

---

# Synergetischer Einsatz von UAV- und Nahbereichs-Photogrammetrie zur Vermessung von Gullys

Claudia STÖCKER, Anette ELTNER und Pierre KARRASCH

Technische Universität Dresden · Claudia.Stoecker@mail.de

## Zusammenfassung

Gullys beschreiben komplexe geomorphologische Systeme, die für ihr Prozessverständnis eine präzise Erfassung ihrer Morphologie notwendig machen. Diese Studie zeigt, dass die Kombination aus der UAV- und Nahbereichs-Photogrammetrie bestehende Lücken in der Datenerfassung schließen kann.

## 1 Einleitung

Gullys sind Erosionsgräben, die oft mit erheblichen Folgen für die Landwirtschaft einhergehen, da permanent fertile Flächen verloren gehen. In der fragilen Mergellandschaft Andalusiens sind Gullys ein häufiges Phänomen. Die Erodibilität des Bodens, die Erosivität saisonaler torrentieller Niederschlagsereignisse sowie die starke ackerbauliche Nutzung verursachen sehr hohe Bodenerosionsraten (u. a. FAUST & SCHMIDT 2009, BRACKEN & KIRKBY 2005, POESEN & HOOKE 1997). Um die Dynamik der Gullygenese besser zu verstehen, ist ihre umfassende und genaue Erfassung notwendig.

Um das Volumen von Gullys sowie deren Erosionsraten zu erfassen, wurde in der Vergangenheit vor allem auf die Auswertung flugzeuggestützter Luftbilder zurückgegriffen. Dabei konnten Auflösungen im Meterbereich erzielt werden (vgl. DABA et al. 2003). Seit wenigen Jahren etablieren sich Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), welche einen völlig neuen Maßstab der photogrammetrischen Aufarbeitung geomorphologischer Fragestellungen erlauben. Die rasche Entwicklung der UAV-Technik ermöglicht eine kostengünstige und flexible Datenakquise. Zusätzlich gibt es aufgrund bedeutender Fortschritte in Computer Vision und digitaler Photogrammetrie Softwarelösungen, welche die aufgenommenen Luftbilder in wenigen Schritten zu hochaufgelösten Geländemodellen prozessieren. Obwohl diese Methodik bei der Erkundung von Gullys ein großes Potenzial aufweist, ist sie in der Literatur erst sehr wenig besprochen. Erste Befliegungen von Gullys fanden im Sahel und in Spanien mit Drachen und Ballons statt (vgl. MARZOLFF & POESEN 2009). In Marokko verfolgen D'OLEIRE-OLTMANN et al. (2012) einen multi-scale Ansatz, bei dem Gullys aus unterschiedlichen Höhen befliegen werden.

## 2 Zielsetzungen

Ein Problem der Datenakquise aus der Luft stellen Überhänge und steile Geländeformen dar. Hierbei gelangt die Methodik der UAV-Photogrammetrie aufgrund der gegebenen

Aufnahmegeometrie an ihre Grenzen. Neben der technisch aufwendigen Nutzung von beispielsweise terrestrischen Laserscanning (TLS) wird eine vollständige photogrammetrische Erfassung des Gullys möglich, wenn es gelingt, die Vorteile terrestrischer und UAV-gestützter Aufnahmeverfahren in geeigneter Weise zu kombinieren.

Das Ziel der Studie ist die Fusion von Nahbereichs- und UAV-Photogrammetrie zur Erzeugung eines konsistenten hoch aufgelösten digitalen Oberflächenmodells. Hierbei sollen Lücken der UAV-Daten mit terrestrischen Aufnahmen ergänzt werden, um ein ganzheitliches digitales Geländemodell eines Gullys zu generieren. Darüber hinaus wird untersucht, ob das dabei generierte terrestrische 3D-Modell ohne zuvor eingemessener Passpunkte (ground control points – GCPs) für eine Fusion der unterschiedlich akquirierten Punktwolken geeignet ist. Insgesamt werden Untersuchungen für drei Testgebiete nördlich der kleinen Stadt Espera in der Mergellandschaft Andalusiens durchgeführt.

## 3 Methoden

### 3.1 Datengrundlage und Datenvorverarbeitung

Die Befliegung wird mit der Mikrodrohne *AscTec Falcon 8* in einer Flughöhe von ca. 15 m mit einer Querüberlappung von 60 % und einer Längsüberlappung von 80 % durchgeführt. Die Drohne integriert einen automatisch stabilisierenden Kamerahalter. Zum Einsatz kommt die Systemkamera Sony NEX-5N mit einer Festbrennweite von 16 mm. Der Sensor besitzt eine Größe von  $23,5 \times 15,6 \text{ mm}^2$ . Die Pixelgröße beträgt  $4,8 \text{ }\mu\text{m}$ . Die terrestrischen Bilder werden mit der Spiegelreflexkamera Nikon D100 mit einer Festbrennweite von 28 mm aufgenommen. Der Sensor ist  $23,7 \times 15,6 \text{ mm}^2$  groß und besitzt eine Pixelgröße von  $7,8 \text{ }\mu\text{m}$ . Initiale Parameter der inneren Orientierung resultieren aus einer Kalibrierung, welche direkt nach der Objekterfassung vor Ort mit einem mobilen Testfeld erfolgt. Die erhaltenen Kameraparameter werden im Rahmen der automatischen Bildorientierung zur Erzeugung der digitalen 3D-Modelle mit der Methode der Selbstkalibrierung verbessert.

Zur Referenzierung der Daten wird ein lokales Netz angelegt. Für die UAV- und terrestrischen Fotos werden unterschiedliche Passpunkte ausgelegt, die an die jeweilige Auflösung der Kameras und ihrer Lage zum Untersuchungsobjekt angepasst sind (Drohnenpasspunkte  $\varnothing$  5 bis 10 cm, terrestrischer Passpunkt  $\varnothing$  2,5 cm). Die Einmessung der Passpunkte erfolgte mit geodätischen Verfahren der Tachymetrie und einer horizontalen sowie vertikalen Genauigkeit von 5 mm. Während die absolute Orientierung der UAV-Aufnahmen mit den Passpunkten berechnet wird, erfolgt die Referenzierung der terrestrisch aufgenommenen Fotos nach zwei unterschiedlichen Verfahren. Einerseits werden ebenfalls die Koordinaten der Passpunkte des lokalen Referenznetzes zur Bestimmung der Rotations-, Translations- und des Maßstabsparameters verwendet. Andererseits wird geprüft, ob markante Punkte des zuvor berechneten UAV-Orthophotos mit unterlegtem digitalem Geländemodell, als „virtuelle“ Passpunkte (vGCP) zur Bestimmung der absoluten Orientierung eine ausreichende Genauigkeit aufweisen.

Die Auswertung der optischen Daten findet mit dem Open Source Softwarepaket *APER0/MicMac* des Institut Géographique National (IGN) statt. Im ersten Schritt erfolgt eine automatische Bildpunktsuche auf Basis des SIFT-Algorithmus (VEDALDI 2014 basierend auf LOWE 2004). Anschließend wird die relative Orientierung anhand zuvor erzeugter Ver-

knüpfungspunkte berechnet, wobei in regelmäßigen Abständen eine Bündelblockausgleichung zur Minimierung der quadratischen Residuen stattfindet. *APER0* arbeitet mit einer Kombination der Essentiel-Matrix und dem RANSAC-Ansatz (PIERROT-DESEILLIGNY & CLERY 2011). Nach erfolgter Bildorientierung werden mit *MicMac* digitale 3D-Modelle in Form von verdichteten Punktwolken erzeugt. Der Pixel-Matching-Algorithmus verfolgt einen multi-resolution und multi-scale Ansatz. Während *APER0/MicMac* ursprünglich für Luftbildaufnahmen konzipiert wurde, erfolgt in der jüngeren Vergangenheit eine Erweiterung an die Anforderungen der terrestrischen Photogrammetrie (GEORGANTAS et al. 2012).

### 3.2 Methoden der Datenfusion

Die Kombination des terrestrischen sowie des UAV-Modells erfolgt über das gemeinsame lokale Referenznetz. Um restliche Abweichungen zwischen den Punktwolken zu minimieren, wird die Möglichkeit des „Iterative Closest Point“ (ICP)-Algorithmus – als eine Variante der Feinregistrierung – evaluiert. Hierbei dient das UAV-Modell als Referenz.

Für die Auswertung der Punktwolken kommt die Open Source Software *CloudCompare* zur Anwendung. Es werden die Punktdistanzen zwischen dem terrestrischen und dem UAV-Modell berechnet. Durch unterschiedliche Punktdichten findet die Berechnung der Distanz zweier Punkte unter Berücksichtigung lokaler Umgebungsfunktionen statt. Aufgrund der konkaven und konvexen Morphologie des Gullys wird die lokale Umgebung mittels quadratischer Funktionen auf Basis einer festgelegten Anzahl an Punkten repräsentiert.<sup>1</sup>

Abschließend erfolgt die Kombination der 3D-Modelle. Um aus den unterschiedlich dichten Punktwolken eine homogene Punktwolke zu generieren, wird ein finales Subsampling durchgeführt. Dabei werden nur Punkte mit einem Mindestabstand von 0,5 cm erhalten.

## 4 Resultate / Ergebnisse

### 4.1 UAV – Photogrammetrie

Bei einer Flughöhe von 15 m wird eine Bodenauflösung von 0,48 cm erreicht. Um den Gully mit einer Ausdehnung von ca. 1.200 m<sup>2</sup> mit ausreichender Überlappung zu erfassen, werden insgesamt 25 Aufnahmen benötigt. Neben einem Orthophoto wird ein digitales 3D-Modell in Form einer Punktwolke generiert, in dessen Schrägansicht die Limitationen der senkrecht akquirierten UAV-Aufnahmen deutlich zu erkennen sind (vgl. Abbildung 2b).

### 4.2 Nahbereichsphotogrammetrie

Mit dem Ziel überhängende und senkrecht abfallende Seitenwände zu implizieren, werden sowohl konvergente als auch parallelaxiale terrestrische Aufnahmen herangezogen. Bei einer durchschnittlichen Aufnahmeentfernung von 5,2 m ergibt sich eine geometrische Auflösung von 0,14 cm. Um eine fehlerfreie Prozessierung mit *MicMac* zu gewährleisten,

---

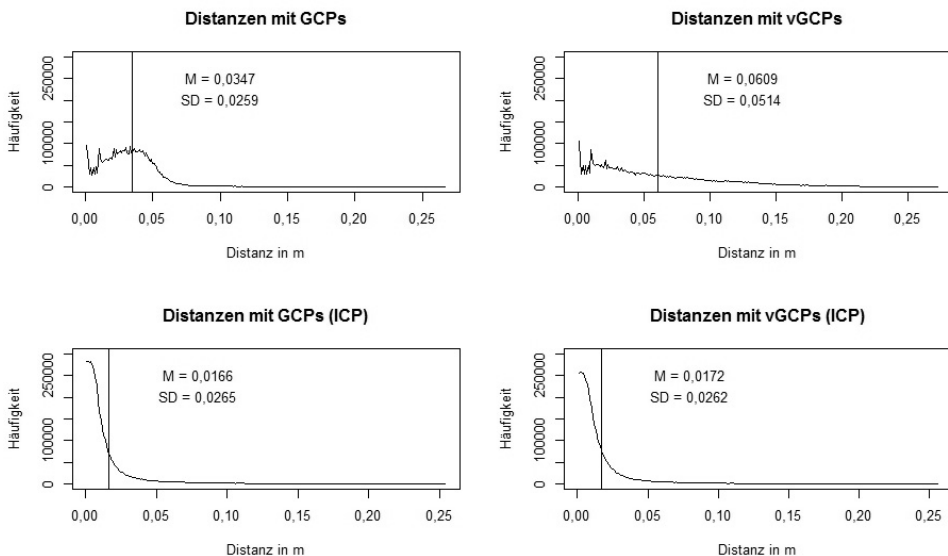
<sup>1</sup> CLOUDCOMPARE (2014): <http://www.danielgm.net/cc/> (letzter Zugriff: 04/2014)

muss die Aufnahmegeometrie manuell konfiguriert werden. Während der Berechnung finden nur Bereiche mit einer Mindestabdeckung von vier Bildern Berücksichtigung.

### 4.3 Distanzmessung und Datenfusion

Die Modellierung der lokalen Umgebung findet unter Berücksichtigung von zwölf nächsten Nachbarn statt. Die Distanzmessungen der Grobregistrierung zeigen, dass die arithmetisch gemittelte Differenzen der Punktwolken ohne Anwendung des ICP-Algorithmus für die fusionierten Daten mit GCPs 3,4 cm und mit vGCPs 6,1 cm betragen. Während das mit GCPs orientierte terrestrische 3D-Modell hauptsächlich vertikal verschoben ist, weist das 3D-Modell auf Basis der vGCPs eine deutliche Verkippung im Vergleich zum Drohnenmodell auf. Neben der Verschiebung der mittleren Distanz ist auch die Standardabweichung deutlich unterschiedlich (vgl. Abbildung 1).

Maximale Distanzen von ca. 26 cm treten in Datenlücken des UAV-Modells auf. Aufgrund der geringen Punktdichte ist die Berechnung der lokalen Umgebung an diesen Stellen kritisch zu sehen.



**Abb. 1:** Histogramm der Distanzberechnung der terrestrischen zur UAV-Punktwolke (links: Berechnung mit GCPs – vor/nach der ICP-Feinregistrierung (oben/unten); rechts: Berechnung mit vGCPs – vor/nach der ICP-Feinregistrierung (oben/unten); Mittelwert (M – schwarze Linie), SD (Standardabweichung))

Mithilfe des ICP-Algorithmus kann die initiale Verkippung bzw. Verschiebung korrigiert werden. Aus den unteren Histogrammen von Abbildung 1 geht hervor, dass die durchschnittliche Differenz der Punktwolken nach Anwendung des ICP-Algorithmus auf weniger als 2 cm minimiert werden kann. Weder im Bezug auf den Mittelwert noch auf die Standardabweichung ist ein deutlicher Unterschied der beiden Ergebnisse zu erkennen.

Anhand dieser Resultate und den Ergebnissen vergleichbarer Datensätze kann gezeigt werden, dass eine Grobregistrierung auf Basis der vGCPs ausreichend genau ist, um den ICP-Algorithmus anzuwenden (vgl. Tabelle 1).

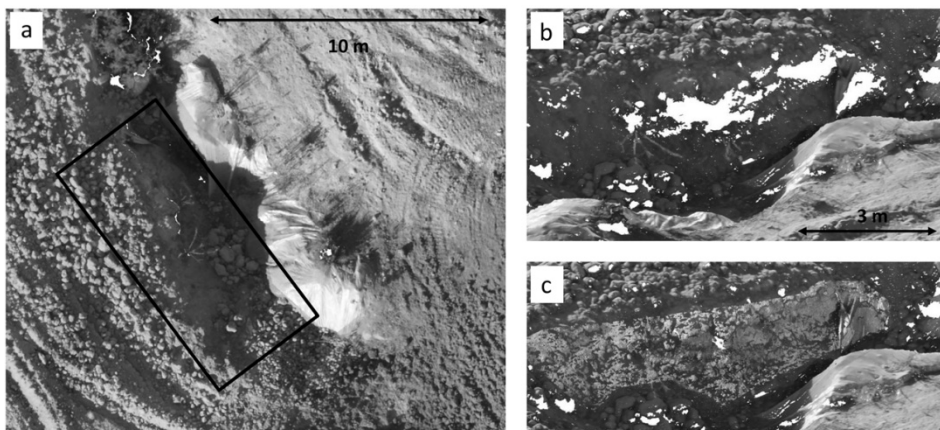
**Tabelle 1:** Statistische Übersicht der Endergebnisse vor und nach der Feinregistrierung

	M	SD	Q <sub>0,25</sub>	Q <sub>0,75</sub>
Testgebiet 1	0,061 m	0,051 m	0,020 m	0,089 m
Testgebiet 1 (ICP)	0,017 m	0,026 m	0,004 m	0,018 m
Testgebiet 2	0,041 m	0,044 m	0,012 m	0,054 m
Testgebiet 2 (ICP)	0,026 m	0,033 m	0,006 m	0,030 m
Testgebiet 3	0,084 m	0,086 m	0,024 m	0,112 m
Testgebiet 3 (ICP)	0,022 m	0,029 m	0,006 m	0,026 m

Die finale Datenfusion durch das Zusammenführen des UAV-Modells und des terrestrischen Modells ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Lücken im Steilwandbereich des Gullys können mit terrestrischen Daten vervollständigt werden.

## 5 Schlussfolgerungen

Erste Ergebnisse zeigen, dass Nahbereichs- und UAV-Photogrammetrie mittels einer Feinregistrierung erfolgreich miteinander kombiniert werden können, um somit lückenhafte Geländemodelle aus UAV-Daten für geomorphologische Fragestellungen zu verdichten. Eine Fusion auf Basis der Grobregistrierung würde zu fehlerhaften Endprodukten führen. Der ICP-Algorithmus stellt für die Feinregistrierung eine gute Möglichkeit dar, denn die Distanzwerte können mithilfe der ICP-Berechnung im Durchschnitt um mehr als die Hälfte minimiert werden.



**Abb. 2:** Kolorierte Punktwolke des Gullys (Testgebiet 1): a) orthogonale Ansicht der UAV – Punktwolke; b) Schrägansicht der Seitenwände, Lücken im Steilbereich der UAV – Punktwolke; c) Schrägansicht des fusionierten 3D-Modells

Das terrestrische Modell kann sowohl mit als auch ohne zuvor eingemessener GCPs orientiert werden, da nahezu idente Modelldistanzen gegeben sind. Daraus folgt, dass für die Feinregistrierung auf den zeitintensiven Einsatz von GCPs für die terrestrischen Aufnahmen verzichtet werden kann. In weiteren Untersuchungen bleibt zu eruieren, ob z. B. auf Basis von differenziellem GPS für die UAV-Aufnahmen, GCPs prinzipiell notwendig sind.

Die Studie zeigt, dass Nahbereichsphotogrammetrie und UAV-Photogrammetrie synergetisch genutzt werden können. Die vorgestellte Vorgehensweise ermöglicht unzugängliche Bereiche in Gullys terrestrisch aufzunehmen und sie anschließend in das UAV-Modell zu integrieren. Folglich kann eine zentimetergenaue, dreidimensionale Datengrundlage als Basis für die Untersuchung der Genese von Gullys, wie sie in der Mergellandschaft Andalusiens gegeben sind, bereitgestellt werden.

## Literatur

- BRACKEN, L. J. & KIRKBY, M. J. (2005), Differences in hillslope runoff and sediment transport rates within two semi-arid catchments in southeast Spain. *Geomorphology*, 68 (3-4), 183-200.
- DABA, S., RIEGER, W. & STRAUSS, P. (2003), Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques. *Catena*, 50 (2-4), 273-291.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S., MARZOLFF, I., PETER, K. & RIES, J. (2012), Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4 (12), 3390-3416.
- FAUST, D. & SCHMIDT, M. (2009), Soil erosion processes and sediment fluxes in a Mediterranean marl landscape, Campiña de Cádiz, SW Spain. *Z. f. Geomorphologie N.F.*, 52 (2), 247-265.
- GEORGANTA, A., BRÉDIF, M. & PIERROT-DESSEILLIGNY, M. (2012), An Accuracy Assessment of Automated Photogrammetric Techniques for 3d Modeling of Complex Interiors. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, 23-28.
- LOWE, D. G. (2004), Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International journal of computer vision*, 60 (2), 91-110.
- MARZOLFF, I. & POESEN, J. (2009), The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology*, 111 (1), 48-60.
- PIERROT-DESSEILLIGNY, M. & CLERY, I. (2011), Apero an open source bundle adjustment software for automatic calibration and orientation of set of images. *Proc. of the ISPRS Commission V Symposium. Image Engineering and Vision Metrology*, 269-276.
- POESEN, J. & HOOKE, J. M. (1997), Erosion flooding and channel management in Mediterranean Environments of southern Europe. *Progress in Phys. Geogr.*, 21 (2), 157-199.
- VEDALDI, A. (2014), <http://www.vlfeat.org/~vedaldi/code/siftpp.html> (12.04.2014).