Vancouver (Taylor & Francis).

MELZNER, S., ROSSI., M., GUZZETTI, F. (2020). Impact of mapping strategies on frequency -size distributions. Journal of Engineering Geology 272.

MELZNER, S. SHTOBER- ZISU, N., KATZ, O., WITTENBERG, L. (2019). Brief communication: Post- wildfire rockfall risk in the eastern Alps. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 19, 2879–2885, https://doi.org/10.5194/nhess-19-2879-2019, 2019.

MELZNER, S. (2019).

Forschungsprojekt NoeTALUS- Gefahrenmodellierung von Sturzprozessen in Niederösterreich. Bericht zu AP 1.2: Geologische Detailkartierung im Göhler Deckensystem, Gemeindegebiet Dürnstein.-Unveröffentlichter NoeTALUS Bericht, 110 S., GBA, Wien.

MELZNER, S., SCHWARZ, L. (2019).

Forschungsprojekt NoeTALUS- Gefahrenmodellierung von Sturzprozessen in Niederösterreich. Bericht zu AP 1.2: Vergleich unterschiedlicher Fernerkundungsmethoden auf der Hangskala, Gemeindegebiet Dürnstein.-Unveröffentlichter NoeTALUS Bericht, 85 S., GBA, Wien.

MELZNER, S., PREH, A., SCHWARZ, L., FLERIS, E., SCHWEIGL, J., BER-TAGNOLI, M. (2019).

Strukturelle Kartierung mittels Fernerkundung- eine kritische Gegenüberstellung von Photogrammetrie, TLS und ALS, 5:203-210. In: Griesmeier, G.E.U., Igleseder, C. (Hrsg.). Arbeitstagung 2019 der GBA Geologie des Kartenblattes GK25 Radenthein-Ost, Murau 24.-27. Juni 2019, Tagungsband: 126-131, Wien.

MELZNER S., MOSER, M., OTTOWITZ, D., OTTER, J., LOTTER, M., MOTSCHKA, K., MINREK, E., WIMMER-REY, I. (2017). Multidisziplinäre Grundlagenerhebung als Basis für die Implementierung eines Monitoringsystems am Plassen. In: Wimmer- Frey, I., Römer, A., Janda, C. (Hrsg.). Arbeitstagung 2017- Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 140-146, Wien.

MELZNER S., (2017).

Exkursion 2A (21.06.2017) Rutschungs- und Felssturzpotential am Plassen. In: Wimmer- Frey, I., Römer, A., Janda, C. (Hrsg.). Arbeitstagung 2017-Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 147-152, Wien.

MELZNER, S. (2017): Challenges in rock fall hazard zoning in Austria, Rocexs- Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection 2017, Barcelona, Spanien.

MELZNER S., DOWD C., SCHILLER G., KOCIU A. (2013). The use of TLS and ALS data for engineering geological mapping in a narrow alpine valley. Posterpräsentation, Umhausen, 16.-18. Oktober 2018, Umhausen Tirol.

OTTER J., IMREK, E., MELZNER S., (2017). Geodätische Grundlagenvermessung als Werkzeug in der Naturgefahren. In: Wimmer- Frey, I., Römer, A., Janda, C. (Hrsg.). Arbeitstagung 2017-Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 147-152, Wien.

SCHILLER, G., MELZNER, S. (2017). Multidisziplinäre Grundlagenerhebung als Basis für die Implementierung eines Monitoringsystems am Plassen. In: Wimmer- Frey, I., Römer, A., Janda, C. (Hrsg.). Arbeitstagung 2017- Angewandte Geowissenschaften an der GBA, 126-131, Wien.