

UAV-gestützte Bildflüge für das photogrammetrische Monitoring einer Buhne und einer Steilküste

Thomas KERSTEN, Maren LINDSTAEDT, Klaus MECHELKE
und Felix TSCHIRSCHWITZ

Zusammenfassung

Durch den Klimawandel und den drohenden Anstieg des Meeresspiegels nimmt der Küstenschutz eine zunehmende Bedeutung ein, denn es müssen Maßnahmen getroffen werden, um den Schutz von Leben und wichtiger Infrastruktur in Küstengebieten zu gewährleisten. Eine wesentliche Voraussetzung für die Umsetzung geeigneter Maßnahmen zum Küstenschutz ist das Monitoring von gefährdeten Gebieten und Quantifizierung der entstehenden Schäden durch entsprechende Sensorik. In diesem Beitrag wird eine einfache praktische Anwendung vorgestellt, in der ein low-cost UAV eingesetzt wird, um durch manuelle UAV-Befliegungen das photogrammetrische Monitoring einer Buhne an der Elbe und einer Steilküste an der Ostsee effizient durchzuführen. Die Buhne dient dem Schutz der Elbdeiche vor Wellen, induziert durch den enormen Schiffstransportverkehr, während die Steilküsten eher schutzlos den Herbststürmen ausgesetzt sind.

Vor der Befliegung wurde jeweils ein Passpunktnetz mit entsprechenden Zielzeichen angelegt und die Koordinaten mit geodätischen Methoden bestimmt. Die verschiedenen Luftbildverbände wurden mit einer DJI Phantom 3 aufgenommen und mit der Software Agisoft PhotoScan ausgewertet. Die generierten Oberflächenmodelle der Buhne wurden anschließend mit aus terrestrischem Laserscanning gewonnenen Daten verglichen. Vergleiche der verschiedenen Epochen, generiert aus den Luftbildverbänden, dokumentieren die Veränderungen an der Buhne durch Auswirkungen des Schiffsverkehrs. Die Oberflächenmodelle der Steilküste wurden verwendet, um den Rückgang der Steilküste durch die Auswirkungen der Herbststürme im Vergleich zu älteren Laserscanningdaten zu dokumentieren und zu quantifizieren.

1 Einleitung

Für Küstengebiete besteht auch als Folge des Klimawandels und dem damit verbundenen Meeresspiegelanstieg eine zunehmende Gefahr an natürlichen Extremwetterereignissen wie z.B. Überflutungen durch Stürme, die zu einer verstärkten Küstenerosion führen. Das natürliche Potential für Küstenerosionen ist gemäß Alexander (1993) durch die folgenden fünf Faktoren beeinflusst: (1) der fehlende Schutz von Gesteinen und Sedimenten gegenüber Wellen und Strömungen, (2) die Topographie der Küste, (3) der Tidenhub und die Intensität der Strömung, (4) das Küstenklima und (5) die (mangelnde) Sedimentzufuhr. Zusätzlich kann die Küstenerosion durch anthropogene Modifikationen wie die Entfernung von Vegetation und die Entnahme von Material (z.B. Sand) verstärkt werden.

Für an Wasserstraßen gelegene oder auch küstennahe Bauwerke stellen winderzeugter See- gang und/oder langperiodische Wellen durch den zunehmend größer werdenden Schiffstrans-

portverkehr die wesentliche Belastung dar, die zu extremen Beschädigungen der Küstenbauwerke führen können. Buhnen sind künstliche Küsten- oder Flussbauwerke, die dem Schutz von Deichen dienen, in dem sie die Wellen brechen und somit potentielle Schädigungen reduzieren.

Um die Schädigungen an Küstenobjekten und -bauwerken zu dokumentieren, zu analysieren und zu bewerten, werden heute je nach Flächengröße verstärkt geodätische Messverfahren wie terrestrisches und Airborne Laserscanning oder Luftbild- und UAV-Photogrammetrie eingesetzt. Der Einsatz von terrestrischem Laserscanning zur Überwachung der Küstenfelsen auf Rügen, Deutschland und die Analyse der Massenbewegungen werden von Kuhn & Prüfer (2014) vorgestellt. Lim et al. (2005) nutzten terrestrische Photogrammetrie in Kombination mit TLS zum Monitoring eines Kliffs. In einem Forschungsvorhaben untersucht Tiepolt (2016) das mobile Laserscanning und den Einsatz von UAVs zur Aufnahme von Küstengebieten und Küstenschutzbauwerken an Nord- und Ostsee.

Heute werden zunehmend Unmanned Aerial Vehicles (UAV) für die Erfassung von Küstengebieten und -objekten eingesetzt, weil sie kostengünstig und sehr flexibel sind. Traut (2017) stellt Untersuchungen mit dem High-End Starrflügler-UAV Q-200 mit Post-Processing Kinematic (PPK) von der Firma QuestUAV vor. In dieser Fallstudie wird UAV-Photogrammetrie zur Messung langfristiger Erosionen an der nordöstlichen Küste Englands in Northumberland ohne Passpunkte erfolgreich eingesetzt. Ein weiteres Beispiel für den Einsatz von UAV-Photogrammetrie mit einem DJI S1000 Oktokopter beschreiben Barlow et al. (2017). Sie erzeugen Punktwolken und Spektraldaten für die kinematische Analyse der Kreidefelsen in Telscombe – einer Felswand von etwa 750 m Länge und einer Höhe von 20 bis 49 m östlich von Brighton in England. Dewez et al. (2016) nutzen ebenfalls UAV-Aufnahmen, um sehr hoch auflösende Punktwolken zu erstellen, anhand derer kleinräumige Änderungen eines Kreidekliffs an der französischen Kanalküste dokumentiert werden. Weitere Beiträge zur Anwendung von UAVs in der Kliff-Vermessung finden sich bei Esposito et al. (2017) und Irvine et al. (2018). Der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) setzt seit 2016 ein Starrflügler-UAV zur Vermessung und Dokumentation der Küstenlinien der deutschen Nordseeküste ein (Dirks, 2018).

In diesem Beitrag wird der Einsatz eines low-cost UAV-Systems für regelmäßige Befliegung eines künstlichen und eines natürlichen Küstenobjektes durch das Labor für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg beschrieben. Die UAV-gestützten Bildflugdaten dienen für das photogrammetrische Monitoring einer Buhne an der Elbe und eines Steilküstenabschnittes an der Ostsee. Durch 3D-Vergleiche der temporalen Oberflächenmodelle werden die Veränderungen der Objekte dokumentiert und quantifiziert.

2 Die Objekte an der Elbe und an der Ostsee

Bei den untersuchten Objekten handelt sich um eine künstlich angelegte Buhne zum Schutz des Elbdeiches und um eine durch die Natur geprägte Steilküste an der Ostsee.

2.1 Die Buhne bei Juellssand an der Unterelbe

Für den Schutz von Uferzonen werden Buhnen, spezielle Strömungsbauwerke, in den Flusslauf eingebracht. An ihnen wird die Energie der Wasserbewegungen reduziert und so die

Auswirkung für das Ufer eingeschränkt. Im Rahmen des gemeinsamen Projektes „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung von Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen“ zwischen der Bundesanstalt für Wasserbau und der HafenCity Universität Hamburg wird untersucht, ob ein Zusammenhang von an den Buhnen vorkommenden Schäden durch von Schiffen erzeugten langperiodischen Wellenbelastungen besteht und ggf. quantifiziert werden kann. Dazu wurde ein geodätisches Monitoringsystem auf Basis eines terrestrischen Laserscanners entwickelt, um die am Objekt erzeugte Deformation seit 2015 laufend zu erfassen (Tschirschwitz et al. 2016). Die Buhne bei Juellssand an der Untereibe (Abb. 1) besitzt eine Ausdehnung von ca. 120 m Länge und 20 m Breite (sichtbarer Bereich bei Niedrigwasser) und ist mit entsprechenden Wasserbausteinen der Größe CP 90/250 ausgeführt. Als Referenz und zum Vergleich wurde die Buhne 29 seit November 2017 drei Mal mit einem UAV erfasst.



Abb. 1: Die untersuchte Buhne im Untereibeabschnitt Juellssand – Schrägansicht (links) und in der Mitte der Übersicht (rechts). Rechtes Foto: Google Maps



Abb. 2: 3D-Punktwolke vom Brodter Steilufer mit Passpunktverteilung 2018 – UAV-Befliegung mit einer DJI Phantom 3

2.2 Die Steilküste bei Brodten

Das Brodtener Ufer ist eine über 4 km lange Steilküste an der Lübecker Bucht (Ostsee) zwischen Travemünde und Niendorf in Schleswig-Holstein. Durch die einsetzende Eisschmelze in der letzten großen Eiszeit formte eine gewaltige Gletscherzunge die heutige Lübecker Bucht, in dem die mit dem Gletscher transportierten Sandmassen, Mergel und mannsgroßen Findlinge sich in Form einer Moräne ablagerten und den Verlauf der heutigen Ostseeküste prägten. Die bis zu 20 m hohe Steilküste stellt in weiten Teilen ein aktives Kliff dar, das durch die Einwirkung von peitschendem Wellenschlag der Winterstürme aus Ost-Nordost, starker Regenfälle mit einhergehender Aufweichung und Auswaschung der unterschiedlichen Sedimentschichten als auch durch gefrierendes, sich im Volumen ausbreitendes Sickerwasser im Durchschnitt bis zu einem Meter pro Jahr zurückweicht. In unmittelbarer Nähe des Steilufers befindet sich das Ausflugslokal Hermannshöhe, welches vor dem Ersten Weltkrieg errichtet, 2011 abgerissen und durch einen im Mai 2012 eröffneten Neubau ersetzt wurde. Die HCU Hamburg führt im Abschnitt Hermannshöhe (Abb. 2) seit 2004 Messungen mit terrestrischen Laserscannern durch, um die rasanten Veränderungen bzw. den Abbruch zu dokumentieren. Im Jahr 2016 wurde die Steilküste zum ersten Mal mit UAV erfasst (Kersten & Lindstaedt 2017). Abb. 2 zeigt das Untersuchungsgebiet am Brodtener Steilufer mit dem Gebäude des Restaurants im Hintergrund, das heute (Status Dezember 2018) ca. 55 m von der Kante des Steilufers entfernt steht.

3 Das eingesetzte UAV-System

Für die Bildflüge über den Bühnen an der Elbe und an der Steilküste in Brodten wurde das low-cost UAV DJI Phantom 3 Advanced mit einer festinstallierten Kamera eingesetzt, das seit April 2015 im Markt verfügbar ist und eine Weiterentwicklung der Vorgängermodelle DJI Phantom 2 und Phantom 2 VISION+ darstellt. Die wichtigen technischen Daten der DJI Phantom 3 Advanced und der dazugehörigen Kamera sind in Tab. 1 und 2 zusammengefasst.

Tab. 1: Technische Daten der DJI Phantom 3 Advanced

	Gewicht (mit Akku & Propellern)	1280 g
	Diagonale Größe (ohne Propeller)	350 mm
	Max. Geschwindigkeit (Steig/Sink)	5 m/s / 3 m/s
	Max. Geschwindigkeit (kein Wind)	16 m/s
	Max. Höhe über NN (6000 m)	120 m über Startpunkt
	Betriebstemperatur	0° bis 40° C
	Positionsbestimmung	GPS/GLONASS
	Max. Flugzeit	ca. 23 Minuten

Bei der Speicherung der Fotos im Bildformat JPEG wird bei der DJI Phantom 3 automatisch eine werkseitig vorkonfigurierte Korrektur der radial-symmetrischen Verzeichnung angebracht, die jedoch nicht die realen systematischen Abbildungsfehler beschreibt (Przybilla et al. 2017). Eine Speicherung der Fotos im Format DNG (RAW) ist während des Flugbetriebs nur mit Einschränkungen in der Anzahl Fotos möglich, da eine Datenspeicherung ca. 7s je Foto braucht und damit die Fluggeschwindigkeit enorm reduziert wird

Tab. 2: Technische Daten der Kamera

Sensor Sony Exmor	1/2.3" CMOS, eff. Pixel: 12,4 MP
Sensorformat, Pixel	6,16 mm × 4,62 mm, 1,54 μm
Objektiv/Brennweite	FOV 94°, 4 mm, f/2.8 Fokus auf ∞
ISO-Empfindlichkeit	100-1600
Elektr. Verschluss	8s bis 1/8000s
Max. Bildgröße	4000 × 3000 Pixel
Betriebstemperatur	0° bis 40° C
Bildformat	JPEG, DNG (RAW)

Viele Spiegelreflexkameras, Kompakt- und Systemkameras sowie proprietäre Kameras mit CMOS-Sensoren, die auf UAV-Systemen eingesetzt werden, verwenden einen Rolling Shutter (rollenden Verschluss), um eine bessere Qualität der Fotos zu erhalten und um die Bewegungsunschärfe (motion blur) zu reduzieren. Bei einem Sensor mit Rolling Shutter werden die Pixel zeilen- oder spaltenweise nacheinander belichtet, wobei eine Bildperiode (1/Bildfrequenz) benötigt wird, bis alle Pixel auf dem Sensor aktiv bzw. lichtempfindlich sind. Dieser Effekt wird als Bildverzerrung sichtbar, wenn ein Objekt oder die Kamera sich während der Aufnahme bewegt (Luhmann 2018: 221). Durch die Bewegung des UAV während der Aufnahme entstehen durch die zeilenhafte Bildauslesung vertikale Verschiebungen im Bild, die einige Pixel betragen können. Jede ausgelesene Bildzeile besitzt somit eine eigene äußere Orientierung. Die Bildauslesezeit bei der Phantom 3 beträgt 33 Millisekunden (Pix4D 2017a). Mit der folgenden Formel (1) nach Vautherin et al. (2016) wird die Verschiebung in y (in Pixel) wie folgt berechnet:

$$\Delta y \approx (v \tau s_y) / (\varphi_y h) \text{ mit } \varphi_y = S_Y / f \quad (1)$$

Dabei sind v die Fluggeschwindigkeit des UAVs in Meter pro Sekunde, τ die Auslesezeit mit Rolling Shutter in Millisekunden, s_y die vertikale Bildgröße in Pixel, φ_y das vertikale Sichtfeld der Kamera in Radiant, h die Flughöhe in Metern über dem Boden, S_Y die vertikale Sensorgröße in Metern und f die Brennweite des Objektivs in Metern. Bei einer geringen durchschnittlichen Fluggeschwindigkeit von 1 m/s in einer Flughöhe von 20 m über Grund erhält man eine Verschiebung von 4 Pixeln durch den Rolling-Shutter-Effekt. Während der Bildauslesezeit hat sich die Phantom 3 bei dieser Geschwindigkeit um 3,3 cm weiter bewegt. Der Effekt kann mathematisch modelliert und durch zusätzliche Parameter in der Bündelausgleichung kompensiert werden. Der Einfluss von CMOS-Kameras mit Rolling-Shutter-Verschluss wurde für photogrammetrische Einzel- und Mehrbildauswertungen im Nahbereich (Rofallski & Luhmann 2017) und für die 3D-Punktbestimmung mit Bilddaten von UAV-Systemen (Vautherin et al. 2016) untersucht und dokumentiert. Eine Korrektur des Rolling-Shutter-Effekts wurde bereits in photogrammetrische Software wie Pix4Dmapper 2.1 und Agisoft PhotoScan 1.3 implementiert, um dadurch den Einsatz von low-cost und light-weight UAVs für professionelle 3D-Mapping-Anwendungen zu verbessern.

4 Eingesetzte photogrammetrische Software Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan ist eine preiswerte 3D-Rekonstruktionssoftware von der Firma Agisoft LLC (www.agisoft.ru) in St. Petersburg, Russland, die genaue texturierte 3D-Modelle unter

Verwendung digitaler Fotos von Szenen automatisch erstellt. Das Programm liefert robuste Bildorientierungen mit und ohne kodierte Zielmarken und ohne spezielle Bildaufnahmebedingungen. PhotoScan (aktuelle Version 1.4.5) kann für \$ 179 USD als preiswerte Standardausgabe oder als professionelle Version für \$ 3.499 USD gekauft werden. Die meisten der folgenden Ergebnisse in diesem Beitrag sind mit der professionellen Version 1.4.4 erstellt worden. Dieses Programm ist unter Windows-Betriebssystemen ausführbar, d.h. alle mit dieser Software erstellten Daten bleiben auf dem lokalen PC des Anwenders. Die Vorteile von PhotoScan können wie folgt zusammengefasst werden: (a) sehr einfacher Workflow mit Option zur Automation durch Batch-Prozessierung, (b) schnelle Berechnungen mit CPU und GPU, (c) genaue interaktive Bildpunktmessungen von Maßstäben und Passpunkten (nur in Professional Version), (d) Bildorientierung und Kamerakalibrierung durch Bündelblockausgleichung inklusive optionaler Korrektur um den Rolling-Shutter-Effekt, (e) Modellierung der inneren Orientierung der Kamera(s) durch verschiedene Parameter (Bildhauptpunkt, Kamerakonstante, sieben radial-symmetrische und tangentielle Verzeichnungsparameter, Affinität und Scherung zwischen x- und y-Achse) sowie (f) verschiedene Exportmöglichkeiten der Ergebnisse. Als Nachteile ergeben sich vor allem begrenzte Eingriffsmöglichkeiten durch den Nutzer. Die Ausgaben und Dokumentationen der Ergebnisse sind beschränkt und nur begrenzt aussagekräftig.

5 Datenaufnahme und Aerotriangulation

Während die Buhne bereits seit 2015 nach Installation des geodätischen Monitoringsystems regelmäßig bei Niedrigwasser durch terrestrisches Laserscanning erfasst wird, erfolgte eine Befliegung durch das low-cost UAV-System DJI Phantom 3 erst an drei verschiedenen Tagen im November 2017, im Februar und Juli 2018. Der entsprechende Abschnitt des Brodterner Steilufers wurde am 21. Juni 2016 und am 10. Dezember 2018 in einem zeitlichen Abstand von 17 Monaten befliegen. Die DJI Phantom 3 wurde während der jeweiligen Bildflüge über die Buhne und über das Steilufer manuell gesteuert, wobei jeweils Senkrecht- und Schrägaufnahmen gemacht wurden. Die technischen Daten der verschiedenen Luftbildverbände mit dem Flugdatum, der Flugdauer, Anzahl Fotos, durchschnittliche Flughöhe und Fluggeschwindigkeit, Pixelgröße am Boden sowie Anzahl Passpunkte sind in Tab. 3 zusammengefasst. Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit wurde aus dem zurückgelegten Weg, der aus den räumlichen Positionen der Fotos berechnet wurde, und der Flugdauer abgeschätzt.

Tab. 3: Technische Daten der Luftbildverbände

Objekt	Flugdatum	FD [min]	# F	Ø FH [m]	Ø V [m/s]	Pixelgröße [mm]	# PP
Buhne	09.11.17	13	157	16,6	1,4	6,3	22
Buhne	06.02.18	24	185	19,3	0,8	7,5	31
Buhne	27.07.18	15	165	18,4	1,3	6,9	25
Steilküste	21.06.16	15	170	20,1	0,8	10,7	15
Steilküste	10.12.18	26	186	29,1	1,3	6,8	12

FD: Flugdauer, F: Fotos, FH: Flughöhe, V: Fluggeschwindigkeit, PP: Passpunkte

Die Passpunkte wurden gut verteilt im Objektraum signalisiert und anschließend mit geodätischen Messverfahren bestimmt. Während die Passpunkte auf der Bühne jeweils durch eine Leica Totalstation in einem lokal angelegten geodätischen Netz mit einer Standardabweichung von 2 cm bestimmt wurden, wurden die Koordinaten der Passpunkte oberhalb und unterhalb des Steilufers im UTM-Koordinatensystem durch eine Leica Totalstation (im Jahr 2016) und durch RTK-GNSS Trimble R8s und den Korrekturdatendienst Trimble VRS Now (im Jahr 2018) mit einer Standardabweichung von 1 cm ermittelt. Gerade bei der Signalisierung und bei den Messungen der Bühnen-Passpunkte besteht ein erheblicher Zeitdruck, da nach dem Zeitpunkt des Niedrigwassers das auflaufende Wasser sehr schnell wieder zurückkommt.

Die Bestimmung der Bildorientierungen und die Kamerakalibrierung erfolgten im Rahmen einer Bündelblockausgleichung mit der Software Agisoft PhotoScan (Version 1.4.4). Die eingelesenen Bilddaten wurden automatisch durch Bildpunktmessungen miteinander verknüpft. Durch manuelle Messungen der signalisierten Passpunkte in den jeweiligen Bildern wurde der Bezug zum geodätischen Koordinatensystem hergestellt. Die Kamerapositionen und die Bildüberlappung für den Bildflug über die Bühne im Juli 2018 (links) und über das Brodtener Steilufer im Dezember 2018 (rechts) sind beispielhaft in Abb. 3 dargestellt. Bei den Bildflügen konnte für die Untersuchungsgebiete eine sehr hohe Überlappung von mehr als neun Fotos erreicht werden.

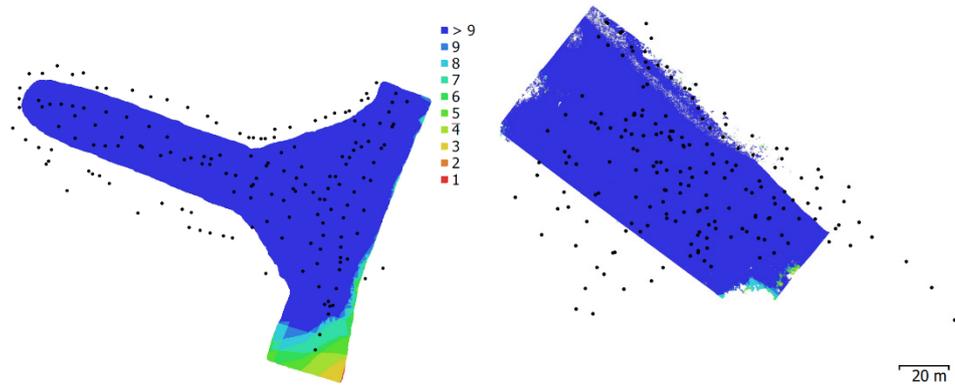


Abb. 3: Kamerapositionen (schwarze Punkte) und Bildüberlappung für den Bildflug über die Bühne im Juli 2018 (links) und über das Brodtener Steilufer im Dezember 2018 (rechts)

In Tab. 4 sind die Ergebnisse der Aerotriangulationen ohne und mit Kompensation des Rolling-Shutter-Effektes zusammengestellt. Trotz der geringen Fluggeschwindigkeit von ca. 1 m/s (siehe Tab. 3) bewirkt die Kompensation des Rolling-Shutter-Effektes bei den Aerotriangulationen der Bildflüge über die Bühne im November 2017 und besonders im Juli 2018 signifikante Verbesserungen bei den gemittelten Abweichungen an den Passpunkten (Absolutwerte). Allerdings hat die Kompensation beim UAV-Bildflug vom Februar 2018 für die Bühne eine leichte Verschlechterung der Ergebnisse gebracht. Nach jeweiliger Kompensation des Rolling-Shutter-Effektes lagen die gemittelten Abweichungen an den Passpunkten bei allen Bildflügen bei kleiner als 1 cm, welches für diese Objekte ein sehr gutes Ergebnis darstellt. Die höheren Abweichungen für die Bühne in dem Bildflug vom Juli 2018 sind vermutlich auf eine schlechte Signalisierung der Passpunkte und deren geodätische Messungen

zurückzuführen. Der Projection Error (in den letzten beiden Spalten in Tab. 4) ist ein Kriterium für die Güte der automatischen Bildpunktmessungen. Für diese Aerotriangulationen liegt der Projection Error bei 1/4 bis 1/10 Pixel mit Maximalwerten unter einem Pixel (Ausnahme RS-Kompensation für die Bildflüge 2016 und 2018).

Tab. 4: Ergebnisse der Aerotriangulationen ohne und mit Kompensation des Rolling-Shutter-Effektes

Objekt (RS = Rolling Shutter)	Flugdatum	# F	# PP	$ s_x $ [mm]	$ s_y $ [mm]	$ s_z $ [mm]	$s_x \cdot y'$ [pix]	RMS PE [pix]	Max PE [pix]
Buhne	09.11.17	157	22	13.6	13.6	9.1	1.24	0.16	0.55
Buhne RS	09.11.17	157	22	4.7	5.3	2.8	0.56	0.13	0.69
Buhne	06.02.18	185	31	5.0	6.0	3.9	0.95	0.14	0.51
Buhne RS	06.02.18	185	31	7.4	5.3	5.5	0.73	0.13	0.95
Buhne	27.07.18	165	25	31.7	19.2	38.4	4.45	0.15	0.50
Buhne RS	27.07.18	165	25	6.8	7.1	13.8	0.77	0.10	2.35
Steilküste	21.06.16	170	15	6.4	6.9	7.8	1.06	0.25	0.85
Steilküste RS	21.06.16	170	15	4.2	4.3	3.5	0.40	0.18	1.21
Steilküste	10.12.18	186	12	5.4	8.4	7.4	1.12	0.20	0.71
Steilküste RS	10.12.18	186	12	3.2	8.1	8.4	0.60	0.17	1.00

F: Fotos, PP: Passpunkte, $|s_{xyz}|$: Mittel absolute Abweichungen PP, PE: Projection Error

6 Die Erstellung der Oberflächenmodelle

Nach den Berechnungen der Bildorientierungen und der Kamerakalibrierung wurde mit PhotoScan jeweils eine dichte Punktwolke mit folgenden Parametern berechnet: Qualität *medium* (entspricht einer Bildreduktion um den Faktor 4) und Filterung *aggressive* zur Eliminierung grober Fehler. Anschließend wurden die generierten Punktwolken manuell bereinigt und das interessierte Untersuchungsgebiet segmentiert. Für die reduzierte Punktwolke wurden in PhotoScan jeweils eine Dreiecksvermaschung in höchster Auflösung und anschließend eine Texturierung berechnet. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die erstellten 3D-Modelle der Buhne und des Steilufers.



Abb. 4: Vermaschtes (links) und texturiertes 3D-Modell (Mitte) der Buhne, generiert in Agisoft PhotoScan sowie farbkodierte Darstellung des Oberflächenmodells (rechts) (UAV-Bildflug 27.07.2018)

Die texturierten 3D-Modelle der Bühnen der drei Epochen haben zwischen 1,3 und 1,85 Millionen Dreiecke, die aus den Punktwolken mit 6 bis 9,5 Millionen Punkten erstellt wurden. Die Zeiten für die verschiedenen Arbeitsschritte zur Erstellung der texturierten 3D-Modelle sind in Tab. 5 zusammengestellt, wobei es sich um Rechenzeiten in Agisoft handelt, während die manuellen Arbeiten *Passpunktmessungen*, *Bereinigung* und *3D-Vergleich* geschätzte Zeiten darstellen. Die Arbeiten mit PhotoScan und Geomagic wurden auf einem Notebook MSI GE63VR durchgeführt, das folgende technische Daten aufweist: Prozessor Intel® Core™ i7-7700HQ CPU@ 2,8 GHz, 16 GB interner Arbeitsspeicher, 64-bit-Betriebssystem und Graphikkarte NVIDIA Geforce GTX1070.

Tab. 5: Zeiten für die Arbeitsschritte zur Erstellung von texturierten 3D-Modellen [min]

Objekt (2018)	Import	PPM	O & K	DPW	Berein	Drei-V	Tex	3DV	Total
Bühne	2	80	5	16,0	20	5	5	20	153,0
Steilküste	2	60	42	7,5	15	2	3	20	151,5

PPM: Passpunktmessungen, O & K: Bildorientierung & Kamerakalibrierung, DPW: Dichte Punktwolke, Berein: Manuelle Bereinigung der DPW, Drei-V: Dreiecksvermaschung, Tex: Texturierung, 3DV: 3D-Vergleich

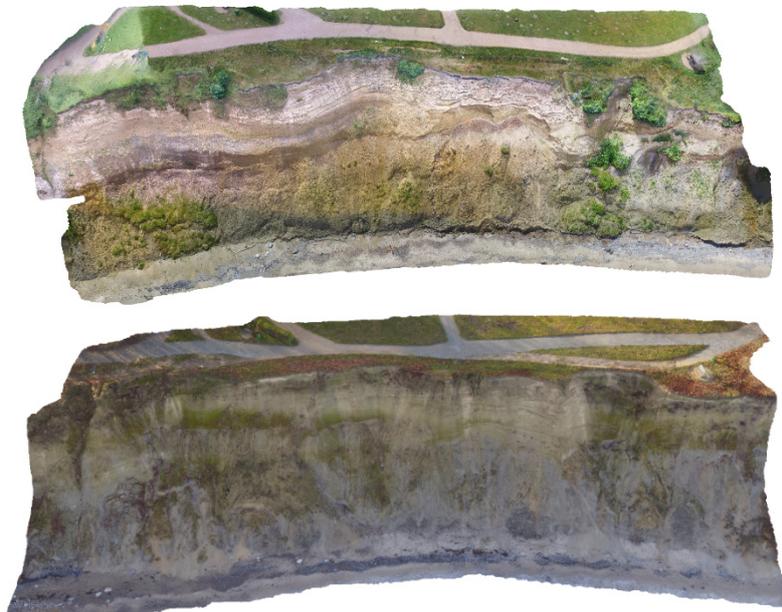


Abb. 5: 3D-Modelle des Steilufers von 2016 (oben) und 2018 (unten) mit sichtbaren Veränderungen in der Wegführung (rechts) und in der Vegetation.

7 Monitoring durch 3D-Vergleiche

Die in PhotoScan erstellten 3D-Modelle der verschiedenen Epochen wurden anschließend für die Dokumentation der Veränderungen durch 3D-Vergleiche in Geomagic Wrap (Buhne) und Geomagic Control (Steilküste) verwendet. Abb. 6 zeigt geringe Veränderungen an der Buhne nach der erneuten Ertüchtigung im November 2017 im Vergleich zu den Folgeepochen im Februar und Juli 2018, wobei die Farbe Grün vernachlässigbare Veränderungen im Bereich von ± 5 cm darstellt. Hellblau bedeutet hier einen Abtrag von mehr als 5 cm und Gelb stellt einen leichten Auftrag dar. Als Referenz wurde für die Berechnung jeweils die Epoche vom 09.11.2017 genommen. Es ist in Abb. 6 sichtbar, dass an der Bühnenkrone bereits leichte Abträge (hellblau) in dem Zeitraum von knapp neun Monaten angefangen haben, die überwiegend an der Westseite der Buhne (Blickrichtung Cuxhaven) aufgefangen wurden (gelb).

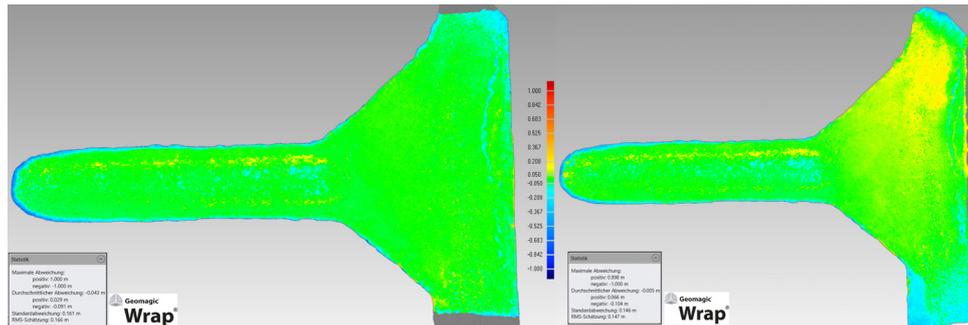


Abb. 6: 3D-Vergleich für die Buhne – Epoche 09.11.17 (Referenz) im Vergleich zu Epoche 06.02.18 (links) und Epoche 27.07.18 (rechts), Abweichungen: Grün ± 5 cm

Um die Qualität der UAV-Daten zu evaluieren, wurde auch ein 3D-Vergleich zwischen dem 3D-Modell aus terrestrischem Laserscanning und vom UAV-Bildflug gerechnet. Die Buhne wurde dafür am selben Tag (09.11.17) auch durch den terrestrischen Laserscanner IMAGER 5010 erfasst. Das 3D-Modell, welches aus der Punktwolke des Laserscanners generiert wurde, ist in Abb. 7 (oben) dargestellt, während der 3D-Vergleich zwischen TLS und UAV in Abb. 7 (unten) visualisiert ist. Die Abweichungen zwischen TLS und UAV sind hier auch im Bereich von ± 5 cm, so dass die Ergebnisse aus UAV-Bilddaten den Anforderungen des Bühnenmonitorings entsprechen und mit den TLS-Daten vergleichbar sind. Die einzelnen Scannerstandpunkte sind in der Abb. 7 (unten) noch zu erkennen.

Da für die Steilküste in Brodten schon seit 2004 ein Monitoring durch terrestrisches Laserscanning (TLS) durchgeführt wird, liegen bereits Ergebnisse aus vorherigen Untersuchungen vor (Qualmann 2010; Kersten & Lindstaedt 2017). Der 3D-Vergleich in Abb. 8 zeigt den massiven Abtrag im Bereich von 5 m bis 15 m für den untersuchten Abschnitt im Zeitraum von 2004 (Referenz durch TLS) und dem UAV-Bildflug am 10.12.2018. Durch dieses Ergebnis werden die Resultate der vorherigen Untersuchungen bestätigt, d.h. pro Jahr verliert die Steilküste ca. 1 m Uferböschung. In Abb. 9 sind die Veränderungen am Steilufer durch die virtuellen Kantenverlauf (Profile) auf 18 m und 1,5 m Höhe von 2004 bis 2018 farbig visualisiert. Die Umlegung des Weges lässt sich in dieser Abbildung auch recht gut erkennen.

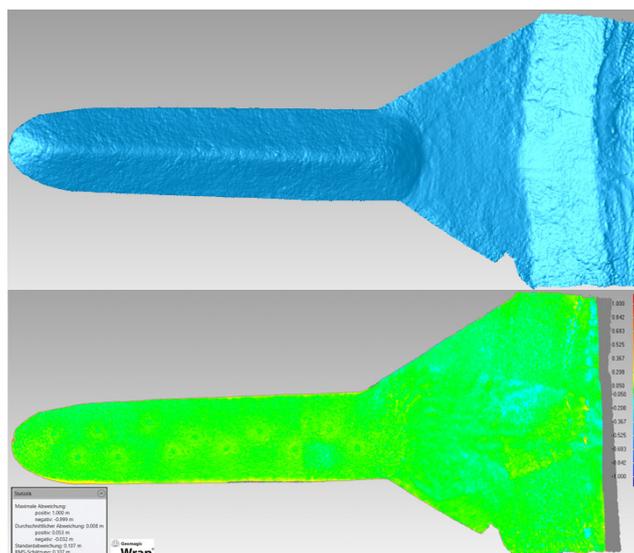


Abb. 7: 3D-Modell der Bühne (oben) aus Daten vom terrestrischen Laserscanning (TLS) und 3D-Vergleich zwischen der Referenz TLS und dem 3D-Modell vom UAV-Bildflug für die Epoche 09.11.17 (unten), Abweichungen: Grün ± 5 cm

Der Zeitbedarf für die Erfassung der Steilküste durch terrestrisches Laserscanning (inkl. Passpunktsignalisierung und Einmessung durch Tachymetrie) mit bis zu zehn Studierenden und zwei Scannern lag bei gut fünf Stunden, während der UAV-Bildflug lediglich 25 Minuten in Anspruch nahm. Zusammen mit der Passpunktmessung durch das RTK-GNSS Trimble R8s benötigt ein Zwei-Mann-Team nur 2,5 Stunden vor Ort. Dauert die Auswertung der Laserscan-Daten (Registrierung und Georeferenzierung der Scans, Filterung, Vermaschung, 3D-Vergleich) einen Arbeitstag (geschätzt), so liegen die Resultate des UAV-Bildfluges bereits nach einem halben Arbeitstag vor, wenn ein leistungsstarker Rechner zur Verfügung steht.

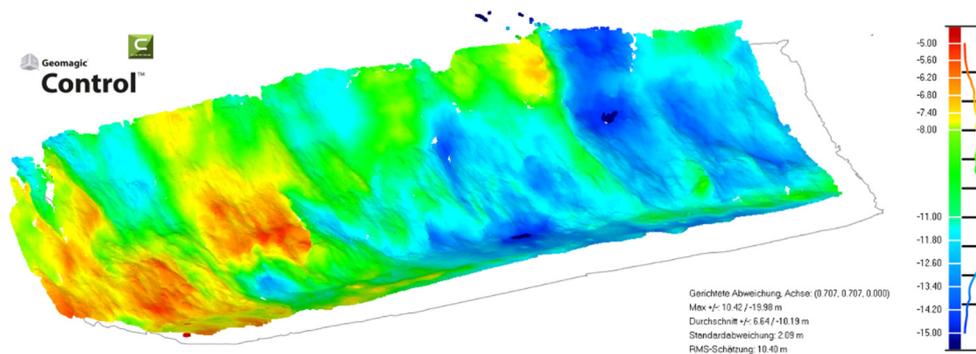


Abb. 8: 3D-Vergleich der Datensätze vom terrestrischen Laserscanning aus dem Jahr 2004 (Referenz) und dem UAV-Bildflug vom 10.12.2018, Abtrag von 5 m bis 15 m dargestellt

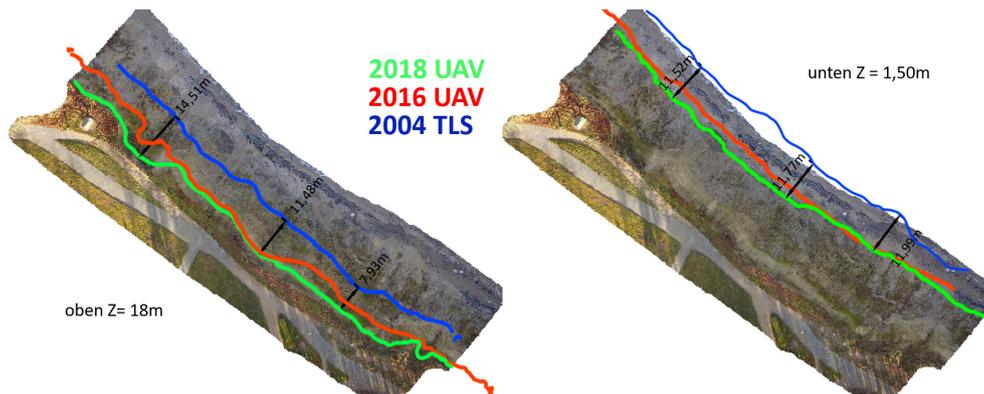


Abb. 9: Veränderungen des Brodtener Steilufers von 2004 bis 2018 – Profile auf der Höhe 18 m (links) und auf der Höhe 1,5 m (rechts)

8 Fazit & Ausblick

Bildflüge mit low-cost UAV-Systemen sind sehr geeignet für das Monitoring von Küstenbereichen und -objekten, da sie einerseits eine hohe Auflösung der Daten garantieren, aber andererseits keine sehr hohen Anforderungen an die Genauigkeit gestellt werden. Für die beiden in diesem Beitrag vorgestellten Beispiele aus der Praxis wurde gezeigt, dass durch automatisierte bildbasierte Erstellung von Punktwolken und Oberflächenmodellen eine Steigerung der Geschwindigkeit bei der Projektbearbeitung um den Faktor 2 abgeschätzt wurde. Die erreichbaren Genauigkeiten für die Produkte (Oberflächenmodelle) aus den UAV-Bildflügen entsprechen dem des terrestrischen Laserscannings, allerdings wird durch die optimale Aufnahmegeometrie mit den UAV-Bildflügen eine bessere Abdeckung des zu untersuchenden Gebietes erzielt. Die Auswirkungen des Rolling Shutters bei CMOS-Kameras können in der Bündelblockausgleichung kompensiert werden, so dass meistens eine signifikante Genauigkeitssteigerung erreicht wird.

Ein Vergleich der Systemkosten fällt zu Gunsten des low-cost UAV-Systems aus, da Rechner, Software und UAV mit ca. EUR 8000 im Vergleich zu ca. EUR 50000 für die Anschaffung eines terrestrischen Laserscanners signifikant preiswerter sind. Somit sind UAV-Systeme im Gegensatz zu terrestrischen Laserscannern flexibler, schneller und günstiger für Anwendungen im kleinflächigen Küstenmonitoring. Zukünftig wird eine deutliche Reduktion der Passpunkte durch RTK-GNSS direkt auf UAV-Systemen möglich sein, wodurch die Zeit für die Datenerfassung im Feld nochmals reduziert werden kann. Das Monitoring der Buhne hat gezeigt, dass die erneute Ertüchtigung der Buhne momentan eine hohe Stabilität gewährleistet und dass die Steilküste durch die Herbststürme stark beschädigt wird und jedes Jahr signifikant an Masse verliert.

Dank

Die Autoren bedanken sich beim Bundesamt für Wasserbau Hamburg und beim Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg für die sehr gute Unterstützung im Rahmen des gemeinsamen Gesamtprojektes „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung von Deckschichten von Strombauwerken an Seeschifffahrtsstraßen“ an der Buhne bei Juelssand.

Literatur

- Alexander, D. (1993): *Natural Disasters*. (UCL Press) London.
- Barlow, J., Gilham, J., & Ibarra Cofrã, I. (2017): Kinematic Analysis of Sea Cliff Stability using UAV Photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8-10), S. 2464-2479.
- Dewez, T. J. B., Leroux, J., & Morelli, S. (2016): Cliff Collapse Hazard from Repeated Multicopter UAV Acquisitions: Return on Experience. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- Dirks, H. (2018): UAV für eine effiziente Vermessung im Insel- und Küstenschutz. *UAV 2018 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*, Schriftenreihe des DVW, Band 89, Beiträge zum 169. DVW-Seminar am 19. und 20. Februar 2018 in Hamburg, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 117-122.
- Esposito, G., Salvini, R., Matano, F., Sacchi, M., Danzi, M., Somma, R., & Troise, C. (2017): Multitemporal Monitoring of a Coastal Landslide Through SfM-derived Point Cloud Comparison. *The Photogrammetric Record*, 32(160), S. 459-479.
- Irvine, M., Roberts, G. & Oldham, L. (2018): *Current Research (2018) Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources Geological Survey*, Report 18-1, S. 15-30.
- Kersten, Th. & Lindstaedt, M., (2017): Photogrammetrie auf Knopfdruck - Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 142. Jhrg., Heft 1, S. 3-13.
- Kuhn, D. & Prüfer, S. (2014): Coastal Cliff Monitoring and Analysis of Mass Wasting Processes with the Application of Terrestrial Laser Scanning: A Case Study of Rügen, Germany. *Geomorphology*, 213, S. 153-165.
- Lim, M., Petley, D. N., Rosser, N. J., Allison, R. J., Long, A. J. & Pybus, D. (2005): Combined Digital Photogrammetry and Time-of-flight Laser Scanning for Monitoring Cliff Evolution. *The Photogrammetric Record*, 20(110), S. 109-129.
- Luhmann, T. (2018): *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Beispiele*. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann, VDE Verlag GmbH Berlin Offenbach, 783 S.
- Pix4D (2016): *Innovation - Improved Accuracy for Rolling Shutter Cameras in Pix4Dmapper*. <https://pix4d.com/rolling-shutter-correction>, letzter Zugriff 27.12.2018.
- Qualmann, D. (2010): *Untersuchungen der Hangrutschungen am Brodtener Steilufer mittels verschiedener Laserscanverfahren*. Unveröffentlichte Masterarbeit im Studiengang Geomatik an der HafenCity Universität Hamburg.
- Rofallski, R. & Luhmann, T. (2017): *Untersuchung und Modellierung des Rolling-Shutter-Effekts für photogrammetrische Einzel- und Mehrbildauswertungen*. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017*, Th.

- Luhmann/Ch. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 388-398.
- Tiepolt, L. (2016): Mobiles Laserscanning und Einsatz von Drohnen zur Aufnahme von Küstengebieten und Küstenschutzbauwerken. *Die Küste*, 84, (84), S. 147-192. https://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/105216/1/k084108_a.pdf.
- Traut, K., (2017): UAV Monitoring of Coastal Erosion. *Geomatics World*, 25(5), S. 19-20.
- Tschirschwitz, F., Mechelke, K., Jansch, H., Uliczka, K. & Kersten, Th., (2016): Ein automatisches Monitoringsystem für Buhnen an der Elbe durch terrestrisches Laserscanning. *zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 141(5), S. 297-305.
- Vautherin, J., Rutishauser, S., Schneider-Zapp, K., Choi, H. F., Chovancova, V., Glass, A. & Strecha, C. (2016): Photogrammetric Accuracy and Modeling of Rolling Shutter Cameras. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 3(3), S. 139-146.

Kersten, Thomas; Lindstaedt, Maren; Mechelke, Klaus; Tschirschwitz, Felix
HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning,
Email-Adressen: [Thomas.Kersten, Maren.Lindstaedt, Klaus.Mechelke]@hcu-hamburg.de,
Felix.Tschirschwitz@web.de