

# Möglichkeiten des Einsatzes von luftgestützter Photogrammetrie zur Bewertung geotechnischer Fragestellungen

Prof. Dr.-Ing. J. Gattermann<sup>1</sup>, M. Brosch<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hochschule für angewandte Wissenschaften, Augsburg, <jens.gattermann@HS-Augsburg.de>

---

## KURZFASSUNG

---

Im vorliegenden Beitrag wird der Einsatz der luftgestützten Photogrammetrie für die Bewertung der Rutschneigung bzw. der Felsschlaggefahr anhand zweier Beispiele vorgestellt. Im ersten Beispiel wurde eine schwer zugängliche und ca. 500 m hohe, nahezu vertikale Felswand aufgenommen und ein 3D-Modell erzeugt. Hiermit konnten unter Berücksichtigung weiterer geotechnischer Aspekte qualitative Aussagen zu möglichen Felsabbrüchen getroffen werden. Im zweiten Beispiel wurde die Geländeoberfläche eines seit mehreren Jahrzehnten rutschenden Hanges mit verschiedenen Messverfahren erfasst. Untersucht wurden dabei neben der terrestrischen Tachymetrie auch die luftgestützte Photogrammetrie. Neben dem Vergleich der Messverfahren hinsichtlich der Genauigkeit und der Anwendbarkeit wurde hier der Umfang der Massenbewegungen abgeschätzt und ein EDV-basiertes Berechnungsmodell erstellt.

*Schlagworte: Photogrammetrie, Drohne, Rutschhang, Felsmechanik,*

## 1 EINLEITUNG

Die Photogrammetrie ermöglicht es, eine dreidimensionale Darstellung eines Objektes aus unter bestimmten Bedingungen aufgenommenen Bildern zu generieren. Neben der Luftbildphotogrammetrie und der Fernerkundung ist vor allem die Nahbereichsphotogrammetrie, bei der die Entfernung zwischen Kamera und Objekt ca. 50 m bis 300 m beträgt, für die Bautechnik von Interesse. Durch die Digitalisierung und insbesondere durch die Verfügbarkeit von einfachen, unbemannten und kostengünstigen Fluggeräten (Drohnen) ist die sogenannte UAV-Photogrammetrie (Unmanned Airborne Vehicle) in den Fokus gerückt. Als bekannte Anwendungen sind Geländeaufnahmen oder Aufmasse im Erdbau zu nennen. Nachfolgend soll anhand von zwei Beispielen beleuchtet werden, inwieweit die UAV-Photogrammetrie auch einen Beitrag für die Lösung geotechnischer Probleme leisten kann.

## 2 GRUNDLAGEN

### 2.1 Prinzip

Durch das Überfliegen eines Geländes mithilfe eines mit Kameras ausgestatteten Fluggeräts können zentralperspektivische Luftbildaufnahmen erzeugt werden. Diese Aufnahmen geben die dreidimensionale Erdoberfläche jedoch nicht genau wieder, sondern müssen mittels spezieller Verfahren, z.B. der Mehrbildmessung, zu einem exakten Orthofoto entzerrt werden. Bei der Bündeltriangulation bzw. Mehrbildphotogrammetrie definieren die Bildpunkte eines Messbildes zusammen mit den Parametern der inneren und äußeren Orientierung (bildspezifischen Parameter, Fest- und Passpunkte) ein räumliches Richtungs Bündel. Durch die Triangulation von mindestens zwei Richtungs Bündeln werden die dreidimensionalen Koordinaten der Objektpunkte bestimmt. (Möser, Müller, Schlemmer, Werner 2000)

## 2.2 Arbeitsschritte bei der UAV-Photogrammetrie

Der Arbeitsablauf bei der UAV-Photogrammetrie gliedert sich in verschiedene Arbeitsschritte. Als vorbereitende Arbeiten sind zu Georeferenzierung und Orientierung Passpunkte bzw. Referenzpunkte zu setzen und gut sichtbar zu markieren. Diese Passpunkte sind auf das im Untersuchungsgebiet gültige Koordinatenreferenzsystem und vorhandene Festpunkte einzumessen. Sofern Echtzeitpositionierungsdienste verfügbar sind, besteht alternativ auch die Möglichkeit, Festpunkte mittels GNSS-Vermessung direkt im Gelände herzustellen.

Im nächsten Schritt erfolgt der eigentliche Bildflug. Hierzu wird ein Flugplan erarbeitet, der von der Drohne dann automatisiert über Koordinatensteuerung abgeflogen wird. Hierbei sind neben dem Raster der Bilder auch die Parameter Flughöhe und Fluggeschwindigkeit zu beachten. Ziel ist eine hinreichende Aufnahmequalität und eine ausreichende Überlappung der Bilder, um möglichst viele Blickwinkel auf ein und denselben Punkt zu erhalten. Mittels entsprechender Software werden im Zuge der Mehrbildorientierung alle Bildpunkte und Muster ermittelt, die auf zwei oder mehreren Aufnahmen abgebildet sind. Die Bildorientierung wird dabei mittels Bündelungsausgleich ermittelt. Im Anschluss daran wird das Modell über die zuvor gesetzten Passpunkte skaliert und georeferenziert. Im letzten Schritt können mittels verschiedenster Softwareanwendungen digitale Oberflächenmodelle (DOM) und 3D-Modelle erzeugt werden. (Witte, Sparla, 2015)

## 3 BEISPIEL 1: KARTIERUNG FELS-WAND

### 3.1 Aufgabenstellung

Ein Wanderweg in den Loferer Steinbergen verläuft in Teilbereichen am Fuß einer steilen Felswand. Entlang dieses Wegabschnittes wurden vermehrt Spuren abgegangener Steinschläge festgestellt. Um Aussagen über Versagensarten einzelner Felsblöcke und der Sturzprozesse treffen zu können, war zunächst eine geotechnische Aufnahme der Felswand notwendig. Da eine klassische Kartierung einer schwer zugänglichen und ca. 500 m hohen, nahezu vertikalen

Felswand nur mit extrem hohem Aufwand möglich ist, wurde nach alternativen Möglichkeiten gesucht. Hierbei bot sich die Aufnahme der Felswand mittels UAV-Photogrammetrie an. Für die geotechnische Bewertung war dabei nicht nur die Oberfläche der Felswand, sondern auch die Erfassung der Raumstellung von Trennflächen im Gestein notwendig.

### 3.2 Photogrammetrische Aufnahmen und 3D-Modell

Die hochalpine und schwer zugängliche Lage der Felswand in den Loferer Steinbergen erforderte umfangreiche Vorarbeiten, wie die Erfassung von frischen Abbrüchen sowie die mehrfache Begehung des Geländes unterhalb der Felswand zur Eingrenzung des gefährdeten Wegabschnittes. Die Aufnahme der Felswand erfolgte durch UAV-Photogrammetrie mithilfe von Drohnen. Insgesamt wurden über 2300 Bildaufnahmen aufgenommen, aus denen über 900.000 Verknüpfungspunkten bestimmt wurden.



Abbildung 1 Maßstäbliches 3D-Modell der Felswand (Bosch, Hildebrand, 2019)

Mit den zwei Programmen (PhotoScan Professional und Pix4Dmapper) wurden jeweils 3D-Modelle der Felswand erzeugt. Zur Veranschaulichung der Verhältnisse wurde ein 3D-Druck des Modells erzeugt. Für eine fotorealistische Darstellung wurde das Modell anschließend mit einer bedruckten Folie überzogen.

### 3.3 Geotechnische Auswertung

Für die geotechnische Bewertung der Felswand war vor allem das Trennflächengefüge, d.h. die Orientierung der Schicht- und Klufflächen sowie der Abstand der Trennflächen zueinander bzw. die Mächtigkeit der Schichtpakete von Bedeutung. Dazu wurden am digitalen Modell einzelne Stellen betrachtet, an denen die Trennflächen als kleine Flächen in der Felswand hervortreten. An diesen Stellen wurde mittels drei Punkten eine mathematische Ebene definiert und über die Abbildung des Normalenvektors die Raumstellung bzw. der Fall- und Streichwinkel der einzelnen Trennflächen ermittelt.

Mithilfe ergänzender geologischer Informationen konnte ein Gefügemodell für die in der Felswand anstehende Abfolge aus massiven Kalksteinbänken mit Zwischenschichten aus Algenmatten (Lofer Zyklotem) erstellt werden. Durch die Betrachtung von Versagensarten, wie Felsabbrüchen bzw. Steinschlägen für exemplarisch ausgewählte Felspartien und der Simulation von Sturzprozessen konnten hieraus Rückschlüsse auf eine mögliche Gefährdung des Wanderweges abgeschätzt werden.

## 4 BEISPIEL 2: RUTSCHHANG

### 4.1 Aufgabenstellung

Bei einem Weinberghang entlang des Mains kommt es seit der Beendigung der Flurbereinigung Ende der 1960-er Jahre immer wieder zu Rutschungen. Diese Rutschungen führen zu Schäden an Anbauflächen und den weitgehend hangparallelen Wirtschaftswegen. Trotz verschiedener Maßnahmen in den vergangenen Jahrzehnten, wie dem Einbau von Drainagen, sind die Hangbewegungen bis dato nicht abgeschlossen. Um die geotechnischen Versagensmechanismen zu beschreiben und langfristig ein tragfähiges Sanierungskonzept erarbeiten zu können, war u.a. die möglichst exakte Kenntnis der Lage und des Umfangs der eintretenden Hangbewegungen notwendig. Hierzu war ein geeignetes Aufnahmeverfahren für ein zukünftiges Monitoring auszuwählen. Auch hier bot sich der Einsatz der UAV-Photogrammetrie an, wobei auch die Genauigkeit des Verfahrens im Vergleich zu „klassischen“ Vermessungsverfahren zu prüfen war.

### 4.2 Terrestrische Vermessung

Zur Vorbereitung der terrestrischen Vermessung wurde zunächst ein Netz von 35 Passpunkten erstellt. Diese mit Hilfe des GNSS-Rovers eingemessenen Passpunkte bilden das Grundgerüst für alle weiteren Vermessungen. Im Zuge der terrestrischen Vermessung wurden sowohl tachymetrische Rasteraufnahmen als auch Profilaufnahmen durchgeführt. Die Rasteraufnahmen wurden, abgestimmt auf die Rebreihen, mit zwei verschiedenen Abständen (3 und 6 m) durchgeführt.

Die Genauigkeit der Messpunkte auf den befestigten Wegen betrug maximal 1 cm. Im Gegensatz hierzu liegt die Genauigkeit der Messpunkte im Weinberg bei ca. 5 cm, wobei diese Abweichung neben den Geräte- und Stationierungsfehlern vor allem auf das Einsinken des Reflektorstabs im weichen Untergrund zurückzuführen war. Mit Hilfe von Softwarelösungen wurde aus den terrestrisch aufgenommenen Punkten (2482 Punkte auf 47.167 m<sup>2</sup>) ein digitales Geländemodell erstellt. Zur Verbesserung der Qualität wurden Punkte entlang der Straßenränder aufgenommen und als Kanten in das DGM eingefügt.

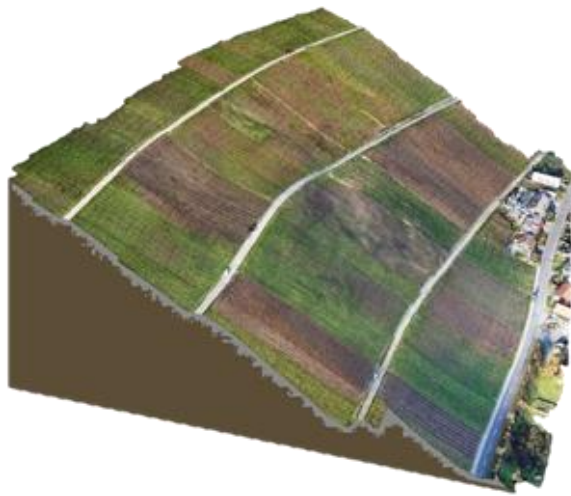
### 4.3 Photogrammetrische Aufnahme

Für die photogrammetrische Aufnahme wurden die schon für die terrestrische Vermessung erstellten Pass- bzw. Referenzpunkte verwendet. Zur Identifizierung der gesetzten Referenzpunkte auf den Fotoaufnahmen wurden diese Referenzpunkte mit Erkennungsmarken versehen. Aufgrund der Größe des zu befliegenden Gebiets war eine Aufteilung der Flugstrecken in zwei Teile notwendig. Auf vordefinierten Routen wurden insgesamt 462 Bilder vom Fluggebiet aufgenommen. Hiermit wurde ein Aufnahmegebiet mit einer Gesamtfläche von ca. 9,5 ha erfasst. Die Auswertung der luftgestützten Aufnahmen und die Erstellung eines digitalen Geländemodelles erfolgte mit Hilfe der Software „Agisoft PhotoScan Professional“.

### 4.4 Vergleich der Messverfahren

Zum Vergleich der mit unterschiedlichen Verfahren ermittelten digitalen Geländemodelle können verschiedenen Methoden herangezogen werden. So kann die Lageabweichung der Hö-

henlinien, die Neigung oder auch die Volumendifferenz der Modelle verglichen werden. Ein Höhenvergleichsmodell, das aus der Subtraktion der Höhen zweier zu vergleichender Geländemodelle entsteht, zeigt die Unterschiede recht anschaulich. Hierzu müssen zunächst beide Modelle modifiziert werden, so dass die Grundfläche bzw. die Umrisse identisch sind. Als Ergebnis erhält man den Höhenunterschied zwischen den beiden Modellen über der gemeinsamen Grundfläche.



**Abbildung 2** Dreidimensionales digitales Geländemodell des Rutschhangs (Brosch, Dumont, Fickert, 2018)

Generell ergibt sich hinsichtlich der Erfassung der Geländeoberfläche eine sehr gute Übereinstimmung der auf photogrammetrischer Basis erstellten Modelle mit den „terrestrischen“ Vergleichsmodellen. So sind der Verlauf der Höhenlinien, wie auch die Neignungsverhältnisse nahezu identisch. Mit den Höhenvergleichsmodellen zeigt sich jedoch, dass bei den Modellen auf Basis der UAV-Photogrammetrie die Geländehöhen im Mittel ca. 7 cm höher als bei den Vergleichsmodellen auf Basis terrestrischer Vermessung liegen. Dieser Unterschied ergibt sich aus der Art der Aufnahmeverfahren. Bei der terrestrischen Vermessung dringt die Spitze des Lotstabes wenige Zentimeter in den Boden bzw. die Vegetationsschicht ein, wogegen bei der luftgestützten Vermessung die sichtbare Oberfläche, bzw. der Bodenbewuchs oder herabgefallenes Laubwerk, aufgenommen wird.

#### 4.5 Geotechnische Auswertung

Neben der Bewertung verschiedener Messverfahren für die Verformungen an der Geländeoberfläche wurde mithilfe der Messdaten und unter Zuhilfenahme weiterer geotechnischer Felduntersuchungen (Spang 2015) ein Berechnungsmodell erstellt. Hiermit wurde der Einfluss wesentlicher Kenngrößen auf die Hangbewegungen abgeschätzt. Mittels dieser Untersuchungen konnte ein Zusammenhang zwischen der Hangneigung, der Mächtigkeit der Deckschichten und den hydraulischen Randbedingungen ermittelt und besonders gefährdete Hangbereiche identifiziert werden.

### 5 ZUSAMMENFASSUNG

Anhand von zwei Beispielen wurden die Möglichkeiten des Einsatzes luftgestützter Photogrammetrie zur Bewertung geotechnischer Fragestellungen diskutiert. Im ersten Beispiel konnte eine schwer zugängliche Felswand mittels UAV-Photogrammetrie kartiert und eine darauf aufbauende geotechnische Bewertung hinsichtlich Versagens- und Sturzprozesse vorgenommen werden. Im zweiten Beispiel konnte nachgewiesen werden, dass mittels UAV-Photogrammetrie Geländeaufnahmen in ähnlicher Qualität wie bei der deutlich aufwendigeren terrestrischen Vermessung möglich sind. Zudem konnten der Ort und Umfang der Massenbewegungen identifiziert und daraus ein geotechnisches Berechnungsmodell unter Zuhilfenahme weiterer geotechnischer Informationen erstellt werden.

### LITERATUR

- Bosch, I., Hildebrand, M. Felssturzgefahr in den Loferer Steinbergen. Masterarbeit Hochschule Augsburg, 2019. unveröffentlicht.
- Brosch, M., Dumont, F., Fickert, F. Bewertung der Rutschneigung von Hängen. Projektarbeit Hochschule Augsburg, 2018. unveröffentlicht.
- Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik Dr. Spang mbH. Hangrutsch im Ortsteil Escherndorf, Stadt Volkach. Gutachten, Nürnberg, 2015.
- Möser, Müller, Schlemmer, Werner. *Handbuch Ingenieurgeodäsie*. Heidelberg: Wichmann, 2000
- Witte, B., Sparla, P. Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 8., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Wichmann, 2015. ISBN 978-3-87907-552-2.