

BfG-1961

Bericht

Evaluierung der Laserbathymetrie zur Erfassung von Flachwasserbereichen in der Nordsee

Dr.-Ing. Robert Weiß
29.06.2018

Auftraggeber: Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
SAP-Nr.: M39610504104
Anzahl der Seiten: 61

Impressum

Herausgeber: Bundesanstalt für Gewässerkunde
Am Mainzer Tor 1
Postfach 20 02 53
56002 Koblenz
Tel.: +49 (0)261 1306-0
Fax: +49 (0)261 1306 5302
E-Mail: posteingang@bafg.de
Internet: <http://www.bafg.de>

DOI: 10.5675/BfG-1961

Inhalt

1	Einführung und Motivation	8
2	Grundprinzip und aktuell verfügbare Systeme	10
2.1	Grundprinzip	10
2.2	Einteilung bathymetrischer ALS-Systeme	14
2.2.1	Tiefwassersysteme	15
2.2.2	Flachwassersysteme	17
2.3	Laserklassen	18
2.4	Zwischenfazit	19
3	Rahmenbedingen im Bereich der Nordsee	21
3.1	Bathymetrie der Nordseeküste	21
3.2	Potenziell zu erfassende Flächen	22
3.2.1	Ostfriesische Inseln	22
3.2.2	Mündungsbereich Elbe/Weser und Nordfriesische Inseln	24
3.2.3	Wasserstand und Verweildauern	25
3.3	Sichttiefen	27
3.3.1	Gemessenen Sichttiefen LLUR	27
3.4	Genauigkeitsanforderungen nach IHO S44	29
3.5	Zwischenfazit	29
4	Ergebnisse bisheriger Einsätze	31
4.1	Erprobung des NLWKN 2016	31
4.1.1	Befliegungszeitpunkt und Rahmenbedingungen	31
4.1.2	Punktdichte	33
4.1.3	Eindringtiefe und Signalstärke	35
4.1.4	Gegenüberstellung der Ergebnisse zu dem DGM-W 2016	36
4.2	LKN und BSH	40
4.3	Zwischenfazit	40
5	F&E Projekt - Optimierte Auswertung der Laserbathymetrie	42
5.1	Aufgabenstellung	42
5.2	Ergebnisse	43
5.2.1	Modellierung der Trübung und Ableitung der Dämpfungskorrekturen	43
5.2.2	Ableitung von Trübungsparametern	43
5.2.3	Ableitung von Bodenpunkten aus den Full-Waveform Daten	44

5.2.4	Fehlermodellierung	46
5.3	Zwischenfazit	49
6	Empfehlung für eine Ausschreibung	50
6.1	Vor der Befliegung	50
6.2	Datenerfassung	50
6.3	Nachweise und Auswertung	52
7	Ausblick und weiterführender F&E Bedarf	53
7.1	Scannertechnik	53
7.2	Erfassung der Randparameter	55
8	Zusammenfassung	57
9	Literatur	59

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundprinzip der Laserbathymetrie	10
Abbildung 2: Kombiniert grün+NIR (links) und ausschließlich grüne Systeme (rechts)	11
Abbildung 3: Auswirkung von exzentrischen Reflektoren im Footprint	12
Abbildung 4: Gewässerbodenpunkte und Volumenstreuer	13
Abbildung 5: Schematische Darstellung Gewässerreturn	13
Abbildung 6: Scanmuster eines Palmer Scans	15
Abbildung 7: Simulierte Punktdichte bei einem RIEGL VQ880G	15
Abbildung 8: Tiefwasserscanner (v.l.n.r. HAWKEYE III, CZMIL, LADS HD)	16
Abbildung 9: Flachwasserscanner (v.l.n.r. CHIROPTERA II, VQ820G, VQ880G, TITAN)	18
Abbildung 10: Bathymetrie der Nordsee	21
Abbildung 11: Bathymetrie der Nordseeküste zwischen 0m und 10m unter LAT	22
Abbildung 12: Wassertiefe bei Wasserstand LAT (Ostfr. Inseln)	23
Abbildung 13: Wassertiefe bei Wasserstand LAT +0,5m (Ostfr. Inseln)	23
Abbildung 14: Wassertiefe bei Wasserstand LAT +1,0m (Ostfr. Inseln)	23
Abbildung 15: Wassertiefe bei Wasserstand LAT +1,5m (Ostfr. Inseln)	24
Abbildung 16: Wassertiefen Wasserstand LAT / LAT+0,5m (Ästuar/Nordfr. Inseln)	25
Abbildung 17: Wassertiefen Wasserstand LAT+1,0/ LAT+1,5m (Ästuar/Nordfr. Inseln)	25
Abbildung 18: Pegelstandorte der Tabelle 5	26
Abbildung 19: Verweildauer des Wasserstandes (Pegel Norderney)	26
Abbildung 20: Mittlere durch das LLUR bestimmte Sichttiefen (Anzahl Einzelmessungen) ..	27
Abbildung 21: Spanne der am LLUR erfassten Sichttiefen	28
Abbildung 22: Sichttiefenmessungen ausgewählter Standorte	28
Abbildung 23: Auftragsgebiet der Befliegung zwischen Juist und Norderney	31
Abbildung 24: Wasserstand am Pegel Norderney Riffgat zum Zeitpunkt der Befliegung	32
Abbildung 25: Punktdichtekarten auf Basis der Bodenpunkte (l: trocken, r: Gewässerbett) ..	33
Abbildung 26: Punktdichten (Gewässerbodenpunkte) der einzelnen Messstreifen	34
Abbildung 27: Punktdichten der Wasseroberflächenpunkte (l. alle Str., r: einzelne Str.)	34
Abbildung 28: Wellenmuster zwischen Juist und Norderney	35
Abbildung 29: Profil aus Abbildung 28	35
Abbildung 30: Eindringtiefe der Gewässerbettunkte	36
Abbildung 31: Signalstärke Boden/Gewässerbettunkte (l.) und Wasseroberflächenpunkte (r.)	36
Abbildung 32: DGM-W 2016 und Zeiträume der hydroakustischen Erfassung	37
Abbildung 33: Differenz DGM-W und ALB-Gewässerbodenpunkten	37
Abbildung 34: Vergrößerte Darstellung der Gewässersohle (l.) und der Differenzen (r.)	38
Abbildung 35: Vergrößerte Darstellung der ALB Beobachtungen	38
Abbildung 36: Verteilung der Differenzen (DGM-W – Laserpunkt Gewässerbett)	39
Abbildung 37: Full-Waveform Information eines Laserschusses	42
Abbildung 38: Dämpfungsfunktion (oben: normalen Punkt, unten Uferpunkt)	44
Abbildung 39: Ergebnisse / Bodenpunkte der Standardprozessierung	45
Abbildung 40: Ergebnisse der Methode 3	45
Abbildung 41: Gewässerbettmodell, hydroakustischer Messungen zw. km 200 und 201,5 ...	45
Abbildung 42: Höhendifferenzen (MS Rossau-ALB) zw. km 200 und 201,5	46
Abbildung 43: Auswirkung von Seegang auf die Brechung	46

Abbildung 44: Modellierung der Brechung, bewegte Oberfläche	47
Abbildung 45: Footprintform (l. Wasserfläche, r.: Gewässerbett)	47
Abbildung 46: Wellenmuster und Footprintdeformation bei Seegang.....	48
Abbildung 47: Leica SPL100	54
Abbildung 48: Trübung (04.06.16 11:29Uhr links, 13:07Uhr rechts)	55
Abbildung 49: Jährliche Variation der Trübungsparameter	56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Footprintdurchmesser und Energiedichte.....	16
Tabelle 2: Eigenschaften von Tiefwasserscannern	16
Tabelle 3: Technische Spezifikationen ausgewählter Flachwasserscanner.....	17
Tabelle 4: Laserklassen IIIB und IV nach EN60825-1	18
Tabelle 5: Verweildauer für LAT+0,5m bzw. LAT+1,0m	26
Tabelle 6: Genauigkeitsanforderungen nach IHO / WSV	29
Tabelle 7: Anteil der Wassertiefen (LAT +0,5m) im Untersuchungsgebiet	33
Tabelle 8: Mittlere Differenzen in bestimmten Gebieten.....	39
Tabelle 9: Lage und Höhenversatz bei unterschiedlichem Seegang	48
Tabelle 10: Unsicherheiten bei Windstärken und 5m Wassertiefe	48
Tabelle 11: Technische Eigenschaften des Leica SPL100.....	54

Abkürzungsverzeichnis

AG	Auftraggeber
ALB	Airborne Laser Bathymetrie
ALS	Airborne Laser Scanning
AN	Auftragnehmer
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie
GCG16	German Combined Geoid 2016
DREF91	Deutsches Referenz Frame 1991
ENOHD	Extrended Nominal Ocular Hazard Distance (erweiterter nomineller Augen-Gefahrenabstand)
ETRS89	European Terrestrial Reference System
F&E	Forschung und Entwicklung
G.d.V.	Grad des Vertrauens
GDWS	Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt
hTPU	horizontal Total Propagated Uncertainty
IHO	International Hydrographic Organization
IPF	Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
LAT	Lowes Astronomical Tide (vgl. SKN)
LIDAR	Light Detection And Ranging (vgl. ALS)
LKN.SH	Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein
LLUR	Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein
mTHW	mittleres Tidehochwasser
mTNW	mittleres Tideniedrigwasser
MEZ	Mitteuropäische Zeit
MESZ	Mitteuropäische Sommerzeit
NHN	NormalHöhenNull
NIR	Near Infra Red
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
NOHD	Nominal Ocular Hazard Distance (nomineller Augen-Gefahrenabstand)
PNP	Pegelnulppunkt
SAPOS®	Satellitenpositionierungsdienst des deutschen Landesvermessung
SKN	Seekartennull
TNW	Tideniedrigwasser
THW	Tidehochwasser
UTM	Universal Transversal Mercator Projection
VFR	Visual Flight Rules
vTPU	Vertical Total Propagated Uncertainty
WSV	Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes

1 Einführung und Motivation

Von Seiten der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) wurde die BfG mit einer Evaluierung beauftragt, inwieweit die Laserbathymetrie zur Erfassung von Flachwasserbereichen der Nordsee nutzbar ist. Mithilfe konventioneller, hydroakustischer Messverfahren können in Flachwasserbereichen nur linienhafte bzw. quasi linienhafte Messdaten aufgenommen werden. Folglich ist die flächendeckende Erfassung von Flachwasserbereichen mit einem sehr großen Aufwand verbunden. Eine Befliegung der Wattenmeere mit konventioneller ALS Technik (Near Infra Red (NIR) Scanner) führt zu Datenlücken innerhalb der zu erfassenden Gebiete, da „nasse“ Bereiche nicht erfasst werden können. Mithilfe der luftgestützten Laserbathymetrie (Airborne Lidar Bathymetry ALB) ist es unter bestimmten Umständen möglich, den Gewässerboden mit hohen Punktdichten flächenhaft zu erfassen. Insofern stellt die Laserbathymetrie eine mögliche Verbesserung dar bzw. das Verfahren kann wichtige Beiträge zur Aufgabenerledigung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung in der Nordsee leisten.

Im Rahmen der Evaluierung sollen die folgenden Fragestellungen erörtert werden:

1. Welche Scannersysteme sind vorzugsweise einzusetzen?
2. Mit welchen Eindringtiefen kann im Nordseebereich gerechnet werden?
3. Welche Vorteile haben bathymetrische Scannersysteme gegenüber konventionellen Systemen in der Nordsee?
4. Wie sind die Erfahrungen anderer Behörden mit diesem Verfahren in der Nordsee?
5. Sind bei dem Verfahren wesentliche Verbesserungen in Zukunft zu erwarten?
6. Inwieweit beeinflusst Seegang die Genauigkeit?

Der vorliegende Bericht basiert auf früheren Evaluierungen der BfG (Bericht 1861 „Erprobung der Laserbathymetrie im Binnenbereich“), sowie auf Erprobungen und Erfahrungen des Niedersächsischen Landesbetriebs Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), des Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN.SH) sowie auf Untersuchungen des Bundesamts für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) zur Nutzbarkeit der Laserbathymetrie im Bereich der Ostsee.

In dem vorliegenden Bericht werden der aktuelle Stand der Scannertechnik, sowie die in der Nordsee vorhandenen Rahmenbedingungen näher beleuchtet. Letztere beinhalten in erster Linie die vorherrschenden Wassertiefen als Funktion der Tide sowie die Sichttiefen. Ziel sind dabei Aussagen zu potenziell erfassbaren Flachwasserbereichen im Wattenmeer. Darüber hinaus werden kurz neue Produkte vorgestellt, welche zur Optimierung von Befliegungszeiten genutzt werden können.

Von Seiten des LKN.SH wird die Laserbathymetrie operationell eingesetzt. Weiterhin hat der NLWKN Niedersachsen eine Erprobungskampagne unter sehr guten Rahmenbedingungen

am Riffbogen der Insel Norderney durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Erprobung, weiterführende Auswertungen sowie Ergebnisse und Erfahrungen des LKN.SH werden in einem Kapitel detailliert dargestellt.

Ein durch die BfG beauftragtes F&E Projekt diene insbesondere der Beantwortung der Fragen nach zukünftigen potenziellen Verbesserungen und den resultierenden Unsicherheiten aufgrund der Wellenbewegungen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 5 dargestellt. Untersucht wurden dabei mögliche Steigerungen der Eindringtiefe durch verbesserte Auswerteansätze der von Full-Waveform Daten. Weiterhin wurde der vollständige Strahlenverlauf und insbesondere die Brechung bei unterschiedlich modellierten Meeresoberflächen analysiert und daraus Unsicherheiten aufgrund des Seegangs abgeleitet.

In einem letzten Kapitel erfolgen Empfehlungen für zukünftige Ausschreibungen sowie eine Zusammenfassung des Berichts.

2 Grundprinzip und aktuell verfügbare Systeme

2.1 Grundprinzip

Das Grundprinzip wird an dieser Stelle nur sehr kurz angesprochen. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in dem BfG Bericht 1861 „Erprobung der Laserbathymetrie im Binnenbereich“ (Weiß und Wirth 2016). Im Wesentlichen handelt es sich bei der Laserbathymetrie um eine spezielle Form des Airborne Laser Scanning (ALS). Im Gegensatz zu herkömmlichen Scannersystemen verfügen die bathymetrischen ALS-Systeme (ALB) über einen Laser mit grünem Laserlicht und teilweise noch über einen Laser im nahen Infrarot (NIR). Im Gegensatz zu NIR Laserlicht ist grünes Laserlicht in der Lage, Wasser zu einem gewissen Grad zu durchdringen und somit kann der Gewässerboden abgetastet werden (Abbildung 1). Der emittierte Laserimpuls läuft durch die Luft, wird an der Wasseroberfläche aufgrund des Medienwechsels gebrochen, am Gewässerboden reflektiert und gelangt zum ALB System. Aus den Sende- und Empfangszeitpunkten lassen sich Laufzeiten und damit Strecken ableiten.

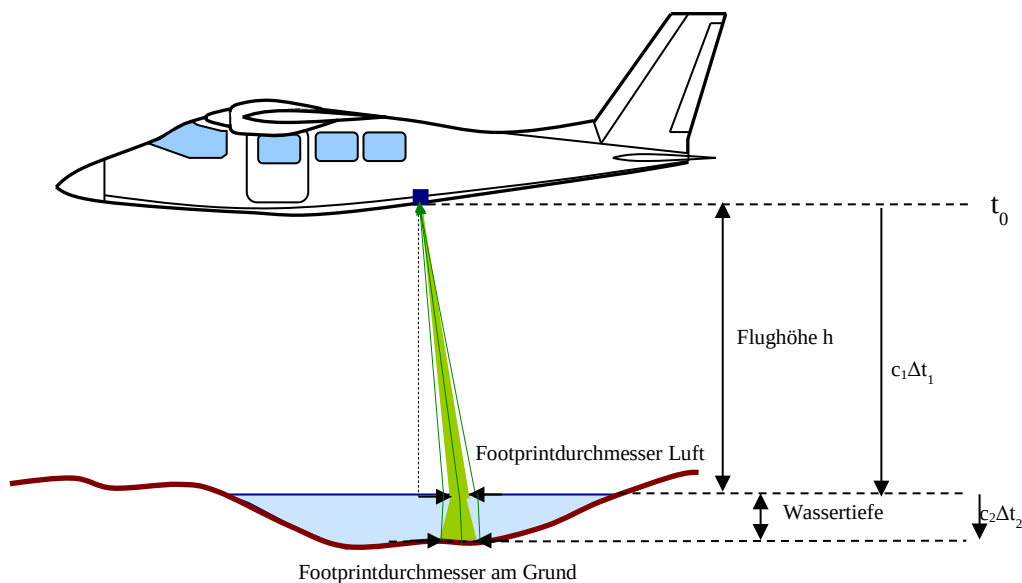


Abbildung 1: Grundprinzip der Laserbathymetrie (Weiß, Wirth 2016)

In Verbindung mit den ebenfalls erfassten Auslenkwinkeln des Laserstrahls gegenüber dem scannerinternen Referenzsystem lassen sich die „Bodenpunkte“ durch polares Anhängen ableiten. Dabei ist zu beachten, dass sich die Brechungsverhältnisse an der Wasseroberfläche ändern und somit die Wasseroberfläche als solche bekannt sein muss. Nur so ist eine entsprechende Korrektur möglich (vgl. Abbildung 1). Unter Berücksichtigung der Einbauwinkel ergeben sich die Koordinaten der Bodenpunkte relativ zum Body-Frame des Sensorträgers (Starrflügler oder Hubschrauber) und über dessen Orientierungswinkel i.V. mit der exakten Position lassen sich die Koordinaten der Bodenpunkte relativ zum gewünschten Referenzsystem bzw. dessen Realisierung bestimmen. Voraussetzung für die korrekte Ableitung der Bodenpunkte sind die folgenden Bedingungen.

- a) Die Einbauwinkel des Scanners und der IMU relativ um Bodyframe müssen hinreichend genau bestimmt sein (Einmessung und/oder Kalibrierung).
- b) Die Orientierungswinkel und die Positionen müssen genau und frei von systematischen Effekten erfasst werden.
- c) Der Positionierungssensor muss die entsprechende Genauigkeit aufweisen und vor allem in der korrekten Realisierung des gewünschten Bezugssystems arbeiten. Praktisch bedeutet dies, dass die korrekten Referenzkoordinaten und Korrekturdaten genutzt werden. Im Fall der WSV sind Koordinaten relativ zum aktuellen Realisierung des ETRS89 zu nutzen (Realisierung ETRS89/DREF91 Epoche 2016). Praktisch bedeutet dies, dass **SAPOS[®]** oder ein dazu in Bezug auf das Referenzsystem kompatibles Korrekturdatensystem (z.B. AXIO Net) zu nutzen ist. Die Kompatibilität anderer Systeme ist ggf. nachzuweisen.
- d) Für die originär erfassten ellipsoidischen Höhen das richtige Quasigeoidmodell genutzt wird, um physikalische NHN Höhen abzuleiten. Im Fall der WSV ist aktuell das Modell GCG16 zu nutzen.

Zur Ableitung der Wasseroberfläche und damit verbunden auch zur Korrektur der Brechung werden einzelne Scanner noch optional mit einem NIR System ausgestattet. Mithilfe des NIR Systems kann dann die Wasseroberfläche zusätzlich erfasst werden, was die Zuverlässigkeit steigert (vgl. Abbildung 2).

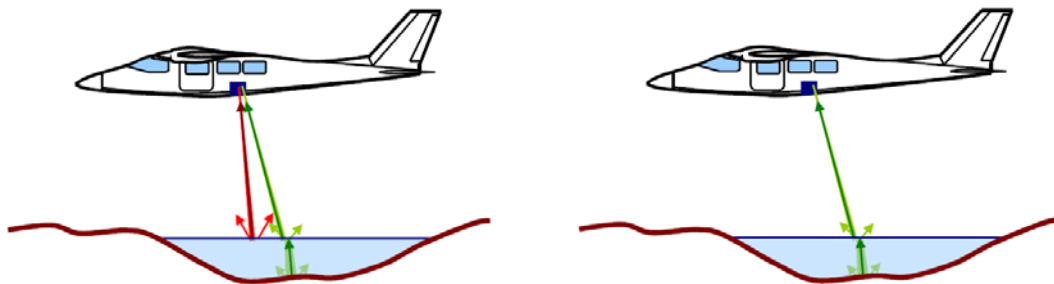


Abbildung 2: Kombiniert grün+NIR (links) und ausschließlich grüne Systeme (rechts)

Weiterhin unterscheiden sich die Scanner noch in Bezug auf das Scanmuster. Die modernen bathymetrischen Systeme verfügen über elliptische Scanmuster (Palmer Scan). Diese haben den Vorteil, dass ein Objekt quasi von vorn (vor dem Scanner) und von hinten (hinter dem Scanner) beleuchtet wird und der Strahl immer in der gleichen Schräge auf eine horizontale Fläche auftrifft.

Prinzipiell weist der emittierte Laserimpuls eine bestimmte Strahldivergenz bzw. einen bestimmten Öffnungswinkel auf, weshalb der Laserimpuls am Boden eine bestimmte Fläche überdeckt. Die üblicherweise angegebenen Öffnungswinkel bzw. Footprintdurchmesser beziehen sich auf das Medium Luft. Geometrisch wird der Mittelpunkt des Footprints als Koordinate für den Messpunkt angenommen. Inwieweit aber der Reflektionsschwerpunkt und damit das eigentliche Signal auch genau in der Mitte des Footprints liegt, ist offen. Es ist also durchaus möglich, dass ein starker Reflektor am Rand des Footprints entscheidend für die eigentliche Laufzeitmessung ist, diese aber der Mitte des Footprints zugeordnet wird. Die Folge sind nicht unerhebliche Lage und Höhenfehler (vgl. Abbildung 3.) Dieser Effekt verstärkt sich bei unebenen Gelände bzw. einer Hanglage unter Wasser (z.B. Böschung).

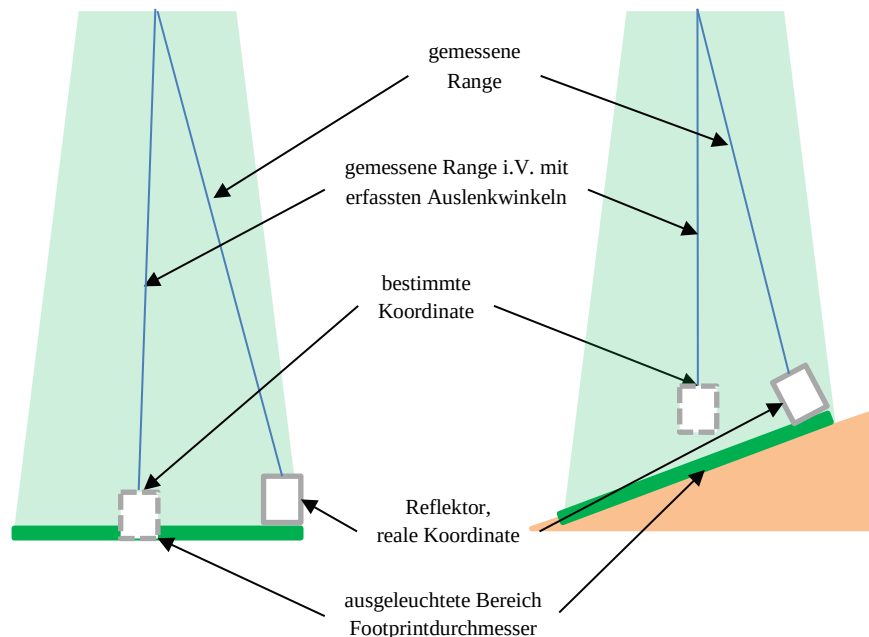


Abbildung 3: Auswirkung von exzentrischen Reflektoren im Footprint

Für jeden einzelnen Laserschuss wird kein einzelnes Echo empfangen. Vielmehr erfasst der Scanner über einen bestimmten Zeitraum die zurückkehrende Energie und trägt diese über die Zeit ab. Diese Beziehung zwischen Empfangszeitpunkt und empfangener Energie wird als „Full-Waveform“ bezeichnet (Abbildung 4, rechter Bereich). Anhand dieser Informationen lassen sich „Echos“ in der Art detektieren, dass zu bestimmten Zeiten viel Energie empfangen und somit auch viel Energie reflektiert wurde. An diesen Stellen bzw. zu diesen Zeitpunkten war folglich ein Reflektionsschwerpunkt bzw. ein Horizont vorhanden. Die Auswertung der Full-Waveform Daten kann mehr oder weniger komplex gestaltet werden.

Während des Scanprozesses erfolgt eine „online“ Auswertung, wobei die Echos über Grenzwerte definiert werden. Im Fall eines Überschreitens des Grenzwertes wird diese Stelle als „Echo“ behandelt. Anhand der Zeitdifferenz zwischen Aussende und Empfangszeitpunkt wird die Strecke von diesem Echo zum Signal erfasst und somit Koordinaten für diese Position abgeleitet. Je nach Scannereinstellung können insbesondere bei niedrigen Schwellwerten sehr viele Punkte als vermeindliche „Echos“ detektiert werden. Bei einer Vielzahl der Punkte handelt es sich aber um Rückstreupunkte im Wasser (Abbildung 5, im Folgenden als „Volumenstreuer“ bezeichnet), die im Wesentlichen der Gewässertrübung geschuldet sind.

Bedingt durch die hohe Messfrequenz können bei einer Echtzeitverarbeitung nur einfache Algorithmen angewendet werden. Im Fall einer so genannten „Full-Waveform Aufzeichnung“ werden die kompletten Waveforms erfasst, was eine aufwendigere Prozessierung im Postprocessing ermöglicht. Hierbei können robustere Schätzungen unter Einbindung von Nachbarschaftsbeziehungen genutzt werden, was die Zuverlässigkeit erhöht. Darüber hinaus erlauben diese Verfahren unter Umständen auch die Detektion tieferer Gewässerbodenpunkte, als dies bei Onlineverfahren möglich ist (vgl. Kapitel 5).

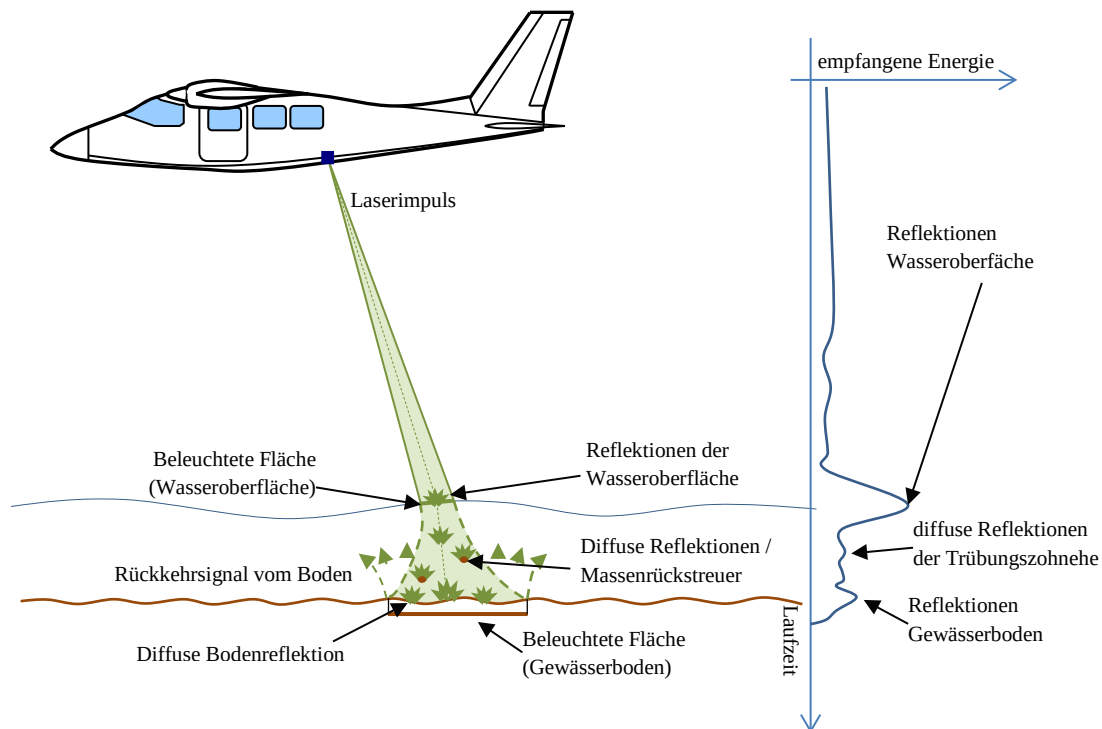


Abbildung 4: Gewässerbodenpunkte und Volumenstreuer (Weiß und Wirth. 2016)

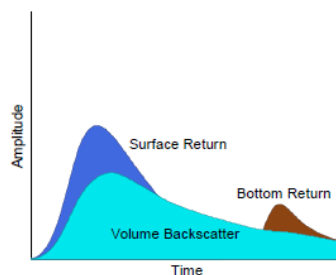


Abbildung 5: Schematische Darstellung Gewässerreturn (Westfeld et al. 2017a)

Das Durchdringen durch ein trübes Medium bzw. trübes Wasser hat neben einer starken Signaldämpfung auch eine Aufweitung des Footprints zur Folge. Bedingt durch diffuse Streuungen an den Schwebstoffteilchen vergrößert sich somit der Footprintdurchmesser beim Durchdringen des Wasserkörpers erheblich, was nicht unerhebliche Lage- und Höhenfehler zur Folge haben kann. Dies ist insbesondere bei Böschungen zu beachten, da in diesem Fall der Footprint auf eine schräge Fläche projiziert wird (vgl. Abbildung 3).

Die Charakterisierung des Leistungsvermögens der Scanner erfolgt über bestimmte physikalische technische Eigenschaften. Neben Parametern, die den ausgesendeten Laserimpuls beschreiben (Pulslänge, emittierte Energie und Beamdivergenz / Öffnungswinkel), Genauigkeitsangaben der eigentlichen Messwerte (Range Genauigkeit, Winkelmessgenauigkeit), Puls- bzw. Wiederholraten wird häufig die Eindringtiefe als ein Vielfaches der Sichttiefe bzw. Secchitiefe beschrieben. Diese wiederum wird mithilfe einer normierten Scheibe erfasst und liefert nur Aussagen zur Trübung des Gewässers.

Neben der Sichttiefe wird die Eindringtiefe häufig über ein Verhältnis zum „diffuse attenuation coefficient“ bzw. diffusen Dämpfungskoeffizient (k_d -Wert) beschrieben. Dieser wird dabei als Verhältnis einer scannerspezifischen Konstante zu dem k_d -Wert beschrieben. Für den Scanner AHAB CHIROPTERA II wird beispielsweise eine Eindringtiefe von 1,5-fachen der Sichttiefe oder ein Verhältnis zum k_d Wert von 2,4 angegeben. Die Eindringtiefe ergibt sich aus $2,4/k_d$ bzw. $\text{Eindringtiefe} \cdot k_d < 2,4$ (Leica 2018b). Die Angaben gelten für einen k_d Wert von 0,1-0,3. Praktisch bedeutet ein k_d Wert von 0,3 eine Eindringtiefe von 8m bzw. eine Sichttiefe von 5,3m. Erprobungen verschiedener Institutionen in der Vergangenheit haben gezeigt, dass diese Werte nur bei sehr klarem Wasser, jedoch im allgemeinen nicht im Bereich der Nordsee auftreten.

Bei einer Bewertung der Scanner ist dabei zu beachten, dass die tatsächliche Eindringtiefe von weiteren bestimmten Parametern abhängt. Mithilfe der Sichttiefe kann die Trübung des Gewässers beschrieben werden, nicht aber der Gewässerboden. Die Reflektivität des Gewässerboden ist ebenfalls ein wesentlicher Faktor. Bei einem schlecht reflektierenden Gewässerboden ist eine wesentlich geringere Eindringtiefe zu erwarten, als dies bei einem gut reflektierendem Gewässerboden der Fall ist. Die Scannerhersteller normieren diesen Faktor häufig, indem für die Eindringtiefe ein bestimmter Reflektionswert angegeben werden (z.B. Reflektivität von 20% beim RIEGL VQ880G oder 15% beim AHAB CHIROPTERA II). Als Konsequenz daraus sind die Herstellerangaben zur Eindringtiefe insbesondere bei trübem Wasser eher optimistisch geschätzt.

2.2 Einteilung bathymetrischer ALS-Systeme

Die derzeit verfügbaren Laserscanner lassen sich im Wesentlichen in zwei Scannerklassen einteilen. Tiefwassersysteme (deep water scanner) sind optimiert für die Erfassung größerer Wassertiefen, wohingegen Flachwassersysteme (shallow water scanner) für flache bzw. Landbereiche optimiert wurden. Teilweise werden die Tiefwassersysteme mit Flachwassersystemen konstruktiv kombiniert und gemeinsam genutzt (z.B. AHAB HAWKEYE III oder OPTTECH CZMIL). Nahezu allen bathymetrischen Scannersystemen ist gemein, dass diese einen Palmer Scan aufweisen bzw. die Scanspur am Boden elliptisch ist (vgl. Abbildung 6). Praktisch hat dies zur Folge, dass die Punktverteilung innerhalb der Flugstreifen sehr inhomogen ist. Exemplarisch ist in Abbildung 7 die simulierte Punktdichte bei einem RIEGL VQ880G Scanner mit Palmer Scanmuster dargestellt (Flughöhe 450m, Pulsrate 544kHz, Fluggeschwindigkeit 80m/s). Anhand der Abbildung wird deutlich, dass zu Beginn des Flugstreifens nur die halbe Punktdichte zur Verfügung steht, da ein Bogen fehlt. Weiterhin wird deutlich, dass im Zentralbereich eine wesentlich geringere Punktdichte gegenüber dem Randbereich vorhanden ist. Liegt eine geringe Überlappung vor (hier 25%) hat dies zur Folge, dass die ohnehin schon große Punktdichte im Randbereich noch einmal verdoppelt wird, wohingegen die Punktdichte im Zentralbereich gering bleibt. Folglich sollten bei der Befliegung mit Scannern mit Palmer Scanmustern die Überlappung so gewählt werden, dass sich Rand- und Zentralbereiche überlagern (z.B. 50% Überlappung). Entsprechende Aussagen gelten sowohl für Tiefwasser- als auch für Flachwassersysteme.

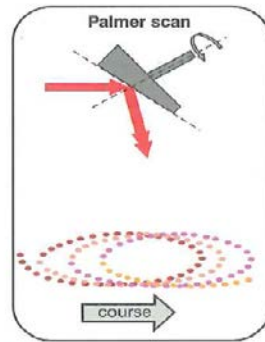


Abbildung 6: Scanmuster eines Palmer Scans (Vosselman et al. 2003)

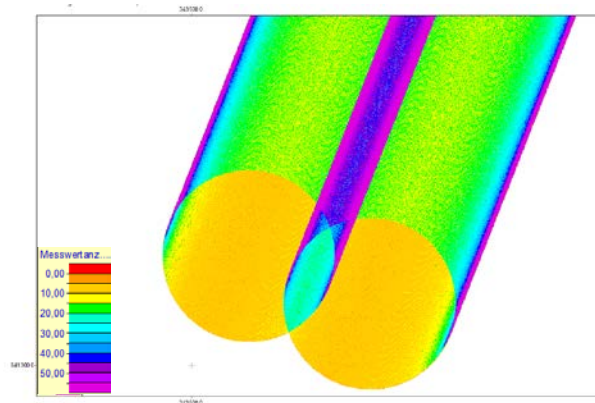


Abbildung 7: Simulierte Punktdichte bei einem RIEGL VQ880G

2.2.1 Tiefwassersysteme

Tiefwassersysteme zeichnen sich durch eine starke Energieemittierung, eine große Eindringtiefe und einen großen Footprint aus. Weiterhin weisen diese Systeme aber auch geringe Pulsraten auf. Die Systeme wurden zur Erfassung großer Meeresflächen konzeptioniert, die üblicherweise einen relativ gering strukturierten Gewässerboden aufweisen. Die große Eindringtiefe wird durch die sehr starken Laserimpulse realisiert. So weist der von Leica stammende AHAB HAWKEYE III eine emittierte Energiemenge von 3mJ auf, wohingegen der (shallow water scanner) AHAB CHIROPTERA „nur“ eine Sendeleistung von 0,1mJ aufweist (Quadros 2013). Darüber hinaus ist zu beachten, dass diese Energie beim HAWKEYE III über eine Beamdivergenz von 11mrad verteilt wird, wohingegen beim AHAB CHIROPTERA II eine Beamdivergenz von nur 3mrad vorhanden ist. Unter der vereinfachten Annahme, dass die Energie gleichmäßig im Bereich des Footprints verteilt wird, ergeben sich bei einer Flughöhe von 500m die in Tabelle 1 dargestellten Footprintdurchmesser und Energiedichten. Es wird deutlich, dass die Energiedichte des CHIROPTERA nur etwa die Hälfte der Energiedichte des HAWKEYE III beträgt. Bei Flügen über bewohnten Gebieten bzw. in denen mit Menschen zu rechnen ist, sind der emittierten Energiemenge Grenzen gesetzt. Es muss die Augensicherheit gewährleistet werden, wodurch Minimalflughöhen vorgegeben werden. Im Fall des AHAB HAWKEYE III beträgt diese 500m über Grund, was am Boden einen Footprintdurchmesser von 5,5m zur Folge hat. Dieser große Footprint bewirkt im Fall von Böschungen verstärkte Hangneigungsfehler sowie einen Glättungseffekt des Gewässerbodens. Treten innerhalb des Footprints dominante Reflektoren auf sind die resultierenden Lagefehler

ebenfalls wesentlich größer, als dies bei Scannersystemen mit kleineren Öffnungswinkeln der Fall ist (vgl. Abbildung 3.). Kleinere Objekte können nicht mehr sicher erfasst werden.

Tabelle 1: Footprintdurchmesser und Energiedichte

	AHAB CHIROPTERA II	AHAB HAWKEYE III
BeamDivergenz [mrad]	3	11
Flughöhe [m]	500	500
Footprintdurchmesser [m]	1,5	5,5
ausgeleuchtete Fläche [m²]	1,8	23,8
emittierte Energie [mJ]	0,1	3
em. Energie je Fläche [mJ/m²]	0,06	0,13
kd - Wert	2,4	4,0
Sichttiefe	1,50	3,00

Die Eindringtiefe wird beim AHAB HAWKEYE III mit etwa der 3-fachen Sichttiefe angegeben. Neben der Sichttiefe erfolgt auch hier eine Angabe relativ zum kd-Faktor, wobei die Eindringtiefe mit $4/kd$ beschrieben wird. Die Angaben gelten bei einer Reflektivität von 15%. Die technischen Eigenschaften verschiedener Tiefwasserscanner sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Eigenschaften von Tiefwasserscannern

	HAWKEYE III (Leica 2018a)	OPTECH CZMIL (Teledyne 2018a)	FUGRO LADS HD (Fugro 2018)
BeamDivergenz [mrad]	11	5	k.A.
Flughöhe [m]	500	400	>650m
Footprintdurchmesser [m]	5,5	2,0	2,7
ausgeleuchtete Fläche [m²]	23,8	3,1	5,7
emittierte Energie [mJ]	3,0	k.A.	7,0
Pulsrate [kHz]	10	10	3
x/kd - Wert	4	4,2	4
Sichttiefe (kd=1,3)	3	3,2	3
Genauigkeit Tiefe bei 10m Wassertiefe [m], 95%	0,33	0,33	<0,5
Genauigkeit Lage [m], 95%	k.A.	4,0	<5,0
Scanmuster	Oblique	rot. Prisma	k.A.
Punktdichte bei 400m ü.G. und 60m/s [Pkt/m²]	0,4	k.A.	k.A.
Laserklasse (nach EN 60825-1)	IV	IV	IV

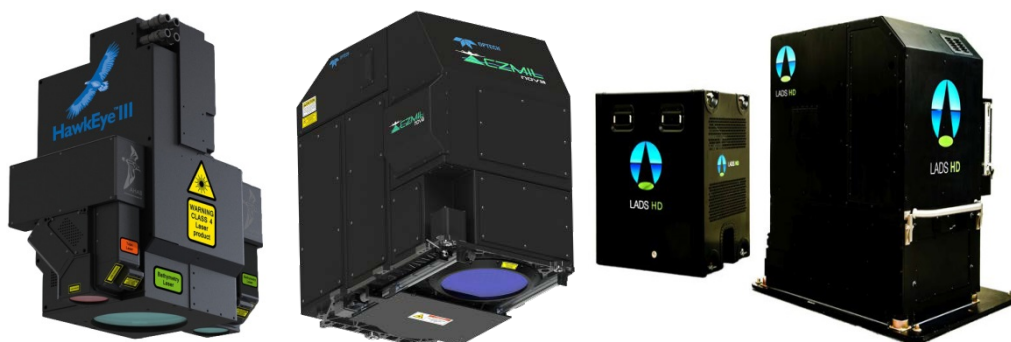


Abbildung 8: Tiefwasserscanner (v.l.n.r. HAWKEYE III, CZMIL, LADS HD¹)

¹ Bildquelle jeweils die Homepage der Hersteller: www.leica-geosystems.com, www.teledyneoptech.com, www.fugro.com

Üblicherweise sind Tiefwasserscanner in der Lage die komplette Full-Waveform eines jeden „Laserschusses“ aufzuzeichnen. Dies ermöglicht eine spätere Nachbearbeitung und damit verbunden auch eine bessere Detektion von Bodenpunkten bzw. eine größere Eindringtiefe.

2.2.2 Flachwassersysteme

Die Flachwassersysteme unterscheiden sich von den Tiefwassersystemen in erster Linie durch eine wesentlich höhere Punktdichte bzw. Pulsrate, kleinere Beamdivergenzen und damit verbunden kleinere Footprints und geringere Energieemissionen. Bedingt durch die hohe Punktdichte kann es möglich sein, dass insbesondere bei älteren Scannern (z.B. RIEGL VG820G) nicht für alle Laserschüsse eine Full-Waveform Aufzeichnung realisierbar ist. Bei neueren System ist dies trotz höherer Pulsrate möglich. Auch ist bei den hohen Punktdichten zu bedenken, dass die tatsächlich erfasste Datenmenge um ein Vielfaches größer und damit verbunden der Auswerteaufwand auch wesentlich größer ist. Typische Flachwassersysteme sind der Leica AHAB CHIROPTERA II oder die RIEGL Scanner VQ820G bzw. dessen Nachfolger VQ880G.

Wesentliche funktionale Parameter sind in Tabelle 3 dargestellt. Es zeigt sich, dass insbesondere die RIEGL Scanner über eine sehr hohe Pulsrate verfügen. Dem entsprechend und in Verbindung mit der sehr kleinen Beamdivergenz ergeben sich für diese Scanner sehr hohe Punktdichten, wobei die Bodenpunkte einen relativ kleinen Footprint aufweisen. Die neueren Scannersysteme (RIEGL VQ880G und OPTECH TITAN) weisen darüber hinaus auch bei hohen Pulsraten eine Full-Waveform Aufzeichnung auf, was Voraussetzung für ein späteres Reprocessing ist.

Tabelle 3: Technische Spezifikationen ausgewählter Flachwasserscanner

	Leica AHAB CHIROPTERA (Leica 2018b)	RIEGL VQ820G (RIEGL 2018a)	RIEGL VQ880G (RIEGL 2018b)	OPTECH Titan (Teledyne 2018b)
BeamDivergenz [mrad]	3	1	0,7	0,7
Full Waveform Recording	ja	anteilig	ja	ja
Anzahl Laserbeams	1	1	1	1
Flughöhe [m]	300	300	300	300
Footprintdurchmesser [m]	0,9	0,3	0,21	0,2
ausgeleuchtete Fläche [m²]	0,6	0,1	0,0	0,0
x/kd - Wert	2,4	1,6	2,4	1,5
Sichttiefe (kd=1,6)	1,5	1	1,5	1,0
max. Pulsrate [kHz]	35	520	550	210
Genauigkeit Tiefe bei 10m Wassertiefe [m], 95%	0,15	Genauigkeit des Lasers 25mm		0,1-0,2
Genauigkeit Lage [m], 95%	0,2	Genauigkeit des Lasers 25mm		0,08
Scanmuster	Oblique	Bogenmuster	Oblique	k.A.
Laserklasse (nach EN 60825-1)	IV	IIIb	IIIb	IV

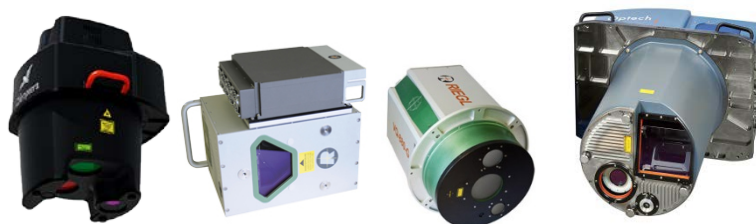


Abbildung 9: Flachwasserscanner (v.l.n.r. CHIOPTERA II, VQ820G, VQ880G, TITAN²)

2.3 Laserklassen

Eine Einteilung der Lasersysteme entsprechend ihres möglichen Gefährdungspotenzials erfolgt nach DIN EN 60825-1/11.01 (Schäfer 2017). Die Laser der bathymetrischen Scanner sind den Klassen IIIB bzw. IV zugeordnet. Die Beschreibung der relevanten Laserklassen erfolgt in Tabelle 4.

Tabelle 4: Laserklassen IIIB und IV nach EN60825-1 (Schäfer 2017)

Laserklasse	Grundkonzept	Wellenlänge [nm]	Basis [s]	Grenzwert [mW]
IIIB	Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge und in besonderen Fällen auch für die Haut. Diffuses Streulicht ist in der Regel ungefährlich.	alle	10	500
IV	Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und gefährlich für die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein. Beim Einsatz dieser Laserstrahlung besteht Brand- oder Explosionsgefahr.	alle	100 oder 30000 (kontinuierlich)	>500

Für die Sicherheit der Beschäftigten eines Arbeitgebers gibt die Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - OStrV) vor, welche Maßnahmen von Seiten des Arbeitgebers zu erfolgen haben. Im Allgemeinen hat nach §5 der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - OStrV) der Arbeitgeber sicherzustellen, dass die Gefährdungsbeurteilung, Messung und Berechnungen von fachkundigen Personen durchgeführt werden. Sofern diese fachkundigen Personen nicht innerhalb der Organisationseinheit verfügbar sind, muss eine fachkundige Beratung erfolgen (Absatz 1). Nach Absatz 2 des §5 OstrV hat vor Arbeiten mit den hier betroffenen Laserklassen der Arbeitgeber einen Laserschutzbeauftragten mit entsprechenden fachlichen Qualifikationen schriftlich zu bestellen, der den Arbeitgeber bei der Durchführung von Gefährdungsbeurteilungen nach §3 OStrV, bei der Durchführung entsprechender Schutzmaßnahmen nach §7 und der Überwachung des sicheren Betriebs entsprechender, im Satz 1 des Absatzes genannten Laser (Absatz 2, §5 OstrV) unterstützt.

Die Hersteller der Scannersysteme geben für die Systeme Flughöhen über Grund an. Daneben werden teilweise NOHD „Nominal Ocular Hazard Distance, based upon MPE“ (RIEGL 2018b) Angaben gemacht. Dieser Wert beschreibt den Minimalabstand für die Augensicherheit ohne verstärkende optische Elemente. Im Fall des RIEGL VQ880G wird ein NOHD

² Bildquelle: www.leica-geosystems.com, www.teledyneoptech.com, www.riegl.com

Wert von 175m angegeben (RIEGL 2018b). Entscheidend sind aber die ENOHD (Extended Nominal Ocular Hazard Distance) Angaben, welche Minimalabstände zur Augensicherheit mit verstärkenden Elementen vorgeben. Entsprechende Angaben werden in den Datenblättern aktuell nicht veröffentlicht. Vielmehr werden in diesen operationelle Flughöhen angegeben. So werden beispielsweise im Produktblatt des Leica HAWKEYE III Flughöhen von 400 – 600 m über Grund genannt („Operation altitude Bathymetry 400 – 600 m AGL“). Auf Nachfrage, welche Minimalflughöhen über bewohntem Gebiet erforderlich sind, gab Leica an, dass zur Wahrung der Augensicherheit die Flughöhe von 500m nicht unterschritten werden darf. Bei dem Leica CHIROPTERA II sind dies 300m³.

Zitat Leica:

„- There are no legal restrictions to fly the HawkEye III system over land. To fly binocular Eye safe with the HawkEye III system, you must fly at 500 meters altitude or higher. For the avoidance of doubt we are the only "deep lidar" offering a Binocular Eye safe option, all other deep penetrating LIDAR systems on the market only offers Eye safe to naked Eye at normal survey altitudes.

- The binocular Eye safe distance for the Chiroptera II system is only 300 meters altitude

- For both the Chiroptera II and the HawkEye III system you must reduce the topo-laser energy for binocular eye safe operation at low altitudes, but that is no problem as you only need a fraction of the topo-laser energy to collect good data at low altitude. full topo-laser energy is only needed at high altitude operations 1.000 - 1.600 meter.”

(Antwort Leica / Felix Puls - Sales Manager Airborne Solutions vom 05.08.2015)

Im Rahmen von Vergaben wird die Sicherstellung der Augensicherheit dem Auftragnehmer übertragen. Dieser muss sein System so betreiben, dass von diesem keine Gefahren ausgehen bzw. die Gefährdung von Mitarbeitern oder Dritten ausgeschlossen ist. Der Auftraggeber muss sicherstellen, dass der Auftragnehmer die Vorgaben vom Systemhersteller einhält. So kann sich ein Auftraggeber vor der Befliegung vorlegen lassen, welche Vorgaben zur Sicherheit von Seiten des Scannerherstellers gemacht werden, wie diese in die Flugplanung eingehen und letztere erst dann freigeben, wenn alle Vorgaben eingehalten sind. Darüber hinaus kann der Auftraggeber über die Trajektorien und die Protokolle prüfen, ob die Parameter auch tatsächlich eingehalten wurden.

2.4 Zwischenfazit

Die bathymetrischen ALS Systeme lassen sich in zwei Klassen unterscheiden. Die Tiefwassersensoren erreichen unter den üblichen Flugparametern nur sehr geringe Punktdichten, die für die Modellierung im Rahmen von hochauflösenden DGM-W Modellen nicht ausreichend sind. Darüber hinaus sind die Footprints dieser Scanner sehr groß, was einen relativ starken Glättungseffekt zur Folge hat. Dem gegenüber stellen die Flachwassersensoren eine für die DGM-W Modellierung ausreichende Punktdichte bereit. Auch sind die Footprints sehr klein, wodurch eine hinreichend detaillierte Erfassung der Geländeoberfläche möglich ist. Primär geben die Hersteller Eindringtiefen als Funktion der kd-Werte (Dämpfungsparameter) an. Alternativ werden diese Werte auch in Sichttiefen umgerechnet. Für die Flachwassersysteme werden dabei Eindringtiefen von etwa dem 1,0 – 1,5- fachen der Sichttiefe angegeben. Alle Angaben sind dabei immer auf einen definierten Reflektionsgrad des Gewässerbodens bezogen.

³ Die allgemein gültige Minimalflughöhe über Grund beträgt in Deutschland über bewohntem Gebiet 1000ft. (~300m)

Die für den Erfolg des Verfahrens entscheidenden Einflussfaktoren sind die Gewässertrübung und die Reflektivität des Gewässerbodens. Die Gewässertrübung führt zu einer Signaldämpfung, wodurch weniger bis keine Energie mehr beim ALS System ankommt und somit keine Messung ausgeführt werden kann. Weiterhin bewirkt die Trübung eine Aufweitung des Footprints und damit verbunden eine Zunahme der Unsicherheit. Darüber hinaus ist die Beschaffenheit des Gewässerbodens mit entscheidend. Bei einem gut reflektierenden Gewässerboden wird mehr Energie zum ALS System reflektiert, als dies bei einem energieabsorbierenden Gewässerboden der Fall ist. Folglich ist das zurückkehrende Signal stärker bzw. es werden eher Punkte detektiert. Sowohl die Trübung als auch die Reflektivität des Gewässerbodens sind natürlich vorgegebene, physikalische Randparameter, die auch in Zukunft nicht veränderlich sind.

Eine Steigerung der Eindringtiefe kann nur über eine Erhöhung der Sensorempfindlichkeit realisiert werden, da eine Steigerung der emittierten Energie aufgrund der geforderten Augensicherheit nicht möglich ist. Eine Steigerung der Signalempfindlichkeit führt insbesondere bei trüben Gewässern auch zwangsläufig zu einer Steigerung der Anzahl von Rückstreupunkten in der Wassersäule. Die angewendeten Auswertalgorithmen müssten in der Lage sein, diese sicher zu detektieren und zu eliminieren. Erfahrungen aus früheren Projekten zeigen, dass dies derzeit nur mit sehr viel manueller Nachbearbeitung möglich ist.

Mit dem Leica SPL100 ist ein neuer Scanner auf dem Markt, welcher eine sehr große Flächenleistung aufweist. Das System wurde nicht auf bathymetrische Anwendungen hin optimiert, weist aber alle Eigenschaften eines bathymetrischen Scanners auf. Bisher liegen zu diesem System keine Erfahrungswerte vor. Sofern sich dieser Scanner als geeignet herausstellen sollte, sind mit diesem System wesentlich größere Flächen in kürzeren Zeiträumen erfassbar. Neben den reinen Scannersystemen existieren auch Anbieter, die flächendeckende Trübungsinformationen aus hyperspektralen Luftbildern anbieten. Sofern diese Produkte qualitativ den Anforderungen entsprechen, könnten diese zur optimierten Planung einer bathymetrischen Befliegung in den Flachwasserbereichen der Nordsee herangezogen werden.

Die Scanner verfügen über relativ starke Laser. Die Tiefwasserscanner nutzen üblicherweise Laser der Laserklasse IV. Bei Flachwasserscannern kommen Laser der Laserklasse IIIB bzw. IV zum Einsatz. Da von diesen Lasern eine potenzielle Gefahr ausgeht, muss im Rahmen einer Befliegung sichergestellt sein, dass die Augensicherheit gewährleistet wird. Dem entsprechend sind die Flughöhen und die Lasereinstellungen anzupassen.

3 Rahmenbedingungen im Bereich der Nordsee

3.1 Bathymetrie der Nordseeküste

Der Küstenbereich der Deutschen Bucht ist geprägt von den Nordfriesischen bzw. Ostfriesischen Inseln sowie der Ästuar der Elbe, Weser, Jade und Ems. Die Tiefe der Nordsee in Relation zum LAT ist in Abbildung 10 dargestellt. Das LAT beschreibt das astronomisch niedrigste Niedrigwasser und somit einen Wasserstand, der sehr selten eintritt. In diesem Bericht werden LAT und Seekartennull (SKN) gleich gesetzt.

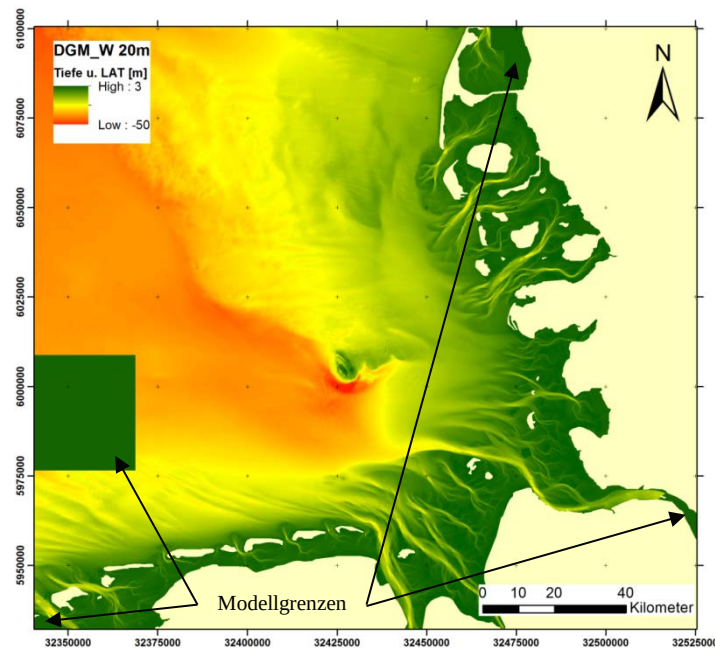


Abbildung 10: Bathymetrie der Nordsee

In Abbildung 10 ist die Wassertiefe relativ zum Seekartennull bzw. dem LAT dargestellt. Datengrundlage ist ein DGM-W der Nordsee mit einer Auflösung von 20m. In dieser Abbildung sind Wassertiefen von 3m oberhalb LAT bis 50m unter LAT dargestellt. Werden die Tiefen nur zwischen 0m und 10m rel. zu LAT eingefärbt, ergibt sich Abbildung 11. Aus dieser Abbildung ergeben sich die bei einem LAT - Wasserstand trocken fallenden Flächen (dunkelgrün) deutlicher und es geht Folgendes daraus hervor.

- Die Flächen zwischen den Inseln und dem Festland fallen bei Niedrigwasser üblicherweise trocken.
- Eine Vielzahl von Prielen verhindert, dass die Flächen vollständig trocken fallen.
- Nördlich der Ostfriesischen Inseln bzw. westlich der Nordfriesischen Inseln fällt das Meer relativ schnell ab bzw. es werden schnell größere Wassertiefen erreicht.

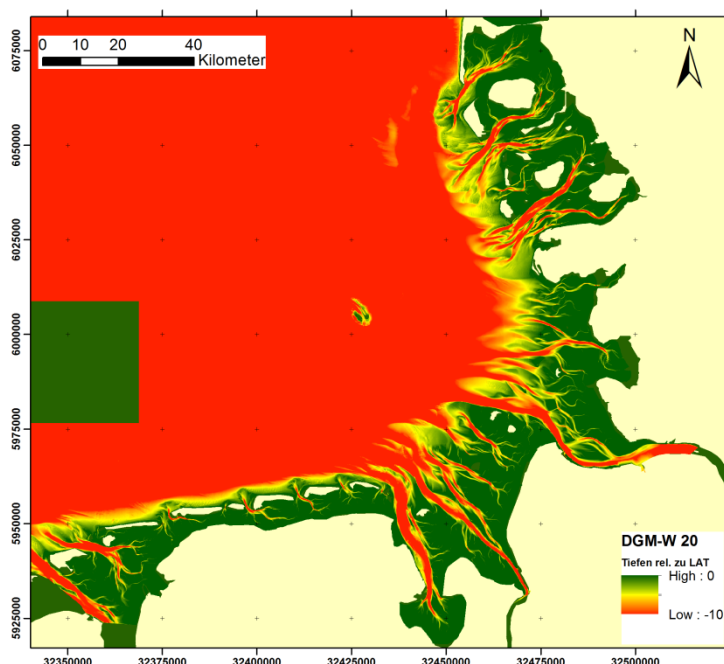


Abbildung 11: Bathymetrie der Nordseeküste zwischen 0m und 10m unter LAT

3.2 Potenziell zu erfassende Flächen

Auf Grundlage der Bathymetrie lassen sich die Wassertiefen relativ zu bestimmten Wasserständen abschätzen. Infolgedessen werden potenzielle Befliegungen auch bei etwas höheren Wasserständen ausgeführt. In den folgenden Abbildungen sind jeweils für den Bereich der Ostfriesischen Inseln, der Nordfriesischen Inseln sowie des Mündungsbereichs der Elbe Flächen bestimmte Wassertiefen bei bestimmten Wasserständen dargestellt. Zur Abschätzung der potenziell erfassbaren Bereiche wird unterstellt, dass bis zu einer Wassertiefe von 1m eine zuverlässige Erfassung möglich ist. Zwischen einer Wassertiefe von 1m und 2m wird von einer wahrscheinlichen Erfassung ausgegangen und bei Bereichen mit einer Wassertiefe von >2m ist eine Erfassung eher unwahrscheinlich.

3.2.1 Ostfriesische Inseln

Der Bereich rund um die Ostfriesischen Inseln ist in Abbildung 12 bis Abbildung 15 dargestellt. Insbesondere im Bereich der Ästuar / Jade ist mit sehr trübem Wasser zu rechnen. Es ist davon auszugehen, dass die Laserbathymetrie in diesem Bereich - wenn überhaupt - nur sehr wenig Punkte unter Wasser erfasst. Infolgedessen sollte eine Befliegung so geplant werden, dass diese Bereiche bei einem möglichst geringem Wasserstand erfasst werden bzw. die Flugstreifen so gewählt werden, dass diese Bereiche tatsächlich zum Zeitpunkt des Niedrigwassers befliegen werden. Bei den Bereichen zwischen den Ostfriesischen Inseln und dem Festland dominieren die hell- und dunkelgrünen Flächen bis zu einem Wasserstand von ~1,5m über LAT. In den Abbildungen stellen die dunkelgrünen Flächen die trocken fallenden Bereiche und die hellgrünen Flächen die Bereiche mit einer Wassertiefe von max. 1,0m dar.

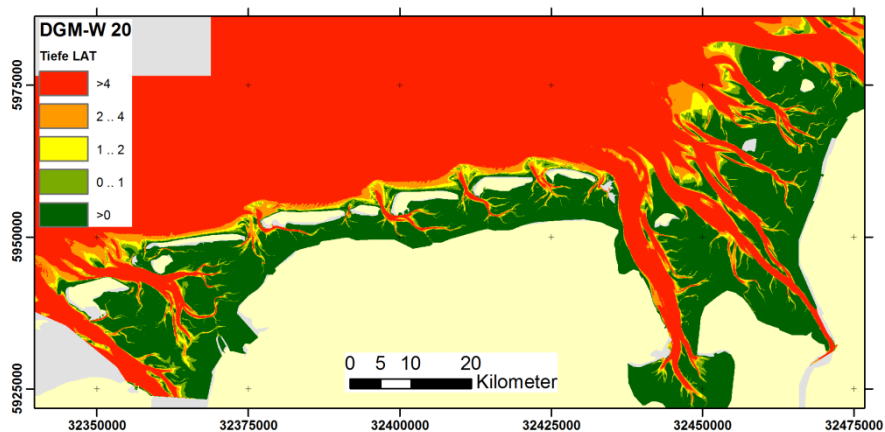


Abbildung 12: Wassertiefe bei Wasserstand LAT (Ostfr. Inseln)

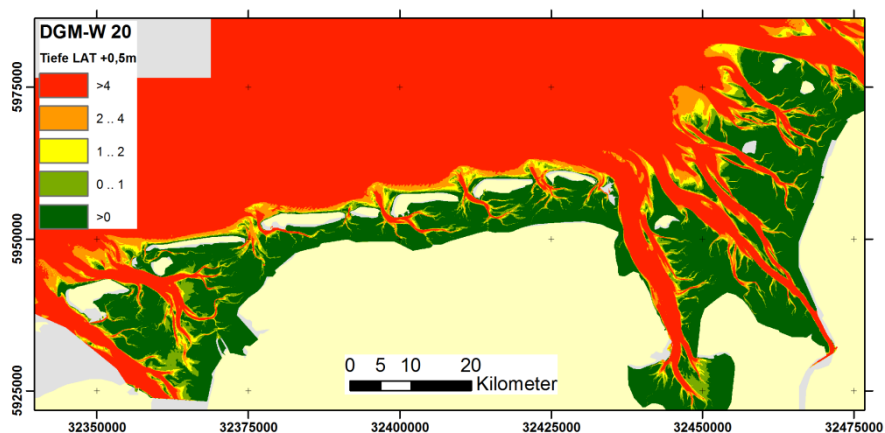


Abbildung 13: Wassertiefe bei Wasserstand LAT +0,5m (Ostfr. Inseln)

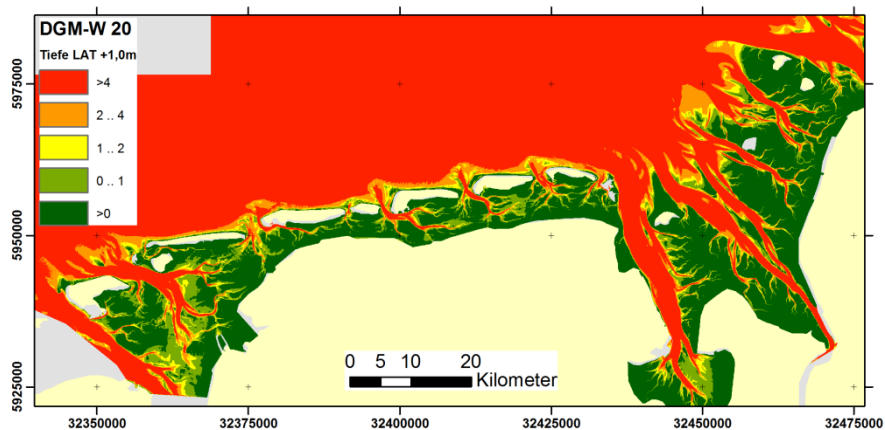


Abbildung 14: Wassertiefe bei Wasserstand LAT +1,0m (Ostfr. Inseln)

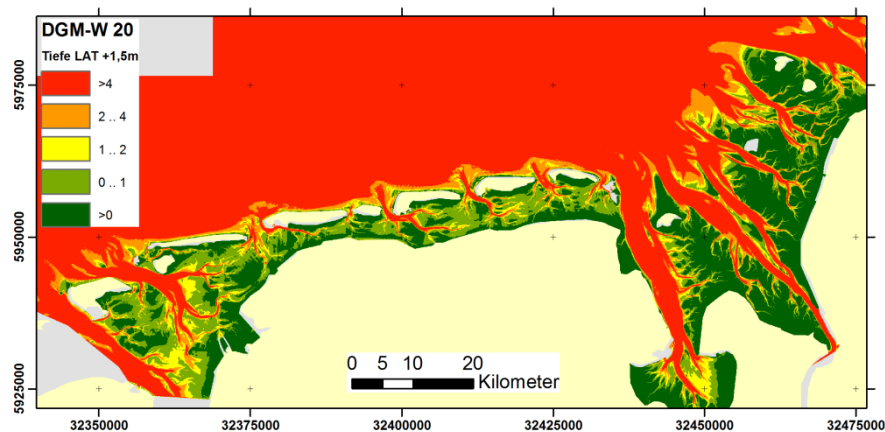


Abbildung 15: Wassertiefe bei Wasserstand LAT +1,5m (Ostfr. Inseln)

3.2.2 Mündungsbereich Elbe/Weser und Nordfriesische Inseln

Vergleichbar der Situation bei den Ostfriesischen Inseln ist in Abbildung 16 bzw. Abbildung 17 die Situation im Bereich der Elbe/Weser Mündung, der Jade und der Nordfriesischen Inseln dargestellt. Im Bereich der Flussmündungen / Jade ist zu beachten, dass bedingt durch zu Zuflüsse der Elbe und Weser das Wasser eine sehr starke Trübung aufweist. Infolgedessen ist zu erwarten, dass hierbei nur sehr geringe Sichttiefen vorherrschen und folglich nur sehr geringe Eindringtiefen erreicht werden. Infolgedessen sollten die Flächen möglichst bei einem sehr niedrigen Wasserstand erfasst werden sollte (trockene Flächen). Aus den Abbildungen geht hervor, dass die Flächen bis zu einem Wasserstand von etwa 0,5m über LAT noch der Großteil trocken Fallen. Ausnahme hierbei sind die inneren Bereiche des Jadebusens. Im Bereich der Nordfriesischen Inseln ähneln die Tiefenverhältnisse den Ostfriesischen Inseln, wobei er Abstand zwischen dem offenen Meer und dem Festland größer ist.

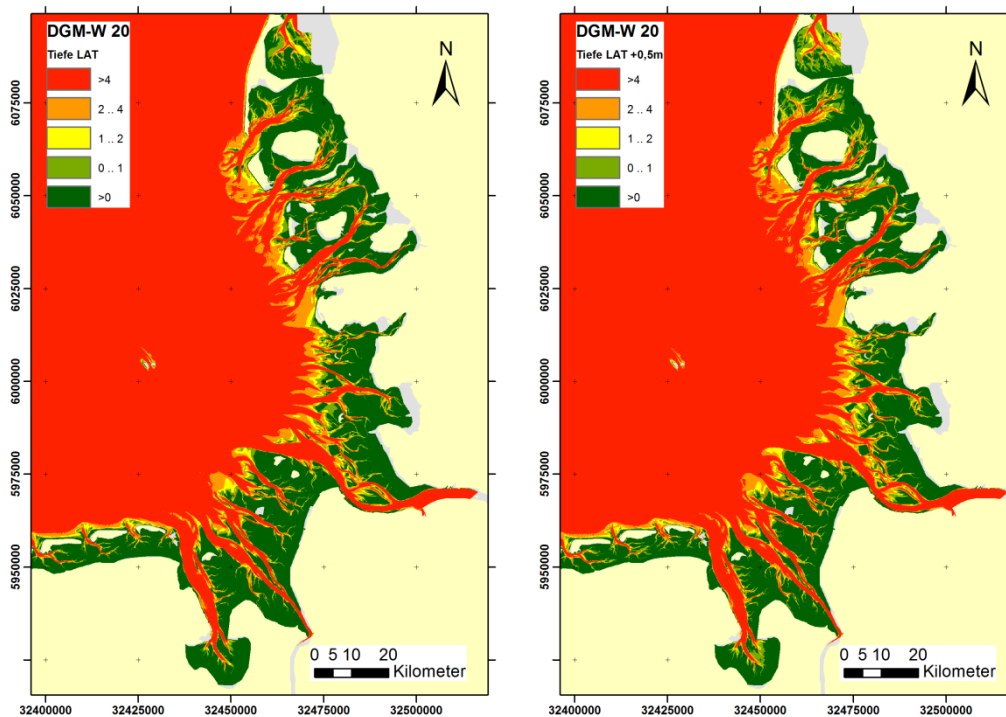


Abbildung 16: Wassertiefen Wasserstand LAT / LAT+0,5m (Ästuar/Nordfr. Inseln)

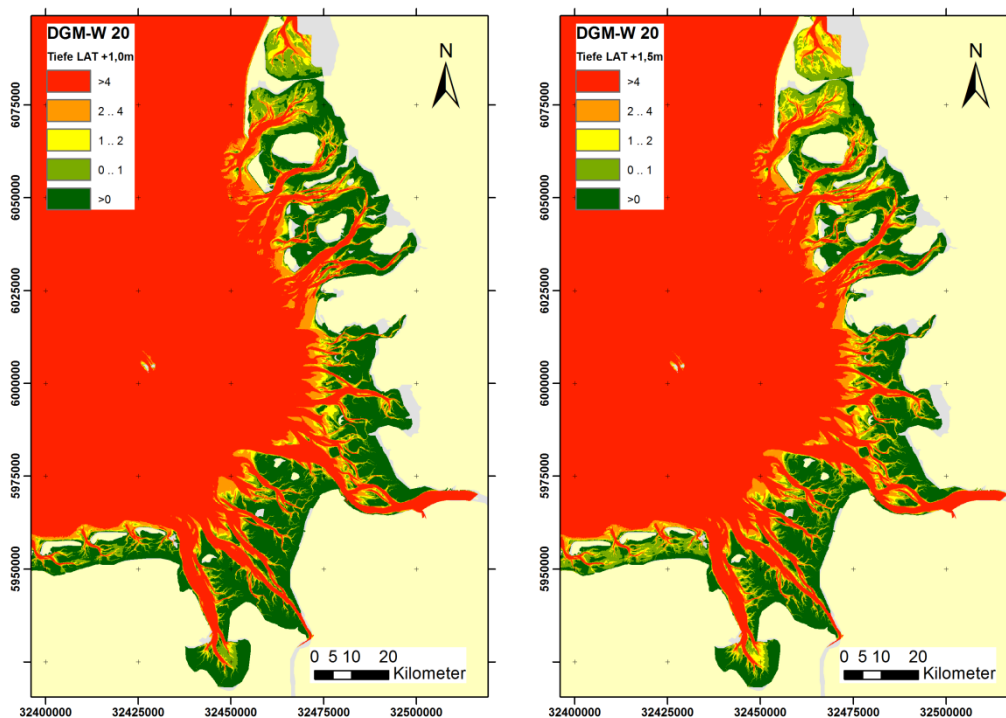


Abbildung 17: Wassertiefen Wasserstand LAT+1,0/ LAT+1,5m (Ästuar/Nordfr. Inseln)

3.2.3 Wasserstand und Verweildauern

Neben den Wassertiefen ist für die Bewertung der Praktikabilität auch entscheidend, wie lange bestimmte Tidephasen andauern bzw. wie lang das Zeitfenster ist, indem ein bestimmter Wasserstand unterschritten wird. Diese Zeiträume variieren an jedem Pegel abhängig von

den morphologischen und hydrologischen Rahmenbedingungen im Bereich der Pegel. Für die Abschätzung, welchen Aufwand eine potenzielle Befliegung hätte und die häufig entsprechende Situationen eintreten, wurden sechs Pegel im Bereich der Nordseeküste näher betrachtet. Für diese Pegel sind in Tabelle 5 neben den Wasserständen auch mittleren Verweildauern von LAT+0,5m – LAT+1,5m dargestellt. In Abbildung 19 ist exemplarisch für den Pegel Norderney die Variation der Verweildauer für alle Tiden eines Jahres dargestellt. Aus der Tabelle und der Abbildung geht hervor, dass im Bereich der ostfriesischen Inseln der Wasserstand im Mittel für etwas weniger als 2h unterhalb des LAT+0,5m liegt. Bei den Ästuaren im Gebiet Weser/Elbe tritt ein größerer Tidenhub auf. Infolgedessen liegt die mittlere Verweildauer von <LAT+0,5m nur bei ~1,5h.

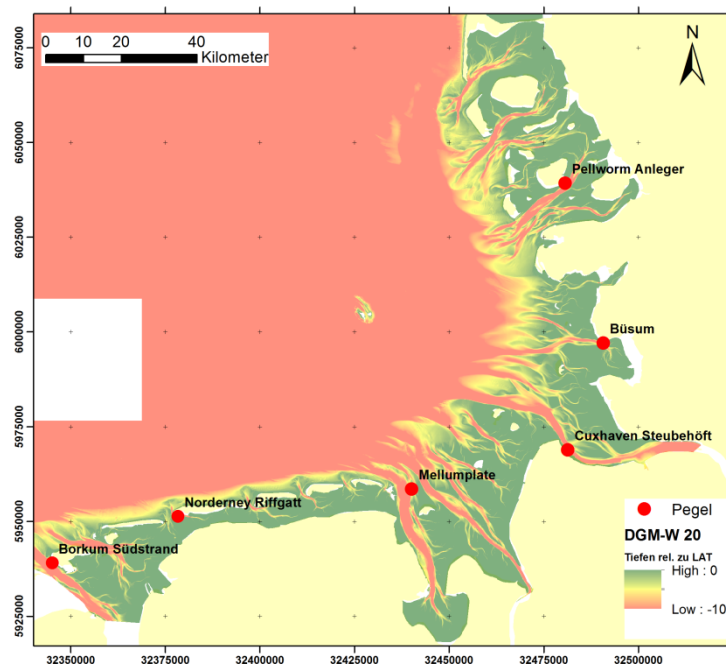


Abbildung 18: Pegelstandorte der Tabelle 5

Tabelle 5: Verweildauer für LAT+0,5m bzw. LAT+1,0m

Pegel	Wasserstand über PNP [m]		mitt. Verweildauer [h]		
	mTNW	LAT	LAT+0,5m	LAT+1,0m	LAT+1,5m
Borkum Südstrand	3,81	3,23	1,90	3,14	4,66
Norderney Riffgatt	3,78	3,16	1,81	3,09	4,69
Mellumplate	3,46	2,79	1,46	2,39	3,70
Cuxhaven Steubenhöft	3,6	2,96	1,46	2,39	3,70
Büsum	3,43	2,73	2,24	3,19	4,03
Pellworm Anleger	3,31	2,63	1,32	2,17	3,17

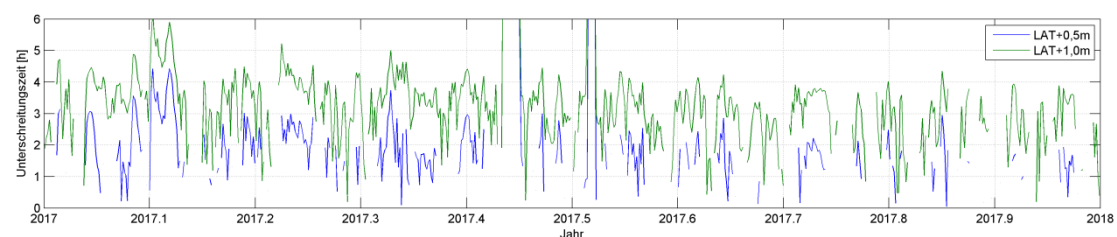


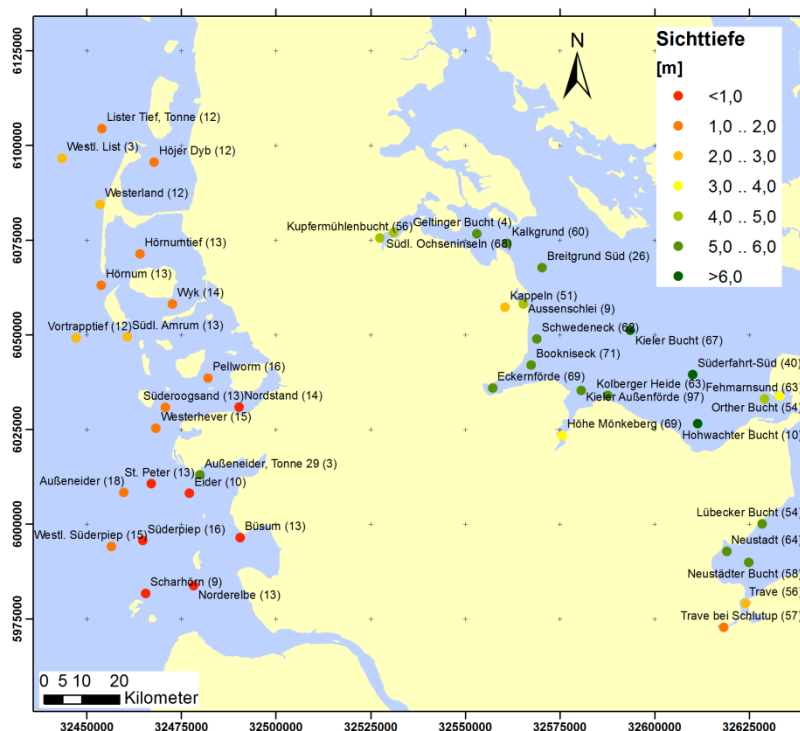
Abbildung 19: Verweildauer des Wasserstandes (Pegel Norderney)

Auch ohne den Einfluss von Wind und Zuflüssen variieren die Gezeiten innerhalb der Deutschen Bucht (vgl. Nipptide und Springtide). Da die Bewegung der verursachenden Himmelskörper bekannt sind, können durch Gezeitenvorausberechnungen die Zeiträume des Springniedrigwassers (min. Wasserstand) ermittelt werden. Von Seiten des BSH werden Gezeitenvorausberechnungen durchgeführt und die Ergebnisse in einem Gezeitenkalender veröffentlicht. Das BSH veröffentlicht weiterhin Informationen zum Seegang.

3.3 Sichttiefen

3.3.1 Gemessenen Sichttiefen LLUR

Für diesen Bericht lagen von Seiten des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (LLUR) in Schleswig-Holstein Sichttiefenmessungen für Standorte in der Nord- und Ostsee vor. Die mittleren Sichttiefen sind in Abbildung 20 dargestellt. Neben den farb-codierten Werten für die Sichttiefe sind in Klammern die Anzahl der zugrunde liegenden Messungen zwischen 2009 und 2016 dargestellt. Darüber hinaus sind in Abbildung 21 die Spannweiten zwischen der geringsten und maximal erfassten Sichttiefe dargestellt.



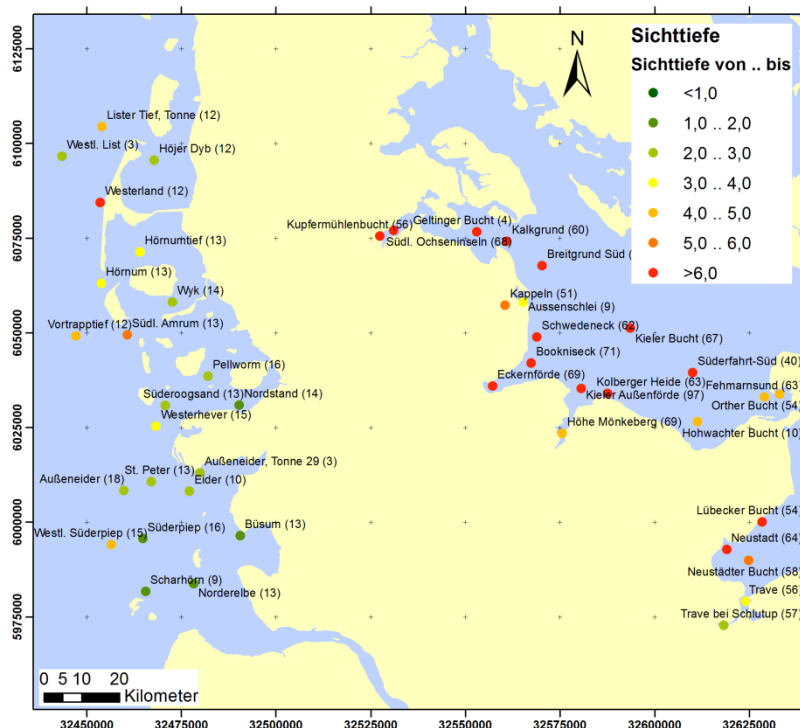


Abbildung 21: Spanne der am LLUR erfassten Sichttiefen

Aus beiden Abbildungen geht hervor, dass die Sichttiefen im Bereich der Nordsee gegenüber der Ostsee wesentlich geringer sind. Treten an der Ostsee noch regelmäßig mittlere Sichttiefen von >4m auf sind an der Nordsee mittlere Sichttiefen <2m die Regel. Es zeigt sich weiterhin, dass im Bereich der Elbmündung wesentlich geringere Sichttiefen auftreten, als dies in Nordfriesland der Fall ist. Da auch die Variationen im Bereich der Elbemündung sehr gering sind, ist davon auszugehen, dass in diesem Bereich nahezu immer sehr geringe Sichttiefen auftreten. Im Bereich Nordfriesland variiert die Sichttiefe um mehrere Meter. Exemplarisch sind in Abbildung 22 die Zeitreihen für vier Standorte dargestellt. Aufgrund der relativ geringen Anzahl von Messungen können jedoch keine belastbaren Aussagen getroffen werden, zu welchen Jahreszeiten mit welchen Sichttiefen zu rechnen ist. Vergleichbare Messungen lagen im Bereich der Ostfriesischen Inseln nicht vor.

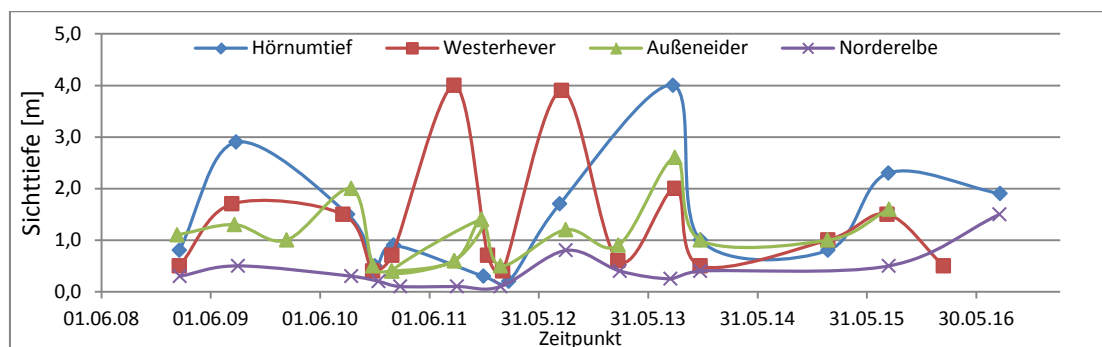


Abbildung 22: Sichttiefenmessungen ausgewählter Standorte

3.4 Genauigkeitsanforderungen nach IHO S44

Bei der Laserbathymetrie handelt es sich um ein Verfahren zur Erfassung des Gewässerbodens und damit um ein hydrografisches Messverfahren. Die IHO gibt Tiefenmessgenauigkeiten im Standard S44 vor. Die Genauigkeit ist dabei abhängig von der Nutzung des jeweiligen Gebietes sowie von der Wassertiefe. Die IHO Special Order gilt für stark frequentierte Bereiche wie etwa Wasserstraßen und Häfen. Zusätzlich zu den Forderungen nach Tabelle 6 muss in IHO-Special Order Gebieten ein 1m³ großes Objekt detektiert werden können. Gebiete mit geringerem Schiffsverkehr sowie Tiefen von <100m fallen in Order 1a/b. Die Order 1a und Order 1b unterscheiden sich in der Art, dass in Order 1b Gebieten keine flächenhaften Vermessungen nötig sind. Zusätzlich müssen in Order 1a Gebieten Objekte mit einer Größe von >2m x 2m x 2m detektiert werden können.

Davon abweichend gibt die WSV für deren Bearbeitungsgebiete höhere Genauigkeitsanforderungen vor. Die Unsicherheiten errechnen sich nach nach folgender Formel (IHO und WSV):

$$vTPU_{max} = \pm \sqrt{a^2 + (b \cdot Wassertiefe)^2}$$

Die Parameter a und b und die daraus resultierenden Genauigkeitsanforderungen (G.d.V. 95%) nach IHO und WSV für eine Wassertiefe von 3m sind in Tabelle 6 dargestellt. Die Angaben sind auf eine Wassertiefe von 3m bezogen, da dies in etwa der zu erwartenden maximalen Eindringtiefe von Flachwassersystemen in der Nordsee entspricht.

Tabelle 6: Genauigkeitsanforderungen nach IHO / WSV

	Tiefe (@3m Wassertiefe)			Lage (@3m Wassertiefe)		
	a	b	vTPU [m]	a	b	hTPU [m]
IHO-Special Order	0,25	0,0075	0,251	2m		2,000
IHO Order 1a / b	0,5	0,013	0,502	5m+5%Tiefe		5,150
WSV	0,14	0,015	0,147	0,3	0,15	0,541

Für den trocken Bereich werden im Rahmen der DGM-W Modellierung i.A. Höhengenaugkeiten von 0,15m und Lagegenauigkeiten von 0,4m bei einem G.d.V. von 95% gefordert.

3.5 Zwischenfazit

Aus den Darstellungen der Wassertiefen lässt sich ableiten, dass große Teile der Flachwasserbereiche während der Ebbphasen (LAT+0,5m) trocken fallen. Die trocken fallenden Flächen werden im Allgemeinen durch die Fahrrinnen bzw. durch Priele unterbrochen. Weiterhin bleiben bestimmte tiefere Bereiche (z.B. Senken) auch bei Ebbe mit Wasser bedeckt. Zwar ist die Wassertiefe in diesen Bereichen nicht sehr hoch, jedoch können diese mit herkömmlichen NIR basierten Laserscannersystemen nicht erfasst werden. Bathymetrische Laserscanner sollten in der Lage sein, diese Bereiche zu erfassen und somit weniger Lücken zu erzeugen. Die so reduzierten Lücken müssen nicht mit konventionellen (aufwendigeren) Verfahren geschlossen werden. Durch einen Mehraufwand auf Seiten der Befliegung könnte der Aufwand zur konventionellen Erfassung der Flachwasserbereiche in bestimmten Gebieten reduziert werden.

Bei einer Betrachtung der vorliegenden Sichttiefeninformationen zeigt sich, dass im Bereich der Elbmündung nur sehr geringe Sichttiefen vorhanden sind. Es ist davon auszugehen, dass ähnliche Verhältnisse auch bei den Mündungen der anderen großen Flüsse (Weser, Ems und Jadegebiet) auftreten bzw. die Eindringtiefen in diesen Bereichen sehr gering sind.

Es liegen nur relativ wenig Sichttiefenmessungen an punktuellen Messstellen vor. Dienstleister bieten mittlerweile flächenhafte Trübungs- und Sichttiefeninformationen auf Basis hyperspektraler Satellitenbilder an, wobei deren Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit bisher im Bereich der Deutschen Nordseeküste nicht validiert wurde. Sofern deren Daten zuverlässig sind, können auf Basis dieser Informationen Aussagen zu bestimmten Zeiträumen im Jahr getroffen werden, in denen mit relativ guten Sichttiefenverhältnissen zu rechnen ist.

Vor einer potenziellen Befliegung sollte das Gebiet näher analysiert werden. Dabei sollte untersucht werden, welche Wassertiefen in diesem Gebiet auftreten und welche Sichttiefenverhältnisse zu erwarten sind. Insbesondere in Ästuargebieten ist mit sehr geringen Sichttiefen zu rechnen. Praktisch bedeutet dies, dass in diesen Bereichen auch nur sehr geringe Eindringtiefen ins Wasser erreicht werden und somit kein großer Vorteil gegenüber konventionellen Springniedrigwasserbefliegungen vorhanden ist.

Allgemein sollten die Befliegungen während der Springniedrigwasser (bei normalen Wassereinträgen der Flüsse) stattfinden, da zu diesen Zeitpunkten sehr geringe Wassertiefen zu erwarten sind bzw. die meisten Flächen trocken fallen. Bei günstigen Sichttiefenverhältnissen kann es aber dennoch günstiger sein, bei nicht auf das Springniedrigwasser zu warten sondern die günstigen Sichttiefen auszunutzen. Bei guten Verhältnissen werden größere, nicht trocken gefallenen Flächen erfasst. In Summe kann dann ein größeres Gebiet erfasst werden, als dies bei einer Springniedrigwasserbefliegung unter schlechteren Bedingungen der Fall ist.

4 Ergebnisse bisheriger Einsätze

4.1 Erprobung des NLWKN 2016

4.1.1 Befliegungszeitpunkt und Rahmenbedingungen

Von Seiten des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) wurde im Sommer 2016 der Scanner RIEGL VQ820G erprobt. Bei dem RIEGL VQ820G handelt es sich um einen Scanner, der ausschließlich grünes Laserlicht nutzt und im Gegensatz zu den meisten anderen bathymetrischen Scannern kein Palmer Scanmuster aufweist. Ziel der Erprobung war der Riffbogen vor der Ostfriesischen Insel Norderney. Die Daten sowie die Ergebnisse wurden von Seiten der Forschungsstelle Küste des NLWKN (Norden/Norderney) der BfG für diesen Bericht freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Die Bathymetrie des betreffenden Bereiches ist in Abbildung 23 dargestellt. Das Gebiet wurde mithilfe von 20 Flugstreifen innerhalb von 1 Stunde und 53 Minuten erfasst. Die rot eingerahmte Fläche beträgt $\sim 36\text{km}^2$.

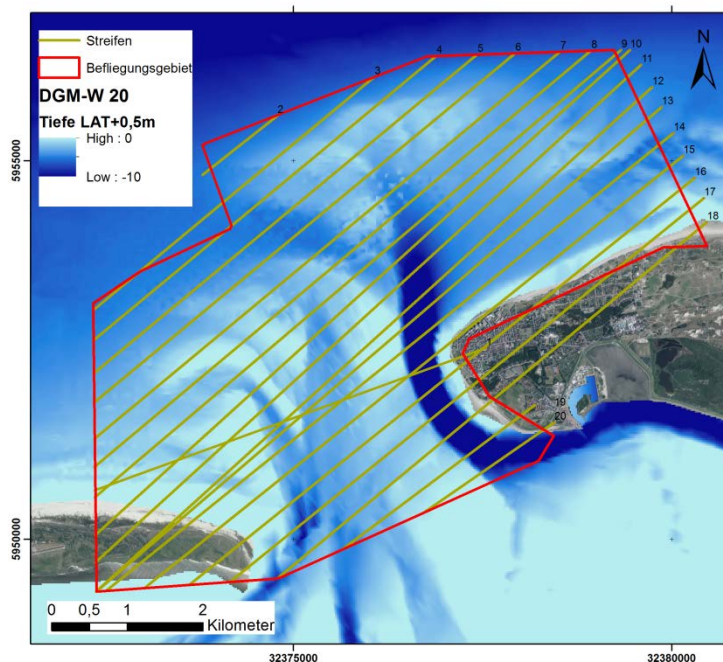


Abbildung 23: Auftragsgebiet der Befliegung zwischen Juist und Norderney

Die Scannerparameter wurden dabei so gewählt, dass bei einer Fluggeschwindigkeit von $\sim 52\text{m/s}$ Streifenbreiten von $\sim 460\text{m}$ bei einem Spurbstand von $\sim 140\text{m}$ erreicht wurden. Bedingt durch die Bauart des RIEGL VQ820G wurde ein bogenförmiges Scanmuster erfasst. Die Pulsrate des Lasers betrug $\sim 284\text{kHz}$ und der Öffnungswinkel $\sim 42^\circ$. Unter Berücksichtigung der Spiegeldrehgeschwindigkeit von 12822gon/s ergibt sich bei einer Flughöhe von 600m ü.G. ein theoretischer mittlerer Punktabstand von $\sim 0,5\text{m}$.

Die eigentliche Befliegung fand am 17.09.2016 zwischen 17:30 und 19:25 MEZ statt. Die am Pegel Norderney erfassten Wasserstände dieses Zeitraums sind in Abbildung 24 dargestellt. Pegelnulldpunkt des Pegel Norderney lag zum Zeitpunkt der Befliegung bei NHN -4,99m. Das amtlich festgelegte LAT lag bei 3,16m über Pegelnulld (tel. Auskunft der zuständigen GDWS Standort Aurich) und dass veröffentlichte mittlere Tideniedrigwasser mTNW (zwischen 01.11.2000 und 30.10.2010) bei 3,78m über PNP⁴ oder 0,62m über LAT. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Befliegung zum Zeitpunkt des Tideniedrigwassers stattgefunden hat und das tatsächlich aufgetretene Tideniedrigwasser deutlich unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers bzw. oberhalb des LAT gelegen hat. Während des Befliegungszeitraums lag der Wasserstand zwischen 0,39m (17:30 Uhr) und 0,9m (19:25 Uhr) bzw. im Mittel 0,5m oberhalb des LAT.

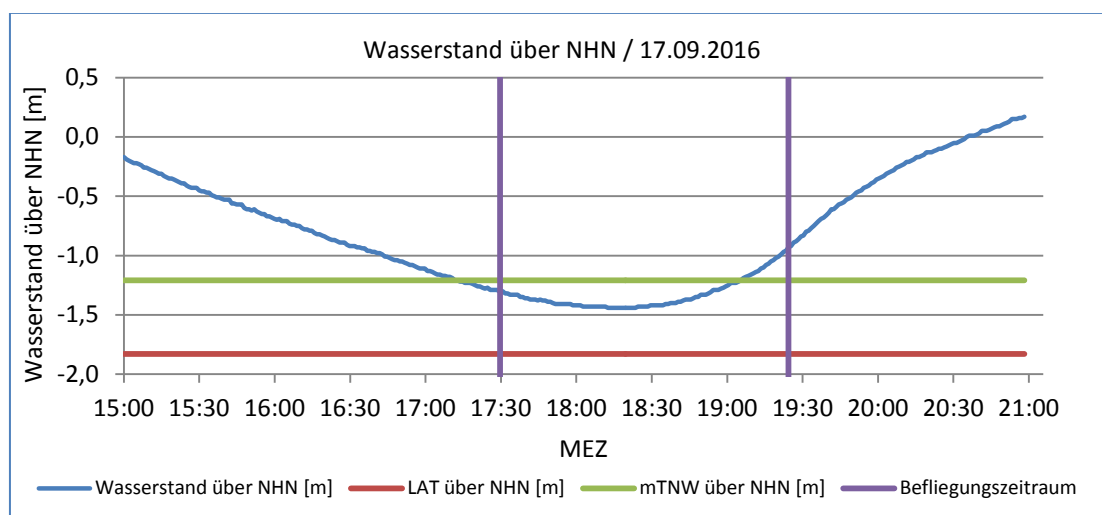


Abbildung 24: Wasserstand am Pegel Norderney Riffgat zum Zeitpunkt der Befliegung

Aus dem Geländemodell der Nordsee ergeben sich die in Abbildung 23 dargestellten Wassertiefen zum Zeitpunkt der Befliegung (LAT+0,5m). Ausgehend von diesen Daten lassen sich die prozentualen Anteile der Wassertiefen darstellen. In der Theorie sollten bei einer Eindringtiefe von 2m in das Wasser ~40% der Wasseroberfläche bzw. bei einer Eindringtiefe von 3m ~50% der Fläche erfasst werden können. Da die Befliegung einen bestimmten Zeitraum in Anspruch genommen hat und sich innerhalb dieses Zeitraums die Wasserstände geändert haben, werden die tatsächlich erfassten Flächen davon abweichen.

Die Rahmenbedingungen waren zum Zeitpunkt der Befliegung sehr günstig. Die Gewässertrübung war zu diesem Zeitpunkt sehr gering und folglich waren größere Eindringtiefen zu erwarten. Weiterhin bleibt festzustellen, dass die nahezu gesamte Befliegung bei einem Wasserstand unterhalb des mittleren Tideniedrigwassers erfolgte und der Gewässerboden aus hellem Sand und damit einem guten Reflektor bestand.

Die erfassten Daten wurden von der ausführenden Firma prozessiert und klassifiziert. Unter Beibehaltung der Streifennummer erfolgte weiterhin eine Plausibilisierung und Kachelung der Daten.

⁴<https://www.pegelonline.wsv.de/gast/stammdaten?pegelnr=9360010>

Tabelle 7: Anteil der Wassertiefen (LAT +0,5m) im Untersuchungsgebiet

Wassertiefe rel. zu LAT+0,5m		Anteil an Gesamtfläche
kleiner 5		14,5%
4	5	11,3%
3	4	18,6%
2	3	15,9%
1	2	14,6%
0,5	1	4,8%
0	0,5	5,5%
trockene Flächen		14,8%

4.1.2 Punktdichte

Ausgehend von den gelieferten Laserdaten lassen sich für die Punktklassen

- Bodenkpunkt,
- Gewässerbett- und
- Wasseroberfläche

Punktdichten ableiten. In Abbildung 25 sind die resultierenden Punktdichten für die trockenen Bodenkpunkte (links) und die Gewässerbettunkte (rechts) dargestellt. Im trockenen Bereich bewegt sich die Punktdichte im Wesentlichen zwischen 10 und 20 Pkt/m². Die rechts dargestellten Punktdichten der Gewässerbettunkte zeigen in den zuverlässig erfassten Gebieten vergleichbare Punktdichten. Am Rand dieser Bereiche bzw. in tieferen Gebieten nimmt die Punktdichte erwartungsgemäß ab.

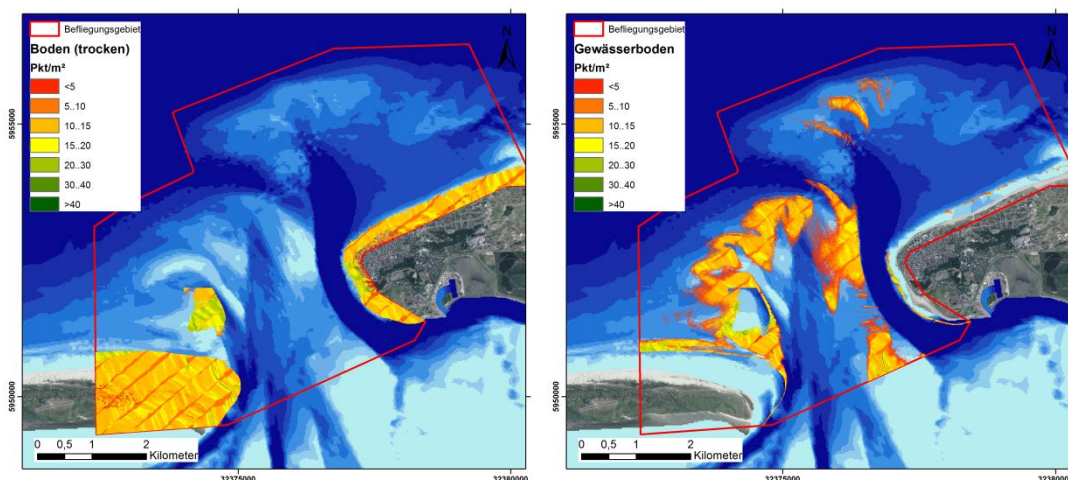


Abbildung 25: Punktdichtekarten auf Basis der Bodenkpunkte (l: trocken, r: Gewässerbett)

Abweichend zur Abbildung 25 sind in Abbildung 26 die Punktdichten ausgewählter Messstreifen ohne Überlappungsbereiche bzw. nur jeder zweite Flugstreifen dargestellt. Dies stellt somit das Ergebnis dar, welches bei einer überlappungsfreien Befliegung erreichbar ist. Die mittlere Punktdichte betrug an dieser Stelle zwischen 5 und 10 Punkten je m². Bei der Bewertung ist aber zu berücksichtigen, dass in dieser Befliegung ein RIEGL VQ820G Scanner zum Einsatz kam, dessen Scanmuster bogenförmig ist. Die Punktverteilung dieses Scanners ist im Gegensatz zu den anderen bathymetrischen Scannern mit elliptischen Scanmustern wesentlich homogener.

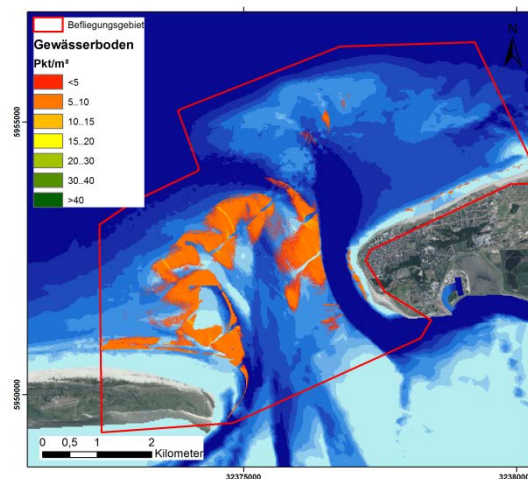


Abbildung 26: Punktdichten (Gewässerbodenpunkte) der einzelnen Messstreifen

Werden die Punkte der Wasseroberfläche betrachtet, ergibt sich die in Abbildung 27 dargestellte Situation. Im linken Bereich der Abbildung sind die finalen Punktdichten inkl. aller Überlappungsbereiche dargestellt. Der rechte Bereich beschreibt die Situation ausgewählter Messstreifen ohne Überlappung. Aus beiden Abbildungen geht hervor, dass die Punktdichten der Wasseroberflächenpunkte wesentlich kleiner sind. Im Allgemeinen werden nur Punktdichten im niedrigen einstelligen Bereich erfasst.

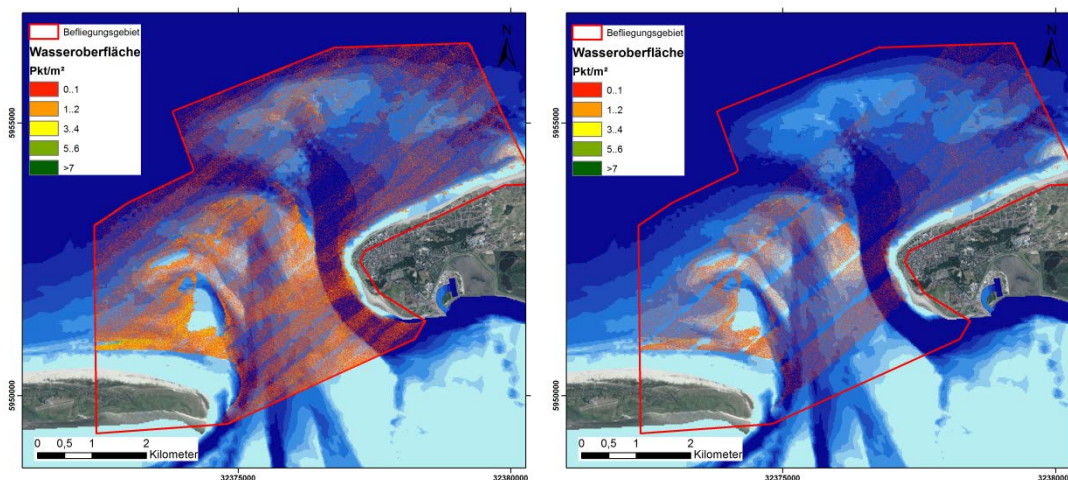


Abbildung 27: Punktdichten der Wasseroberflächenpunkte (l. alle Str., r: einzelne Str.)

Entscheidend für die korrekte Erfassung des Gewässerbodens mithilfe der Laserbathymetrie ist die korrekte Erfassung der Wasseroberfläche. Diese ist für die Brechung bzw. den Medienbruch zwischen Luft und Wasser von entscheidender Bedeutung. Eine Darstellung der erfassten Wasseroberflächenpunkte einzelner Messstreifen erfolgt in Abbildung 28. Es zeigt sich, dass als Nebenprodukt auch Aussagen zu den Wellenmustern sowie zu den Wellenhöhen möglich sind (vgl. Abbildung 29).

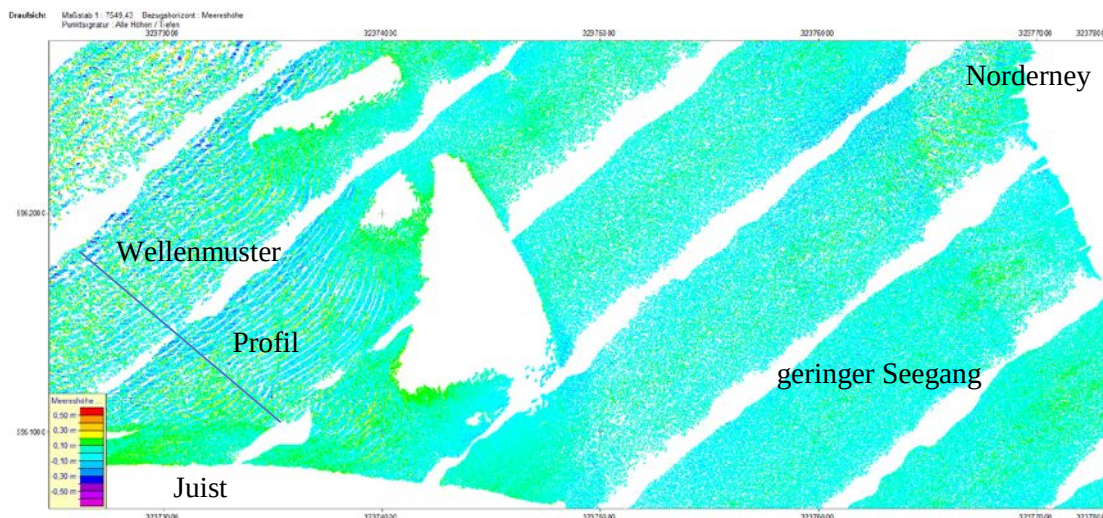


Abbildung 28: Wellenmuster zwischen Juist und Norderney

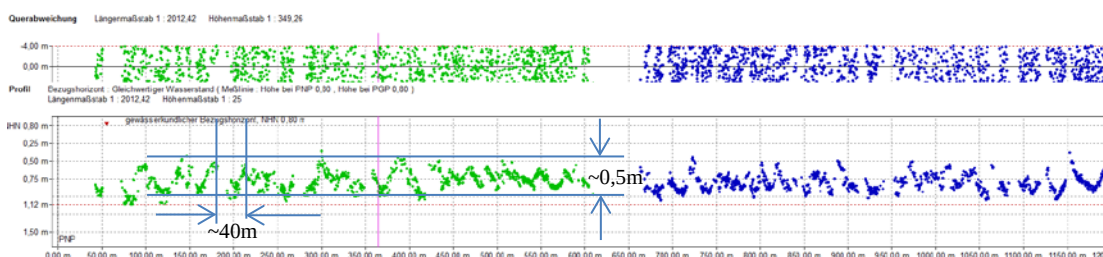


Abbildung 29: Profil aus Abbildung 28

4.1.3 Eindringtiefe und Signalstärke

Für jeden Messstreifen erfolgte eine Zuordnung der zeitgleich gemessenen Wasserstandshöhen. In Abbildung 30 sind die resultierenden Eindringtiefen dargestellt. Aus der Abbildung wird deutlich, dass im Wesentlichen Eindringtiefen zwischen 0,5 (gelb) und ~1,5m (grün) erreicht wurden. Im Randbereich wurden auch Eindringtiefen von bis zu 2m erreicht, wobei deren Gesamtanzahl eher gering war.

Ergänzend sind in Abbildung 31 die Signalstärken der Echos dargestellt. Die Abbildung korrespondiert mit der Abbildung der Eindringtiefen. In trocken gefallen Gebieten bzw. in Gebieten mit einer geringen Tiefe treten relativ starke Signalstärken auf. In den Gebieten mit den maximalen Eindringtiefen sind die Signalstärken relativ schwach. Die Signale der Wasseroberfläche sind ebenfalls eher schwach ausgeprägt (Abbildung 31, rechts).

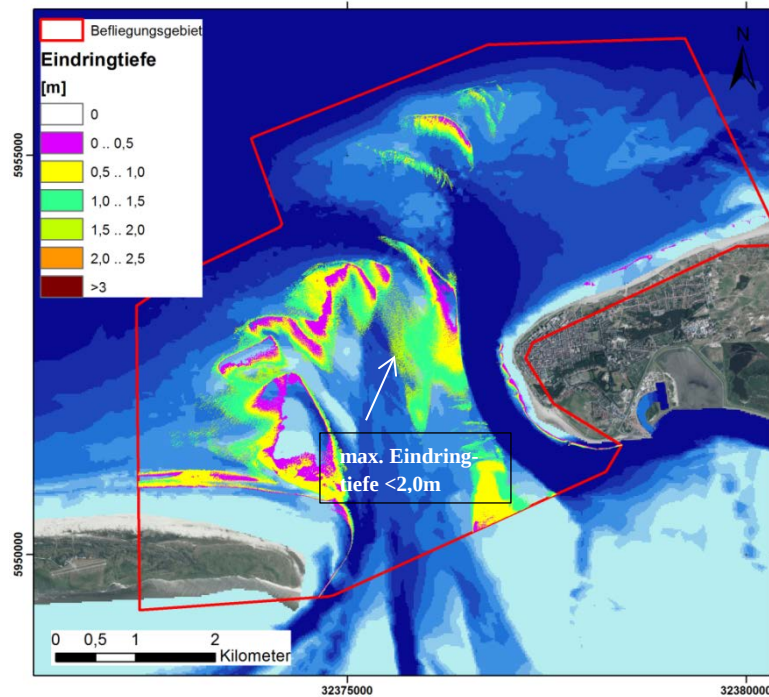


Abbildung 30: Eindringtiefe der Gewässerbettpunkte

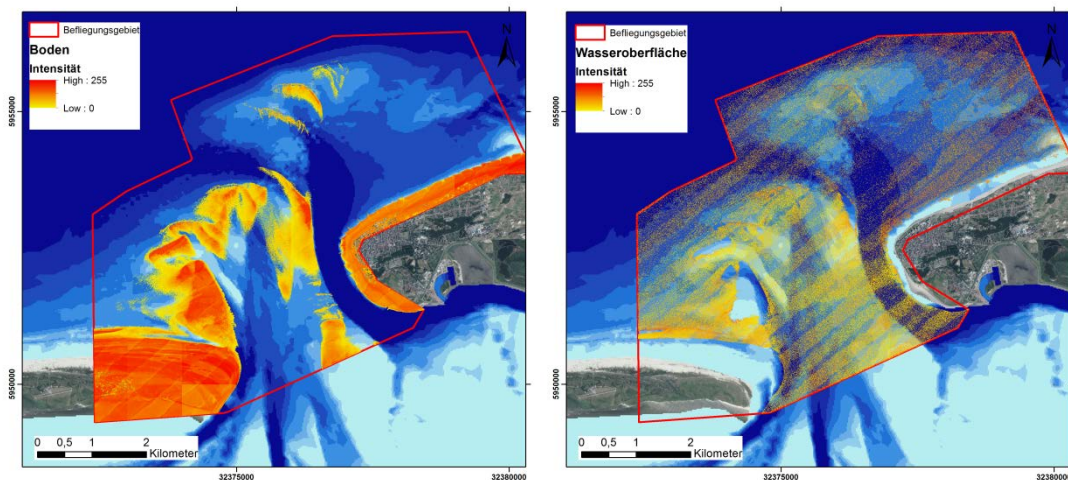


Abbildung 31: Signalstärke Boden/Gewässerbettpunkte (l.) und Wasseroberflächenpunkte (r.)

4.1.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse zu dem DGM-W 2016

Im Folgenden werden die Befliegungsergebnisse einem zeitnah erfassten DGM-W gegenüber gestellt. Dieses, von NLWKN bereitgestellte Geländemodell beinhaltet auch hydroakustische Messungen, die relativ zeitnah zur Befliegung erfasst wurden. Das Modell wurde als 1m GRID gerechnet und ist in Abbildung 32 dargestellt. Zusätzlich sind in der gleichen Abbildung die Erfassungszeiträume der hydroakustischen Messungen dargestellt.

Bei den im Folgenden dargestellten Differenzen handelt es sich immer um Höhendifferenzen, wobei die NHN-Höhe der Laserpunkte von der Höhe der Referenzfläche abgezogen wurde

(Differenz = $H_{\text{Referenz}} - H_{\text{ALBPunkt}}$). Positive Differenzen bedeuten folglich dass die NHN Höhe der Laserpunkte kleiner ist und diese Punkte somit unterhalb der Echolotung liegen.

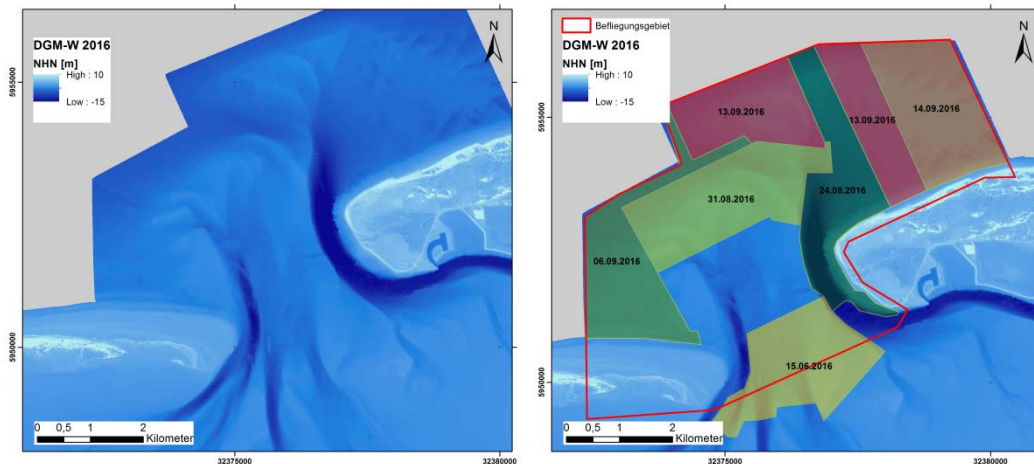


Abbildung 32. DGM-W 2016 und Zeiträume der hydroakustischen Erfassung

Ausgehend von dem Befliegungsdatum (17.09.2016) ergeben sich zeitliche Abstände von 94 bis 3 Tage zwischen der hydroakustischen Erfassung und der Befliegung. Bei dem Gebiet zwischen Juist und Norderney handelt es sich um ein morphologisch sehr aktives Gebiet bzw. es ist mit starken Veränderungen des Gewässerbodens zu rechnen.

In Abbildung 33 sind die Differenzen zwischen den als Gewässerbodenpunkt klassifizierten Laserpunkten und dem DGM-W dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass es zum Teil erhebliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Befliegung und den DGM-W bzw. den zugrunde liegenden Gewässerdaten gibt. Die Mehrzahl der während der Befliegung erfassten Gewässerbettpunkte wurde in einem Bereich erfasst, welcher am 31.08.2016 und damit 17 Tage vorher mit konventionellen hydroakustischen Methoden vermessen wurde.

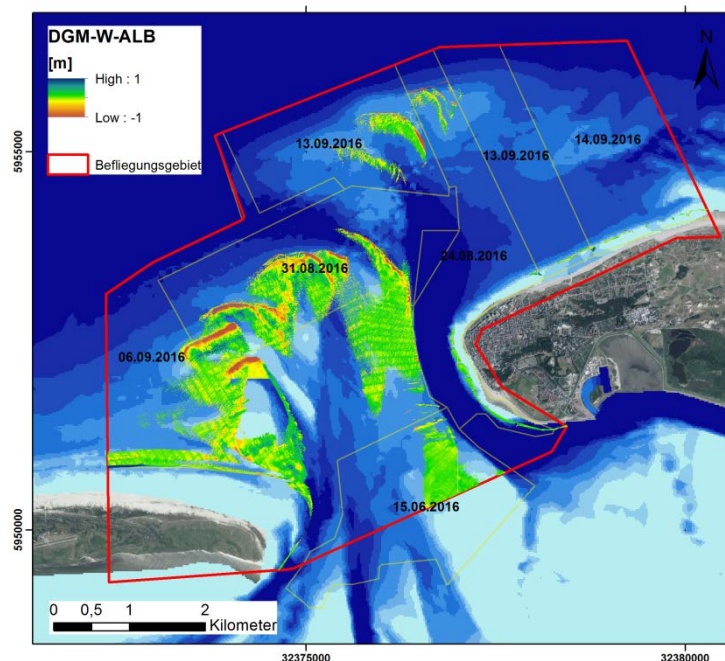


Abbildung 33: Differenz DGM-W und ALB-Gewässerbodenpunkten

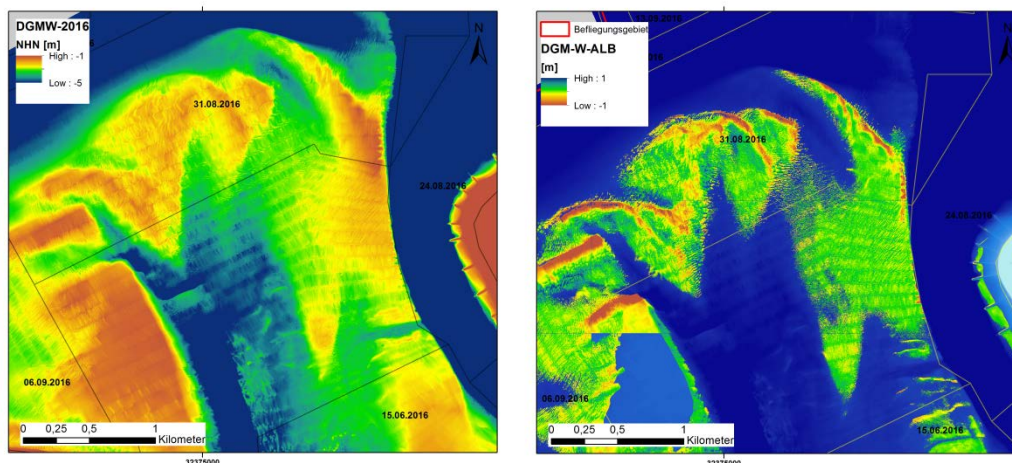


Abbildung 34: Vergrößerte Darstellung der Gewässersohle (l.) und der Differenzen (r.)

Zur Verdeutlichung der morphologischen Aktivität ist in Abbildung 34 das Geländemodell (links) sowie die Differenzen zu den ALB Beobachtungen (rechts) in einem Bereich vergrößert dargestellt. Die im linken Bereich erkennbaren morphologischen Strukturen bilden sich auch in den Differenzen im rechten Bereich ab. Dies lässt auf großflächige Verlagerungen bzw. Veränderungen des Gewässerbodens zwischen dem Erfassungszeiträumen schließen.

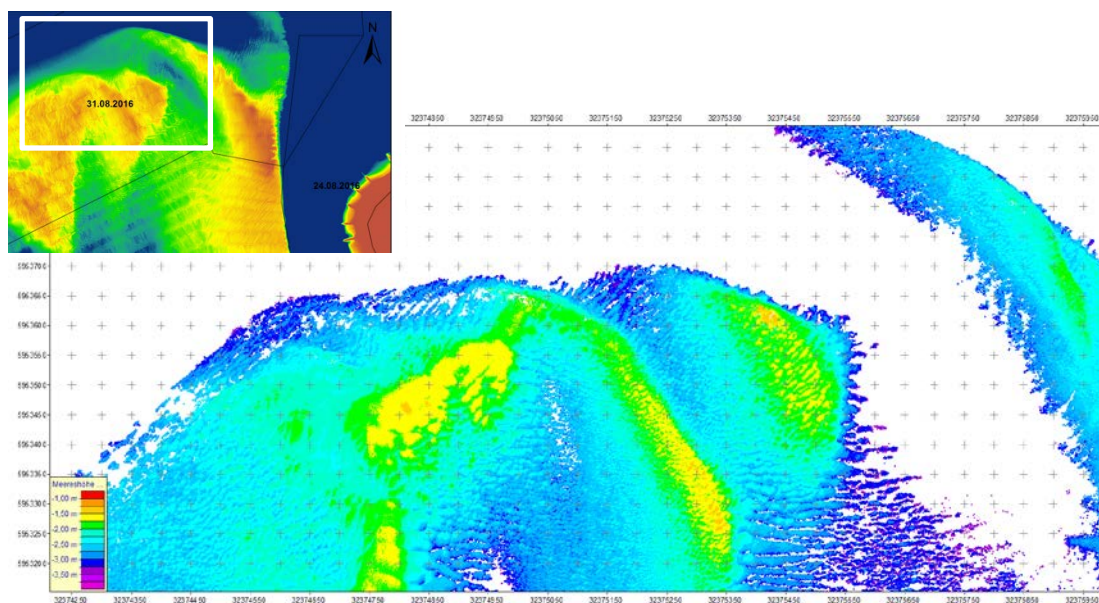


Abbildung 35: Vergrößerte Darstellung der ALB Beobachtungen

Ergänzend sind in Abbildung 35 die als Gewässerbodenpunkt klassifizierte Laserpunkte für einen kleinen Bereich dargestellt. Aus der Abbildung geht die Struktur des Gewässerbodens hervor. Es zeigt sich, dass der Gewässerboden als solcher Höhenvariationen aufweist und zusätzlich diese von Riffelstrukturen überlagert werden.

Aus den Höhendifferenzen lassen sich statistische Kennzahlen ableiten (Tabelle 8). An dieser Stelle wurden nur die Bereiche ausgewertet, in denen das Datum der hydroakustischen Aufnahme bekannt war. Es zeigt sich, dass die mittleren Abweichungen bzw. die Mediane der

Abweichung i.A. unter einem dm liegen. Die einzelnen Abweichungen streuen aber sehr stark und somit fällt die Standardabweichung der Differenzen mit mehreren Dezimetern sehr groß aus. Im Allgemeinen sind die minimalen und maximalen Abweichungen größer als 1m. Der Anteil der als Gewässerbodenpunkt klassifizierten Laserpunkte, deren Höhendifferenz zum DGM-W nicht mehr als 0,25m beträgt variiert zwischen ~56% (31.08.2016) und ~96% (15.06.2016).

Tabelle 8: Mittlere Differenzen in bestimmten Gebieten

Datum hydroak. Messung	Tage zur Be- fliegung	Differenz DGM-W 2016 - ALB Punkte							
		Anzahl	Mittelwert [m]	Median [m]	Std. Abw. [m]	min. [m]	max. [m]	Anteil [%] Diff < 0,5m	Anteil [%] Diff < 0,25m
15.06.2016	94	4.885.316	0,069	0,072	0,095	-0,808	0,759	99,93	96,68
24.08.2016	24	1.371.790	0,009	0,070	0,248	-1,936	1,179	94,94	85,11
31.08.2016	17	16.268.763	-0,053	-0,001	0,391	-2,182	1,658	82,67	56,65
06.09.2016	11	9.302.685	-0,009	-0,013	0,279	-1,492	1,382	93,03	78,06
13.09.2016	4	2.088.587	-0,107	-0,029	0,348	-2,393	1,193	89,25	70,32

Ergänzend zu der Tabelle ist in Abbildung 36 die Verteilung der Differenzen dargestellt. Aus dieser geht hervor, dass trotz großer morphologischer Veränderungen im Mittel die Mehrzahl aller Punkte in einem Bereich von $\pm 0,5$ m ober bzw. unterhalb des modellierten Geländes liegt. Innerhalb des Bereiches, welcher am 31.08.2016 hydroakustisch erfasst wurde, sind die Abweichungen am größten bzw. etwa 17% der ALB Gewässerbettunkte weichen um mehr als $\pm 0,5$ m von dem DGM-W 2016 ab.

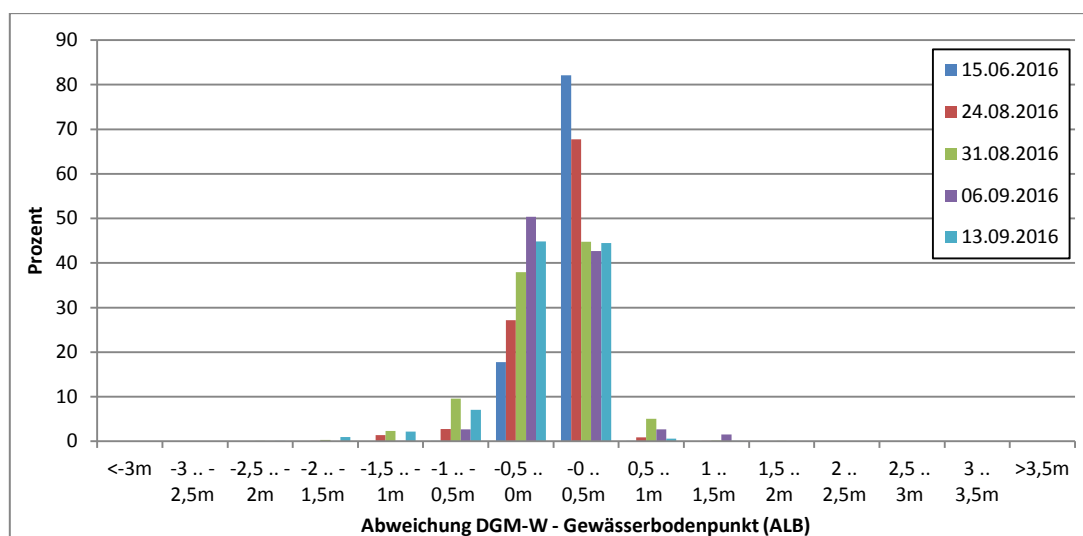


Abbildung 36: Verteilung der Differenzen (DGM-W – Laserpunkt Gewässerbett)

Die in Tabelle 8 und Abbildung 36 gemachten Angaben eignen sich nicht zur Charakterisierung der Genauigkeit. Bedingt durch die morphologischen Änderungen beschreibt das DGM-W 2016 nicht die zum Zeitpunkt der Befliegung tatsächlich vorhandene Form und Höhe des Gewässerbodens. Folglich ist eine Trennung zwischen verfahrensbedingten Unsicherheiten und morphologisch bedingten Abweichungen nicht möglich.

4.2 LKN und BSH

Von Seiten des LKN.SH wird die Laserbathymetrie im Bereich der Nordfriesischen Inseln bzw. der Ostseeküste regelmäßig für die Wattflächenerfassung eingesetzt (Christiansen 2016). Ziel ist es dabei, die Wattflächen flächenhaft zu vermessen und so den zusätzlichen Aufwand für kostspielige hydroakustische Messungen zu minimieren bzw. diese auf die Fahrrinnen und tiefe Bereiche zu beschränken. Seit 2014 wurden durch das LKN.SH über 2000km² an der Nord- und Ostseeküste mit dieser Technik operationell erfasst (Christiansen 2016). Trotz der wesentlich geringeren Sichttiefen werden bathymetrische Befliegungen durchgeführt, da diese flächenhafte Informationen über die Wattenmeere geben und darüber hinaus mit Wasser benetzte Bereiche in Senken ebenfalls erfasst werden. Diese würden bei konventionellen Befliegungen Datenlücken verursachen. Nach Angaben des LKN.SH wurden die erwarteten Eindringtiefen (Sichttiefe * Eindringfaktor) erreicht, wobei im Wesentlichen Flachwassersysteme (z.B. RIEGL VQ820G) und in einem Fall auch ein Tiefwassersystem (Leica AHAB HAWKEYE III) zum Einsatz kamen. Mit dem Tiefwassersystem AHAB HAWKEYE III wurde von Seiten des LKN.SH die Westküste vor Sylt befliegen. An dieser Stelle wurden Eindringtiefen von bis zu 8m erreicht. Dies korrespondiert mit den Sichttiefen von 2m-3m (vgl. Abbildung 20) und der Herstellerangaben der Eindringtiefe (3-fache Sichttiefe). Zur Abschätzung der Genauigkeit wurden Vergleiche mit terrestrischen und hydroakustischen Messungen durchgeführt, wobei die Abweichungen in der Größenordnung von 1 bis 2 Dezimetern liegen (Christiansen 2016). Die Arbeiten des LKN.SH wurden auf der Hydro 2016 in Rostock Warnemünde vorgestellt.

Von Seiten des BSH erfolgte zwischen 2013 und 2015 eine Untersuchung zur Nutzbarkeit der Laserbathymetrie in der Ostsee. Im Rahmen dieser Befliegungen wurden verschiedene Flachwassersysteme (RIEGL VQ820G, AHAB CHIROPTERA) und ein Tiefwassersystem (AHAB HAWKEYE III) vor der Ostseeinsel Poel erprobt. Die Herstellerangaben zu den Eindringtiefen wurden dabei nicht ganz erreicht. Mit dem Tiefwassersystem konnten Eindringtiefen der doppelten Sichttiefen erreicht werden. Bei den Flachwassersystemen konnten etwa 70% (RIEGL VQ820G) bzw. 85% (AHAB CHIROPTERA) der angegebenen Eindringtiefe erreicht werden. In Bezug auf die Genauigkeit konnte die Anforderungen der IHO gem. Order 1b größtenteils erfüllt werden. Einzelne Objekte unter Wasser wurden nicht zuverlässig detektiert. Aus Sicht des BSH stellt die Laserbathymetrie eine Ergänzung für Flachwasserbereiche dar, deren konventionelle Vermessung einen sehr großen Aufwand bedeuten würde. Die Ergebnisse wurden ebenfalls auf der Hydro 2016 vorgestellt (Ellmer 2016).

4.3 Zwischenfazit

Die Erprobung des NLWKN, der operationelle Einsatz von Seiten des LKN.SH sowie die Erfahrungen der BfG und des BSH zeigen, dass die Laserbathymetrie grundsätzlich im Flachwasserbereich einsetzbar ist. Bedingt durch die Bathymetrie der Nordseeküste können damit in erster Linie die Wattenmeere erfasst werden, wobei flache Bereiche, die auch bei Ebbe nicht trocken fallen (z.B. Senken und flache Priele) mit großer Wahrscheinlichkeit erfasst werden können. Üblicherweise steigt die Wassertiefe hinter den Wattbereichen sehr

schnell an, weshalb in diesen tiefen Bereichen eine Erfassung mithilfe der Laserbathymetrie sehr unwahrscheinlich ist.

Die Erprobungskampagne des NLWKN unter sehr guten Rahmenbedingungen hat gezeigt, dass Eindringtiefen bis etwa 2m erreicht werden konnten, was in diesem Fall in etwa den Herstellervorgaben entsprochen hat. Der LKN.SH setzt die Laserbathymetrie routinemäßig ein, wobei auch nach Angaben des LKN.SH die Eindringtiefen der Hersteller erreicht wurden. Während der BSH Untersuchungen wurden die Herstellerangaben bzgl. der Eindringtiefe nicht erreicht.

Bedingt durch die hohen morphologischen Aktivitäten konnten keine Aussagen zur Genauigkeit der NLWKN Erprobung getroffen werden. Es zeigt sich aber, dass sich die morphologischen Strukturen in den Differenzen widerspiegeln und nicht gleichmäßig verteilt sind. Dies ist ein sehr starker Indikator dafür, dass die Differenzen in morphologischen Änderungen geschuldet sind und nicht der Messverfahren Laserbathymetrie zugeordnet werden können. Von Seiten des LKN.SH wurden Differenzen zu hydroakustisch gemessenen Punkten von ein bzw. 2dm festgestellt (Christiansen 2016).

5 F&E Projekt - Optimierte Auswertung der Laserbathymetrie

5.1 Aufgabenstellung

Von Seiten der BfG wurde ein Forschung & Entwicklungsprojekt initiiert welches bestimmte universitäre Fragestellungen zur Laserbathymetrie beantworten sollte. Das Projekt:

„Ableitung von Trübungsparametern und Performanceverbesserungen der Auswertealgorithmen der Laserbathymetrie im Bereich Elbe/Klöden“

wurde zwischen 2015 und 2017 von Seiten des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Dresden (IPF-TU-Dresden) bearbeitet. Die Hauptziele des Projekts bestanden darin, das Verfahren besser „auszureizen“ bzw. mithilfe besserer Algorithmen auch tiefer gelegene Gewässerbodenpunkte zu detektieren. Gewässerbodenpunkte, deren Echos innerhalb der Full-Waveform Daten vorhanden sind, aber durch die Standardmethoden nicht erfasst wurden, sollten in diesem Projekt abgeleitet werden (vgl. Abbildung 37). Weiterhin sollten Aussagen zum Genauigkeitsverlust aufgrund des Seegangs getroffen werden. Für die Erreichung der Ziele wurden die folgenden Bereiche bearbeitet:

- Modellierung der Trübung und Ableitung von Dämpfungskorrekturen
- Modellierung flächenhafter Gewässertrübungsparameter
- Ableitung von Bodenpunkten durch Anwendung verbesserter Algorithmen auf die erfassten Full-Waveform Daten
- Modellierung von Fehlern aufgrund des Seegangs und der Wasseroberfläche.

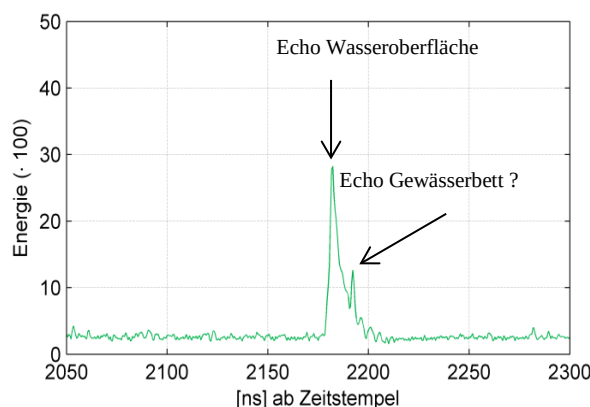


Abbildung 37: Full-Waveform Information eines Laserschusses

Die Analyse und Auswertung basiert auf den Daten, die während der Befliegung Elbe/Klöden durch die BfG im Frühling 2014 erfasst wurden. Diese wurden mit dem Scanner AHAB CHIROPTERA I erfasst. Darüber hinaus erfolgte eine Auswertung der Befliegungsdaten des

gleichen Gebietes vom September 2015, wo ein RIEGL VQ880G Scannersystem unter sehr guten Rahmenbedingungen zum Einsatz kam.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Modellierung der Trübung und Ableitung der Dämpfungskorrekturen

Um den Anteil der detektierbaren Bodenpunkte zu erhöhen sollte der Anteil der Signaldämpfung kompensiert werden. Die Ursache für die Signaldämpfung ist eine Intensitätsabschwächung aufgrund von diffusen Reflektionen bzw. von Absorptionsprozessen. Das Ziel bestand darin, für jeden Laserschuss bzw. für jede erfasste Full-Waveform die Signaldämpfung zu modellieren und auf Basis dieser Ergebnisse eine Korrektur der Full-Waveform durchzuführen. Auf Grundlage der so modifizierten Waverforms erfolgte eine erneute Ableitung von Echos bzw. damit verbunden von Punkten. Das Ziel bestand darin, bisher nicht erfasste Bodenpunkte zu erfassen und so die Eindringtiefe zu erhöhen.

Im Ergebnis wurde festgestellt, dass die Ansätze zur Modellierung der Trübung prinzipiell funktionieren. Innerhalb der Full-Waveform ist ein bestimmtes Messrauschen vorhanden, welches durch die Korrektur mit verstärkt wurde. Somit sind innerhalb der Full-Waveform Daten vermeindliche Echos entstanden aus denen Rückstreupunkten innerhalb der Wassersäule abgeleitet wurden. Bei trüben Gewässern wurde zwar folglich mehr Punkte abgeleitet, jedoch konnte nicht zuverlässig zwischen realen Bodenpunkten und Punkten innerhalb der Wassersäule unterschieden werden. Sofern das reale Bodenecho innerhalb der Full-Waveform im Messrauschen untergeht, ist eine Detektion des Bodens nicht möglich. Praktisch bedeutet dies, dass der Boden „vom Laser aus“ wahrgenommen werden muss bzw. bei einer zu starken Signaldämpfung auch mit entsprechenden Korrekturen keine Erfassung des Gewässerbodens möglich ist.

5.2.2 Ableitung von Trübungsparametern

Ausgehend von den Auswertungen im ersten Aufgabenpaket lassen sich Trübungsparameter ableiten. Die modellierte Signaldämpfung beschreibt für jeden Laserschuss eine Dämpfungsfunktion, die im Wesentlichen durch die Gewässertrübung verursacht wird. Folglich lassen sich die Dämpfungsfunktionen auch als Trübungsparameter darstellen. Im Uferbereich treten an diesen Stellen Probleme auf. Es ist möglich, dass die Reflektionen des Gewässerbodens die Oberflächenreflektionen förmlich „überstrahlen“. Praktisch äußert sich dies in einem dominierenden Peak innerhalb der Waveform neben dem Echo der Wasseroberfläche. Durch die geschätzte Funktion wird der Bereich rechts des Gewässerbodenpeaks als Dämpfung interpretiert (Abbildung 38). Folglich tritt scheinbar eine extrem starke Dämpfung ein, obwohl das Wasser in Wahrheit sehr klar ist. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere in Uferbereichen dieser Effekt auftritt und an diesen Stellen nicht zwischen Trübung und Gewässerboden unterschieden werden kann. Vergleichbare Probleme sind auch bei der Ableitung von Trübungsinformationen aus hyperspektralen Luftbildern zu erwarten (vgl. Abschnitt Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).

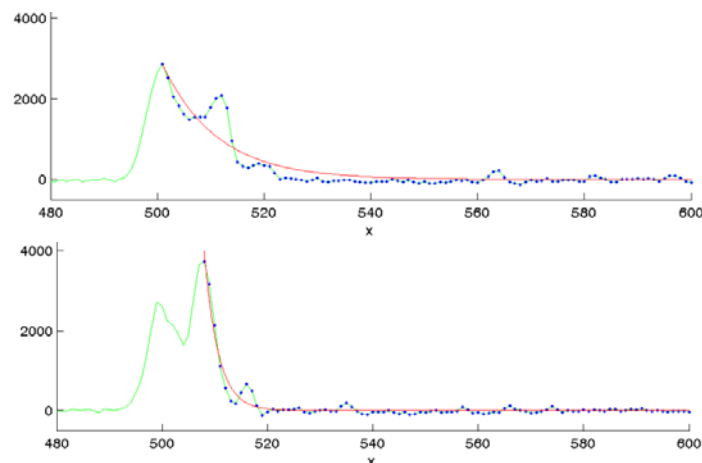


Abbildung 38: Dämpfungsfunktion (oben: normalen Punkt, unten Uferpunkt)

5.2.3 Ableitung von Bodenpunkten aus den Full-Waveform Daten

Auf Basis der aufgezeichneten originalen bzw. der im vorangegangenen Arbeitspaket modifizierten Full-Waveform Daten sollten Bodenpunkte abgeleitet werden. Das Ziel bestand darin, bisher nicht erfasste Bodenechos aus den Daten zu extrahieren und so auch tiefere Gewässerbodenpunkte zu erfassen (vgl. Abbildung 37). Darüber hinaus waren Aussagen zur Zuverlässigkeit und Genauigkeit der erfassten Bodenechos zu treffen. Im Rahmen der Arbeiten wurden drei unterschiedliche Methoden zur Gewässerbodendetektion entwickelt. Die ersten beiden Methoden waren nicht zielführend bzw. deren Resultate haben nicht die Qualität der dritten Methode erreicht. Infolgedessen wird an dieser Stelle auch nur die dritte Methode näher dargestellt.

Diese basiert auf einem „Stacking“ der Waveforms. Dabei erfolgt eine Analyse benachbarter Waveforms in der Art, dass alle Waveforms einer Rasterzelle zueinander ausgerichtet und aufaddiert werden (Stacking). So verbessert sich innerhalb der aufaddierten Waveform das Signal-Rausch Verhältnis und Bodenpunkte werden deutlich sichtbarer. Bedingt durch die hohe Redundanz werden „richtige Kandidaten“ bzw. korrekte Messungen verstärkt und die nur in einer Waveform auftretenden Fehlmessungen eliminiert. Auf Basis dieser Auswertung können Näherungswerte abgeleitet werden. Rund um den Näherungswert erfolgt dann innerhalb der Waveform eine gezielte Suche nach Echos der Bodenpunkte. Sofern diese vorhanden sind wird daraus ein Gewässerbodenpunkt abgeleitet. Neben diesen Näherungsinformationen werden beim dritten Ansatz noch die Informationen der Nachbarzelle genutzt, welche weiterführende apriori Informationen zur Ableitung korrekter Höhen liefern. Der Ansatz arbeitet iterativ vom Ufer aus in Richtung Gewässermitte. Bei Nutzung der RIEGL VQ880G Daten vom September 2015 konnten die Eindringtiefe von 1,65m auf etwa 2,0m erhöht werden, was einem Zuwachs von ~21% entspricht. Infolgedessen wurde ein wesentlich höherer Anteil des Gewässerbodens erfasst.

In Abbildung 39 ist das Ergebnis einer „Standardprozessierung“ von AHM dargestellt. Dem wird in Abbildung 40 das Ergebnis der dritten Methode gegenüber gestellt. Es zeigt sich, dass an bestimmten Bereichen die Lücke zwischen den Peildaten und den Laserbathymetriedaten geschlossen werden konnte. Eine vollständige Erfassung des Gewässerbodens (hier der Elbe) konnte auch mit dieser Methode nicht flächendeckend erreicht werden.

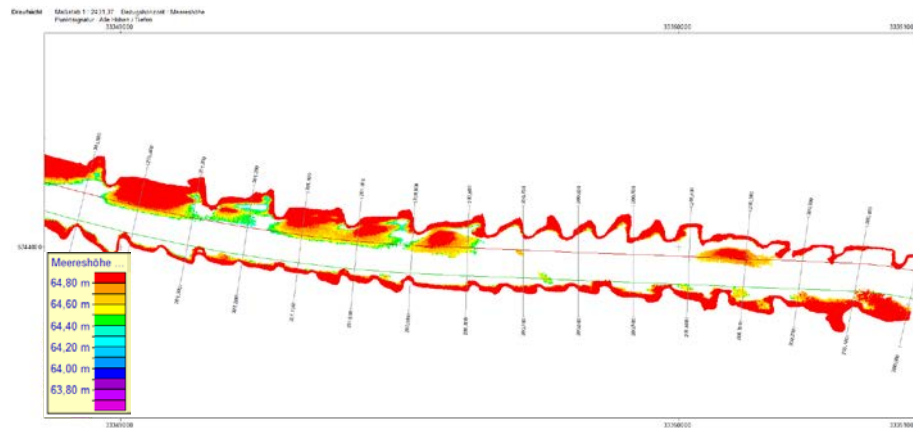


Abbildung 39: Ergebnisse / Bodenpunkte der Standardprozessierung (AHM, Sep. 2015)

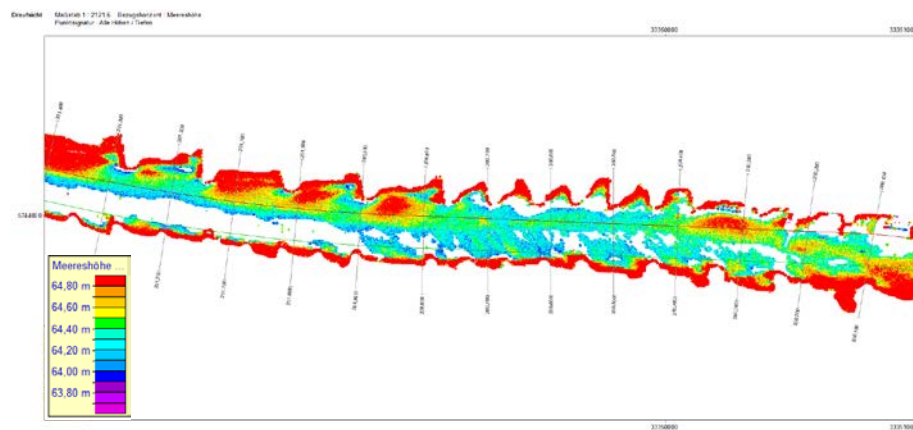


Abbildung 40: Ergebnisse der Methode 3 (AHM, Sep. 2015)

Bei einem Vergleich mit konventionell erfassten Gewässerbettdaten (hier Daten des MS Ross lau, WSA Dresden, Abbildung 41) lassen sich die in Abbildung 42 dargestellten Mo-
delldifferenzen ableiten. Die konventionelle Messung durch MS Ross lau erfolge am
29.09.2015. Die Befliegung fand am 07.09.2015 statt. Zwischen beiden Erfassungen liegt ein
zeitlicher Abstand von 22 Tagen.

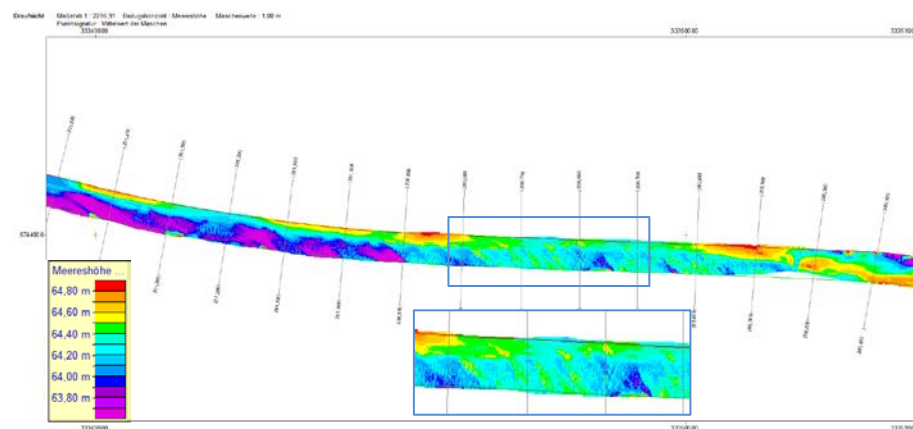


Abbildung 41: Gewässerbettmodell, hydroakustischer Messungen zw. km 200 und 201,5

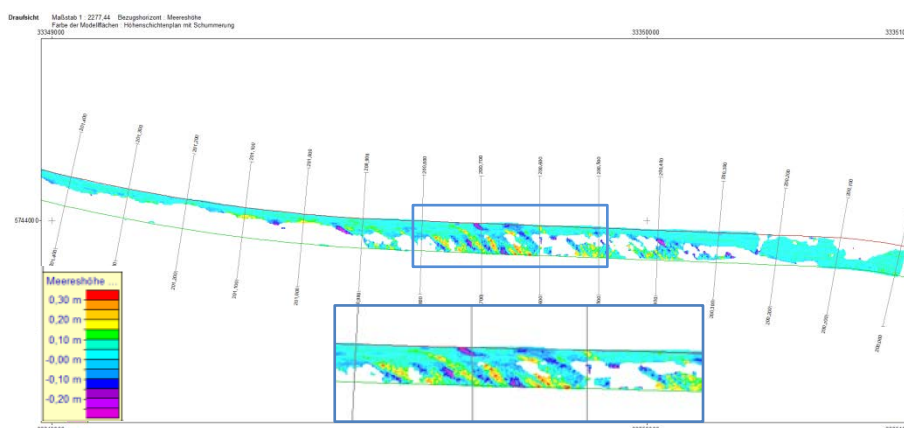


Abbildung 42: Höhendifferenzen (MS Rosslau-ALB) zw. km 200 und 201,5

Die in Abbildung 42 dargestellten Differenzen zeigen, dass im Bereich der Fahrrinne z.t. einzelne Differenzen von $\pm 0,25\text{m}$ auftreten. Die Differenzen weisen einen mittleren Betrag von $+0,03\text{m}$ (Median: $0,039\text{m}$) auf. Die positive Differenz bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Laserbathymetriebeobachtung unterhalb der hydroakustisch erfassten Sohle liegt. Die Standardabweichung der Differenzen liegt bei $0,067\text{m}$. Eine Trennung zwischen morphologisch bedingten Differenzen und tatsächlichen Unsicherheiten der Laserbathymetrie ist an dieser Stelle nicht sicher möglich.

5.2.4 Fehlermodellierung

Der letzte Schwerpunkt des Projektes bildete die Modellierung der Strahlbrechung beim Übergang vom Medium Luft in das Medium Wasser und zurück. Bedingt durch Wellenbewegung bzw. durch Seegang entspricht der tatsächliche Auftreffwinkel nicht immer dem idealisierten Auftreffwinkel auf eine ebene Fläche. Infolgedessen entspricht der tatsächliche Brechungswinkel nicht dem angenommenen Winkel und somit ergeben sich Lage- und Höhenfehler aufgrund der Wellenbewegung (Abbildung 43). Weiterhin ist zu beachten, dass sich die Laufzeiten durch das Wasser ebenfalls unterscheiden und somit die Streckenmessung ebenfalls mit zusätzlichen Fehlern beaufschlagt werden.

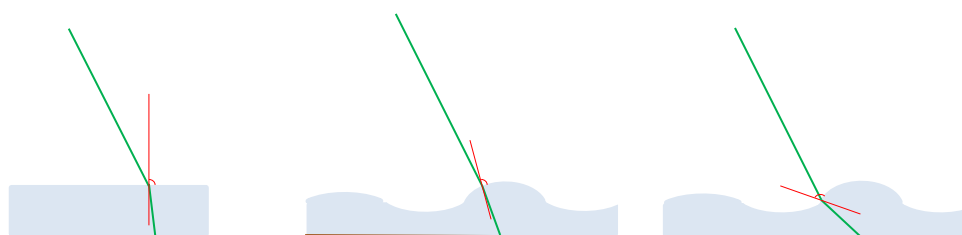


Abbildung 43: Auswirkung von Seegang auf die Brechung

Innherhalb des Projektes wurden sowohl der Strahlengang als auch die Gewässeroberfläche unter verschiedenen Annahmen (Wellengang, Wellenmuster, Öffnungswinkel usw.) modelliert und darauf aufbauend die Unsicherheiten abgeleitet. So wurde ein einzelner Laserschuss nicht als einzelner Punkt behandelt, sondern durch etwa 200 „Einzelstrahlen“ repräsentiert, die auf der Gewässeroberfläche gleichmäßig innerhalb des Footprints verteilt waren. Für jeden „Einzelstrahl“ erfolgte anschließend eine individuelle Berechnung der

Brechung auf der modellierten Oberfläche. Die Gesamtheit aller individuell gebrochenen „Einzelstrahlen“ eines simulierten Laserschusses am Gewässerboden diente als Grundlage der Bewertung der Unsicherheiten (vgl. Abbildung 44). Neben der Betrachtung der Unsicherheiten erfolgte so auch eine Modellierung der Deformation des Footprints unter Wasser (Abbildung 45).

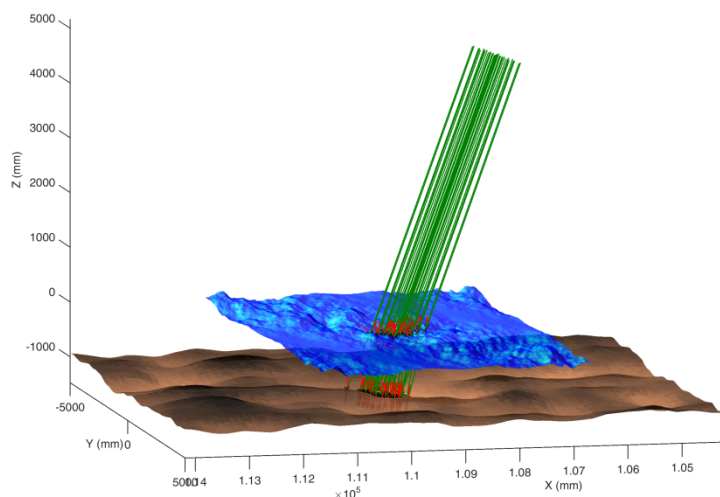


Abbildung 44: Modellierung der Brechung, bewegte Oberfläche (Westfeld et al. 2017)

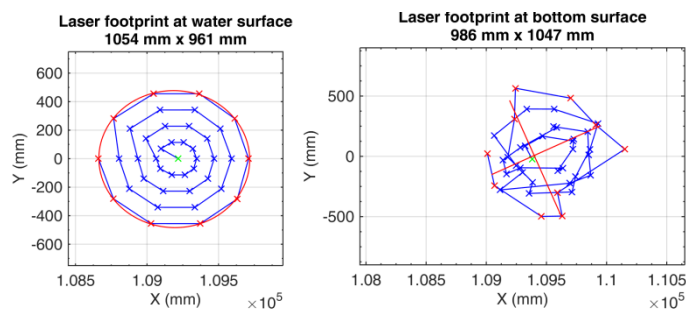


Abbildung 45: Footprintform (l. Wasserfläche, r.: Gewässerbett) (Westfeld et al. 2017)

Grundlage des in Abbildung 44 dargestellten Laserschusses war eine simulierte Wasseroberfläche mit einem seichtem Wellengang (Wellenhöhe ± 15 cm, Breite der Wellen 0,5m, Gewässertiefe ~ 2 m), wie diese bei sehr ruhiger See auftritt. Darüber hinaus liegt eine Flughöhe von 300m über Grund, ein Öffnungswinkel des Laserstrahls von 3mrad sowie eine Variation der Gewässerbodenhöhe ± 20 cm der Berechnung zugrunde. Es zeigt sich, dass innerhalb des Footprints nur eine geringe Aufweitung des Footprints (Abbildung 45) existiert. Bei stärkerem Seegang (Wellenhöhe $\pm 1,5$ m, Wellenbreite 6m und einer größeren Wassertiefe von 5m) ergeben sich die in Abbildung 46 dargestellten Muster. Es zeigt sich, dass der Footprint wesentlich vergrößert wird (Oberfläche: 1,0m x 0,8m Gewässerboden 4,2m x 2,0m) wesentlich vergrößert.

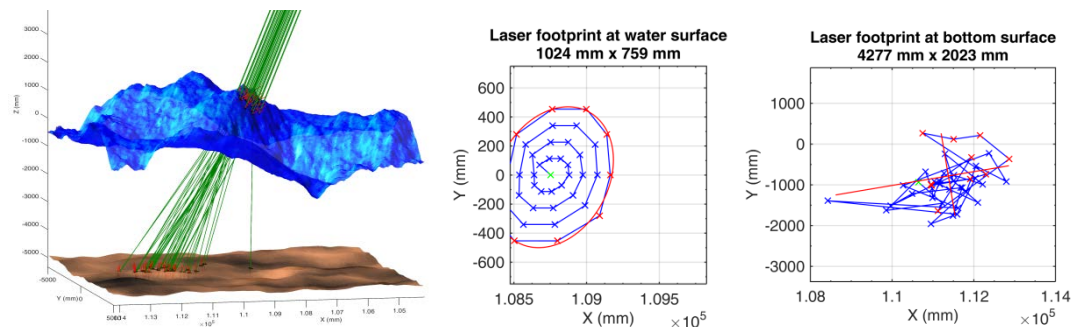


Abbildung 46: Wellenmuster und Footprintdeformation bei Seegang

Im Rahmen des Projektes wurde verschiedene Szenarien für die Wasseroberfläche simuliert. Als Ergebnis ergeben sich je nach Oberflächenform unterschiedliche Koordinatenversätze (Tabelle 9). Bei seichtem Wellengang ergeben sich noch relativ geringe Lage- (0,2m@5m Wassertiefe) und Höhenfehler (0,04m@5m Wassertiefe). Mit zunehmendem Seegang steigen diese erheblich an. Bei dem in Abbildung 46 dargestellten starkem Seegang treten mittlere Lagefehler von 0,8m und Höhenfehler von 0,2m bei einer Wassertiefe von 5m auf. Bei Nutzung von Tiefwassersensoren können im Nordseebereich noch wesentlich größere Eindringtiefen erreicht werden. Bezogen auf die Windstärke und die daraus resultierenden Wellenhöhen sind in Tabelle 10 für einen Scanner mit einem Öffnungswinkel von 0,7mrad (RIEGL VQ880G) die resultierenden Unsicherheiten dargestellt (Flughöhe 500m, Wassertiefe 5m). Bei flacher See bzw. geringen Windstärken treten vernachlässigbare Differenzen auf. In der Praxis sollten Wassertiefen von 5m in der Nordsee eher selten erreicht werden. Werden die Angaben auf eine Wassertiefe von 2m skaliert, ergeben sich bei Windstärke 4 mittlere Lagefehler von 0,2m und mittlere Höhenfehler von 0,05m. Unabhängig davon können einzelne Werte wesentlich größere Werte annehmen (vgl. Anforderungen IHO Order 1a/b, Tabelle 6).

Tabelle 9: Lage und Höhenversatz bei unterschiedlichem Seegang (Westfeld 2016)

Wellen	prozentualer Lageversatz [%]			prozentualer Höhenversatz [%]		
	min.	max.	Mittel	min.	max.	Mittel
Seichter Wellengang	0,4	10,2	4	-0,2	1,8	0,7
Turbulenter flacher Wellengang	0,2	14,8	7,5	1,5	6,3	3
Starke Wellengang	0,9	36,4	15,8	0,1	12	3,9
	min. [m]	max. [m]	Mittel [m]	min. [m]	max. [m]	Mittel [m]
Wassertiefe von 2m						
Seichter Wellengang	0,01	0,20	0,08	0,00	0,04	0,01
Turbulenter flacher Wellengang	0,00	0,30	0,15	0,03	0,13	0,06
Starke Wellengang	0,02	0,73	0,32	0,00	0,24	0,08
Wassertiefe von 5m						
Seichter Wellengang	0,02	0,51	0,20	-0,01	0,09	0,04
Turbulenter flacher Wellengang	0,01	0,74	0,38	0,08	0,32	0,15
Starke Wellengang	0,05	1,82	0,79	0,01	0,60	0,20

Tabelle 10: Unsicherheiten bei Windstärken und 5m Wassertiefe (Westfeld 2017b)

Beaufort Skala	Lagefehler			Höhenfehler		
	min. [m]	max. [m]	Mittel [m]	min. [m]	max. [m]	Mittel [m]
1	0,02	0,31	0,12	-0,05	0,03	0,02
2	0,02	0,44	0,19	-0,07	0,07	0,03

3	0,03	1,03	0,43	-0,09	0,20	0,08
4	0,06	0,97	0,49	-0,10	0,26	0,10

Im Projekt wurde weiterhin deutlich, dass je nach Wellenmuster eine Aufweitung oder Fokussierung des Footprints erfolgen kann, wobei die Aufweitung im Mittel klar überwiegt.

5.3 Zwischenfazit

Das Projekt hat gezeigt, dass in der Auswertung der Laserbathymetriedaten noch Verbesserungspotenzial vorhanden ist. Die Modellierung / Korrektur der Gewässertrübung hat sich als nur bedingt zielführend erwiesen. Es wurden mehr Gewässerbettunkte erfasst und gleichzeitig ist auch die Anzahl der Punkte innerhalb der Wassersäule angestiegen. Infolgedessen war eine sichere Unterscheidung zwischen realem Gewässerbodenpunkt und Wassersäulenpunkt nicht möglich, da diese auf einer statistischen Häufung der Gewässerbodenpunkte basiert. Durch eine Reprozessierung der Full-Waveform Daten unter Einbindung von Nachbarschaftsinformationen konnten auch Gewässerbodenpunkte detektiert werden, die etwa 20% tiefer lagen.

Die Fehlermodellierung hat weiterhin gezeigt, dass bei großen Eindringtiefen durch lokale Welleneffekte verursachte horizontale und vertikale Versätze am Gewässerboden von mehreren Dezimetern auftreten können. Die Annahme, wonach sich die Effekte durch Mittelwertbildung bei großen Strahldurchmessern herausmitteln ist nicht erfüllt. Die resultierenden Unsicherheiten steigen mit dem Seegang an. Um diese Unsicherheiten sauber abbilden zu können, muss die tatsächliche Wasseroberfläche mit den Wellen modelliert werden. Dies wiederum bedingt aber eine hohe Punktdichte von Wasseroberflächenpunkten. Letztere bedingen eine hohe Pulsrate, sowie relativ enge Öffnungswinkel der Scanner, damit die Footprintgrößen am Boden deutlich kleiner als die Wellenfronten sind.

Auf die Fragestellung des Berichts bezogen, bedeutet dies, dass die Trübung nach wie vor die Eindringtiefe beschränkt. Auch durch aufwendige Modellierungen konnte die Auswirkungen der Trübung nicht verringert werden. Infolgedessen bleibt die Trübung der wesentliche limitierende Faktor. Eine Auswertung der Full-Waveform Daten im Postprocessing hat aber das Potenzial, auch in der Nordsee tiefer gelegene Punkte zu detektieren. Dies bedingt aber auch, dass die Full-Waveform Informationen jedes Laserschusses mit gespeichert werden.

Die Unsicherheiten aufgrund der Wellenbewegung sind vorhanden und nehmen auch unter Umständen bei größeren Wassertiefen nicht mehr zu vernachlässigende Werte an. Bei geringen Eindringtiefen und geringem Seegang sind die Unsicherheiten noch zu vernachlässigen. Infolgedessen sollte eine Befliegung nur dann erfolgen, wenn der Seegang gering ist (Windstärke 3 bis max. 4). Eine Modellierung der Wasseroberfläche bedingt eine hohe Punktdichte der Wasseroberflächenpunkte und damit verbunden, eine hohe Pulsrate und einen kleinen Öffnungswinkel des Scanners.

6 Empfehlung für eine Ausschreibung

Gegenüber einer konventionellen ALS Befliegung sind bei bathymetrischen Befliegungen bestimmte Rahmenbedingungen mit zu beachten, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Die folgenden Hinweise sind als Ergänzung zu den Vorgaben konventioneller Befliegungen zu verstehen.

6.1 Vor der Befliegung

Während der Planung sollte berücksichtigt werden, dass derzeit nur sehr wenige bathymetrische Scanner in Europa im Einsatz sind. Viele potenzielle Befliegungsfirmen leihen sich die Geräte bei den Herstellern aus. Dies hat zusätzliche Kosten zur Folge (Scannerbereitstellung, Abholung, Installation, Testflug und Rückgabe). Weiterhin ist zu beachten, dass der Auswertaufwand gegenüber einer herkömmlichen Befliegung größer ist und somit mehr Kosten verursacht.

Vor der Befliegung sollte das zu befliegende Gebiet näher analysiert werden. Dies betrifft insbesondere die Bathymetrie und die Sichttiefe. Aus der Bathymetrie sollten die bei Niedrigwasser zu erwartenden Wassertiefen abgeleitet werden. Diese dienen als Grundlage einer detaillierten Befliegungsplanung. Die Flugstreifen können darauf aufbauend so gelegt werden, dass besonders tiefe Bereiche genau zum Zeitpunkt des Niedrigwassers erfasst werden. Die Sichttiefenmessungen dienen der Abschätzung der zu erwartenden Eindringtiefe. Werden in einem Gebiet kontinuierlich sehr geringe Sichttiefen z.B. kleiner als 1m gemessen, sollte der Mehraufwand einer bathymetrischen Befliegung kritisch hinterfragt werden (z.B. Elbmündung).

6.2 Datenerfassung

Zur Erfassung der relevanten Bereiche (z.B. für DGM-W Modellierung) werden Flachwassersysteme (nominelle Eindringtiefe etwa 1,0 – 1,5 Sichttiefen) mit einer hohen Pulsrate empfohlen. Nur mit diesen Systemen ist eine ausreichend hohe Punktdichte möglich. Vorteile bieten Systeme, die sowohl über einen bathymetrischen als auch über einen NIR Kanal verfügen. Bei der Vorgabe der Punktdichte ist zu beachten, dass nahezu alle bathymetrischen Scanner über ein Palmer Scanmuster verfügen. Die Konsequenz aus diesem Scanmuster sind inhomogene Punktdichten innerhalb des Flugstreifens. Eine Angabe der mittleren Punktdichte ist bei diesem Scanmuster nicht zielführend. Infolgedessen sollten die Anforderungen so formuliert werden, dass im Zentralbereich der Flugstreifen die geforderte Punktdichte erreicht werden muss bzw. durch geeignete Überlappung ausreichende Punktdichten erreichbar sind. Vor einer Befliegung sollte die zu erwartende Punktdichte bei bestimmten Befliegungsparametern modelliert und mit dem AG abgestimmt werden. Auch ist zu beachten, dass nicht jeder emittierte Laserpuls zu einem Echo führt. Die nominelle bzw. sich aus den technischen Daten ergebende Punktdichte sollte somit wesentlich größer sein.

Analog zu konventionellen Befliegungen sollten Referenzflächen an Land vorhanden sein. Darüber hinaus wäre es bei bathymetrischen Befliegungen sehr empfehlenswert, wenn in Gebieten mit wenig morphologischen Änderungen nahezu zeitgleich Referenzflächen unter Wasser erfasst werden könnten.

Aufgrund der starken Laser muss vertraglich geregelt werden, dass die Gewährleistung der Augensicherheit bei der ausführenden Befliegungsfirma / AN liegt. Augensicherheit in diesem Kontext beinhaltet auch die Augensicherheit bei Nutzung verstärkender optischer Einrichtungen (ENOHD, vgl. 2.3). Der AN muss sicherstellen, dass während des Betriebs des Lasersystems alle für die Augensicherheit erforderlichen Parameter eingehalten werden. Vor der Befliegung bzw. dem Flug zur Systemkalibrierung/Systemprüfung sollte die Problematik der Augensicherheit mit dem AG erörtert werden. Der AN sollte die Vorgaben des Herstellers umfänglich beschreiben und vor den Flügen ein Konzept zu deren Umsetzung erstellen sowie dieses mit dem AG abstimmen. Erst danach kann eine Flugfreigabe erfolgen.

Die Flugstreifen sollten so geplant werden, dass die tiefsten Bereiche in denen eine ALB Erfassung realistisch erscheint zum Zeitpunkt des niedrigsten Wasserstandes während des Fluges erfasst werden.

Von den Herstellern werden Flughöhen empfohlen, die im Allgemeinen unterhalb der Flughöhen konventioneller Scannersysteme liegen. Die Flughöhen sind so zu wählen, dass alle Vorgaben in Bezug auf die Augensicherheit und anderer Restriktionen einhalten werden.

Da üblicherweise die Scanner von den Herstellerfirmen ausgeliehen werden, sollte nach dem Einbau ein Flug zur Systemkalibrierung / Systemprüfung erfolgen. Die Ergebnisse dieses Fluges sollten vor der Flugfreigabe durch den AG beurteilt werden.

Es müssen die Rahmenparameter definiert werden, unter welchen eine Flugfreigabe von Seiten des AG erfolgen kann. Zusätzlich zu den Rahmenbedingungen bei konventionellen Befliegungen sollten Vorgaben zu Sichttiefen und zur Windrichtung gemacht werden. Im Küstenbereich sollte – wenn überhaupt – ein ablandiger Wind wehen. Damit verbunden sind Vorgaben zum maximalen zulässigen Seegang. Zielführend sind auch Vorgaben zur Erkennung bestimmter Unterwasserstrukturen in bestimmten Wassertiefen.

Die Befliegung sollte möglichst während der Springniedrigwasserphasen erfolgen bzw. während der Befliegung sollte der Wasserstand an einem Referenzpegel den Wert von LAT+0,5m nicht überschreiten. Die Springniedrigwasserzeiträume sind astronomisch bedingt und somit vorausberechenbar. Von Seiten des BSH werden entsprechende Tabellen veröffentlicht. So ist sichergestellt, dass möglichst viel Flächen trocken fallen und damit zuverlässig erfassbar sind.

Während der Befliegung sollten alle relevanten Rohdaten aufgezeichnet werden. Dies beinhaltet neben der Trajektorie auch die GNSS-Rohdaten, der durch die IMU erfassten Orientierungswinkeln und alle Laserdaten und insbesondere auch die Full-Waveform Daten.

Neben den Laserdaten sind zeitgleich Luftbilder mit einer ausreichenden Ground Sampling Distance zu erfassen. Die Bilder dienen einerseits der potenziellen Ableitung von Orthofotos, sollen aber auch den Zustand während der Befliegung dokumentieren.

6.3 Nachweise und Auswertung

Ergänzend zu den bei konventionellen Befliegungen geforderten Datensicherungskonzepten und Qualitätssicherungskonzepten sollte bei bathymetrischen Befliegungen ein Konzept zur Sicherstellung der Augensicherheit erstellt werden. Dieses muss neben den Herstellervorgaben auch verbindliche Informationen darüber enthalten, wie diese umgesetzt werden. Ergänzend zu konventionellen Befliegen sollte im Qualitätssicherungskonzept auch die Punktdichte unter Berücksichtigung des speziellen Scanmuster bathymetrischer Laserscannersysteme behandelt werden.

Nach der Datenerfassung sind die Rohdaten zu plausibilisieren und zu klassifizieren. Ergänzend zu den konventionellen Befliegungen werden bei bathymetrischen Befliegungen auch Gewässerbett- und Wasseroberflächenpunkte abgeleitet. Die Ableitung der Gewässerbett- und Wasseroberflächenpunkte sollte dabei dokumentiert werden. Insbesondere sind die Prozessierungseinstellungen (z.B. Lichtgeschwindigkeit im Wasser usw.) zu dokumentieren und zu verifizieren.

Neben den klassifizierten Koordinaten sollten auch die Intensitätswerte mit ausgegeben werden. Die Zuordnung der finalen Daten kann in einzelnen Kacheln erfolgen. Es sollte aber sichergestellt werden, dass jedem Punkt eine Flugstreifennummer zugeordnet ist.

Am Ende sollte jedes Projekt über einen Abschlussbericht hinreichend dokumentiert werden.

7 Ausblick und weiterführender F&E Bedarf

7.1 Scannertechnik

Bei den bathymetrischen Scannersystemen ist zu beobachten, dass die Pulsrate und damit verbunden die Punktdichte am Boden ansteigt. So erreicht der RIEGL VQ880G eine Pulsrate von bis zu 550kHz. Infolgedessen sind ohne Probleme Punktdichten von $>10\text{Pkt}/\text{m}^2$ am Boden erreichbar. Bei einzelnen Scannern wird die Beamdivergenz mit der Folge reduziert, dass die Footprints immer kleiner werden und so mehr Details erfasst werden können bzw. die Effekte der Hangneigung mehr und mehr zurückgehen.

Eine Steigerung der emittierten Energiemenge ist aufgrund der Augensicherheit nicht möglich. Folglich kann eine verbesserte Eindringleistung nur über empfindlichere Sensoren realisiert werden. Dies bedingt aber auch die Zunahme von Fehlmessungen bzw. von Punkten innerhalb der Wassersäule. Empfindlichere Sensoren bedingen damit auch verbesserte Auswertelgorithmen, die zuverlässig Gewässerbodenpunkte von Streupunkten im Wasser unterscheiden können.

Die Ergebnisse des F&E Projektes haben gezeigt, dass durch eine Postprocessingauswertung der Full-Waveform Daten auch Gewässerbodenpunkte detektiert werden können, die mit den bisherigen Standardverfahren nicht erfasst werden können. Die entwickelten Algorithmen müssen von Seiten der Hersteller in deren Auswerteprozess implementiert werden.

Seit kurzem bietet Leica mit dem Scanner SPL100 (Abbildung 47) ein neuartiges Messsystem auf dem Markt an, das in diesem Zusammenhang eine Sonderstellung einnimmt. Dieses System wird von Leica als ein Scannersystem vermarktet, welches zur effektiven Aufnahme großer Gebiete konzeptioniert wurde. Obwohl das Scannersystem einen grünen Laser nutzt, Mehrfachechos aufzeichnen kann und eine Palmer Scanmuster nutzt, wird dieser Scanner von Leica nicht als bathymetrisches Scannersystem vermarktet. Technisch sind bei diesem System Echos vom Gewässerboden zu erwarten. Leica macht keine Angaben zur Sichttiefe und derzeit liegen noch keine näheren Untersuchungen zur Eignung als bathymetrischer Scanner vor. Die technischen Eigenschaften sind in Tabelle 11 dargestellt.

Der SPL100 verfügt nicht über einen einzelnen Laserstrahl. Vielmehr wird der Laserimpuls ein Array von 10×10 Strahlen aufgeteilt (Beamlets), von denen jeder ein eigenes Empfangselement nutzt. Bei jedem Laserschuss werden folglich 100 Einzelmessungen durchgeführt, wobei für jede Einzelmessung mehrere Echos detektiert werden können. Bei einer Scanrate von 60kHz entstehen so effektiv 6 Millionen Messungen je Sekunde (Mandlbürger 2017). Darüber hinaus weisen die einzelnen Strahlen eine Beamdivergenz von 0,08mrad auf, was im Vergleich zu herkömmlichen bathymetrischen Sensoren etwa um den Faktor 10 geringer ist. Nominell bedeutet dies, dass ein Footprint aus einer Höhe von 3000m ü.G. etwa einen Durchmesser von ~0,24m aufweist. Ein herkömmlicher RIEGL VQ880G mit einer Beamdi-

vergenz von 0,7mrad hat bei einer Flughöhe von 500m ü.G. einen Footprintdurchmesser von 0,35m. In Verbindung mit der hohen Messrate von 6MHz werden auch bei großen Flughöhen ausreichende Punktdichten erreicht. Infolge der großen Flughöhe wird je Messstreifen eine wesentlich größere Fläche erfasst. Dies ist insbesondere für potenzielle Anwendungen in der Nordsee von großem Interesse, da tidebedingt nur kurze Zeitfenster für eine Befliegung zur Verfügung stehen. Dabei ist aber zu beachten, dass der normale VFR-Luftraum auf eine Höhe von 3000m begrenzt ist und ein Wolkenabstand von 300m einzuhalten ist. Aus einer Flughöhe von 3000m kann der Scanner also nur dann eingesetzt werden, wenn die Unterkannte der Wolken bzw. die Wolkenbasis über einer Höhe von 3300m liegt.

Tabelle 11: Technische Eigenschaften des Leica SPL100

	Leica SPL100 (Leica 2018c)
BeamDivergenz [mrad]	0,08
Full Waveform Recording	nein
Anzahl Laserbeams	10x10
Flughöhe [m]	3000
Footprintdurchmesser [m]	0,24
ausgeleuchtete Fläche [m²]	<0,1
max. Pulsrate [kHz]	60 ⁵
Genauigkeit Tiefe bei 10m Wassertiefe [m], 95%	<0,2
Genauigkeit Lage [m], 95%	<0,3
Scanmuster	Oblique
Laserklasse	IV



Abbildung 47: Leica SPL100 (Leica 2018c)

Zu Abschätzungen der tatsächlichen Leistungsfähigkeit des SPL100 in der Form als bathymetrischer Scanner sind die Ergebnisse weiterführender Untersuchungen abzuwarten. Aus Sicht der BfG sollten daher die Möglichkeiten und Grenzen dieses neuen Scannersystems untersucht werden. Es ist davon auszugehen, dass andere Scannerhersteller mit vergleichbaren Systemen auf den Markt treten und entsprechende Scannersysteme zukünftig mehr und mehr bei Befliegungen angeboten werden.

⁵ Die effektive Pulsrate beträgt $10 \times 10 = 100 \times 60 = 6\text{Mhz}$

7.2 Erfassung der Randparameter

Neben der reinen Geometrie bzw. der Erfassung der Gewässersohle sind für bestimmte Anwendungen auch Gewässerbetteigenschaften bzw. Oberflächeneigenschaften von großem Interesse. Die Erfassung der Wasseroberfläche fällt bei einer bathymetrischen Befliegung als Nebenprodukt mit ab. In Abschnitt 4.1.2 wird gezeigt, dass bei einer Nutzung entsprechender Scanner die Form des Seegangs erfasst werden kann (vgl. Abbildung 28). In der Theorie lassen die Full-Waveform Daten in Verbindung mit zeitgleich erfassten Luftbildern auch Rückschlüsse auf die Oberfläche zu und ermöglichen damit eine Klassifizierung der Oberfläche. Der derzeitige Forschungsbedarf besteht darin, inwieweit eine entsprechende Seebodenklassifizierung durch Laserbathymetrie möglich ist. Sofern dies erfolgsversprechend ist, würde eine entsprechende Seebodenklassifizierung als Nebenprodukt einer weiteren Befliegung mit abfallen.

Neben den technischen Entwicklungen im Bereich der Laserscanner sind auch weiterführende Ansätze zur flächendeckenden Erfassung der Rahmenparameter von großem Interesse. Es gibt Ansätze, auf Basis hyperspektraler Satellitenbilder flächenhafte Informationen zur Gewässertrübung abzuleiten. Innerhalb der BfG laufen im Referat M4 Gewässerfernerkundung entsprechende Untersuchungen. Als Dienstleister bietet die EOMAP GmbH & Co KG entsprechende Produkte an. Exemplarisch sind in Abbildung 48 abgeleitete Trübungswerte für die Deutsche Bucht dargestellt.

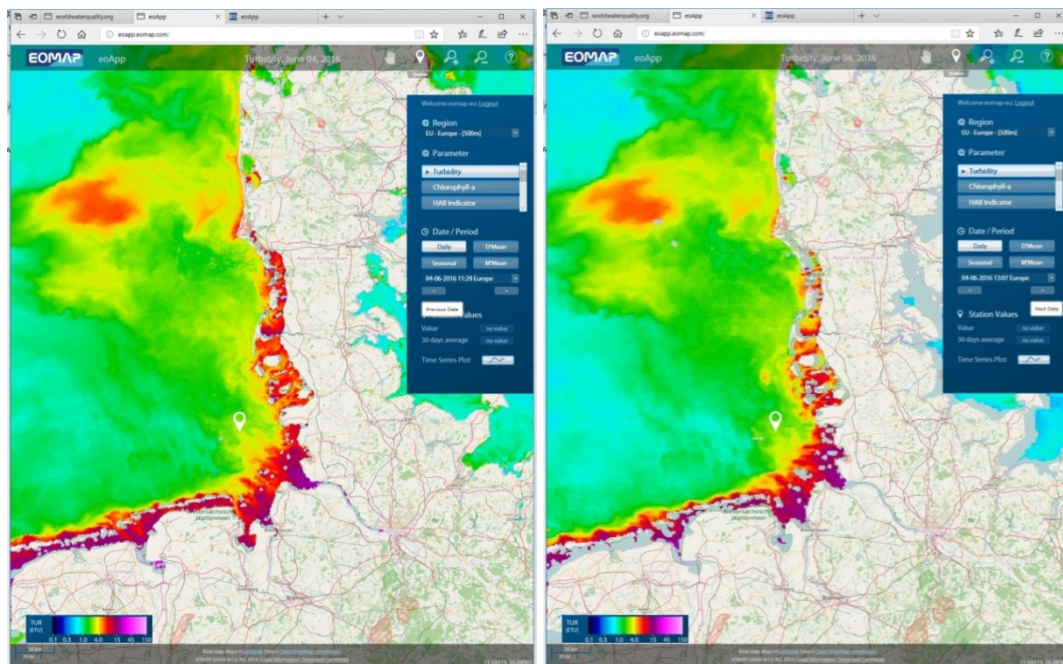


Abbildung 48: Trübung (04.06.16 11:29Uhr links, 13:07Uhr rechts), (Quelle EOMAP)

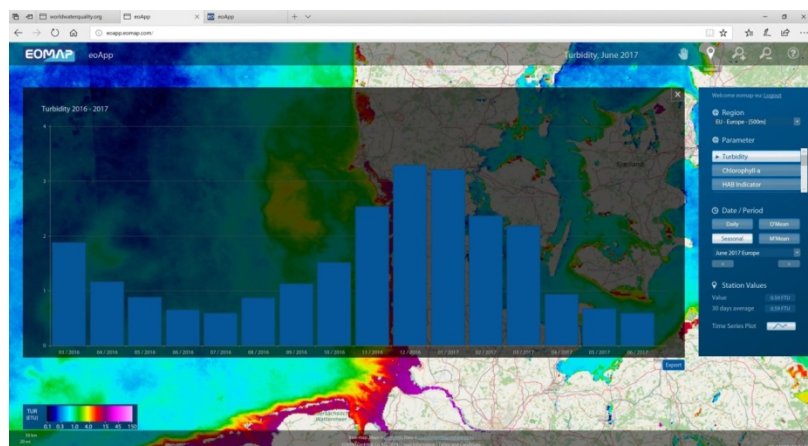


Abbildung 49: Jährliche Variation der Trübungsparameter (Quelle EOMAP GmbH)

Durch die EOMAP GmbH & Co KG werden auch Zeitreihenanalysen in der Art angeboten, dass die Trübungssituation über die Zeit dargestellt wird. In Abbildung 49 ist ein entsprechendes Produkt exemplarisch abgebildet. Dieses zeigt die jährlichen Variationen der Trübung und damit verbunden auch der Sichttiefe. Entsprechende Auswertungen über einen längeren Zeitraum würden die Ableitung bestimmter saisonaler Zeiträume erlauben, in denen mit einer geringeren Trübung und damit verbunden mit einer höheren Eindringtiefe zu rechnen ist. Neben den Trübungsvariationen bietet die EOMAP GmbH & Co KG auch Bathymetrieinformationen auf Basis hyperspektraler Satellitenbilder an.

Die Ergebnisse bzw. Produkte der EOMAP GmbH & Co KG wurden bisher durch die BfG bzw. WSV nicht näher validiert. Insbesondere im Flachwasserbereich ist zu analysieren, inwieweit die Trübungsdaten mit tatsächlichen Sichttiefenmessungen übereinstimmen. In diesen Bereichen ist der Gewässerboden von einer Trübung nicht oder nur sehr schwer zu unterscheiden. Insofern besteht die Möglichkeit, dass eine beschränkte Sichttiefe abgeleitet wurde, tatsächlich aber das Wasser klar und der Gewässerboden sichtbar ist. Darüber hinaus sollten die abgeleiteten Bathymetrieinformationen validiert werden. Sofern Zuverlässigkeitsaussagen zu den Produkten vorliegen, können diese auch für andere Anwendungen genutzt werden. Der Vorteil dieser Produkte besteht in der wesentlich höheren Erfassungsfrequenz. Das Wattenmeer wird in der Regel in Abständen von mehreren Jahren neu vermessen. Bedingt durch den Satellitenorbit liegen die Luftbilder in wesentlich geringeren zeitlichen Abständen vor. Auch wenn die Genauigkeit nicht der konventionell bzw. mit ALB erreichbaren Genauigkeit entspricht, können die Ergebnisse durchaus als Indikator für Änderungen genutzt werden. Sofern relevante Änderungen vermutet werden, kann können gezielte partielle Neumessungen veranlasst werden.

8 Zusammenfassung

Der Auftrag für diesen Bericht bestand in der Evaluierung der Laserbathymetrie zur möglichen Erfassung von Flachwasserbereichen in der Nordsee. Bei der Laserbathymetrie handelt es sich um eine Abwandlung der konventionellen ALS Technik, die sich durch die Nutzung von grünem Laserlicht auszeichnet. In der Theorie sind entsprechende Systeme in der Lage, den Gewässerboden durch das Wasser hindurch flächenhaft zu erfassen. Das Verfahren setzt ein Durchdringen des Laserlichts durch das Wasser voraus, weshalb die Gewässertrübung die wesentlichen Grenzen des Verfahrens bestimmt.

Von Seiten der Scannertechnik können die bathymetrischen Laserscannersysteme in Tiefwassersysteme und Flachwassersysteme unterschieden werden. Tiefwassersysteme verfügen über eine nominell wesentlich größere Eindringtiefe, erkaufen diesen Vorteil aber durch eine wesentlich stärkere emittierte Energie, einen größeren Footprint und eine viel geringere Punktdichte. Dem gegenüber dringen Flachwassersysteme weniger stark in das Wasser ein, verfügen aber über wesentlich höhere Punktdichten (mehrere Punkte je m²) und sehr kleine Footprints was eine Modellierung hoch aufgelöster Geländemodelle ermöglicht.

Eine Betrachtung der Bathymetrie der Nordsee zeigt, dass die Bereiche zwischen den Nord- und Ostfriesischen Inseln nur relativ geringe Wassertiefen aufweisen und diese über die Inseln hinaus relativ schnell stark ansteigen. Bedingt durch das starke Ansteigen der Wassertiefe im Norden der Ostfriesischen bzw. Westen der Nordfriesischen Inseln ist davon auszugehen, dass die mit Tiefwassersensoren erfasste Fläche nicht wesentlich größer als die Fläche ist, welche mit Flachwassersensoren zu erfassen wäre. Fahrrinnen sind im Rahmen von Verkehrssicherungspeilungen ohnehin in regelmäßigen Abständen mit hydroakustischen Methoden zu vermessen. Es wird daher empfohlen, entsprechende Flachwassersensoren zur Erfassung von Flachwasserbereichen einzusetzen.

Gegenüber der Ostsee weist die Nordsee wesentlich geringere Sichttiefen auf. Liegen die Sichttiefen in der Ostsee häufig bei mehreren Metern, sind in den klaren Bereichen der Nordsee eher Sichttiefen von etwa 1m – 2m die Regel. Infolgedessen sind die zu erwartenden Eindringtiefen mit eher 2m -3m relativ gering. Die Angaben zu den Eindringtiefen der Messsysteme gehen i.A. von klarem Wasser und somit von großen Sichttiefen aus. In Bezug auf die Sichttiefenverhältnisse der Nordsee hat dies zur Folge, dass die durch die Hersteller genannten Faktoren ($\text{Eindringtiefe} = \text{Sichttiefe} * 1,0 \text{ .. } 1,5$) zur Abschätzung der Eindringtiefe eher die obere mögliche Grenze darstellen, die aber unter sehr guten Bedingungen erreicht werden sollte. Im Wattenmeer der Nordfriesischen bzw. Ostfriesischen Inseln werden trotz der gegenüber der Ostsee geringeren Eindringtiefe erhebliche Vorteile bei einer bathymetrischen Befliegung erwartet. Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass flache Wasserflächen (z.B. flache Priele, Wasser in Senken usw.) mit erfasst werden sollten, was bei konventionellen Befliegungen nicht der Fall ist. Insofern sind weniger Datenlücken vorhanden, die mit alternativen Verfahren geschlossen werden müssen. Erfahrungen des LKN.SH mit dem operatio-

nellen Einsatz der Laserbathymetrie bestätigen dies. Im Bereich der Ästuar- bzw. in Bereichen mit kontinuierlich geringen Sichttiefen bietet eine bathymetrische Befliegung keinen großen Vorteil. Von Seiten des NLWKN erfolgte eine Erprobung der Laserbathymetrie am Riffbogen Norderney. Die vom NLWKN bereitgestellten Daten zeigen, dass während dieser Befliegung Daten bis zu einer Eindringtiefe von 2m erfasst wurden. Dies entsprach der einfachen Sichttiefe und damit der Herstellerangabe.

Die Ergebnisse eines F&E Projektes der BfG zeigen, dass im Postprocessing noch tiefer liegende Punkte detektiert werden können. Eine Prozessierung der Full-Waveform Daten unter Berücksichtigung der Nachbarschaft hat zu einer Verbesserung von etwa 20% geführt. Sofern die Ergebnisse von Seiten der Hersteller implementiert werden, kann die Gewässerbodenerkennung im Postprocessing noch etwas gesteigert werden. Eine genaue Modellierung der Brechungsverhältnisse unter Berücksichtigung simulierter bewegter Wasseroberflächen hat gezeigt, dass die resultierenden Unsicherheiten bei großen Wassertiefen nicht zu vernachlässigen sind. Bei Eindringtiefen von 2m treten akzeptable Unsicherheiten von wenigen cm auf. Praktisch hat dies zur Folge, dass nur bei geringem Seegang (z.B. Windstärke 3 bis max. 4) Befliegungen durchgeführt werden sollten. Üblicherweise treten bei geringem Seegang auch weniger starke Trübungen auf.

Eine Nutzung der Laserbathymetrie zur Erfassung von Flachwasserbereichen in der Nordsee ist durchaus möglich. Empfehlenswert sind Datenerfassungen für die Ableitung von DGM-W Modellen in den Bereichen rund um die Ostfriesischen bzw. Nordfriesischen Inseln. Bathymetrische Scanner sollten anstelle herkömmlicher ALS Scanner eingesetzt werden. Bedingt durch die tiefere Flughöhe sind mehr Flugstreifen erforderlich. Weiterhin kommt durch die Scannerbereitstellung und Tests ein zusätzlicher Aufwand hinzu. Der Erfassungsaufwand (vgl. Kapitel 6) und auch der Auswerteaufwand ist gegenüber einer herkömmlichen Befliegung größer, jedoch können Flächen erfasst werden, die im Fall einer konventionellen Befliegung anders geschlossen werden müssten. Hydroakustische Messungen können so reduziert werden. Darüber hinaus erfolgt durch die Laserbathymetrie eine nahezu flächenhafte Datenerfassung (im Gegensatz zur profilweisen Erfassung mit hydroakustischen Methoden).

Verfahrensbegrenzender Faktor ist und bleibt die Gewässertrübung. Zukünftig sollte durch die BfG untersucht werden, inwieweit auf Basis hyperspektraler Luft-/Satellitenbilder flächenhafte Informationen über die Sichttiefe und deren saisonale Schwankungen erstellt werden können. Sofern dies möglich ist, können entsprechende Produkte zur Planung potenzieller Befliegungszeiträume mit guten Rahmenbedingungen herangezogen werden. Darüber hinaus sollte untersucht werden, inwieweit auf Basis von Luft-/Satellitenbildern abgeleitete Bathymetrieinformationen mit konventionellen Aufnahmen übereinstimmen. Aufgrund wesentlich häufigeren Satellitenüberflüge könnten diese Produkte auch als Änderungsindikator eingesetzt und auf deren Basis gezielte Neuvermessungen initiiert werden.

Ein verlässlicher Einsatz der Laserbathymetrie zur Erfassung der Fahrrinne von Bundeswasserstraßen ist auch in Zukunft sehr unwahrscheinlich. Aufgrund der hohen Trübung und der großen Wassertiefen der Bundeswasserstraßen ist eine Erfassung mithilfe bathymetrischer Scanner (Flachwasser- und Tiefwasserscanner) extrem unwahrscheinlich.

9 Literatur

- Christansen, L. (2016) Coastal protection: New techniques in capturing and modelling of morphological data, Konferenzbeitrag Hydro 2016, November 2016, Rostock
https://www.hydro2016.com/downloads/Paper/07A4_Christansen__NewTechniquesCapturingModellingMorphologicalData_Hydro2016.pdf
- Ellmer, W. (2016) Use of laser bathymetry at the German Baltic Sea coast, Konferenzbeitrag Hydro 2016, November 2016, Rostock
https://www.hydro2016.com/downloads/Paper/07A3_Ellmer__LaserBathymetryAtTheGermanBalticSeaCoast_Hydro2016.pdf
- Fugro (2018) DataSheet: FUGRO LADS HD
<https://www.fugro.com/Widgets/MediaResourcesList/MediaResourceDownloadHandler.ashx?guid=1c3e7cf1-f3db-6785-9f9d-ff250019aa6e&culture=en>
- Leica Geosystems GmbH (2018a): DataSheet: Leica AHAB HAWKEYE III:
https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_hawkeye_iii_ds.ashx?la=de-de
- Leica Geosystems GmbH (2018b): DataSheet: Leica AHAB CHIROPTERA II
https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_chiroptera_ii_ds.ashx?la=en
- Leica Geosystems GmbH (2018c): DataSheet: Leica Single Photon Lidar SPL 100
https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/leica_spl100_ds.ashx?la=de-de
- Niemeyer, J., Song, Y., Kogut T., Heipke C. (2015) Projektbericht: Untersuchungen zum Einsatz der Laserbathymetrie in der Seevermessung, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Leibniz Universität Hannover im Auftrag des BSH
- Mandlbürger, G. (2017) Bathymetry from active and passive airborne remote sensing – looking back and ahead, 56th Photogrammetric Week '17, September 11-15, 2017, Stuttgart, Germany
- Quadros (2013): Investigating shallow water bathymetry acquisition technologies, survey considerations and strategies; CRC for Spatial Information, Melbourne (<http://www.crcsi.com.au/assets/Resources/695d2af9-e397-4029-8cad-6dfe5510d581.pdf>)
- RIEGL (2018a) DataSheet: RIEGL VQ820G
http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet

RIEGL (2018b)	_VQ-820-G_2015-03-24.pdf DataSheet: RIEGL VQ880G http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-880-G_DataSheet_2017-10-17.pdf
Schäfer, T. (2017)	Dissertation, „Berührungslose und flächenhafte Deformationsmessungen an Betonoberflächen unter besonderer Berücksichtigung der Interaktion zwischen Laserstrahl und Oberfläche“, Technische Universität München, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt Lehrstuhl für Geodäsie, angenommen am 20.06.2017
Teledyne (2018a)	DataSheet: Teledyne Optech CZMIL http://www.teledyneoptech.com/wp-content/uploads/CZMIL-Nova-Specsheet-150626-WEB.pdf
Teledyne (2018b)	DataSheet: Teledyne Optech TITAN http://www.teledyneoptech.com/wp-content/uploads/Titan-Specsheet-150515-WEB.pdf
Vosselman, G., Maas, H.-G. (2010):	Airborne and Terrestrial Laser Scanning; Whittles Publishing, Dunbeath, Caithness KW6 6EY, Scotland, UK, ISBN: 978-1904445-87-6
Weiß, R., Wirth, H. (2016):	BfG Bericht-1862: Erprobung der Laserbathymetrie im Binnenbereich, BfG
Westfeld, P., Maas, H.G., Richter, K., Weiß, R. (2017)	Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 128, Juni 2017
Westfeld, P., Maas, H.G., Richter, K., Weiß, R. (2016)	Analysis of the effect of wave patterns on refraction in Airborne LiDAR bathymetry, ISPRS International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Juni 2016, Prag Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B1, 133-139, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-133-2016 , 2016
Westfeld, P. (2017b)	Neue Ansätze zur Modellierung von geometrischen und radiometrischen Effekten in der Laserbathymetrie, Konferenzbeitrag Intergeo 2017
Westfeld, P., Richter, K., Mader, D. (2017):	Abschlussbericht zum Projekt: Ableitung von Trübungsparametern und Performanceverbesserungen der Auswertalgorithmen der Laserbathymetrie im Bereich Elbe/Klößen, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU-Dresden im Auftrag der BfG

Bundesanstalt für
Gewässerkunde

Referat M5
Gewässer-
vermessung

Evaluierung der
Laserbathymetrie
zur Erfassung von
Flachwasserberei-
chen in der
Nordsee

M39610504104