
Monitoring von Naturgefahren mittels UAV – Analysen zu Genauigkeit sowie automatischer Passpunkt-detektion anhand ausgewählter Fallbeispiele

¹ Alexander TSCHARF, ² Robert WENIGHOFER, ² Lukas STIFT, ¹ Gerhard MAYER,
² Robert GALLER

Montanuniversität Leoben, ¹ Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft,
² Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Zusammenfassung

Durch anspruchsvolle topologisch und geologisch gegebene Bedingungen in Österreich stellen alpine Naturgefahren in vielen Regionen ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar. Besonders in Zeiten vermehrter Auswirkungen des Klimawandels erhält das Monitoring von Gefahren wie Hangrutschung, Steinfall oder Blocksturz zunehmendes Gewicht. Zugleich muss das Monitoring hohe sicherheitstechnische Anforderungen wie z.B. Verzicht auf Betreten des Geländes erfüllen und einen hohen Automatisierungsgrad zur Gewährleistung einer wirtschaftlichen Auswertung aufweisen. Beides kann die Befliegung mit Drohnen leisten. Der Beitrag enthält eine Analyse vorteilhafter Passpunktsignalisierungen, wodurch eine hohe Verlässlichkeit des Monitorings erreicht werden soll. Anhand ausgewählter Fallbeispiele aus dem Bergbau bzw. des aktuellen Tunnelprojektes Zentrum am Berg, dessen Portalsituation in der unmittelbaren Gefahrenzone still gelegter Teile der Erzlagerstätte Erzberg in Eisenerz liegt, wird einerseits das Potential unbemannter Flugsysteme zum Böschungsmonitoring, untersucht und andererseits werden verschiedene Werkzeuge zur automatischen Markerdetektion sowie deren Auswirkungen auf den Bündelblock-Ausgleich einer näheren Betrachtung unterzogen.

1 Einleitung

In Österreich verkörpern alpine Naturgefahren in vielen Regionen ein Sicherheitsrisiko: Hochwasser, Muren, Lawinen, Hangbewegungen und Steinfall bedrohen Menschen, ihren Lebens-, Siedlungs- und Wirtschaftsraum, Verkehrswege, Versorgungslinien und Infrastruktur.

Somit kommt der regelmäßigen Überwachungsmessung sowie der messtechnischen Früherkennung kommt besondere Bedeutung zu. Bei gegenwärtig gängigen Methoden werden zumeist ausgewählte Punkte am zu überwachenden Objekt beobachtet, und eine vollständige, flächige Beobachtung der Bewegungsvorgänge ist nicht immer möglich. Überdies führen die hohen Investitions- und Vorbereitungskosten herkömmlicher Methoden dazu, dass viele Ereignisse nicht frühzeitig erkannt und dementsprechend nicht verhindert werden. Das Aufkommen unbemannter und mit Kameras ausgerüsteter Flugsysteme ermöglicht einerseits eine vollständige messtechnische Erfassung der oberflächennah detektierbaren Verän-

derungen, und andererseits kann ein besseres Verständnis über die Bewegungsmechanismen bei Rutschungen bzw. Böschungsversagen erreicht werden.

Die Genauigkeit der UAV-gestützten Vermessung wird neben anderen Größen stark von der Art der Georeferenzierung beeinflusst, wobei die höchsten Genauigkeiten durch die Verwendung signalisierter Passpunkte erreichbar sind. Zur Gewährleistung von Wirtschaftlichkeit und Reproduzierbarkeit – ist ein möglichst hoher Automatisierungsgrad anzustreben, weshalb im Folgenden neben dem Potential von UAVs für Monitoring auch verschiedene automatisch detektierbare Passpunktmarker analysiert werden.

2 Anwendungsorientierte Grundlagen

2.1 Monitoring von Naturgefahren

Bei den meisten gängigen Messverfahren wird das zu beobachtende Objekt durch eine Reihe vermarkter und signalisierter Kontrollpunkte diskretisiert, welche von den sogenannten Beobachtungspunkten aus beobachtet werden, um bei drohender Gefahr entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Die Messungen werden in der Regel mit automatischen Totalstationen (Messung von Richtungen und Distanzen), oder als manuelle 3D Verschiebungs- bzw. Höhenmessungen durchgeführt. (PILGRAM & RANDJBAR 2013, MARTIN et al. 2013)

Sofern es die äußeren Randbedingungen zulassen, können auch satellitengestützte Methoden zum Einsatz kommen, wobei jene entweder direkt an den Kontrollpunkten, in der Regel jedoch häufiger in Kombination mit elektronischen, oft automatisierten, Totalstationen, verwendet werden. Ein entscheidender Verfahrensvorteil gegenüber den ausschließlich lokal arbeitenden terrestrischen Systemen (Theodolit-, Nivelliersysteme) besteht darin, dass GNSS (Global Navigation Satellite System) großräumig zusammenhängende bzw. global referenzierte, dreidimensionale Positionsdaten bereitstellt. (PILGRAM et al. 2011)

Zur Beurteilung der Bewegungen stellen jedoch flächige Verfahren wirtschaftlich sowie technologisch eine wertvolle Alternative dar. Neben dem Laserscanning, das im Wesentlichen eine sehr dichte reflektorlose Polaraufnahme (Messung von Richtungen und Distanzen) darstellt, erlangt vor allem die Radarinterferometrie (terrestrisch und satellitengestützt) zusehends an Bedeutung, obwohl hier nur die Bewegungskomponente in Blickrichtung erfassbar ist. (WUJANZ et al. 2013, WALTER et al. 2008, CONTE et al. 2014)

Der größte Vorteil der angesprochenen flächigen Verfahren stellt gewissermaßen auch deren größten Nachteil dar. Sie geben ein hoch aufgelöstes tagesaktuelles Bild des beobachteten Objekts frei von jeglicher Interpretation. Der Vergleich zweier aufeinanderfolgender Messepochen liefert alle aufgetretenen Differenzen, wobei nicht immer klar ist, ob es sich dabei um tatsächlich standsicherheitsrelevante Deformationen handelt.

2.2 Automatische Mehrbildauswertung

Vollautomatische bildgestützte 3D Rekonstruktionen wurden zunächst in der Bildverarbeitung entwickelt und werden heute auch in der Photogrammetrie eingesetzt. Diese sind in der Lage, aus einer Vielzahl an (ungeordneten) Bildern zunächst die äußere Orientierung der Kamera und eine punktbasierte Szenenrekonstruktion zu errechnen, um dann in weite-

ren Schritten eine dichte Punktwolke zu erzeugen. Die Genauigkeit der Berechnung der äußeren Orientierung ist maßgeblich für die Genauigkeit aller nachfolgenden Schritte.

Die Errechnung der äußeren Orientierung, im Bildverarbeitungsbereich Structure-from-Motion (SfM) genannt, erfolgt durch das automatische Finden von Passpunkten in sich überlappenden Bildern. Sind diese bekannt, kann zunächst die relative Orientierung zwischen Bildpaaren und anschließend die äußere Orientierung aller Kameras mittels Bündelblockausgleich (TRIGGS ET AL 2000) berechnet werden.

Die vollautomatischen Verfahren stellen hohe Anforderungen an die Eingangsbilder, damit eine gültige Rekonstruktion errechnet werden kann. So müssen die Bilder eine relativ große Szenenüberlappung haben, der eingeschlossene Winkel zwischen den Bildern darf nicht zu groß sein (< 40 Grad) und es muss genügend Textur auf der Oberfläche vorhanden, diese jedoch nicht zu repetitiv sein (HOPPE et al. (2012-2)).

2.3 Automatische Passpunkt- bzw. Markerdetektion

Fiducial-marker oder Passpunkte sind computergenerierte Elemente, deren Hauptkriterium es ist, eine robuste Detektion im jeweiligen Anwendungsfeld zu gewährleisten. Detektiert werden die Passpunkte von einem Algorithmus, welcher auch Schritte zur Fehlerkorrektur beinhaltet, auf die später genauer eingegangen wird. (GARRIDO et al. 2014) Eine automatische Detektion ermöglicht in einem kurzen Zeitraum große Datensätze mit einer konstant geringen Fehlerquote abzusuchen, schließt nicht nur den Ungenauigkeitsfaktor Mensch aus, sondern gestaltet die Datenaufbereitung wirtschaftlicher. Zur Veranschaulichung werden in Abschnitt 4 unterschiedliche Markertypen mit automatischer Detektion verglichen.

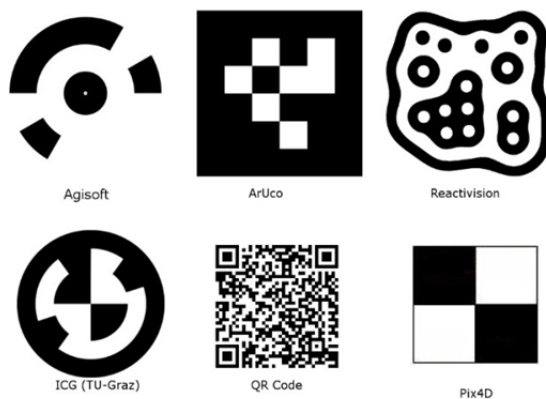


Abb.1: Unterschiedliche Markertypen (RUMPLER et al. 2014, GARRIDO et al. 2014, GARRIDO et al. 2016, Agisoft LLC, Pix4D SA)

Es existieren verschiedene Markertypen mit unterschiedlichen Formen und daraus resultierenden Detektionsmechanismen. Die am häufigsten verwendeten Formen sind dabei das Quadrat und der Kreis.

Die ArUco Marker basieren auf einer OpenCv (Open Source Computer Vision Library). Zu definieren sind die Anzahl an Bits, z.B. 4x4 in Abb. 1 die Summe der zu erzeugenden Marker sowie die Seitenlänge in Pixel. ARUcos besitzen eine quadratische Form, die gegenüber der runden den Vorteil vier detektierbarer Punkte pro Marker bietet (vier Eckpunkte). Die

Bits sind ebenfalls quadratisch und von einem schwarzen Rand (Border-Bit) umgeben, welcher eine erleichterte Detektion ermöglichen soll. Die Kodierung aus weißen und schwarzen Bits (Code) korrespondieren mit einer Marker ID (Garrido et al. 2016)

Der Detektionsprozess gliedert sich in zwei Hauptschritte. Im ersten Schritt wird das Bild auf die Form der Marker abgesucht. Werden mögliche Kandidaten gefunden, wird im zweiten Schritt entschieden, ob diese im Inneren des Markes den entsprechenden Code, passend zur Bibliothek, enthalten.

Neben der Bildqualität haben sowohl die Wahl der Markerform als auch die Position in der Umgebung vor Ort einen Einfluss auf eine erfolgreiche Detektion mit möglichst geringen Fehldetektionen. Die Flugaufnahmen sind im Zuge des Bauvorhabens der Montanuniversität Leoben, Zentrum am Berg, entstanden, um eine Volumenberechnung des Aushubmaterials für die ausführende Baufirma Swietelsky Tunnelbau zu erstellen, die Tauglichkeit von Drohnenaufnahmen zur Erkennung von Steinfall festzustellen sowie ein wirtschaftliches und genaues Arbeiten mit UAV-Photogrammetrie im Tunnelbau zu untersuchen.

Neben dem beschriebenen quadratischen Markertyp ArUco existiert noch eine Reihe weiterer, wobei im Folgenden speziell auf eine kreisrunde Entwicklung des Instituts für Maschinelles Sehen und Darstellen (ICG) an der TU Graz eingegangen werden soll (siehe Abb. 1 links unten): Nach Schwellenwert und Kantenerkennung, werden potentielle Marker durch Ellipsenanpassung extrahiert. Diese potentiellen Marker werden dann zu einem kanonischen Patch rektifiziert und, sofern mittels Hough Transformation Kreise gefunden werden können, verifiziert. Nach erfolgreicher Detektion erfolgt die Dekodierung durch Abrollen und Analyse des entstehenden Histogramms als Binärcode. Ist ausreichend hohe Übereinstimmung mit einer zuvor erstellten Bibliothek in zumindest 2 korrespondierenden Bildern gegeben, kann der Marker eindeutig lokalisiert und identifiziert werden (RUMPLER et al. 2014)

3 Fallbeispiele

3.1 UAV Ausrüstung

Der Lehrstuhl für Bergbaukunde an der Montanuniversität verfügt seit Herbst 2015 über eine eigene UAV-Ausrüstung. Es handelt sich dabei um einen Hexakopter, in Komponenten aus dem Modellflugbereich verbaut wurden (Abb. 2 können zwei Ansichten des startbereiten Systems entnommen werden). Für eine detaillierte Beschreibung der Komponenten wird an dieser Stelle auf TSCHARF et al. (2016) verwiesen. Das System verfügt über eine Genehmigung der Kategorie A (Austro Control 2015), womit das grundlegende Anwendungsfeld von Forschungsflügen in Bergbaubetrieben abgedeckt wird. 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. Die Steuerung des gesamten Systems erfolgt über eine mobile Bodenstation, die es ermöglicht, dass alle Funktionen (Flugkörper und Kamera) von einer Person erledigt werden können.



Abb. 2: Der Hexakopter des Lehrstuhls für Bergbaukunde

3.2 Bergbau

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 Böschungsstabilität und deren Beobachtung ein besonders hohes Gewicht zu. Neben dem Überprüfen der Standsicherheit von Böschungen und der Schaffung von Grundlagen für weitere Planungsaufgaben dienen die durchgeführten Bewegungsmessungen vor allem auch der Beweissicherung, insbesondere für behördliche Angelegenheiten.

Im Rahmen einer grundlegenden Potentialanalyse wurden über mehrere Befliegungen in einem Bergbaubetrieb nahe Leoben die Anwendungsmöglichkeiten der UAV-Photogrammetrie zur Durchführung von Beobachtungsmessungen untersucht. Die beflogene – und auch unter permanenter Beobachtung stehende - Felsböschung wurde über einen Zeitraum von mehreren Jahren in regelmäßigen Abständen aufgenommen und etwaige Veränderungen analysiert. Die Bildaufnahme wurde an das aufzunehmende Objekt angepasst, wobei insbesondere auf hohen Bildüberlapp, möglichst orthogonal auf die Wand ausgerichtete Aufnahmeachse und konvergente Aufnahmegeometrie geachtet wurde. Aufgrund der großen vertikalen Erstreckung wurde das Objekt in „vertikalen Bahnen“ aus unterschiedlichen Flughöhen erfasst, und zur Stabilisierung des Bildverbands noch weiter entfernte Schrägsichten in die Auswertung integriert. Für Genauigkeitsuntersuchungen und zur Schaffung eines einheitlichen Bezugskordinatensystems wurden insgesamt 46 Punkte im rund 6 ha umfassenden Gebiet eingemessen, vermarktet und signalisiert. Die Vermessung erfolgte als tachymetrische Netzmessung mit mehreren Standpunkten unter Verwendung einer Trimble S6 Totalstation und die Ausgleichung wurde in rmGEO durchgeführt.

3.3 Zentrum am Berg (ZaB)

Das Zentrum am Berg (ZaB) ist das Forschungs-, Entwicklungs- und Schulungszentrum der Montanuniversität Leoben für den Bau- und Betrieb untertägiger Anlagen (Abb. 3). Das ZaB besteht aus einem unterirdischen Tunnelsystem von jeweils mehreren 100 m Länge moderner Querschnitte für Eisenbahn (eingleisig, doppelröhrig) und Straße (zweispurig, doppelröhrig). Diese wurden im Hauptvortrieb von September 2017 bis Dezember 2018 am Steirischen Erzberg bei Eisenerz (Österreich) auf der Etage „Dreikönig“ errichtet. Das Ausbruchsmaterial der Tunnels in der Hauptvortriebsphase wird zu einem Damm von ca. 120.000 m³ aufgebaut, woraus eine Erweiterung der ebenen Einrichtungsfäche für das

Forschungszentrum hervorgeht. Unter verschiedenen Monitoringverfahren erfolgen Befliegung zur Beobachtung des mit losem Ausbruchsmaterial aufgeschütteten Damms. Sie dienen zur Detektion vereinzelter Steinfalls, der innerbetriebliche Verkehrswege unterhalb gefährden könnte.



Abb. 3: Aus Ausbruchsmaterial der Tunnelröhren aufgebauter Damm mit ca. 120.000 m³

Die Aufnahmen des Damms entstammen vier Befliegungen am gleichen Tag aus unterschiedlichen Flughöhen. Die verwendeten Marker sind, wie in Abb. 1 angeführt, zwei grundsätzlichen Markertypen zugehörig: den kreisförmigen (ICG) sowie rechteckigen (ArUco):

- Flug 1 80m Höhe, ArUco Marker
- Flug 2 60m Höhe, ArUco Marker
- Flug 3 60m Höhe, ICG Marker
- Flug 4 60m Höhe, ICG Marker

Für die Einpassung der photogrammetrischen Auswertung in das Projektkoordinatensystem liegen insgesamt sieben Punkte vor: 2 auf der Dammkrone, 2 zirka auf halber Höhe und beiderseits des Damms und 3 an der Unterkante. Die Vermessung der vermarkten sieben Punkte wird mit der Robotic Station Leica MS60 mittels Satzmessung in 2 Kreislagen vorgenommen. Zwischen den einzelnen Befliegungen wurden die Marker gewechselt. Die Messflüge erfolgten mit der Ausrüstung des Lehrstuhls für Bergbaukunde und wurden als zuvor geplanter und somit eindeutig reproduzierbarer Streifenflug mit an das Gelände angepasster Flughöhe durchgeführt. In der Pause von Flug 3 zu 4 wurden neben der Dammkrone Steine von zirka 25 cm Größe entfernt und an der Dammkrone hangabwärts geworfen. Ziel war die Feststellung, ob das Fehlen der Steine in der Punktwolke entdeckt und ihr Hinunterstürzen an der Dammoberfläche detektiert werden kann.

4 Ergebnisse

4.1 Automatisierte Markerdetektion

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben wurden bei der Befliegung am Zentrum am Berg zwei grundlegend verschiedene Passpunkt-Markertypen verwendet, um deren Einfluss auf die Auswertung und die Güte der Ergebnisse zu studieren.

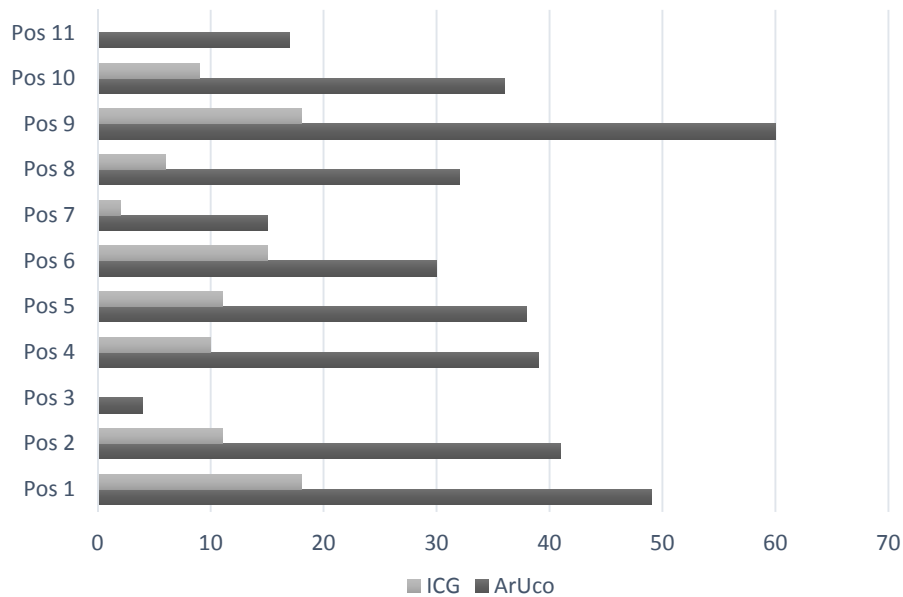


Abb. 4: Gegenüberstellung der Anzahl der Markerdetektionen anhand von zwei wiederholten Befliegungen am Forschungszentrum "Zentrum am Berg"

Quantitativ „messbar“ ist in dieser Gegenüberstellung die Anzahl der Detektionen je Marker und in weiterer Folge – nach Integration in den Bündelblockausgleich bzw. nach erfolgter Georeferenzierung – insbesondere die Rückprojektionsfehler sowie die dreidimensionalen Restklaffen der triangulierten Punkte. In Abb. 4 werden die Markersysteme ArUco und ICG (TU-Graz) gegenübergestellt. Aus ihr ist eindeutig ersichtlich, dass die quadratischen ArUco Marker wesentlich häufiger detektiert werden konnten. Dieser Umstand ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die einfachere Gestaltung des Binärcodes zurückzuführen. Während die „ICG Marker“ als rotationsinvarianter 10Bit Code ohne Startpixel ausgeführt sind, wurden die ArUcos mit 4×4 Bit + 1 Borderbit erzeugt und in Relation zur Gesamtgröße des Markers nimmt die „Codierung“ bei den kreisrunden Markern nur rund 31% ein, während die Fläche der ArUcos nahezu zur Gänze für die Codierung verwendet werden kann.

Neben der Anzahl an Detektionen ist bei vermessungstechnischen Anwendungen jedoch vielmehr die „geometrische Richtigkeit“ der Markerdetektion von Bedeutung, da diese als Güte der Bildmessung direkte Auswirkung auf die Qualität der 3D Rekonstruktion hat. Im Folgenden werden daher die erkannten Fehler paarweise gegenübergestellt, wobei insbesondere auch auf die Gegenüberstellung zwischen der analysierten automatischen Detektion mit einer manuellen Referenzmessung durch den Anwender eingegangen wird.

4.1.1 Marker ICG „manuell vs. automatisch“

Die automatische Detektion der ICG Marker liefert nur dann ein Ergebnis, wenn der Marker lokalisiert (Fitting der Ellipse) und robust dekodiert werden kann. Insbesondere bei höheren Flughöhen ist jedoch die Dekodierung bzw. „Entschlüsselung des Binärcodes“

nicht immer möglich, weshalb die Marker nur in verhältnismäßig wenigen Bildern erkannt werden können. Der menschliche Anwender leitet die ID des Markers nicht aus der Bildinformation ab und die Dekodierung erfolgt sozusagen unter Zuhilfenahme von zusätzlicher „Metainformation“, wie zum Beispiel einer Feldskizze mit den Markerpositionen. Entsprechend können zunächst auch Mittelpunkte ohne Kenntnis der ID markiert werden.

Im Ergebnis führt dies zu einer wesentlich höheren Anzahl an manuellen Detektionen, was sich vordergründig in der Tatsache äußert, dass bei der automatischen Detektion nur 5 der sieben Marker erkannt werden konnten. Anhand der Rückprojektionsfehler bzw. Restklaffen werden diese Unterschiede allerdings nur schwach sichtbar. Die manuelle Markierung zeigt etwas kleinere Rückprojektionsfehler bei geringfügig größeren Restklaffungen, wie anhand der Ergebnisse in Tabelle 1 deutlich erkannt werden kann.

Tabelle 1: Mittlere Restklaffungen ICG "manuell vs. automatisch"

ID	X error	Y error	Z error	Total	Image	# of Points
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[pix]	
manual	1,066	1,301	1,491	2,260	0,462	7
automated	0,767	0,567	1,166	1,527	0,492	5

4.1.2 ArUco „manuell vs. automatisch“

Wie den Ergebnissen in Tabelle 2 entnommen werden kann, sind die Unterschiede zwischen manueller und automatischer Detektion bei den ArUco Markern marginal. Dies betrifft sowohl die Anzahl der Detektionen (vgl. Abb. 4) als auch die Größe der Rückprojektionsfehler und Restklaffungen.

Dieser Umstand deutet, wie bereits in Abschnitt 4.1.1 erkannt, darauf hin, dass die automatische Bildmessung in einem ähnlichen Genauigkeitsbereich erfolgt, wie sie auch von einem menschlichen Anwender durchgeführt werden kann.

Tabelle 2: Mittlere Restklaffungen Aruco "manuell vs. automatisch"

ID	X error	Y error	Z error	Total	Image	# of Points
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[pix]	
manual	1,722	2,896	1,721	3,783	0,451	7
automated	1,622	2,583	1,665	3,474	0,600	7

4.1.3 Marker „ICG vs. ArUco“ (manuell)

Aufgrund der besseren Erkennbarkeit, verstärkt durch die –ähnlich einer Zielscheibe ausgeführte - „Center Refinement Markierung“ ist es für den menschlichen Anwender leichter den Mittelpunkt der kreisrunden ICG Marker zu markieren, als die Mitte der rechteckigen ArUcos abzuschätzen. Insbesondere bei Schrägsicht ist die Mitte des Rechtecks nicht eindeutig erkennbar, bzw. ist auch die Codierung der ArUco Marker grundsätzlich nicht darauf ausgelegt, den Mittelpunkt eindeutig zu markieren.

Die untersuchten ArUco Marker zielen ursprünglich auf die Eckpunkte des rechteckigen Markers ab und die Mittelpunkte müssen (falls notwendig) im Nachgang daraus berechnet werden. Ist eine manuelle Auswertung, eine händische Markierung des Markerzentrums, erforderlich, so müsste bei der Erstellung der Marker darauf geachtet werden, Marker mit solcher Kodierung auszuwählen, deren Mittelpunkt klarer erkennbar ist, oder aber bei der

herkömmlichen Passpunktmessung müssten nicht die Mittelpunkte sondern entsprechend die Eckpunkte der Marker eingemessen werden.

Aus der in Tabelle 3 dargestellten Gegenüberstellung von Flug 2 mit Flug 3 bzw. 4 geht dieser Umstand eindeutig hervor. Die 3D Restklaffungen nach der Transformation in das übergeordnete Referenzkoordinatensystem sind bei den ICG Markern mit 2,260 cm deutlich geringer als bei den ausgewerteten ArUcos (3,783 cm).

Tabelle 3: Mittlere Restklaffungen manuell „ICG vs. Aruco“

ID	X error	Y error	Z error	Total	Image	# of Points
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[pix]	
ICG	1,066	1,301	1,491	2,260	0,462	7
Aruco	1,722	2,896	1,721	3,783	0,451	7

4.1.4 Marker „ICG vs. Aruco“ (automatisch)

Die untersuchten ArUco Marker werden rund 3 mal häufiger erkannt als die kreisrunden Marker der TU Graz, was natürlich zu einer wesentlich höheren Gesamtanzahl an Detektionen führt (vgl. Abb. 4). In den Rückprojektionsfehlern zeigen jedoch die ICG Marker die deutlich besseren Ergebnisse bzw. geringeren Fehler.

Dies liegt wohl einerseits daran, dass die Bildmessung bei den kreisrunden Markern genauer durchgeführt werden können, was teilweise auch optisch anhand der Bilder mit den verorteten Markern erkannt werden kann.

Andererseits ergeben sich die geringen Restklaffungen im Falle der ICG Marker vor allem auch dadurch, dass bei insgesamt 5 Markern kaum Überbestimmung vorhanden ist, und die Ergebnisse nahe an der eindeutigen Minimallösung (drei nicht kollineare Punkte zur Schätzung der 7-Parametertransformation) sind. Entsprechend müssen die untersuchten Restklaffungen sehr klein sein und bei der Ableitung voreiliger Schlüsse muss entsprechend vorsichtig vorgegangen werden.

Tabelle 4: Mittlere Restklaffungen automatisch „ICG vs. Aruco“

ID	X error	Y error	Z error	Total	Image	# of Points
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[pix]	
ICG	0,767	0,567	1,166	1,527	0,492	5
Aruco	1,622	2,583	1,665	3,474	0,600	7

4.2 Böschungsmonitoring mittels UAV

Die erreichbaren und in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Genauigkeiten (Restklaffungen im Bereich weniger Zentimeter) legen die Vermutung, dass die hier untersuchte photogrammetrische UAV-Vermessung im Rahmen gewisser Grenzen auch zur Veränderungsmessung an natürlichen oder künstlichen Böschungen eingesetzt werden kann. So müsste es möglich sein, lokale Veränderungen an Felsböschungen (Ausbrüche, Abplatzungen, Rissbildungen, usw.) bzw. auch Setzungen und Bewegungen an geschütteten Bauwerken wie zum Beispiel am Zentrum am Berg erkennen zu können.

4.2.1 Bergbau

Anhand der Beobachtungskampagne im beschriebenen Bergbau nahe Leoben wird das Potential der UAV-Photogrammetrie zum Böschungsmonitoring noch einmal praktisch verdeutlicht. Aus der Gegenüberstellung verschiedener Messepochen, und der Berechnung der räumlichen Distanzen in den hochaufgelösten 3D-Punktwolken ist es möglich Veränderungen zu lokalisieren und anschließend auch zu quantifizieren. Während große Teile des Böschungssystems weitestgehend stabil waren, kam es im Beobachtungszeitraum allerdings auch zu einem größeren lokalen Felssturz (rund 1 500m³), der mittels UAV-Vermessung genau lokalisiert und quantifiziert werden konnte. So konnte eindeutig gezeigt werden, von welchen Bereichen das Versagen ausging, und außerdem konnten die Sturzmassen quantifiziert, sowie der Sturzraum abgegrenzt werden. Dies ist jedoch nicht nur für größere und mit freiem Auge ersichtliche Massenbewegungen möglich, sondern bei entsprechender Flugplanung und –durchführung, sowie Güte der Georeferenzierung (siehe Abschnitt 4.1) können Veränderungen in der Größenordnung weniger Zentimeter festgestellt und beobachtet werden, was auch anhand der Datensätze vom Steirischen Erzberg noch einmal gezeigt werden kann.

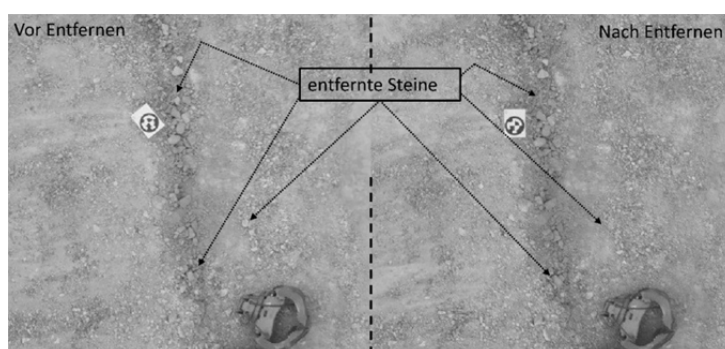


Abb. 5: Orthofotos mit Auflösung 2x2 cm. Links: Vor Abwerfen der Steine. Rechts: nach Abwerfen

4.2.2 Zentrum am Berg (ZaB)

Aus den Befliegungen des aufgebauten Damms des Zentrums am Berg (Abb. 3) resultiert eine hoch aufgelöste 3D-Geometrieerfassung dieser künstlich hergestellten Böschung. Zur Untersuchung der Auflösungsgrenzen dienen die Flüge 3 und 4 aus Abschnitt 3.3, aus denen in Abb. 5 Ausschnitte eines Orthofotos mit 2x2 cm Auflösung an derselben Position dargestellt sind. Die in Abschnitt 3.3 skizzierte Vorgangsweise, zu Testzwecken einzelne Steine von ca. 25 cm Größe zu entfernen und über die Böschung abzuwerfen, drückt sich ebenfalls in Abb. 5 aus, die links diese Steine erkennen lässt, während sie rechts deutlich ersichtlich fehlen.

Der Geometrievergleich beider Punktwolken mittels Cloud-To-Cloud-Distanz (C2C) in CloudCompare spiegelt sich in Abb. 6 wider, die links die Punktwolke monochrom wiedergibt, während Abb. 6 rechts entsprechend einer Graustufenkodierung von 0 bis 10 cm die C2C-Auswertung illustriert. Die beseitigten Steine treten darin deutlich hervor und kennzeichnen die Flugaufnahmen als in hohem Maß fähig, über Geometrieänderungen vorgekommenen Steinfall aus dem Damm festzustellen. Diese Aussage untermauern zusätzlich die beobachtbaren Spuren in Abb. 6 rechts, die die abgeworfenen Steine auf dem Damm durch Mitreißen von weiterem losen Material verursacht haben.

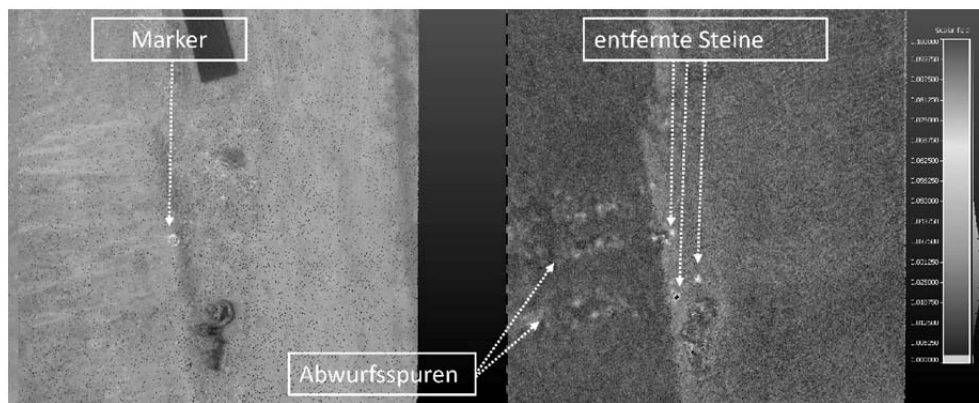


Abb. 6: Links: Zur Orientierung die Situation aus Abb. 5 mit einem ArUco-Marker. Rechts: Graustufen-kodierte C2C-Auswertung entsprechend der Skala rechts mit den hell heraustretenden Indikationen der beseitigten Steine (~25 cm max. Ausdehnung).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Der vorliegende Beitrag zeigt das hohe Potenzial der UAV-Photogrammetrie für die Gefahrenerkennung von Steinfall und deren Massenbilanzierung anhand von Fest- und Lockergesteinsböschungen. Dieses Potenzial gründet sich zusätzlich auf dem in der Regel im Berg- und Tunnelbau fehlenden Bewuchs, wodurch die Auswertung doch vereinfacht wird. Die Vergleichbarkeit der Punktwolken unterschiedlicher Messepochen setzt die Georeferenzierung der Flugaufnahmen mit einer an die Erfordernisse angepassten Genauigkeit voraus.

Im Beitrag wird auf die Georeferenzierung mittels Passpunkten und unterschiedlichen Markersysteme – kreisrunde ICGs (TU-Graz) und rechteckige ArUcos – eingegangen. Letztere wurden 3-mal häufiger automatisiert detektiert als die ICGs. Aus dem Vergleich der Häufigkeit der detektierten Marker bietet der Markertyp ArUco Vorteile, da er am ausgeprägtesten die Möglichkeit eröffnet, die in der Natur gekennzeichneten Passpunkte und deren Konfiguration automatisch in entsprechende Auswertewertesoftware (z.B.: Agisoft Photoscan) als Projektionen zu übertragen.

Unterschiede der händischen Markierung der Markertypen ergeben sich aus deren Aussehen. So weist der Typ ICG Vorteile für die manuelle Markierung auf Grund der guten Er-sichtlichkeit des Zentrums auf. Diesem Umstand kann bei den ArUco-Markern Rechnung getragen werden, indem aus den mehreren 100 unterschiedlichen Kodierungen der ArUco-Bibliothek solche mit guter Sichtbarkeit des Zentrums gewählt werden können.

Die Aussagen zur Genauigkeit der automatischen Bildmessung werden durch die unterschiedlich große Grundgesamtheit erschwert. Der Vergleich der mittleren Restklaffungen deutet darauf hin, dass die Genauigkeit der automatischen Bildmessung mit den ICG-Markern jene mit den ArUco-Markern übertrifft. In diesen Vergleich muss jedoch auch die geringere Anzahl an Detektionen der ICG-Marker einbezogen werden, sodass weniger Bildmessungen den, für die Einpassung in das Projektkoordinatensystem nötigen, Trans-

formationselementen und den, für die innere Orientierung der Kamera nötigen Parametern, gegenüberstehen.

Grundsätzlich zeigt sich jedoch sehr deutlich, dass die stärkere Automatisierung sich positiv auf die Güte der Ergebnisse auswirken kann und überdies kann angemerkt werden, dass eine Vereinfachung - wie z.B. die automationsunterstützte Detektion von Passpunktmarkern – einer wirtschaftlichen Durchsetzung dieser Technologie mit Sicherheit förderlich ist.

Literatur

- AUSTRO CONTROL GMBH (2015): Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeitsanforderungen für unbemannte Luftfahrzeuge der Klasse 1, Lufttüchtigkeits- und Betriebstüchtigkeits-hinweis Nr. 67 (LBTH 67), 2015
- CONTE G., RUDOL P., DOHERTY P. (2014): Evaluation of a light weight lidar and a photogrammetric system for unmanned airborne mapping applications, In: Journal for Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation, "014/4, 287-298
- GARRIDO-JURADO, S., MUÑOZ-SALINAS, R., MADRID-CUEVAS, F. J., MARÍN-JIMÉNEZ, M. J. (2014): Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. Pattern Recognition 47 (2014), H. 6, S. 2280–2292.
- GARRIDO-JURADO, S., MUÑOZ-SALINAS, R., MADRID-CUEVAS, F. J., MEDINA-CARNICER, R. (2016): Generation of fiducial marker dictionaries using Mixed Integer Linear Programming. Pattern Recognition 51 (2016), S. 481–491.
- HOPPE C., KLOPSCHITZ M., RUMPLER M., WENDEL A., KLUCKNER S., BISCHOF H., REITMAYR G. (2012): Online Feedback for Structure from Motion image acquisition, In Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC), Guildford, 2012
- MARTIN C.D., TANNANT D.D., LAN H. (2007): Comparison of terrestrial-based, high resolution, LIDAR and digital Photogrammetry Surveys of a rock slope, in Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, 2007
- PILGRAM R. & RANDJBAR B. (2003): Markscheiderische und Geotechnische Messungen an Hängen und Böschungen, BHM 148 (2003), H12, 487-492
- PILGRAM R., MAYER G., KREMSER F. (2011): Die Messtechnische Erfassung von Bodenbewegungen an Hängen und Böschungen, BHM 156 (2011), H4, 131-141
- RUMPLER, M.; DAFTRY, S.; TSCHARF, A.; PRETTENTHALER, 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., CLAUCHLAN P.M., HARTLEY R., FITZGIBBON. (2000): Bundle Adjustment - a modern synthesis, Vision Algorithms: Theory and Practice, LNCS, 2000
- WUJANZ D., NEITZEL F., HEBEL H.P., LINKE J., BUSCH W. (2013): Terrestrial Radar and Laser Scanning for deformation monitoring: First steps towards assisted radar scanning, ISPRS Annals of the Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information, Volume II-5/W2, 2013
- WALTER D., KAMPHANS K, BUSCH W., SPRECKELS V. (2008): Einsatz der Radarinterferometrie im Rahmen des GIS-basierten Monitoringsystems zur Analyse bergbaulicher Bodenbewegungen. 9. Geokinematischer Tag, Freiberg, Tagungsband 2008, 75-90