

GENERIERUNG DIGITALER GELÄNDEOBERFLÄCHEN MITTELS BILDDATEN VON UNBEMANNTEN FLUGSYSTEMEN ZUM MONITORING VON KÜSTENSCHUTZBAUWERKEN

Matthias Naumann, Ralf Bill, Frank Niemeyer

Zusammenfassung: Unmanned Aerial Systems (UAS, kleine unbemannte Flugsysteme) erleben aktuell einen gewissen Hype. Auch für die Geoinformationsgewinnung stellen sie eine interessante Möglichkeit dar. Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt darin, zu untersuchen, ob die mittels UAS erzeugten photogrammetrisch ausgewerteten Bilddaten geeignet sind, Digitale Oberflächenmodelle (DOM) zu generieren, mit denen der Nachweis von Formänderungen von Küstenbauwerken über die Zeit gelingen kann. Verschiedene Küstenbauwerke wurden hierzu in den letzten Jahren befliegen, der Schwerpunkt der Auswertungen wird hier am Pilotdeich in Rostock-Markgrafenheide dargestellt.

Schlüsselwörter: DOM, 3D-Punktvolke, UAS, Änderungserkennung, Genauigkeitsanalysen, DredgDikes

GENERATION OF DIGITAL SURFACE MODELS USING IMAGERY FROM UNMANNED AERIAL SYSTEMS FOR MONITORING COASTAL PROTECTION CONSTRUCTIONS

Abstract: The usage of Unmanned Aerial Systems (UAS) is currently experiencing a certain hype. For the geographic information extraction they are offering an interesting possibility nowadays. The focus of this paper is to investigate whether those imagery produced by UAS and processed with photogrammetric methods are suitable to generate Digital Surface Models (DSM). The goal is to detect changes of shape of coastal structures over time. Various coastal structures were flown on this issue in recent years, the focus of the analysis presented in this paper is on the pilot dike in Rostock-Markgrafenheide.

Keywords: DOM, 3D point clouds, UAS, change detection, accuracy analysis, DredgDikes

Autoren

Dipl.-Ing. (FH) M. Sc. Matthias Naumann

Prof. Dr.-Ing. Ralf Bill

Dipl.-Ing. Frank Niemeyer

Universität Rostock

Professur für Geodäsie und Geoinformatik

D-18051 Rostock

E: {matthias.naumann, ralf.bill, frank.niemeyer}@uni-rostock.de

1 MOTIVATION

UAS (Unmanned Aerial Systems, auch Unmanned/Uninhabited/Unpiloted Aerial/Airborne/Assisted Vehicles (UAV), RPV (Remotely-Piloted Vehicle) oder Remotely-Piloted Aircraft Systems (RPAS) genannt), erleben aktuell einen gewissen Boom. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Der Bedarf an zeitlich und räumlich hochauflösenden Luftbildern und 3D-Oberflächenmodellen wächst. Klassische Systeme (Flugzeuge) sind für kleine Gebiete (Einzelobjekte bis zu einigen 100 ha) zu teuer und zu witterungsabhängig. Die Entwicklung miniaturisierter autonomer Steuerungen (GPS/INS) für unbemannte Luftflugzeuge ermöglicht systematische Bildflüge. Die Benutzung von UAS bietet Kostenersparnis und höhere Flexibilität (geringere Wetterabhängigkeit bezüglich Wolken, dafür aber höhere Empfindlichkeit gegenüber Wind). UAS schließen die große Lücke zwischen terrestrischer und flugzeug- bzw. satellitengetragener Geodatenerfassung. Sie stellen somit eine interessante Alternative zu klassischen Vermessungsflügen, aber auch zur gängigen terrestrischen Vermessung dar, da sie einerseits aufgrund der geringen Aufwände (z. B. für Erfassungszeit vor Ort und Auswertekosten) eine Befliegung und damit flächenhafte Erfassung überhaupt erst rentabel werden lassen und andererseits die möglicherweise für terrestrische Messverfahren vorherrschenden Einschränkungen durch die Nutzung der Vogelperspektive umgehen kann.

Einen Überblick über die vorhandenen Systemkomponenten und deren Leistungsmerkmale geben Grenzdörffer & Bill (2010). Auch in den Forschungsanwendungen der Photogrammetrie und Geodatengewinnung gewinnen sie zunehmend an Bedeutung. Dies zeigten eindrucksvoll

die Beiträge zur letztjährigen Konferenz UAV-g in Rostock (Grenzdörffer & Bill 2013). Neben der Technologie und den Auswertemethoden diskutierte eine Vielzahl von Beiträgen die Verwendung von UAS in Anwendungsbereichen wie Liegenschaftskataster, Land- und Forstwirtschaft, Küstenschutz, Archäologie, Meteorologie, Planung und Umwelt.

UAS haben das Potenzial für eine schnelle und präzise Bildaufnahme von kleinen Bereichen aus niedriger Höhe und unter verschiedenen Blickwinkeln. Durch die Flugplanung und die Wegpunkt-Navigation wird eine vollständige Flächendeckung mit großen Bildüberlappungen ermöglicht. Ausgeklügelte Rechenprozesse erledigen die automatische Generierung von 3D-Punktwolken, Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und Orthophotomosaiken. Sowohl der Zeit- als auch Personalaufwand entlang der gesamten Verarbeitungskette von der Bildflugplanung über die DOM-Generierung bis zur Ableitung von Orthophotomosaiken ist recht gering. Sehr gering ist vor allem der Aufwand vor Ort und – falls automatische Auswerteprozesse, basierend auf Computer-Vision-Ansätzen, genutzt werden – auch für die Auswertung. Gering ist die Auswertung auch noch, wenn Computer-Vision-basiert vorprozessiert und klassische Aerotriangulations-Prozessierung mit diesen Näherungswerten nachgeschaltet wird.

Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt darin, zu untersuchen, ob die mittels UAS erzeugten und photogrammetrisch ausgewerteten Bilddaten geeignet sind, Digitale Oberflächenmodelle (DOM) zu erstellen, mit denen der Nachweis von Formänderungen von Küstenbauwerken über die Zeit gelingen kann. Untersucht wurde dieses an mehreren Küstenbauwerken. Der Schwer-

punkt der Auswertungen wird hier an einem Testdeich in Rostock-Markgrafenheide dargestellt. Ein unabhängiger Vergleich mit terrestrischem Laserscanning, einer etablierten Methode zur Erzeugung von Oberflächenmodellen, ist in Naumann et. al. (2013) publiziert.

Die Eignungsfähigkeit dieser Micro-UAS für die 3D-Geländeoberflächenrekonstruktion in Gebieten von wenigen Hektar Ausdehnung wurde in den vergangenen Jahren in verschiedenen wissenschaftlichen Studien demonstriert (z. B. Eltner et al. 2013, González-Aguilera et al. 2012, Sauerbier et al. 2011, Eisenbeiss & Zhang 2006).

2 DAS UNTERSUCHUNGSOBJEKT

2.1 DAS PROJEKT DREDGDIKES UND DER TESTDEICH

Die umfangreichsten Messungen und Auswertungen erfolgten an einem Testdeich in Rostock-Markgrafenheide. Dieser Deich – im Jahr 2012 gebaut – ist Teil eines Forschungsprojekts namens DredgDikes. Detailliertere Ausführungen finden sich auf der Webseite des Projekts DredgDikes (2014), die hier auszugsweise zusammengefasst sind, um die Hintergründe des Projekts und die Einbindung der UAS-Versuche zu verstehen. Das von der Universität Rostock (Prof. Fokke Saathoff) und der Technischen Universität Danzig ins Leben gerufene Projekt dient der Erforschung der Verwendbarkeit von Baggergut im Deichbau. Die internationale Zusammenarbeit von Universitäten, Ämtern, Verbänden und Unternehmen aus der Wirtschaft wird durch das EU-Programm Südliche Ostsee zur grenzüberschreitenden Zusammenarbeit kofinanziert (South Baltic Cross-Border Co-Operation Programme). Zur Untersuchung der verschiedenen Materialien und Materialkom-

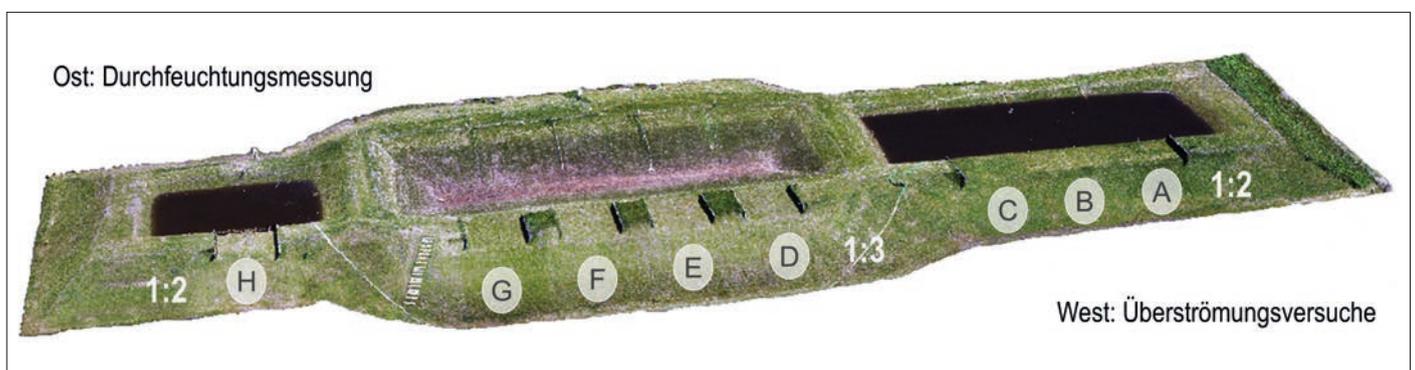


Abbildung 1: Der Testdeich im Rostock-Markgrafenheide (DredgDikes 2014)

binationen werden in Mecklenburg-Vorpommern und in Pommern großmaßstäbliche Versuchsdeiche gebaut, an denen eine Vielzahl an Messungen vorgenommen werden: geotechnische Feldmessung, Einstauversuche, Durchfeuchtungsmessungen und Überströmversuche, Vegetationsmonitoring sowie Messungen zur Überprüfung eventueller Stoffausträge.

Der Testdeich in Markgrafenheide hat eine Abmessung von 40 m x 140 m – das Gesamtareal umfasst etwa 3 Hektar – und verbindet drei Polder, die separat mit Wasser gefüllt werden können, um unterschiedliche hydraulische Belastungen zu simulieren (Abbildung 1). Der Deich besteht aus vier verschiedenen Materialkombinationen mit unterschiedlichem Baggergut und Geotextilien (A bis H) und weist unterschiedliche Neigungsverhältnisse (bis 1:2 oder 1:3) auf. Für das geotechnische Messprogramm wurde eine Vielzahl von Sensoren (so z. B. Tensiometer, Piezometer, Frequent Domain Reflectometry (FDR)-Sensoren) in den Deich eingebaut und dauerhaft eine große Anzahl von Messungen durchgeführt. Das geodätische Mess- und Monitoring-Programm innerhalb des Projekts besteht standardmäßig aus tachymetrisch

wiederkehrenden Beobachtungen von ausgewählten Punkten, um Verformungen an diesen Punkten zu erkennen.

In Laborversuchen werden die mechanischen, hydraulischen, chemischen und ökologischen Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien untersucht sowie Vorabprüfungen und Begleitungen der Feldversuche zur Analyse der Materialveränderungen durch statische und hydraulische Kräfte, Vegetation, Entsalzung und Konsolidierung durchgeführt. Die mehrjährigen Feldversuche betrachten Setzungen, Konsolidierungen, Versickerung, Oberflächenerosion und Stabilität von durchnässten Deichen. Belastungstests und Vegetationsbewertungen werden durchgeführt.

Im Ergebnis erhofft man sich Aussagen zur Eignung von entwässertem feinkörnigem, organischem Baggergut als zukünftige Deckschicht für Deichkonstruktionen. Das Baggergut soll den üblicherweise verwendeten Mergel ersetzen, der aufwendig und unter zum Teil großem Eingriff in die Landschaft aus entsprechenden natürlichen Lagerstätten gewonnen werden muss. Zudem soll der Einsatz von Geokunststoffen steilere Böschungsneigungen als bisher üblich ermöglichen und das Baggergut durch

bewehrende bzw. vor Erosion schützende Elemente unterstützen.

Auf der Elbe-Insel „Lühesand“ wurde am Beispiel eines 150 m langen Teilstücks des Deckwerks einer Uferbefestigung in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) untersucht, inwieweit man mit UAS-Befliegungen als alternative Vermessungsmethode Veränderungsvorgänge von schwer zugänglichen Uferbereichen detektieren kann. Die schützenden Deckwerke der Uferzonen bestehen z. B. aus losen bzw. teilweise vergossenen Steinaufschüttungen mit kantigen Steinen mit einem Durchmesser von etwa 5 cm bis 30 cm. Hier spielen Gezeiten (Ebbe und Flut), Unwetter und Schiffsverkehr im Hinblick auf Wellenerzeugung eine wesentliche Rolle, die das Bauwerk angreifen und in seiner Form verändern.

2.2 DAS MESS- UND AUSWERTEPROGRAMM

Die Professur für Geodäsie und Geoinformatik (GG) an der Universität Rostock führt am Testdeich in Markgrafenheide ein geodätisch orientiertes unabhängiges Messprogramm durch, welches zwei Ziele verfolgt:

Nummer des Flugs	3	4	5	6
Nummer der Epoche	Epoche 00	Epoche 01	Epoche 02	Epoche 03
Flugdatum	11. Juni 2012	12. Dezember 2012	16. April 2013	17. Juni 2013
Plattform und Sensor				
UAS	MD4-1000	MD4-1000	MD4-1000	Falcon 8
Kamera	Olympus PEN e-P2	Olympus PEN e-P2	Olympus PEN e-P2	Sony NEX-5
Brennweite [mm]	17	17	17	16
Sensorgröße [px]	3024 x 4032	3024 x 4032	3024 x 4032	3056 x 4592
Kameraeinstellungen				
F-Nummer	5.6	3.5	5.6	8
ISO-Sensitivität	100	200	200	200
Auslösezeit	1/800	1/1000	1/1600	1/640
Flugdaten				
Abdeckung der Mission	Deich und nähere Umgebung	Deich und weitere Umgebung	Deich und nähere Umgebung	Deich und unmittelbare Umgebung
Abgedecktes Gebiet [ha]	3,19	5,78	2,56	1,45
Anzahl der Streifen	5	5	8	5
Anzahl der Bilder	86	124	361	80
Höhe über Grund [m]	74,6	77,7	52,8	37,8
Bodenauflösung [cm]	2,55	2,45	1,47	1,31

Tabelle 1: Ausgewählte Bildflüge mit charakteristischen Daten

1. Anlage eines geodätischen Netzes mit hoher Präzision, um sowohl die tachymetrischen und Nivellementsvermessungen einzubinden als auch die Möglichkeiten eines Festpunktnetzes für Deformationsanalysen zu schaffen.
2. Test neuer Messmethoden wie terrestrisches Laserscanning (TLS) und bildbasierter UAS-Photogrammetrie zur Erzeugung Digitaler Oberflächenmodelle, Abschätzung von deren Genauigkeitspotenzialen und Etablierung effizienter Arbeitsabläufe zur Messung und Auswertung.

In Kombination beider Ziele behandelt dieser Beitrag im Wesentlichen die Qualitätsanalysen der UAS-Methode und prüft, ob diese geeignet ist, eine flächenhafte Deformationsanalyse zu ermöglichen. Die Gegenüberstellung und der Genauigkeitsvergleich zwischen aus TLS oder UAS abgeleiteten Oberflächenmodellen ist in Naumann et al. (2013) beschrieben. Ein Vergleich mit den im Standardmessprogramm von Dredg-Dikes durchgeführten Tachymetermessungen findet sich in Naumann et al. (2014).

Die Größe und das Umfeld des Testdeichs ist für die Verwendung der bildbasierten UAS-Photogrammetrie mit kleinen UAS und wenig Nutzlast (bis 1 kg), sogenannter Micro-UAS (bis 5 kg Gesamtgewicht) (Grenzdörffer & Bill 2010, Everaerts 2010, Eisenbeiss 2009), gut geeignet. Ein UAS-Gesamtsystem besteht aus der fliegenden Trägerplattform mit der On-Board-Sensorik und autonomen Steuerung (Autopilot), der Nutzlast (hier einer Kamera) und der Bodenstation zur eventuellen manuellen Führung und Überwachung des Flugs (vom Start bis zur Landung). Zwei verschiedene UAS wurden eingesetzt, um Daten für die Generierung von Digitalen Oberflächenmodellen zu gewinnen. Dies ist einerseits die MD4-1000, ein Quadcopter von Microdrones mit einer Digitalkamera von Olympus (PEN E-P2) und einer festen Brennweite von 17 mm. Als weiteres System kam die AscTec Falcon 8 zum Einsatz, ein Octocopter von Ascending Technologies mit der Digitalkamera Sony NEX-5 und einer festen Brennweite von 16 mm.

Beide UAS sind Serienmodelle ohne Modifikationen; sie integrieren GPS (Global Positioning System), IMU (Inertial Measurement Unit) und eine aktive stabilisierende Kameraaufhängung zur Kompen-

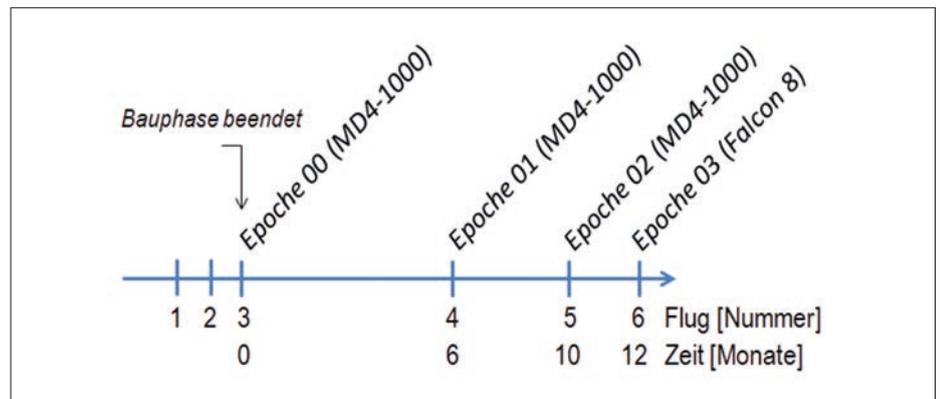


Abbildung 2: Bildflüge und Epochen

sation von Vibrationen in verschiedenen Neigungsrichtungen. Beide Kameras sind handelsübliche Digitalkameras, d. h., es sind nichtmetrische Amateurkameras und damit keine professionellen Kamerasysteme, wie sie in der terrestrischen oder Nahbereichsphotogrammetrie eingesetzt werden. Auf eine umfangreiche unabhängige Kalibrierung im Labor mit Bestimmung der inneren Orientierung und der Verzeichnung wird verzichtet, da dies den Praxis Gesichtspunkten etwas entgegensteht. Die Bildauswertesoftware bestimmt innere Orientierungsparameter (Bildhauptpunktlage, Kammerkonstante und Verzeichnungen) der Kamera (Simultankalibrierung der inneren Orientierung), aber auch die äußere Orientierung mit.

Insgesamt wurde während der Bauzeit des Deichs und seit Fertigstellung sechsmal geflogen. Die ersten beiden Flüge am 3. Mai 2012 und 23. Mai 2012 fanden noch während der Bauzeit statt und dienen mehr der Dokumentation des Baugeschehens und vorbereitender Untersuchungen zur UAS-Technologie. Die weiteren vier Flüge ab Juni 2012 nach Fertigstellung und Inbetriebnahme des Deichs gehen in die hier dargestellten Untersuchungen als Epoche 00 bis 03 ein. Tabelle 1 stellt die wesentlichen Daten zum UAS und den Bildflugparametern zusammen. Abbildung 2 stellt den Bezug zwischen Flug und Epoche her. Die Flughöhe betrug zu Anfang rund 85 m bis 90 m über Grund (Flugnummer 1-4), später wurde sie auf knapp 40 m herabgesetzt. Drei Flugstreifen sind notwendig, um das Testgebiet abzudecken. Es wurden aber fünf bis acht Streifen geflogen, um den Rand des Gebiets auch abzudecken bzw. die Überlappung in den Streifen zu erhöhen. Zwischen 80 und 360 Bilder

wurden entlang den vorgeplanten Flugbahnen in vorgegebenen Zeitabständen erfasst. Längsüberdeckungen von über 80 % und Querüberlappungen von mehr als 60 % konnten erreicht werden, die somit für eine hohe Stabilität der Bildverbände sorgen. Jeder Objektpunkt ist i. d. R. in etwa vier bis neun Bildern zu sehen. Die Bodenauflösungen liegen im Bereich von etwa 1,3 cm bis 2,6 cm pro Pixel. Sechs bis 19 Passpunkte (Ground Control Points, GCP) wurden zur Georeferenzierung der Bilder auf und um den Deich herum angeordnet. Die 3D-Positionen der Passpunkte wurden mittels RTK-GPS unter Verwendung der Referenzsignale von SAPOS-HEPS (Hochpräziser Echtzeit-Positionierungsservice des Satellitenpositionierungsdienstes der AdV) erfasst. Die Positionierungsgenauigkeit wurde mit der Software Leica GeoOffice bestimmt und beträgt etwa 0,013 m mit einer Standardabweichung von 0,004 m. Für die Geoprozessierung der Bilder wurde der State-of-the-Art Web-Verarbeitungsdienst mit Pix4UAV Cloud (pix4d.com/pix4uav_product.html) sowie die Desktop-Software Agisoft PhotoScan Professional (Agisoft 2013) genutzt.

2.3 AUTOMATISIERTER WORKFLOW

Die UAS-Bildflugplanung und -durchführung wird im Wesentlichen durch das zu vermessende Projekt bestimmt. Die Projektkenn-daten (Gebietsausdehnung, gewünschte Auflösung/Qualität usw.) dienen der Festlegung der wesentlichen Bildflugdaten wie Flughöhe, Streifenanzahl, Überlappung, Auflösung etc. Der UAS-Flug erfolgt entlang vorgeplanter Trajektorien, die Bildauslösung an den vordefinierten Wegpunkten (Points-of-Interest oder Zeitinkrement entlang Vektor). Für die Georeferenzierung werden

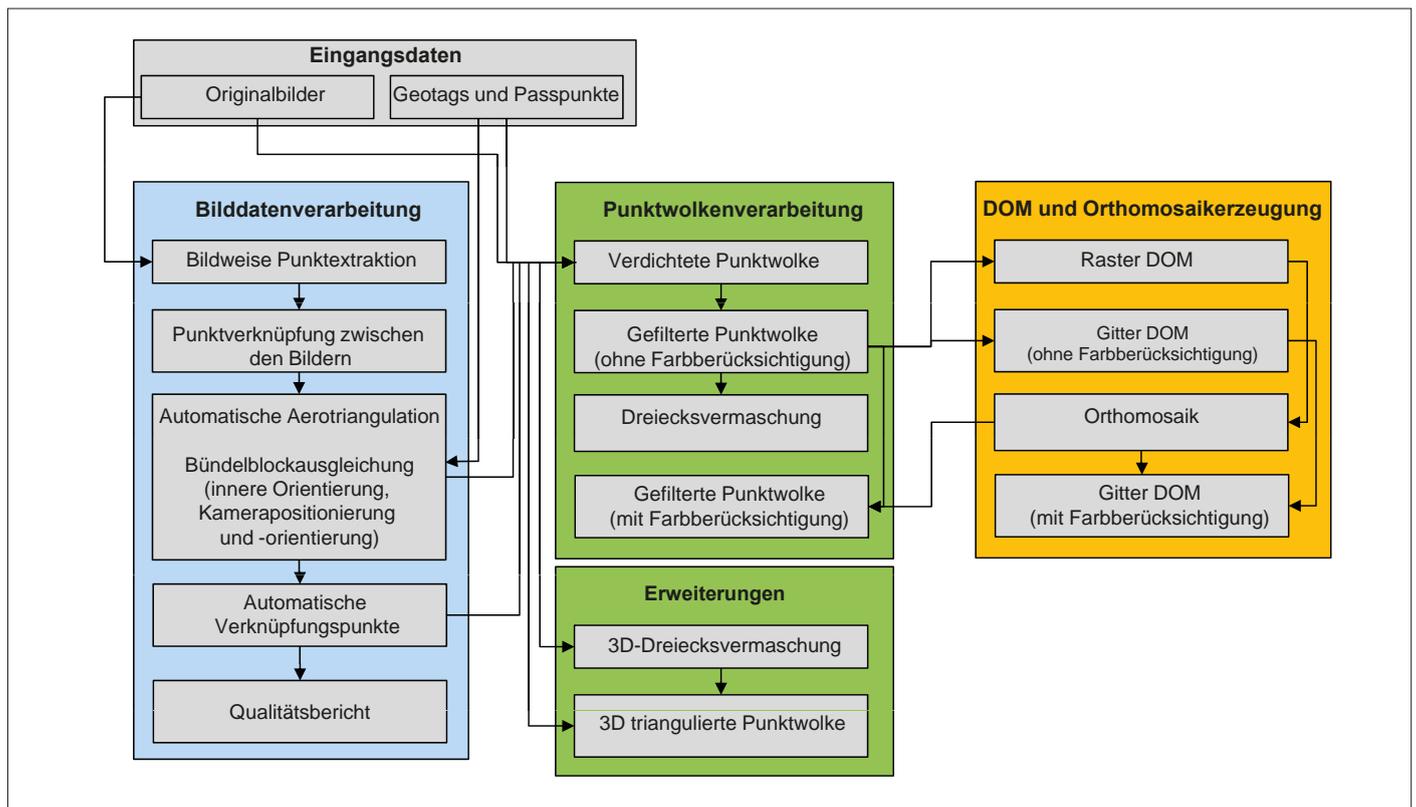


Abbildung 3: Typischer Workflow in der UAS-Photogrammetrie (nach <https://support.pix4d.com/entries/27939633>)

Passpunkte vorab ausgelegt und parallel zum Flug eingemessen.

Die UAS-Auswertung folgt in etwa dem abgebildeten Workflow, der sich hier an die Verarbeitung durch die Pix4UAV Cloud Software anlehnt und im Wesentlichen aus drei Schritten besteht (Abbildung 3, nach <https://support.pix4d.com/entries/27939633>). Die Bilder und die Passpunkt-daten gehen in den ersten Schritt, die Bild-datenauswertung. Aus den Bildern werden gut erkennbare Punkte mittels SIFT-Operator (Scale-Invariant Feature Transform) extrahiert, die dann zwischen den Bildern verknüpft werden und als Eingabe für die Aero-triangulation oder Bündelausgleichung dienen. In der Bündelblockausgleichung werden die exakte Position und Orientierung der Kamera für jedes Bild rekonstruiert, sie beruht auf diesen Verknüpfungspunkten und Näherungswerten zu den Bildpositionen, die durch die GPS-Einheit im UAS-Autopiloten erfasst wurden. Zudem kann hier auch die innere Orientierung (Kamerakalibrierung) mitgeschätzt werden. Als Ergebnis wird eine Liste der Verknüpfungspunkte und ein Qualitätsbericht zur Ausglei-chung generiert.

Die Punktwolkenverarbeitung nutzt die Bilddaten, deren Positionierung/Orientierung sowie die Verknüpfungspunkte und

erzeugt eine verdichtete Punktwolke, die dann gefiltert und dreiecksvermascht wird. Im Ergebnis kann zusätzlich eine 3D-Dreiecksnetz- oder eine 3D-Punktwolkenvermaschung erstellt werden.

Darüber hinaus werden abgeleitete Produkte wie das Digitale Oberflächenmodell (DOM) und ein Orthophotomosaik berechnet, welches auch über das DOM gelegt werden kann.

Der hier beschriebene Ablauf wird in den genutzten Softwarepaketen eher im Sinne einer Blackbox abgearbeitet. Hier wurde die webbasierte WPS Pix4UAV Cloud Software verwendet, die mit wenig Aufbereitungsaufwand auskommt, einfach bedienbar ist, weitestgehend automatisiert abläuft und ein aufwands- und gebietsbezogenes Abrechnungsmodell hat (Pix4D 2014). Für jeden Bildflug wurde dieser Workflow komplett durchlaufen. In der Auswertung, insbesondere hinsichtlich einer Deformationsanalyse und einem Veränderungsmonitoring, werden nachfolgend ausschließlich die DOM betrachtet.

3 ERGEBNISSE

Flug 3 war der erste Flug nach Fertigstellung des Bauwerks. Er wird als Epoche 00 bezeichnet und dient als Bezug für die Veränderungsdetektion am Bauwerk. Das

daraus mittels UAS erzeugte DOM wurde auch mit einer TLS-Kampagne verglichen. Der Vergleich zeigte eine gute Korrelation zwischen den Oberflächen mit einer Standardabweichung von 2,2 cm bis 4,0 cm (gefiltert oder ungefiltert, insgesamt wurden 681.338 Punkte einbezogen, weniger als 1 % wurden gefiltert) (Naumann et al. 2013). Eine hohe Übereinstimmung beider DOM ergibt sich insbesondere in den Gebieten der Deichoberfläche ohne oder mit wenig Bewuchs und kontinuierlichem Oberflächenverlauf. Problematische Gebiete für die UAS-Photogrammetrie mit senkrecht schauenden Kameras sind ungünstig texturierte Areale (zu homogen oder einfarbig), Objekte geringer Größe oder Bereiche mit abrupten Sprüngen in der Höhe (z. B. senkrechte Spundwände, Böschungen schmaler Gräben). Hier können sich durchaus Abweichungen in der Größenordnung von mehreren Dezimeter ergeben, die z. B. aus einer ungünstigen Ausrichtung zum Aufnahmesystem (Projektion der Fläche zu klein, somit geringere Punktdichte) und der oftmals schlechteren Beleuchtung oder ungünstigen Textur begründet sind, in deren Folge die Verknüpfungspunkte dort geringer dicht ausfallen und auch fehlerhaft zugeordnet werden. Bei unterschiedlichsten Vegetationsständen

Nummer des Flugs Nummer der Epoche	3 Epoche 00	4 Epoche 01	5 Epoche 02	6 Epoche 03
DOM vs. RTK-Kontrollpunkte: Mittel und Standardabweichung der Höhendifferenzen [m] Anzahl Kontrollpunkte	0,005 ±0,013 9	-0,040 ±0,130 6	-0,003 ±0,019 alle 19 Passpunkte	0,001 ±0,010 16
DOM vs. Tachymeter-Kontrollpunkte: Mittel und Standardabweichung der Höhendifferenzen [m] Anzahl Kontrollpunkte	0,027 ±0,028 34	- (keine Vermessung zu dem Zeitpunkt)	0,032 ±0,024 41	0,041 ±0,018 2
DOM vs. TLS-DOM: Standardabweichung der Höhendifferenzen [m]	±0,040 (±0,022 mit gefilterten Abweichungen > 10 cm, weniger als 1 % der Daten)			

Tabelle 2: UAS-DOM-Qualitätsvergleich an ausgewählten Punkten mit RTK, Tachymetrie und Laserscanning

ist die automatisierte Bildpunktbestimmung mit der Softwarelösung eher als Blackbox zu sehen, bei der nicht genau nachzuvollziehen ist, wie die Schnittgeometrie zur Erzeugung des Punkts gebildet wird. Derartige Problemareale wurden ausmarkiert und in der allgemeinen Gegenüberstellung nicht berücksichtigt.

3.1 QUALITÄTSVERGLEICH DER UAS-DOM MIT ANDEREN VERFAHREN

Die Höhen der DOM wurden an ausgewählten Punkten verglichen. Einerseits sind dies temporär für den jeweiligen Flug markierte Passpunkte, die nicht in der Berechnung der Georeferenzierung berücksichtigt wurden. Andererseits sind dies dauerhaft vermarkte Punkte, die für das Projekt Dredg-Dikes bei der unabhängigen Vermessung mittels Tachymetrie genutzt werden (Tabelle 2). Bei Vergleich der zeitlich leicht versetzten Messkampagnen zwischen TLS-DOM und UAS-DOM liegen solche Punkte natürlich nicht vor, sodass hier nur die Streuung zwischen beiden DOM berechnet werden kann.

Der direkte Vergleich mit den durch RTK-GPS bestimmten Kontrollpunkten zeigt das hohe Genauigkeitspotenzial der UAS-Photogrammetrie. Die Abweichungen gehen bei fast allen Epochen gegen 0 (Ausnahme Epoche 01), und die Streuungen der Höhendifferenzen liegen im Bereich von etwa 1,5 cm. Eine genauere Prüfung der Epoche 01 ergab größere Abweichungen von vier Kontrollpunkten im westlichen Teil von Polder 1 und am östlichen Rand

der Polder in der Größenordnung von -0,27 m und +0,14 m, welches zu dem Zeitpunkt auf den Höchststand an Bewuchs zurückgeführt werden kann. Zudem ergaben sich längere Schatten aufgrund des Sonnenstands zu dem Flugzeitpunkt. Aber auch kleinere Messfehler können nicht ausgeschlossen werden, da hier kleinere Messmarken gewählt wurden, die für die später gewählten niedrigeren Flughöhen geeigneter waren.

Die mittleren Abweichungen von den mit einem Stab markierten Tachymetermesspunkten zeigen nahezu durchgängig einen systematischen Versatz (UAS liegt einige Zentimeter über der Tachymetrie), dies ist vermutlich auf die den Stab umgebende Vegetation zurückzuführen. Die Höhendifferenzqualität liegt hier im Bereich von etwa 2 cm bis 3 cm.

3.2 VERÄNDERUNGSANALYSE DER OBERFLÄCHEN

Um eine Aussage zur Verwendungsfähigkeit von mittels UAS erzeugten DOM zum Nachweis von Veränderungen – im Wesentlichen interessieren die zu erwartenden Setzungsprozesse – des Deichs zu erlangen, werden die vier Epochen mittels UAS-DOM gegenübergestellt. In einem Vorverarbeitungsschritt wurden, ausgehend von den im vorangegangenen Abschnitt angedeuteten Problemarealen, Gebiete mit hohem Vegetationsbestand, abrupten Sprüngen in der Höhe an Spundwänden oder Objekten auf der Deichoberfläche (z. B. Personen, technische Ausstattungen)

und Installationen) in allen DOM eliminiert (in den Abbildungen als weiß markierte Gebiete dargestellt). Berechnet werden dann Differenzen in der Höhe bezogen auf Epoche 00 und zwischen den nachfolgenden Epochen. Für die Genauigkeitsanalyse wird die folgende Klassifizierung und Farbgebung zugrunde gelegt (Abbildung 4).

Die Differenzen werden in Schritten von 5 cm abgestuft. Erhöhungen werden in den folgenden Abbildungen in Farbabstufungen von Ocker zu Rot, Setzungen von leichtem Grün zu Purpur dargestellt. Grau sind Differenzen zwischen -2,5 cm

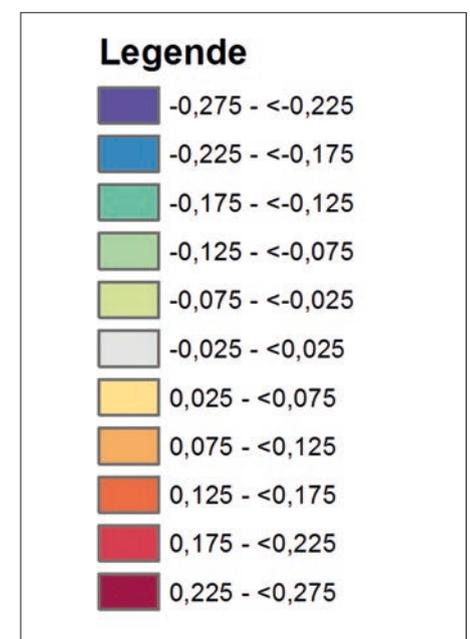


Abbildung 4: Klassifizierung und Farbgebung des Epochenvergleichs

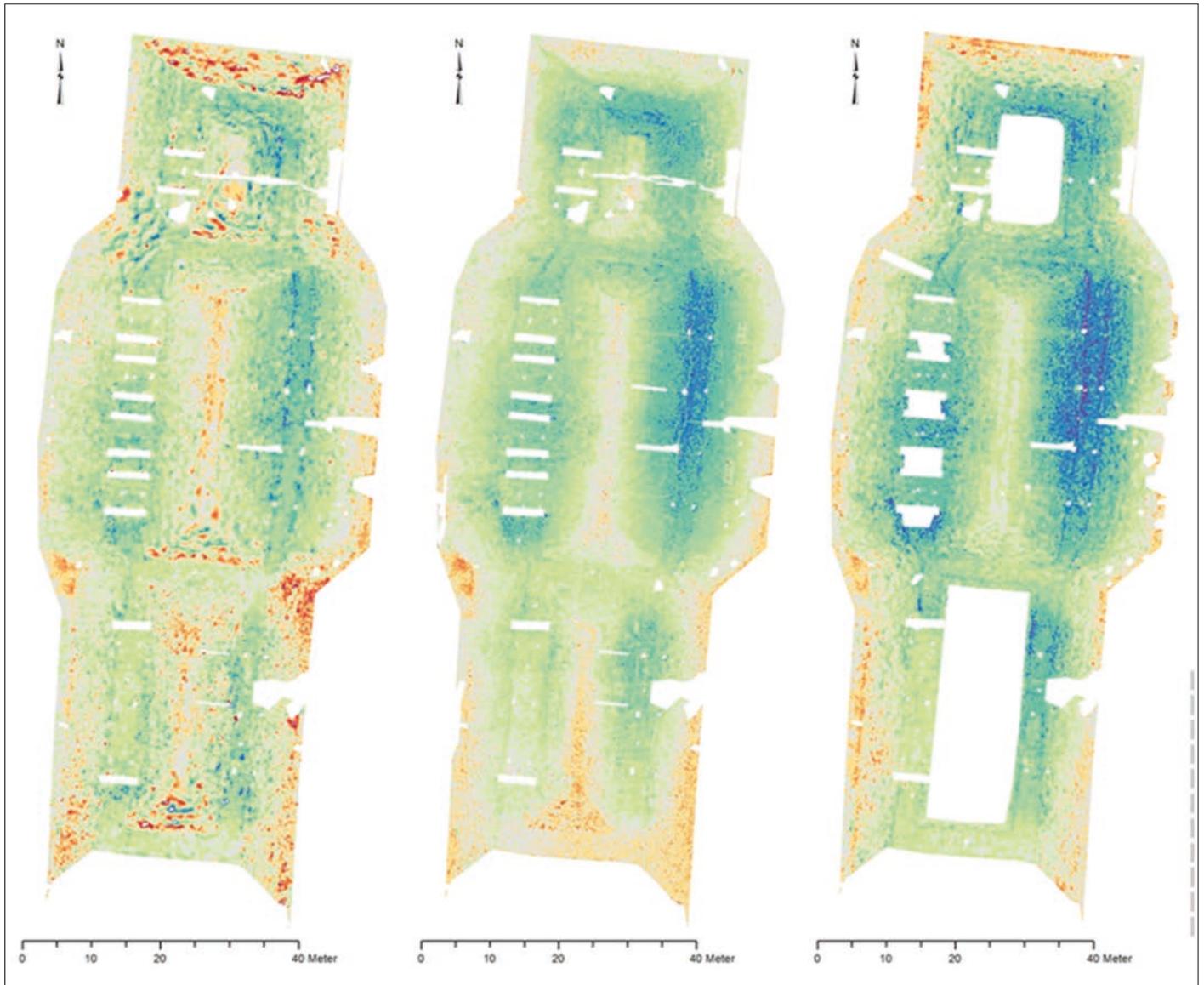


Abbildung 5: Epochenvergleiche: Differenzen in der Deichoberfläche nach sechs, zehn und zwölf Monaten (Ep01-Ep00, Ep02-Ep00, Ep03-Ep00 von links nach rechts)

und 2,5 cm dargestellt, die in etwa dem Messrauschen bzw. der Messgenauigkeit entsprechen (Naumann et al. 2013).

Zusammengefasst konnten in den Epochenvergleichen die wesentlichen Oberflächenveränderungen detektiert werden. Erhöhungen bis zu fast 30 cm, in den rötlichen Tönen dargestellt, sind im Wesentlichen durch unterschiedliche Wachstumsstände der Vegetation auf dem Deich zwischen den Epochen zu erklären. Absenkungen bis zur Größenordnung von gut 20 cm entstehen im östlichen Deichbereich, im Bildverband rechts durch die zunehmende Blaufärbung deutlich erkennbar (Abbildung 5). Durch das größere Volumen und Gewicht des Deichkörpers im Osten könnte sich dort der Untergrund stärker gesenkt haben. Das relativ nass eingebaute

Baggergut verliert Wasser und verdichtet sich. Die Größenordnung wurde auch bei der Konzeption des Versuchsdeichs vorhergesagt und wird durch die bereits erwähnten Tachymetermessungen punktuell bestätigt.

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Micro-UAS sind einfach zu bedienen, können komplexe vordefinierte Trajektorien autonom abfliegen und Aufnahmen an vordefinierten Punkten erzeugen und erreichen sehr hohe Bildüberlappungen. Die Zeit für die Befliegung vor Ort wird stark reduziert, die Prozessierung der großen Bilddatenmengen geschieht nahezu vollautomatisch. Somit ermöglichen sie (unter Beachtung der Flugerlaubnis, der Wetterbedingungen und

der Energieverfügbarkeit) wiederholte Messkampagnen innerhalb kurzer Zeiträume.

Die Genauigkeit von UAS-DOM ist abhängig von einer Vielzahl von Parametern, die folgenden Bereichen zugeordnet werden können:

- ▶ Kamera und Bildflug: Flughöhe und Bodenauflösung (eventuell Nachführung an Reliefänderungen), Bildüberlappung, Anzahl und Schnittgeometrie der homologen Bildstrahlen, die den einzelnen Punkt im Bildverband bestimmen, stabile innere Orientierung der Kamera, Kalibrierung im Labor.
- ▶ Eigenschaften des Objekts und damit Verknüpfungspunkte: Dichte und Höhe der Vegetation, Texturierung, Beleuchtung zum Aufnahmezeitpunkt ausreichend hell, aber diffus, wenn möglich

keine Schattenbildung, kontinuierliche Oberflächenform, keine abrupten Sprünge im Gelände.

- Passpunkte: Genauigkeit der Passpunktmessung im Gelände, Erkennbarkeit und Messgenauigkeit im Bild sowie Verteilung der Punkte.

Hohe Genauigkeit bei der Bestimmung von Veränderungen zwischen DOM verschiedener Epochen kann nur erreicht werden, wenn etwa vergleichbare Bildflugbedingungen gelten und bezogen auf ein naturnahes Objekt auch gleichmäßige Wachstumsbedingungen gewährleistet sind. Das Messrauschen der Methode wird auch von der kleinräumigen Heterogenität (Rauigkeit, Granularität) in vegetationsarmen Oberflächenbereichen beeinflusst. Für weitere Kampagnen am Testdeich in Markgra-

fenheide sollte daher unmittelbar vor der Befliegung gemäht werden, und gleiche Pflanzenentwicklungsstadien sollten überwiegen.

Unsere Untersuchungen über die Genauigkeit zeigte, dass die UAS-Photogrammetrie für solche Zwecke geeignet ist und Änderungen zwischen DOM im Bereich oberhalb des Messrauschens gut erkennbar sind. Bei der hier mittels UAS-Photogrammetrie erreichten durchschnittlichen Höhengenaugkeit im Bereich von wenigen Zentimetern sind die Setzungen ab der zwei- bis dreifachen Genauigkeit klar nachweisbar. Ähnliche Qualitäten konnten auch an anderen Deichbauwerken erreicht werden, so z. B. in Lühesand. Die Ergebnisse sind auf andere Objekte mit kontinuierlicher Oberflächenform übertragbar. Da-

rüber hinaus kann die Genauigkeit durch Modifikationen des Flugs erreicht werden, beispielsweise durch Erhöhung der Auflösung durch Verringerung der Flughöhe, die Anpassung der Flugbahn an schwierige Bereiche des Objekts (z. B. Befliegung in Längs- und Querstreifen statt nur Längsstreifen) oder durch Hinzunahme von schräg in Richtung der Flächennormalen blickende Aufnahmen (Oblique-Aufnahme), wodurch die Erfassungsgenauigkeit spezifischer Objektdetails wie vertikaler Wände gesteigert wird.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Land Mecklenburg-Vorpommern für die Finanzierung des Projekts Pfiffikus (V220-630-08-TFMV-F-041).

Literatur

- DredgeDikes (2014): Projekthomepage. <http://www.dredgedikes.eu/de/>, Zugriff 01/2014.
- Eisenbeiss, H. (2009): UAV Photogrammetry. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, Mitteilungen Nr. 105, 235 S.
- Eisenbeiss, H.; Zhang, L. (2006): Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. ISPRS (International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences), Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology, Dresden, Germany, 25.-27. September 2006. In: ISPRS, Vol. XXXVI-Part5, S. 90-96.
- Eltner, A.; Mulsow, C.; Maas, H.-G. (2013): Quantitative Measurement of soil erosion from TLS and UAV data. In: Grendzörffer, G.; Bill, R. (Eds.): Proceedings UAV-g. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XL-1/W2, S. 119-124.
- Everaerts, J. (2010): NEWPLATFORMS – Unconventional Platforms for Remote Sensing – Final EuroSDR Publication No. 56, S. 57-98.
- González-Aguilera, D.; Fernández-Hernández, J.; Mancera-Taboada, J.; Rodríguez-Gonzálvez, P.; Hernández-López, D.; Felipe-García, B.; Gozalo-Sanz, I.; Arias-Perez, B. (2012): 3D Modelling and accuracy assessment of granite quarry using unmanned aerial vehicle. ISPRS (International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences) Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology, Melbourne, Australia. In: ISPRS, Vol. XXII, S. 37-42.
- Grendzörffer, G.; Bill, R. (2010): Unmanned Airborne Systems (UAS) – moderne und flexible Geodatenerfassung. In: Harzer, B. (Hrsg.): GIS-Report 2010/11 – Software – Daten – Firmen. Bernhard Harzer Verlag, Karlsruhe, S. 17-26.
- Grendzörffer, G.; Bill, R. (Eds.) (2013): Proceedings UAV-g. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XL-1/W2. Copernicus.
- Naumann, M.; Geist, M.; Bill, R.; Niemeyer, F.; Grendzörffer, G. (2013): Accuracy comparison of digital surface models created by unmanned aerial systems imagery and terrestrial laser scanner. In: Grendzörffer, G.; Bill, R. (Eds.): Proceedings UAV-g. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-1/W2, 2013, S. 281-283.
- Naumann, M.; Bill, R.; Niemeyer, F.; Nitschke, E. (2014): Deformation analysis of dikes using unmanned aerial systems (UAS). In: Proceedings South Baltic Conference on Dredged Materials in Dike Construction, Rostock.
- Pix4D (2014): Product overview (Website). <http://www.pix4d.com/products/>, Zugriff 01/2014.
- Sauerbier, M.; Siegrist, H.; Eisenbeiss, H.; Derri, N. (2011): The practical application of UAV-based Photogrammetry under economic aspects. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland. In: ISPRS, Vol. XXXVIII-1/C22.