

Integration von 3D-Laserscanning in die Rohstoffgewinnung im Untertagebau

JÜRGEN SELENSKI¹, OLIVER REUß¹, JONAS ROTH¹, VERENA HÄNDLER¹, TOMASZ BADECKI², UWE SCHIRMER², MARKUS BOGNER³, ANDREAS WAGNER³ & ANSGAR BRUNN¹

Zusammenfassung: Im regelmäßigen Untertagebau wachsen beständig die Anforderungen an Wirtschaftlichkeit und Dokumentation. Eine detaillierte Situationserfassung durch terrestrisches Laserscanning kann die Datengrundlagen schaffen. Die Vermessungsaufgaben fallen dabei sporadisch regelmäßig an und sind im Regelbetrieb durch Nichtvermesser durchzuführen. In diesem Beitrag werden Ansätze zur Vorbereitung eines vermessungstechnischen Umfelds entwickelt, die die Bedürfnisse des Untertagebaus erfüllen. Dazu werden die Aufgaben der Volumenbestimmung des Abbaus, die Optimierung der Bohrlochtiefen und die Dokumentation des Gesamtbaus exemplarisch behandelt. Die vorgestellten Verfahrensabläufe wurden exemplarisch realisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verfahren die erwartete und notwendige Vollständigkeit sowie auch Genauigkeit liefern.

1 Einleitung

In Industrie, Bauwesen und Handwerk wird das Potenzial von dichten 3D-Daten zunehmend genutzt. In der Regel werden dabei digitale Teilschritte in bestehende Arbeitsprozesse integriert. Andauerndes Ziel ist es, repetitive Arbeitsabläufe und Prozessketten (teilweise) zu automatisieren und damit wirtschaftlicher zu gestalten sowie zusätzliche Informationen zu gewinnen. Solche wiederkehrenden Arbeitsabläufe sind auch bei der Gesteinsförderung im Untertagebergbau zu finden. Die Firma Knauf Gips KG baut in der Grube Hüttenheim IV im Örtferfestenbau Anhydrit ab. Dabei entsteht ein sich wiederholendes System aus Festen (Pfeilern), die stehen bleiben, und Kammern (Örtern), aus denen der Anhydrit gewonnen wird (Abb. 1).

1.1 Anforderungen des Untertagebaus

Für die Gewinnung des Anhydrits wird ein konventionelles Bohr – und Sprengverfahren eingesetzt. Hierzu werden Örter (Hohlräume, Kammern) mit einer Breite von 7 m und einer Höhe von 4 m aufgefahren, sowie schachbrettmusterartig Festen (Pillar; Abb. 1) mit den Abmessungen 10 m lang und 6 m breit stehen gelassen.

Der Gewinnungszyklus untertage setzt sich wie folgt zusammen: 1. Bohren der Sprenglöcher, 2. Besetzen und Sprengen, 3. Beladen der Fahrzeuge, 4. Transport zum Brecher und 5. Brechen und Zerkleinern.

¹ Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt (THWS), Fakultät für Kunststofftechnik und Vermessung, Studienbereich Geo, Röntgenring 8, D-97070 Würzburg,

E-Mail: [Ansgar.Brunn, Oliver.Reuss]@thws.de

² Knauf Gips KG, Willanzheim-Hüttenheim, Hüttenheim 45, D-97348 Willanzheim-Hüttenheim,

E-Mail: [Uwe.Schirmer, Tomasz.Badecki]@knauf.com

³ ANGERMEIER INGENIEURE GmbH, i_PARK Klingholz 16, 97232 Giebelstadt,

E-Mail: [Bogner.Markus, Wagner.Andreas]@angermeier.de

Zu 1.: In regelmäßigen Abständen werden durch den Markscheider Vermessungspunkte (Stunden) an der Firste (Decke) der Grube eingerichtet. Sie dienen dem Bohrmeister zur Ausrichtung seines Bohrwagens. Die Einrichtung erfolgt rein optisch. In zwei Stunden werden Lote eingehängt. Anschließend wird ein Strahler an das hintere Lot gehalten. Anhand der Schatten markiert ein zweiter Mitarbeiter die Mitte des Ansatzpunktes an der Ortsbrust (Abbauwand). Danach wird der Bohrwagen mittels zwei Abstandslasern positioniert, bevor das programmierte Bohrschema halbautomatisch abgebohrt wird. Es werden 4 bis 5 Abbauorte pro Tag gebohrt.

Zu 2. bis 5.: Die Bohrlöcher werden mit Sprengstoff gefüllt und anschließend gezündet. Das gesprengte Haufwerk wird mit Radladern auf die Transportfahrzeuge aufgeladen. Die Fahrzeuge transportieren das Material zum untertägigen Brecher, der den Anhydrit vorzerkleinert, bevor er zur weiteren Verarbeitung mit einer Förderbandanlage in die Fabrik gefördert wird.

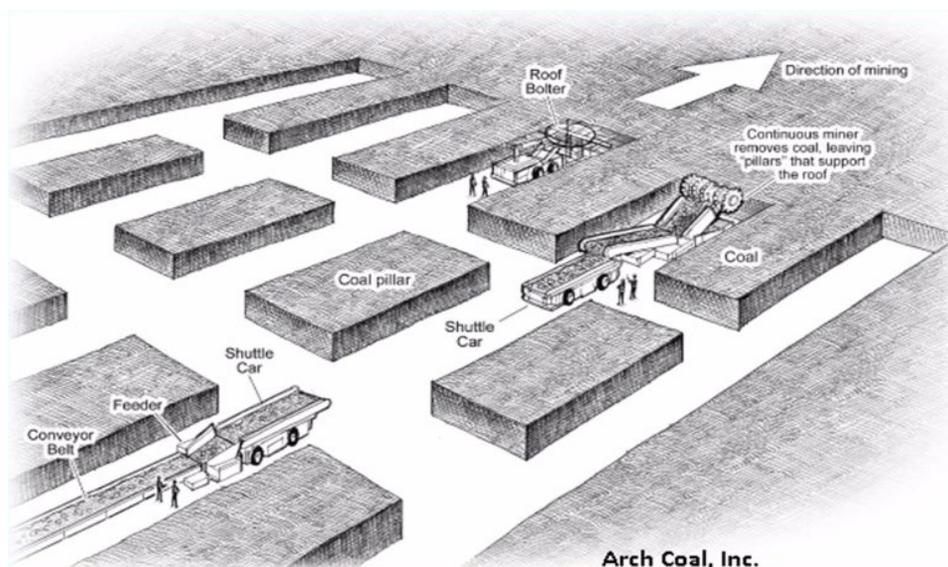


Abb. 1: Prinzip des Orterfestenbaus in der Grube Hüttenheim IV (Quelle: ARCH COAL 2023)

Die zukünftige Nutzung digitaler Mess- und Auswerteverfahren soll die Bewirtschaftung der Lagerstätte effizienter gestalten. Hierfür wurden in enger Abstimmung mit dem Bergbauunternehmen Ansätze ausgearbeitet, die das Potenzial von terrestrischem Laserscanning im Untertagebergbau aufzeigen. Wichtig war es etablierte Prozessketten zu berücksichtigen und die neuen Verfahren in die bisherigen Abläufe zu integrieren. Aus den vom Unternehmen geäußerten Zielen und der ersten testorientierten 3D-Datenerfassung stellten sich die Volumenberechnung der abgebauten Kammer pro Sprengung, die Dokumentation des Abbaus und die Sicherstellung einer einheitlichen Bohrtiefe für den Sprengvortrieb als erfolgversprechend heraus. Die Integration des terrestrischen Laserscannings soll die effektive Nutzung der Lagerstätte gewährleisten, den Bohr- und Sprengzyklus optimieren sowie den Vortrieb dokumentieren.

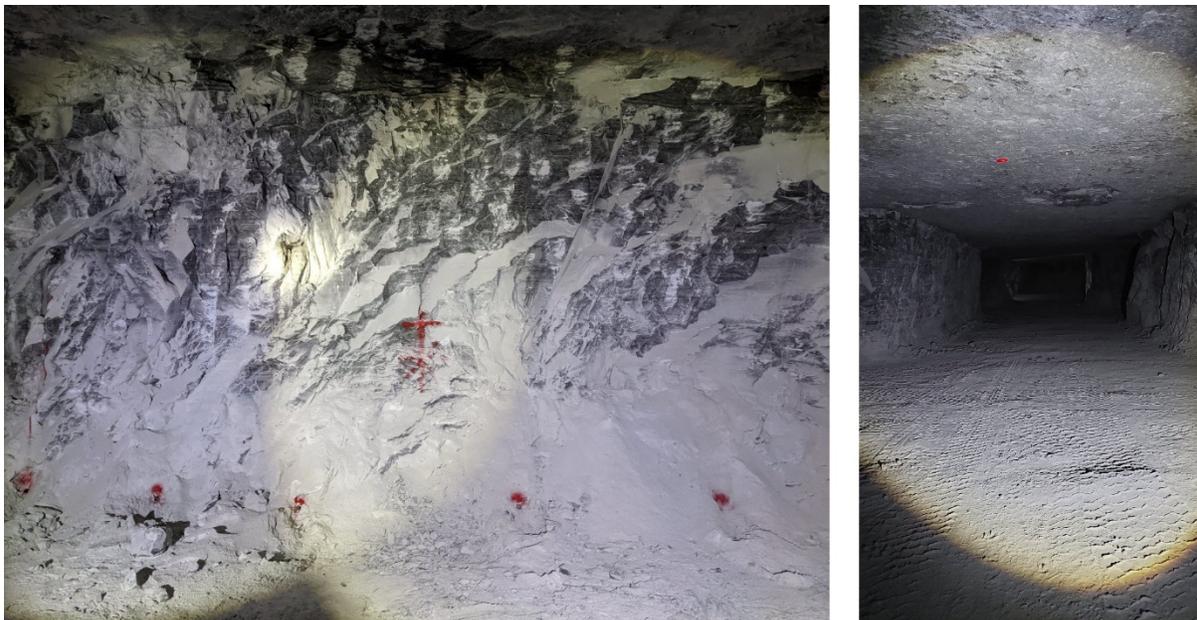


Abb. 2: Abbauwand mit Markierungen (links) und Kammersituation (rechts) untertage. Rote Markierung an der Firste im rechten Bild zeigt einen Stundenpunkt des Markscheiders

1.2 Vorarbeiten

1.2.1 Terrestrisches Laserscanning im Bergbau

Das terrestrische Laserscanning (TLS) wird seit vielen Jahren regelmäßig im Bergbau eingesetzt. Das TLS ermöglicht eine vollständige 3D Datenerfassung, ist hochgenau und auch in Kombination mit Kameras möglich, erzeugt jedoch große Datenmengen und erfordert eine schrittweise Datenerfassung (TSCHARF 2018). Der übliche Einsatzrahmen von TLS unterscheidet sich jedoch von der hier vorliegenden Situation, durch die Kombination eines regelmäßigen Untertagebaus mit dem sprengenden Abbauverfahren im Anhydritabbau und dem Wunsch nach einer Low-Cost-Lösung. Relevante aktuelle Verfahren zum terrestrischen Laserscanning innerhalb der Gewinnung von festen Stoffen lassen sich nach dem Ort des Abbaus einteilen:

Im Tagebau, z.B. in Steinbrüchen, werden terrestrische Laserscanner zur Dokumentation (z.B. O-PARIN et al. 2007) und Analyse der Abbruchwand (z.B. LAUX 2017) eingesetzt, oft als Einzelstandpunkte bei überschaubaren Objektgrößen. Im großflächigen Tagebau (z.B. Braunkohle in Deutschland) werden die Daten des terrestrischen Laserscanners durch Airborne Laserscanning (JAWECKI et al. 2017) und Drohnenbefliegungen (UAV) ergänzt. In Steinbrüchen und im Tagebau allgemein wird mit Schaufelrad- oder Löffelbaggern gearbeitet. Ebenso sind Sprengungen üblich.

Im Untertage, z.B. für den Stollenabbau, hat die DMT früher bereits einen speziellen explosionsgeschützten Laserscanner mit der Zoller+Fröhlich GmbH entwickelt (KUCHENBECKER 2010), der der Richtlinie 94/9/EG (abgelöst durch die Richtlinie 2014/34/EG in 2016) sowie der BetriebssicherheitsVO der DMT genügte. STUDNICKA & GROISS (2019) berichten von einer Gesamtaufnahme eines Untertage-Bergwerks. Im europäischen Eisenbahn- und Straßentunnelbau ist die Ortsbrust i.d.R. nicht beobachtbar, da die Tunnelbohrmaschine (TBM) die gesamte Ortsbrust

durchgehend bearbeitet und verdeckt. TLS dient in diesen Fällen zur Dokumentation und Qualitätssicherung hinter der TBM bzw. der wandernden Ortsbrust, der Dokumentation von Sekundärauswirkungen der Baumaßnahme (MATWIJ et al. 2021) und auch zur Sicherstellung von Durchfahrtsprofilen im Betrieb (PEJIC 2013).

Terrestrische Laserscanner werden zunehmend durch fahrzeugbasierte Mobile Mapping Systeme dort ersetzt, wo die Mobile Mapping Systeme wirtschaftlich eingesetzt werden können. Im Tagebau (Braunkohle) werden regelmäßig wiederholend große Flächen befahren, sodass das fahrzeugbasierte Mobile aufgrund der reduzierten Auswertezeit interessant ist. Das INS und GNSS liefern im freien Gelände präzise Positionsdaten. Mit diesen Sekundärdaten lassen sich schnell Punktwolken und Oberflächenvermaschungen berechnen, die dann zur Kartierung und Volumenermittlung in Ergänzung zu UAV-Vermessungen herangezogen werden.

Die Situation im Anhydritabbau in der hier relevanten Grube Hüttenheim IV unterscheidet sich dadurch, dass hier nur kleine Bereiche jeweils im Fokus stehen, untertage gesprengt wird und regelmäßig die Oberfläche der Ortsbrust zur Optimierung weiterer Sprengungen beobachtet werden soll. GNSS scheidet als Positionierungssystem untertage aus. Zentimetergenaue Einmessungen wie bei KAJZAR et al. (2015) sind nicht erforderlich. Wirtschaftliche Speziallösungen sind daher hier für den Einsatz im nichtvermessungstechnischen Regelbetrieb erforderlich. Vergleichbare Abbausituationen sind in Deutschland im Kalibergbau gegeben.

1.2.2 Registrierung und Georeferenzierung von 3D Punktwolken aus terrestrischem Laserscanning

Terrestrisches Laserscanning ist ein Verfahren zur Messung von Millionen von Oberflächenpunkten der vom jeweiligen Laserscannerstandpunkt aus sichtbaren Objekte bzw. Objektteile. Zur vollständigen Objekterfassung sind im Allgemeinen mehrere Standpunkte des Laserscanners erforderlich, die dann zueinander registriert und ggfls. in ein übergeordnetes Referenzsystem georeferenziert werden müssen. Die Georeferenzierung kann nach zwei unterschiedlichen Ansätzen erfolgen:

- In einer Einstufenlösung wird jeder Laserscannerstandpunkt in das übergeordnete Koordinatensystem georeferenziert. Es werden häufig Targets als Passpunkte genutzt (z.B. DEGEN et al. 2014).
- In der Zweistufenlösung erfolgt zunächst eine gegenseitige Registrierung der einzelnen lokalen Punktwolken anhand homologer Messungen (z.B. von Targets (Target-to-Target Registrierung), automatisch detektierter Ebenen (Plane-to-Plane Registrierung) oder lokaler Punktgeometrien (Cloud-to-Cloud Registrierung). Dieser Vorgang kann als relative Orientierung ausgefasst werden. In einem zweiten Schritt wird die relativ orientierte Punktwolke in das übergeordnete Referenzsystem georeferenziert (Absolute Orientierung).

Die Zweistufenlösung erfordert mehr Scanaufwand, weniger Passpunkte und hat eine homogenere innere Geometrie, weil weniger äußere Einflüsse auf die Punktwolkengeometrie wirken. Sequentielle Anschlüsse von Punktwolken an vorhandene Registrierungen verhalten sich ungünstig in Bezug auf die absolute (äußere) Genauigkeit (WUJANZ et al. 2019).

2 Untersuchungen

Die Untersuchungen umfassen drei Aufgabenbereiche: a) Ermittlung des Volumens der Abbruchkammer, b) Optimierung der Bohrlochtiefen und c) die Dokumentation des Gesamtabbaus. Aufgrund der Einfachheit der Bedienung und der erprobten Genauigkeit kommen terrestrische Laserscanner zum Einsatz. Handgetragene Scanlösungen (wie bei HÖBELBARTH et al. 2018) schieden aufgrund der erwarteten geringen Positionierungsgenauigkeit in dieser regelmäßigen Abbausituation als Messsensoren aus. Die 3D-Vermessung mittels terrestrischem Laserscanning kann in den genannten drei Themenbereichen die Wirtschaftlichkeit und Genauigkeit steigern. Im Einzelnen wurden drei Verfahren untersucht, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

2.1 Volumenberechnung der Abbaukammer

Für die Ermittlung des gesprengten Haufwerks sind zwei Laserscans erforderlich. Die Ortsbrust wird einmal vor und einmal nach der Sprengung erfasst. Die beiden multitemporalen Scans bzw. Scangruppen werden zueinander orientiert, um anschließend das geförderte Volumen ableiten zu können. Es wurden zwei Ansätze der Registrierung (Abs. 1.2.2) verfolgt:

1. Lokaler Cloud-to-Cloud-basierter Ansatz
2. Target-basierter Ansatz mit Festpunktfeld

Im Folgenden wird die Umsetzung beider Ansätze beschrieben.

2.1.1 Volumenbestimmung durch einen lokalen Ansatz

In dem lokalen Ansatz erfolgt lediglich eine gegenseitige Registrierung der multitemporalen 3D-Punktwolken. Ein Bezug zu einem übergeordneten Referenzsystem wird nicht hergestellt. Nach dem Scanning der Ortsbrust und der Registrierung von ggfls. mehreren Scanstandpunkten pro Zeitpunkt werden die Bereiche in den beiden registrierten Punktwolken im Rückraum identifiziert, die sich durch die Sprengung nicht verändert haben. Die Abb. 3 (links) ist also multitemporal aufzufassen. Die Stunden (Festpunkte) sind die Vermarkungen des bisherigen Referenzsystems der Markscheider. In einer Minimalkonfiguration ist Standpunkt 1 der Standpunkt des Laserscanners vor der Sprengung und Standpunkt 2 der Standpunkt nach der Sprengung und dem Abtransport. Gelbe Linien markieren potentielle gleichbleibende Teile der Punktwolke, die für die Registrierung geeignet sind. Diese unveränderten Bereiche werden durch eine Cloud-to-Cloud-Zuordnung registriert. Das Ergebnis ist in Abb. 3 (rechts) dargestellt. In der Abbildung ist bei Standpunkt 9 die alte Ortsbrust zu sehen. Anmerkung: In dieser Messkampagne wurden zusätzlich Standpunkte zur Verbesserung der Prozessdokumentation gemessen.

Zum Einsatz kam der Z+F IMAGER 5016 der THWS. Die Cloud-to-Cloud-Registrierung erfolgte in der Software ZF Laser Control mit einer Genauigkeit besser als 1cm Standardabweichung. Die Volumenberechnung erfolgte in der Software CloudCompare mit dem Tool "Volumen Calculation". In diesem Fall wurden 68m³ Material abgebaut. Tests ergaben, dass eine Scanauflösung "Medium" für die fachlichen Anforderungen ausreichend ist.

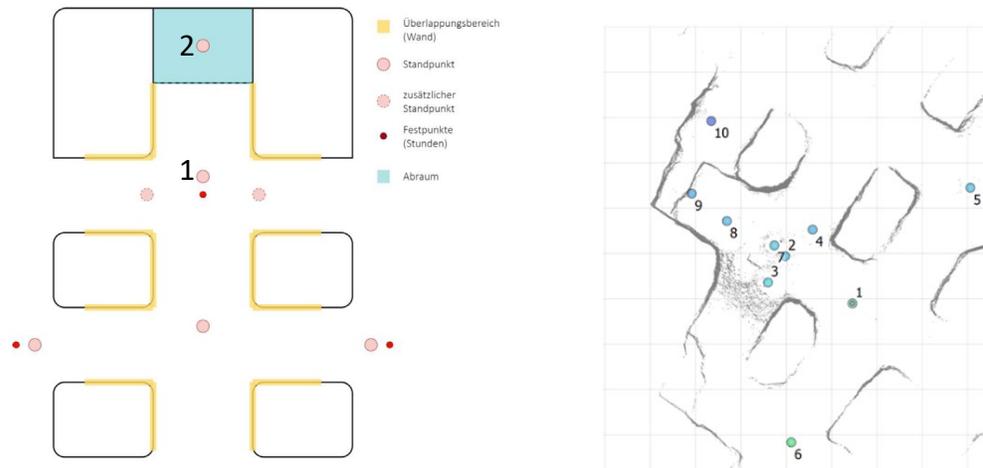


Abb. 3: Messanordnung für die lokale Volumenbestimmung des Abraums und Ergebnis der multitemporalen Messaufnahme

2.1.2 Volumenbestimmung mit Festpunktfeld und target-basierter Registrierung

In dem zweiten Ansatz der Punktwolkenregistrierung wurden künstliche Passpunkte – in diesem Fall Referenzkugeln – verwendet, um die Transformationsparameter zwischen den einzelnen Laserscans zu bestimmen. Vorteile dieses Verfahrens sind:

- Die Passpunkte können tachymetrisch, d. h. mit höherer Genauigkeit in einem übergeordneten Koordinatensystem bestimmt werden.
- Eine einfache Qualitätssicherung der Registrierung ist möglich, da die Residuen in den Passpunkten einfach zu deuten sind und Schwellwerte leicht zu definieren sind.
- Es sind keine Näherungswerte notwendig, was insb. im untertägigen regelmäßigen Abbauraster schwierig ist. Die Gefahr einen cloud-to-cloud-basierten Ansatz in einem falschen Angriff zu initialisieren, was in der Folge in einem falschen Ergebnis konvergieren könnte, ist hoch.

Eine weitere Nutzung des Passpunktfelds, die nicht direkt mit der Registrierung zu tun hat, ist dessen Nutzung für eine Maschinensteuerung des Bohrgeräts. Nach Ermittlung des optimalen Bohrlochrasters und -tiefen aus den Scandaten, vgl. Kap. 2.2, kann die Information digital an das Bohrgerät übergeben und z.B. für eine tachymetrische Gerätesteuerung genutzt werden.

Schwierigkeiten in der Umsetzung der target-basierten Methode sind hingegen die Sicherstellung der Stabilität der Festpunkte und die Sichtbarkeit einer ausreichenden Anzahl in den Scans. Eine sinnvolle Konfiguration, d. h. eine gute dreidimensionale Verteilung der Passpunkte muss gegeben sein.

Besonderes Augenmerk lag auf der stabilen Anbringung der Passpunkte in dem spröden Gestein, um auch den Erschütterungen in unmittelbarer Nähe Stand zu halten. Eingesetzt wurden Steckzapfenadapter, auf die sowohl ein Prisma als auch eine Scanningkugel aufgesetzt werden. Die Kombination ist so gewählt, dass das Zentrum der Kugel mit dem des Prismas übereinstimmt und keine rechnerische Korrektur notwendig ist.



Abb. 4: Anbringen von Gewindeaufnahmen (Dübelbolzen) für Steckzapfen

Die (Scan-)Passpunkte wurden tachymetrisch im übergeordneten Hauptzugnetz des Markscheiders (Stundenpunkte wie in Abb. 2 rechts) eingemessen, so dass sich eine Einzelpunktgenauigkeit im Bereich 1-2 mm im Abbildungssystem ergibt. Die Auswertung der Scanstandpunkte erfolgt softwarebedingt in einem lokalen System, die Auswirkungen auf die zu ermittelnden Volumina sind aber vernachlässigbar.

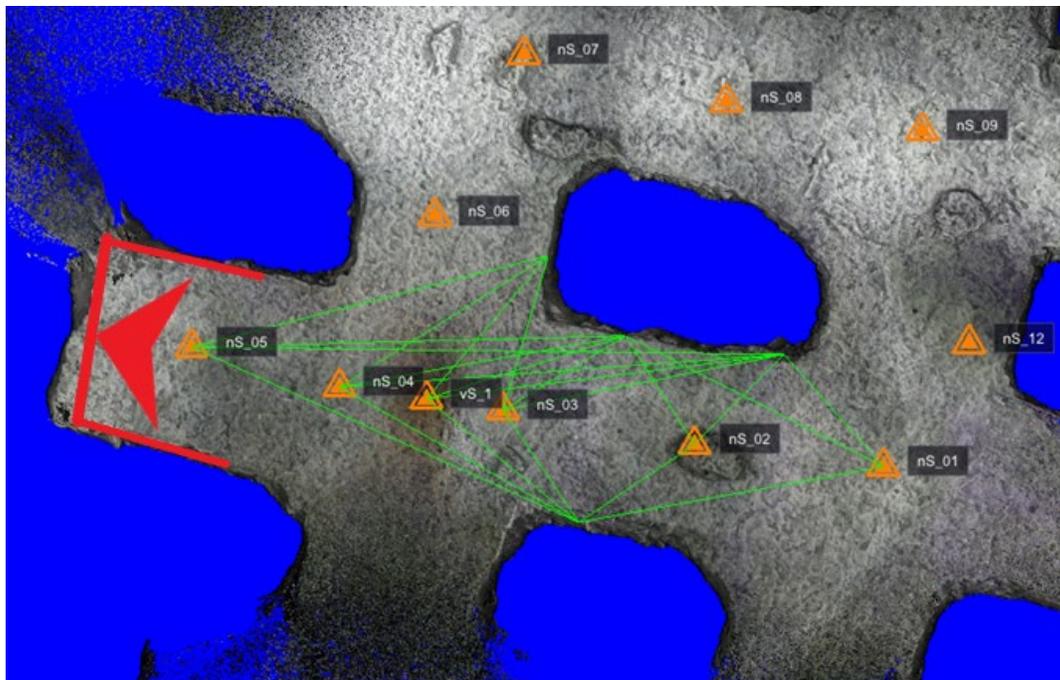


Abb. 5: Übersicht Messbereich (rot: Sprengvortrieb / orange Dreiecke: Standpunkte / grün: Passpunkt-Beziehungen)

Für die untertägige Aufnahme wurden zwei unterschiedliche terrestrische Laserscanner verwendet und deren Ergebnisse und Eignung miteinander verglichen. Für die Aufnahmen vor der Sprengung kam ein Trimble X7 zum Einsatz, nach Sprengung ein Leica RTC360. In Abb. 5 ist die Messkonfiguration für die Erfassung des rot markierten Abbaubereich als Draufsicht dargestellt. Die orangenen Dreiecke stellen die einzelnen Scanstandpunkte dar, die jeweiligen Präfixe zeigen den Messzeitpunkt vor (vS) oder nach (nS) der Sprengung. Die grünen Linien zeigen die Visuren zu den jeweils verwendeten Passpunkten. Zur besseren Interpretierbarkeit der Punktwolke, z. B. in Bezug auf die Gesteinsschichten wurde in Farbe gescannt. Hierbei nimmt der Scanner zusätzlich Fotos auf und überträgt diese Farbinformationen auf jeden einzelnen Scanpunkt. Voraussetzung dafür ist eine gute Ausleuchtung des Messbereiches durch externe Lichtquellen.

Zusammenfassend sind beide Laserscanner den Anforderungen gewachsen und lieferten Punktwolken mit einem erwartbaren, durchschnittlichen Punktrauschen von wenigen Millimetern. Auch die zusätzlichen Farbbilder wurden mithilfe intensiver externer Beleuchtung in guter Schärfe und Kontrast erstellt.

Als Ansatz für die Volumenberechnung wurde die Erzeugung eines “wasserdichten” Meshes aus den kombinierten Punktwolken vor und nach der Sprengung gewählt. Dazu wird zunächst ein Mesh der Ortsbrust nach der Sprengung inkl. ihres Vorraums erstellt und im zweiten Schritt mit dem Mesh der Ortsbrust vor der Sprengung “verschlossen” (Abb. 6). Von dem so entstandenen Volumenkörper lässt sich die Menge des herausgesprengten Materials ableiten.

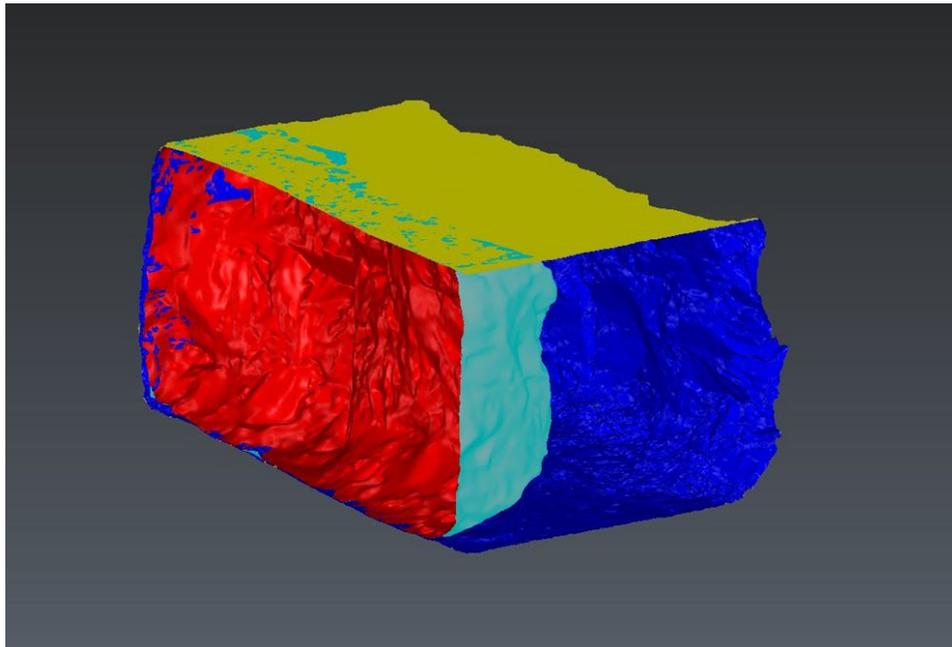


Abb. 6: Seitenansicht der verbundenen Meshes (rot: Ortsbrust vS / blau: Ortsbrust nS)

Das Ergebnis dieser Methode stellt in jedem Fall einen Näherungswert dar, denn im Zuge der Erstellung bedarf es zum einen einer Generalisierung der Mesh-Oberflächen und zum anderen der Interpretation des Bearbeiters.

Die sehr unregelmäßige und verwinkelte Felsoberfläche führt bei Verwendung der kompletten Punktwolke zu Löchern und Fehlern im Mesh, deren Behebung mit größerem manuellem Aufwand verbunden wäre. Ein vorab angewendetes Ausdünnen bzw. Filtern der Punktwolke ermöglicht hier eine schnellere und vor allem lückenlose, automatische Berechnung des Meshes. Hierfür hat sich ein Punktabstand von 20 cm als zielführend erwiesen.

Ein gewisser Interpretationsspielraum ergibt sich außerdem bei der Segmentierung der Punktwolke, also der Auswahl der jeweiligen Bereiche, die für das Mesh berücksichtigt werden. Kritisch ist hier beispielsweise der Übergang zwischen der Ortsbrust vor der Sprengung und der Punktwolke in diesem Bereich nach der Sprengung. Des Weiteren können größere Lücken in der Ortsbrust vorhanden sein, wenn diese sich in einen Kreuzungsbereich mit weiteren Nebenorten befindet. Derartige Löcher im Mesh müssen dann durch Interpolation manuell verschlossen werden.

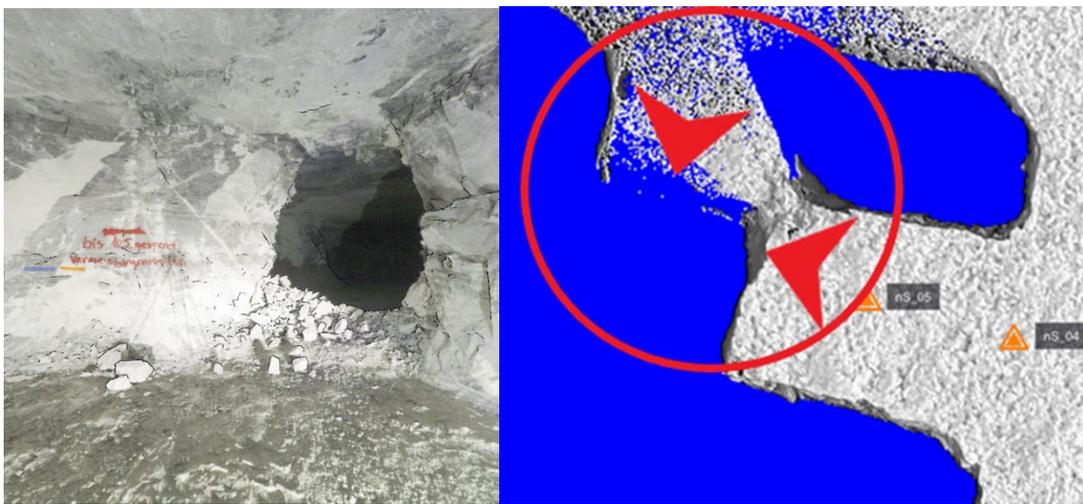


Abb. 7: Blick auf die Ortsbrust nS mit Durchbruch zum Nebenort (links) / Durchbruchssituation in der Draufsicht mit Vortriebsrichtungen (rechts)

2.2 Optimierung der Bohrtiefen

Aufgrund der geologischen Gegebenheiten und des Bohrschemas entstehen nach jeder Sprengung Unebenheiten an der neuen Ortsbrust. Erneuter Vortrieb mit gleichbleibenden Bohrtiefen führt zur Zunahme dieser Unebenheiten und einem ineffizienten Gesteinsabbau, weil die Ortsbrust mechanisch nachgearbeitet werden muss. Durch die Optimierung der Bohrtiefen wird beabsichtigt nach einer Sprengung eine neue, ebene Ortsbrust zu erreichen. Durch den Abschluss aller Bohrungen auf einer zur Vortriebsrichtung senkrecht stehenden Ebene soll dies gewährleistet werden. Das Ziel ist es die individuelle Tiefe aller Bohrlöcher auf Basis der Laserscanning-Daten zu berechnen. Dies soll auch eine Optimierung der Bohrarbeit und der eingesetzten Sprengstoffmenge ermöglichen.

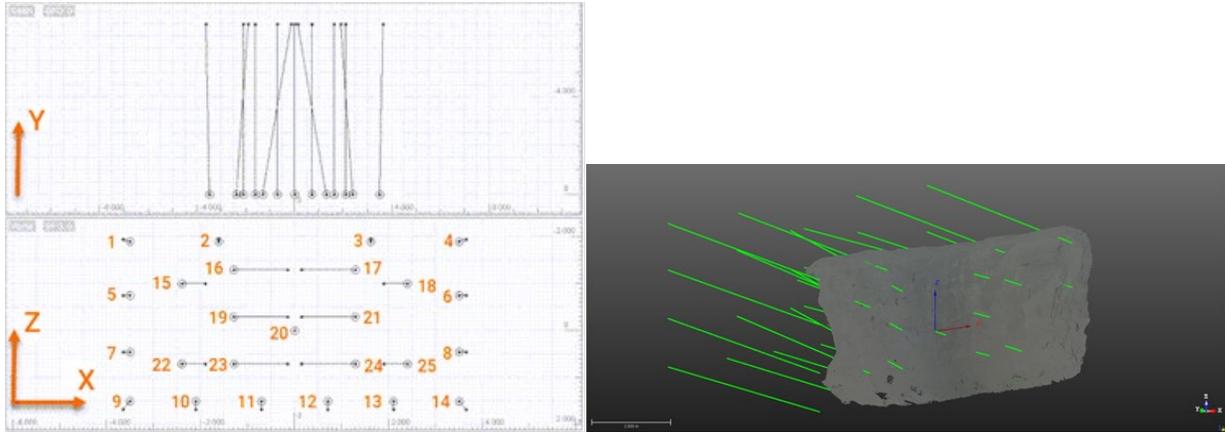


Abb. 8: Bohrlochplan und Visualisierung der Bohrlochtiefen in Abhängigkeit der aktuellen Ortsbrust

Die Bohrungen orientieren sich an der “Zeigerschicht”, die händisch auf der Ortsbrust durch Sprühfarbe markiert wird. Zur Ermittlung der optimalen Bohrlochtiefen wird die Ortsbrust mit dem TLS gescannt. Der relevante Teil der entstehenden Punktwolke wird ausgeschnitten und so orientiert, dass die Vortriebsrichtung in y-Achsenrichtung zeigt. Der Sprühmarkierung dient als Ursprung des Koordinatensystems. Die x,z-Ebene steht senkrecht zur Vortriebsrichtung, also zur y-Achse. Das 3D-Bohr raster (Abb. 8 links) wird im lokalen Koordinatensystem eingepasst. Entlang der Vortriebsrichtung werden die Bohrlöcher unter Berücksichtigung des Bohrwinkels bis zu einer vorgegebenen einheitlichen Tiefe visualisiert und mit der gemessenen Ortsbrust verschnitten. Dadurch ergeben sich die in Abb. 8 (rechts) gezeigten aus der Ortsbrust herausstehenden Linienstücke, um deren Länge die jeweilige Bohrung gekürzt wird, damit die Bohrlochenden nach Abschluss aller Bohrungen in einer Ebene liegen. Die Untersuchungen zur Optimierung des Bohrrasters erfolgten in Trimble Realworks sowie in CloudCompare.

Das Testszenario hat gezeigt, dass die Optimierung der Bohrlochtiefen aus 3D-Punktwolken möglich ist. Für eine effiziente Umsetzung ist eine automatische Maschinensteuerung notwendig.

2.3 Dokumentation des Abbaus

Im Rahmen der Verordnung über markscheiderische Arbeiten und Beobachtungen der Oberfläche (Markscheider-Bergverordnung - MarksBergV), ist der Betreiber des Gewinnungsbetriebes dazu verpflichtet den Abbau zu dokumentieren. Hierfür wurde ein Ansatz zur Dokumentation des Abbaus mit terrestrischem Laserscanning ausgearbeitet und das o.g. Festpunktfeld (Kap. 2.1.2) verwendet. Mithilfe der target-basierten Registrierung ist es möglich die Scans (automatisch) im übergeordneten Koordinatensystem zu verorten, zu georeferenzieren. Die Abbaugrenzen sind in den Laserscans ersichtlich und können lagegenau in das Risswerk / den Grubenplan übernommen werden.

Mit heutigen Softwarepaketen ist es des Weiteren möglich eine Punktwolke der gesamten Grube vorzuhalten, d. h. in einem dreidimensionalen GIS (Geoinformationssystem) die Geometrie zu dokumentieren und laufend fortzuschreiben. Aufgrund der Größe des Gebietes ist allerdings eine verzerrungsfreie Abbildung in der Ebene mit Maßstab 1 nicht möglich. Andererseits ist es in den gängigen Softwareprodukten zur Punktwolkenbearbeitung und -speicherung nicht möglich geodätische Korrekturen für Projektion und Höhe anzubringen. Mit der Verwendung der Passpunkte im

übergeordneten Koordinatensystem– in diesem Fall einer Gauß-Krüger-Projektion– werden die einzelnen Punktwolken mittels einer Affinen Transformation georeferenziert. Fehler aus den nicht reduzierten Strecken kommen somit nur innerhalb einer einzelnen Punktwolke vor und sind aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung vernachlässigbar. In der Gesamtsicht, der Positionierung einzelner eigenständig georeferenzierter Punktwolken im übergeordneten System, ist die Abbildung aber korrekt.

In dem Gruben-GIS können Veränderungen über die Zeit dokumentiert aber auch (flächenhafte) Deformationen ermittelt werden, wenn Bereiche zeitlich versetzt mehrfach erfasst werden.

3 Fazit & Ausblick

Im Laufe des Projektes konnten die Berechnung des Abbauvolumens, die Sicherstellung einheitlicher Bohrtiefen sowie die Dokumentation des Abbaus erfolgreich exemplarisch realisiert werden. Die Optimierungsansätze wurden mit verschiedenen Softwarepaketen für die 3D-Punktwolkenauswertung erprobt.

Bei den eingesetzten Programmen wurden Arbeitsabläufe unter Berücksichtigung der Integrierbarkeit in vorhandene Prozessketten durchlaufen und dahingehend kritisch beurteilt. Dabei stellte sich eine organisationstechnische Zweistufenlösung als zielführend heraus. Die 3D-Datenerfassung, -auswertung und -weiterverarbeitung soll durch firmeninternes Personal seitens des Bergbauunternehmens bewerkstelligt werden. Die Schulung des Personals des Bergbauunternehmens in Messung und Auswertung von Laserscanningdaten für wiederkehrende Abläufe, sowie Grundlagenstellung und Integration in die Prozessketten ist extern beabsichtigt.

Weitergehende Ziele sind die Weitergabe des abgeleiteten Bohrrasters an die Maschinensteuerung des Bohrwagens zur automatisierten Einstellung der optimalen Position der Bohrlöcher und der Bohrtiefen. Die Positionierung und Ausrichtung des Bohrwagens, kann dabei mithilfe eines im Festpunktfeld stationierten Tachymeters maschinengestützt/automatisiert erfolgen. Die Erkennung der “Zeigerschicht” (Charakteristische Gesteinsschicht in der Lagerstätte) im digitalen Datensatz (ggfls. IR-Bild des Laserscanners) und die damit verbundene automatische Höheneinstellung des Bohrrasters, die Optimierung der Bohrtiefen mit dem Ziel der Reduktion der Bohrungen und des Sprengstoffverbrauchs sind für Folgearbeiten vorgesehen.

4 Literaturverzeichnis

- ARCH COAL, 2023: ABC 123: Testing Site / Course zitiert nach Arc Resources, Inc., <https://www.e-education.psu.edu/geog000/node/900>, letzter Zugriff 19.02.2023.
- DEGEN, I., WEBER, L. & BRUNN, A., 2014: Erstellung eines 3D-Höhlenmodells einer Tropfsteinhöhle. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., **23**, Seyfert, E., Gülch, E., Heipke, C., Schiewe, J. & Sester, M. (Hrsg.).
- HÖBELBART, D.; RICHTER, O., MARTIN, C., MARTIENßEN, TH. & WANDINGER, M., 2018: Erste Erfahrungen mit dem handgeführten Laserscanner ZEB-REVO bei Vermessungsarbeiten im Altbergbau am Südtiroler Schneeberg. 18. Altbergbau-Kolloquium, Wieliczka.

- JAWECKI, B., DABEK, P.B., PAWESKA, K. & WIE, X., 2018: Estimating Water Retention in Post-mining Excavations using LIDAR ALS Data for Strzelin Quarry in Lower Silesia. *Mine Water and the Environment*, **37**, 744-753.
- KAJZAR, V., KUKUTSCH, R. & HEROLDOVA, N., 2015: Verifying the Possibilities of using a 3D Laser scanner in the Mining Underground. *Acta Geodyn. Geomater.*, 1/12 (177), 51-58.
- KUCHENBECKER, R., 2010: Sub-Terrestrisches Laserscanning – Anwendungsbeispiele aus dem Bergbau unter Tage. DVW-Schriftenreihe, **64**, TLS 2010.
- LAUX, D., 2017: Terrestrisches Laserscanning zur Quantifizierung von Trennflächenparametern für statistisch signifikante Discrete-Fracture-Network-Modelle. Dissertation an der TU Darmstadt.
- MATWIJ, W., GRUSZCZYNSKI, W., PUNIACH, E. & CWIAKALA, P., 2021: Determination of Underground-mining Displacement Fields using Multitemporal TLS Point Cloud Registration. *Measurement*, **180**.
- OPARIN, V.N., SEREDOVICH, V.A., YUSHKIN, V.F., IVANOV, A.V. & PROKOP'eva, S.A., 2007: Application of Laser Scanning for Developing a 3D Digital Model of an Open-pit Side Surface. *Journal of Mining Science*, **43**(5).
- PEJIC, M., 2013: Design and Optimisation of Laser Scanning for Tunnels Geometry Inspection. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **37**, 199-206.
- STUDNICKA, N. & GROISS, B., 2019: Untertage-Aufnahme und anschließende Demokratisierung von terrestrischen Laserscandaten. 20. Geokinematischer Tag, Freiberg, 172-181.
- TSCHARF, A., 2018: Stand der Technik in der Tagbauvermessung. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, **163**, 57-63.
- WUJANZ, D., BARAZETTI, L., PREVITALI, M. & SCAIONI, M., 2019: A comparative study among three registration algorithms: Performance, quality assurance and accuracy. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **42**(2/W9), 779-786.