

UAS unterstützte Vegetationserfassung tidebeeinflusster Makrophytenbestände in der Unterelbe

GÖRRES GRENZDÖRFFER¹ & UWE SCHRÖDER²

Zusammenfassung: Die langfristige und objektive Überwachung und Vermessung schwer zugänglicher Gebiete, wie die Elbauen mit hohen Röhrichten und tidenbeeinflussten offenen Wattflächen sind ein ideales Einsatzszenario für UAS. Gleichwohl stellen gerade solche Areale in praktischen Projekten besondere Herausforderungen im Hinblick auf die Bildflugplanung und Realisierung dar. Der Beitrag geht auf die größten Herausforderungen bei der Bildflugplanung und Realisierung ein. Anschließend wird die Leistung verschiedener Softwareprodukte im Hinblick auf Genauigkeit und Vollständigkeit bei der Ableitung von photogrammetrischen Standardprodukten (Punktwolke und „True Orthophoto“) verglichen. Das hohe geometrische Genauigkeitspotential ermöglicht es, selbst geringe Veränderungen der Wattflächen von wenigen Zentimetern über einen Zeitraum von ca. zwei Jahren zu beschreiben. Die in diesem Zeitraum zu beobachteten saisonalen Veränderungen auf den Wattflächen betragen bis zu ± 20 cm, gleichen sich aber oftmals wieder aus.

1 Einleitung

Im Zuge der geplanten Fahrrinnenanpassung der Tideelbe und in Ergänzung der WRRL-Monitoringsaktivitäten sollen an mehreren Standorten der Unterelbe Makrophyten jährlich bis 12 Jahre nach Ausbau untersucht werden, WSD-NORD 2012. In diesem Zusammenhang sollen Luftbilddaufnahmen von unbemannten Luftfahrtsystemen (UAS) für eine lagegenaue flächenhafte Erfassung der Bestände verwendet werden. Die UAS-Befliegungen sollen zudem im Zusammenhang mit der Vermessung der Topographie zur Ableitung von Erosions- und Sedimentationstendenzen flächenhafte Informationen dienen. Eine zentrale Fragestellung im Zusammenhang einer etwaigen Fahrrinnenvertiefung und sonstigen Veränderungen am Flussverlauf sowie dem Wasser- und Strömungsregime der Elbe ist die Veränderung der Wattflächen und der Küstenlinie, bzw. der Grenze zwischen Vegetation und Watt. Vor diesem Hintergrund hat die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ein Forschungsprojekt initiiert, das diesen Fragen nachgehen soll. Darüber hinaus sollen die Möglichkeiten zur Analyse von 3D-Punktwolken in Kombination mit digitalen Farbluftbildern und daraus abgeleiteten Indizes zur Differenzierung von Biomasse, Bestandsdichte und Vegetationstypen untersucht werden. Aus der Lage der zu untersuchenden Gebiete (Abb. 1) wird ersichtlich, dass drei Standorte auf der schleswig-holsteinischen Seite der Elbe liegen und einer auf der niedersächsischen.

¹ Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik, J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock, E-Mail: goerres.grenzdoerffer@uni-rostock.de

² Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referat U3 – Vegetationskunde, Landschaftspflege, Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz, E-Mail: uwe.schroeder@bafg.de



Abb. 1: Lage der Standorte

Zudem verteilen sich über eine Fließstrecke von über 30 km. Das bedeutet, dass bei einem Tidezyklus nicht alle Gebiete auf einmal bei Niedrigwasser abgeflogen werden können. Zudem sind Aufstiegs Erlaubnisse für Niedersachsen und Schleswig-Holstein notwendig. Die vier Standorte liegen außerhalb des Luftraums D der Hamburger Flughäfen, so dass grundsätzlich immer geflogen werden kann und keine Abstimmung mit der Deutschen Flugsicherung notwendig ist.

2 Problemstellung

Im Zeitraum vom Herbst 2014 bis Sommer 2016 wurden insgesamt 4 UAS-Flugkampagnen durchgeführt und dabei die genannten Standorte mit einer Fläche von jeweils ca. 2 - 4 ha. mehrmals mit einer Längs- und Querüberlappung von 80/60 % überflogen. Als Fluggerät wurde ein Falcon 8 der Firma Intel eingesetzt. Während für die Befliegungen 2014 und 2015 ein Falcon 8 mit einer Sony Nex5 (12 MPix) zum Einsatz kam, konnte im Jahr 2016 der Nachfolger Falcon 8 Trinity mit einer Sony Alpha 7R Kamera mit 36 MPix verwendet werden. Demzufolge konnten die Befliegungen 2016 mit einer höheren Bodenauflösung von 1,1 cm / Pixel (2015: 1,7 cm) und auch bei höheren Windgeschwindigkeiten realisiert werden. Dies führt insgesamt zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse und einer Erweiterung möglicher Flugfenster. Im Zusammenhang mit den UAS-Befliegungen waren mehrere technische und organisatorische Herausforderungen und Fragestellungen zu meistern, z.B.:

Zeitlich enge Befliegungsfenster. Die Befliegungen der Makrophytenstandorte können nur bei Niedrigwasser und geeigneten Licht- und Witterungsverhältnissen durchgeführt werden, d.h. ab etwa 2 Stunden vor Niedrigwasser. Während die Zeitfenster für UAS-Befliegungen gegenüber klassischen Luftbildbefliegungen generell wesentlich größer sind, da auch unter Wolken geflogen

werden kann, bzw. kurze sonnige Abschnitte ausgenutzt werden können, stellt der Wind in Küstennähe in Kombination mit der Tide ein nicht zu unterschätzendes Problem dar. Aus diesen Gründen mussten die Befliegungen teilweise um mehrere Wochen verschoben werden, bis sich ein entsprechendes Zeitfenster aufgetan hat, in dem sowohl Tide als auch Wind und Wetter eine Befliegung sicher zulassen.

Verhinderung von Überstrahlungen. Bei Befliegungen der nassen Wattflächen um die Mittagszeit, bzw. höher stehender Sonne, kann es zu spiegelnden Reflexionen und einem so genannten Hot Spot kommen. Dieser Effekt tritt dann ein, wenn der Sensor die Sonnenspur kreuzt und der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist. Eine wirksame Strategie ist demzufolge nur, in den Morgen- oder Abendstunden zu fliegen. Das wurde aber verworfen, da dadurch die möglichen Zeitfenster noch mehr eingeschränkt würden.

Messung von Passpunkten. Die Genauigkeit des Bildverbands steht und fällt mit der Entwicklung von transportablen Passpunkten, bzw. kodierten Messmarken, die auch bei Tide und hoher Vegetation verwendet werden können. Die ursprüngliche Idee permanenter Passpunkte ließ sich unter praktischen Gesichtspunkten nicht realisieren, da im Tidenbereich kontinuierlich große Kräfte wirken, und eine entsprechende konstruktive Lösung sehr aufwändig, bzw. u.U. auch genehmigungspflichtig wäre. Aufgrund der Tatsache, dass schwarze Messmarken auf einem weißen Hintergrund unter ungünstiger, d.h. heller Belichtung immer kleiner werden (GRENZDÖRFFER 2011), haben die als signalisierte Passpunkte verwendeten Aluminiumscheiben mit einem Durchmesser von 20 cm ein helles Zentrum und einen schwarzen Rand. Im Einzelnen wurden drei verschiedene Arten von Passpunkten verwendet. Im Röhricht wurden Passpunkte auf 1 bzw. 2 m hohe Vermessungsstäbe montiert. Auf Wegen, Sand oder sonstigen Flächen mit kurzer Vegetation wurden die Messmarken direkt auf den Boden gelegt. Auf den teilweise nassen und wellenbeeinflussten Wattflächen wiederum wurden umgedrehte Eimer verwendet, die nicht einsinken oder durch Sand überspült werden können.

Folgende Qualitätsfragen der photogrammetrischen Prozesskette und der abgeleiteten Produkte sind untersucht worden, auf die nachfolgend detailliert eingegangen wird:

- Wie genau sind die 3D-Punktwolken und wie zuverlässig kann die Vegetationshöhe und die Topographie zur Berechnung von Erosion und Sedimentation abgebildet werden?
- Welchen Einfluss hat die Auswertesoftware (Vergleich von Agisoft Photoscan, Pix4D und Trimble UAS-Master) auf die Ergebnisse?
- Lassen sich mit Hilfe von Vegetationsindices aus RGB-Aufnahmen Aussagen über die Vegetationstypen machen, bzw. die visuelle Interpretation unterstützen bzw. erleichtern?
- Ist die Qualität der erzeugten „True“ Orthophotos für eine Vegetationskartierung ausreichend, bzw. welche Stellschrauben bei der Erzeugung von True Orthophotos sind von Bedeutung?

Durch den multitemporalen Ansatz können verschiedene Prozesse erfasst und begleitet werden. Beispielsweise die Entwicklung der Vegetation, die sich zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedlich gut differenzieren lässt. Aufbauend auf der Frühjahrsaufnahme lassen sich darüber hinaus auch Vegetationshöhen ungefähr ableiten. Problematisch in diesem Zusammenhang geschlossene Schilfbestände, die auch im Winter einen dicht geschlossenen Röhrichtgürtel bilden können.

2.1 Photogrammetrische Prozessierung und Datenqualität

Die photogrammetrische Datenauswertung der UAS-Bildflüge erfolgte mit der Software Photoscan Professional der Firma Agisoft. Inhaltliche Auswertungen, Volumenberechnungen etc. erfolgten mit der Software ArcGIS 10.2.

Die Software Photoscan Professional liefert in einer sehr benutzerfreundlichen Art die automatische Bildorientierung für hochgradig überlappende Bildsequenzen einschließlich der Kamerakalibrierung und 3D-Punktwolken sowie abgeleitete Produkte z.B. ein digitales Oberflächenmodell, Orthophotos und Vegetationsindices. Verschiedene Vergleichsstudien zur Genauigkeit unterschiedlicher Softwareprodukte, sind in den letzten Jahren durchgeführt worden (MOUTINHO 2015). Dabei wurde festgestellt, dass kommerzielle Produkte durchwegs sehr gute, d.h. genaue und zuverlässige Ergebnisse geliefert haben. Allerdings beziehen sich diese Aussagen in erster Linie auf Genauigkeiten (Residuen) an Pass- oder Kontrollpunkten.

Grundsätzlich können die an den Passpunkten erzielten Genauigkeiten nicht auf alle 3D-Punkte übertragen werden. Das hat mehrere Ursachen. Z.B. ist auf Wasseroberflächen und anderen bewegten Oberflächen, z.B. durch Wind bewegte Bäume kein Matching möglich. Ähnliche Probleme ergeben sich auf sehr homogenen Flächen, bzw. Flächen mit gleichförmigen Strukturen, bei denen identische Punkte anhand fehlender Merkmale nicht identifiziert werden können bzw. fehlerhaft verknüpft werden. Das betrifft im vorliegenden Fall einige Wattbereiche, interessanterweise auch nahezu unabhängig von der verwendeten Software. Abb. 2 zeigt beispielhaft die ungleiche Verteilung der Verknüpfungspunkte (Keypoints) auf einem Bild. Abb. 3 zeigt die dichte 3D-Punktwolke der Wattfläche mit den fehlerhaften Bildzuordnungen (Rauschen), welche durch die strukturlosen Bildinhalte verursacht wurden.



Abb. 2: Ungleiche Verteilung der Keypoints in einem Bild (Bildflug Bielenberg, 9.6.2015)



Abb. 3: 3D-Punktwolke mit fehlerhaften Bildzuordnungen im Watt

Ebenfalls problematisch sind durch „Hot Spots“, Glitter oder Glare überstrahlte Flächen, bei denen ein Matching dieses Bilds zu seinen Nachbarn ebenfalls versagt. Das ist auf den Wattflächen allerdings nicht so problematisch, da durch die hohe Redundanz im Allgemeinen genügend Bilder zur Ermittlung einer akkuraten 3D Position zur Verfügung stehen. Zwischen belaubten Bäumen ist teilweise der Waldboden zu erkennen. Die ermittelten 3D-Koordinaten dieser Bereiche sind

aufgrund ungünstiger Schnittbedingungen gleichwohl mit besonderer Vorsicht zu genießen. Auf allen anderen Oberflächen lassen sich 3D-Koordinaten mit hoher Genauigkeit (< 5 cm) erfassen. Umfangreiche Tests in der Vergangenheit, z.B. HAALA (2014), haben das große Potential von Dense Matching Algorithmen anhand von digitalen flugzeuggestützten Luftbilddaten eingehend untersucht. Dabei hat sich gezeigt, dass gerade bei der Vegetation verschiedene Softwareprodukte zu unterschiedlichen Ergebnissen gekommen sind. Für höher aufgelöste UAS-Aufnahmen ist ähnliches zu beobachten (GRENZDÖRFFER 2014).

Aus diesem Grund wurde der 3. UAS-Flug im Testgebiet Hollerwettern vom 9.6.2015 mit drei verschiedenen Softwareprodukten ausgewertet, um vor allem die dabei abgeleiteten Punktwolken besser vergleichen zu können. In dem Softwarevergleich wurden Agisoft PhotoScan Professional (Version 1.2), Pix4Dmapper Pro (Version 2.3) und Trimble UASMaster einbezogen. Der Bildflug Hollerwettern am 9.6.2015 mit insgesamt 115 Aufnahmen bietet in dreierlei Hinsicht Herausforderungen für das Matching und Mosaicing:

1. Volle Vegetationsbedeckung und etwas Wind
2. Auf den Wattflächen Hot Spot Effekte am Bildrand
3. Teilweise sehr homogene Strukturen auf den Wattflächen

Die Bilder konnten mit allen drei Programmen problemlos ausgewertet werden. Die Residuen an den Passpunkten sind minimal und vergleichbar, wie Tab. 1 zeigt.

Tab. 1: Vergleich der Residuen an 12 Passpunkten für das Projekt Hollerwettern vom 9.6.2015

RMS Fehler [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	Total [m]
Agisoft Photoscan	0.0072	0.0053	0.0033	0.0095
Pix4D	0.0066	0.0059	0.0073	0.0115
Trimble UAS-Master	0.0035	0.0024	0.0132	0.0139

Anzumerken ist, dass die Residuen im Allgemeinen zu optimistische Daten liefern, und somit nur eine eingeschränkte Aussagekraft haben. Deshalb wurden die 4 Passpunkte im inneren des Bildverbands als Kontrollpunkte definiert. Im Ergebnis liegen die RMS Werte bei allen Produkten im ähnlichen Bereich (x) 0.017 m, (y) 0.002 m und (z) 0.024 m (Pix4D), (x) 0.011 m, (y) 0.001 m und (z) 0.005 m (Photoscan), sowie (x) 0.014 m, (y) 0.015 m und (z) 0.037 m (UAS Master). Dies entspricht den Erwartungen, da die tatsächlich erzielbaren Genauigkeiten üblicherweise bei dem 0,5 - 2 fachen der Bodenauflösung (GSD) liegen.

Die Punktwolken unterscheiden sich im Hinblick auf ihre Dichte und Vollständigkeit jedoch deutlich, wie der nachfolgende graphische Vergleich (Abb. 5 - 5) zeigt. Die größten Unterschiede sind in der hohen Vegetation (Bäume) und im Watt zu beobachten, d.h. genau an den Stellen an denen die Matching Algorithmen oftmals Schwierigkeiten haben. Dabei ist die Frage, welche Software nun besser ist, so einfach nicht zu beantworten. Das hängt auch damit zusammen, dass die (Standard) Parameter zur Erstellung der Punktwolken bei den verschiedenen Softwareprogrammen durchaus unterschiedlich sind. So wurden beispielsweise bei Pix4DMapper alle 2-fach verknüpften Punkte gewählt, um auch bei den Bäumen 3D-Punkte zu bekommen. Gleichzeitig sind deshalb

auf den Wattflächen Fehler aufgetreten. Die Oberfläche der Büsche und Bäume sowie der Priel sind bei Photoscan Professional am vollständigsten und detailliertesten beschrieben.

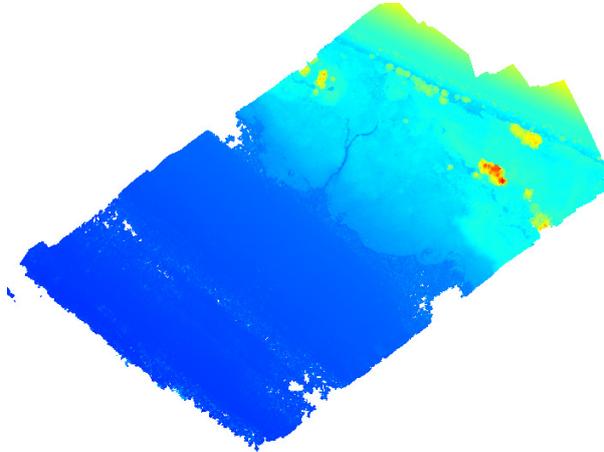


Abb. 4: 3D-Punktwolke mit der Software Trimble UAS-Master 19,6 Mio. Punkte

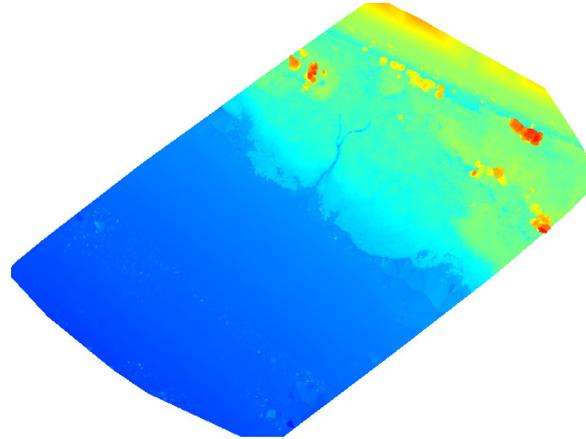


Abb. 5: 3D-Modell der Punktwolke mit der Software Pix4D Mapper (143,8 Mio. Punkte)

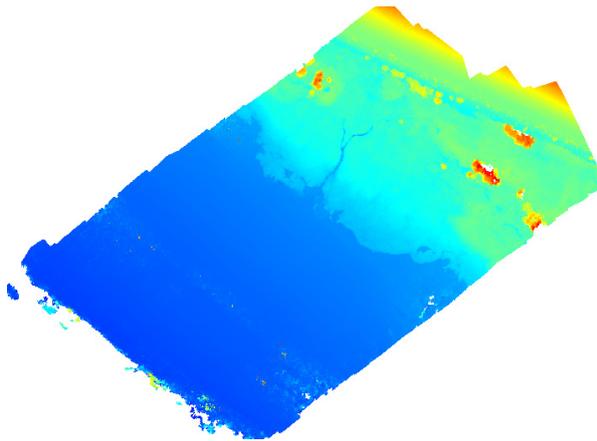


Abb. 6: 3D-Punktwolke mit der Software Photoscan Professional 47,3 Mio. Punkte

Der Ableitung eines digitalen Geländemodells (DGM) aus dem photogrammetrischen Oberflächenmodell durch eine Klassifikation der 3D-Punktwolke sind leider natürliche Grenzen gesetzt, da die Vegetation und hier insbesondere das Schilf auch im Winter einen dicht geschlossenen Röhrichtbestand bilden kann. Für andere Bereiche, z.B. Laubbäume können laubfreie Aufnahmen genutzt werden, um Informationen über die Geländetopographie zu erhalten.

Es zeigt sich zudem, dass die Ermittlung eines Zuwachses durch Vergleiche zweier digitaler Oberflächenmodelle auch nicht immer so einfach ist, wie gedacht. Vor allem dann nicht, wenn starker Wind das Schilf oder andere Vegetation herunterdrückt.

2.2 True Orthophotos - Vor und Nachteile

Im Rahmen der Datenprozessierung von UAS-Aufnahmen werden neben 3D-Punktwolken und digitalen Oberflächenmodellen üblicher Weise so genannte "True Orthophotos" erzeugt.

Per Definition (DIN 18740-3) ist ein „*True Orthophoto ... ein Orthophoto, in dem sichttote Räume ... weitgehend beseitigt sind.*“

Zur Erzeugung eines True Orthophotos, in dem alle Objekte lagerichtig abgebildet sind, müssen alle im Bild sichtbaren Objekte und deren Einzelteile im zugrundeliegenden Digitalen Oberflächenmodell repräsentiert sein. Während dies bei Gebäuden grundsätzlich machbar ist, von Problemen an den Gebäudekanten einmal abgesehen, gibt es bei Vegetation generell Probleme, vgl. Abb. 7. Die Probleme treten vor allem bei höheren Objekten, insbesondere Bäumen auf, deren Form nur unzureichend im DOM abgebildet ist. Gleichförmig hohe und dichte Vegetationsbestände, wie z.B. Schilf, werden im DOM als homogene Oberfläche erfasst und demzufolge im Orthophoto korrekt dargestellt.

Da bei entsprechendem Kontrast selbst Objekte kleiner als die Bildauflösung im Bild sichtbar sein können (z.B. Äste oder Freileitungen), scheitert deren lagerichtige Abbildung auch dann, wenn man ein Digitales Oberflächenmodell mit der Auflösung des zu erstellenden Digitalen Orthophotos zu Grunde legt. Das ist aus mehreren Gründen kaum machbar. Zum ersten können für ein Objekt, z.B. ein Baum, Haus, Brücke auch mehrere Höhen an einer Fassade oder im Geäst existieren, die zu einem digitalen Oberflächenmodell intelligent vermascht werden müssen. Zum zweiten ist das Matching jedes Bildpunktes in zwei und mehr Bildern, z.B. auf Grund von Bewegungen und Abschattungen, ungünstigen Schnittbedingungen etc. nicht möglich, siehe Abb. 9. Nicht zuletzt können im DOM auch Fehler und Artefakte vorhanden sein. Deshalb ist die Auflösung des DOM im Allgemeinen um den Faktor 4 - 9 geringer als das Luftbild, Abb. 10.

Neben einer möglichst detaillierten Beschreibung der tatsächlichen Oberfläche ist die Mosaikbildung der zweite problematische Schritt bei der Erzeugung eines True Orthophotos. Die in einem Bild auftretenden sichttoten Bereiche müssen aus anderen, benachbarten Bildern gewonnen werden. Grundvoraussetzung ist eine hohe Überdeckung, die bei UAS Befliegungen für Vermessungsaufgaben im Allgemeinen gegeben ist (Längs- und Querüberdeckung 80/60%) um jedes Objekt aus jeder Perspektive betrachten zu können. Dennoch können z.B. in einer Straßenschlucht oder zwischen Bäumen sichttote Räume verbleiben. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die einzelnen Bildpixel in der Regel mit ihren Nachbarpixeln korreliert sind, sei es durch das Bayer-Pattern auf der Sensor Ebene oder auch durch die Optik etc. Dies kann an der Grenze zwischen den zu verwendenden Bildbereichen zu Farbsäumen führen. Radiometrische (BRDF, Hotspots) und geometrische Restfehler können die Ergebnisse weiter beeinträchtigen, wie auf Abb. 12 deutlich zu sehen ist. Eine alternative Berechnungsmethode ist die Verwendung aller verfügbaren Farbwerte aus den zugrundeliegenden Bildern für die Erstellung des True Orthophotos. Dies bedeutet eine Mittelwertbildung und führt damit nahezu unweigerlich zu einem Verlust an Schärfe, vgl. Abb. 11. Gefordert ist also eine intelligente Mosaikbildung, die die vorhandenen Bilder und deren Blickrichtung für die Zusammenstellung des Mosaiks berücksichtigt, dabei aber weitgehend auf Mittelwertbildung verzichtet (WIEDEMANN & WICKI 2010).



Abb. 7: True Orthophoto auf der Grundlage eines UAS-DOM mit nahezu lagerichtiger Darstellung der Bäume und Artefakten



Abb. 8: Herkömmliches Orthophoto auf der Grundlage eines UAS-DGM, welches um Bäume und Gebäude bereinigt ist



Abb. 9: Aus UAS-Befliegung abgeleitete 3D-Punktwolke für True Orthophoto

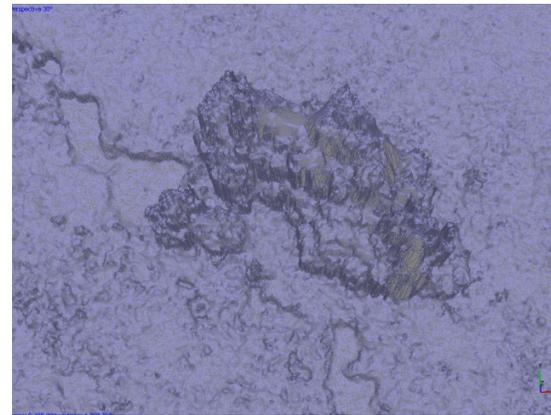


Abb. 10: Aus 3D-Punktwolke abgeleitetes Oberflächenmodell (Dreiecksvermaschung)



Abb. 11: Orthophoto mit Mittelwertbildung und Glättung im Übergangsbereich zwischen benachbarten Bildern



Abb. 12: True Orthophoto mit Artefakten im Gewässerbereich, die von geometrischen Restfehlern und radiometrischen Unterschieden benachbarter Bilder herrühren

3 Temporale Veränderungen im Watt

Eine zentrale Fragestellung im Zusammenhang einer etwaigen Fahrrinnenvertiefung und sonstigen Veränderungen am Flussverlauf und dem Wasser- und Strömungsregime der Elbe ist die Veränderung der Wattflächen und der Küstenlinie, bzw. der Grenze zwischen Vegetation und Watt. In Abhängigkeit des Standorts ist die Trennlinie zwischen der Vegetation und der Wattfläche in einer unterschiedlichen Höhe über dem Meeresspiegel und auch das Gefälle des Watts ist auf den Standorten sehr unterschiedlich, wie die nachfolgende Abb. 13 von vier Profilen aus den digitalen Oberflächenmodellen der UAS-Befliegungen zeigt. Die Profile wurden quer zur Küstenlinie gewonnen und beginnen jeweils kurz vor der Grenze zwischen der Vegetation und dem Watt. Das Gefälle im Watt ist recht konstant. In der Abb. 6 ist allerdings auch das Rauschen zu sehen, dass durch die fehlerhaften Punktzuordnungen auftreten kann. Die genauen Ursachen für die Unterschiede zwischen den Standorten hängen mit den lokal vorherrschenden Gelände- und Strömungsverhältnissen zusammen.

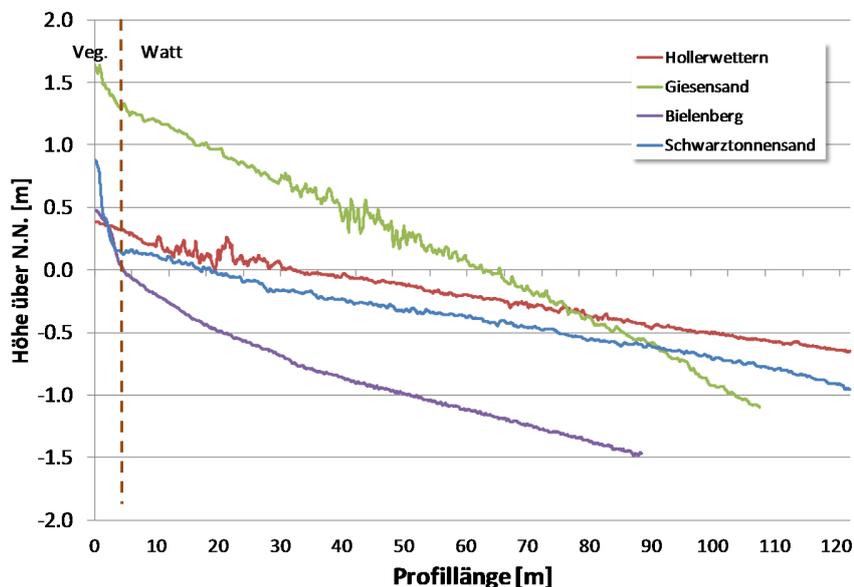


Abb. 13: Aus dem DOM abgegriffene Profillinien durch das Watt, quer zum Küstenverlauf, für die vier beflogenen Standorte, gestrichelte senkrechte Linie: geschlossene Vegetationsgrenze. Das zu beobachtende Rauschen ist auf Unzulänglichkeiten bei der Ableitung des DOM zurückzuführen.

Neben beliebigen Profilen sind die geometrisch hochaufgelösten UAS-Oberflächenmodelle besonders geeignet, um flächenhafte Veränderungen im Höhenprofil durch Vergleiche zwischen den Befliegungen zu erfassen. Das trifft im besonderen Maße auf die vegetationslosen Wattflächen zu somit das Oberflächenmodell dem Geländemodell entspricht. Die nachfolgenden drei Abbildungen zeigen die Differenzen zwischen den durchgeführten Befliegungen (Abb. 14, Abb. 15, Abb. 16). Aufgrund unterschiedlicher Tidenverhältnisse ist das zu beobachtende Watt unterschiedlich breit. Das vegetationslose Watt beginnt bei etwa 0.3 m ü. N.N. und reicht je nach Flugtermin zwischen -0,8 m für die Winteraufnahme und bis -1,5 m bei der Frühjahrs- und Sommeraufnahme. Die an obiger Stelle bereits erläuterten Matchingfehler führen teilweise zu einem Rauschen, was sich negativ auf das Ergebnis auswirkt.

Wie vielleicht zu erwarten war, kam es über die Wintermonate an den südlichen Teilen des Standorts Bielenberg zu einem leichten Abtrag von teilweise mehr als 10 cm, vgl. Abb. 14. Im Norden des Standorts ist hingegen keine signifikanten Veränderungen zu beobachten. Diese Entwicklung hat sich im Zeitraum zwischen der Frühjahrs- und der Sommeraufnahme wieder umgekehrt, wie die Abb. 15 anschaulich verdeutlicht. Im Saldo eines Jahres (Abb. 16) gleichen sich die Differenzen weitgehend aus. Allerdings ist an diesem Standort im Zeitraum Juni 2015 – August 2016 wieder eine Versteilung des Wattprofils zu beobachten. Ebenfalls festzuhalten bleibt, dass sich die Grenze zwischen dem Watt und der Vegetation kaum verändert hat.

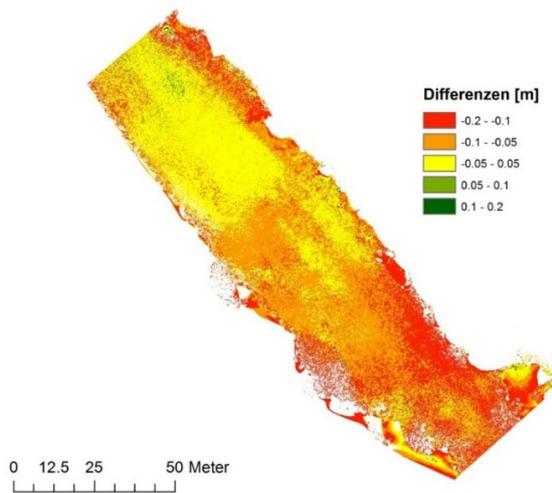


Abb. 14: Vertikale Veränderungen der Wattoberfläche am Standort Bielenberg von Herbst (30.10.2014) bis Frühjahr (09.03.2015)

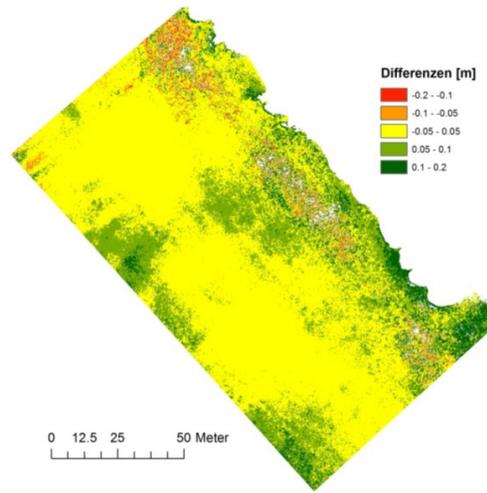


Abb. 15: Vertikale Veränderungen der Wattoberfläche am Standort Bielenberg von Frühjahr (09.03.2015) bis Sommer (09.06.2015)

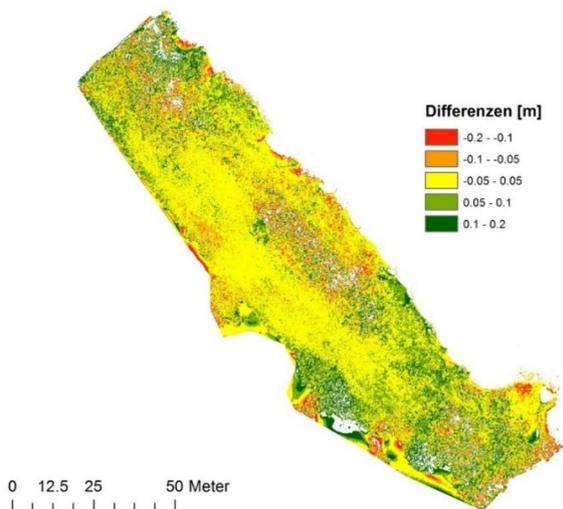


Abb. 16: Vertikale Veränderungen der Wattoberfläche am Standort Bielenberg von Herbst (30.10.2015) bis Sommer (09.06.2015)

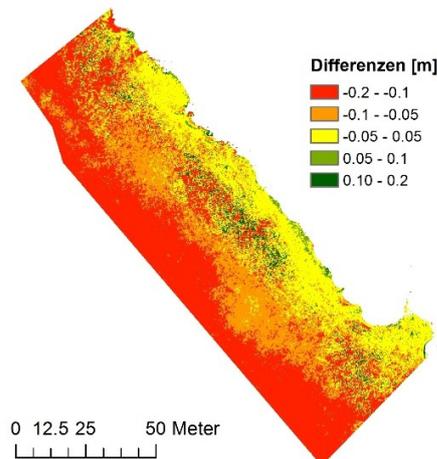


Abb. 17: Vertikale Veränderungen der Wattoberfläche am Standort Bielenberg von Sommer (09.06.2015) bis Sommer (04.08.2016)

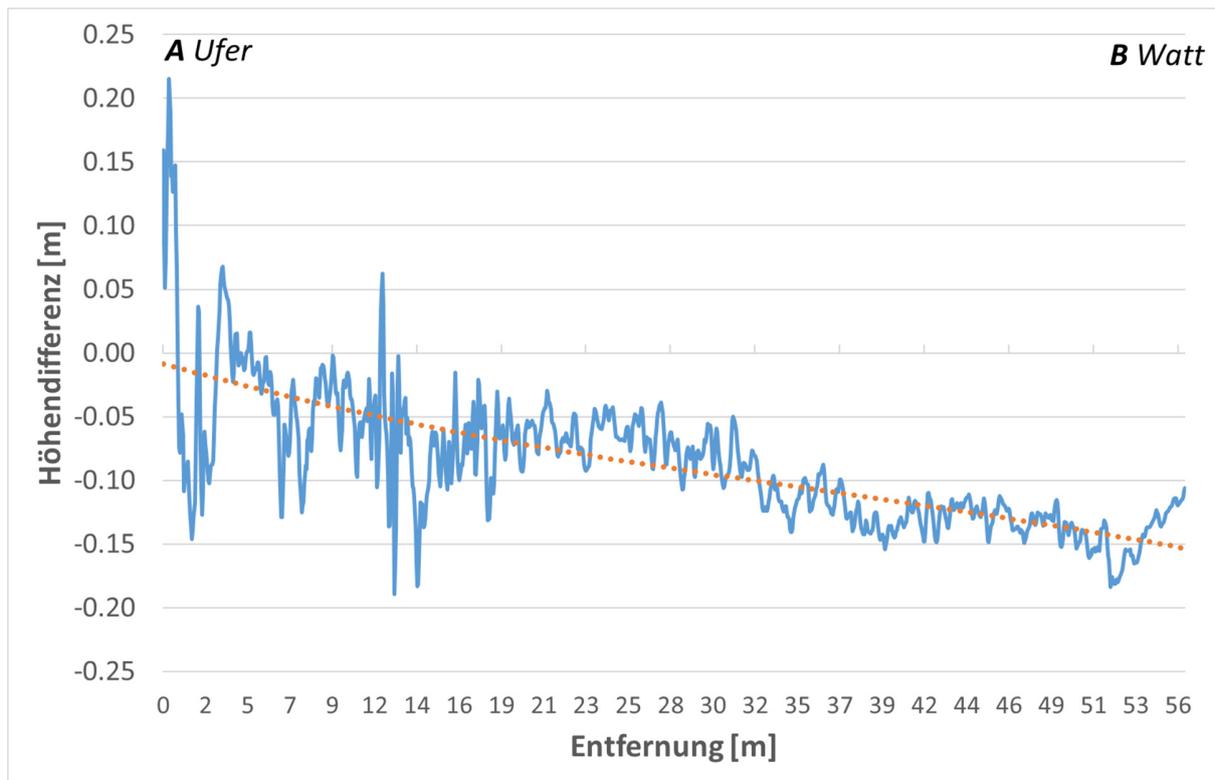


Abb. 18: Veränderung des Profils der Wattflächen am Standort Bielenberg vom 4.8.2016 im Vergleich zur Befliegung vom 9.6.2015 (etwa 50 m Breite) vom Ufer (links) bis zur maximal auswertbaren Tiefe von -1 m ü. N.N. (rechts)

Tab. 2: Vergleich der Höhenwerte [m ü. N.N.] bisheriger UAS Befliegungen entlang des Profils in Bielenberg

Befliegungsdatum	A - Ufer				B - Watt
30.10.2014	-0.03	-0.37	-0.65		
09.03.2015	0.14	-0.38	-0.66	-0.87	-1.00
09.06.2015	-0.08	-0.33	-0.66	-0.84	-0.98
04.08.2016	-0.05	-0.44	-0.73	-0.96	-1.09

Insgesamt zeigten sich also auf den untersuchten Standorten im Zeitraum der letzten zwei Jahre durchaus signifikante temporale Veränderungen an dem Profil der Wattflächen, jedoch nicht an dem Verlauf der Watt / Vegetationsgrenze bzw. der Küstenlinie.

4 Zusammenfassung

Der Ansatz eines kontinuierlichen (multitemporalen) landschaftsökologischen Monitorings mit Hilfe von UAS ist ein längerfristiger Ansatz, mit dessen Hilfe verschiedene Prozesse erfasst und begleitet werden können. Beispielsweise die Entwicklung und Verbreitung verschiedener Vegetationstypen und -gesellschaften, die sich zu verschiedenen Zeitpunkten unterschiedlich gut differenzieren lassen. Die Interpretation und Erfassung der Veränderungen sollte manuell erfolgen, denn für eine weitgehend automatische Auswertung / Klassifikation des Bildmaterials bedarf es aus heutiger Perspektive noch weitere Untersuchungen, da die sehr hohe Auflösung und die variable Radiometrie, die bei wechselnden Belichtungsverhältnissen während einer Befliegung auftreten kann, zu viele Sonderfälle erzeugt.

Fehler im DOM bzw. ein DOM mit einer Auflösung unterhalb der Bildauflösung führen zu Artefakten im "True" Orthophoto. Das betrifft insbesondere Vegetations- und Wasserbereiche, in denen die zugrundeliegenden Matchingverfahren aus verschiedenen Gründen Probleme haben. Diese sind für eine visuelle Interpretation in der Regel unproblematisch, bei automatisierten Verfahren jedoch zu berücksichtigen.

Insgesamt zeigten sich auf den untersuchten Standorten signifikante Veränderungen an den Wattflächen bzw. der Küstenlinie. Veränderungen über den Winter haben sich über das Frühjahr bis zum Sommer meist wieder ausgeglichen. Um die Relevanz und die Ursachen der Veränderungen beobachten zu können, ist ein zeitlich engeres Befliegungsschema notwendig.

5 Literaturverzeichnis

- GRENZDÖRFFER, G., 2011: Geodatenerfassung mit Unmanned Airborne Systems (UAS). Terrestrisches Laserscanning - TLS 2011 mit TLS Challenge, DVW-Schriftenreihe Band 66, Wißner-Verlag, 203-214.
- GRENZDÖRFFER, G., 2014: Crop Height Determination with UAS Point Clouds. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 40(1), 135-140.
- HAALA, N., 2014: Dense Image Matching Final Report. EuroSDR Official Publication 64, 115-146.
- MOUTINHO, O., 2015: Evaluation of Photogrammetric Solutions for RPAS: Commercial vs. Open Source. Master thesis, Universidade do Porto, <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/82382>, last access January 22, 2017.
- WIEDEMANN, A. & WICKI, P., 2010: Mythos True Orthophotos - Vom Sinn und Unsinn eines Produkts. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 19, Kohlhofer, G. & Franzen, M. (Hrsg.), 271-279.
- WSD-NORD, (2012): Planfeststellungsbeschluss für die Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe für 14,5 m tiefgehende Containerschiffe. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Kiel, AZ.: P-143.3/46.