Photogrammetrische Aufnahme und 3D-Punktewolken-Prozessierung einer Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb und dessen Vergleich mit einem Laserscan

Simone Schachner, Dipl.-Ing.

Projektleitung der Bauvermessung (Projekt Tunnel Vierzehn S10, A-4240 Freistadt)
Geodata ZT GmbH, Hans Kudlich-Straße 28, A-8700 Leoben

Schachner

Einleitung

In der modernen Tunnelbauindustrie werden zunehmend hochentwickelte Technologien eingesetzt, um die Sicherheit und Effizienz der Bauprojekte zu steigern. Im Zuge dieser Fortschritte hat die Montanuniversität in Zusammenarbeit mit der Firma Geodata MT GmbH ein innovatives photogrammetrisches Messsystem entwickelt. Dieses Kamerasystem ermöglicht die vollflächige digitale Kartierung der Ortsbrust, um die geologische Beurteilung objektiver zu gestalten und eine erhöhte Transparenz der Ortsbrustkartierung für Auftraggeber und -nehmer zu schaffen. [Wenighofer et al. 2017; Wenighofer et al. 2020]

Praktische Relevanz

Die photogrammetrische Messmethode erweist sich im maschinellen Tunnelvortrieb als äußerst bedeutsam, da die Ortsbrust lediglich durch Öffnungen wie Mannlöcher, Räumer und Diskengehäuse im Bohrkopf der Tunnelbohrmaschine besichtigt werden kann. Durch die beschränkte Zugänglichkeit können keine klassischen Vermessungsmethoden an der Ortsbrust angewendet werden. In diesem Kontext wird die photogrammetrische Methode zur Erstellung von 3D-Punktewolken zunehmend relevant, da sie trotz behinderter Sicht auf die Ortsbrust eine vollflächige digitale Dokumentation jener bietet. [Wenighofer et al. 2017; Wenighofer et al. 2020]

In diesem Artikel wird die Masterarbeit von Frau Dipl.-Ing. Simone Schachner behandelt, die die Anwendung und Analyse eines photogrammetrischen Messsystems zur digitalen geologischen Dokumentation einer Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb beinhaltet. Das innovative Kamerasystem, entwickelt in Zusammenarbeit mit der Montanuniversität und der Firma Geodata MT GmbH, ermöglicht trotz beschränkter Zugänglichkeit eine vollflächige digitale Kartierung der Ortsbrust. Aus den abgebildeten ringförmigen Teilabschnitten wurde mit der Software Agisoft-Metashape eine Punktewolke erzeugt, die anschließend mit Laserscandaten verglichen wurde. Der Laserscan wurde als fehlerfreie Referenz angenommen und konnte so als Referenz zur Betrachtung der Richtigkeit der photogrammetrischen Punktewolke dienen. Neben einem qualitativ hochwertigen Bildverband und hoher Präzision zeigte die photogrammetrisch prozessierte Punktewolke in den Randbereichen der Teilabschnitte eine Abweichung gegenüber den Laserscandaten. Dies ist mit der Nichterfüllung der empfohlenen Mindestüberlappung der Aufnahmen zu begründen, die sich auf das geringe Zeitfenster zur Ortsbrustaufnahme und der daraus resultierenden minimalen Anzahl an Kameras zurückführen lässt. Zur Abhilfe und Verbesserung der Richtigkeit der photogrammetrisch prozessierten Ortsbrust wird eine Erhöhung der Anzahl der Kameras und eine Verlängerung des Zeitfensters für die Bildaufnahme empfohlen.

Photogrammetric imaging and 3D-pointcloud-processing of a tunnelface in mechanized tunnelling and its comparison to a laser scan

This article deals with the master thesis of Dipl.-Ing. Simone Schachner, which includes the application and analysis of a photogrammetric measuring system for the digital geological documentation of a tunnel face in mechanized tunnelling. The innovative camera system, developed in cooperation with the Montanuniversität and the company Geodata MT GmbH, enables full-surface digital mapping of the tunnel face despite limited accessibility. A point cloud was generated from the mapped ring-shaped sections using Agisoft Metashape software, which was then compared with laser scan data. The laser scan was assumed to be an error-free reference and could therefore be used as a reference for observing the accuracy of the photogrammetric point cloud. In addition to a high-quality image composite and high precision, the photogrammetrically processed point cloud showed a deviation from the laser scan data in the edge areas of the subsections. This can be explained by the failure to meet the recommended minimum overlap of the images, which can be attributed to the small time window for the local breast recording and the resulting minimum number of cameras. To remedy this and improve the accuracy of the photogrammetrically processed face, an increase in the number of cameras and an extension of the time window for image acquisition is recommended.

Schlagworte
Keywords

Maschineller Tunnelbau
Mechanical tunnel construction

Photogrammetrie
photogrammetry

photogrammetrische Prozessierung
photogrammetric processing

Ortsbrustmonitoring
tunnel face monitoring

geologische Dokumentation
geological documentation

Ortsbrustkartierung
tunnel face mapping

Distanzermittlung
distance determination

innere Genauigkeit
internal accuracy

äußere Genauigkeit
external accuracy

Funktion und Anwendung der photogrammetrischen Methode

Zur praktischen Anwendung wird das Kamerasystem der Montanuniversität und der Firma Geodata MT GmbH während den geplanten Vortriebspausen in die Gehäuse der Schneidedisken des Bohrkopfes integriert. Während dieser durch manuelle Steuerung rotiert, werden ringförmige Teilabschnitte, sogenannte Aufnahmespuren, abgebildet. Die Anzahl der Aufnahmespuren ist von den Parametern der eingesetzten Kameras, dem Durchmesser der Ortsbrust und dem Aufnahmeabstand abhängig. In einem weiteren Verarbeitungsschritt wird durch Anwendung der bildverarbeitenden Software Agisoft-Metashape aus dem aufgenommenen Bildverband eine vollflächige und detaillierte Punktewolke der Ortsbrust erstellt, die je nach Notwendigkeit zu einem Modell oder einem Orthofoto weiterverarbeitet werden kann. [Wenighofer et al. 2020]

Optische Aufnahmeparameter

Um einen qualitativ hochwertigen Bildverband zu erzielen werden die wesentlichen optischen Aufnahmeparameter an die vorherrschenden Bedingungen angepasst. Im Rahmen der hier zu Grunde liegenden Masterarbeit von Frau Dipl.Ing. Simone Schachner [Schachner, S. 2023] umfassen diese die Bildrate auf Basis der geforderten Bildüberlappung in Bewegungsrichtung, die Blendenöffnung für eine an die Umgebung angepasste Lichtmenge in Kombination mit dem ISO-Wert, sowie die Belichtungszeit des Sensors, die an die maximal tolerierbare Bewegungsunschärfe der Aufnahmen angepasst wurde. Zudem wurde der Fokus und die Schärfentiefe betrachtet, die sich aus dem tolerierbaren Unschärfekreis, der gewählten Blendenzahl, dem verwendeten Objektiv und dem Aufnahmeabstand ergibt.

Kamerapositionen

Da die Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb nicht direkt zugänglich ist, ist es unmöglich, mithilfe herkömmlicher Passpunkte oder Strecken eine Maßstabsinformation im photogrammetrischen Objektraum zu erlangen. Daher werden die Kamerapositionen während der Bildaufnahme genutzt, um die Maßstabstreue der photogrammetrisch verarbeiteten Punktewolke sicherzustellen. Zur Umsetzung werden die Kamerapositionen in einem zuvor definierten Objektkoordinatensystem ermittelt, durch die mithilfe einer Rotationsmatrix die Kamerapositionen während der Bildaufnahme berechnet werden. [Schachner, S. 2023]

Bildüberlappung

Die jeweilige Mindestüberlappung der Aufnahmen ist zur qualitativ hochwertigen photogrammetrischen Verarbeitung des Bildverbandes an die Empfehlung der bildverarbeitenden Software anzupassen [Schachner, S. 2023]. Dem Benutzerhandbuch von Agisoft-Metashape [Agisoft LLC 2022] ist eine Empfehlung von 80% in Bewegungsrichtung und eine seitliche Bildüberlappung von 60% zu entnehmen.

Praktische Umsetzung am Gotthard-Straßentunnel

Bei der hier zugrunde liegenden Masterarbeit von Frau Dipl.Ing. Simone Schachner [Schachner, S. 2023] wurde vor dem Start des maschinellen Vortriebes des nördlichen Zugangsstollens der zweiten Röhre des Gotthard-Straßentunnels die Ortsbrust mit einem Focus-Premium-70 Laserscanner gescannt. Nach Aufbau der Tunnelbohrmaschine kam im Rahmen des Kamerasystems der Montanuniversität und der Firma Geodata MT GmbH eine Allied-Vision Mako G-234 Industriekamera mit dem Sony IMX249 1/1,2″ CMOS-Sensor mit 2,4 MP Auflösung zum Einsatz [Allied Vision V1.0.1, 2022]. Die Kamera wurde mit einem Kowa 5 mm-Objektiv mit Festbrennweite ausgestattet, das hervorragend für die Nahbereichsphotogrammetrie geeignet ist [Kowa 2014]. Die Ortsbrust wurde durch vier voneinander unabhängigen ringförmigen Aufnahmespuren abgebildet, die zeitlich direkt nacheinander aufgenommen wurden.

Durch photogrammetrische Prozessierung mit Agisoft-Metashape wurde der Bildverband durch Umsetzung der Bündelausgleichung mit Simultankalibrierung zu einer vollflächigen Punktewolke der Ortsbrust verknüpft. Zur Evaluierung der inneren Genauigkeit wurden die RMS-Werte der äußeren Orientierungsparameter sowie der mittlere und maximale RMS-Wert der Objektpunkte herangezogen. Die Standardabweichungen und Korrelationen der inneren Orientierungsparameter sind nach Luhmann [Luhmann 2010b, S. 563, 2010a, S. 115] nicht für die Genauigkeit der Objektpunktbestimmung mit der Simultankalibrierung relevant. [Schachner, S. 2023]

In einem weiteren Schritt wurde die äußere Genauigkeit der photogrammetrisch prozessierten Punktewolke durch Distanzermittlung zu einem Laserscan ermittelt. Die Abweichung des Laserscans zum wahren Wert wurde als innerhalb eines akzeptablen Bereichs angenommen, wodurch dieser als fehlerfreie Referenz dienen konnte. Zur Ermittlung der Distanz zwischen der photogrammetrischen Punktewolke und dem Laserscan wurden die Algorithmen C2C (Cloud-to-Cloud), C2M (Cloud-to-Mesh) und M3C2 (Multiscale-Model-to-Model) der Software CloudCompare eingesetzt. Durch die Anwendung verschiedener Algorithmen wird eine umfassende Analyse der Ergebnisse ermöglicht. Zudem ist es von wesentlicher Bedeutung, die Funktionsweise jedes einzelnen Algorithmus zu verstehen, um die ermittelten Distanzen kritisch bewerten zu können. [Schachner, S. 2023]

Ergebnisse

Die vor der Aufnahme des Bildverbandes abgeschätzten optischen Aufnahmeparameter führten zu einem qualitativ hochwertigen Bildverband und einer photo-

grammetrisch prozessierten Punktewolke (Abbildung 1) mit einem mittleren RMS-Wert von 0,675 Pixel, sowie einem maximalen RMS-Wert von 0,892 Pixel [Schachner, S. 2023].

Bei Betrachtung der Bildüberlappung wurde festgestellt, dass die von Agisoft-Metashape empfohlene seitliche Bildüberlappung von 80 % in allen Teilabschnitten erfüllt wurde. Jedoch erwies sich die seitliche Bildüberlappung als problematisch. Zwischen den inneren Aufnahmespuren 1 und 2 wurde eine mittlere Überlappung von 61 % erreicht, die die Empfehlung von 60 % erfüllte. Hingegen lagen die Überlappungen zwischen den Spuren 2 und 3 sowie 3 und 4 bei nur 45% bzw. 37%. Daraus lässt sich schließen, dass sowohl die inneren als auch die äußeren Orientierungsparameter nicht auf Basis eines vollständig verknüpften Bildverbandes bestimmt wurden, da der Ausgleich lediglich auf den Bildverknüpfungen innerhalb der Aufnahmespuren basierte. [Schachner, S. 2023]

Zur Analyse der Distanzwerte aus der Distanzermittlung (Abbildung 2) diente ein kombinierter maximaler Fehler von ±5 mm als Schwellenwert, um tatsächliche von scheinbaren Positionsabweichungen zu unterscheiden. Dieser Schwellenwert berücksichtigt sowohl den maximalen Fehler des Laserscans als auch jenen der photogrammetrischen Rekonstruktion. Die Distanzermittlung in z-Richtung mittels des

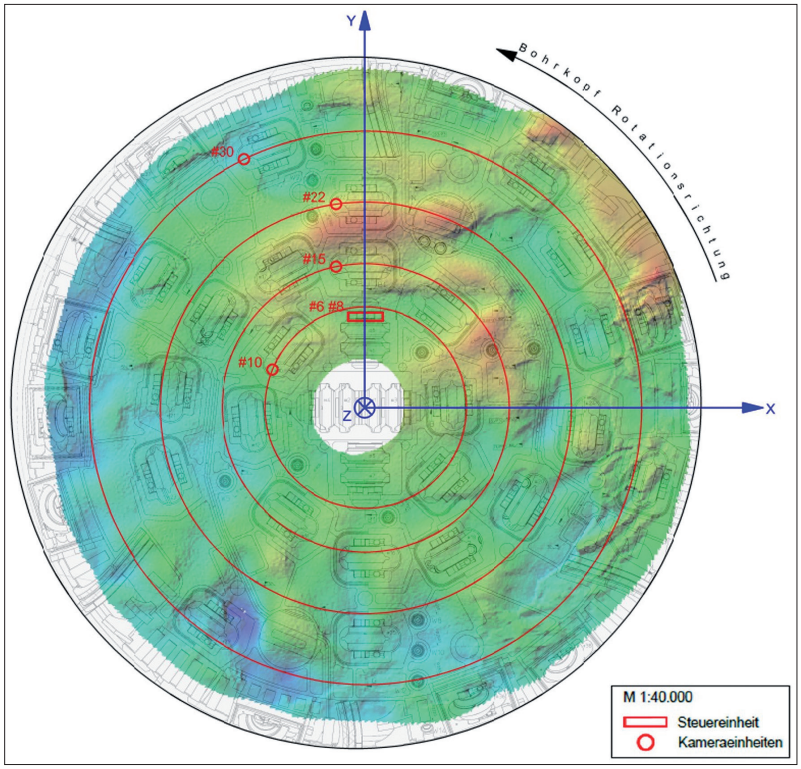

Abb. 1: Bohrkopfplan (schwarz), montiertes Kamerasystem (rot); Objektkoordinatensystem (blau), Höhenmodell der photogrammetrisch prozessierten Ortsbrust; [Schachner, S. 2023]

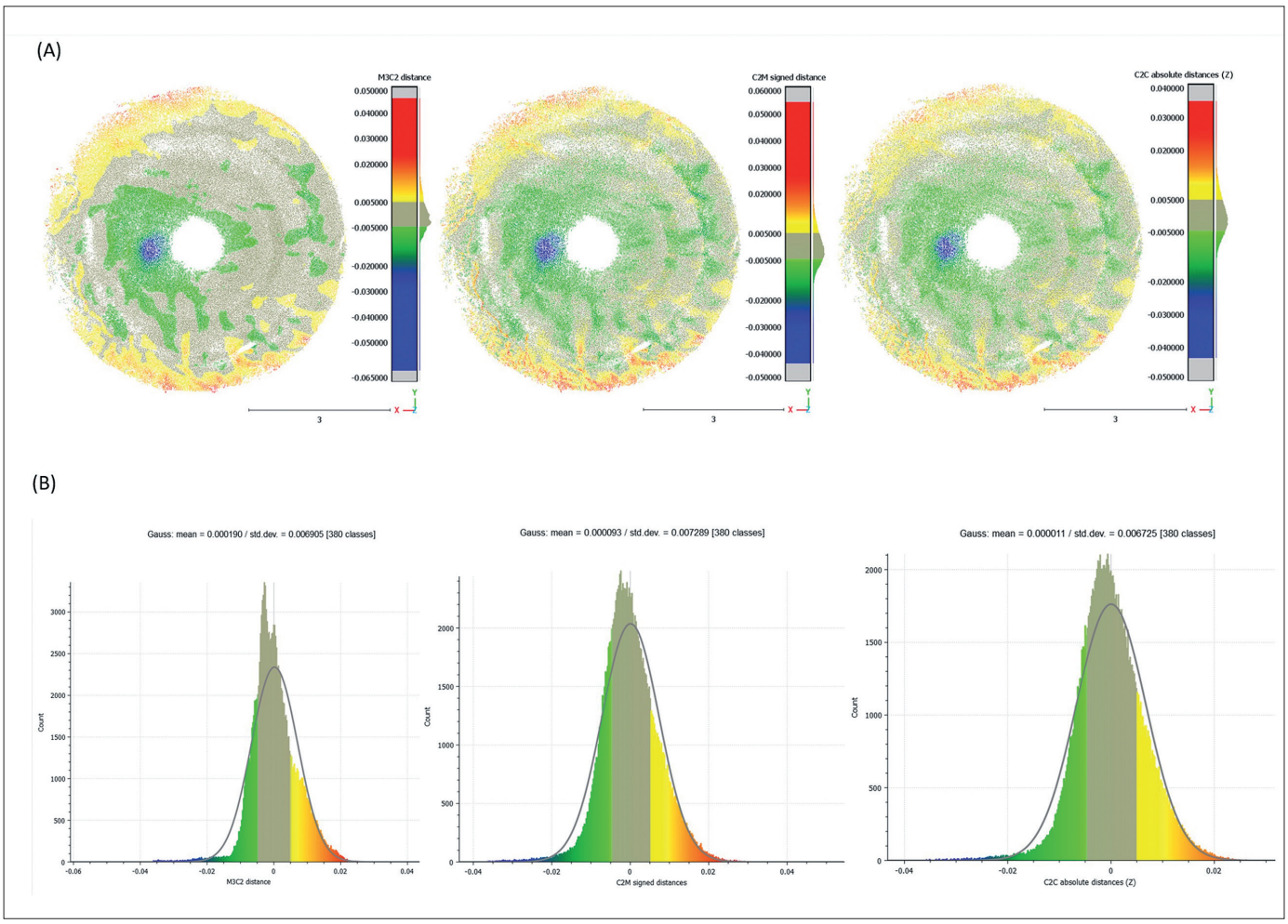

Abb. 2: Distanzermittlung C2C-, C2M-, M3C2-Algorithmus; Referenzpunktewolke: Laserscan; Werte in m; (A) Distanzwerte; (B) Histogramm und Häufigkeitsverteilung; CloudCompare; [Schachner, S. 2023]

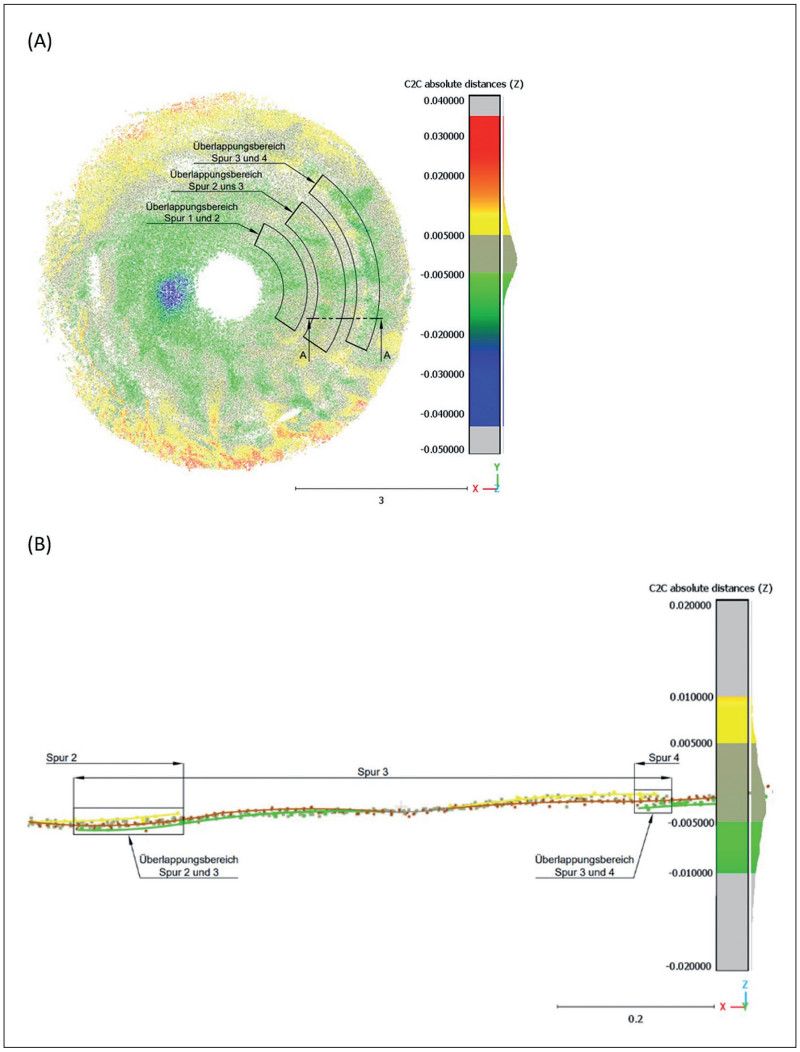

Abb. 3: (A) Distanzermittlung C2C-Algorithmus in z-Richtung; Werte in m; modifiziert nach CloudCompare; (B) Schnitt A-A; photogrammetrisch prozessierte Objektpunkte (Farbskala); Laserscan (braun); [Schachner, S. 2023]

C2C-Algorithmus ergab, dass 95% der Distanzwerte innerhalb eines Bereichs von ±13,450 mm lagen. Der C2M-Algorithmus zeigte, dass 95% der Punkte einen Abstand von ±14,578 mm nicht überschritten. Diese Resultate stimmten weitgehend mit denen des M3C2-Algorithmus überein, der eine Spannweite von ±13,810 mm für 95% der Distanzwerte ermittelte.

Die Analyse der räumlichen Verteilung der Abstände zwischen den Objektpunkten aus der Photogrammetrie und den Referenzdaten des Laserscans deutete besonders in den Randbereichen der Aufnahmespuren auf eine auffällig hohe Punktedichte hin (Abbildung 3A). Eine Schnittdarstellung (Abbildung 3B) verdeutlichte, dass keine zusammenhängende Punktewolke prozessiert wurde und sich in diesen Bereichen die Aufnahmespuren überlappen.

Empfehlung für die Praxis

Aufgrund der unzureichenden Überlappung der Aufnahmespuren resultierte eine photogrammetrisch prozessierte Punktewolke mit mangelhafter äußerer Genauigkeit in den Randbereichen der ringförmigen Teilabschnitte. Um diese Problematik zu beheben, ist es notwendig die Anzahl der Kameras zu erhöhen und das Zeitfenster für die Bildaufnahme zu erweitern. Diese Maßnahmen würden die Überlappung der Aufnahmespuren erhöhen und somit die Qualität der geologischen Dokumentation erheblich steigern. [Schachner, S. 2023]

Schlussfolgerung

Die hier zugrunde liegenden Masterarbeit von Frau Dipl.Ing. Simone Schachner [Schachner, S. 2023] verdeutlicht die essenzielle Rolle einer sorgfältigen Planung der Durchführung der photogrammetrischen Aufnahme. Dies ist die Voraussetzung, um eine für die Praxis angemessene Präzision und Richtigkeit der rekonstruierten Ortsbrust zu erlangen. Durch die Optimierung der Bildaufnahmeprozesse können zukünftige Projekte von einer digitalen geologischen Dokumentation profitieren. Die Fortschritte und Erkenntnisse dieser Masterarbeit bieten wertvolle Ansätze für die zukünftige Weiterentwicklung der digitalen Monitoring-Technologien im Tunnelbau. [Schachner, S. 2023]

Literaturverzeichnis

1. [Agisoft LLC 2022] Agisoft LLC: Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.8., 2022.
2. [Allied Vision V1.0.1, 2022] Allied Vision: Ultra-compact GigE Vision cameras, Mako G-234, V1.0.1, 2022.
3. [FARO Technologies Inc. 2023] FARO Technologies Inc.: Faro Focus Premium 70. USA, 2023.
4. [Kowa 2014] Kowa: Product Information LM5JCM | 2/3" 5mm 2MP C-Mount Lens, 2014.
5. [Luhmann, T. 2010a] Luhmann, T.: Erweiterte Verfahren zur geometrischen Kamerakalibrierung in der Nahbereichsphotogrammetrie. München. Deutsche Geodätische Kommission (Reihe C, 645). https://dgk.badw.de/fileadmin/user_upload/Files/DGK/docs/c-645.pdf, 2010a.
6. [Luhmann, T. 2010b] Luhmann, T.: Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen, Methoden und Anwendungen (3. Aufl.). Berlin und Offenbach: Wichmann, 2010b.
7. [Schachner, S. 2023] Schachner, S.: Photogrammetrische Aufnahme und 3D-Punktewolken-Prozessierung einer Ortsbrust im maschinellen Tunnelvortrieb und deren Vergleich mit einem Laserscan. Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, TU-Bergakademie Freiberg, 2023.
8. [Wenighofer, R., et al. 2017] Wenighofer, R., Six, G., Galler, R., & Chmelina, K.: Cameras for digitized 3D geological documentation of the tunnel face from cutterheads of TBMs: Ortsbrustkameras zur digitalen geologischen 3D-Dokumentation aus dem Bohrkopf von TBM - Stand der Entwicklungsarbeiten. Geomechanik und Tunnelbau (10.6), 706–766, 2017.
9. [Wenighofer, R., et al. 2020] Wenighofer, R., Galler, R., Karel, W., & Pfeifer, N.: Efficient Digital Imaging for Full Face Rock Mass Evaluation in Hard Rock TBM Tunnelling. ISRM Congress 2019 Proceedings, Symposium on Rock Mechanics - EUROCK 2020, 1–7, 2020.