

UAV Vermessung im Bergbau – Stand der Forschung und Ausblick

Alexander Tscharf¹, Markus Rumpler², Gerhard Mayer¹, Friedrich Fraundorfer², Horst Bischof²

¹Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft,
²Technische Universität Graz, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen

ZUSAMMENFASSUNG:

Die Herstellung von optisch realistischen und hochgenauen 3D Modellen stellt eine zentrale Frage im Bereich der geodätischen und markscheiderischen Forschung dar. Mit dem zusehenden Aufkommen unbemannter Flugsysteme haben sich photogrammetrische Messsysteme als erschwingliche und flexible Alternative etabliert, wobei zur Gewährleistung definierter Genauigkeiten und somit zur Verwendung vergleichbarer Systeme für vermessungstechnische Anwendungen eine sorgfältige Flugplanung, Durchführung und Auswertung unbedingte Erfordernisse sind.

Im vorliegenden Beitrag wird einerseits auf die laufenden Forschungen zu Genauigkeit und Anwendbarkeit der UAV-basierten Vermessung im Bergbau eingegangen und andererseits werden zukünftige Forschungstendenzen aufgezeigt, wodurch in neue, bislang nicht erreichbare Anwendungsfelder, vorgedrungen werden könnte.

ABSTRACT:

Creating and visualizing realistic and accurate 3D models is a central ambition of research in the field of geodesy and mine surveying. Due to the increasing affordability of unmanned aerial vehicles (UAVs) photogrammetric systems have been well established as affordable and flexible alternative. In order to ensure a certain accuracy and thus to enable the usage for surveying applications, careful flight planning, implementation and evaluation are of special importance.

This paper discusses the ongoing research on accuracy and applicability of UAV-based mine surveying as well as future research tendencies, whereby new, currently not achievable fields of application could be investigated.

1 Einleitung

Der Einsatz unbemannter Flugsysteme (unmanned aerial vehicle, UAV) zur Erfassung von Geodaten aus der Luft hat in den letzten Jahren signifikant zugenommen. Im Gegensatz zu vielen herkömmlichen Messsystemträgern (Flugzeuge, Satelliten, Fahrzeuge oder Schiffe) zeichnen sich UAVs vor allem durch die Möglichkeit der schnellen, einfachen, sicheren und kostengünstigen Datenerfassung aus. Auch in der bergmännischen Vermessung kommen vergleichbare Systeme, vor allem zur Nachtragung des Bergbaukartenwerks (§42 Markscheideverordnung 2013), zur Massenermittlung, sowie zur Erhebung des Ist-Zustandes als Planungsgrundlage immer häufiger zum Einsatz. Sie schließen die Lücke zwischen Luftbildphotogrammetrie und terrestrischen Methoden und führen gleichsam zu einer Wiederbelebung bildbasierter Vermessungsmethoden in der Praxis.

Moderne und weitestgehend automatisierte Verfahren stellen jedoch hohe Anforderungen an die Qualität und auch die geometrische Aufnahmekonfiguration der Bilder, weshalb zur Gewährleistung definierter Genauigkeiten - und somit zur Verwendung vergleichbarer Systeme für vermessungstechnische Anwendungen - eine sorgfältige Flugplanung, Durchführung und Auswertung unbedingte Erfordernisse sind. Bekannte Ansätze zur optimierten Planung terrestrischer Kameranetze basieren im Wesentlichen auf der Minimierung der Fehler der 3D Punkte unter Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes (Alsadik et al. (2012)). Alsadik et al. (2012) gehen dabei jedoch von gleichgewichteten Beobachtungen aus, und berücksichtigen den tatsächlichen Einfluss der unterschiedlichen Parameter, sowie etwaig bekannte a priori Genauigkeiten nicht.

Ziel der gegenwärtigen Forschung ist allerdings die robuste Identifizierung und Quantifizierung genauigkeitsrelevanter Einflussparameter. Das tiefgreifende Verständnis über erreichbare Genauigkeiten und deren Zusammenhang mit der Bildaufnahme bildet die Basis für die Erschließung neuer, bislang nicht erreichbarer, Anwendungsfelder, wodurch der Wert vergleichbarer Systeme für vermessungstechnische Anwendungen weiter steigen würde.

2 Automatisierte Mehrbildauswertung

Zunächst in der Bildverarbeitung (Hartley und Zissermann (2000)) entwickelt, werden vollautomatische bildbasierte 3D Rekonstruktionen zunehmend auch für photogrammetrische beziehungsweise vermessungstechnische Anwendungen eingesetzt. Aus einer Vielzahl an (ungeordneten) Bildern kann eine punktbasierte Szenenrekonstruktion sowie die äußere Orientierung der Kameras errechnet werden. Gängige Verfahren bieten in der Regel Möglichkeiten zur Verdichtung und Vermaschung der erhaltenen 3D Rekonstruktionen zu digitalen Oberflächenmodellen, was abhängig vom konkreten Anwendungsfall von Bedeutung ist.

Abb. 1 stellt schematisch den Ablauf bei der bildgestützten 3D Rekonstruktion dar, der auch im nächsten Abschnitt noch einmal kurz beschrieben wird. Für detailliertere Informationen zur verwendeten Pipeline und den einzelnen Bearbeitungsschritten, wird an dieser Stelle jedoch auf Tscharf et al. (2014) beziehungsweise Rumpler et al. (2013, 2014) verwiesen.

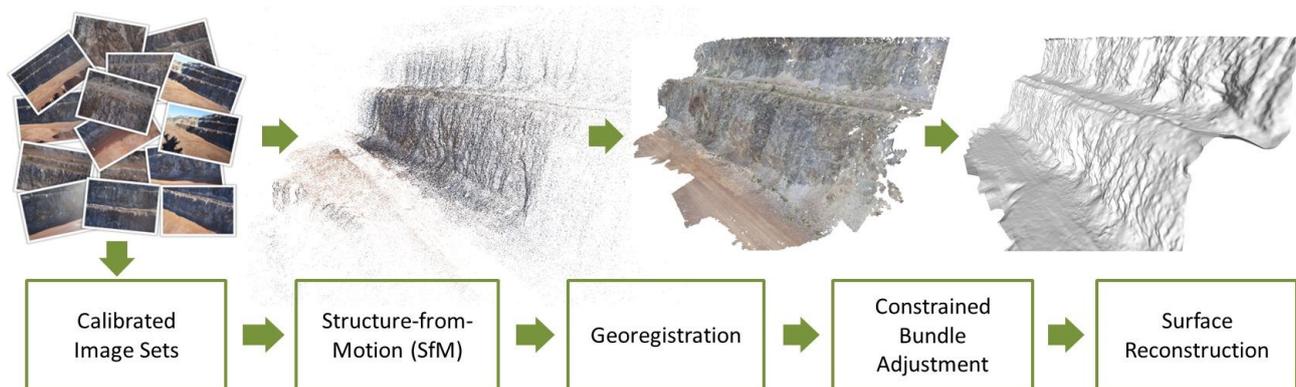


Abb. 1: Vollautomatische Mehrbildauswertungen sind in der Lage aus einer Vielzahl an ungeordneten Bildern die äußere Orientierung und eine punktbasierte Szenenrekonstruktion zu errechnen.

2.1 Structure from Motion

Besonders bei der Aufnahme mittels Multikopter-UAVs müssen ähnlich der terrestrischen Nahbereichsphotogrammetrie zumeist beliebige Bildkonfigurationen ausgewertet werden. Obwohl die meisten Plattformen mit einer Reihe von Sensoren zur Schätzung der Orientierung ausgestattet sind, ist einer der wesentlichsten Schritte in der Auswertung die Bestimmung der äußeren Orientierung (Lage der Bilder zum Zeitpunkt der Aufnahme), die in den folgenden - bei Tscharf et al. (2014) näher beschriebenen Schritten - verwirklicht wird:

8. **Kamerakalibrierung:** Bestimmung der inneren Orientierung (Lage des Bildhauptpunkts, fokale Länge und Parameter der Linsenverzeichnung) unter Verwendung von individuell identifizierbaren „fiducial markers“ beziehungsweise Schachbrettmustern (Daftry et al. (2013))
9. **Merkmalsextraktion und Korrespondenzanalyse:** Finden von „Natural Features“ (SIFT, Lowe, D. (2004)) und Berechnung der Korrespondenzen beziehungsweise der „matches“ auf Basis der euklidischen Distanz zwischen den Deskriptoren verschiedener Bilder
10. **Relative Orientierung und Bündelblockausgleich:** Schätzung der relativen Lage der Bilder zueinander auf Basis der gefundenen Korrespondenzen und anschließende simultane Optimierung der intrinsischen und extrinsischen Parameter, sowie der 3D Objektpunkte (Triggs et al. (2000))

2.2 Georeferenzierung

Aufgrund der fehlenden Längenmessung befinden sich die mittels Structure from Motion abgeleiteten Rekonstruktionen zunächst nur in einem lokalen euklidischen Koordinatensystem, das zufällig durch eines der gefundenen Kamerapaare festgelegt wird. Zur metrischen Skalierung der Ergebnisse muss zumindest eine bekannte Distanz in die Auswertung integriert werden, was durch einen in der Szene und in der Rekonstruktion eindeutig zuzuordnenden Maßstab erfolgen kann. Zur weiteren Verwendung der Daten im Markscheidewesen müssen die erstellten 3D-Modelle jedoch im konkreten geographischen Kontext richtig gespeichert und dargestellt werden.

Wie bereits erwähnt verfügen die meisten professionell eingesetzten Systeme über GNSS Empfänger zur Bestimmung der Plattformposition in der Luft, zur Stabilisierung im Flug, sowie zur autonomen Navigation zwischen definierten Wegpunkten. Werden die Positions- beziehungsweise teilweise auch die Orientierungsdaten (durch inertielle Messeinheiten) mit den aufgenommenen Bildern verknüpft können die in Modellkoordinaten vorliegenden Rekonstruktionen in ein übergeordnetes Referenzsystem überführt werden. Die absolute Genauigkeit der auf diese Weise durchgeführten Transformation ist jedoch in den meisten Fällen nicht ausreichend (1-2 Meter, Pfeiffer et al. (2012)), wiewohl aufgrund der hohen Anzahl an Positionsmessungen die Relativgenauigkeit innerhalb des Bildverbandes im niedrigen Zentimeterbereich liegt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von zumindest 3 Vollpasspunkten zur Schätzung der Transformationsparameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation, wobei hier eine ausreichende Genauigkeit in der Passpunktbestimmung vorausgesetzt wird.

Zur Erhöhung der Genauigkeit und insbesondere zur Vermeidung beziehungsweise Abschwächung systematischer Deformationen des Bildblocks können die zusätzlichen Informationen aus Bodenkontrollpunkten und bekannten Kamerapositionen auch in den Bündelblockausgleich integriert werden. Im Gegensatz zur formerhaltenden Transformation werden sowohl die innere als auch die äußere Orientierung nochmals optimiert, wobei die Kamera- und Objektpunktpositionen an die bekannten Referenzpositionen gekoppelt werden und sich somit nur beschränkt bewegen dürfen.

3 Stand der Forschung

Seit nunmehr Oktober 2013 beschäftigt sich der Fachbereich Markscheidewesen am Lehrstuhl für Bergbaukunde der Montanuniversität Leoben (MUL), gemeinsam mit weiteren Partnern aus Forschung und Industrie mit grundlegenden Untersuchungen zu Genauigkeit und Anwendbarkeit der UAV-gestützten photogrammetrischen Tagebauvermessung. Im Laufe der Zeit wurden einerseits mehrere praktische und theoretische Überlegungen zur erreichbaren Genauigkeit sowie relevanten Einflussparametern angestellt, und andererseits die notwendige Infrastruktur geschaffen, um künftig eigenständige, unabhängige und zielgerichtete Forschungsarbeit zu ermöglichen.

3.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen in Österreich

Wie in mittlerweile fast allen europäischen Ländern wurde auch in Österreich auf den vermehrten Einsatz unbemannter Flugsysteme reagiert und das Luftfahrtgesetz (LFG, BGBl. Nr. 253/1957 i.d.g.F.) mit 01.01.2014 novelliert, wodurch sich grundlegende Änderungen für die zivile Nutzung der unbemannten Luftfahrt und somit auch für den Einsatz unbemannter Flugkörper zur Vermessung im Bergbau ergaben. Auf Basis dieser Novelle ist der Betrieb unbemannter Flugkörper nun möglich, wobei die technischen und betrieblichen Voraussetzungen gem. LBTH 67 (Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge bis 150 kg) berücksichtigt werden müssen. Jedes Flugsystem bedarf der Bewilligung durch die Austro Control, wobei die Bewilligung in Bescheidform auf Antrag des Bewilligungswerbers vergeben wird.

Nahezu alle zur Vermessung eingesetzten Systeme sind der sogenannten Klasse 1 zugeordnet, wobei ständige Sichtverbindung zum Piloten gegeben sein muss. Abhängig von Betriebsmasse und Einsatzgebiet werden diese noch weiter kategorisiert (Abb. 2), was wiederum unterschiedliche Luft-

tüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen (redundante Energie- und Datenversorgung, spezielle Ausbildung der Piloten, etc.) im Bewilligungsverfahren zur Folge hat.

	Einsatzgebiet			
	I unbebaut	II unbesiedelt	III besiedelt	IV dicht besiedelt
< 5kg	A	A	B	C
< 25kg	A	B	C	D
< 150kg	B	C	D	D

Abb. 2: Kategorisierung nach LBTH 67

Unabhängig der jeweiligen Kategorie dürfen Luftfahrzeuge der Klasse 1 allerdings nur bis zu einer Höhe von 150 m und innerhalb des österreichischen Bundesgebiets betrieben werden. Höhere Flüge beziehungsweise Umstände, unter denen mit einem Überfliegen der Bundesgrenzen gerechnet werden muss, bedürfen einer gesonderten Bewilligung durch die Austro Control.

3.2 *Forschungsinfrastruktur Montanuniversität Leoben*

Zur Gewährleistung der wissenschaftlichen Qualität und um gleichzeitig potentielle neue Anwendungsfelder zu erforschen werden neben der notwendigen Hardware auch geeignete Testgebiete beziehungsweise Objekte benötigt. In den folgenden Abschnitten wird nun kurz auf die geänderten Rahmenbedingungen an der MUL eingegangen, bevor in weiterer Folge Ergebnisse und zukünftige Tendenzen präsentiert werden.

3.2.1 *Hardware*

Nachdem frühere Untersuchungen immer auf die Unterstützung externer Partner angewiesen waren, verfügt der Lehrstuhl für Bergbaukunde seit Herbst 2015 über eine eigene Flugausrüstung. Es handelt sich dabei um einen an die zuvor definierte Kamera - und somit auch Dienstmasse - angepassten Hexakopter, wobei im Wesentlichen Komponenten aus dem Modellflugbereich verbaut wurden. Die wichtigsten technischen Daten sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst und Abb. 3 können zwei Ansichten des startbereiten Flugsystems entnommen werden.

Als Flight Controller wurde der DJI Naza M V2 verbaut, der über eine integrierte Dämpfung der Regler, Gyroskop, Beschleunigungsmesser, Barometer und externen GNSS Empfänger verfügt. Der Controller übernimmt während des Fluges die Stabilisierung des Systems und bietet außerdem Funktionalitäten, die einen sicheren und rechtlich zulässigen Flugbetrieb ermöglichen. Das System verfügt über eine Genehmigung der Kategorie A (vgl. Abb. 2), womit die angestrebten Forschungsflüge in Bergbaubetrieben abgedeckt werden.

Tab. 1: Technische Daten Hexakopter

Typ	Hexakopter
Größe	Durchmesser 680 mm ohne Rotoren.
Antrieb	6 elektrische, bürsten und sensorlose Motoren mit 340 W Höchstleistung
Rotordurchmesser	13" (ca. 33 cm)
Anzahl der Rotoren	6
Rotorgewicht	15 g
Akku	2 x parallel 4 Zellen LiPo Akku, 4000 mAh → 4 P8000mAh
Leergewicht	3500 g (inkl. Akkus)
Mit Akkus und Kamera	3860 g
Aufstiegsgeschwindigkeit	4 m/s
Sinkrate	4 m/s
Fluggeschwindigkeit	Bis zu 15 m/s (manueller Modus)
Flugzeit	7 Minuten mit Nutzlast (bei 20°C, 30% Restleistung)
Reichweite	
Empfohlen	< 250 m (Sichtweite)
Technische Begrenzung	< 900 m
Standard Nutzlast - Kamera	
Typ	Sony A6000, 24 Mp
Gewicht	344 g
Zertifikate	CE (Komponenten)

Als eigentliches Vermessungsinstrument (Kamera) wurde eine Sony Alpha 6000 Systemkamera gewählt, die sich vor allem durch geringes Gewicht bei hoher Bildqualität und großer physischer Sensorgröße auszeichnet. Die Kamera ist mit einem 16 mm Festbrennweitenobjektiv ausgestattet und bietet eine Auflösung von 24Mp. Besonders beim dynamischen Einsatz im Rahmen einer UAV-Befliegung wirkt sich der sehr schnelle Autofokus der Alpha 6000 positiv auf die Bildqualität und -Schärfe aus. Außerdem ist die gewählte Kamera unempfindlich gegen spontan ändernde Belichtungsänderungen und produziert somit während des gesamten Überfluges Bilder mit gleichbleibender Qualität.



Abb. 3: Der Hexakopter des Lehrstuhls für Bergbaukunde wurde an die zuvor definierte Kamera angepasst und alle weiteren Komponenten auf die zu tragende Dienstmasse ausgelegt.

Die Steuerung des gesamten Systems erfolgt über eine mobile Bodenstation, die es ermöglicht, dass alle Funktionen (Steuerung des Flugkörpers und der Kamera) von einer Person erledigt werden können.

3.2.2 Testgebiet

Wie in früheren Beiträgen (Tscharf et al. (2014, 2015)) bereits näher thematisiert verfügt die MUL am Steirischen Erzberg über ein mit insgesamt 129 Punkten ausgestattetes Referenzpunktfeld, das eine rund 100 m lange und 24 m hohe Bruchwand samt der angrenzenden Etagen umfasst. Da jedoch eine einzelne Bruchwand mit Sicherheit nicht das vordergründige Anwendungsgebiet für UAVs darstellt, und gleichzeitig die Möglichkeiten und Eigenschaften dieser Systeme unter diesen Bedingungen nur teilweise studiert werden können, wurde in einem stillgelegten Hartgesteinsgewinnungsbetrieb ein umfassenderes und größeres Testfeld angelegt, das auch die Möglichkeit für tiefgreifende Untersuchungen unter Realbedingungen bietet.

Wie der nachstehenden Abbildung entnommen werden kann, umfasst das Gebiet flache, fahrbahn-ähnliche Bereiche mit geschüttetem Haufwerk, genauso wie steil stehende Wände und blockige Sturzhalden.

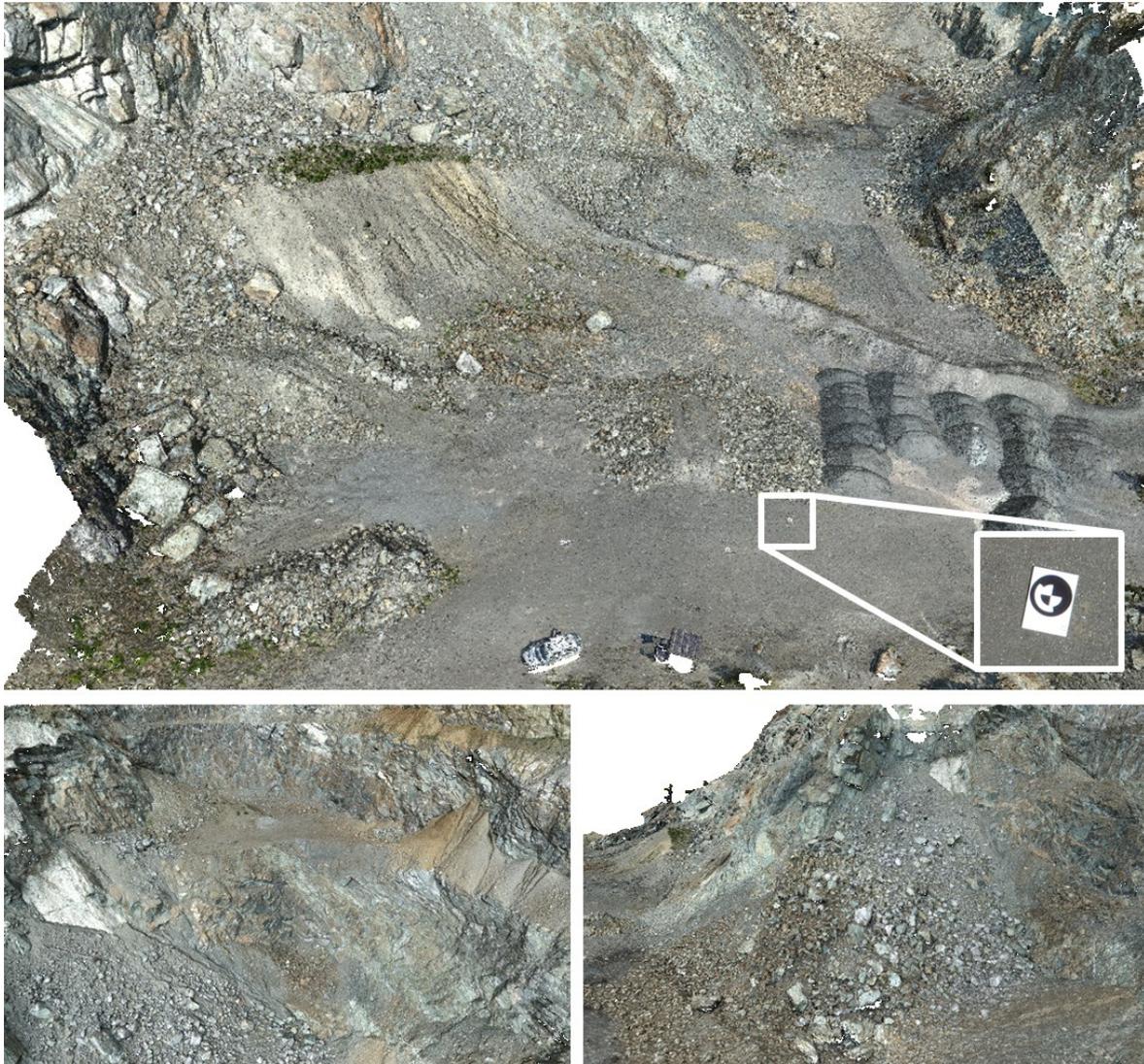


Abb. 4: Das Testfeld in einem Steinbruch nahe Leoben ermöglicht umfassende Untersuchungen, sowohl hinsichtlich Genauigkeit als auch zur Erforschung neuer Anwendungsgebiete.

Für die Genauigkeitsuntersuchungen und zur Schaffung eines einheitlichen Bezugskordinatensystems wurden insgesamt 46 Punkte im rund 6 ha umfassenden Gebiet eingemessen, vermarktet und signalisiert. Die Signalisierung erfolgte unter Verwendung individuell identifizierbarer kreisförmiger Marker, die eine automatisierte Bildmessung ermöglichen und somit Fehler durch falsche Passpunktzuordnung von vornherein ausschließen.

3.3 Genauigkeitsevaluierung

Zur Identifizierung und Quantifizierung der genauigkeitsrelevanten Einflussparameter wurden in den letzten Jahren mehrere Befliegungen mit verschiedenen Plattformen in unterschiedlichen Gewinnungsstätten durchgeführt. Die hier näher beschriebene Kampagne fand im Mai 2015 statt, wobei die Ergebnisse auch anhand zusätzlicher Flüge verifiziert wurden.

Im Zuge der erwähnten Kampagne wurden insgesamt 7 Flüge in unterschiedlichen Höhen durchgeführt. (von 60 m bis 150 m in 15 m Schritten), wobei die wesentlichen Informationen der nachstehenden Tabelle entnommen werden können. Zur Evaluierung der Genauigkeit wurden im 4,5 ha großen Gebiet insgesamt 19 Punkte durch Auslegen von Target-Tafeln bzw. durch Aufsprühen von Farbkreisen signalisiert und mittels Trimble S6 Totalstation hochgenau vermessen. Fünf gleichmäßig im Gebiet verteilte Punkte wurden als Passpunkte zur Georeferenzierung verwendet und die übrigen Punkte dienten als „Check Points“ im Sinne der Genauigkeit.

Als Sensorplattform wurde das Flächenflugzeug senseFly eBee, ausgerüstet mit einer Sony DSC-WX220 Kompaktkamera verwendet. Die Kamera hat eine Auflösung von 18Mp und es ist ein 1/2,3“ Zoll CMOS Sensor mit einer physischen Pixelgröße von 1,3 μm verbaut. Durch die Bauart des Flugzeugs waren alle aufgenommenen Bilder Vertikal- als auch Lateralüberlapp konstant bei 85 beziehungsweise 70 % gehalten wurden.

Tab. 2: Übersicht über die durchgeführten Flüge

Flughöhe	Fläche	Überlapp longitudinal	Überlapp lateral	GSD	Bildanzahl	Passpunktanzahl
[m]	[ha]	[%]	[%]	[cm/px]	[-]	[-]
60,0	4,5	85	70	1,7	74	5
74,2	4,5	85	70	2,1	59	5
91,8	4,5	85	70	2,6	46	5
105,9	4,5	85	70	3,0	45	5
120,1	4,5	85	70	3,4	41	5
134,2	4,5	85	70	3,8	39	5
148,3	4,5	85	70	4,2	33	5

In Abb. 5 kann deutlich erkannt werden, dass die mittleren Fehler mit steigender Flughöhe leicht zunehmen. Durch die roten gestrichelten Linien wird der $\pm \sigma$ Bereich als Visualisierung der Unsicherheit angedeutet. Unter der Annahme einer Normalverteilung der Fehler würden signalisierte und vermessene Punkte mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,3 % innerhalb des rot abgegrenzten Bereichs liegen. Wie ersichtlich ist steigen gemeinsam mit den mittleren Fehlern auch die Standardabweichungen bei größer werdender Höhe an, was darauf hindeutet, dass die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei höheren Flughöhen nicht mehr im selben Ausmaß gegeben ist. Grundsätzlich nehmen die Standardabweichungen jedoch verhältnismäßig große Werte an, was auf eine starke Streuung innerhalb der detektierten Fehler im Gebiet hindeutet.

Bei getrennter Betrachtung der mittleren Fehler in Lage und Höhe zeigt sich deutlich, dass der mittlere Fehler in der Höhe den Hauptanteil am Gesamtfehler ausmacht. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der getrennten Analyse der Standardabweichungen in Lage und Höhe. Die Streuung der Fehler

in der Höhe ist signifikant größer als jene in der Lage, wobei bedingt durch die direkte dreidimensionale Punktbestimmung auch ganz klar die Korrelation zwischen Lage- und Höhenfehler erkannt werden kann. Dieser Umstand ist jedoch auch aus der herkömmlichen Luftbildphotogrammetrie hinlänglich bekannt und außerdem muss angemerkt werden, dass die Fehler bei allen Flügen (auch bei Berücksichtigung der Streuung) klar im einstelligen Zentimeterbereich liegen, wodurch die Anforderungen der Markscheideverordnung 2013 mehr als deutlich eingehalten werden können.

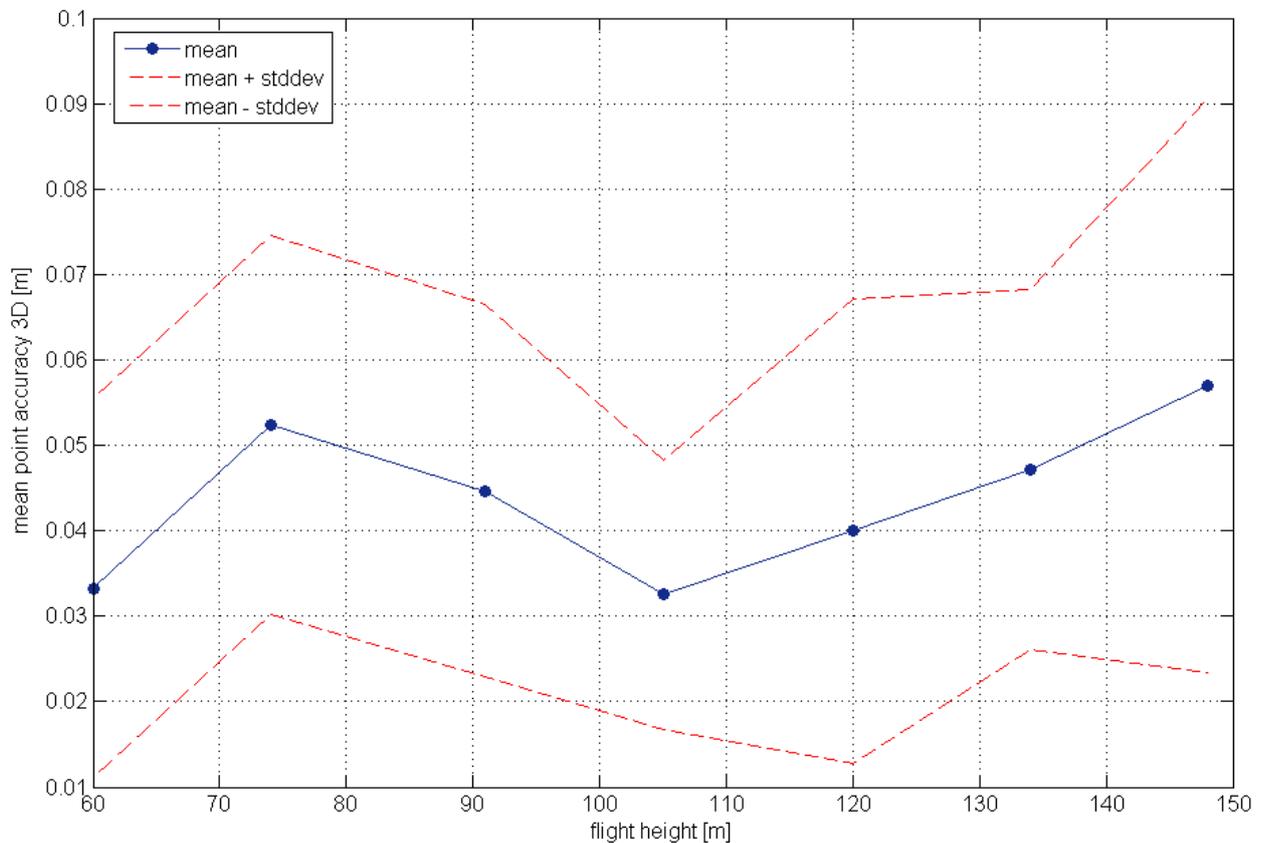


Abb. 5: Gegenüberstellung der mittleren Fehler mit der Flughöhe (Tscharf (2016))

In allen bisherigen Untersuchungen auffallend ist vor allem auch, dass bei Verwendung der beschriebenen Ausrüstung die höchste Genauigkeit bei einer Flughöhe von 105 m erreicht werden konnte. Die Begründung hierfür liegt vermutlich in einem Optimum aus Erkennbarkeit der natürlichen Features und Texturen sowie der Passpunkte und den dementsprechend genauen Bildmessungen, was in weiterer Folge zu einem gut stabilisierten Bildverband und einer hohen Genauigkeit führt. (Tscharf (2016))

3.3.1 Einfluss der 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. Die genaueste Methode zur absoluten Orientierung der Ergebnisse ist mit Sicherheit die räumliche Ähnlichkeitstransformation unter der Verwendung von zumindest 3 Vollpasspunkten, deren Koordinaten sowohl im Modell- als auch im Zielkoordinatensystem bekannt sind. Eine größere Anzahl an

Punkten und eine robuste Schätzung der zur Registrierung nötigen Transformationsparameter (Rotation, Translation und Skalierung) mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate erhöhen die Genauigkeit der Ausrichtung des Modells jedoch deutlich.

Die Ergebnisse aus den durchgeführten Befliegungen zeigen deutlich, dass die besten Ergebnisse mit 5-10 Passpunkten erreicht werden können, wobei hinsichtlich der räumlichen Konfiguration darauf zu achten ist, dass die Passpunkte gleichmäßig – auch unter Berücksichtigung der Höhenkomponente - im gesamten Gebiet verteilt und nicht zu sehr am Rand des Bildblocks platziert werden.

Zusätzlich zur Güte der geschätzten Transformationsparameter muss selbstverständlich auch die Genauigkeit der konventionellen Passpunkteinmessung in die Betrachtungen miteinbezogen werden. Als Richtwert sollten die GCPs (Ground Control Points) mit $0,5 * GSD$ eingemessen werden. Bei einer in Österreich gesetzlich zulässigen Flughöhe von 150 m ergibt sich bei Verwendung der beschriebenen senseFly eBee eine Bodenauflösung von rund 4,5 cm, was in weiterer Folge eine Passpunktgenauigkeit von ± 2 cm bedeutet. Diese Genauigkeitsanforderung kann jedoch mit moderner RTK- (Real Time Kinematic) GNSS- (Global Navigation Satellite System) Vermessung in der Regel eingehalten werden.

4 Zukünftige Forschungstendenzen

Obwohl die im Zuge der laufenden Forschungsarbeiten gewonnenen Erkenntnisse für sich schon einen wichtigen Beitrag zum Stand des Wissens und der Technik darstellen, besteht durch das grundlegende und fundierte Verständnis über Genauigkeit, sowie deren „Entstehung“ überdies die Möglichkeit neue Anwendungsfelder zu erschließen, beziehungsweise das Einsatzgebiet für UAVs in marktscheiderischen Anwendungen weiter zu vergrößern.

Der Lehrstuhl für Bergbaukunde verfolgt dabei im Rahmen von zwei unabhängig beantragten Forschungsprojekten zwei unterschiedliche Stoßrichtungen, die im Folgenden kurz näher beschrieben werden sollen. An dieser Stelle wird jedoch auch in aller Deutlichkeit darauf verwiesen, dass sich beide Projekte in der Antragsphase befinden und eine zukünftige Bearbeitung somit noch nicht als gesichert betrachtet werden darf beziehungsweise kann.

4.1 Deformationsvermessung

Durch anspruchsvolle topologisch und geologisch gegebene Bedingungen in Österreich stellen alpine Naturgefahren in vielen Regionen ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar: Hochwasser, Muren, Lawinen, Hangbewegungen und Steinschlag bedrohen Menschen, ihren Lebens-, Siedlungs- und Wirtschaftsraum, Verkehrswege, sowie kritische Versorgungsinfrastruktur. Besonders gravitative Massenbewegungen (Fels- und Bergsturz sowie Rutschungen) verursachen zumeist schwere Schäden und sind oft mit langfristigen Ausfällen wichtiger Versorgungslinien verbunden. Die Bedeutung vergleichbarer Ereignisse für die Sicherheit der Bevölkerung wird durch die nachstehende Abbildung, die alle durch die geologische Bundesanstalt dokumentierten Massenbewegungen seit Juni 2011 (rund 1000 Ereignisse pro Jahr) beinhaltet, noch einmal grafisch verdeutlicht.

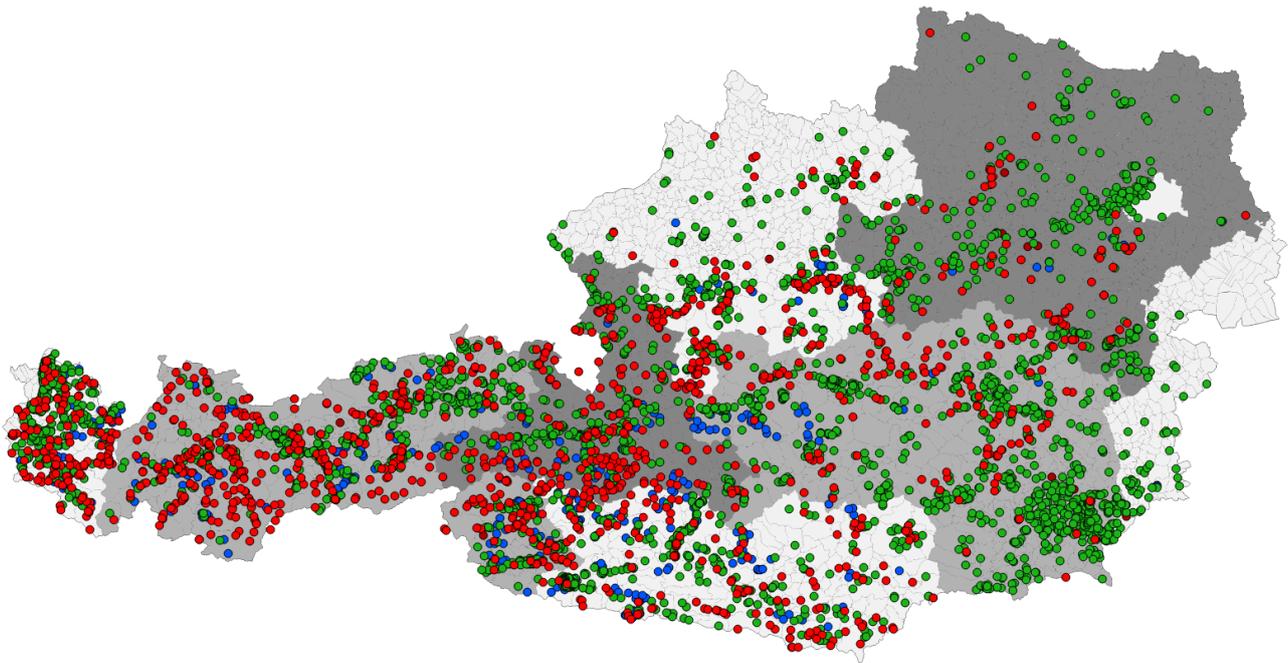


Abb. 6: Gravitative Massenbewegungen in Österreich (rot: Berg- und Felssturz (Festgestein); blau: Kriechmasse, Talzusub, Sackung; grün: Rutschung (Lockergestein))

Zur Vermeidung vergleichbarer Schadensereignisse und zur rechtzeitigen Ergreifung notwendiger Gegenmaßnahmen, sowie zur frühzeitigen Erkennung des Verlaufs von Massenbewegungen sind markscheiderische Bodenbewegungsmessungen unter Anwendung geodätischer und geotechnischer Verfahren notwendig. Speziell im Bergbau, wo im Zuge der Gewinnungstätigkeiten künstliche Böschungen geschaffen werden, bzw. durch den Eingriff in das Gebirge standsicherheitsrelevante Elemente aktiviert werden können, kommt der Frage der Böschungstabilität und deren Beobachtung ein besonders hohes Gewicht zu. Die messtechnische Überwachungseinrichtung muss in der Lage sein die dreidimensionalen Bewegungen (Vertikal- als auch Horizontalkomponente) zu erfassen und soll überdies beitragen, Antworten auf die folgenden Fragen zu geben:

- Welcher aktuelle Zustand der Böschung liegt, die Stabilität betreffend, vor?
- Kann auf den Mechanismus der Bewegung geschlossen werden? (Translation, Rotation,...)
- Welcher zeitlichen Veränderung unterliegen die Bewegungen? (Deformationsgeschwindigkeit)
- Wie groß ist der Einwirkungsbereich der Böschung?
- Können Aussagen hinsichtlich auftretender Massendifferenzen getroffen werden? (Wohin bewegen sich die Massen?)

Bei der Anwendung derzeit verwendeter Methoden ist die notwendige vollständige messtechnische Erfassung allerdings nur bedingt möglich. Aussagen über die Bewegungsmechanismen können aufgrund der Beobachtung diskreter Punkte nur bei Vorhandensein von zusätzlichen Informationen (Geologie, geotechnische Parameter) abgeleitet werden. Durch den derzeit nur untergeordneten Einsatz von Kameras - vordergründig zu Dokumentations- und nicht zu Messzwecken – liefern herkömmliche Methoden zudem nur rein geometrische Informationen ohne inhaltliche bzw. semantisch- bildhafte Interpretationshilfen. Verursacht durch bodengebundene Beobachtungspunkte kann in vielen Fällen auch nicht das ganze Areal beobachtet werden, bzw. wird der Einwirkungsbereich

und die beteiligten Massen zumeist unterschätzt, was im Versagensfall zu unvorhergesehenen Folgen und Schäden führen kann.

Das Ziel des beantragten Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung eines UAV- und bildbasierten, nutzerfreundlichen Systems zur Böschungsbeobachtung, das ohne aufwendige Zusatzarbeiten im Feld (z.B. Punktsignalisierung und Einmessung) eingesetzt werden kann.

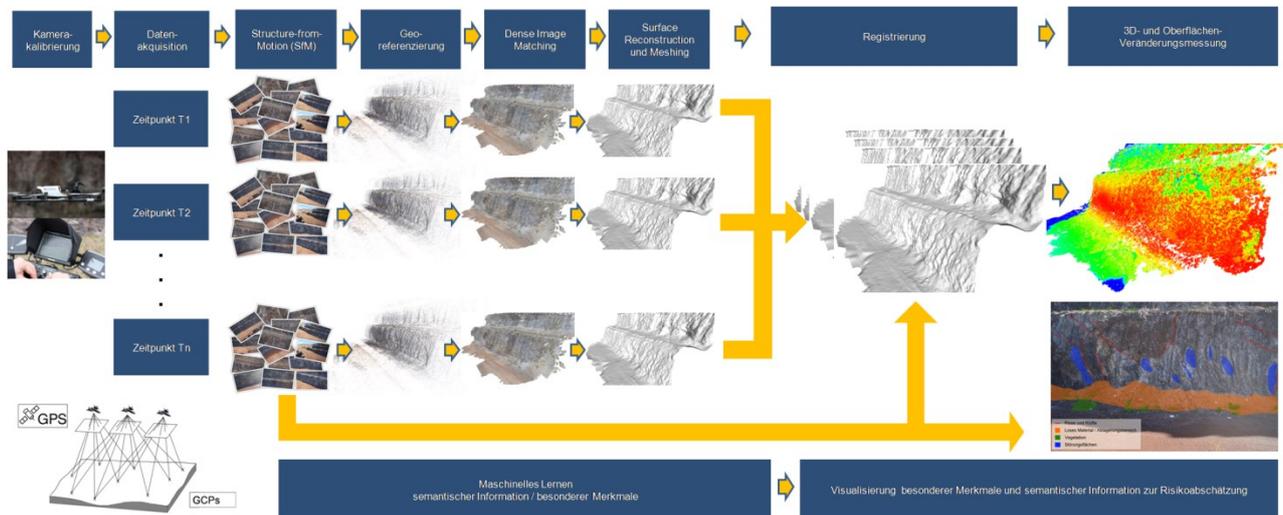


Abb. 7: Neben der Bestimmung der Messwerte soll das entwickelte System die aufgenommenen Daten verarbeiten, interpretieren und die Ergebnisse auch visualisieren können.

Durch den Einsatz von Kameras in Kombination mit unbemannten Flugsystemen soll einerseits eine vollständige messtechnische Erfassung der oberflächennah detektierbaren Veränderungen in Lage und Morphologie, und andererseits ein besseres Verständnis über die Bewegungsmechanismen bei Rutschungen bzw. Böschungsversagen erreicht werden. Die Messergebnisse sollen, besonders durch die Kombination von semantischer und geometrischer Information, eine über die reine Geometrie hinausgehende fundierte Basis zur Risikoabschätzung darstellen, wodurch in weiterer Folge Schadensereignisse, und hohe Wiederherstellungskosten verhindert werden können. Durch die gemeinsame Nutzung der Bildinformation mit der abgeleiteten 3D Geometrie sollen überdies standsicherheitsrelevante Elemente, wie Trennflächen oder Diskontinuitäten besser erkannt, verortet und in weiterer Folge näher untersucht werden.

Aus technologischer Sicht stellen mit Sicherheit die zu erreichenden Genauigkeiten, sowie die Detektion relevanter Bewegungen die größten Herausforderungen dar. Die Forschungsschwerpunkte bilden vor allem Bildfehlerklassifikation (change detection) sowie die Integration semantischer Information zur besseren und vor allem auch automatischen Interpretation der Daten bzw. zum Filtern irrelevanter Veränderungen. Eine große Herausforderung ist mit Sicherheit auch die Registrierung von über die Zeit veränderlichen Geometrien zur Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messepochen.

4.2 Haufwerksanalyse

Das zweite Projekt beschäftigt sich mit dem Potential unbemannter Flugsysteme zur Analyse von gesprengtem Haufwerk. Die erreichte Zerkleinerung und die Form des Haufwerks sind die beiden wichtigsten Ergebnisse einer Tagebausprengung. Sie stellen die erste Stufe der Zerkleinerungskette dar und haben naturgemäß einen starken Einfluss auf alle nachgeschalteten Prozesse, wie das La-

den, Fördern und die folgenden Zerkleinerungsschritte. Die Form des Haufwerks kann zum Beispiel bestimmen ob ein Radlader oder ein Bagger effizienter sind. Das Vorhandensein von Knäppern, sowie deren Größe beeinflusst wo mit der Ladearbeit begonnen wird, beziehungsweise ob vorab eine weitere Zerkleinerung notwendig ist.

Schnelle Informationen über die Eigenschaften des gesprengten Haufwerks ermöglichen eine zielgerichtete und effiziente Produktionsplanung und Kenntnisse über die erreichte Zerkleinerung ermöglichen außerdem Anpassungen in der weiteren Zerkleinerungskette beziehungsweise können Rückschlüsse auf zukünftige Gewinnungssprengungen gezogen werden.

Das Ziel des gegenständlichen Projekts ist die Entwicklung eines Systems, das die schnelle Erfassung der Eigenschaften eines gesprengten Haufwerks, wie Form, Zerkleinerung und das Vorhandensein von Knäppern ermöglicht. Durch den Einsatz von mit Kameras ausgerüsteten UAVs gemeinsam mit modernen Algorithmen aus dem Bereich der Computervisualistik sowie des maschinellen Lernens sollen vordergründig folgende Ziele erreicht werden:

- Bestimmung der Zerkleinerung (Korngrößenverteilung)
- Erkennung und Lokalisierung von Knäppern
- Erkennung von teilweise verdeckten Blöcken
- Erkennung von Feinmaterial

Der Schwerpunkt der Arbeiten soll in der Entwicklung neuer Methoden zur Charakterisierung des Haufwerks liegen, wobei insbesondere die gemeinsame Nutzung von zweidimensionaler Bild- mit dreidimensionaler Geometrieinformation im Fokus steht. Durch die Flexibilität der UAVs soll die Aufnahme und Analyse optimal in die herkömmlichen betrieblichen Abläufe integriert werden und außerdem sollen Schwächen bodengebundener Systeme hinsichtlich Vollständigkeit und Repräsentativität umgangen werden.

5 Schlussfolgerungen

Aus den in den letzten Jahren durchgeführten Forschungstätigkeiten konnte zunächst gezeigt werden, dass es möglich ist mit einem, mit einer Kamera ausgerüsteten UAV, Tagebauvermessungen mit ausreichender Genauigkeit durchzuführen. Bei entsprechender Vorgehensweise konnten die gesetzlichen Schranken der Markscheideverordnung auch bei der Befliegung ganzer Gewinnungsstätten eingehalten werden. Es ist jedoch auch erkennbar, dass die erreichbare Genauigkeit von einer Vielzahl an Parametern abhängt, die sowohl in der Planung als auch der Durchführung und Auswertung der Befliegung berücksichtigt werden müssen.

Im Zuge der Tätigkeiten wurde an der Montanuniversität Leoben jedoch nicht nur Know How und grundlegendes Wissen aufgebaut, sondern auch die notwendige Forschungsinfrastruktur geschaffen, um wissenschaftlich fundierte Untersuchungen durchzuführen und in weiterer Folge auch neue Anwendungsfelder zu erschließen. Im Rahmen zweier beantragter Forschungsvorhaben soll aufbauend auf den grundlegenden Erkenntnissen zur Genauigkeit die praktische Relevanz der bildgestützten UAV-Vermessung weiter gesteigert werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- Alsadik B., Gerke M., Vosselman G. (2012): Optimal Camera Network Design for 3D Modeling of Cultural Heritage, in: The Proceedings of the XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, pp 7-12
- Daftry, S., Maurer, M.; Wendel, A., Bischof H. (2013): Flexible and User-Centric Camera Calibration using Planar Fiducial Markers, Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology, Austria
- Hartley, R.; Zissermann, A. (2000): Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press
- Lowe, D. (2004): Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: International Journal of Computer Vision 60 (2), S. 91–110
- Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1 (2015), Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitshinweis Nr. 67 (LBTH 67)
- Markscheideverordnung (2013), Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft Familie und Jugend über Vermessungen beim Bergbau, das Bergbaukartenwerk und die Erfassung von Bodenbewegungen 2013 (Markscheideverordnung 2013), BGBl. II Nr. 437/2012
- Pfeifer N., Glira P., Briese C. (2012): Direct georeferencing with on board navigation components of light weight UAV platforms. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences
- Rumpler, M., Hoppe, C., Wendel, A., Mayer, G., Bischof, H. (2013): Echtzeit-Qualitätsüberprüfung für zuverlässige UAV-gestützte Bilddatenerfassung und exakte, automatisierte Mehrbildauswertung. In: VGI Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 101 (2+3/2013), S. 88–100
- Rumpler, M.; Daftry, S.; Tscharf, A.; Prettenhaler, R.; Hoppe, C.; Mayer, G.; Bischof, H. (2014): Automated End-to-End Workflow for Precise and Geo-accurate Reconstructions using Fiducial Markers. - in: Proceedings of PCV 2014, S. 135 – 142
- Triggs, B., McLaughlan, P., Hartley, R., Fitzgibbon, A. (2000): Bundle adjustment – A modern synthesis. In: Vision Algorithms: Theory and Practice, pp. 298–375
- Tscharf, A., Rumpler, M., Mayer, G., Bischof, H. (2014): Aktueller Forschungsstand zur Genauigkeit UAV-gestützter Tagebauvermessung. In: Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie (2014-1), S. 178–189
- Tscharf, A., Rumpler, M., Mayer, G., Bischof, H. (2015): Zur Frage der Genauigkeit UAV-gestützter Tagebauvermessung. In: Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie (2015-1), S. 72–85
- Tscharf A. (2016): Genauigkeitsevaluierung – Untersuchungen zur Genauigkeit der UAV-gestützten photogrammetrischen Vermessung im Bergbau, in Zusammenarbeit mit Friedl ZT GmbH; Interner Projektbericht zu FFG-Bridge „UAV Vermessung im Bergbau“ (841298), unveröffentlicht