



Einfluss der Georeferenzierung auf die absolute Rekonstruktionsgenauigkeit der photogrammetrischen UAV-gestützten Tagebauvermessung

Katharina Lobnig · Alexander Tscharf · Gerhard Mayer

Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft, Department Mineral Resources Engineering, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Eingegangen am 16. Juni 2015; angenommen am 18. Juni 2015; online publiziert am 7. August 2015

Zusammenfassung: Hervorgerufen durch den in den letzten Jahren vermehrten Einsatz unbemannter Flugsysteme in den unterschiedlichsten Bereichen der Vermessung, gewinnt, vor allem vor dem Hintergrund der Ergebnisverantwortlichkeit, auch die Frage nach der erreichten Genauigkeit zusehends an Bedeutung. Einer der Haupteinflussfaktoren auf die Güte der Ergebnisse ist mit Sicherheit die Georeferenzierung. Aufgrund der Tatsache, dass rein bildbasierte Rekonstruktionsverfahren nicht in der Lage sind, metrisch korrekte Ergebnisse in einem übergeordneten Koordinatensystem zu generieren, ist der Referenzierungsschritt unabhängig von der Bildaufnahme bei jeder Vermessung durchzuführen.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft der Montanuniversität Leoben der Einfluss der Georeferenzierung auf die Genauigkeit photogrammetrischer Rekonstruktionen näher untersucht. Im Speziellen wurde der Einfluss der räumlichen Passpunktanordnung auf die Genauigkeit der Transformation in Form einer punktwweisen Analyse am Beispiel mehrerer unabhängiger Befliegungen einer typischen Bruchwand am Steirischen Erzberg untersucht. Die Ergebnisse zeigen deutlich den systematischen Zusammenhang zwischen der Passpunktanordnung und der erreichbaren Genauigkeit. Zur Gewährleistung definierter Genauigkeiten im gesamten Vermessungsgebiet ist eine gleichmäßige räumliche Verteilung der Passpunkte in der ganzen Szene unerlässlich.

Schlüsselwörter: UAV-Vermessung, Photogrammetrie, Georeferenzierung, Räumliche Passpunktanordnung

Dipl.-Ing. A. Tscharf (✉)
Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft,
Department Mineral Resources Engineering, Montanuniversität
Leoben,
Franz-Josef-Str. 18,
8700 Leoben, Österreich
E-Mail: alexander.tscharf@unileoben.ac.at

Influence of Geo-referencing on the Absolute Accuracy of UAV-based Photogrammetric Reconstructions in Open Pit Surveying

Abstract: Caused by increasing use of unmanned aerial systems in the various fields of surveying, the question of accuracy has been growing in importance. One of the main accuracy influencing factors is certainly the georeferencing. Due to the fact that purely image-based reconstruction methods are not able to generate metrically correct results in a defined coordinate frame, the step of referencing has to be carried out regardless of the images captured.

For this reason, a bachelor thesis concerning the influence of geo-referencing on the accuracy of photogrammetric reconstructions was carried out at the Chair of Mining Engineering and Mineral Economics at Montanuniversität Leoben. Specifically, the influence of the spatial distribution of control points was tested in form of a point by point analysis based on several independent aerial surveys of a typical wall at the Styrian Erzberg. The results clearly demonstrate the systematic relationship between the control point assembly and the achievable accuracy. To ensure defined accuracy in the entire survey area, a uniform spatial distribution of the control points in the whole scene is essential.

Keywords: UAV based surveying, Photogrammetry, Georeferencing, Control point configuration

1. Einleitung und Motivation

Die markscheiderische Vermessung ist eine der wichtigsten Aufgaben in der Mineralrohstoffgewinnung. Sie hat das Ziel, in allen Phasen des Mineralrohstoffprojekts, beginnend von der Erkundung über die Erschließung und Gewinnung bis hin zur Nachsorge, die notwendigen

raumbezogenen Daten zu generieren und zu pflegen. Die regelmäßige Vermessung des Betriebes im Rahmen der marktscheiderischen Betriebs- und Produktionskontrolle ist zur Nachtragung des Bergbaukartenwerks (§ 42 Marktscheideverordnung 2013 [1]), zur Massenermittlung sowie auch zur Qualitätssteuerung unbedingt erforderlich.

Die rasanten technologischen Entwicklungen im Bereich der unbemannten Luftfahrzeuge (unmanned aerial vehicle, UAV), verstärkt durch die stetigen Verbesserungen automatisierter Bildauswertungen, führen zu einem vermehrten Einsatz dieser Technologien für vermessungstechnischen Anwendungen auch im Bergbau [2]. Diese Systeme vereinen die Vorteile der luftgebundenen und der terrestrischen Photogrammetrie, sind in der Lage, nahezu jeden Aufnahmepunkt im Raum einzunehmen und können so gegenwärtig und künftig viele Vermessungsaufgaben schneller, flexibler, kostengünstiger und vor allem sicherer erledigen [3, 4, 5].

Vor allem vor dem Hintergrund der Ergebnisverantwortlichkeit gewinnt auch die Frage nach der tatsächlich erreichten Genauigkeit und deren Reproduzierbarkeit zusehends an Bedeutung. Während die Genauigkeit der klassischen Photogrammetrie hinlänglich untersucht ist, so zeigen die neuesten Ergebnisse, dass zur Gewährleistung definierter Genauigkeiten aufgrund der Vielzahl an genauigkeitsrelevanten Einflussparametern eine sorgfältige Flugplanung unerlässlich ist [5].

Rein bildbasierte Rekonstruktionen liefern zwar weitestgehend verzerrungsfreie Ergebnisse, jedoch liegen die 3D-Punkte in einem zufälligen und nicht metrischen Koordinatensystem vor. Unabhängig davon, wie oft und in welcher Weise die Bruchwand befliegen wird und wie viele und in welcher Qualität Fotos aufgenommen werden, muss der Referenzierungsschritt immer durchgeführt werden.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit [6] am Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft der Montanuniversität Leoben wurde im Speziellen der Einfluss der Georeferenzierung bzw. Skalierung auf die absolute Rekonstruktionsgenauigkeit der photogrammetrischen UAV-gestützten Tagebauvermessung am Beispiel einer mittels Oktokopter befliegenen Bruchwand am Steirischen Erzberg untersucht. Durch das virtuell verschiedene Anordnen und Erstellen unterschiedlicher Passpunkt-

konfigurationen sollte die Genauigkeit anhand eines Punkt-zu-Punkt-Vergleichs zu konventionell vermessenen Referenzpunkten untersucht und quantifiziert werden. Ziel war es, eine optimale beziehungsweise an den gewünschten Zweck angepasste Passpunktconfiguration zu erstellen, um den absoluten Punktabstand zur Referenzvermessung möglichst gering zu halten.

2. Theoretische Grundlagen

Die Aufgabe der Photogrammetrie ist es, aus Bildern bestimmte inhaltliche Daten zu liefern. Sie verbindet die inhaltliche Beschreibung sowie die geometrischen Eigenschaften der jeweiligen Objekte, die durch die verschiedenen Methoden der Photogrammetrie erfasst wurden. Das oberste Ziel der Photogrammetrie ist demnach eine exakte dreidimensionale Nachbildung der aufgenommenen Szene.

Vollautomatische, bildgestützte 3D-Rekonstruktionen wurden zunächst in der Bildverarbeitung entwickelt, werden in den letzten Jahren jedoch zunehmend auch für photogrammetrische Anwendungen eingesetzt [7]. Sie können aus einer Vielzahl an (ungeordneten) Bildern die äußere Orientierung der Kamera und eine punktbasierte Szenenrekonstruktion errechnen. Je nach Anwendung können die erhaltenen 3D-Rekonstruktionen in weitere Folge noch verdichtet beziehungsweise zu digitalen Oberflächenmodellen vermascht werden.

Abbildung 1 stellt schematisch den Ablauf bei der bildbasierten 3D-Rekonstruktion dar, der im Folgenden noch näher beschrieben wird.

2.1 Structure from Motion

Als Produkt der Flexibilität müssen bei der UAV-gestützten Aufnahme ähnlich der terrestrischen Nahbereichsphotogrammetrie zumeist beliebige und stark unregelmäßige Bildverbände ausgewertet werden. Die Bestimmung der relativen beziehungsweise äußeren Orientierung (Lage der Bilder zum Zeitpunkt der Aufnahme), die in den folgen-

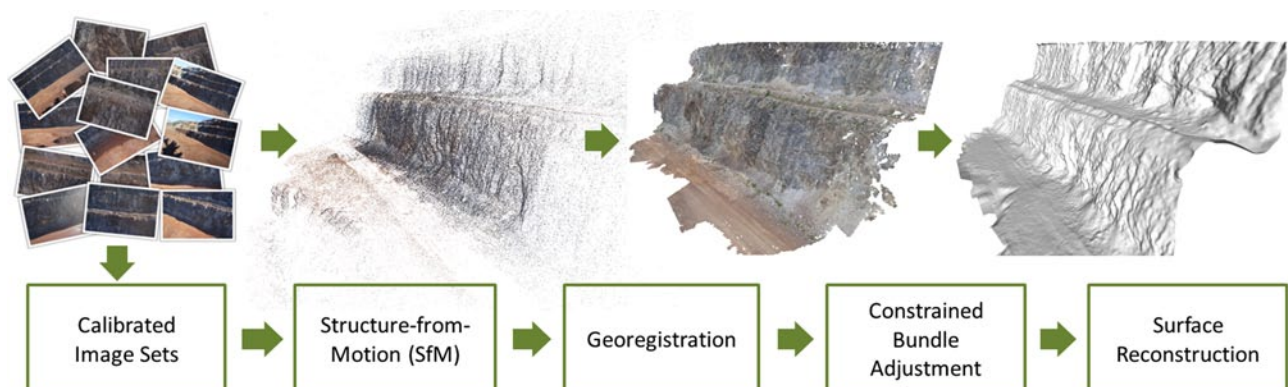


Abb. 1: Workflow bei der 3D-Objektrekonstruktion aus Bildern

den bei [5] näher beschriebenen Teilschritten verwirklicht wird, stellt dabei eine der wesentlichsten Aufgaben dar:

1. Kamerakalibrierung: Bestimmung der inneren Orientierung (Fehllage des Bildhauptpunkts, fokale Länge und Verzeichnungsparameter)
2. Merkmalsextraktion und Korrespondenzanalyse: Finden von Features und Berechnung der Korrespondenzen basierend auf der euklidischen Distanz zwischen den Deskriptoren im Eigenschaftsraum [8]
3. Relative Orientierung und Bündelblockausgleich: Schätzung der relativen Lage der Bilder zueinander und anschließende simultane Optimierung der intrinsischen und extrinsischen Parameter, sowie der 3D-Objektpunkte [9]

2.2 Georeferenzierung

Wie bereits erwähnt, ist rein bildbasiert eine metrisch korrekte Rekonstruktion des aufgenommenen Objektes nicht möglich, und die dreidimensionalen Rekonstruktionen befinden sich zunächst aufgrund der fehlenden Längenmessung lediglich in einem lokalen Modellsystem. Dieses lokale Koordinatensystem der rekonstruierten Kameras und Objektpunkte wird anfänglich durch eines der gefundenen Kamerapaare festgelegt.

Eine metrische Skalierung der Punktwolke kann durch die Integration zumindest einer bekannten Distanz in die Auswertung erreicht werden, was wiederum durch einen in der Szene und in der Rekonstruktion eindeutig zuzuordnenden Maßstab, wie zum Beispiel einen bekannten Abstand zwischen zwei Kamerapositionen oder die Distanz zwischen zwei markanten Punkten erfolgen kann. Für vermessungstechnische Anwendungen ist jedoch die absolute Position der Objektpunkte von wesentlicher Bedeutung, wozu das Modell mittels räumlicher Ähnlichkeitstransformation (3D-Helmert Transformation, 7-Parameter Transformation, beziehungsweise „Similarity Transform“) unter der Verwendung von zumindest 3 Vollpasspunkten vom Modellsystem in das übergeordnete Referenzsystem transformiert wird. Bei den angesprochenen sieben Parametern handelt es sich um drei Translationen (in x , y und z), drei Rotationen (um die x -, y - und z -Achse) und um einen für alle drei Raumrichtungen einheitlichen Maßstab. Da das Modell abgesehen von Randdefekten in der Regel weitestgehend verzerrungsfrei ist, ist ein globaler Maßstabsfaktor ausreichend und es kann von einer Ähnlichkeitstransformation gesprochen werden. Nachstehend sind die Transformationsgleichungen formal zusammengefasst:

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + m * \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$$

mit

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix}$$

Die notwendigen sieben Transformationsparameter ($x_0, y_0, z_0, \omega, \varphi, \kappa$ und m) werden auf Basis von mindestens drei 3D-Passpunkten, deren Koordinaten in beiden Systemen bekannt sind, nach der Methode der kleinsten Quadrate geschätzt.

3. Datengrundlage und Methodik

Wie oben angeführt, wurden die vorliegenden Untersuchungen anhand einer Bruchwand am Steirischen Erzberg durchgeführt. Die Daten stammen aus zwei unabhängigen Befliegungen desselben Objekts, wodurch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet wird.

3.1 Beschreibung der verwendeten Daten

Die angesprochene Bruchwand ist rund 100 m lang und 24 m hoch. Zur Quantifizierung der erreichten Genauigkeiten wurde in der Bruchwand und auf den angrenzenden Etagen ein insgesamt 129 Punkte umfassendes Referenzpunktfeld aus speziell signalisierten und mit konventionellen Methoden hochgenau eingemessenen Punkten angelegt. Die Punkte wurden auf zwei unterschiedliche Arten signalisiert, wobei die individuell identifizierbaren, binär codierten Marker im Kopf- und Fußbereich der Bruchwand hauptsächlich als Passpunkte und die in der Bruchwand befestigten Targets als Evaluierungspunkte verwendet wurden. Abbildung 2 gibt einen Überblick über das Testgebiet als dichte 3D-Rekonstruktion der beschriebenen Bruchwand und zeigt auch exemplarisch die beiden beschriebenen Signalisierungsvarianten.

Als Flugplattform diente der Oktoorkopter AscTec Falcon 8, ausgestattet mit einer Sony NEX 5 N Systemkamera mit einer Auflösung von 16 Mp und einer fixen Brennweite von 16 mm. Bei der Bildaufnahme wurde darauf geachtet, das Objekt aus unterschiedlichen Höhen und Blickwinkeln aufzunehmen und besonders auch die potentiellen Passpunkte ausreichend oft in den Bildern zu erfassen. Um einen signalisierten Punkt über räumlichen Vorwärtsschnitt zu triangulieren und ihn in weiterer Folge auch als Passpunkt zur Ermittlung der Transformationsparameter verwenden zu können, muss dieser in zumindest zwei Bildern robust detektiert werden.

Abb. 2: Test Site am Steirischen Erzberg, ausgerüstet mit insgesamt 129 Referenzpunkten



3.2 Methodik

Das Ziel der hier beschriebenen Bachelorarbeit war es, den Einfluss der Passpunktanordnung auf die absolute Rekonstruktionsgenauigkeit der photogrammetrischen 3D-Punkte zu studieren. Wie bereits erwähnt, wurde ein dichtes Referenzpunktfeld angelegt und der Fokus in den weiteren Untersuchungen ausschließlich auf diese Punkte gelegt.

Unter Verwendung von rmGEO wurden virtuell verschiedene Transformationsparametersätze auf Basis unterschiedlicher Passpunktanordnungen berechnet und anschließend auf die verbliebenen Referenzpunkte angewandt. In weiterer Folge wurden die so erhaltenen Koordinaten mit jenen aus der konventionellen Vermessung verglichen und statistisch ausgewertet. Neben den absoluten Fehlern je 3D-Punkt wurden zusätzlich noch mittlere Fehler für jede Passpunktanordnung und zur einheitlichen Quantifizierung der untersuchten Varianten auch die aufgespannte Fläche und der Umfang der gewählten Passpunkte berechnet.

Die Systematik der gewählten Passpunktanordnungen bezieht sich auf ihre Lage, Verteilung und Anzahl. Aufgrund der höheren praktischen Relevanz wurden zunächst ausschließlich Punkte auf den Etagen und nicht direkt in der Bruchwand als Passpunkte herangezogen, und erst später im Sinne der Vollständigkeit noch der Einfluss von Passpunkten unmittelbar in der Bruchwand studiert.

Insgesamt wurden 30 verschiedene Konfigurationen anhand des Modells einer der beiden Befliegungen getestet, wobei sechs Anordnungen mit je vier, vier Anordnungen mit fünf, fünf Anordnungen mit sechs, zwei Anordnungen mit sieben, sowie fünf Konfigurationen mit acht und eine Anordnung mit neun Passpunkten gewählt wurden. Zusätzlich wurde noch je eine Konfiguration mit 11, 12, 13 beziehungsweise 15 Passpunkten, zwei Varianten mit insgesamt 14 Punkten und schließlich eine Konfiguration mit allen 38 binär codierten Markern als Passpunkt analysiert. Hinsichtlich der räumlichen Verteilung wurde versucht, ein möglichst breites Spektrum abzudecken. So reicht die Anordnung von einseitigen Geraden, zu einzelnen Punktclustern, hin zu Verteilungen nur an den oberen

und unteren Ecken der Szene, bis hin zu einer gleichmäßigen Verteilung rund um die Bruchwand.

Zur Verifizierung der Ergebnisse wurden aus den beschriebenen 30 Transformationen jeweils jene drei Passpunktanordnungen (PA) ausgewählt, die den geringsten beziehungsweise den höchsten mittleren Fehler auswiesen. In weiterer Folge wurden basierend auf denselben Konfigurationen die Transformationsparameter anhand des Modells aus der zweiten Befliegung geschätzt und die Ergebnisse in gleicher Weise analysiert.

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigen deutlich einen systematischen Einfluss der räumlichen Punktanordnung und die Fehlerbeiträge reichen von wenigen Zentimetern (3,3 cm) bis hin zu 3 m. In den meisten Fällen können jedoch, wie in Abb. 3 ersichtlich, mittlere Genauigkeiten von unter 20 cm beziehungsweise sogar 10 cm erreicht werden, womit auch die Vorgaben der Markscheideverordnung 2013 [1] eingehalten werden können.

Die in Abb. 3 klar erkennbaren negativen Ausreißer stellen Konfigurationen mit nahezu kollinearer Anordnung der Passpunkte dar und führen somit naturgemäß zu den schlechtesten Ergebnissen. Die Rekonstruktion kippt um die Achse der Passpunkte, was sich in zunehmenden Fehlern bei zunehmendem Abstand von der angesprochenen Achse äußert.

Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse in Form der einzelnen Fehler an den Evaluierungspunkten können deutlich systematische Zusammenhänge zwischen der Passpunktanordnung und der räumlichen Fehlerverteilung erkannt werden. Neben dem bereits erwähnten Kippen der gesamten Rekonstruktion um Achsen von Passpunkten können auch systematische Zu- beziehungsweise Abnahmen der Fehler an den Rändern sowie unterschiedlich stark fehlerbehaftete Bereiche im Zusammenhang mit der Passpunktanordnung erkannt werden. So zeigen Evaluierungspunkte, die nahe an den Passpunkten liegen, systematisch geringere Fehler als jene mit größerem Abstand oder außerhalb des Passpunktfeldes gelegene „Check Points“. Diese Effekte können teilweise auch bei gleichmäßiger Verteilung der Passpunkte im gesamten

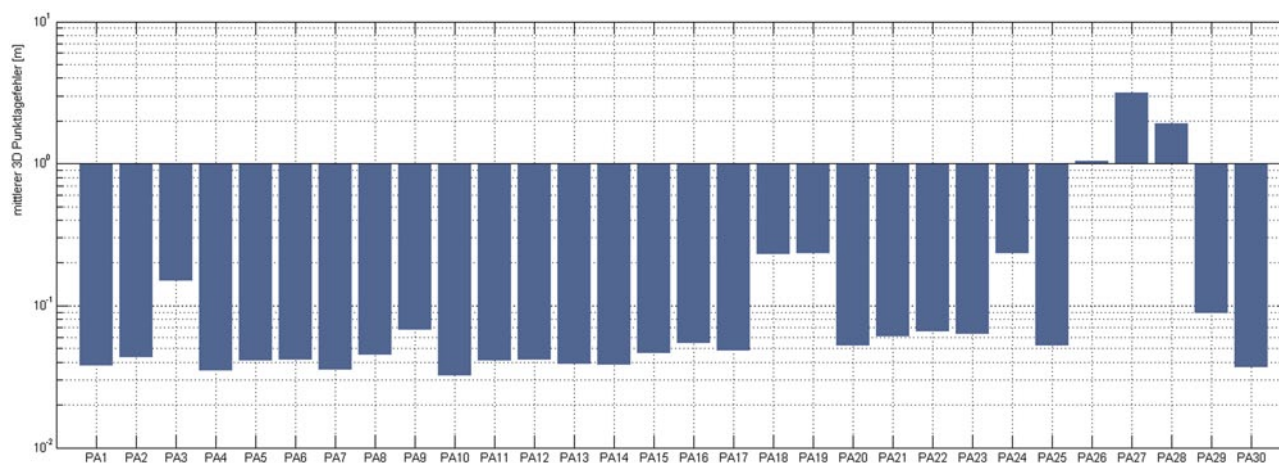


Abb. 3: Gegenüberstellung der in logarithmischer Skalierung dargestellten mittleren Fehler für die untersuchten 30 Passpunktkonfigurationen

Gebiet erkannt werden, wobei grundsätzlich gleichmäßig und repräsentativ in der gesamten Szene verteilte Passpunkte auch zu einer gleichmäßigen Fehlerverteilung führen.

Außerdem zeigt sich, dass zwar mit zunehmender Anzahl an Passpunkten die Genauigkeit tendenziell zunimmt, die höchsten Genauigkeiten jedoch mit fünf bis acht Punkten erreicht werden können.

Zuletzt konnte noch erkannt werden, dass durch die Hinzunahme von direkt in der Bruchwand befindlichen Passpunkten die Genauigkeit der Ergebnisse nochmals gesteigert werden kann. In der praktischen Anwendung wird dies jedoch zumeist keine ernst zu nehmende Option darstellen, weil eine Signalisierung von Punkten in potentiell gefährlichen Bruchwandbereichen durch den Einsatz der berührungslosen UAV-Vermessung ja gerade vermieden werden soll.

5. Schlussfolgerungen und kritische Ergebnisbetrachtung

Am Beispiel der hier untersuchten Bruchwand konnte gezeigt werden, dass ein systematischer Einfluss der räumlichen Passpunktanordnung bei der 3D-Ähnlichkeitstransformation von photogrammetrischen Modellen in ein übergeordnetes metrisches Koordinatensystem vorhanden ist. Es zeigte sich jedoch auch, dass die Genauigkeit im Mittel nicht so sensibel auf Änderungen der Passpunktanordnung reagiert und in der Regel die Genauigkeitsanforderungen der Marktscheideverordnung 2013 [1] eingehalten werden können.

Zur Gewährleistung einer definierten Genauigkeit im gesamten Vermessungsgebiet ist eine gleichmäßige räumliche Verteilung der Passpunkte zu empfehlen, da sonst systematische Schief lagen in den resultierenden Fehlerverteilungen erkannt werden können. Die Passpunkte sollten räumlich repräsentativ für das gesamte Gebiet sein, also besonders auch in unterschiedlichen Höhen situiert werden. Überdies führt eine hohe Anzahl an Passpunkten

nicht zwingendermaßen zu einer hohen Genauigkeit. Im vorliegenden Fall konnten die besten Ergebnisse mit fünf bis acht Punkten erreicht werden.

Zusätzlich zur räumlichen Verteilung der Passpunkte hat auch deren photogrammetrische Erfassung und infolgedessen auch die Güte der Modellkoordinaten einen starken Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit. Während der Bildaufnahme muss unbedingt darauf geachtet werden, die Passpunkte entsprechend oft abzubilden. Aus diesem Grund sollten die Passpunkte nicht zu sehr am Rand des Bildblocks positioniert werden, da die Randbereiche in der Regel weniger redundant erfasst werden.

Durch die Untersuchung mehrerer unabhängiger Datensätze konnten im Rahmen der vorgestellten Analyse reproduzierbare Ergebnisse abgeleitet werden. Ein Punkt, der jedoch mit Sicherheit nicht außer Acht gelassen werden darf, ist die Tatsache, dass alle verwendeten Datensätze ein und dasselbe Objekt zeigen. Die Geometrie eines klassischen Hartgesteinstagebaus ist allerdings sehr speziell, was die Möglichkeit, allgemeine Aussagen abzuleiten, doch stark beschränkt. Für zukünftige Untersuchungen sollten deshalb auf jeden Fall auch flächigere Objekte befliegen werden, um allgemein gültige Aussagen zum Einfluss der Passpunktanordnung abzuleiten.

Literatur

1. Marktscheideverordnung 2013, Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft, Familie und Jugend über Vermessungen beim Bergbau, das Bergbaukartenwerk und die Erfassung von Bodenbewegungen 2013, BGBl. II Nr. 437/2012
2. Briese, C.; Fortner, R.; Sager, P.; Pfeifer, N.: Vom Modellflughobby zu unbemannten Flugsystemen für die Geodatenerfassung, VGI Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 101 (2013), H. 2+3, S. 64–74
3. Rumpler, M.; Hoppe, C.; Wendel, A.; Mayer, G.; Bischof, H.: Echtzeit-Qualitätsüberprüfung für zuverlässige UAV-gestützte Bildatenerfassung und exakte, automatisierte Mehrbildauswertung, VGI Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 101 (2013), H. 2+3, S. 88–100
4. Mayer, G.; Pilgram, R.: Neue Entwicklungen in der Tagebauvermessung, Schriftenreihe des Instituts für Marktscheidewesen und Geodäsie (2013–1), S. 36–48.

-
5. Tscharf, A.; Rumpler, M.; Mayer, G.; Bischof, H.: Zur Frage der Genauigkeit UAV-gestützter Tagebauvermessung, Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie (2014–1), S. 178–189
 6. Lobnig, K.: Einfluss der Georeferenzierung auf die absolute Rekonstruktionsgenauigkeit der photogrammetrischen UAV-gestützten Tagebauvermessung, Bachelorarbeit, Leoben, Montanuniversität, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft, 2014
 7. Hartley, R.; Zissermann, A.: Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2000
 8. Lowe, D.: Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision* 60 (2004), iss. 2, pp. 91–110
 9. Triggs, B.; McLauchlan, P.; Hartley, R.; Fitzgibbon, A.: Bundle adjustment – A modern synthesis, *Vision Algorithms: Theory and Practice* (2000), pp. 298–375