

UAS-Luftbildbefliegung in Marokko – ein Anwendungsbeispiel zur Untersuchung von Bodenerosion¹

Sebastian D'OLEIRE-OLTMANN

DK GIScience, Universität Salzburg · sebastian.doleire-oltmanns@sbg.ac.at

Dieser Beitrag wurde durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

Abstract

Die UAS-gestützte Datenaufnahme hat gerade in den letzten Jahren im Bereich wissenschaftlicher Projekte stark an Attraktivität zugenommen. Die deutliche Verringerung im Bereich der Anschaffungskosten sowie die Ausfallsicherheit durch die Unterstützung von Autopilot-Programmen erlauben es, auch wenig ausgebildeten Piloten ein UAS zu steuern. Das hier vorgestellte Anwendungsbeispiel zur Untersuchung von Bodenerosion in Marokko mittels Luftbildbefliegung wird in einzelnen Arbeitsschritten genau erläutert. Die Handhabung des UAS, die notwendigen Arbeiten vor der eigentlichen Luftbildbefliegung, die Datenauswertung sowie die Analysemöglichkeiten auf Basis der aufgenommenen Daten werden detailliert dargestellt. Die hier verwandte Methode erlaubt, Veränderung von Erosionsrinnen im Bereich weniger Zentimeter verlässlich zu dokumentieren. Die erzeugten Datensätze ermöglichen darüber hinaus die Ableitung weiterer Informationen, welche beispielsweise zur Beantwortung hydrologischer Fragestellungen notwendig sind. Im Laufe der vergangenen drei Jahre erfolgten an die 100 Luftbildbefliegungen im Untersuchungsgebiet, welche eine Datenbasis von um die 17.500 Luftbilder erzeugten. Das enorme Potenzial von UAS für wissenschaftliche Fragestellungen wird durch dieses Anwendungsbeispiel verdeutlicht.

1 Einleitung

Der Einsatz von Luftbildbefliegung hat im privaten und wissenschaftlichen Umfeld gerade in den letzten Jahren einen starken Aufschwung erfahren. Moderne Flugsysteme in Kombination mit hochauflösenden Sensoren erlauben den Einsatz dieser unbemannten Flugsysteme in einer Vielzahl verschiedener Anwendungsbereiche. Besonders die sehr hoch auflösenden (optischen) Luftbilddaten, welche in einer frei wählbaren zeitlichen Auflösung aufgenommen werden können, stellen ein wesentliches Argument für den Einsatz von unbemannten Luftfahrtssystemen, engl. Unmanned Aerial Systems (UAS) dar.

¹ Dieser Beitrag basiert auf Arbeiten aus dem Forschungsprojekt *AGASouss – Gully-Erosion in agro-industriell genutzten Landschaften zwischen Hohem und Anti-Atlas (Marokko)* (DFG-Projekt MA 2594/3-1, in Kooperation mit J. B. Ries, Uni Trier und A. Ait Hssaine, Uni Agadir). Diese sind als Veröffentlichung unter folgender Adresse abrufbar: D'OLEIRE-OLTMANN et al. 2012, DOI: 10.3390/rs4113390.

Anwendungsbereiche für UAS sind u. a. Kartierung und Monitoring (BARKER & KING 2012, LALIBERTE et al. 2011), Dokumentation archäologischer Ausgrabungsstätten (VERHOEVEN et al. 2012) sowie Aufnahmen im urbanen Raum (FORLENZA et al. 2012). Darüber hinaus finden UAS auch Anwendung im Bereich von Wartung und Inspektion: Schienennetze, Stromleitungen, Flussläufe sowie Start- und Landebahnen an Flughäfen. Letztlich ergeben sich weitere Anwendungsfelder in Gebieten, welche während/nach einer (Natur-)Katastrophe nicht zugänglich sind (PASTOR et al. 2011, TOWLER et al. 2012).

Im Rahmen der Arbeit des Forschungsprojektes *AGASouss – Gully-Erosion in agro-industriell genutzten Landschaften zwischen Hohem und Anti-Atlas (Marokko)* (DFG-Projekt MA 2549/3-1, in Kooperation mit J. B. Ries, Uni Trier und A. Ait Hssaine, Uni Agadir) steht die kontinuierliche Kartierung und Analyse von Gullyerosion in der Souss-Ebene in Süd-Marokko im Fokus. Die Entwicklung eines wiederholbaren Kartierungsablaufs sowie die anschließende Datenauswertung werden im folgenden Text beschrieben. Dabei stützt sich diese Darstellung teilweise auf vorangegangene Publikationen, welche mit entsprechenden Verweisen gekennzeichnet sind.

2 Gullykartierung mittels Luftbildbefliegung

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in der Souss-Ebene in Süd-Marokko. Begrenzt wird die Ebene im Norden vom Atlasgebirge und im Süden durch den Anti-Atlas. Der Name für das Gebiet leitet sich vom Fluss Souss ab. Dieser entwässert die gesamte Ebene von Ost nach West auf einer Länge von 150 km und mündet schließlich bei der Stadt Agadir in den Atlantik. Es herrscht ein semi-arides Klima vor mit einer jährlichen Niederschlagsmenge von etwa 200 mm. Häufig treten kurze, sehr intensive Starkregenereignisse auf, welche hauptsächlich die Bodenerosion durch den sehr starken Oberflächenabfluss herbeiführen.



Abb. 1: Wiederkehrende Einschneidung eines Gullys auf einer landwirtschaftlichen Nutzfläche. Untersuchungsstandort GLA (Foto: S. d’Oleire-Oltmanns, 2011)

Dies führt zu erheblichen Erosionsschäden, welche u. a. zum Verlust von landwirtschaftlicher Nutzfläche führen. Typischerweise tritt in dieser Region Gullyerosion auf, welche in Abbildung 1 zu sehen ist. (D'OLEIRE-OLTMANNs et al. 2012).

2.2 Eigenschaften des UAS inkl. Sensor

Für die Luftbildaufnahmen wurde ein Flächenflieger, Modell SIRIUS (MAVinci, Heidelberg) eingesetzt. Die firmenintern entwickelte, mitgelieferte Autopilot-Software garantiert eine lückenlose Luftbildabdeckung. Wichtige Vorteile des Flächenfliegers gegenüber anderen Flugsystemen sind die große Reichweite und die geringe Anfälligkeit gegenüber Wind während des Fluges. Diese beiden Aspekte sind zwingend notwendig für die Befliegung von Untersuchungsgebieten mit Gebietsausdehnungen bis über 200 ha. Die Autopilot-Software übernimmt während der Flugkampagne teilweise die Steuerung des UAS und ermöglicht dessen permanente Überwachung.

Der Korpus des Fliegers besteht aus Elapor und hat eine Spannweite von 1.63 m bei einer Länge von 1.2 m. Das Gewicht inklusive Zuladung beträgt rund 2.8 kg. Als Sensor wird eine digitale Systemkamera (Panasonic Lumix GF1) verwendet. Um konstant gleichbleibende Aufnahmeeigenschaften zu gewährleisten, erfolgte vor der ersten Befliegungskampagne eine Kalibrierung der Kamera. Zudem wurde die elektronische Steuerung des Autofokus abgeschaltet. Dies sind notwendige Vorbereitungen um die Eigenschaften der aufgenommenen Luftbilder zu kennen, welche photogrammetrisch ausgewertet werden. Weitere technische Einzelheiten sind in D'OLEIRE-OLTMANNs et al. 2012 beschrieben. In Abbildung 2 ist das UAS startbereit zu sehen, sowie im linken Bereich des Fotos die Kommunikationseinheit welche die Informationen von UAS zum Laptop als auch gegengleich schickt. Dies erlaubt u. a. die Übertragung eines im Vorfeld erstellten fest definierten Flugplans, die autopilot-gesteuerte Überwachung während der Befliegung sowie eine ständig aktualisierte Zustandsinformation zu Temperatur des UAS, Akkukapazität und verbleibender Flugdauer.



Abb. 2: Startbereites UAS kurz vor einer Luftbildbefliegung sowie Kommunikationseinheit zwischen UAS und Laptop im linken Teil des Fotos (Foto: W. d'Oleire-Oltmanns, 2011)

2.3 Datenaufnahme

Die Luftbilddaufnahme erfolgt in verschiedenen Schritten. Bevor die eigentliche Befliegung erfolgt, werden Passpunkte im zu befliegenden Untersuchungsgebiet ausgelegt. Jeder Passpunkt wird mittels eines Tachymeters präzise vermessen, um später eine exakte Triangulation der Luftbilder vornehmen zu können. Da in dem beschriebenen Untersuchungsgebiet keine offiziellen Vermessungspunkte vorhanden waren, wurde ein lokales Koordinatensystem generiert.

Um die Passpunkte auf den Luftbildern später bei für die Triangulation eindeutig wiederzufinden, ist eine entsprechend auffällige Markierung notwendig. Der einzumessende Passpunkt wird durch ein Stahlrohr festgelegt, welches in den Boden eingeschlagen wird. Es ist darauf zu achten, dass die verbleibende Höhe der Stahlrohre über Grund zueinander einheitlich ist. Mittels eines roten Pappkartons werden die ausgebrachten Stahlrohre markiert. Auf das Stahlrohr wird eine matt gelabelte CD aufgelegt. Die Mitte der CD entspricht der Position des Stahlrohrs. Das matte Label verhindert ein Überstrahlen des zu identifizierenden CD-Mittelpunkts. Die runde Form der CD ist auf den Luftbildern gut zu sehen. Somit ist eine wiederholbare Zuordnung der Koordinatenwerte auf den CD-Mittelpunkt gewährleistet (vgl. ABER et al. 2010). Im Folgenden erfolgt die Datenaufnahme mittels Luftbildbefliegung.

Das UAS ermöglicht eine gleichmäßige Rasterung eines definierten Gebietes. Mittels der Autopilot-Software wird ein Flugplan erstellt, welcher alle notwendigen Informationen für eine Befliegung erhält. Die Länge des Flugplans variiert in Abhängigkeit von der zu befliegenden Fläche sowie von der Flughöhe. Die gewünschte prozentuale Überlagerung der einzelnen Luftbilder wird vom Benutzer festgelegt. Dies ist für die Überlagerung in Flugrichtung als auch für die parallele Überlagerung möglich. Ein Auftreten von Lücken, also Flächen, welche keine Abdeckung durch ein oder mehrere Luftbilddaufnahmen haben, wird somit annähernd vollständig ausgeschlossen. Aufnahmezeitpunkt der einzelnen Bilder wird automatisch berechnet und von der Software elektronisch gesteuert. Die Kommunikation zwischen UAS und Laptop erfolgt mittels einer drahtlosen Netzwerkverbindung (WLAN) und einer Funkverbindung.

Um Schrägaufnahmen zu vermeiden, wird ein Schwellwert für den Kippwinkel des UAS eingestellt. Sobald dieser Schwellwert überschritten wird, unterbricht der Auslösemechanismus die Aufnahme weiterer Luftbilder. Die Messung der Kippwinkel erfolgt über eine im UAS eingebaute Einheit zur Trägheitsnavigation (engl. Inertial Measurement Unit – IMU).

Der Start des UAS erfolgt automatisch, direkt aus der Hand des Piloten. Es ist mit diesem System nicht notwendig, für das Abheben ein Katapult o. Ä. zu benutzen. Die Luftbildbefliegung erfolgt ebenfalls komplett per Autopilot. Für die Landung schaltet der Pilot in den sogenannten *assisted mode*. Dieser Modus ermöglicht die Steuerung des UAS als auch dessen sichere Landung für weniger erfahrene Piloten. Durch Unterstützung der Software wird das Flugverhalten gesteuert, während der Pilot lediglich die Möglichkeiten links, rechts, hoch und runter als Kommandos steuern kann. Sollte es zu einem unerwarteten Ausfall der Software kommen, so ist es zu jedem Zeitpunkt möglich, in den vollmanuellen Modus zu schalten. Hierfür bedarf es jedoch einiger Erfahrung im Umgang mit Modellfluggeräten.

Während einer Befliegung nimmt die Kamera etwa 250 bis 400 Einzelbilder im RAW-Format auf. Diese werden auf einer SD-Karte gespeichert und sind somit nach erfolgreicher Landung einfach auszulesen. Zusätzlich speichert das UAS auch für jedes Bild folgende Informationen: Position zum Zeitpunkt der Aufnahme sowie Dreh- und Kippwinkel. Diese können aus dem RAM-Speicher des UAS ausgelesen werden und für weitere Auswertungsschritte herangezogen werden.

Die Bearbeitungszeit angefangen von der Ausbringung der Passpunkte, deren Vermessung, die Luftbildbefliegung mittels UAS und letztlich der Abbau der Passpunkte variiert stark nach Gebietsgröße. Während die reine Befliegung (inkl. Erstellung des Flugplans und Auslesen der Daten) sich zeitlich in einem Rahmen von ca. 1,5 h bewerkstelligen lässt, erfordern die verbleibenden Arbeitsschritte einen zeitlichen Aufwand zwischen 2 h – 6 h.

3 Datenauswertung

Die Auswertung der aufgenommenen Luftbilder folgt den Grundlagen der Photogrammetrie. Die Einzelbilder werden ihrer Aufnahmeposition entsprechend auf alle drei Ebenen im Raum orientiert. Durch den stereoskopischen Überlapp von mindestens 2 Luftbildern ist eine Ableitung von räumlichen Datenprodukten möglich, wie unter 3.2 erklärt.

3.1 Erstellung triangulierter Bildblöcke

Die Erstellung der triangulierten Bildblöcke erfolgt mittels der Bearbeitung der Daten in der *Leica Photogrammetry Suite LPS* (Intergraph). Während der Erstellung des lokalen Koordinatensystems werden alle ausgebrachten Passpunkte 3-dimensional vermessen. Diese Koordinaten mit Werten für $(x/y/z)$ können dann in LPS eingelesen werden. Eine Zuordnung der gemessenen Koordinaten auf die in den Luftbildern zu identifizierenden Passpunkten führt zu einer ersten Orientierung der Bilder. Dabei ist es notwendig, dass pro Luftbild mindestens drei Passpunkte vorhanden sind. Um den so erstellten Bildblock robuster zu machen, ist nach der Zuordnung der Passpunkte die Identifizierung weiterer sog. *tie points* wichtig. Dies können jegliche Art von eindeutig zuordenbarer und somit markanter Objekte in den Luftbildern sein: solitäre Steine mit einer Ecke, Mauerkanten, Straßenkanten u. Ä. Zu beachten gilt, dass sich Bäume, Sträucher oder andere ‚diffuse‘ Objekte nicht als *tie points* eignen, weil eine eindeutige Zuordnung des festgelegten Punktes in weiteren Luftbildern nicht gewährleistet ist.

Nach einer erfolgreichen Zuordnung von Passpunkten und *tie points* kann die iterative Triangulierung erfolgen. Mit voreingestellten Schwellwerten berechnet die Software eine hohe Anzahl automatischer *tie points* und errechnet auch die Genauigkeit aller vorhandenen Punkte im Datensatz. Dies ermöglicht die Verringerung des Verzerrungsgrades einzelner Bilder und führt schlussendlich zu einem genau triangulierten Bildblock. Aus diesem Bildblock können nun verschiedene Datenprodukte abgeleitet werden, welche im Folgenden beschrieben werden.

3.2 Ableitung von Datenprodukten

Die Erstellung eines triangulierten Bildblocks wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben ermöglicht die Ableitung verschiedener Datenprodukte. Diese Datenprodukte sind hinsichtlich Lage in x- und y-Richtung sowie in der Höhe in z-Richtung definiert.

Ein erstes Datenprodukt ist ein Orthophotomosaik. Dabei werden alle Einzelbilder zu einem Gesamtbild vereinigt. Durch die bereits mehrfach angesprochene Existenz von Koordinaten ist im Orthophoto auch die Messung von Abständen möglich. In Abbildung 3 ist ein Beispiel eines solchen Orthophotomosaiks dargestellt. Es sind zwei verschiedene Typen von Gullies zu erkennen. Im mittleren Bereich des Mosaiks erkennt man einen bank gully, welcher sich von der Wadikante regressiv in die extensiv landwirtschaftlich genutzte Fläche einschneidet. Im rechten Bereich des Mosaiks ist deutlich das dendritisch verästelte System eines älteren Gullys zu erkennen.

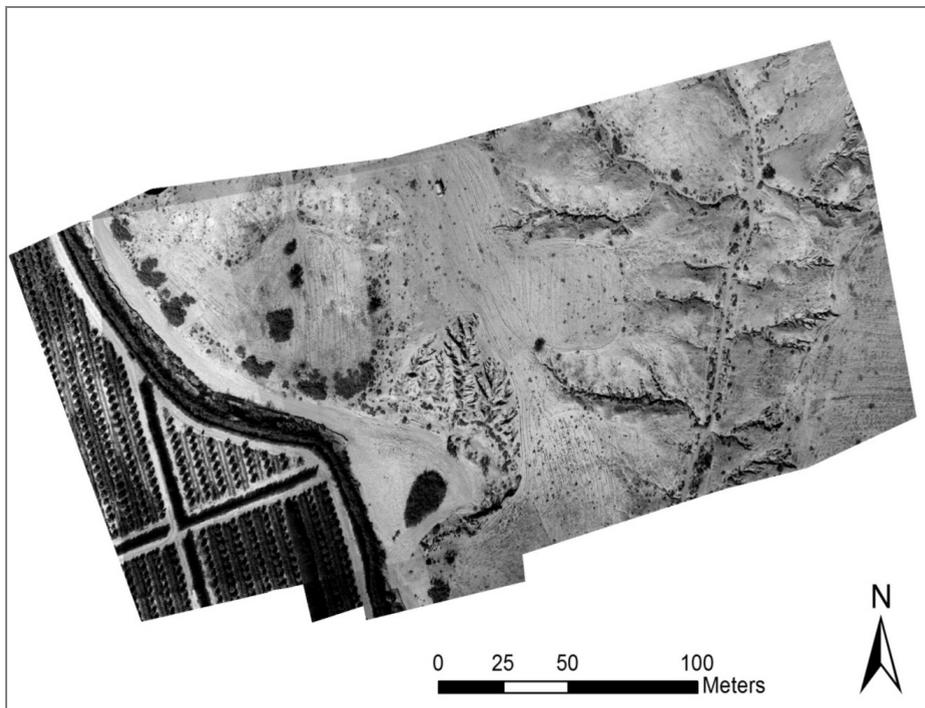


Abb. 3: Orthophotomosaik des Untersuchungsstandorts HAM3 (Befliegung 20.10.2010)

Ein weiteres Datenprodukt ist ein Digitales Oberflächenmodell. Die vorhandenen Koordinatenwerte, welche für jeden Pixel vorhanden sind, erlauben die Ableitung eines genauen Oberflächenmodells. Dies kann sowohl als Raster-Datensatz ausgegeben werden als auch als Punktwolkendatensatz. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Erstellung von Punktwolkendatensätzen nicht durchgeführt. In Abbildung 4 ist ein Digitales Oberflächenmodell dargestellt.

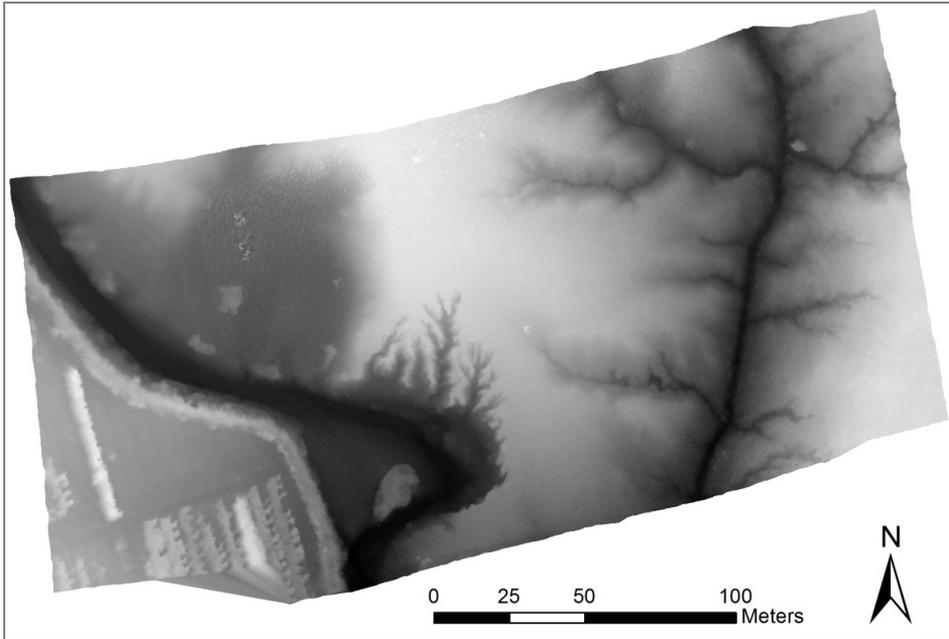


Abb. 4: Digitales Oberflächenmodell des Untersuchungsstandorts HAM3

Die Auflösung der Daten beträgt wenige Zentimeter und deren Genauigkeit liegt bei der vorgestellten Methode im Bereich von etwa 1.5 cm – 3 cm in der Lage und 5 cm – 8 cm in der Höhe.

Die Erfassung des Untersuchungsgebietes in diesen verschiedenen digitalen Datensätzen erlaubt eine Vielzahl an weiterführenden Analyse- und Anwendungsmöglichkeiten, welche im folgenden Kapitel beschrieben sind.

4 Analyse- und Anwendungsmöglichkeiten

Die Erstellung der Datenprodukte wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben erlaubt eine Vielzahl an Möglichkeiten. Im Folgenden werden beispielhaft zwei Analyse- und Anwendungsmöglichkeiten beschrieben.

4.1 Erosionsentwicklung und -quantifizierung

Die kontinuierliche Erfassung derselben Untersuchungsstandorte über mehrere Jahre, in diesem Fall also die wiederholte Befliegung mittels UAS, bildet die Basis für die Etablierung eines Monitoringsystems. Die Erstellung von Orthofotomosaiken kartiert den Zustand des Untersuchungsstandortes. Vergleichende Analysen erlauben qualitative Einschätzungen hinsichtlich der Entwicklung von Gullys.

Um die Entwicklung der Erosion darzustellen, ist es zudem notwendig, eine quantitative Zunahme oder Verringerung der Erosion messbar zu machen. Dies erfolgt durch die Volumenquantifizierung der Gullys mittels der Digitalen Oberflächenmodelle. Wenn man die Volumina desselben Untersuchungsstandortes in aufeinanderfolgenden Jahren berechnet und diese dann voneinander subtrahiert, ergibt sich ein positiver Wert bei einer Vergrößerung des Gullys, was einer fortschreitenden Erosion entspricht. Ergibt sich bei der Berechnung ein negativer Wert, was einer Verkleinerung des Gullys entspricht, so belegt das bspw. eine anthropogen eingeleitete Maßnahme zur Verfüllung des Gullys als Maßnahme dem Verlust des Bodens entgegenzuwirken (vgl. PETER et al. 2012, D’OLEIRE-OLTMANN et al. 2012).

4.2 Hydrologische Fragestellungen

Hydrologische Fragestellungen bedingen in erster Linie eine Datenbasis, welche über die Fläche des eigentlichen Gullys an sich hinausgeht und auch das hydrologische Einzugsgebiet beinhaltet. Auch hier sind die Digitalen Oberflächenmodelle der zugrunde liegende Datensatz. Mittels der Auswertung in einem GIS-Umfeld lässt sich das Gewässernetz ableiten. Die Einteilung in verschiedene Klassen erlaubt die Identifikation der Hauptabflüsse, welche die größte Wirkung auf die Erosion haben. Weitere Details zu den technischen Aspekten der Auswertung von hydrologischen Netzen finden sich bei PETER et al. 2012 und D’OLEIRE-OLTMANN et al. 2012

5 Zusammenfassung

Der Einsatz von UAS zur Datenaufnahme hat in den letzten Jahren einen enormen Anstieg erfahren. Die Vorteile dieser Datenaufnahme sind die frei wählbare zeitliche Auflösung, die sehr hohe räumliche Auflösung der Luftbilder und die flexiblen Einsatzmöglichkeiten des UAS in einer Vielzahl von Untersuchungsgebieten, welche auf Zeitintervalle von wenigen Stunden gefasst werden kann.

Bei dem hier vorgestellten Anwendungsbeispiel der Luftbildkartierung von Gullys ist die flexible Handhabung der Hardware ein wesentlicher Vorteil. Die Untersuchungsgebiete sind manchmal nicht direkt mit dem Auto erreichbar. Auch ist die Befliegung unterschiedlich großer Flächen möglich. Die kleinsten Untersuchungsstandorte haben eine Fläche von ca. 0.5 ha, während die größten Untersuchungsstandorte eine Fläche von über 200 ha einnehmen. Der Einsatz eines Flächenfliegers hat sich in der Region bewährt, da in der Ebene annähernd täglich Wind auftritt. Der Flächenflieger hatte damit allerdings keinerlei Probleme und die Luftbildbefliegung war somit bis auf wenige Ausnahmen möglich.

Die Passpunktinstallation hat sich gerade in wiederholter Durchführung als praktikabel erwiesen. Stahlrohre wurden gleichmäßig in dem Untersuchungsstandort ausgebracht und mit rotem Karton sowie weißen CDs markiert. Anschließend erfolgt eine genaue Vermessung der Passpunkte mittels eines Tachymeters. Da keine offiziellen Messpunkte vorliegen, wird ein lokales Koordinatensystem angelegt. Offizielle Messpunkte würden ein direktes Einmessen in ein vorhandenes Koordinatensystem erlauben.

Photogrammetrische Auswertungsschritte mittels der Software *Leica Photogrammetry Suite (LPS)* führen zu einem sehr robusten Bildblock. Dieser Bildblock bildet den gesamten

Untersuchungsstandort ab. Aus diesem Bildblock lassen sich weitere Datenprodukte ableiten. Ein Orthophotomosaik zur visuellen Interpretation sowie ein Digitales Oberflächenmodell. Auf Basis dieser Datenprodukte erfolgen eine Analyse der Erosionsentwicklung, die Quantifizierung der Erosionsraten als auch die Ableitung von Gewässernetzen und Einzugsgebieten um hydrologische Fragestellungen zu beantworten.

Literatur

- ABER, J., MARZOLFF, I. & RIES, J. B. (2010), *Small Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications*. Elsevier, Amsterdam. 256 S.
- BARKER, R. & KING, D. J. (2012), Blanding's Turtle (*Emydoidea blandingii*) Potential Habitat Mapping Using Aerial Orthophotographic Imagery and Object Based Classification. *Remote Sensing*, 4 (1), 194-219.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S., MARZOLFF, I., PETER, K. D. & RIES, J. B. (2012), Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4 (11), 3390-3416.
- FORLENZA, L., CARTON, P., ACCARDO, D., FASANO, G. & MOCCIA, A. (2012), Real Time Corner Detection for Miniaturized Electro-Optical Sensors Onboard Small Unmanned Aerial Systems. *Sensors* 2012, 12 (1), 863-877.
- LALIBERTE, A. S., WINTERS, C. & RANGO, A. (2011), UAS remote sensing missions for rangeland applications. *Geocarto International* 2011, 26 (2), 141-156.
- PASTOR, E., BARRADO, C., ROYO, P., SANTAMARIA, E., LOPEZ, J. & SALAMI, E. (2011), Architecture for a helicopter-based unmanned aerial systems wildfire surveillance system. *Geocarto International* 2011, 26 (2), 113-131.
- PETER, K. D., D'OLEIRE-OLTMANN, S., RIES, J. B. R. & MARZOLFF, I. (2012), Soil erosion in gully catchments affected by land-levelling measures in the Souss Basin, Morocco, analysed by rainfall simulation and UAV remote sensing data. *Catena* 2012 – under review.
- TOWLER, J., KRAWIEC, B., KOCHERSBERGER, K. (2012), Terrain and Radiation Mapping in Post-Disaster Environments Using an Autonomous Helicopter. *Remote Sensing*, 4 (7), 1995-2015.
- VERHOEVEN, G., Taelman, D. & VERMEULEN, F. (2012), Computer Vision-based Orthophoto Mapping of complex archaeological sites: The ancient Quarry of Pitaranha (Portugal-Spain). *Archaeometry* 2012, 54 (6), 1114-1129.