

Zu Lande, Untertage und aus der Luft – Photogrammetrische Ansätze zur geologischen Trennflächenanalyse

Michael Mett¹, Jérôme Steinkühler¹

¹Dibit Messtechnik GmbH, Framsweg 16, 6020 Innsbruck

Abstract

Photogrammetric methods enable the three-dimensional measurement of geological outcrops with high accuracy and spatial / temporal resolution. Particularly in the case of temporary outcrops, the fast and relatively inexpensive methods are useful to measure geologically and geomechanically relevant structural information. These include e.g. blasts when building a new tunnel, active quarry work or acute events, such as rock falls or mudflows. Drone-based systems can also be used in poorly accessible or even dangerous conditions, which previously could only be accomplished with great expenditure of time and personnel, or incompletely.

The present paper describes innovative recording and analysis methods for areas of application in tunneling, civil engineering and mining. In addition to technical aspects, spatial resolutions and accuracies are described, as well as the practicability for various geological and geotechnical investigations.

Zusammenfassung

Photogrammetrische Verfahren ermöglichen die dreidimensionale Messung geologischer Aufschlüsse mit einer hohen Genauigkeit und räumlich-/zeitlicher Auflösung. Insbesondere bei temporären Aufschlüssen bieten sich die schnellen und mit relativ geringem Aufwand anzuwendenden Methoden an, geologisch-, geomechanisch relevante Gefügeinformationen zu erheben. Dazu gehören z.B. Abschlüsse beim Tunnelneubau, aktive Steinbrucharbeiten oder akute Ereignisse, wie Felsstürze oder Muren. Drohnengestützte Systeme können überdies bei schlecht zugänglichen oder gar gefährlichen Verhältnissen eingesetzt werden, die vormals nur mit einem hohen zeitlichen und personellen Aufwand, bzw. unvollständig zu bewältigen waren.

Die vorliegende Arbeit beschreibt innovative Aufnahme- und Analysemethoden für Anwendungsgebiete im Tunnelbau, Bau- und Bergwesen. Neben technischen Aspekten werden räumlichen Auflösungen und Genauigkeiten beschrieben, sowie die Praktikabilität für verschiedene geologisch-, geotechnische Untersuchungen.

1. Photogrammetrie und Videogrammetrie

1.1 Photogrammetrie

Photogrammetrie bezeichnet die Messung geometrischer Eigenschaften von Objekten aus photographischen Aufnahmen. Der Begriff stammt aus dem Griechischen und bedeutet so viel wie „das Messen von Lichtlinien“ (Schindler, 2011).

Für die photogrammetrische 3D-Rekonstruktion wird das zu untersuchende Objekt mehrfach von unterschiedlichen Aufnahmestandorten mit sich überlappenden Messphotos aufgenommen. Neben handelsüblichen Digitalkameras werden Drohnen-basierte Aufnahmesysteme, Industriekameras und Videoaufzeichnungen verwendet.

Während der photogrammetrischen Berechnung ist es möglich, die Lage der Fotos zu rekonstruieren und mit Hilfe bekannter Aufnahmeparameter die räumlichen Koordinaten von Oberflächenpunkten zu berechnen. Der Hauptschritt zur photogrammetrischen Modellerstellung ist der sogenannte Bündelblockausgleich. In diesem werden die Bilder eines Blocks über Strahlenbündel miteinander verbunden (Abb. 01).

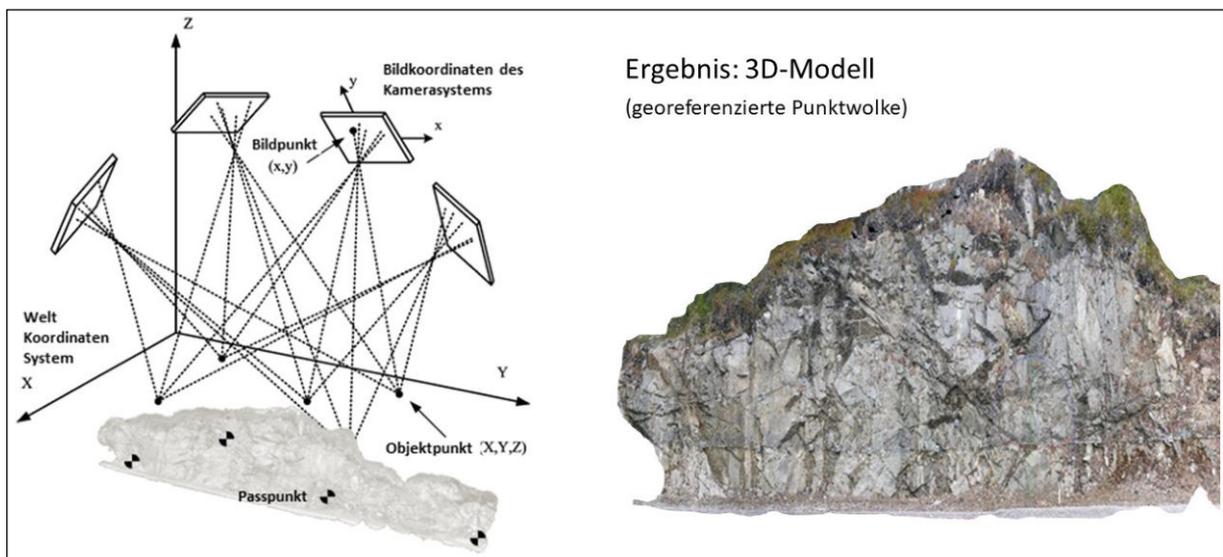


Abb. 01: Links: Schematische Darstellung einer photogrammetrischen Berechnung. Rechts zeigt das Resultat ein 3D-Modell (Punktwolke) einer etwa 10 m hohen Felswand, deren Oberfläche mit einem Schutzgitter gesichert ist.

Die Verknüpfung der Bilder untereinander erfolgt über Verknüpfungspunkte (tie points). Moderne Photogrammetrie-Softwares wie Agisoft Metashape, Photomodeler und Pix4D berechnen aus den Messphotos bereits die Aufnahmeparameter. Zu diesen gehören die (1) innere Orientierung der Kamera (Koordinaten des Bildhauptpunktes, Kammerkonstante), (2) die äußere Orientierung, d. h. lokale Position und Lage der Kamera während der Aufnahme in Relation zum aufgenommenen Objekt und (3) Verzeichnungscharakteristika des Objektivs (Mett, 2015).

Um die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion zu erhöhen können die Messkameras kalibriert werden, indem (1) und (3) in einem optischen Labor bestimmt werden. Die kalibrierten Kameraparameter fließen den o.g. Softwares für die 3D-Rekonstruktion zu. Die absolute Orientierung der 3D-Modelle, d.h. deren Verortung in ein übergeordnetes Koordinatensystem (=Georeferenzierung), geschieht abschließend mit Hilfe von

Passpunkten (Kalisch, 2009). Hierbei wird auf das 3D-Modell eine Rotation, Translation und Skalierung angewandt. Auf Basis der Georeferenzierung erlangen auch die einzelnen errechneten Bildpositionen globale Koordinaten.

Je nach verwendeter Prozessierungssoftware resultieren die 3D-Daten in Punktwolken und/oder Gitternetzmodellen. Punktwolken bestehen aus Einzelpunkten mit X-, Y- und Z-Koordinaten, denen zumeist RGB-Farbwerte zugeordnet sind. Gängige Formate sind z.B. LAS, ASCII, PLY oder e57. Gitternetzmodelle sind hingegen aus Netzelementen aufgebaut denen eine Fototextur als zusätzliche Information beigelegt ist.

1.2 Videogrammetrie

Videogrammetrische Messsysteme erfassen das Objekt nicht mit räumlich / (zeitlich) unterschiedlichen Einzelaufnahmen, sondern in Form einer (konstanten) Videoaufnahme. Dabei bewegt sich die Aufnahmeeinheit relativ zur aufzunehmenden Oberfläche. Aus dem Video werden einzelne Foto-Frames extrahiert, die im Anschluss photogrammetrisch ausgewertet werden. Die derzeit eingesetzten Videokameras besitzen eine geringere Pixel-Auflösung als gängige Fotokameras. So können in HD (High Definition) 1280 × 720 Pixel, in Full-HD 1920 × 1080 Pixel und in Ultra-HD (4K) 3840 × 2160 Pixel aufgenommen werden. Aufgrund der Aufnahmefrequenzen zwischen >100 (HD) und 30 Bildern pro Sekunde in 4K (GoPro5, 2020) werden hohe Bildüberlappungen erreicht, die eine detaillierte 3D-Rekonstruktion ermöglichen.

Neben vereinzelt Anwendungen in der 3D-Rekonstruktion von Kulturdenkmälern (Torresani & Remondino, 2019) und der Geländeaufnahme durch Drohnen, zeigt die Videogrammetrie insbesondere bei der Vermessung von TBM Ortsbrüsten Potential (s. 2.4).

2. Photogrammetrische Methoden für geologisch- / geotechnische Untersuchungen

2.1 Terrestrische Photogrammetrie

Die terrestrische, d.h. vom Boden ausgeführte, Photogrammetrie eignet sich besonders für Objekte mit einer wenig komplexen Geometrie, die umfänglich vom Aufnahmestandort einzusehen sind (Abb.02). Wie auch beim Laserscannen entstehen Datenlücken prinzipiell dort im 3D-Modell, wo der Sensor die zu messende Oberfläche nicht direkt einsehen kann, bzw. die Aufnahme in einem flachen Winkel zur Oberfläche erfolgt.



Abb. 02: Screenshot vom Ausschnitt eines 3D-Modells einer terrestrisch aufgenommenen Kiesgrube mit naturgetreuer Fototextur (die untere Seite misst etwa 40 m Länge). Es sind fluvatile Ablagerungsstrukturen zu erkennen, die in ihrer Mächtigkeit und Raumlage aus dem Modell herausgemessen werden können.

2.2 Photogrammetrie im zyklischen Tunnelbau

Im Tunnelneubau sind photogrammetrische Messsysteme vor allem aufgrund der rauen Betriebsbedingungen mit Schmutz, Feuchtigkeit, Staub und Aerosolen kaum vertreten. Es werden standardmäßig Laserscanner für die Vermessung von Ortsbrüsten und Laibungen eingesetzt. Diese generieren Graustufen-(Intensitäts)-Modelle der Oberfläche und sind daher nur eingeschränkt für die visuelle geologische Auswertung verwendbar. Die Dibit Messtechnik GmbH hat mit dem „Handheld“ ein robustes, auf die o.g. Bedingungen optimiertes photogrammetrisches Messsystem für den Tunnelneubau entwickelt (Abb. 03).

Als monoskopisches System enthält es eine einzelne hochauflösende Digitalkamera. Das Fischaugenobjektiv ermöglicht die Aufnahme großer Oberflächenbereiche um die Anzahl der Fotos (und damit die Aufnahmezeit) auf ein Minimum zu reduzieren. Das autark agierende, in einem robusten Aluminiumgehäuse verbaute System wird bei der Aufnahme vor Ort auf einem Stativ befestigt (Dibit, 2020). Während der Messung wird die Blickrichtung der Kamera von einer motorisierten Einheit gedreht. Es werden insgesamt 8 (oder 6 Fotos) für die photogrammetrische Rekonstruktion der Tunnellaibung benötigt (Eder et al., 2019). Für die zusätzliche Erfassung der Ortsbrust werden 2 weitere Fotos erstellt.

Die Prozessierung der Fotos und die Georeferenzierung der 3D-Modelle geschehen in der Software Dibit. Mit dem Handheld sind farbechte, hochauflösende 3D-Modelle mit einer Bildauflösung von 1 mm und einer geometrischen Genauigkeit von +/- 5 mm zu erstellen (Abb. 04). Die Aufnahmedauer beträgt maximal 2 min, wodurch der Baubetrieb nur sehr geringfügig beeinträchtigt wird.



Abb. 03: Handheld Tunnelscanner.



Abb. 04: 3D-Ortsbrustmodell aus Handheld-Scan.

2.3 Photogrammetrie - Drohne / UAV

Die luftbasierte Photogrammetrie mittels Drohnen bzw. UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) ist zu einem etablierten und sehr vielseitig einsetzbaren Instrument im Vermessungswesen und bei der Bearbeitung geotechnischer Fragestellungen geworden. Der Vorteil von UAVs liegt vor allem darin, große und geometrisch komplexe Objekte mit einem geringen zeitlichen, personellen und finanziellen Aufwand vermessen zu können. Dabei lassen sich hohe geometrische Auflösungen, Genauigkeiten und zeitliche Wiederholraten bei den Messungen erreichen. Bei flächigen Vermessungen mit relativ geringen

Höhenunterschieden (z.B. Schütthalden, Baustellen, etc.) können UAVs mittels spezieller Softwares zur Drohnenflugplanung automatisch betrieben werden.

Bei den Softwares werden die Flugbereiche, Flughöhen und gewünschten Bildüberlappungen vorgegeben. Flug und Fotoerstellung geschehen daraufhin automatisch auf einer rasterförmigen, streckenoptimierten Bahn über dem Objekt. Bei Objekten mit hoher vertikaler Erstreckung und bei geometrisch komplexen, schwer einsehbaren Körpern muss der UAV-Pilot manuell fliegen. Dabei obliegt es seiner Erfahrung, die richtigen Abstände zum Objekt und damit resultierenden Bildüberlappungen zu wählen. Je nach Fluggebiet, Art des UAV und max. Flughöhe sind entsprechende Flugerlaubnisse bei den zuständigen Flugbehörden einzuholen.

2.4 Videogrammetrie für den TBM Vortrieb

Die Firma 3GSM (Graz, Österreich) besitzt mit ShapeMetriX TBM ein System zur 3D-Dokumentation von Ortsbrüsten bei Vortrieben im Hartgestein mit einer TBM (Tunnel Bohr Maschine). Die Aufnahmeeinheit basiert im Wesentlichen auf der Kamera GoPro 5 (3GSM, 2020a) in Kombination mit einer aktiven Ausleuchtung der Ortsbrust. Das System wird in ein Mannloch der TBM eingespannt und nimmt während einer 360 Grad Drehung des Schneidkopfes die Ortsbrust auf (3GSM, 2020b). Dazu muss die TBM von der Ortsbrust zurückgefahren werden, was zumeist während der Wartungsschicht geschieht. Aufgrund des geringen Abstands zwischen Aufnahmeeinheit und Ortsbrust kann nicht die gesamte Fläche der Ortsbrust erfasst werden. Es entstehen ringförmige 3D Bilder (Abb. 05). Beim Vorhandensein mehrerer Mannlöcher können die aufnehmbaren Bereiche entsprechend ausgeweitet werden.

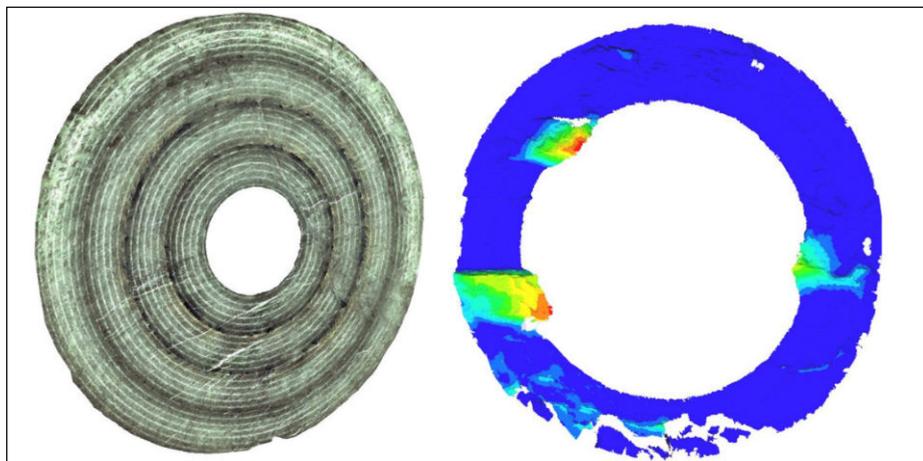


Abb. 05: Ringförmige 3D-Aufnahmen einer TBM Ortsbrust (3GSM, 2020b). Links: Zusammengefügtes 3D-Modell mit Fototextur. Rechts: Falschfarbendarstellung von geologisch bedingten Ausbrüchen (3GSM, 2020b).

3. Softwares zur Analyse geologisch relevanter Geometrieausprägungen

Auf dem Markt befinden sich diverse Softwareprodukte, mit denen geologische Gefüge analysiert werden können. Im Folgenden ist eine beschränkte Auswahl an gängigen Produkten genannt:

3.1 Photogrammetrie-Softwares

Photogrammetrie-Softwares wie Pix4D, Photomodeler und Agisoft Metashape berechnen vorrangig aus Einzelfotos, wie in 1.1 beschrieben, 3D-Modelle in Form von Punktwolken und (texturierten) Gitternetzmodellen. Sie bieten zusätzlich im geringen Umfang die Möglichkeiten zur Berechnung von geometrischen Eigenschaften, wie die Koordinaten von Einzelpunkten (X, Y, Z), Längen, Flächen und Volumen.

Beurteilung: Messung von Eingangsparametern für weitergehende Gefügeuntersuchungen (z.B. Erstellung von Stereoplots, s. 4.1). Einfache Strecken-, Volumen- und Flächenabschätzungen. Beschränkte Eignung für Ingenieursanwendungen.

3.2 Dibit

Die Software „Dibit“ der Firma Dibit Messtechnik GmbH ist eine Spezialsoftware für linienhafte (röhrenförmige) Bauwerke, besonders für den Tunnelbau und weitere Ingenieursanwendungen. Die photogrammetrische Prozessierungs- und Analysesoftware besitzt einen leistungsfähigen 3D-Viewer für die Darstellung (praktisch unendlich langer) Bauwerke und großer Punktwolken. Die Software besitzt umfangreiche Möglichkeiten zur Messung geometrischer Eigenschaften (Profilkontrolle, Schadstellen, Lichtraumanalyse, etc.) und geologischer Merkmale (Einfallen von Trennflächen, Kubaturen, etc.). Die vermessenen und annotierten Details werden in der zentralen Datenbank TIS (Tunnel Information System) strukturiert erfasst und für die weitere Verwendung in Ingenieursoftwares (CAD, GIS, BIM) bereitgestellt (Mett et al., 2019). Darüber hinaus sind Analyseergebnisse in Form von Falschfarbendarstellungen, annotierten (Orthophoto)-Plots, etc. auszuspielen und eine Betrachtung hochauflösender 3D-Modelle in Virtual Reality möglich.

Beurteilung: Umfängliche Möglichkeiten zur präzisen Analyse von geologischen Merkmalen für Ingenieursanwendungen.

3.3 CloudCompare

Die Freeware CloudCompare ist eine Darstellungs- und Analysesoftware für unterschiedliche 3D-Datenformate. Sie ist konzipiert für den Umgang mit großen Punktwolken (bis zu mehreren 100 Millionen Punkten), speziell für den geometrischen Vergleich von Punktwolken zueinander. Die open source Software besitzt eine Fülle von Plugins, die Toolsets für geologische Untersuchungen enthalten. Unter den Funktionen befinden sich Punkt-, Linien- und Flächenmessungen, sowie virtuelle Kompass zur Ermittlung der Orientierung geologischer Flächen im Raum. Mit den „Facets“-Tools ist eine leistungsfähige Methode zur Segmentierung und statistischen Analyse von Flächenlagen gegeben, deren Ergebnisse auch in Form von Stereoplots ausgegeben werden können.

Beurteilung: Unkomplizierte Auswertung geologischer Trennflächen. Beschränkte Eignung für Ingenieursanwendungen. Da CloudCompare eine open source Software ist, ist sie nicht für den kommerziellen Gebrauch bestimmt.

3.4 CAD-Softwares

Gängige CAD-Softwares wie AutoCAD, SketchUP, Rhinoceros und ArchiCAD können zumeist Punktwolken und/ oder Gitternetzmodelle mit einer überschaubaren Größe (zumeist wenige tausend Punkte, bzw. Netzelemente) handhaben. Zu den Analysemöglichkeiten zählen die Ableitung von Profilen, Raumschnitten, Höhenschichtlinien, etc. und die präzise Berechnung von Flächen und Volumen. Weiterhin können geometrische Details vermessen, bzw. als skalierte Raumelemente gezeichnet werden. Die Softwares sind nicht darauf optimiert, die 3D-Modelle performant zu visualisieren und zu annotieren.

Beurteilung: Bereitstellung von präzisen Messungen und Zeichnungen für Bauingenieursanwendungen. Eingeschränkte Möglichkeiten zur 3D-Visualisierung.

3.5 GIS-Softwares

GIS-Softwares wie ArcGIS, AutoCAD Map3D, QGIS und SAGA GIS sind für die Analyse unterschiedlichster Fernerkundungs- und Geodaten konzipiert. Sie benutzen umfangreiche Toolsets zur Kartierung, Messung und Visualisierung geometrischer und thematischer Informationen. Die Bedienung der Programme benötigt zumeist ausgewiesener Fachkenntnisse, wobei die Ergebnisse sehr spezifisch editierbar und aussagekräftig darstellbar sind.

Beurteilung: Präzise und universell gestaltbare Möglichkeiten für 3D-Messungen und deren Ergebnisdarstellungen. Eingeschränkte Möglichkeiten zur 3D-Visualisierung.

4. Gefügemessungen aus 3D-Modellen

4.1 Messung von geologischen Trennflächen und Linearen

Geologische Trennflächen umfassen Klufflächen (K), Störungsflächen (S_t), Schichtflächen (S_s) und Schieferungsflächen (S_f). Sind diese eindeutig in der Geometrie eines 3D-Modells identifizierbar, so sind diese auch mit den vorher beschriebenen Softwares auszumessen. Dafür müssen die vorhandenen Punkte der Punktwolke eine Ebene bilden, auf der man Punkte manuell definieren kann, um eine „Messfläche“ aufzuspannen, auf deren Basis Streich- und Fallwerte berechnet werden.

Geologische Lineare beinhalten z.B. Faltenachsen, Verschnittlineare, Scherungslineare, Gleitstriemen und sedimentäre Strömungsmarken. Bei einem vorteilhaften Ausstreichen dieser Strukturen an der Gebirgsoberfläche und einer genügenden Identifizierbarkeit im 3D-Modell können sie durch Definieren einer Geraden (= Achse) eingemessen werden.

Ein Einmessen der o.g. Gefüge ermöglicht die Software Dibat (s. 3.2) in Punktwolken und texturierten 3D-Modellen (Abb. 06). Dafür werden manuell auf der zu messenden Oberfläche mehrere Punkte definiert (mindestens 3), zwischen denen eine Messfläche aufgespannt wird. Lineare sind durch das Definieren eines Linien-Polygons durch Anklicken eines Anfangs- und Endpunktes zu berechnen. Die gelabelten und klassifizierten Messergebnisse sind auszuspielen, bzw. virtuell zu betrachten (3D-Viewer, VR-Brillen).

Im Dibat-Viewer kann weiterhin die Richtung des Einfallens mit Hilfe von Falschfarbendarstellungen kenntlich verdeutlicht werden. Flächen gleicher Farben geben dem bearbeitenden Geologen anschauliche

Informationen zu vorherrschenden Trennflächengefügen, z.B. dominanten Kluft- oder Harnischflächen. Eine Beurteilung und Annotierung der Trennflächen kann im virtuellen Raum erfolgen (Abb. 07).

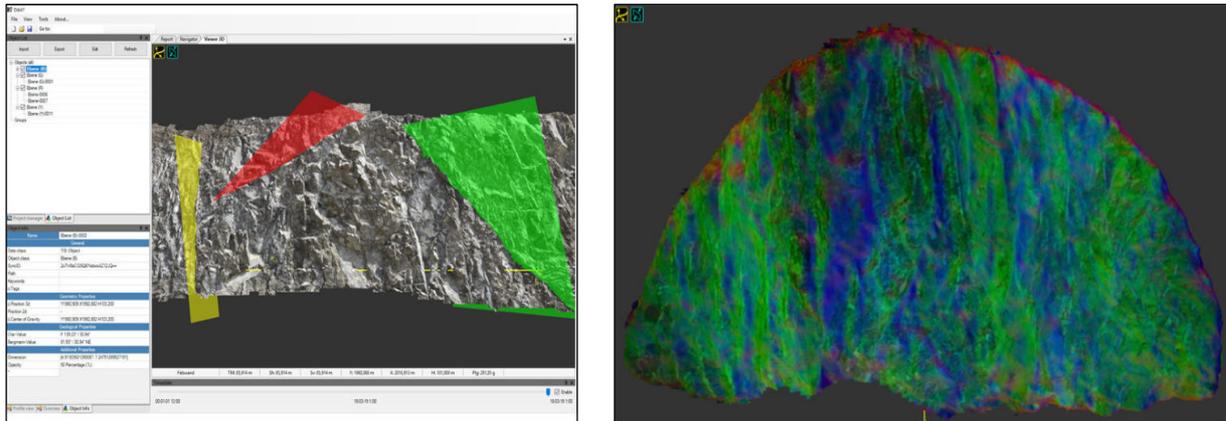


Abb. 06: Links. Auswertung von Kluftflächen (K_1 - K_3) in einem terrestrisch vermessenen 3D-Modell (s. 2.1) mit der Software DIBIT (s. 3.2). Die farbigen Messflächen entsprechen einer spezifischen Kluft-Klasse. Sie wurden durch das manuelle Anwählen mehrerer Oberflächenpunkte aufgespannt. Die Streich-/Fallwerte jeder einzelnen Messung können aus der zentralen Datenbank exportiert werden und als Eingangsgrößen bei Stereoplots verwendet werden. **Abb. 07:** Rechts. Visualisierung von Flächenorientierungen am Beispiel einer Ortsbrust in der Software DIBIT. Die Falschfarbendarstellungen basieren auf der Lage der Normalen der Flächen. Die blauen Flächen fallen nach Nordosten, wohingegen die grünen Flächen etwa nach Südosten ausgerichtet sind.

Die Software CloudCompare (s. 3.3) ist mit einem Kompass-Tool ausgestattet. Mit diesem werden per Mausklick Messflächen auf den einzumessenden Strukturen generiert und deren Raumwerte ermittelt. Die Größe der Messflächen ist variabel anpassbar. Lineationen können ebenso leicht durch zwei Punkte oder das linienhafte Nachfahren von Strukturen vermessen werden.

Ein Haupt-Funktionalität der Software ist die automatische Ermittlung und Abgrenzung von Flächen mit ähnlicher Raumlage. Das Tool „detect planar facets“ basiert auf den Flächennormalen des 3D-Modells (Dewez et al., 2016). Mit Filtern können diese sog. „Facetten“, eingegrenzt auf gewünschte Raumlagenbereiche, visualisiert, exportiert und in Form von Stereoplots analysiert werden (Abb. 08, 09).

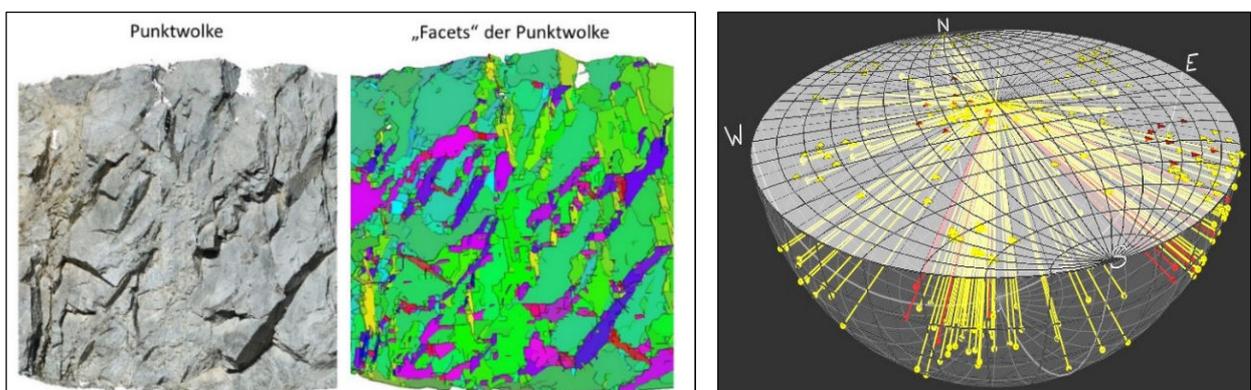


Abb. 08: Links. Analyse eines 3D-Modells mit der „Facets“-Funktion von CloudCompare (s. 3.3). **Abb. 09:** Rechts. Darstellung der Trennflächenorientierungen der Facets in Form eines Stereoplots aus der Software „Stereonet“.

4.2 Mächtigkeiten und weitere Entfernungsmessungen

Die Messung von Distanzen aus 3D-Modellen kann für eine Vielzahl geologischer Untersuchungen wertvolle Informationen liefern. Zu den Messgrößen zählen u.a. Mächtigkeiten (Gesteinsschichten, Bankungen, Ablagerungsstrukturen) und Entfernungsbeträge (Öffnungsweiten von Klüften, Versatzbeträge bei Verwerfungen, u.v.m.). Die Messungen sind zumeist durch Klicken von zwei Punkten durchzuführen, zwischen denen der Abstand im skalierten 3D-Modell berechnet wird. Werden X, Y und Z-Koordinaten von Einzelpunkten bestimmt, so sind die Entfernungen mit geeigneten Koordinatentransformationen zu berechnen.

4.3 Rauigkeiten

Die Oberflächenrauigkeit beschreibt den Grad der Unregelmäßigkeit auf einer geologischen Trennfläche, der die Scherfestigkeit und Durchlässigkeit eines Gesteins charakterisiert (Fernandez-Steeger, 2011). Die Quantifizierung der Oberflächenrauigkeit ist ein wichtiges Werkzeug in der Geologie. Sie hilft bei der Analyse der Gesteinsstabilität, der Wasserdurchlässigkeit, der Entwicklung des Kluftwasserdrucks und des Verwitterungsverhaltens des Gesteins (Steinkühler, 2019). Für die Beurteilung von Störungsaktivitäten in paläoseismologischen Untersuchungen oder die Beurteilung der seismischen Gefährdung können das Verwitterungsverhalten und der Verwitterungszustand von Oberflächen wichtige Informationen über den Exhumierungsgrad aktiver Störungen liefern. Die Rauigkeitscharakterisierung dient direkt der Bewertung der geologischen Gefährdung.

Hochauflösende 3D-Modelle werden verwendet, um Oberflächenrauigkeiten mittels geschlossenen 3D-Meshes zu rekonstruieren. Rauigkeitsanalysen basierend auf photogrammetrischen 3D-Modellen liefern die genauesten Ergebnisse, wenn die Distanz zwischen Kamera und Oberfläche während der Aufnahme so gering wie möglich ist (Steinkühler, 2019). Die Rauigkeitsgenauigkeiten von 3D-Modellen können bis in den mm-Bereich reichen. Softwares wie CloudCompare bieten die Möglichkeit aus hochauflösenden 3D-Punktwolken dichte Meshes zu erzeugen aus denen man qualifizierte Aussagen bezüglich Oberflächenbeschaffenheiten treffen kann (Abb. 10).

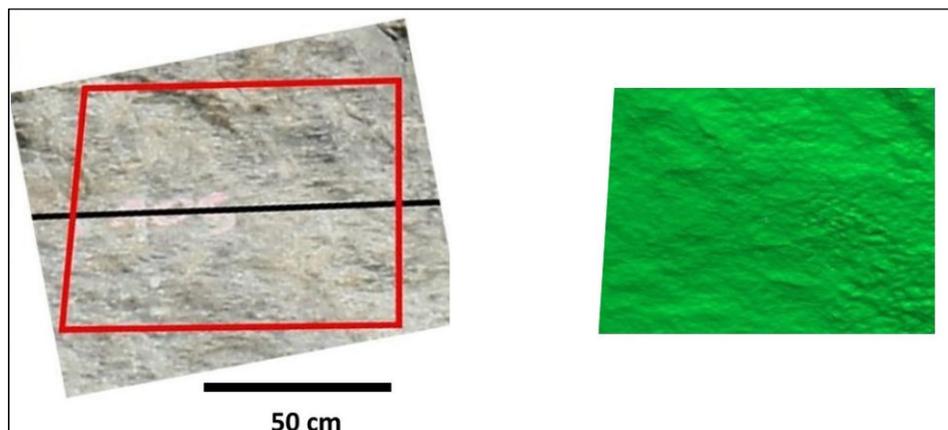


Abb.10: Links: Referenzoberfläche zur Rauigkeitsbestimmung im Rahmen der Masterarbeit von Steinkühler (2019). Rechts: 3-D Punktwolke zur Ableitung der Oberflächenrauheit, prozessiert in CloudCompare. Die grüne Fläche ist äquivalent zum roten Rahmen im Foto links.

4.4 Messgenauigkeiten:

Bei den zuvor genannten Methoden erreichen die Messgenauigkeiten für Flächenorientierungen < 10 Grad für Streich- und Fallwinkel. Dies zeigten vergleichende Untersuchungen zwischen händischen Messungen (Ground Truth per Geologenkompass), photogrammetrischen- und LiDAR-basierten 3D-Modellen (Steinkühler, 2019).

Geometrische Genauigkeiten von Punktmessungen können mit bis zu 2 mm veranschlagt werden (Steinkühler, 2019). Somit sind bei der Messung von Weiten und Entfernungen (Schichtmächtigkeiten, Kluftöffnungsweiten, Versätze) Genauigkeiten von < 10 mm zu erreichen.

5. Resümee

Photogrammetrische Messverfahren haben sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt und erweisen sich (bei geeigneten Aufnahmebedingungen) in Punkto Messgenauigkeit als ebenbürtig zu den etablierten Laserscan-Verfahren. Aufgrund der technischen Schlichtheit und Unempfindlichkeit kann die Photogrammetrie vielseitig, schnell und kostengünstig als flächenhaftes Messverfahren eingesetzt werden.

Photogrammetrische 3D-Modelle mit Fototextur ermöglichen eine geologische Kartierung und permanente Dokumentation der Gebirgsverhältnisse. Damit ist eine Auswertung der Trennflächen ungebunden von Ort und Zeit vom Bestehen des Aufschlusses möglich und somit auch eine retrospektive Betrachtung und ggf. (Neu-)Beurteilung von geologischen Auswertungen. Ein fundiertes Vor-Ort-Wissen eines Geologen (= ground truth) ist für die Erhebung und Interpretation der Ergebnisse jedoch obligatorisch und unersetzbar.

Zum heutigen Stand der Technik kann bereits eine Vielzahl von geologischen Trennflächenparametern aus photogrammetrisch gewonnenen 3D-Modellen abgeleitet werden. Mit einer sich rasant weiterentwickelnden Kamera- und Softwaretechnik ist davon auszugehen, dass zukünftig höher auflösende geometrische Informationen mit einem geringeren Analyseaufwand zur Verfügung stehen werden.

6. Literaturquellen

3GSM (2020a): Zweite Generation von TBM-Kameras eingeführt! 3GSM Information02.06.2017. https://3gsm.at/wp-content/uploads/2017/06/3GSM_TBM_Camera_2017_de.pdf. Abgerufen: 19.06.2020.

3GSM (2020b): 3D Bilder für TBM Vortriebe. <https://3gsm.at/de/produkte/shape-matrix-tbm/>. Abgerufen: 03.07.2020.

Dewez, T., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C., Rohmer, J. (2016): FACETS: A CLOUDCOMPARE PLUGIN TO EXTRACT GEOLOGICAL PLANES FROM UNSTRUCTURED 3D POINT CLOUDS. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B5, 2016 XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016. 799-804. Prague.

Dibit (2020): Dibit - Handheld System - Excavation Scan - On Site Scanning. Video: <https://www.dibit.at/videos/>. Abgerufen: 01.06.2020.

- Eder, S., Mett, M., Kontrus, H., Müller, N. (2019): Geological 3D analysis of tunnel faces performed using Dibit software and hardware tools. 10 S. Proceedings of the 14th International Conference on Shotcrete for Underground Support (ECI SUS XIV), Nong Nooch Gardens – Pattaya, November 17-20, 2019. Thailand.
- Fernandez-Steeger, T. M. (2011): Quantification of spatial joint roughness from LIDAR data, 18. Conference for Engineering Geology and Forum "Young Engineering Geologists", p. 1–7. Berlin.
- GoPro5 (2020): Hero 5 Black – Benutzerhandbuch. 95 S. 130-18420-000 REVD. https://de.gopro.com/content/dam/help/hero5-black/manuals/HERO5Black_UM_DE_REVD_Web.pdf.
- Kalisch, A. (2009): Ableitung und Analyse von Erosionsrinnen-Netzwerken aus digitalen Geländemodellen mittels großmaßstäbiger Photogrammetrie und GIS – Südwest-Marokko. 124 S. Diplomarbeit. Johann Wolfgang-Goethe-Universität Frankfurt. Institut für Physische Geographie. Frankfurt.
- Mett, M. (2015): Geo-Photogrammetrie - Verwendung photogrammetrischer Messmethoden in der Beurteilung von Georisiken im Wasserbau und der Forensik. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 55. 9 S. 17. JuWi-Treffen (26.-28.08.2015), Technische Universität Dresden – Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Dresden.
- Mett, M., Kontrus, H., Holzer, S. (2019): Dibit TIS - Das "Proto"-BIM für den Tunnelbau. 10 S. Tagungsband zur 20. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2019. Arbeitsbereich für Vermessung und GEOinformation, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck. https://www.uibk.ac.at/geometrie-vermessung/gruppe_vermessung_und_geoinformation/geodaetische_wochen/obergurgl_2019/beitraege/vo_mett.pdf.
- Schindler, K. (2011): Einführung in die Photogrammetrie. Vorlesungsskriptum. ETH, Inst. f. Geodäsie und Photogrammetrie. <http://www.igp.ethz.ch/photogrammetry/education/lehrveranstaltungen/PhotogrammetryFS11/coursematerial/Photo-FS2011-02-intro.pdf>.
- Steinkühler, J. (2019): 3D point clouds: Comparison between terrestrial LiDAR and terrestrial & aerial photogrammetry. 101 S. Masterarbeit. Ruhr University of Bochum, Institute of Geology, Mineralogy and Geophysics, Structural Geology. Bochum.
- Torresani, A., Remondino, F. (2019): Videogrammetry vs. photogrammetry for heritage 3D reconstruction. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W15, 2019. 27th CIPA International Symposium "Documenting the past for a better future", 1–5 September 2019. 1157-1162. Ávila.