



Staatliches Amt für
Landwirtschaft und Umwelt
Mittleres Mecklenburg

Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg

Dezernatsgruppe Küste

Dezernat Allgemeine Angelegenheiten und Küstenkunde

Erich-Schlesinger-Str. 35

18059 Rostock

LEDA-K:

**Mobiles Laserscanning und Einsatz von Drohnen zur
Aufnahme von Küstengebieten und
Küstenschutzbauwerken**

Schlussbericht

Tiepolt, Lars; Kittel, Oskar

Förderkennzeichen 03KIS104

Laufzeit des Projektes und Berichtszeitraum: Oktober 2012 – Januar 2013

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung und Hintergrund	3
2. Aufgabenstellung	3
3. Wissenschaftlich-technischer Stand	4
4. Planung und Ablauf	4
5. Zusammenfassung der Ergebnisse	5
6. Methodik und Ergebnisse Mobiles Laserscanning (MLS)	6
7. Methodik und Ergebnisse beim Einsatz von Drohnen (UAV)	26
8. Nutzen und Verwendbarkeit, Zusammenarbeit mit anderen Stellen	47
9. Fortschritt	48
10. Veröffentlichungen	48
11. Patente	48
12. Quellen	48

1. Einleitung und Hintergrund

Bisher kamen im Küstenschutz von Mecklenburg-Vorpommern zur Aufnahme der Morphologie und zur Vermessung von Küstenschutzanlagen neben den klassischen tachymetrischen Messverfahren hauptsächlich Airborne Laserscanning (ALS) und vereinzelt terrestrisches Laserscanning zum Einsatz.

Bei der tachymetrischer Vermessung wird der Vorteil der hochgenauen Aufnahme von Objekten inklusive der Attributierung durch die überwiegenden Nachteile von wenigen Punkten pro Fläche, hoher Zeit- und Kostenaufwand und der Notwendigkeit der Interpolation von Zwischenflächen zunichte gemacht.

Andererseits wird bei der ALS-Vermessung eine sehr große Fläche in kurzer Zeit aufgenommen, hier fehlen aber dann die Attributierung der Punkte sowie die hohe Genauigkeit und es besteht das Problem der Verfügbarkeit von Flugzeugen/Hubschraubern zum gewünschten Zeitpunkt. Bei zu kleinen Flächen liegen die Mob-/DeMobkosten bzw. An- und Abflugkosten oft über den tatsächlichen Befliegungskosten.

Das terrestrische Laserscanning als Mittelweg durch die Aufnahme eine hohen Punktdichte bei einer größeren Fläche mit schnellerer Verfügbarkeit (als beim ALS), aber mit reduzierter Genauigkeit gegenüber tachymetrischen Verfahren und mittlerem Zeit- und Kostenaufwand ist für kleinflächige Objekte eine gute Alternative, für größere und insbesondere langgestreckte Objekte, wie Dünen und Deiche, aber auch keine befriedigende Lösung.

Die Technikentwicklung der letzten Zeit hat nun 2 weitere mögliche Aufnahmeverfahren zur Marktreife gebracht, deren Anwendung gerade für die Aufgaben des Küstenschutzes, nicht nur in MV sondern in allen Küstenländern, theoretisch vielversprechende Ergebnisse erwarten lässt, zum einen ist dies das Mobile Laserscanning (MLS) und der Einsatz ferngesteuerter Drohnen. Im Projekt LEDA-K wurden diese erfolgversprechenden Verfahren exemplarisch an ausgewählten Küstenschutzstandorten getestet, um entweder ihre praxisrelevante Nutzbarkeit zu bestätigen und damit eine Grundlage für detaillierte Forschungen und Anwendungen zu schaffen oder eben diese Verfahren für Belange des Küstenschutzes in der jetzt vorliegenden Technologie auszuschließen.

2. Aufgabenstellung

Die Dezernatsgruppe Küste des Staatlichen Amtes für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg hatte neben der Koordination der externen Projektpartner Milan Geoservice GmbH Spremberg und CIS GmbH Rostock alle Arbeiten im Projekt zu begleiten, zu bewerten, notwendige Änderungen an den Fluggeräten durchzuführen sowie die angewendeten Hard- und Softwareprodukte zu testen. Es war darauf zu achten, dass in dem sehr kurzen Projektzeitraum von nur 4 Monaten alle beantragten Arbeiten und Forschungen durchgeführt werden konnten.

3. Wissenschaftlich-technischer Stand

Das Verfahren des Mobilien Laserscannings beschränkte sich bisher zum einen auf den Aufbau eines terrestrischen Laserscanners auf ein geländefähiges Fahrzeug, mit dem dann die jeweiligen Vermessungspunkte angefahren wurden und bei Fahrzeugstillstand ein 360°Scan durchgeführt wurde, analog der terrestrischen Aufnahme mit Vermessungstrupp, zum anderen wurde der neu entwickelte Laserscanner RIEGL VMX-250 auf Fahrzeuge montiert, die in städtischen Bereichen oder befahrbaren Bereichen im Tagebau für verschiedenste Fragestellungen zum Einsatz kamen. Die Nutzung dieser Technik im Strand-, Dünen- und Deichbereich an den Küsten wurde bisher noch nicht durchgeführt.

In MV wurden und werden UAVs (Drohnen) seit Jahren sehr erfolgreich in der Landwirtschaft zur Optimierung des Düngemittelbedarfs (Precision Farming), der Aufnahme des Schädlingsbefalls und zur Schädlingsbekämpfung sowie zur Flächenüberwachung und –nutzungsfeststellung verwendet. GRENZDÖRFFER und BILL gehen in Ihren Vorträgen (u.a. GeoMV 2011) und Publikationen derzeit noch davon aus, dass ein Einsatz im Küstenschutz nicht sinnvoll erscheint, wobei es dazu aber keine tatsächlichen Tests gab, sondern lediglich keine Anwendung im Bereich des Küstenschutzes gesehen wurde. Mittlerweile können diese Drohnen nicht nur eine Kamera (mit natürlich unterschiedlichen Sensoren bestückbar) mit sich führen, sondern es gibt bereits Einsatzerfahrungen mit 2 Kameras, derzeit 1 RGB-Kamera sowie 1 Infrarotkamera. Eine Ausstattung mit 2 RGB-Kameras, wie im Projekt vorgesehen, soll zukünftig auch die Möglichkeit der stereoskopischen Auswertung bei nur einer Befliegung liefern können. Gerade diese stereoskopische Auswertung könnte bei verschiedenen Fragestellungen des Küstenschutzes allein und/oder im Zusammenwirken mit dem MLS hervorragende Ergebnisse erzielen.

4. Planung und Ablauf

Der Ablauf des Projektes entsprach weitestgehend den Planungen. Die Projektlaufzeit vom 01.10.2012 bis zum 31.01.2013 wurde eingehalten. Der Kostenplan wurde eingehalten und fast alle bereitgestellten Mittel wurden abgerufen und projektbezogen verwendet, der zahlenmäßige Nachweis des Verwendungsnachweises wurde im Juni 2013 an den Projektträger Jülich übergeben und bereits von diesem bestätigt und angenommen. Alle im Projektantrag aufgeworfenen Fragestellungen konnten bearbeitet werden, wobei bei den praktischen Durchführungen bei einigen Problemgebieten schnell ersichtlich wurde (Siehe Erläuterungen zu den Ergebnissen in den Punkten 15), 23), 24), 25) und 26)), dass hier die theoretischen Anforderungen mit den vorhandenen Techniken und Algorithmen nicht erreicht werden konnten. In diesen Punkten ist ein weiterer, detaillierterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu formulieren und zu bearbeiten, was in der kurzen, 4-monatigen

Projektlaufzeit nicht möglich war. Aufgrund der starken Witterungsabhängigkeit mussten eine Reihe von Messterminen entweder zusammengefasst oder gesplittet, verschoben oder separat bearbeitet werden, was aber letztendlich trotzdem zur vollständigen Bearbeitung der Projektaufgaben geführt hat.

5. Zusammenfassung der Ergebnisse

Alle Projektergebnisse sind in den Unterpunkten 1) bis 16) für den Teil des Mobilien Laserscannings (Punkt 6) und in den Unterpunkten 17) bis 27) für den Teil des Einsatzes von Unmanned Aircraft Vehicles (Drohnen) unter Punkt 7 aufgeführt und beschrieben. Diese Ergebnisse aus dem Projekt LEDA-K für den Einsatz von MLS und UAV lassen sich stichpunktartig wie folgt zusammenfassen:

- Für alle morphologischen Naturraummessungen im ufernahen Bereich mittels MLS reichen die erzielbaren Punktdichten (>10 Punkte) und Punktgenauigkeiten (in der Höhe kleiner 5 cm und in der Lage kleiner als 1 dm) aus.
- Die minimale Scanreichweite bei MLS liegt bei 1,5 m, die optimale Scanreichweite sollte die 200 m-Marke nicht überschreiten, die maximale Scanreichweite liegt bei 500 m, wobei eigene Abschattungen durch das System selbst nicht zu verzeichnen sind.
- Die Lasermesspunktgröße sowie die verwendeten Korrelationen von Fahrgeschwindigkeit, Scanrate und Messpunktdichte sind in allen Reichweitenbereichen für Naturraummessungen völlig ausreichend und somit uneingeschränkt nutzbar.
- Bei einer optimalen, durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit mit MLS von 30-40 km/h bei sandigen Flachküstenabschnitten und Deichtrassen können bis zu 80 km am Tag aufgenommen werden.
- Eine Unterscheidung von Gebäuden und befestigten Deichtrassen gegenüber natürlichen Strukturen (Sandstrand, Pflanzen, Bäume) ist bei MLS über die erfassten Rauigkeitsbeiwerte möglich.
- In der Regel sind im ufernahen Bereich alle Vorgaben für die problemlose GPS/INS Initialisierung und GPS-Vermessung vorhanden.
- In der Regel gibt es bei der Vermessung mit MLS an sandigen Flachküstenabschnitten vom Strand aus, von der Deichkrone bzw. von der landseitigen Dünen- oder Deichseite keine Probleme, auch nicht bei der Erfassung des Deichfußes.
- Probleme beim MLS gibt es bei Schneebedeckung, die zu quantitativen und qualitativen Verlusten bei den Messergebnissen führen kann sowie an stark steinigen Flachküstenbereichen, an Steilküstenbereichen oder auch bei feinsandigen, neu akkumulierten Strandbereichen, wo die Gefahr des Festfahrens des Fahrzeugs besteht.

- Die Datenmengen und Bearbeitungszeiten sind stark von den Aufnahmeparametern abhängig, bei optimierten Verarbeitungsalgorithmen benötigt man pro 1 MLS-Datenerfassungsstunde 8 Stunden für das Postprocessing.
- Durch Verwendung des LAS-Formates bei MLS ist Standardsoftware verwendbar und es können problemlos Digitale Geländemodelle (DSM, DTM) erzeugt werden, auch verlustfreie CAD-Konvertierungen sind theoretisch möglich.
- Der Einsatz der UAV (Drohne) direkt nach Sturmfluten ist bis Windstärke 4 problemlos möglich, ebenso im Winter, solange keine vollständige Schneebedeckung vorliegt.
- Die optimale Flughöhe von UAVs für Küstenschutzbelange beträgt 80-120 m bei möglichen Fluggeschwindigkeiten von 10-70 km/h, die maximale Windgeschwindigkeit darf dabei 30 km/h nicht überschreiten.
- Die tatsächlichen Flugzeiten der UAVs im Winterbetrieb liegen zwischen 20 und 35 Minuten in Abhängigkeit der verwendeten Akkus und Witterungsverhältnisse.
- Orthophotos von UAVs lassen über manuelle Auswertung eine rein optische Betrachtung des Vegetationszustandes zu, automatische Verfahren mit NIR-Filtern sind nicht zu empfehlen.
- Die Kombination von UAV, MLS- und DGM-Daten ist möglich und sinnvoll, da die Verschneidung dieser Daten zu einem deutlichen Erkenntniszuwachs führt.
- Die Nutzung von UAV-Daten (Orthophotos) für Digitale Geländemodelle, für stereoskopische Auswertungen sowie zur Ermittlung von Abbruchraten, Volumen- und Massenberechnungen sind theoretisch möglich, aber derzeit nicht praktikabel.
- Die verwendete MLS-Technik sowie die Drohnen (UAV) entsprechen für den dienstlichen Einsatz den gesetzlichen Vorgaben und Regelungen, wobei bei der Datenerfassung und -verarbeitung die Datenschutzbestimmungen des jeweiligen (Bundes-)Landes zu beachten sind.

6. Methodik und Ergebnisse Mobiles Laserscanning (MLS)

Beim Mobilem Laserscanning werden auf einem Fahrzeug montierte, klassische Laserscanner zur Aufnahme der direkten Umgebung genutzt, wobei diese ihre Arbeit bei kontinuierlicher Fahrt schneller, flächenhafter und hervorragend für Linienelemente durchführen können. Durch die parallele Aufnahme von Echtfarbvideos kann im Nachhinein ein besonders gutes Zustandsbild von den erfassten Objekten erstellt werden.

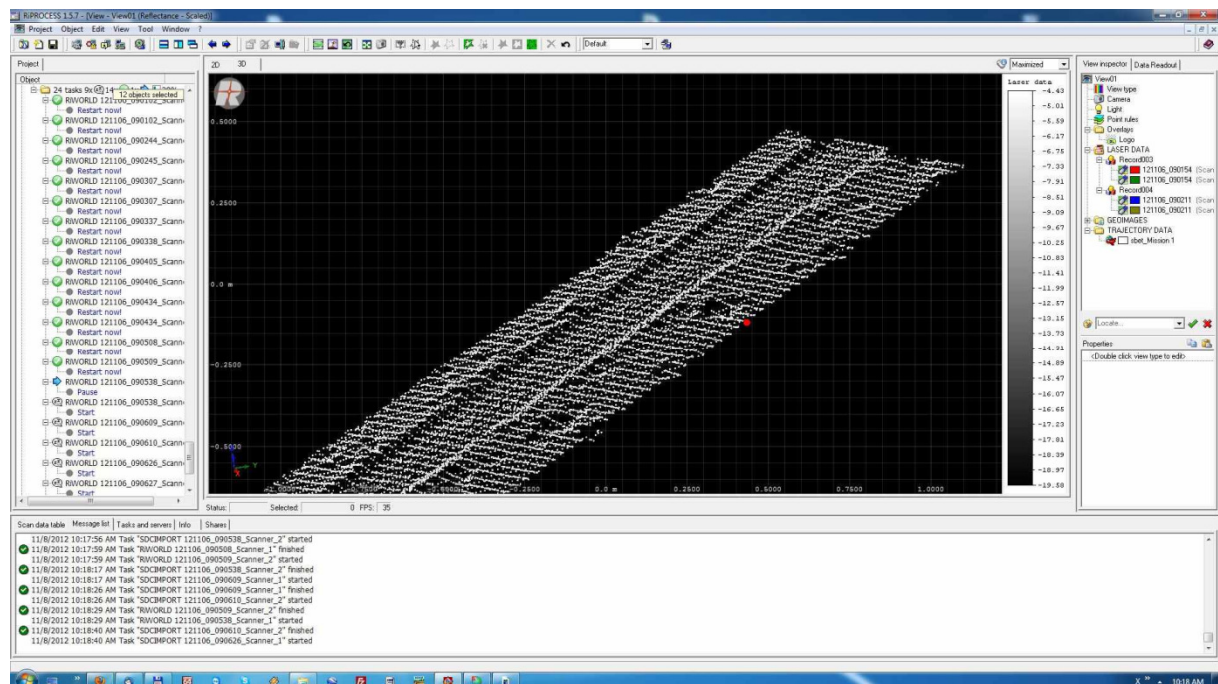
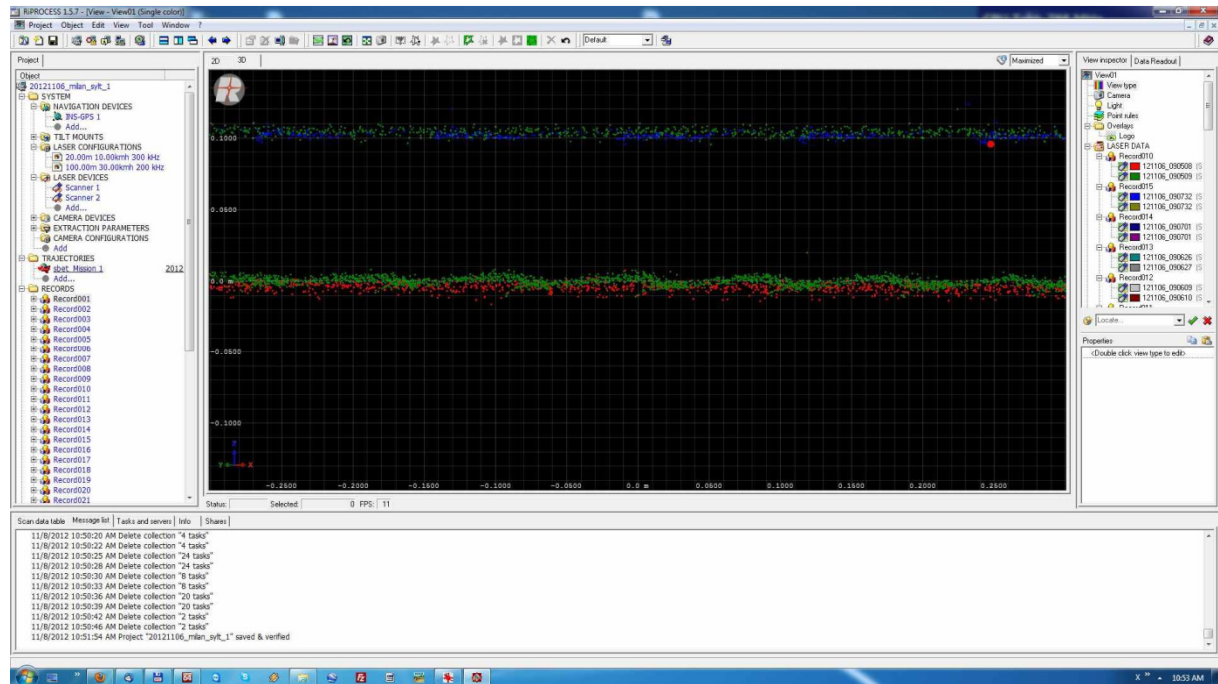
Im Projekt kam dabei der RIEGL-Scanner VMX-250 auf verschiedenen Fahrzeugen zum Einsatz sowie ein klassischer terrestrischer RIEGL-Scanner, der auf einen Jeep montiert worden war (Siehe folgende Fotos).

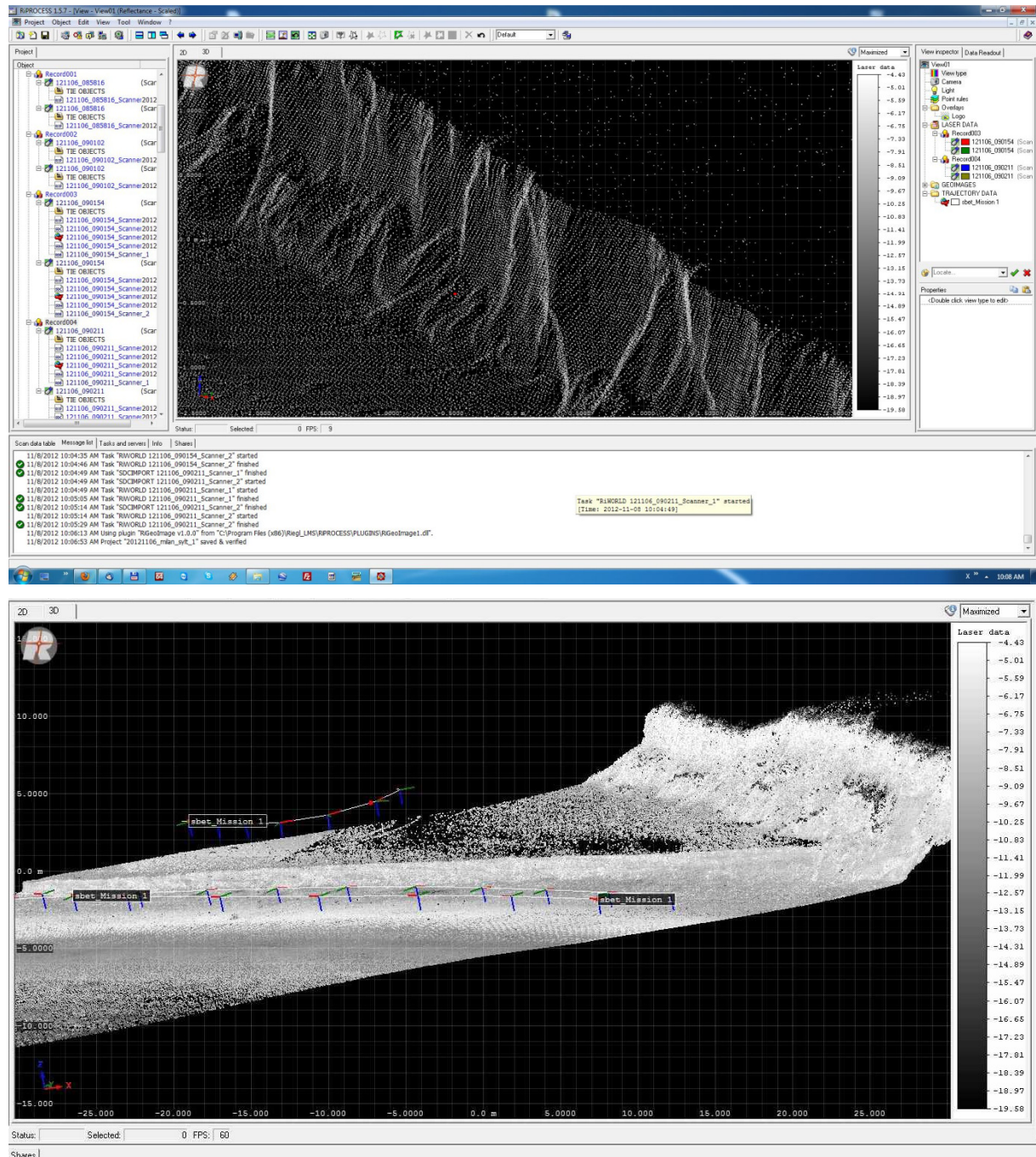






Alle erhobenen MLS-Daten wurden von der Firma Milan Geoservice GmbH mit Softwarepaketen ausgewertet, wie sie auch bei der tachymetrischen Landvermessung bzw. bei der ALS-Vermessung verwendet werden, um die tatsächliche Datenqualität zwischen den jeweiligen Verfahren softwareunabhängig und verlustfrei beurteilen zu können (Siehe Screenshots von der Auswertung):





Im Projektantrag wurden folgende Fragestellungen formuliert, die zu untersuchen waren:

- Leistungsparameter, d.h. km pro h, km pro d, km pro Woche
- Fahrgeschwindigkeiten
- Erfassungsgenauigkeiten in Lage und Höhe
- Scanraten, Lasermesswerte pro m²
- Messpunktdichte in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit
- Messpunktdichte in Abhängigkeit der Scanrate
- min./max. Scanreichweite, Scanbereich, Scanwinkel
- Lasermesspunktgröße in Anhängigkeit der Reichweite

- Genauigkeitsbetrachtung: Korrelation Fahrgeschwindigkeit, Scanrate, Messpunktdichte
- Erfassung von Rauigkeitsbeiwerten der reflektierten Materialien
- Navigationspfad, GPS/INS Initialisierung, GPS-Abschattungen
- Laserabschattungen, Deichfusserfassung
- Zugangsmöglichkeiten bzw. Zugangseinschränkungen des Messfahrzeuges
- Auswirkungen von Schneebedeckung auf die Messergebnisse
- Datenerfassung, Datenmenge, Zeitraum der Bearbeitung
- Datenformate, Datenableitungen, Datenspeicherung
- Datenaufbereitung, u.a. CAD-Modell, Zeit-/Leistungsverhältnis, Genauigkeitsverlust
- Betriebswirtschaftliche Gesamtbewertung, Zeit- und Kostenersparnis
- gesetzliche Forderungen im Bereich des Küstenschutzes
- gesetzliche Bestimmungen, Datenschutz

Folgende Projektergebnisse wurden erzielt:

1) Welche Fahrgeschwindigkeiten sind realisierbar?

Die erreichbaren und realisierbaren Fahrgeschwindigkeiten richten sich nach verschiedenen Gesichtspunkten. Erfolgt eine Aufnahme bspw. in bebauten Gebieten auf öffentlichen Straßen, so ist die maximale Geschwindigkeit auf die durch die STVO vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit begrenzt. Diese Beschränkungen gelten auch bei MLS-Aufnahmen auf Deichwegen. Da diese üblicherweise als Rad- und Fußgängerwege ausgelegt sind, ist die Geschwindigkeit zusätzlich so anzupassen, dass weder Menschen noch Tiere zu Schaden kommen können. Die Sperrung von Stränden und Deichwegen ist im Sommer aufgrund der touristischen Nutzung keine Option und auch im Winter sollte/muss eigentlich eine Sperrung nur eine temporärere und räumlich stark begrenzte Möglichkeit sein. Vom Gerätehersteller wird dazu eine maximale Geschwindigkeit von 60-70 km/h vorgesehen, um ein optimales Verhältnis von Punktdichte, Punktgenauigkeit und Datensicherheit bei maximaler Datenaufnahme zu erhalten.

Dies gilt gleichermaßen für MLS-Aufnahmen im Strandgebiet. Im Verlaufe der MLS-Messungen an den Stränden von Wustrow-Dierhagen, Prerow und Hörnum-Odde ergab sich eine maximale Fahrgeschwindigkeit von 40-50 km/h. Höhere Geschwindigkeiten konnten auf Sandboden nicht erreicht werden.

Fazit: Durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei sandigen Flachküstenabschnitten und Deichtrassen beträgt bei MLS 30-40 km/h.

2) Welche Leistungsparameter, d.h. km pro h, km pro d, km pro Woche sind zu realisieren?

Angenommen an sandigen Strandbereichen kann über weite Strecken mit der Höchstgeschwindigkeit (40-50 km/h) gefahren werden, dann ergibt sich eine theoretische maximale Aufnahmegeschwindigkeit von 40 bis 50 km Sandstrand pro Stunde. Dies kommt nur in Frage, wenn alle Strandabschnitte direkt miteinander verbunden sind und dadurch nacheinander aufgenommen werden können. Durch den teilweise recht lockeren Sandboden, Hindernisse sowie Passanten ist eher von einer Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 25-30 km/h. Des Weiteren wird Zeit für das Umsetzen des Fahrzeuges, für einen eventuellen Austausch der Datensicherungsplatten und auch für die Betankung des Fahrzeuges benötigt. Anhand dieser Faktoren und der im Rahmen des Projektes tatsächlich gefahrenen Kilometer ist von einer Aufnahmelänge von 10 km pro Stunde auszugehen. Damit wären pro Tag 80 km und in einer Woche rund 500-600 km erreichbar.

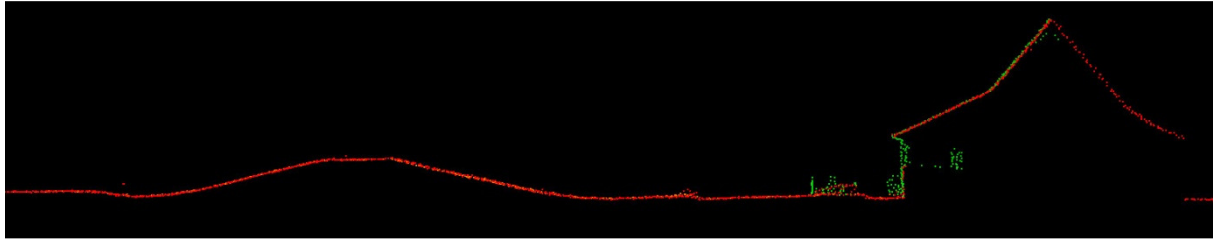
Fazit: Durchschnittliche Geländeaufnahme bei MLS: 80 km am Tag.

3) Wie hoch sind Erfassungsgenauigkeiten in Lage und Höhe?

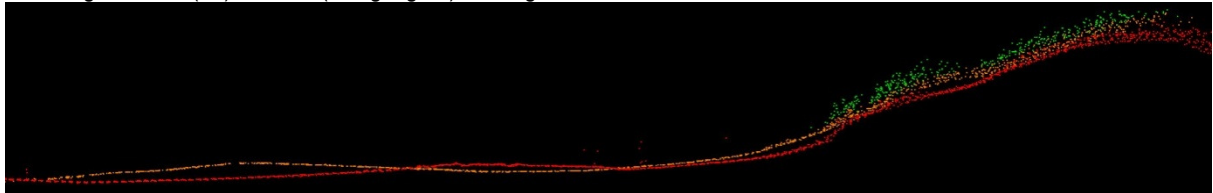
Betrachten wir zunächst die innere Genauigkeit, d.h. wie Einzelmessungen (ein Scanstreifen) zueinander passen, von MLS-Messungen in Küstengebieten. In dem Testgebiet Wustrow-Dierhagen wurden ca. 20.000 Ebenenpaare in benachbarten Scanstreifen gefunden. Die Abstände der Ebenen zueinander wiesen eingangs eine Standardabweichung von ca. 4 cm auf. Nach einer Ausgleichung, welche eine Verschiebung und Verkipfung der einzelnen Streifen zuließ, betrug die Standardabweichung nur noch ca. 1 cm.

Für die Bestimmung der äußeren Genauigkeit wurde ein Datensatz aus einer ALS-Befliegung aus dem Jahr 2012 verwendet. Dabei wurden wiederum Ebenenpaare zur Berechnung herangezogen. Horizontale Flächen dienen hier zur Abschätzung der Höhengenaugkeit und schräge Fläche z.B. an Häusern zur Abschätzung der Lagegenauigkeit. Zudem wurde die Höhengenaugkeit mit Hilfe von Profilvergleichen ermittelt.

Die Profile passen in den befestigten Bereichen wie dem Deich oder an Häusern sehr gut zueinander. Hier liegen die Höhenunterschiede der beiden Messungen bei etwa 4 cm. Im Strandbereich befinden sich keine ebenen und befestigten Flächen die zur Referenzierung verwendet werden können. Da die innere Genauigkeit der Punktwolke jedoch ca. 1 cm beträgt, kann der Profilverlauf am Strand als realistisch angenommen werden. Daher ist davon auszugehen, dass die unterschiedlichen Profile durch Veränderungen der Morphologie entstanden sind.



Profilvergleich ALS (rot) mit MLS (orange, grün) befestigter Bereich Wustrow

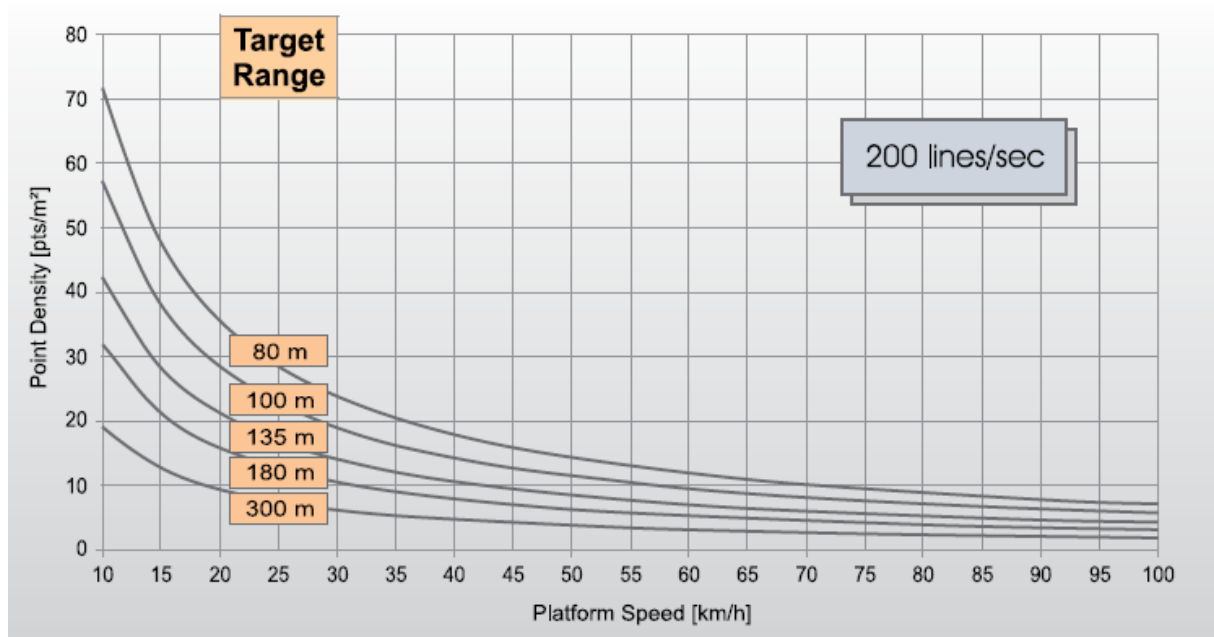


Profilvergleich ALS (rot) mit MLS (orange, grün) Strandbereich Wustrow

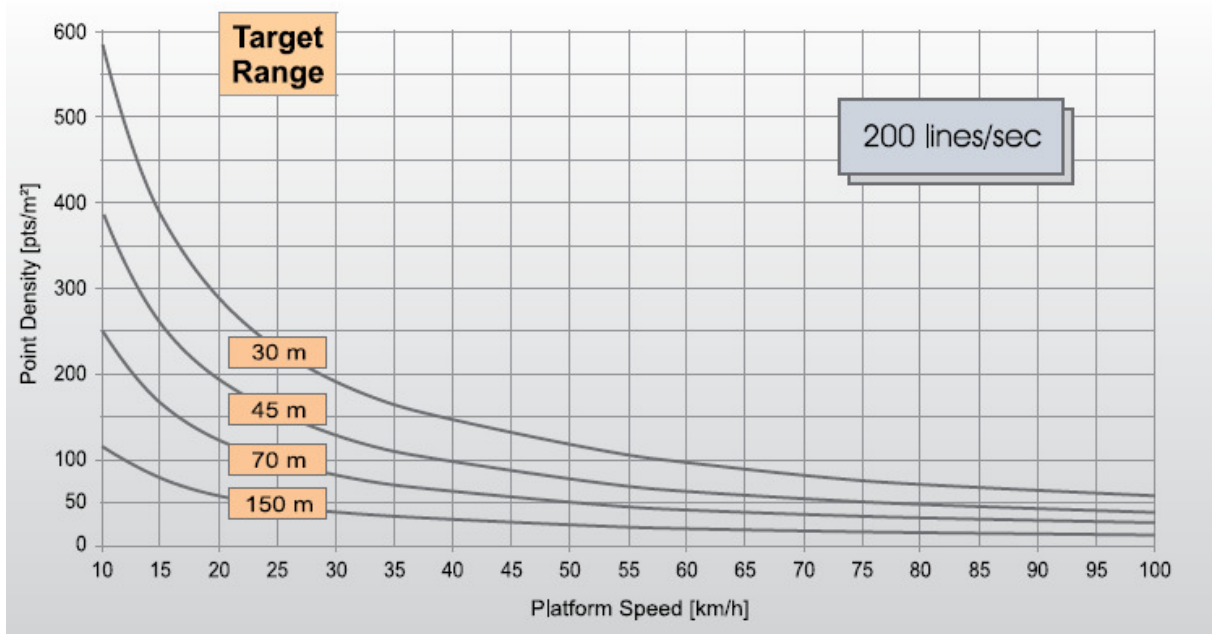
Fazit: Erfassungsgenauigkeiten bei MLS in der Höhe definitiv kleiner 5 cm (1-4 cm im Projekt) und in der Lage kleiner als 1 dm.

4) Wie hoch sind Scanraten, Lasermesswerte pro m²? Wie groß ist die Messpunktdichte in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit? Wie groß ist die Messpunktdichte in Abhängigkeit von der Scanrate?

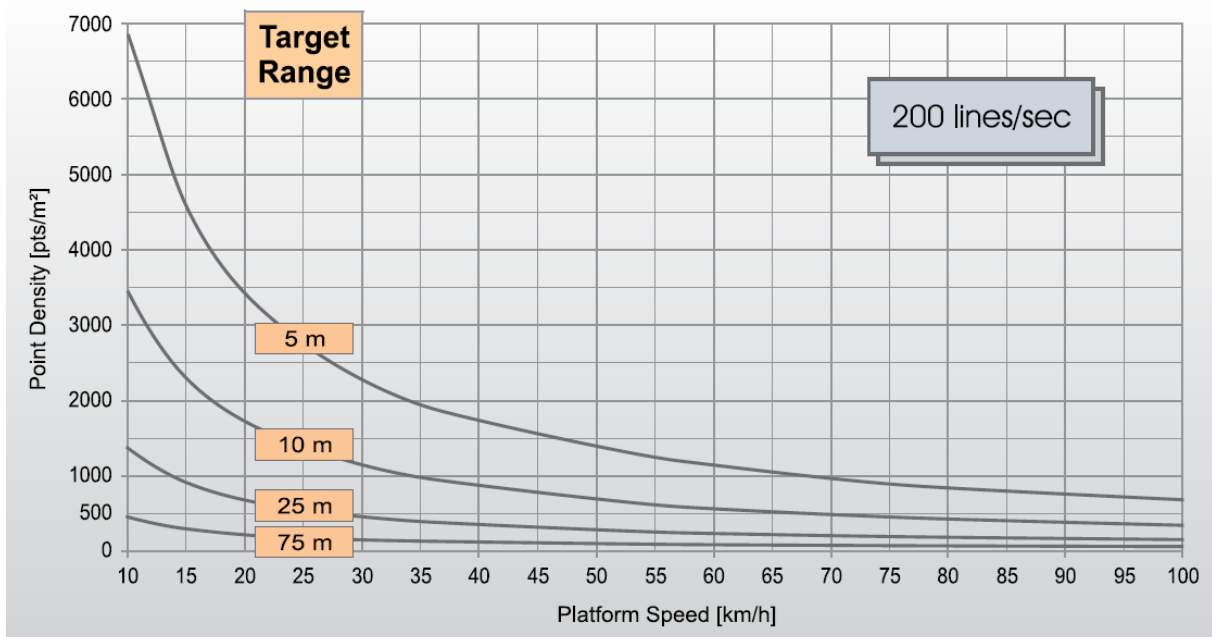
Jeder der beiden Riegl VQ-250 Laserscanner weist eine maximale Scanrate von 300 kHz und eine maximale Scangeschwindigkeit von 100 Scanlinien/sek. auf. Die Anzahl der 3D-Punkte pro m² ist abhängig von der verwendeten Scanrate, der Fahrgeschwindigkeit und der Entfernung zum Laserscanner. Je höher die Scanrate ist, desto mehr Messungen werden auf einen m² durchgeführt. Die Wahl der verwendeten Scanrate ist wiederum davon abhängig, welche maximale Reichweite benötigt wird, um das Zielgebiet aufzunehmen.



Punktdichte bei 100 kHz (2 x 50 kHz) bei langen Zielweiten und verschiedenen Geschwindigkeiten



Punktdichte bei 300 kHz (2 x 150 kHz) bei mittleren Zielweiten und verschiedenen Geschwindigkeiten



Punktdichte bei 600 kHz (2 x 300 kHz) bei kurzen Zielweiten und verschiedenen Geschwindigkeiten

Die Punktdichte nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit des Messfahrzeuges exponentiell ab. Dies gilt ebenso bei zunehmender Distanz zum Aufnahmeobjekt.

Fazit: Für alle morphologischen Naturraummessungen im ufernahen Bereich reichen die erzielbaren Punktdichten und Punktgenauigkeiten bei den angestrebten Fahrgeschwindigkeiten von 30-40 km/h definitiv aus.

5) Wie ist die min./max. Scanreichweite, Scanbereich und Scanwinkel?

Die minimale Reichweite, ab der eine Distanzmessung möglich ist, beläuft sich auf 1,5 m. Die beiden verwendeten Laserscanner haben relativ zueinander einen Abstand von ca. 70 cm und sind üblicherweise auf dem Dach eines Geländefahrzeuges montiert. Aufgrund dieser Konfiguration entstehen praktisch keine Datenlücken. Sollte die Distanz zu einem Objekt die minimale Reichweite einmal nicht erreichen, wird das Objekt durch den zweiten Scanner aufgenommen. Die maximale Reichweite beträgt bei einer gewählten Scanrate von 50 kHz 500 m. Bei 300 kHz wird nur noch eine maximale Reichweite von 200 m erreicht. Die beiden Laserscanner des VQ-250 weisen jeweils ein Sichtfeld von 360° auf und besitzen somit bezüglich des Scanbereiches keine Einschränkungen. Zudem sind sie bezüglich einer horizontalen und vertikalen Ebene schräg angeordnet. Hierdurch können Schattenbereichen des einen Scanners durch den anderen Scanner aufgenommen werden.

Fazit: Die minimale Scanreichweite liegt bei 1,5 m, die maximale Scanreichweite sollte die 200 m-Marke nicht überschreiten, aufgrund der Vorwärtsbewegung des Fahrzeugs und des 360° Scanwinkels sind eigene Abschattungen durch das System selbst nicht zu verzeichnen.

6) Wie verhält sich die Lasermesspunktgröße in Abhängigkeit von der Reichweite?

Der VQ-250 verfügt über eine Laserstrahlabweichung von 0,35 mrad (Milli-Radian). Das entspricht einem Winkel von 0,02°. Bereits beim Verlassen weist der Laserstrahl eine Breite von 7 mm auf. Bei einer Entfernung von 50 m trifft der Strahl mit einem Durchmesser von 18 mm auf ein Objekt auf und bei einer Entfernung von 100 m bereits mit 36 mm Durchmesser. Für die maximale Reichweite von 500 m ergibt sich demnach eine Punktgröße von 18 cm.

Fazit: Die Lasermesspunktgröße ist im angestrebten Reichweitenbereich von 200 m sehr gut und selbst im maximalen Reichweitenbereich von 500 m für Naturraummessungen völlig ausreichen und somit uneingeschränkt nutzbar.

7) Genauigkeitsbetrachtung: Korrelation Fahrgeschwindigkeit, Scanrate, Messpunktdichte?

Wurden mehrere Scans vorgenommen (bspw. vom Strand und vom Deich aus), können diese zueinander angepasst werden. Zunächst werden mittels der sog. Boresight-Kalibrierung Korrekturen der Orientierung von Scanner und IMU-Einheit zueinander vorgenommen. Diese können durch den Vergleich von Ebenen aus gegenläufigen Scanstreifen bestimmt werden. Die folgende Anpassung der einzelnen Streifen zueinander

verläuft ebenfalls über einen Vergleich von Ebenenpaaren. Hausdächer bspw. sind für diesen Vergleich am besten geeignet. Bei Frage 4 wurde bereits eingehend behandelt wie sich die Scanrate und die Fahrgeschwindigkeit auf die Messpunktdichte auswirken. Je höher die verwendete Scanrate ist und je langsamer das Fahrzeug fährt, desto höher ist die Anzahl der Punkte pro m².

Fazit: Die bekannten und dargestellten Korrelationen von Fahrgeschwindigkeit, Scanrate und Messpunktdichte liefern in allen Fällen mit den vorgegebenen Parametern sehr gute Ergebnisse.

8) Erfassung von Rauigkeitsbeiwerten der reflektierten Materialien möglich?

Intensitätsbilder der Rückstreuung des Laserscanners können genutzt werden, um Aussagen zur Beschaffenheit der Oberflächen zu machen. Glatte Oberflächen reflektieren das auftreffende Lasersignal eher in einem Winkel, der dem Auftreffwinkel entspricht. Somit kommt nur ein geringer Teil des Signals zurück zum Scanner. Bei rauen Flächen verhält es sich umgekehrt, wodurch Punkte eine höhere Intensität aufweisen. Aufgrund dessen sind Fassadenpunkte in der folgenden Intensitätsdarstellung heller abgebildet als Punkte des Daches.



Intensitätsbild eines Hauses im Gebiet Hörnum-Odde

Fazit: Eine Unterscheidung von Gebäuden und befestigten Deichtrassen gegenüber natürlichen Strukturen (Sandstrand, Pflanzen, Bäume) ist über die erfassten Rauigkeitsbeiwerte möglich.

9) Navigationspfad, GPS/INS Initialisierung, GPS-Abschattungen

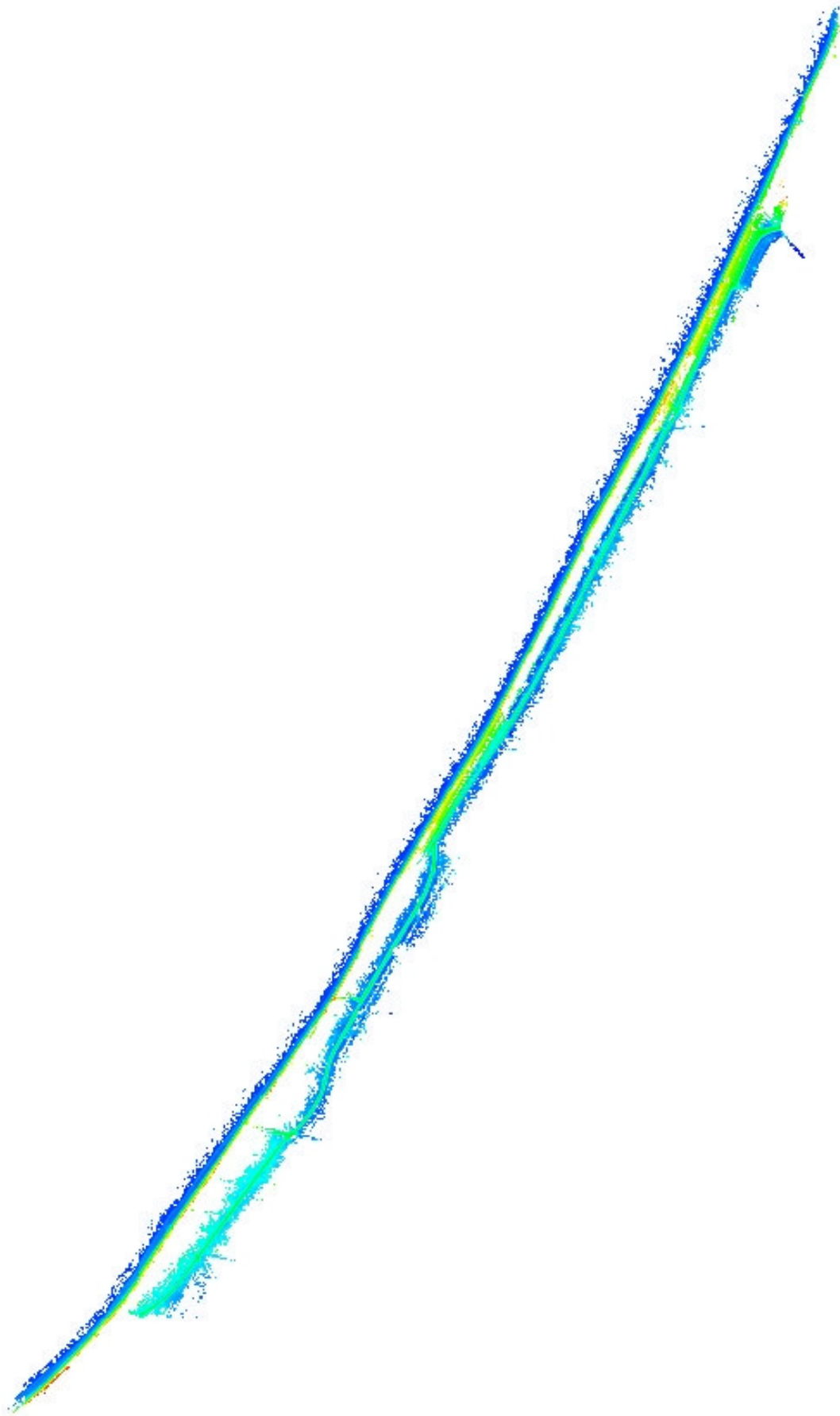
Eine GPS/INS Initialisierung muss vor Beginn jeder Messungskampagne durchgeführt werden. Für die Initialisierung der GPS/INS-Einheit muss diese für eine kurze Zeit auf eine Geschwindigkeit von 60-70 km/h beschleunigt werden. Dafür ist eine in der Nähe befindliche Straße zu wählen, auf der mindestens 70 km/h gefahren werden darf.

Der GNSS-Empfänger des Riegl VMX-250-Systems kann Signale von sowohl GPS als auch GLONASS-Satelliten empfangen. Aufgrund dessen ist die Sicht zu ausreichend Satelliten fast immer gegeben. Größere, die Güte der Positionsbestimmung beeinflussende Abschattungen sollten daher weder am Strand noch auf Deichen auftreten und stellen somit kein Problem dar.

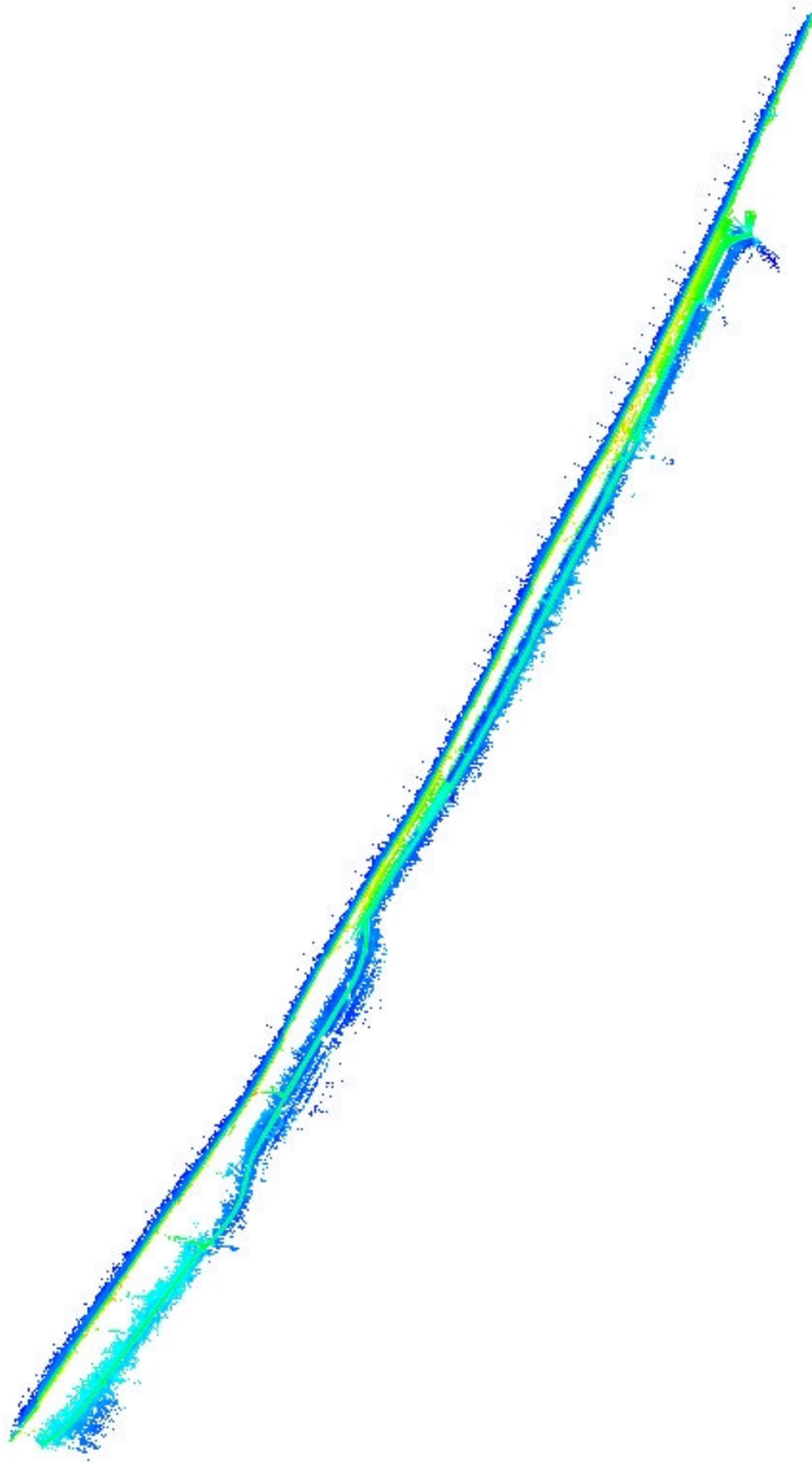
Fazit: In der Regel sind im ufernahen Bereich alle Vorgaben für die problemlose GPS/INS Initialisierung und GPS-Vermessung vorhanden.

10) Gibt es Probleme durch Laserabschattungen hinsichtlich der Deichfußfassung?

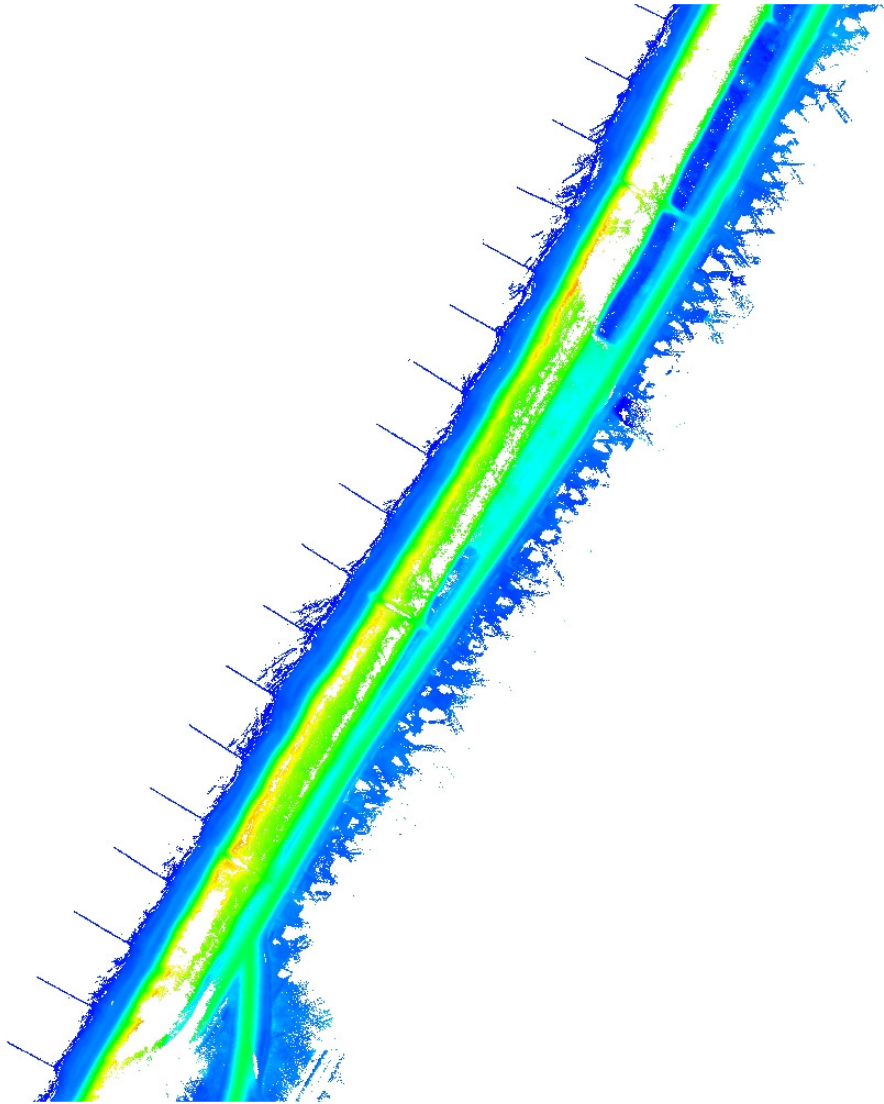
Wenn möglich, dann wird sowohl vom Strand als auch vom Deich aus mit dem MLS-Verfahren gescannt. Da von einem Fahrzeug aus gemessen wird, ist eine vollständige Durchdringung des Waldes hinter dem Deich abhängig von der Breite Waldes. Trotz der steilen Aufnahme der Deichfüße vom Deich aus, ergaben sich keine Probleme bei Rekonstruktion des Deichprofils. Vom Strand aus konnten nur bis zur seeseitigen Dünenoberkannte Punkte aufgenommen werden.



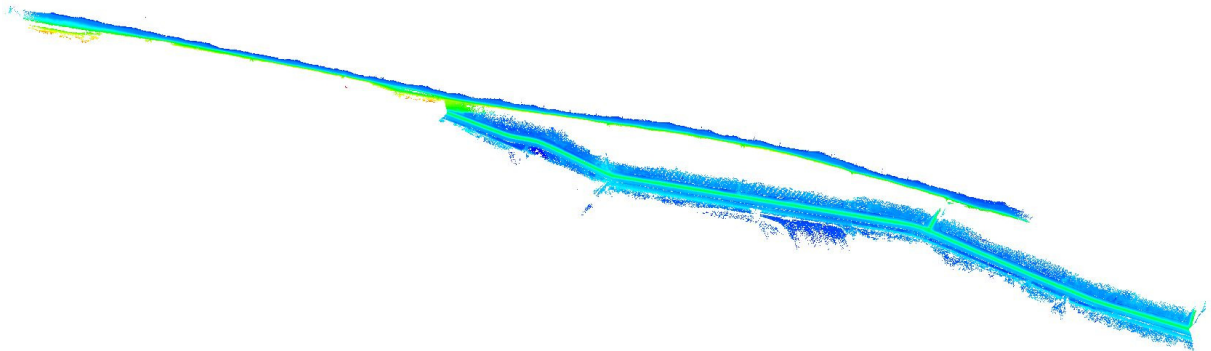
MLS 11-2012 Wustrow



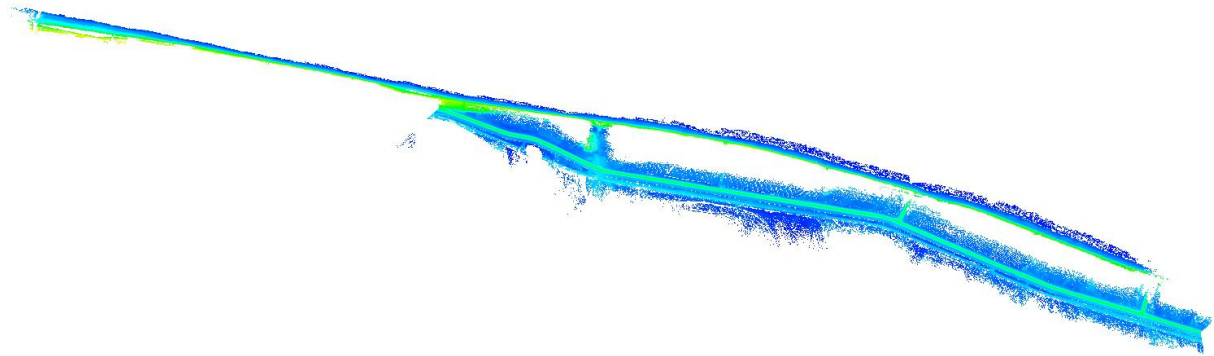
MLS 03-2013 Wustrow



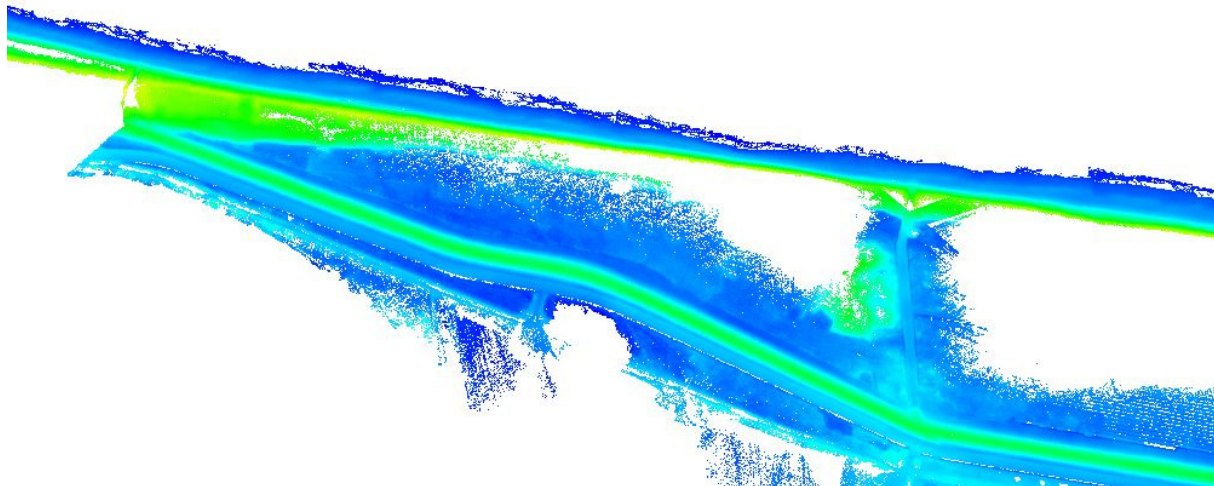
MLS 03-2013 Wustrow Detail



MLS 11-2012 Prerow



MLS 03-2013 Prerow



MLS 03-2013 Prerow Detail

Fazit: In der Regel gibt es bei der Vermessung vom Strand aus, von der Deichkrone bzw. von der landseitigen Dünen- oder Deichseite keine oder wenig Probleme mit evtl. Abschattungen des Deichfußes.

11) Existieren Zugangsmöglichkeiten bzw. -einschränkungen des Messfahrzeuges?

In Strandbereichen erfolgt der Zugang des Messfahrzeuges über Strandaufgänge. Im Bereich der Steilküste existieren keine direkten Zugangsmöglichkeiten. Hier muss der Aufnahmebereich am Strand entlang über u. U. weite Strecken angefahren werden. Oft machen Findlinge im Steilküstenbereich eine solche Unternehmung unmöglich. In diesem Fall ist eine Aufnahme von Steilküstenabschnitten per MLS praktisch nicht durchführbar. Da Strandauf- oder -abspülungen überwiegend im Flachküstenbereich auftreten, reicht eine MLS-Aufnahme in diesen Abschnitten aus.

Fazit: Problemlose Erfassung an sandigen Flachküstenabschnitten. Eine Vermessung an stark steinigen Flachküstenbereichen sowie an Steilküstenbereichen ist mittels MLS nicht möglich und auch bei feinsandigen, neu akkumulierten Strandbereichen besteht die Gefahr des Festfahrens des Fahrzeuges.

12) Wie übt sich Schneebedeckung auf die Messergebnisse aus?

Laserdistanzmessungen auf schnee- oder eisbedeckten Flächen liefern nur einen geringen Teil der Messwerte zurück. Aufgrund der glatten und dadurch stark reflektierenden Oberfläche von Eis und Schnee werden die ausgesandten Laserimpulse überwiegend in andere Richtungen als die Eintreffrichtung reflektiert.

Fazit: Schneebedeckung führt zu quantitativen und qualitativen Verlusten bei den Messergebnissen, eine Vermessung ist aber durch Veränderung der Aufnahmeparameter (Geschwindigkeit, Scanrate, Punktdichte) prinzipiell möglich.

13) Datenerfassung, Datenmenge, Zeitraum der Bearbeitung?

Für die Aufnahme des Strandabschnittes zwischen Wustrow und Dierhagen sowohl vom Strand als auch vom Deich aus wurde weniger als eine Stunde benötigt. Die Bearbeitung der aufgezeichneten Daten nimmt dagegen wesentlich mehr Zeit in Anspruch. Insgesamt beläuft sich die Bearbeitungszeit auf ca. zwei Werkzeuge. Am ersten Tag erfolgt die Berechnung der Trajektorie sowie im Anschluss daran die Prozessierung der Rohdaten. Weiterhin werden die Spuranpassung und die Transformation in ein Koordinatensystem vorgenommen. Es folgt die Anpassung des Datensatzes an Referenzmessungen und die Ausgabe im las-Format. Am zweiten Tag wird die Punktwolke klassifiziert. Dies erfolgt zunächst automatisch und wird im Anschluss manuell kontrolliert und nachbearbeitet.

Eine mögliche Einteilung der Punkte kann in folgende Klassen vorgenommen werden:

- Boden
- Vegetation
- Gebäude

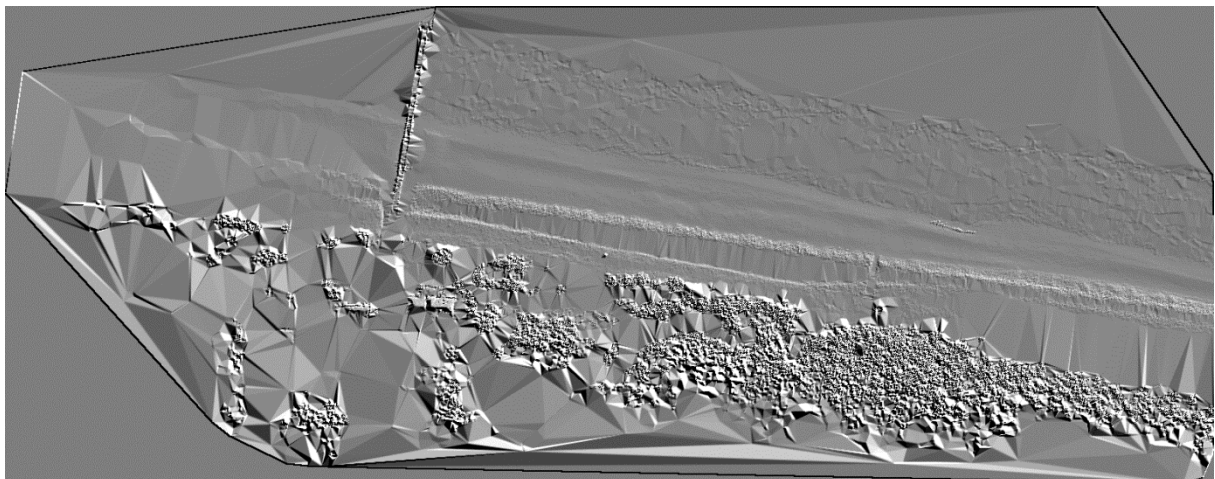
Die Punkte können anschließend als Endprodukt in Form eines Digital Terrain Model (DTM) oder als Digital Surface Model (DSM) ausgegeben.

Bei der Aufnahme von Wustrow-Dierhagen im März 2013 entstand durch MLS-Messungen vom Strand und vom Deich aus eine Rohdatenmenge von ca. 20 GB. Die Punktwolke wurde im Verlauf der Nachbearbeitung stark ausgedünnt, da die Punktdichte in der Nähe des Aufnahmefahrzeuges bis zu 4000 Punkte/m² betrug. Letztlich betrug die Größe der Daten nur noch ca. 600 MB.

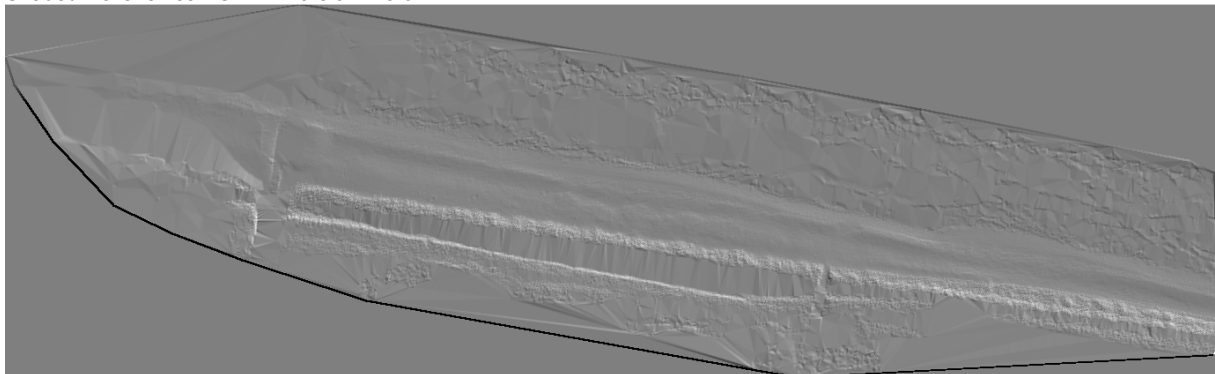
Fazit: Die Datenmengen und Bearbeitungszeiten sind stark von den Aufnahmeparametern abhängig, bei optimierten Verarbeitungsalgorithmen benötigt man pro MLS-Datenerfassungsstunde 8 Stunden für das Postprocessing.

14) Welche Datenformate, Datenableitungen, Datenspeicherung?

Bei der Ausgabe der klassifizierten Punktwolke können verschiedenste Formate gewählt werden. Zum einen das weit verbreitete las-Format, welches u.a. die Klasseninformation zu jedem Punkt enthält. Die Punkte können auch als gerastertes Modell ausgegeben werden. Hierbei können entweder nur die Bodenpunkte als Digital Terrain Model (DTM) oder zusätzlich Punkte der Vegetation und Bebauung als Digital Surface Model (DSM) ausgegeben werden. Für eine bessere Visualisierung können farbhöhenkodierte Bilder oder sogenannte Shaded Reliefs berechnet werden.



Shaded Relief eines DSM im Bereich Prerow



Shaded Relief eines DTM im Bereich Prerow

Fazit: Durch Verwendung des LAS-Formates ist Standardsoftware verwendbar und es können problemlos Digitale Gelädemodelle (DSM, DTM) erzeugt werden.

15) Datenaufbereitung, u.a. CAD-Modell, Zeit-/Leistungsverhältnis, Genauigkeitsverlust

Eine Rückführung der Daten in bspw. ein CAD-Modell hat im Zuge des LEDA-K Projektes nicht stattgefunden. Aussagen über das Zeit-/Leistungsverhältnis können daher nicht getroffen werden. Die Durchführung ist theoretisch möglich und wurde bereits vorher mehrfach mit Airborne Laserdaten (ALS) durchgeführt. Da diese ALS-Daten analog zum MLS im LAS-Format vorliegen, war die praktische Konvertierung nicht notwendig. Ein

Genauigkeitsverlust wurde bei der LAS-Datenverarbeitung nicht nachgewiesen, lediglich bei der Transformation in andere Koordinatennetze können die üblichen und bekannten Lage- und Höhenungenauigkeiten auftreten, die aber nicht im Zusammenhang mit dem verwendeten MLS-Verfahren stehen.

Fazit: Verlustfreie CAD-Konvertierungen sind theoretisch möglich, wurden aber im Rahmen des Projekts nicht ausgeführt.

16) Wie lautet die betriebswirtschaftliche Gesamtbewertung, Zeit- und Kostenersparnis?

- **10 km (klassische) tachymetrische Aufnahme** eines Küstenstreifens von der Uferlinie bis ca. 500 m ins Land
→ Ø 2 Mann Messtrupp, Grundlagennetz, Polygonierung, Niv., etc. ca. 3 Tage a 1.000,00 entspricht **ca. 3.000,00 €**
- **10 km Aufnahme mit terrestrischem Laserscanner (ZU FUSS)** eines Küstenstreifens von der Uferlinie bis ca. 500 m ins Land
→ Ø 2 Mann Messtrupp, GPS Orientierung, sowie ergänzende konventionelle Grundlagenvermessung, quasi Lage- und Höhenanschluss, etc. ca. 2 Tage a 1.700,00 entspricht **ca. 3.400,00 €**
- **10 km Aufnahme mit terrestrischem Laserscanner auf Jeep** eines Küstenstreifens von der Uferlinie bis ca. 500 m ins Land
→ Ø 1 Mann Messtrupp, GPS Orientierung, sowie Voraussetzung Grundlagennetz vorhanden, Verfügbar, Nutzbar, etc. ca. 1 Tage a 1.700,00 = **ca. 1.700,00 €**
- **10 km Aufnahme mit MLS Riegl-Scanner 250 (LEDA-K)** eines Küstenstreifens von der Uferlinie bis ca. 500 m ins Land
→ Ø 1 Mann Messtrupp, GPS Orientierung, sowie Voraussetzung Grundlagennetz vorhanden, Verfügbar, Nutzbar, Logistik, Admin Org., Initalisierung, Kalibrierung, etc. ca. 1h a 700,00 = **ca. 700,00 €**
- **10 km Aufnahme mit ALS** eines Küstenstreifens von der Uferlinie bis ca. 500 m ins Land
→ Ø ALS-Flug, Flugzeug, LIDAR-System, Pilot, Operator, Orientierung u.a. über SAPOS Stationen, bei 50 m mit vergleichbarere Auflösung, 2 gegenläufige Flugstreifen, ca. 15', ca. 400,00 € (Flugstunde inkl. Erfassung, Auswertung) **ca. 1.500,00 €**

Eine betriebswirtschaftliche Gesamtbewertung gestaltet sich schon aufgrund ständig wechselnder Preise als schwierig, zu dem gibt es starke Abweichungen im Preis für die jeweiligen Verfahren, wenn unterschiedliche Aufnahmegenaugigkeiten, Aufnahme­flächengrößen, Punktdichten, Termine und Fristen, Ausschreibungsmodalitäten, Kooperationen mit Dritten usw. gewählt werden (können). Die unterschiedliche Punktdichte wirkt sich später insbesondere bei der Verarbeitung der Daten im Postprozessing aus und kann damit die reinen Datenerfassungspreise im Endprodukt stark verändern, d.h. das auch gerade bei der Vorgabe der Auslieferungsparameter schon das geeignete Aufnahmeverfahren gewählt werden muss, um ein optimales Preis-Leistungsverhältnis zu erzielen. Grob verallgemeinernd kann man festlegen, dass sich derzeit das MLS zwischen dem terrestrischen Laserscan mit bis zu 10 km bzw. km² und dem ALS ab ca. 80 km bzw. km² in der Anwendung lohnen würde.

Außerdem sind derzeit nur wenige MLS-Systeme in Deutschland verfügbar, so dass dadurch die Beschaffung und Nutzung derzeit noch relativ teuer ist, was sich bei erhoffter zukünftiger Verbreitung aber ähnlich der Entwicklung bei den ALS-Produkten (Preisverfall von 2006 mit 800 Euro/m² zu 40 Euro/m² in 2013) relativieren müsste. Es wird davon ausgegangen, dass für langgestreckte Küstenbereiche von 40-60 km bzw. bei Inseln der Einsatz vom MLS eine kostengünstige Alternative zu ALS und terrestrischem Laserscan sein wird!

Zusammenfassend haben sich folgende Einsatzmöglichkeiten des MLS-Verfahrens im Küstenschutz ergeben:

- Deicherfassung allgemein
- Deichhöhen
- Dünen- und Stranderfassung allgemein
- Strandmonitoring
- Uferlinienerfassung, Strandneigungen, Strandlängen, Strandbreiten
- Ableitung von Böschungsunterkanten und Böschungsoberkanten
- Erfassung von Vegetationsbereichen
- Monitoring von Vegetationsflächen
- Monitoring von Sackungserscheinungen
- Aufnahme von Wildschäden (z.B. Wildschweinsuhlen)
- Gebäude- und Objekterfassung

7. Methodik und Ergebnisse beim Einsatz von Drohnen (UAV)

Bisher wurde zur Ermittlung der Morphologie des Strand-Dünenbereichs und zur Erfassung von Schäden nach Sturmfluten neben den Profilaufnahmen (von maximal 3 Profilen pro Kilometer bei Naturraummessungen bis zu nur 5 Profilen an der gesamten Flachküsten nach

Sturmfluten) auch für kleinere Gebiete Airborne Laseraufnahmen (5 Gebiete à 5-10 km Küstenlänge pro Jahr bzw. Schadensereignis) verwendet, um Zustand und Schäden des Uferbereiches zu ermitteln. Nach Sturmfluten haben Mitarbeiter der Staatlichen Ämter für Landwirtschaft und Umwelt (StÄLUs) vor Ort Fotoaufnahmen gemacht, mit deren Hilfe dann Abtragsraten und -volumina überschläglich ermittelt wurden, um den monetären Schaden und auch die Notwendigkeit von Reparatur- oder Aufpülmaßnahmen zu beurteilen. Das sind im Endeffekt unsichere Verfahren mit der großen Gefahr von manuellen Fehleinschätzungen bzw. –berechnungen. Jede flächenhaftere Aufnahme mit geprüften und einheitlichen Werkzeugen und Methoden muss zwangsläufig zur Verbesserung der Ergebnisse führen. Diesem Ziel standen bisher die viel zu hohen Kosten von klassischer Vermessung und ALS entgegen.

Im Forschungsprojekt LEDA-K sollten neue, luftgestützte Aufnahmegерäte, u.a. Multikopter oder Unmanned Aircraft Vehicles (UAV, die sogenannten "Drohnen") für den speziellen Einsatz im Küstenschutz getestet werden.

Zum Einsatz kamen dabei verschiedene, von der Firma CIS GmbH Rostock modifizierte UAVs auf Basis des Modellflugzeuges „Easy Glider Pro“ (Siehe folgende Fotos)







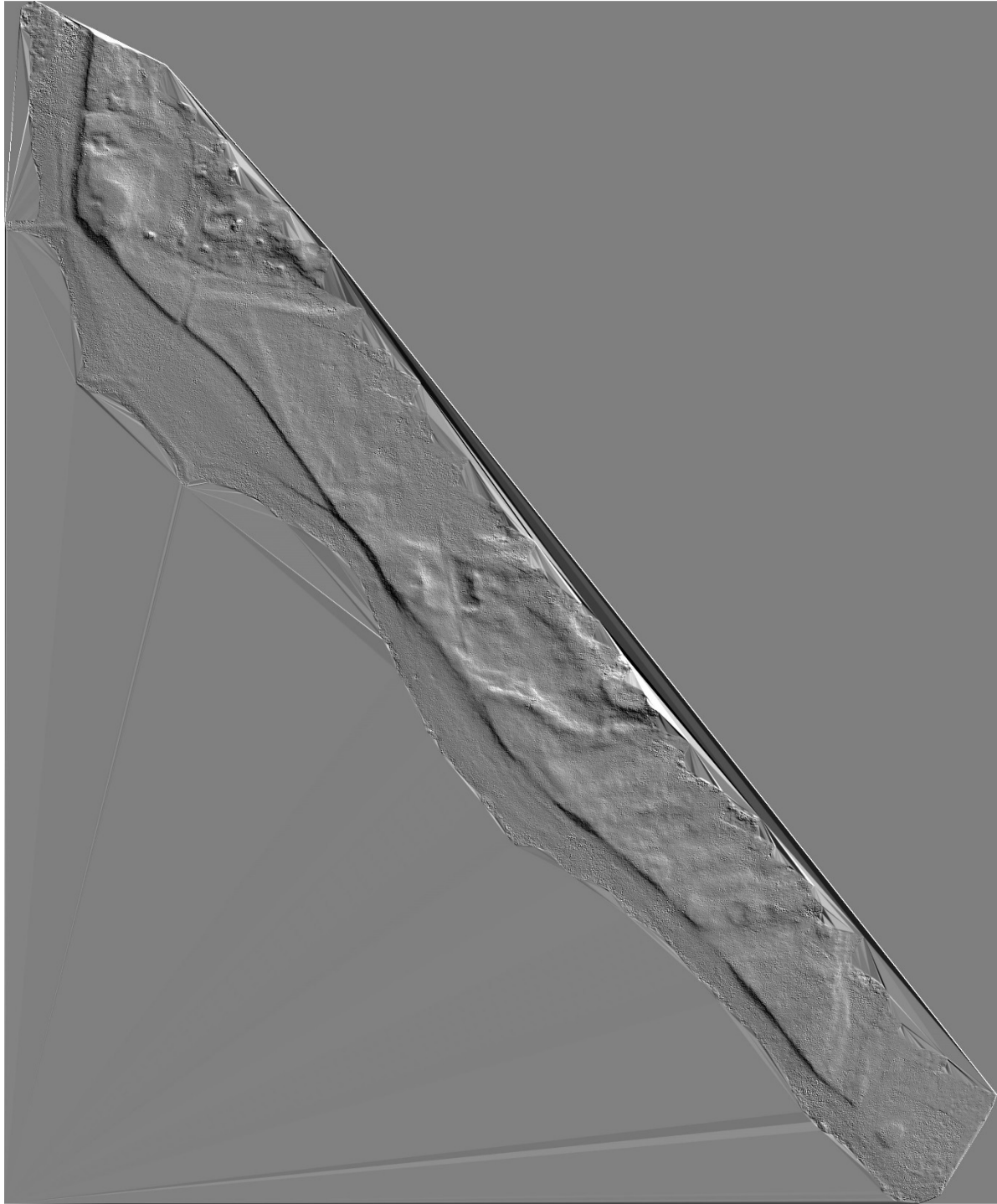
Folgende Fragestellungen standen dabei im Projekt-Fokus, wobei von vornherein eine Verschneidung der Luftbilddaten aus den UAVs mit den Ergebnissen der MLS-Vermessung vorgesehen war:

- Zustandserfassung Deiche und Dünen allgemein
- Zustandserfassung/Abbruchraten nach Sturmfluten im Strand-/Dünenbereich
- Vegetation des Deiches, Strandhaferzustand/-dichte in den Dünen
- Monitoring Ufer-Strand-Dünen
- Monitoring im Steilküstenbereich bzw. Dokumentation von Abbrüchen
- Grundlagen für Digitale Geländemodellierung
- Beitrag zu Volumen-und Massenberechnungen nach Sturmfluten
- Möglichkeit von Stereoaufnahmen mit entsprechenden Verarbeitungsmethoden

Folgende Projektergebnisse wurden erzielt:

**17) Ist die Zustandserfassung von Deichen und Dünen im Allgemeinen möglich?
Monitoring von Ufer-Strand-Dünen?**

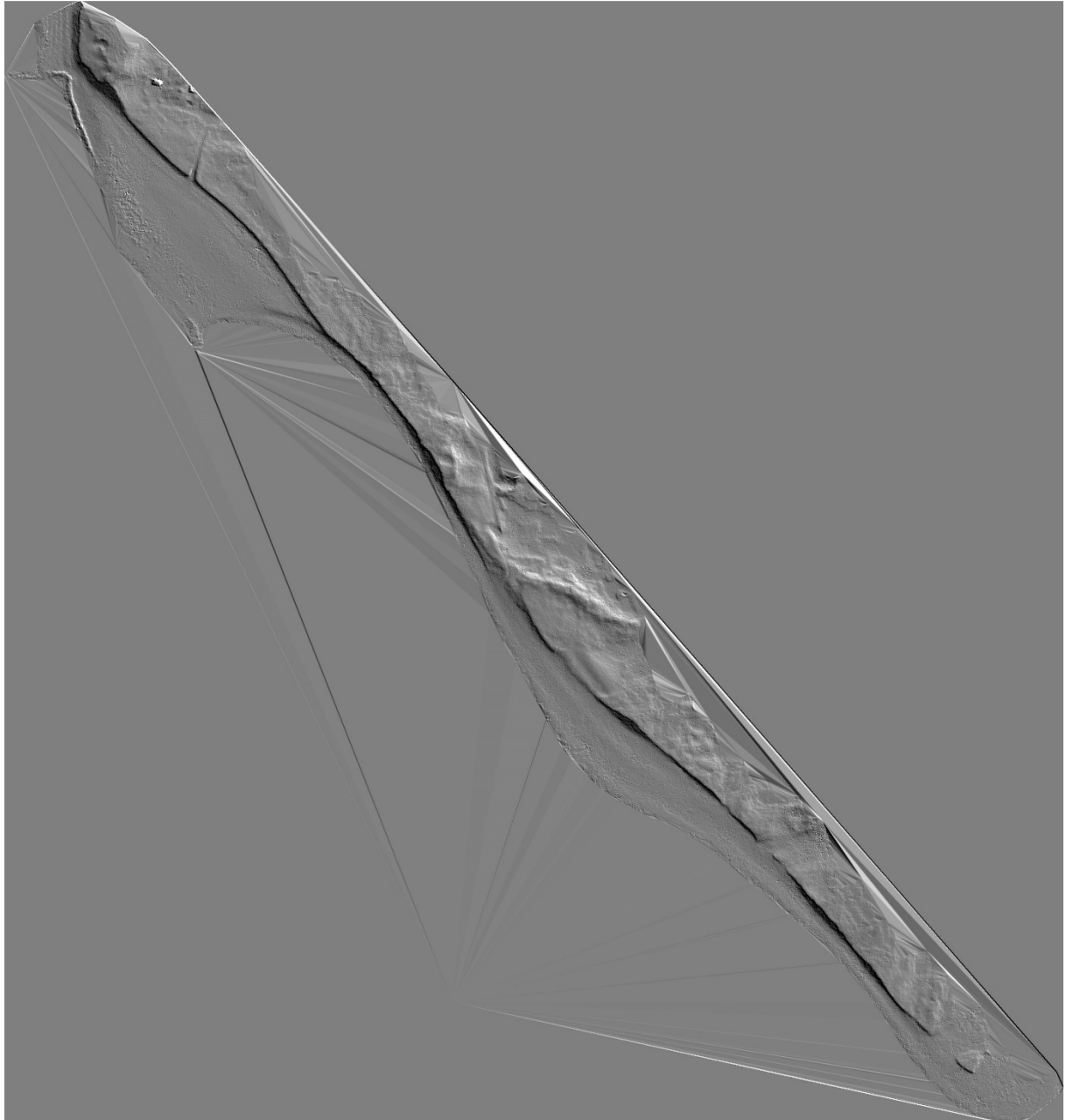
Die allgemeine Zustandserfassung ist sowohl optisch durch generierte Orthophotos als auch rechnerisch durch die erzeugten Punktwolken möglich. Die folgenden Abbildungen zeigen die Zustandserfassung von Hörnum-Odde zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten als Shaded Relief und als Ortophoto:



Schummerung des Gebietes Hörnum-Odde 06.11.2012



Orthofoto des Gebietes Hörnum-Odde vom 06.11.2012



Schummerung des Gebietes Hörnum-Odde 25.01.2013



Orthofoto des Gebietes Hörnum-Odde vom 25.01.2013

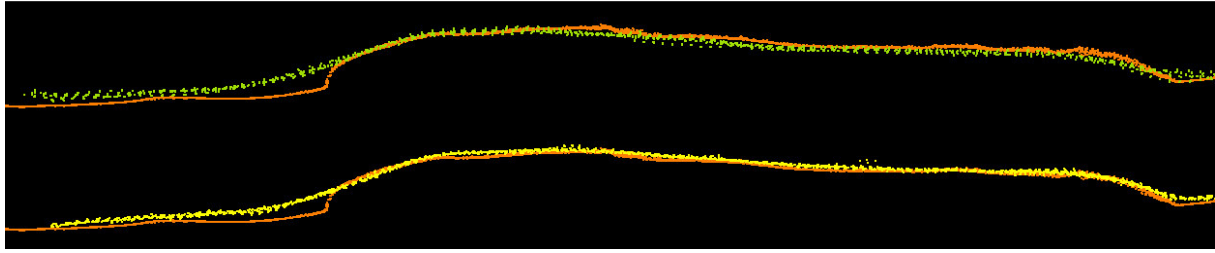


Schummerung des Gebietes Hörnum-Odde 05.03.2013



Orthofoto der gesamten Südspitze im Gebiet Hörnum-Odde vom 03.05.2013

Die Schummerungsdarstellungen der drei Messkampagnen sind im Vergleich zu den MLS-Daten weniger detailliert. Die wesentliche Morphologie kommt zwar zum Vorschein, jedoch haben die Strukturen einen geglätteten Charakter. Teilweise können in den Daten rechteckige Strukturen erkannt werden, welche den Ausdehnungen der Bilder entsprechen. Diese sind auf eine ungenügende Verknüpfung der Bilder zurückzuführen. Zudem ist der Profilverlauf der aus den Bildern errechneten Punktwolken im Vergleich zu den Referenzdaten äußerst geglättet. Der Grad der Glättung ist im Strandbereich stärker als auf der Düne. Dies ist auf die unterschiedliche Texturierung in den beiden Bereichen und die damit verbundene Robustheit der Punktzuordnung im Anpassungsprozess zurückzuführen. Dadurch kann gesagt werden, dass die auffälligere Bepflanzung auf der Düne zu einer besseren Übereinstimmung mit den Referenzdaten führt.



Fazit: Die allgemeine Zustandserfassung ist sowohl optisch durch generierte Orthophotos als auch rechnerisch durch die erzeugten MLS-Punktwolken möglich.

18) Flughöhe, -geschwindigkeit und -dauer?

Die maximale Flughöhe der Drohne beträgt mit der projektzugehörigen Zuladung etwa 300 m. Im Zuge des Projektes kam die Drohne in einer maximalen Höhe von 200 m zum Einsatz. Als optimale Flughöhe ergab sich aber ein Wert von 120 m. Wird die Flughöhe niedriger angesetzt, weisen die Bilder eine zu geringe Überlappung auf. Wird mehr als 120 m gewählt, zeigen die Fotos aufgrund der größeren Entfernung zum Boden zu wenige Details, wodurch die generierte Punktwolke zu Einzelheiten ungenügend wider gibt. Je nach Kamera variieren der Aufnahmebereich/ -winkel und die maximale Auflösung. Damit ist die optimale Flughöhe zugleich abhängig von der gewählten Kamera. Im Zuge des LEDA-K Projektes kamen nur Kameras des Typs Casio EX-Z800 zum Einsatz.

Für eine stabile Flugbahn der Drohne wird eine Windgeschwindigkeit von mind. 5 km/h benötigt. Die absolute Geschwindigkeit der Drohne zur Zeit der Aufnahme beträgt im Idealfall 72 km/h (~20 m/s). Dabei versucht die Drohne mit maximal 70% ihrer Motorleistung diese

Geschwindigkeit zu erreichen, da dieses Leistungsniveau auf Dauer den Motor schont. Zusätzlich dazu fällt die Motorleistung beim Rückflug zur Nutzspur auf 30% zurück. Die Flugdauer hängt stark sowohl von der Umgebungstemperatur als auch von den vorherrschenden Windverhältnissen ab. Je kälter es ist und je stärker der Wind weht, desto weniger Zeit kann die Drohne in der Luft verbleiben. Denn durch Kälte entladen sich die Akkus schneller und bei viel Wind muss der Motor mehr Leistung aufbringen, um seine absolute Geschwindigkeit bei zu behalten. Beide Einwirkungen erhöhen den Stromverbrauch eines Akkus erheblich. Zusätzlich darf die Drohne nur bis zu einer maximalen Windgeschwindigkeit von 30 km/h betrieben werden. Im Laufe des Testprojektes wurde das Fluggerät zudem so angepasst, dass sie 2 Akkus tragen kann und somit die Zuverlässigkeit und Dauer eines Fluges erhöht wurde. Mithilfe der zwei Akkus wurde eine Flugzeit von bis zu 40 min ermöglicht.

Fazit: Die optimale Flughöhe beträgt 80-120 m bei Fluggeschwindigkeiten von 5-70 km/h. Die maximale Windgeschwindigkeit darf dabei 30 km/h nicht überschreiten und die dabei erzielten Flugzeiten im Winterbetrieb liegen zwischen 20 und 35 Minuten in Abhängigkeit der verwendeten Akkus und Witterungsverhältnisse.

19) Kombination MLS und Drohne während der Aufnahme möglich?

Die parallele Durchführung von Drohnenbefliegungen und MLS-Messungen ist logistisch möglich. Dabei entstehen allerdings zusätzliche Kosten, da sowohl für den Betrieb der Drohne als auch des MLS-Systems jeweils zwei Mitarbeiter benötigt werden. Aufgrund dessen müssen vier anstatt zwei Mitarbeiter vor Ort sein.

Die Idee, die Drohne vom Fahrzeug aus parallel zur MLS-Aufnahme zu bedienen, ist nicht realisierbar und scheitert aus einer Vielzahl von Gründen und Problemen (u.a. gesetzliche Bestimmungen, unterschiedliche Geschwindigkeiten, Flugplanungssoftware, Sicherheitsbestimmungen, Streifenproblematik).

Fazit: Eine Steuerung der Drohne vom MLS-Fahrzeug ist nicht möglich.

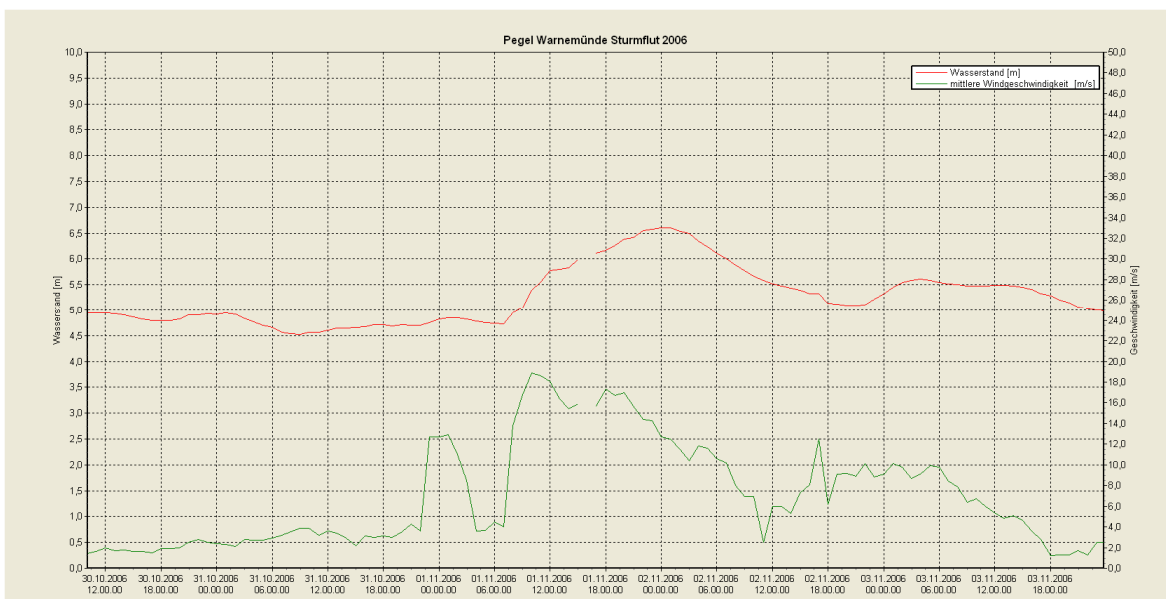
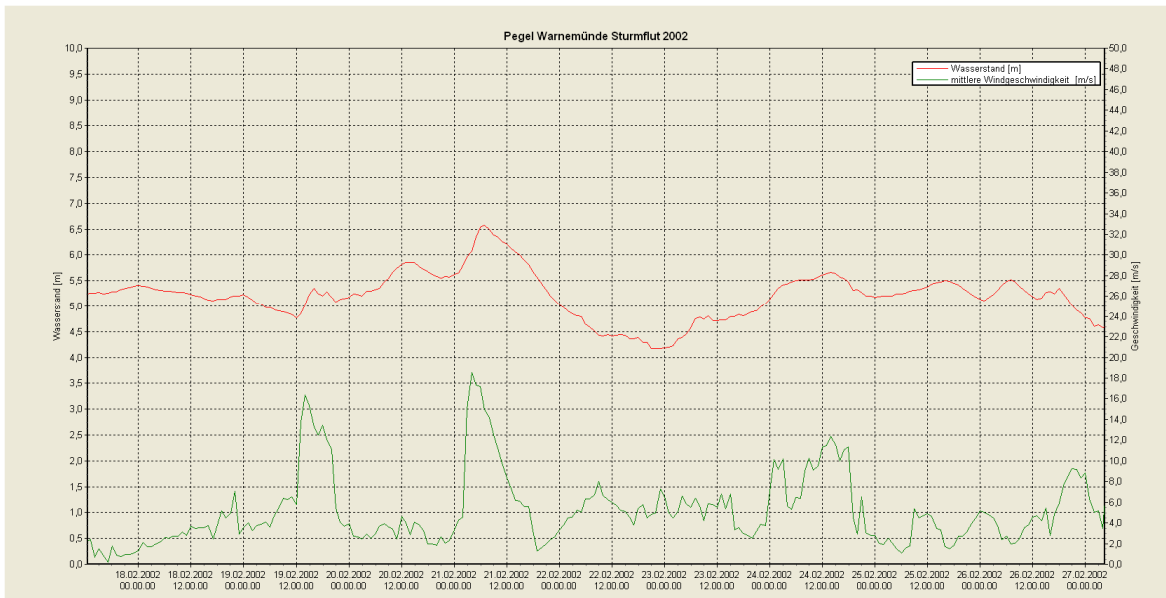
20) Wintereinsatz der Drohne?

Der Einsatz der Drohne bei Temperaturen unter 0°C ist prinzipiell möglich. Jedoch hat die Umgebungstemperatur einen Einfluss auf die Dauer des Fluges, da sich die Akkus bei Kälte schneller entladen. Die Verwendung von Isoliermaterial hat hier Verbesserungen erwirkt. Auch das Mitführen von 2 Akkus hat die Zuverlässigkeit und Dauer eines Fluges erhöht. Bei leichter Schneebedeckung weist das Aufnahmegebiet eine auffälligere Texturierung auf. Matching-Algorithmen liefern hier bessere Ergebnisse da Muster robuster zu erkennen und Zuordnungen in benachbarten Bildern eindeutiger sind. Allerdings ist eine 3D-Punktgenerierung bei vollständiger Schneebedeckung nicht möglich.

Fazit: Der Einsatz der Drohne im Winter ist mit Einschränkungen möglich, solange keine vollständige Schneebedeckung vorliegt.

21) Tatsächliche Windanfälligkeit (nach Sturmflut!)?

Beobachtungen der Pegelstände und Windgeschwindigkeiten zeigten, dass 24 Stunden nach einer Sturmflut der Wind soweit abgeschwächt ist, dass die LEDA-K Drohne sicher zum Einsatz kommen kann. Die beiden folgenden Abbildungen zeigen, dass die Windgeschwindigkeit innerhalb von einem Tag bereits wieder Durchschnittswerte erreicht hat. Zudem erreichen die Windgeschwindigkeiten ihren Spitzenwert bereits bevor der Wasserstand seinen Höchststand erreicht. Das hat zur Folge, dass nach dem Wasserhöchststand durch eine Sturmflut die Windgeschwindigkeit bereits soweit abgeschwächt ist, dass eine Drohnenbefliegung einen Tag nach einer Sturmflut gefahrlos möglich ist.



Fazit: Der Einsatz der Drohne direkt nach Sturmfluten ist bis Windstärke 4 problemlos möglich.

22) Kombinationsmöglichkeit der UAV-Daten mit MLS und DGM?

Die durch MLS-Messungen und durch Drohnenbefliegung erzeugten Punktwolken können in gleiche Datenformate ausgegeben werden. Damit ist sowohl ein Vergleich als auch ein Zusammenführen der verschiedenen Datensätze möglich. So können bei MLS-Messungen auftretende Abschattungsgebiete durch Daten der LEDA-K Drohne aufgefüllt werden. Dabei ist zu beachten, dass die aus digitalen Bildern heraus generierte Punktwolke die Erdoberfläche als DSM und nicht als DTM abbildet. Bei normaler bis dichter Begrünung der Flora können durch die Software an diesen Stellen keine Bodenpunkte berechnet werden. Eine weitere Möglichkeit der Kombination beider Messungen, ist die Erstellung eines texturierten DGMs. Dabei werden die Bildinformationen der Drohne auf das Oberflächenmodell projiziert. Dies ermöglicht Echtfarbenansichten und –animationen eines aufgenommenen Geländes für Präsentationen und Kameraflüge.

Fazit: Die Kombination von UAV, MLS- und DGM-Daten ist möglich und sinnvoll, da die Verschneidung dieser Daten zu einem deutlichen Erkenntniszuwachs führt.

23) Möglichkeit der Zustandserfassung/Abbruchraten nach Sturmfluten im Strand-/Dünenbereich? Beitrag zu Volumen- und Massenberechnungen nach Sturmfluten möglich? Monitoring im Steilküstenbereich bzw. Dokumentation von Abbrüchen möglich?

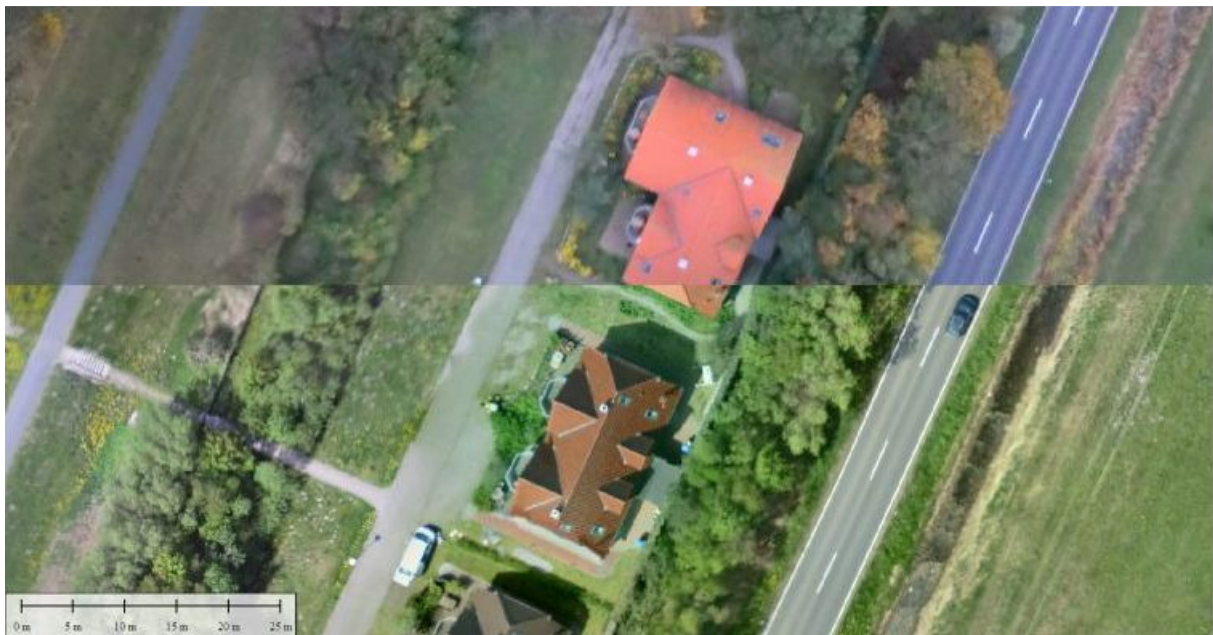
Die Zustandserfassung nach Sturmfluten ist prinzipiell möglich. Jedoch müssen Passpunkte über das gesamte Aufnahmegebiet verteilt sein, damit eine genaue Georeferenzierung ermöglicht wird.

Im Gebiet Wustrow-Dierhagen konnte eine günstige Passpunktverteilung erreicht werden. Dies lag einerseits an der Bebauung hinter dem Deich. Andererseits befinden sich im Wasser Buhnen, welche in den ALS-Daten gut lokalisiert und entsprechende Koordinaten abgeleitet werden konnten.



Passpunktverteilung im Bereich Wustrow-Dierhagen

Ein Vergleich mit einem Referenzbild zeigt im überwiegenden Teil eine hohe Übereinstimmung. In den Randbereichen, in denen schon die Zusammensetzung der Einzelbilder nicht überzeugend war, ist folglich auch eine Abweichung zum Referenzbild zu erkennen.



Vergleich des erzeugten zum Referenzbild im mittleren Bereich



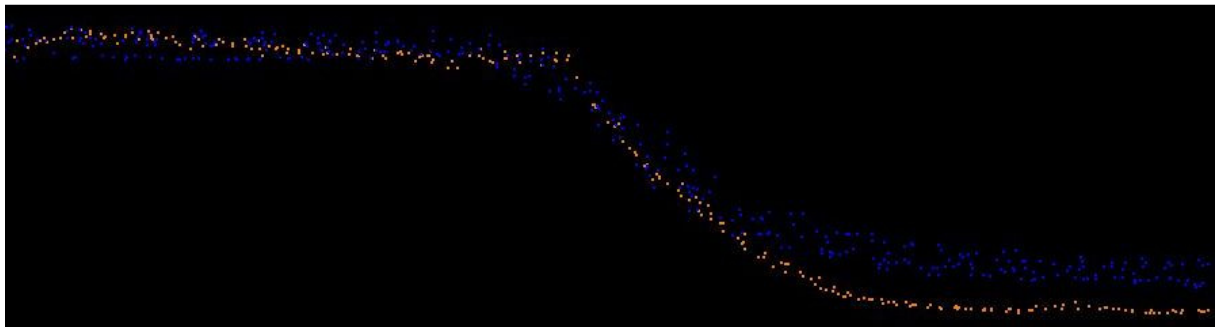
Vergleich des erzeugten zum Referenzbild im südlichen Randbereich

Im Gebiet Hörnum-Odde dagegen war die Passpunktverteilung nicht optimal. Geeignete Punkte traten vermehrt im nördlichen Bereich auf. Im Süden konnten Passpunkte lediglich in einem Areal um den Leuchtturm gefunden werden.

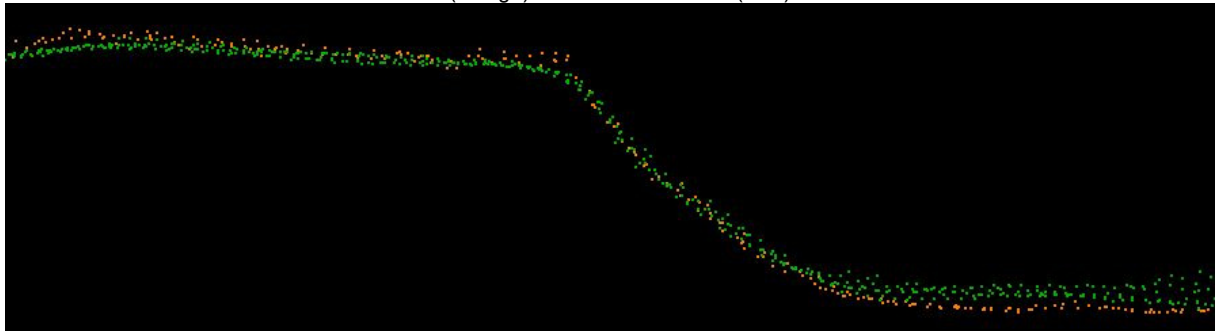


Passpunktverteilung im Gebiet Hörnum-Odde

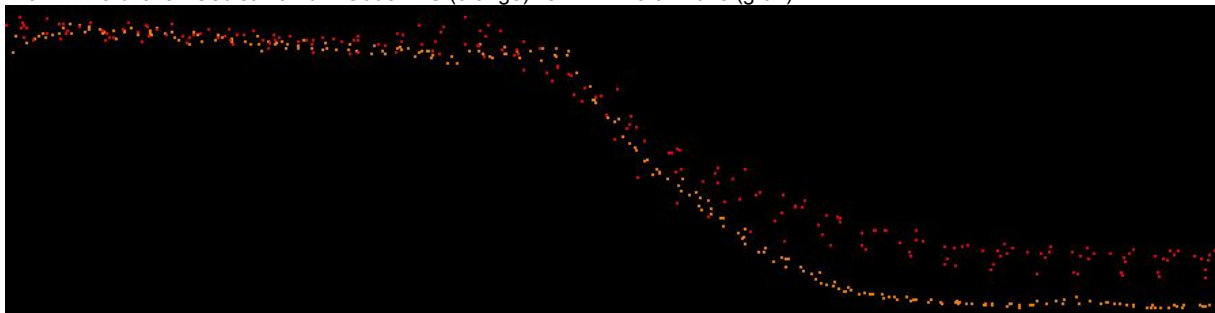
Eine Folge davon ist, dass die Übereinstimmung der Punktwolken im nördlichen Bereich größer ist als im Süden.



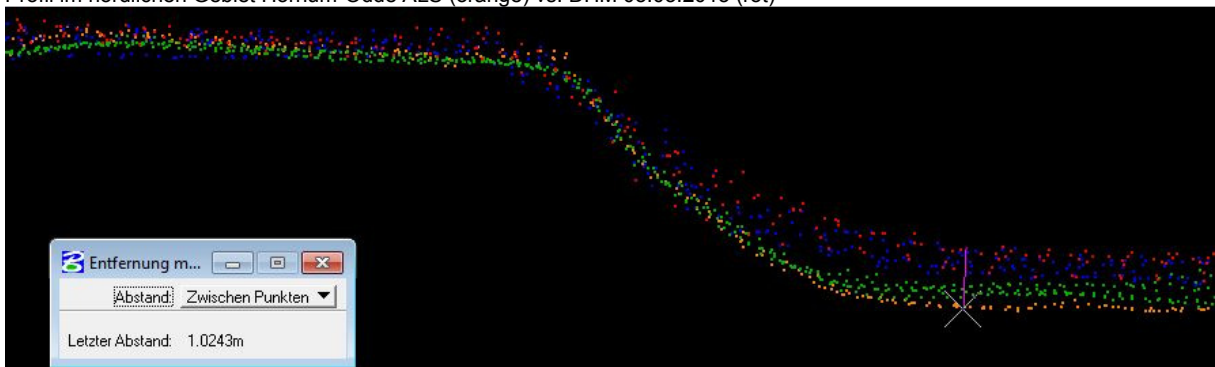
Profil im nördlichen Gebiet Hörnum-Odde ALS (orange) vs. DHM 06.11.2012 (blau)



Profil im nördlichen Gebiet Hörnum-Odde ALS (orange) vs. DHM 25.01.2013 (grün)

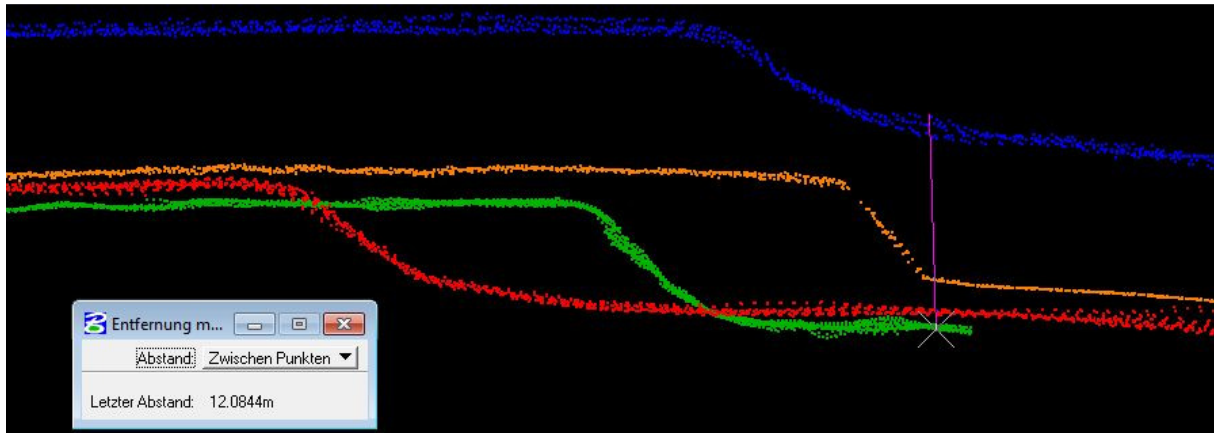


Profil im nördlichen Gebiet Hörnum-Odde ALS (orange) vs. DHM 05.03.2013 (rot)



Vergleich aller drei DHMs zum ALS-Datensatz mit maximaler Abweichung von 1m

Im Gegensatz dazu treten im südlichen Bereich von Hörnum-Odde extreme Höhenunterschiede auf. Die maximalen Abweichungen betragen bis zu 12 m. Die ist höchstwahrscheinlich auf die Passpunktverteilung zurückzuführen. Der südlichste Passpunkt befindet sich ca. in der Mitte des Untersuchungsgebietes. Je weiter südlich man von diesem Passpunkt die Profile vergleicht, desto größer werden die Abweichungen.



Vergleich aller Digitalen Höhenmodelle

Ohne eine genaue Georeferenzierung über geeignete Passpunkte, ist eine zuverlässige Ermittlung von Differenzen zwischen zwei Aufnahmen nicht möglich und damit auch keine zuverlässige Massen- oder Volumenberechnung. Differenzen würden schon allein durch Lageungenauigkeiten zwischen zwei Modellen entstehen. Passpunkte sollten daher möglichst am Rand des Untersuchungsgebietes verteilt sein, um eine stabile Geometrie zu erhalten. Außerdem sollten sie sich auf befestigten Oberflächen befinden und gut erkennbar sein. Das Auffinden geeigneter Passpunkte ist gerade im Strandbereich schwierig, da es hier kaum befestigte und gut signalisierte Punkte gibt. Abhilfe schafft hier das Anlegen von eigenen Passpunkten vor Ort in Form von Holz- oder Stoffkreuzen, die temporär im lockeren Boden befestigt werden oder durch das Aufbringen von temporären Farbkreuzen auf befestigten Flächen (Straßen, Wege). Dadurch kann die Verteilung der Passpunkte gezielt gesteuert werden. Durch das Anbringen und das Einmessen der Passpunkte vor Ort entsteht allerdings ein zusätzlicher zeitlicher und personeller Aufwand.

Fazit: Abbruchraten, Volumen- und Massenberechnungen sind theoretisch möglich und wurden auch exemplarisch durchgeführt, wobei der tatsächliche Aufwand für belastbare Aussagen mit hoher Genauigkeit mit den verwendeten Verfahren und Softwarepaketen zu hoch ist. Hier besteht zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

24) Als Grundlagen für Digitale Geländemodellierung nutzbar?

Die aus Drohnendaten generierten Punktwolken können u. U. als Grundlage für digitale Geländemodelle genutzt werden. Dafür müssen jedoch mindestens die folgenden Punkte erfüllt sein.

- Passpunkte müssen gut verteilt, genau bestimmt und auf den Bildern scharf zu erkennen sein.
- Die Kameras müssen stabilisiert und kalibriert sein.

- Die aufgenommenen Bilder müssen scharf sein und ausreichend kontrastreiche Textur aufweisen.

Doch selbst wenn alle eben aufgezählten Punkte beachtet werden, sind ALS- oder MLS-Daten von der Genauigkeit und Aussagekräftigkeit her immer noch den aus Bilddaten heraus erzeugten DGMs vorzuziehen. Zudem gestaltet sich die Ableitung eines DGMs aus den Bilddaten heraus schwierig. Denn die Punkte werden anhand aller Bildinformationen generiert und bilden somit das DSM des Aufnahmegebietes ab. Die Ableitung eines DGMs ist daher nur möglich, wenn auf den Bildern ausreichend Boden abgebildet wird. Dies setzt voraus, dass die Vegetation nicht zu dicht ist. Zur Generierung eines durchgängigen DGMs stellt ALS bisweilen das am geeignetste Verfahren dar.

Fazit: Die Nutzung von UAV-Daten (Orthophotos) für Digitale Geländemodelle ist unter Einhaltung verschiedener Voraussetzungen theoretisch möglich, aber in punkto Genauigkeit und Aufwand derzeit nicht effektiv anwendbar. Hier besteht zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf bzw. es sind andere Aufnahmeverfahren vorzuziehen (u.a. ALS, MLS).

25) Vegetation des Deiches, Strandhaferzustand/-dichte in den Dünen ableitbar?

Durch die Ausstattung der Drohne mit einer Infrarotkamera können die Aufnahmen dazu verwendet werden, Rückschlüsse auf die Gesundheit von Pflanzen zu ziehen. Mithilfe der Rot- und der Infrarotanteile eines jeden Bildpixels, können über den sog. NDVI (normalisierten Vegetationsindex) Rückschlüsse auf die Vegetationsbedeckung gezogen werden. Bei der Ableitung von 3D-Punkten aus digitalen RGB-Bildern, sind Punkte die zur Vegetation und Punkte die zum Relief gehören, schwer voneinander zu unterscheiden. Aussagen über die Vegetation des Deiches und Strandhaferdichte können nur optisch anhand eines generierten Orthophotos und durch den NDVI getroffen werden. Im Forschungsprojekt kam eine normale RGB-Kamera mit einem NIR-Filter zum Einsatz, deren Bilder befriedigende Ergebnisse bei der Vegetationsauswertung lieferten. Grünland- und Waldflächen sind mit den bekannten Algorithmen sicher auswertbar, für Fragen des Küstenschutzes und hier insbesondere zum Zustand des Strandhafers auf den Dünen und der Grasnarbe auf den Deichen waren die erzeugten Bilder nicht verwertbar. Durch den frühen Totalverlust der Kamera nach einem UAV-Absturz wurden die Arbeiten zu dieser Thematik nicht fortgesetzt, da keine befriedigenden Ergebnisse zu erwarten waren. Sollte diese Fragestellung im Küstenschutz zukünftig doch mehr in den Mittelpunkt gestellt werden müssen, ist hier ein weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf nötig.

Fazit: Orthophotos lassen über manuelle Auswertung eine rein optische Betrachtung des Vegetationszustandes zu, automatische Verfahren mit NIR-Filter-Einsatz haben zu keinem verwertbaren Ergebnis geführt.

26) Möglichkeit von Stereoaufnahmen mit entsprechenden Verarbeitungsmethoden?

Durch das Mitführen von zwei Kameras gleichzeitig an der Drohne, war es möglich, zeitgleich zwei Bilder von jeder Position aufzunehmen. Eine stereoskopische Auswertung anhand von Bildpaaren konnte durch dieses Vorgehen allerdings nicht durchgeführt werden, da der Abstand zwischen den Kameras (ca. 0,5m) als stereoskopische Basis nicht ausreicht. Für eine gute Höhenbestimmung mittels Stereoskopie wird eine breite Basis der Bildpaare benötigt. Eine Basis von 0,5 m stellt eine unzureichende Länge für eine aussagekräftige Höhenbestimmung dar.

Auch eine stereoskopische Auswertung im herkömmlichen Sinne fand durch die große Längs- und Querüberdeckung der Einzelbilder nicht statt. Die durch manuelles Abgreifen erreichbare Genauigkeit in der Lage wäre vergleichbar groß mit der geforderten Erfassungsgenauigkeit von Veränderungen. Da bei einer stereoskopischen Verarbeitungsmethode die Probleme überwiegen, war eine Untersuchung nicht sinnvoll. Allerdings ist eine stereoskopische Auswertung von benachbarten Bildern bereits in Verarbeitungsalgorithmen von Softwareprodukten enthalten und läuft automatisch ab. Dadurch erscheint eine manuelle stereoskopische Auswertung zudem als unwirtschaftlich.

Fazit: Eine stereoskopische Auswertung der Luftbilder führte mit den bestehenden Aufnahmetechniken und Softwarepaketen trotz mehrfachen Modifikationen nicht zu verwertbaren Ergebnissen. Hier besteht zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

27) Welche gesetzlichen Bestimmungen (u.a. Datenschutz) gibt es?

Rechtliche Vorgaben und die Einstufung von Drohnen finden sich im Luftverkehrsgesetz (LuftVG) und in der Luftverkehrsverordnung (LuftVO) der Bundesrepublik Deutschland. Laut § 1 Absatz 2 Nummer 3 des LuftVG „gelten unbemannte Fluggeräte einschließlich ihrer Kontrollstation, die nicht zu Zwecken des Sports oder der Freizeitgestaltung betrieben werden (unbemannte Luftfahrssysteme)“, müssen UAV's als Luftfahrzeug behandelt werden. Zusätzlich dazu können UAV's auch zur Gruppe der Flugmodelle gezählt werden, die ebenfalls als Luftfahrzeuge einzustufen sind [LuftVG 2013 § 1 (2) Nr. 9]. Der Betrieb von Drohnen ist nur verboten, „wenn er außerhalb der Sichtweite des Steuerers erfolgt oder die Gesamtmasse des Geräts mehr als 25 Kilogramm beträgt“ [LuftVO § 15a (3)]. Daher müssen UAV's auf Sicht gesteuert werden, damit der Benutzer nicht die Kontrolle des Fluggerätes verlieren und in einem Notfall manuell eingreifen kann. Ein völlig autonomer Flug eines UAV's ist nur durch Ausnahmeregelungen möglich. Grundvoraussetzung dafür ist allerdings, dass weder die Sicherheit des Luftverkehrs gefährdet ist, noch Gefahr für die öffentliche Ordnung besteht [LuftVO § 15a (2)].

Ein weiterer Punkt ist die Notwendigkeit einer Erlaubnis zur Nutzung des Luftraumes. Zwar dürfen Flugmodelle mit weniger als 5 kg Gesamtmasse, elektrischem Antrieb und mehr als 1,5 km Entfernung zu einem Flugplatz, ohne Erlaubnis betrieben werden [LuftVO § 16 (1) Nummer 1]. Doch wird in § 16 Absatz 1 Nummer 7 LuftVO festgelegt, dass der „Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen“ einer Erlaubnis bedarf. Eine Erlaubnis ist bei der örtlich zuständigen Behörde des entsprechenden Bundeslandes, in dem der Flug stattfinden soll, einzuholen [LuftVO § 16 (3)].

Fazit: Die verwendete MLS-Technik sowie die Drohnen (UAV) entsprechen den gesetzlichen Vorgaben und Regelungen, wobei bei der Datenerfassung und -verarbeitung die Datenschutzbestimmungen des jeweiligen (Bundes-)Landes zu beachten sind.

8. Nutzen und Verwendbarkeit, Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die erarbeiteten Ergebnisse haben Eingang in zukünftige Aufnahmeverfahren der Dezernatsgruppe Küste gefunden, gleichzeitig besteht Interesse von Seiten des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern in Güstrow zur Übernahme der Technik für Flussbereiche und von den Staatlichen Ämtern für Landwirtschaft und Umwelt in Stralsund und Schwerin für Fragestellungen im Küstenbereich in Zusammenarbeit mit der Dezernatsgruppe Küste.

Der Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN) war in allen Projektphasen über den Ablauf und die Ergebnisse informiert und hat aktiv an den Projektarbeiten auf der Insel Sylt teilgenommen. Dabei hat das LKN durch die kostenfreien Referenzmessungen vor Ort an allen Befliegungs- und Vermessungskampagnen einen hervorragenden Beitrag für die Erreichung der Projektziele geleistet.

Der Niedersächsische Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) wurde ebenfalls über die Projektergebnisse informiert und es wurden mittlerweile im Herbst 2013 Testmessungen mit beiden Systemen aus LEDA-K auf der Insel Juist durchgeführt und die entwickelten Techniken und Verfahren vorgestellt.

Das Projekt LEDA-K ist Grundlage für die Weiterentwicklung der Software, der Entwicklung der Flieger sowie der Anwendung neuester Kleinstlaser auf UAV-Systemen im Projekt LEDA-K2.

Die Katastrophenleitstelle der norddeutschen Bundesländer in Cuxhaven hat Interesse am System und den Ergebnissen angemeldet und bereits einen Termin zur Vorstellung des LEDA-K Projekts auf einem Stabstreifen vereinbart.

Der Fachbereich Landschaftsgestaltung und Landschaftsarchitektur der Hochschule Neubrandenburg, wo das Projekt LEDA-K während Vorträgen und im Rahmen einer

Lehrveranstaltung vorgestellt wurde, hat sich mittlerweile eine UAV bei der Firma CIS GmbH in Rostock mit den aus dem Projekt hervorgegangenen neuen Konfigurationen beschafft, um diese in der Lehre, bei Praktika und Auftragsbearbeitungen anzuwenden.

9. Fortschritt

Alle vorgesehenen Arbeiten konnten termingemäß fertig gestellt werden. Eine Reihe von Ergebnissen führen aber zu dem Schluss, dass nicht alle theoretischen Ansatzpunkte aus dem Projektantrag tatsächlich praxisrelevant einsetzbar sind (Siehe Ergebnisse).

10. Veröffentlichungen

In der 4-monatigen Projektlaufzeit gab es keine Publikationen und Veröffentlichungen. Es wurde aber ein Poster (A0) erstellt und u.a. auf einer Konferenz in Oostende (Belgien) vorgestellt. Desweiteren haben beide Verfahren (MLS und UAV) Eingang in die Vortragsfolien der Dezernatsgruppe Küste gefunden und sind somit Teil aller Küstenschutzvorträge und -exkursionen durch diese Mitarbeiter.

11. Patente

Es wurde keine Patente zur Anmeldung gebracht und es sind auch keine patentrechtlichen Schritte geplant!

12. Quellen

Alle Abbildungen und Fotos sind projektbezogen entstanden und von den beteiligten Firmen/Institutionen erstellt/aufgenommen worden:

- Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg
- Milan Geoservice GmbH
- CIS GmbH Rostock

15. Januar 2014

gez. Tiepolt

Dr. Lars Tiepolt
Dezernatsgruppe Küste
Dezernat Allgemeine Angelegenheiten und Küstenkunde
Erich-Schlesinger-Str. 35
18059 Rostock
Tel: 0381 331 67-604
Fax: 0381 331 67-799
E-Mail: lars.tiepolt@stalumm.mv-regierung.de