

Volumetrisches Full-Waveform Stacking zur Ableitung der Gewässerbodentopographie aus Laserbathymetriedaten – Erste Ergebnisse einer Pilotstudie am Fluss Elbe

DAVID MADER¹, KATJA RICHTER¹, PATRICK WESTFELD² & HANS-GERD MAAS¹

Zusammenfassung: Die Laserbathymetrie ermöglicht eine effiziente und flächendeckende Erfassung der Wasserbodentopographie in Flachwasserbereichen. Die Eindringtiefe dieser Methode in die Wassersäule ist jedoch stark durch die Trübung limitiert, resultierend in einer eingeschränkten Erfassung der Gewässerbodentopographie bei tieferen Gewässern. Dieser Beitrag stellt ein erweitertes Full-Waveform Verarbeitungsverfahren vor. Ziel ist, die auswertbare Eindringtiefe zu erhöhen und eine zuverlässige Extraktion und Erkennung von Bodenpunkten in tieferen Gewässern zu ermöglichen. Die Methodik basiert auf der Analyse von Informationen dicht benachbarter Messungen unter der Annahme, dass die Wassertiefe lokal stetig ist. Die Ergebnisse zeigen eine deutlich höhere auswertbare Eindringtiefe mit einer hohen Zuverlässigkeit der zusätzlich extrahierten Wasserbodenpunkte bei gleichzeitig größerer Abdeckung der Gewässerbodentopographie.

1 Einleitung

Airborne LiDAR Bathymetry (ALB) ist ein aktuelles Verfahren zur effizienten und großflächigen Vermessung von Gewässerbodentopographien in flachen Küstengebieten sowie in Binnengewässern. Das Verfahren basiert auf der simultanen Abtastung von Wasseroberfläche, Wassersäule und Gewässerboden durch bathymetrische Flugzeuglaserscannersysteme, die im grünen Wellenlängenbereich (532 nm) operieren. Die Gewässertrübung bewirkt dabei eine Abschwächung des Signals, welche die Eindringtiefe des grünen Laserstrahls in die Wassersäule limitiert. In Abb. 1 wird das Problem beispielhaft an zwei Full-Waveforms von unterschiedlichen Gewässertiefen illustriert. Bei der Full-Waveform in Abb. 1a kann das Bodenecho in einer Gewässertiefe von 0,78 m eindeutig detektiert werden. Im Beispiel in Abb. 1b ist die Detektion des Bodenechos in einer Gewässertiefe von 1,68 m nicht mehr eindeutig möglich.

In MADER et al. (2021) wurde ein neuartiges Verfahren zur Prozessierung von Laserbathymetriedaten vorgestellt, mit dem die auswertbare Gewässertiefe im konkreten Beispiel um 27% erhöht werden konnte. Grundidee des Verfahrens ist die Kombination von eng benachbarten Full-Waveforms in einem nicht-linearen Full-Waveform Stacking Ansatz (Zusammenfassung von mehreren Full-Waveforms zu einer Gesamtwellenform (stacked Full-Waveform)). Dadurch wird es möglich, Gewässerbodenpunkte zu detektieren, die mit Standardauswertemethoden nicht erkannt werden konnten.

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, D-01069 Dresden, E-Mail: [david.mader, katja.richter1, hans-gerd.maas]@hcu-hamburg.de

² Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Neptunallee 5, D-18057 Rostock, E-Mail: patrick.westfeld@bsh.de

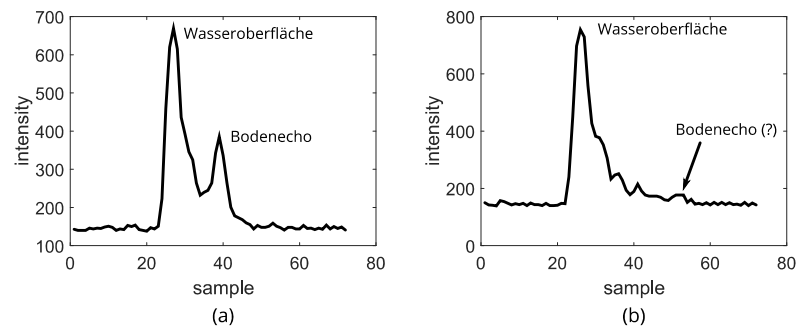


Abb. 1: Full-Waveform Laserbathymetriedaten mit (a) deutlich erkennbarem Gewässerbodenecho und (b) nicht eindeutig detektierbarem Bodenecho (MADER et al. 2021)

In dem Ansatz wurde zur Definition der Nachbarschaft ein regelmäßiges Raster auf der Wasseroberfläche definiert, in dessen Rasterzellen die individuellen Full-Waveforms zusammengefasst und gemeinsam ausgewertet wurden. Durch eine geeignete Wahl der Rasterzellengröße, kann die schräge Richtung des Laserstrahls durch die Wassersäule (z.B. forward-look und backward-look im Palmer-Scanmuster) bei geringen Gewässertiefen von ca. 2,0 m vernachlässigt werden. In tieferen Gewässern, wie z.B. küstennahen Flachwasserbereichen, kann die laterale Nachbarschaft an der Wasseroberfläche jedoch nicht mehr ohne weiteres auf den Gewässerboden übertragen werden. Die Prozessierung derartiger Datensätze erfordert somit eine Erweiterung des entwickelten Full-Waveform Stacking Ansatzes, welche eine geometrisch korrekte Berücksichtigung der Nachbarschaft am Gewässerboden ermöglicht. In diesem Beitrag wird daher ein volumetrischer Full-Waveform Stacking Ansatz zur zuverlässigen und genauen Extraktion des Gewässerbodens aus Laserbathymetriedaten vorgestellt.

Abschnitt 2 gibt zunächst einen Überblick über das Untersuchungsgebiet sowie die Datengrundlage. Anschließend werden in Abschnitt 3 die weiterentwickelten Methoden detailliert behandelt. Im Ergebnisteil (Abschnitt 4) erfolgt die visuelle und quantitative Evaluation und Validierung der erzielten Resultate auf Grundlage von Vergleichen mit standardprozessierten Daten und Echolotmessungen.

2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

In diesem Beitrag wird ein erweiterter Ansatz zur Prozessierung von Full-Waveform Laserbathymetriedaten mit schwachen Gewässerbodenechos vorgestellt. Die Einschätzung des Potentials dieses Ansatzes erforderte einen ALB Datensatz inklusive Full-Waveform Informationen eines Gewässers und Referenzdaten der Gewässerbodentopographie, um eine aussagekräftige Evaluierung und Validierung der erzielten Ergebnisse gewährleisten zu können. In der hier vorgestellten Pilotstudie kamen ALB-Messdaten eines Abschnittes der Elbe nahe der Stadt Elster zur Anwendung (Abb. 2), die vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe (WSA Elbe) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) bereitgestellt wurden. Diese Daten erfüllen die genannten Anforderungen weitgehend; lediglich die Verfügbarkeit von hochgenauen Referenzdaten der Gewässersohle ist nicht gegeben. Stattdessen kamen Echolotmessungen für die Validierung als Vergleichsdaten zum Einsatz (Genauigkeiten siehe Abschnitt 2.2).

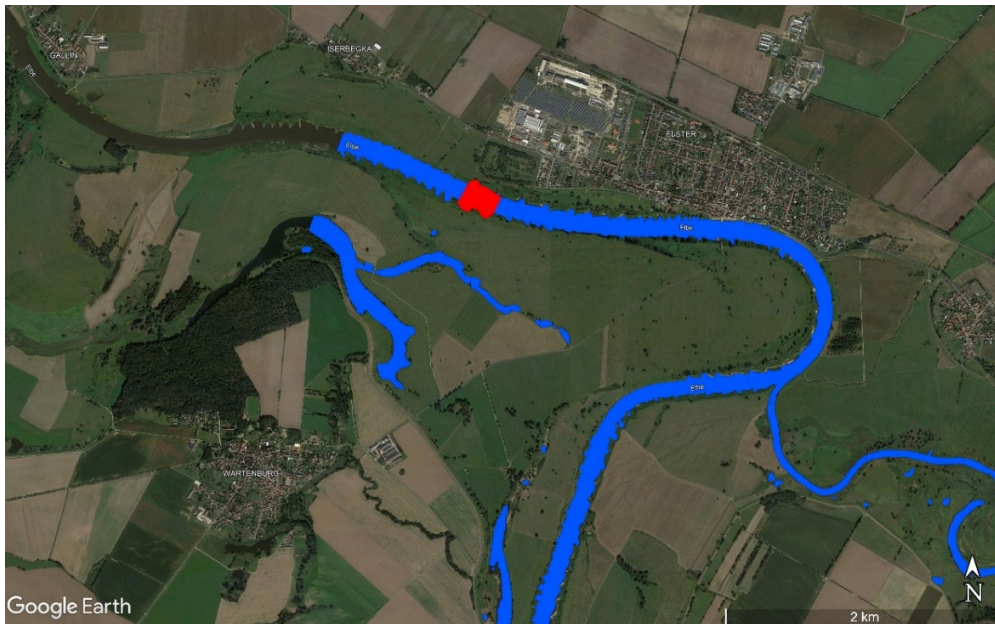


Abb. 2: Karte des Untersuchungsgebiets (blau) mit dem Testgebiet (rot). Nördlich der Elbe liegt die Stadt Elster

Die Ergebnisse der Standardauswertemethoden (online waveform processing - OWP) für die gemessenen ALB-Daten durch den Auftragnehmer bilden den Gewässerboden bis zu einer ungefähren Gewässertiefe von 1,65 m ab. Die Echolotdaten weisen Gewässertiefen über 2,20 m auf. Der Datensatz bietet somit genug Spielraum für die Entwicklung der erweiterten Auswertemethoden und deren Validierung sowie Evaluierung.

Im Folgenden werden das Untersuchungsgebiet, das ALB-Messsystem, die Charakteristik der Messdaten und die als Vergleichsdaten verwendeten Echolotdaten kurz vorgestellt.

2.1 Untersuchungsgebiet und ALB-Messdaten

Die Datenaufnahme erfolgte im Frühjahr 2015 mit dem topo-bathymetrischen Messsystem RIEGL VQ-880-G in einer ungefähren Flughöhe von 380 m. Die Punktdichte variiert zwischen 11 bis zu 55 Punkten pro m² in Abhängigkeit von Datenlücken, Überlappung der Flugstreifen und heterogener Punktverteilung des Palmer-Scanmuster. Zusätzlich zu den 3D-Punkten wurden die Full-Waveform Daten gespeichert. Eine Full-Waveform besteht aus 60-200 gleichabständigen Abtastwerten (Samples) mit einem konstanten Abtastintervall von 0,575 ns, was unter Wasser einem Intervall von ca. 6,5 cm entspricht. Die Evaluierung der Auswertemethoden erfolgte in einem Testgebiet, welches in Abb. 2 rot dargestellt ist. Abb. 3a zeigt die Ergebnisse der Standardprozessierung im Testgebiet.

2.2 Echolotdaten

Die für die Validierung verwendeten Echolotdaten wurden von einem Messschiff im Herbst 2015 akquiriert. Das Schiff war zu diesem Zeitpunkt mit einem Leica GX1200 RTK SAPOS Rover (für die Positionierung), einem Seatex MRU5 (für die Orientierung) und einem elektroakustischen Peilrahmen ausgestattet. Der Peilrahmen bestand aus 37 Singlebeam-Schwingern, verteilt auf zwei

Seitenauslegern mit einer Spannweite von 12 m. Die Echolote der Firma Dr. Fahrentholz (Kiel) messen mit einer Frequenz von 200 kHz und eine Tiefenauflösung von 1 cm. In WEIß & WIRTH 2015 wird eine 3D-Punktgenauigkeit von 7,5 cm im Böschungsbereichen und 6,4 cm in flachen Flussbettbereichen angegeben. Die Echolotdaten sind in Abb. 3b farbkodiert bzgl. ihrer Höhenkoordinaten dargestellt.

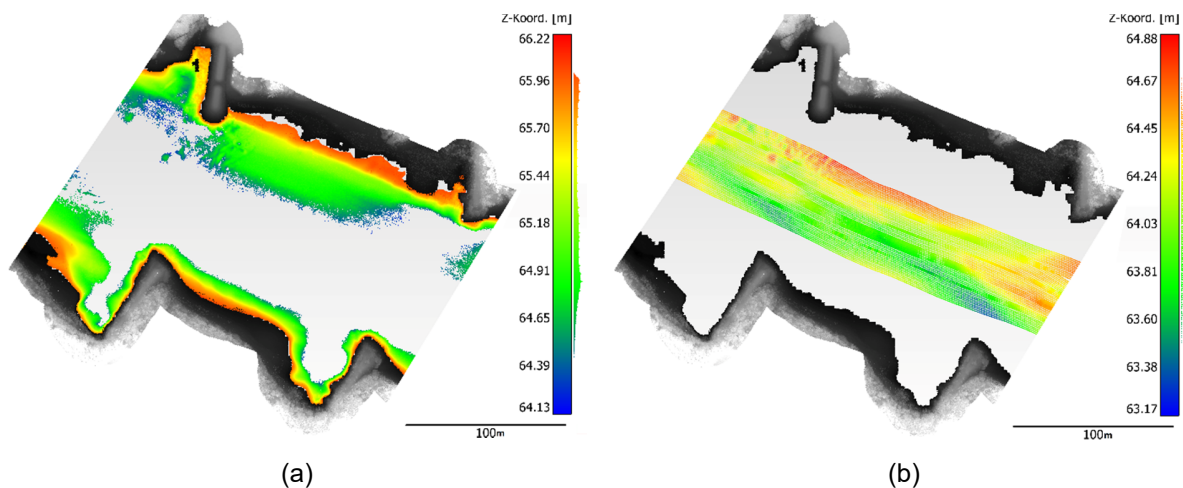


Abb. 3: Darstellung des Testgebietes mit (a) Ergebnissen der Full-Waveform Standardprozessierung und (b) Echolotmessungen. Die Punktwolken sind farbkodiert bzgl. ihrer Höhenkoordinate. Die grauwertkodierten Bereiche sind Land- und Uferbereiche. Die standardprozessierten Punkte beschränken sich hauptsächlich auf die flacheren Abschnitte des Flusses, während die Echolotpunkte aufgrund der Zugänglichkeit für Schiffe hauptsächlich die tieferen Teile des Flusses abdecken

3 Methoden

Das volumetrische Full-Waveform Stacking verfolgt das Ziel der Detektion von zum Teil sehr schwachen Gewässerbodenechos. Diese sind durch Standardauswerteverfahren nicht mehr detektierbar, da sie in der Regel ohne das Hinzuziehen von zusätzlicher Information nicht vom zufälligen Rauschen unterschieden werden können. Diese Informationen werden aus der gemeinsamen Auswertung benachbarter Full-Waveform Daten gewonnen. Es wird die Annahme zu Grunde gelegt, dass sich durch eine gemeinsame Auswertung und eines lokal stetigen Gewässerbodenverlaufs zufällige Signalanteile (zumeist Rauschsignal) gegenseitig abschwächen oder gar eliminieren. Schwache Objektechos werden hingegen verstärkt und somit einfacher detektierbar.

Für diese Auswertung muss zunächst festgelegt werden, welche Messungen aufgrund ihrer Nachbarschaft zueinander gemeinsam ausgewertet werden sollen. Dazu werden die Messdaten in einen Voxelaum integriert (Details siehe Abschnitt 3.1). Anschließend erfolgt die Auswertung und Analyse räumlich dicht benachbarter Full-Waveform Daten (Abschnitt 3.2), um aus den Ergebnissen einen Suchbereich für das Gewässerbodenecho in den einzelnen Full-Waveforms abzuleiten. Innerhalb dieses Suchbereichs wird das Maximum detektiert, welches mit hoher

Wahrscheinlichkeit dem Gewässerbodenecho entspricht, und der dazugehörige Gewässerbodenpunkt extrahiert (Abschnitt 3.3).

3.1 Integration der Full-Waveform Daten in den Voxelraum

Der volumetrische Full-Waveform Stacking Ansatz basiert auf der Überführung der Laserbathymetriedaten in eine lokale Voxelraumrepräsentation. Es werden also nicht mehr die an der Wasseroberfläche benachbarten individuellen Full-Waveforms durch Akkumulation zu einer sogenannten stacked Full-Waveform zusammengefasst, sondern die individuellen Full-Waveforms geometrisch korrekt in einen Voxelraum eingetragen.

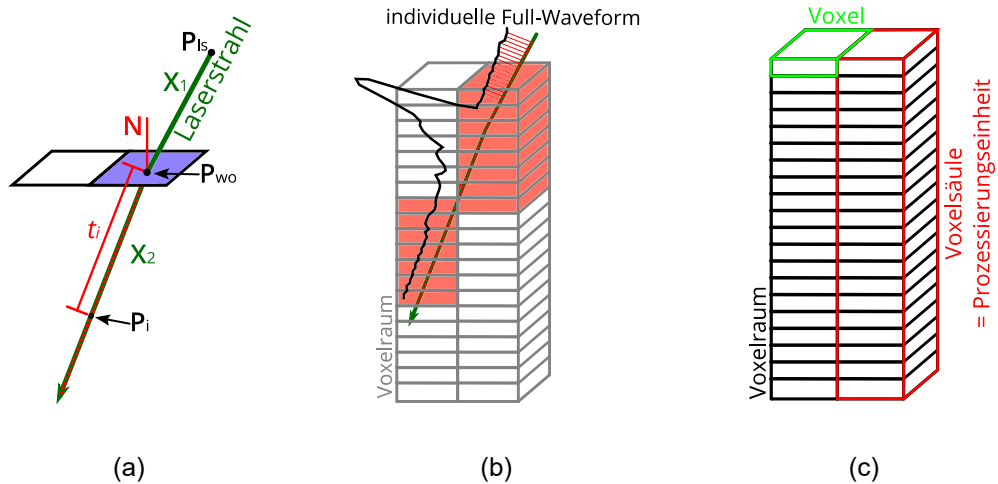


Abb. 4: Schematische Darstellung der Voxelraumrepräsentation. Links: geometrische Darstellung der Sampleintegration, Mitte: Prinzip der Integration von Full-Waveform Samples in den Voxelraum, Rechts: Voxelraum mit individuellem Voxel (grün) und Voxelsäule bzw. Prozessierungseinheit (rot)

Im Detail bedeutet dies, dass die Intensitäten der georeferenzierten Samples jeder Full-Waveform in den Voxelraum transformiert werden. Dazu wird mit dem Richtungsvektor \mathbf{X}_1 (normierter Vektor von Punkt der Pulsemmission \mathbf{P}_{Is} zu Wasserflächenpunkt \mathbf{P}_{wo}) und der Wasserflächennormalen \mathbf{N} der Richtungsvektor \mathbf{X}_2 des Laserstrahls in der Wassersäule berechnet (Gl. 1 (GLASSNER 1989); Abb. 4a).

$$\mathbf{X}_2 = \eta \cdot \mathbf{X}_1 + \left(\eta \cdot C - \sqrt{1 + \eta^2 \cdot (C^2 - 1)} \right) \cdot \mathbf{N} \quad (1)$$

$$C = -\mathbf{N} \cdot \mathbf{X}_1$$

$$\eta = n_{Luft} / n_{Wasser}$$

mit

n_{Luft}, n_{Wasser} : Brechungsindex Luft, Brechungsindex Wasser

Anhand der Sampleanzahl zwischen Wasserflächenpeak und des Samples i sowie des Sampling Intervalls kann für jedes Sample i eine Laufzeit t_i bestimmt werden, woraus der Punkt \mathbf{P}_i

berechnet und zusammen mit der dazugehörigem Intensitätswert einem Voxel zugeordnet werden (Gl. 2; Abb. 4b).

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_{WO} + t_i \cdot c_{Wasser} \cdot \mathbf{X}_2 \quad (2)$$

mit

c_{Wasser} : Lichtgeschwindigkeit in Wasser (ca. 225000 km/s)

Fallen mehrere Intensitätswerte in einem Voxel zusammen, wird aus den Intensitätswerten das arithmetische Mittel gebildet und dieser Mittelwert dem Voxel zugeordnet. Die Strahlendivergenz des Laserstrahls wird dabei vernachlässigt.

Anschließend erfolgt die Zusammenfassung der vertikal angeordneten Voxel zu einer vertikalen Voxelsäule (= Prozessierungseinheit), was im Prinzip einer Wassersäule entspricht (Abb. 4c). Alle Messdaten, die in eine solche Prozessierungseinheit fallen, werden als dicht benachbarte Messwerte angesehen und in der weiteren Prozessierung gemeinsam ausgewertet.

3.2 Generierung und Analyse der Ortho Full-Waveforms

Nachdem die Messdaten in eine lokale Voxelraumrepräsentation integriert und die Prozessierungseinheiten festgelegt wurden, können diese ausgewertet werden. Dazu wird für jede vertikale Voxelsäule eine sogenannte Ortho Full-Waveform generiert (PAN et al., 2016), indem jedes Voxel der Prozessierungseinheit als ein Sample der Ortho Full-Waveform interpretiert wird (Abb. 5). Die Intensität des Ortho Full-Waveform Samples ergibt sich aus der mittleren Intensität aller Samples im entsprechenden Voxel. Somit kann die Ortho Full-Waveform als repräsentatives Signal der Prozessierungseinheit angesehen werden.

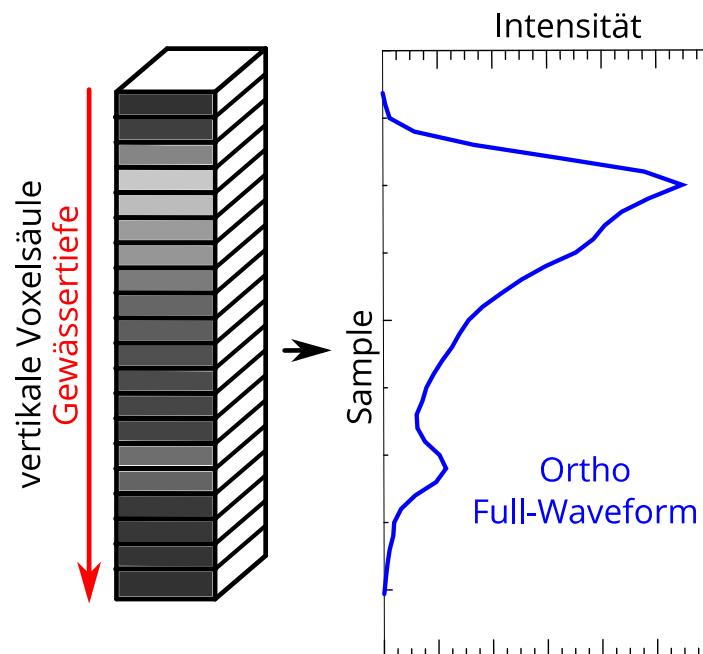


Abb. 5: Generierung einer Ortho Full-Waveform aus einer vertikalen Voxelsäule (RICHTER et al. 2021)

Die Ortho Full-Waveform wird anschließend mit dem Ziel analysiert, einen Suchkorridor zur Detektion der Gewässerbodenechos in den individuellen Full-Waveforms zuverlässig zu bestimmen. Dazu werden alle lokalen Maxima mit den Parametern *Isolation*, *Prominenz* und *Amplitude* charakterisiert (Abb. 6) und daraus die *Signifikanz* der Maxima berechnet.

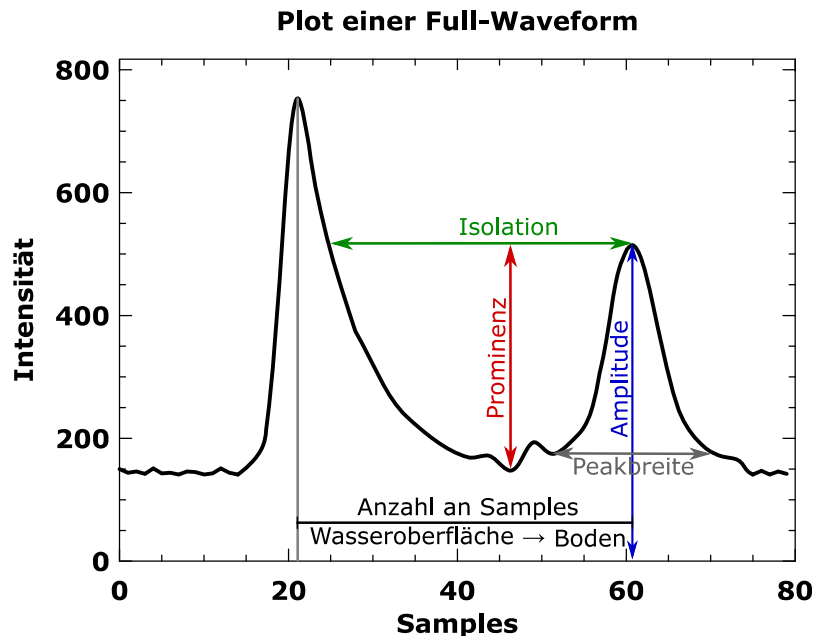


Abb. 6: Schematische Darstellung der Parameter der Full-Waveform Analyse (MADER et al. 2021)

Die Parameter *Isolation* und *Prominenz* sind aus der Arbeit von KIRMSE & DE FERRANTI 2017 abgeleitet, wo sie zur Detektion von signifikanten Berggipfeln aus Höhendaten verwendet wurden. Die *Isolation* gibt die Anzahl an Samples zwischen dem lokalen Maximum und einem Sample mit mindestens dem gleichen Intensitätswert an. Die *Prominenz* ist die Differenz der Intensitäten zwischen dem lokalen Maximum und dem lokalen Minimum (zwischen den beiden Samples der *Isolation*). Aus dem Produkt von *Isolation*, *Prominenz* und *Amplitude* resultiert die *Signifikanz*, wobei die Anteile bei Bedarf verschieden gewichtet werden können. In SCHWARZ et al. 2019 wurden die *Signifikanz* gemeinsam mit *Isolation*, *Prominenz* und *Amplitude* zur Näherungswertbestimmung von Wasseroberflächen- und Gewässerbodenpeak verwendet.

Anhand der *Signifikanz* der lokalen Maxima können die Echos der Wasseroberfläche und des Gewässerbodens in der Ortho Full-Waveform detektiert werden, unter der Annahme, dass der signifikanteste Peak die Wasseroberfläche und der signifikanteste Peak nach der Wasseroberfläche den Gewässerboden repräsentieren. Nachdem alle Prozessierungseinheiten unabhängig voneinander analysiert wurden, erfolgt eine Filterung, um mögliche Fehldetektionen zu erkennen und zu eliminieren. Die Filterung wird iterativ durchgeführt, indem die ermittelte Wassertiefe jeder Prozessierungseinheit mit dem arithmetischen Mittel der bereits validierten Nachbarschaftsinformationen verglichen wird. Die Einzelheiten zu diesem Filterverfahren sind in MADER et al. 2021 veröffentlicht.

3.3 Detektion und Extraktion von Gewässerbodenpunkte

Die aus der Analyse der Ortho Full-Waveforms resultierende Gewässertiefe dient als Näherungswert für die Detektion und Extraktion der Gewässerbodenechos in den gemessenen Full-Waveforms der Prozessierungseinheit. Für jede gemessene Full-Waveform wird ein Bereich bestimmt, in dem nach Gewässerbodenechos gesucht werden soll. Dazu wird aus dem Näherungswert der Gewässertiefe unter Berücksichtigung der Laserstrahlrichtung die entsprechende Samplenummer in der gemessenen Full-Waveform abgeleitet. Anhand der Charakteristik der Ortho Full-Waveform wird dann ein Toleranzbereich für die Suche festgelegt (MADER et al. 2021). Der Peak im Suchbereich, der dem Näherungswert am nächsten ist, wird als Gewässerbodenecho detektiert. Befindet sich innerhalb des Suchbereichs kein lokales Maximum, wird auch kein Gewässerbodenpunkt für diese Full-Waveform berechnet.

Mit den vorliegenden Informationen erfolgt die Extraktion des Gewässerbodenpunktes, sofern ein Echo detektiert wurde (Abb. 7). Die Koordinaten des Gewässerbodenpunktes \mathbf{P}_{GB} werden mit Gleichung (3) berechnet.

$$\mathbf{P}_{GB} = \mathbf{P}_{WO} + t_2 \cdot c_{Wasser} \cdot \mathbf{X}_2 \quad (3)$$

Der Parameter t_2 ist die Zeit, die der Laserstrahl von der Wasseroberfläche bis zum Gewässerboden benötigt und kann mit der Anzahl der Samples zwischen Wasseroberflächenpeak und Gewässerbodenpeak und dem zeitlichen Abtastintervall berechnet werden.

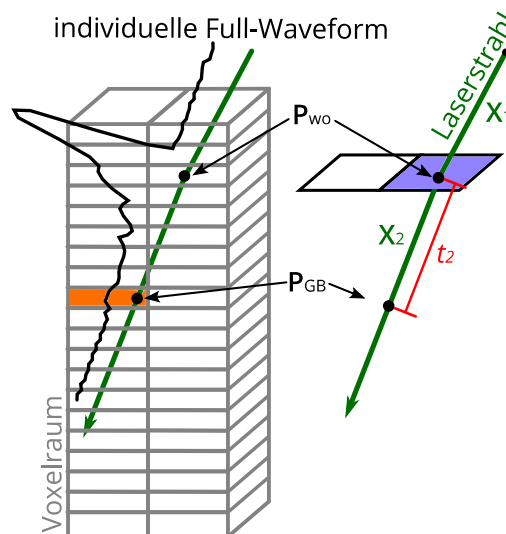


Abb. 7: Schematische Darstellung zur Extraktion eines Gewässerbodenpunktes aus den Ergebnissen des volumetrischen Full-Waveformstacking und der gemessenen Full-Waveform

4 Ergebnisse und Diskussion

Das volumetrische Full-Waveform Stacking (VFWS) wurde für alle Signale im Testgebiet durchgeführt. Für die Prozessierung kam eine Voxelgröße von $2,0\text{ m} \times 2,0\text{ m} \times 0,1\text{ m}$ zur Anwendung, welche sich in empirischen Untersuchungen bewährt hat. Aufgrund der Nicht-Linearität des Ansatzes bewirkt die Voxelgröße jedoch keine Reduktion der lateralen Auflösung am Boden.

Als erstes erfolgt eine visuelle Beurteilung der Ergebnisse. Abb. 8 zeigt die aus dem VFWS resultierende Punktwolke, farbkodiert bzgl. der Z-Koordinate. Grundsätzlich ist der in den Vergleichsdaten präsente Höhenverlauf (Abb. 3) hier ebenfalls sehr gut erkennbar, wobei es noch einige wenige falsch detektierte Bereiche (blauen Bereiche in Abb. 8) gibt. Dieser Eindruck wird durch die Profile in Abb. 9 bestätigt. Verglichen mit den OWP Daten (Abb. 3a) konnte eine deutlich höhere Eindringtiefe und Punktabdeckung und damit eine bessere Repräsentation des Gewässerbodens erreicht werden.

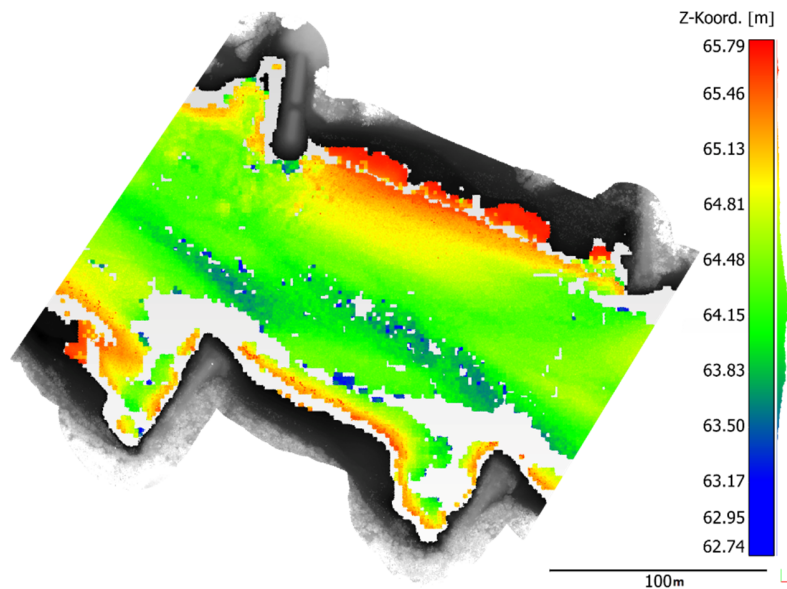


Abb. 8: Ergebnis der volumetrischen Full-Waveform Prozessierung. Die Z-Koordinaten bzw. Höhen sind farbcodiert dargestellt

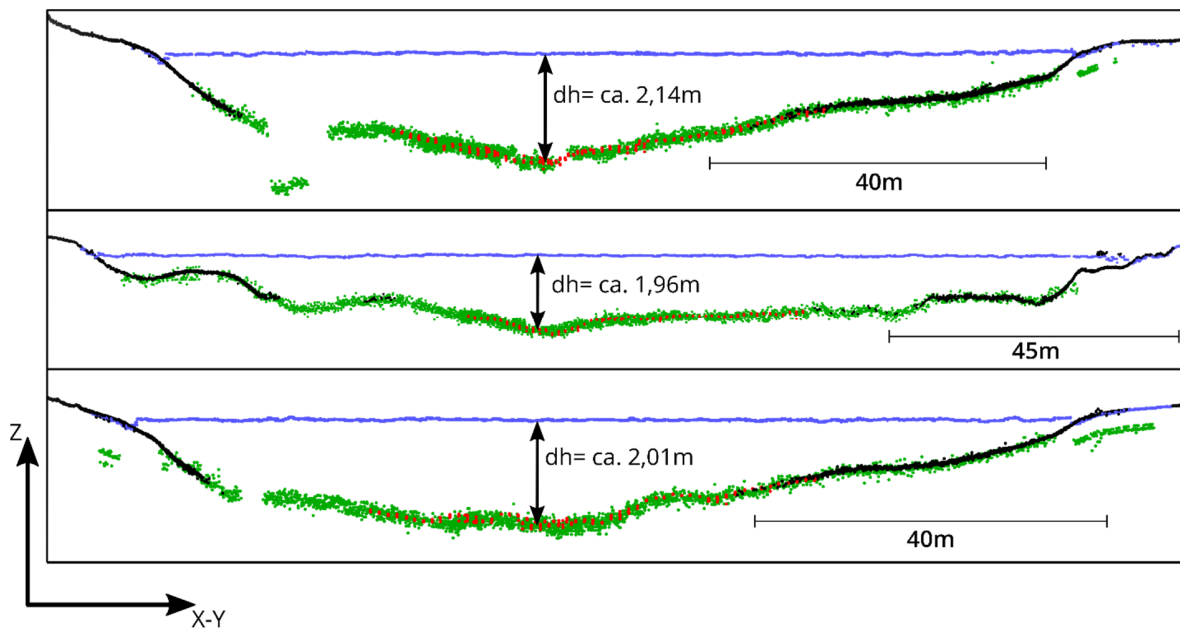


Abb. 9: Profile durch die Elbe. Die Z-Koordinatenkomponente ist 6fach überhöht. Blau: Wasseroberflächenpunkte; Schwarz: OWP Punkte; Rot: ES Punkte; Grün: VFWS Punkte

Zur Evaluation werden die Höhendifferenzen zwischen VFWS Ergebnissen und Vergleichsdaten quantitativ analysiert. Der Fokus liegt dabei auf dem Vergleich mit den Echolotmessungen (ES). Die standardprozessierten Daten (OWP) werden lediglich für eine erste Überprüfung der VFWS Daten herangezogen. Abb. 10 zeigt die Höhendifferenzen als farbcodierte Darstellung.

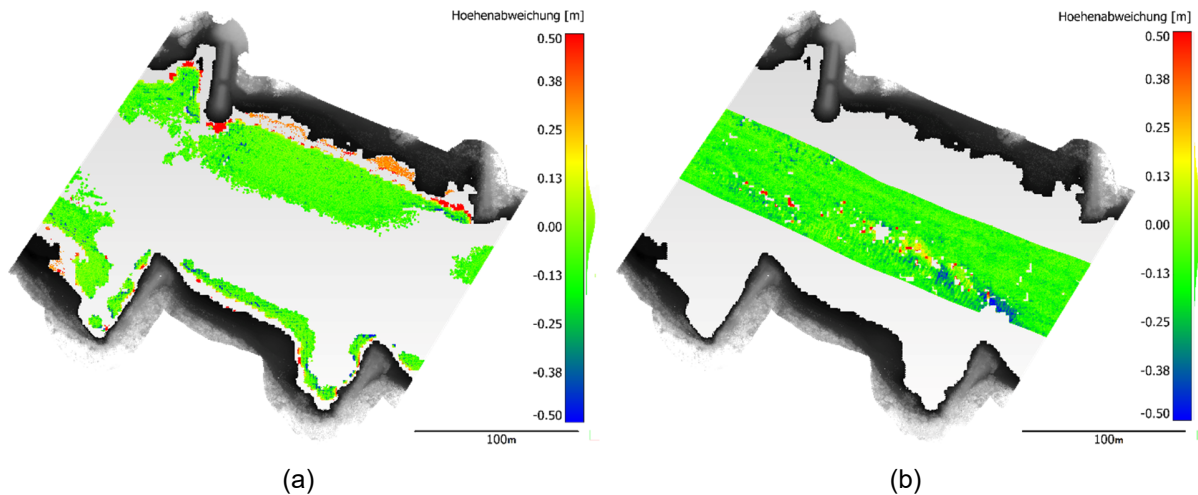


Abb. 10: Farbkodierte Darstellung der Höhendifferenzen zwischen neuprozessierten Bodenpunkten und (a) OWP Punkten und (b) ES Punkten

In Tab. 1 sind Root Mean Square (RMS), Mean Absolute Deviation (MAD(mean) / $\sigma_{MAD(mean)}$) und Median Absolute Deviation (MAD(median) / $\sigma_{MAD(median)}$) zusammengefasst. Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit wird außerdem die sogenannte Inlier Rate (LITMAN et al. 2015) angegeben, welche den Anteil an VFWS Punkte beschreibt, deren Höhendifferenz zu den Vergleichswerten unter einem bestimmten Grenzwert Δh liegt.

Tab. 1: Statistische Auswertung der Höhendifferenzen zwischen allen neuprozessierten Bodenpunkten und den Vergleichsdaten

| Vergleich | VFWS vs. OWP | VFWS vs. ES |
|---|-------------------|-------------------|
| Vergleichspunkte / VFWS Punkte | 292093 / 1426958 | 891358 / 1426958 |
| Mittlere Höhenabweichung / $\sigma_{\text{Mittlere Höhenabw.}}$ | 0.037 m / 0.15 m | 0.012 m / 0.11 m |
| RMS | 0.15 m | 0.11 m |
| MAD(mean) / $\sigma_{MAD(mean)}$ | 0.073 m / 0.092 m | 0.080 m / 0.10 m |
| MAD(median) / $\sigma_{MAD(median)}$ | 0.044 m / 0.065 m | 0.062 m / 0.092 m |
| Inlier Rate: $\Delta h \leq 0,35$ m | 97,90% | 99,39% |
| Inlier Rate: $\Delta h \leq 0,25$ m | 96,42% | 97,43% |
| Inlier Rate: $\Delta h \leq 0,15$ m | 90,96% | 87,39% |

Die statistische Auswertung der Höhendifferenzen bezogen auf die OWP Daten (Tab. 1) und die Visualisierungen (Abb. 8-10) bestätigen die korrekte Funktionsweise des volumetrischen Full-Waveform Stackings. Allerdings sind die oben aufgeführten Werte nicht für jede Gewässertiefe repräsentativ, sodass im Folgenden die Auswertung in Abhängigkeit der Gewässertiefe durchgeführt wurde.

In Abb. 11 sind die Genauigkeitsmaße und Zuverlässigkeitsmaße für den Vergleich von OWP Punkten und VFWS Punkten in Abhängigkeit von der Gewässertiefe dargestellt. Bis zu einer Gewässertiefe von ca. 0,7 m sind die Genauigkeitsmaße relativ schlecht, zeigen danach aber bessere Werte (Abb. 11a). Ein ähnliches Verhalten ist bei den Zuverlässigkeitsmaßen zu beobachten (Abb. 11b). Die Probleme im Gewässertiefenbereich von 0,0 m – 0,7 m sind aus dem Full-Waveform Stacking (MADER et al. 2021) bekannt und wurden unter anderem auf mögliche Probleme mit Mischechos von Wasseroberfläche, Wassersäule und Gewässerboden zurückgeführt. Ab einer Gewässertiefe von etwa 0,7 m liegen die OWP und VFWS Punkte aber dicht beieinander, was die guten Genauigkeitswerte und die hohen Inlier Werte bestätigen. Der Fokus dieses Beitrags und des Full-Waveform Stacking Ansatzes im Allgemeinen liegt auf der Detektion und Extraktion von Gewässerbodenpunkten, welche nicht durch OWP Verfahren erfasst wurden. Die Probleme in Bereichen mit sehr geringer Gewässertiefe spielen für die Beurteilung des Potentials des hier vorgestellten Verfahrens eine untergeordnete Rolle, da dort eine Standardprozessierung problemlos möglich ist.

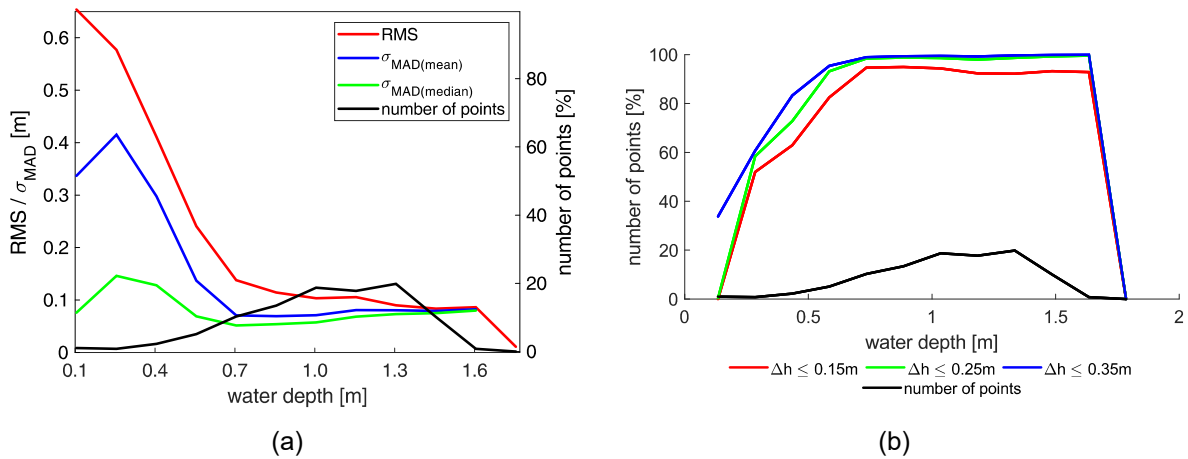


Abb. 11: Ergebnisse des Vergleichs OWP Punkte und VFWS Punkte in Abhängigkeit der Gewässertiefe. (a) Genauigkeitsmaße; (b) Zuverlässigkeitsmaße

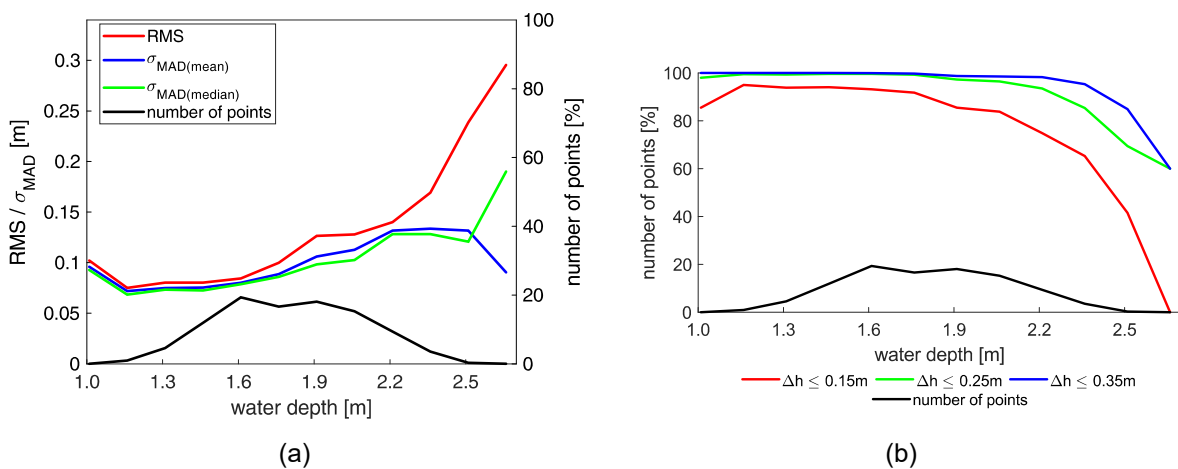


Abb. 12: Ergebnisse des Vergleichs ES Punkte und VFWS Punkte in Abhängigkeit der Gewässertiefe. (a) Genauigkeitswerte; (b) Zuverlässigkeitswerte

Die Ergebnisse des Vergleichs von ES Punkten und VFWS Punkten ist in Abb. 12 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Güte der VFWS Punkte durch die ES Punkte validiert wird. Die Genauigkeitswerte in Abb. 12a bewegen sich bis zu einer Gewässertiefe von ca. 2,0m zwischen 10-15 cm, was von der Inlier Rate in Abb. 12b bestätigt wird.

5 Fazit und Ausblick

Die Eindringtiefe von bathymetrischen Laserscannersystemen wird, aufgrund der starken Abschwächung des ausgesandten Lasersignals in der Wassersäule, stark von der Trübung des Gewässers beeinflusst. Dies führt zu einer Abschwächung des Gewässerbodenechos in den aufgenommen Full-Waveform Daten, sodass ab einer gewissen Gewässertiefe das Bodenecho nicht mehr zuverlässig vom Rauschsignal des Sensors unterscheidbar ist und somit auch nicht mehr detektiert werden kann. Ziel des vorgestellten nicht-linearen volumetrischen Full-Waveform Stacking ist eine gemeinsame Auswertung räumlich dicht benachbarter Full-Waveform Daten mit der Annahme, dass die Anzahl der Samples zwischen Wasserobflächenecho und Bodenecho sehr ähnlich ist. Damit sollen zufällige Signalanteile (wie z.B. das Rauschen) abgeschwächt und redundante Signale (Boden) verstärkt werden. Für die gemeinsame Auswertung von dicht benachbarten Messungen kamen lokale Voxelauswertungen und daraus resultierende Ortho Full-Waveforms zur Anwendung. Auf Basis der Analyse der Ortho Full-Waveforms konnten Suchbereiche in den gemessenen Full-Waveforms definiert und, insofern vorhanden, Gewässerbodenecho detektiert sowie Gewässerbodenpunkte extrahiert werden.

Die Auswertung hat gezeigt, dass im konkreten Beispiel die auswertbare Eindringtiefe von ca. 1,65 m auf mindestens 2,10 m erhöht werden konnte, was einem Zuwachs um 27% entspricht. Dies führt zu einer deutlich größeren Abdeckung des Gewässerbodens durch die extrahierten Punkte des volumetrischen Full-Waveform Stackings (2,29fache im Vergleich zu der Anzahl an OWP Punkten).

Die quantitative Auswertung ergab gute Genauigkeiten bzgl. der Höhenabweichung. Der RMS Wert für das gesamte Gebiet lag bei 0,11 m. Da der RMS Wert durch Ausreißer oder auch systematische Fehler beeinflusst sein kann, wurden zusätzlich die $\sigma_{MAD(\text{mean})}$ und $\sigma_{MAD(\text{median})}$ Werte für die Beurteilung der Ergebnisse herangezogen. Für $\sigma_{MAD(\text{mean})}$ und $\sigma_{MAD(\text{median})}$ ergaben sich Werte von 0,10 m respektive 0,092 m, was ebenfalls auf eine hohe Güte der erzielten Ergebnisse hindeutet. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse wurde mit der Inlier Rate bestimmt und besagt, dass 97,43% der neuprozessierten Punkte eine Höhendifferenz zu den Vergleichsdaten von weniger als 25 cm aufweisen. Für eine optimierte Repräsentation der Gewässerbodentopographie aus ALB Daten sollten OWP Punkte (vor allem für die ufernahen Bereiche) und VFWS Punkte gemeinsam genutzt werden.

In zukünftigen Arbeiten sollen folgende Aspekte des volumetrischen Full-Waveform Stackings weiterentwickelt werden:

- Verbesserung der Filtermethoden
- Nutzung eines komplexeren Wasseroberflächenmodells nach RICHTER et. al 2021 für eine verbesserte Bestimmung der Wasseroberflächennormalen

- optimierte Bestimmung des Suchbereichs in der gemessenen Full-Waveform durch Einführung eines Gewässerbodenmodells.

Außerdem soll die Methodik auf maritime Datensätze aus küstennahen Flachwasserbereichen übertragen werden. Aufgrund der komplexen Charakteristik dieser Laserbathymetriedaten ist dafür weitere Entwicklungsarbeit erforderlich.

6 Danksagung

Die Arbeiten zur Laserbathymetrie werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Wir danken auch der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und dem Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe (WSA Elbe) für die Unterstützung unserer Forschungsarbeiten sowie der Firma Airborne Hydro Mapping GmbH (AHM) für die gute Zusammenarbeit bei der Aufbereitung der Befliegungsdaten.

7 Literaturverzeichnis

- GLASSNER, A. S., 1989: An introduction to ray tracing. Academic Press, London.
- KIRMSE, A. & DE FERRANTI, J., 2017: Calculating the prominence and isolation of every mountain in the world. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, **41**(6), 788-802.
- LITMAN, R., KORMAN, S., BRONSTEIN, A. & AVIDAN, S., 2015: Inverting RANSAC: Global Model Detection via Inlier Rate Estimation. *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 5243-5251.
- MADER, D., RICHTER, K., WESTFELD, P. & MAAS, H.-G., 2021: Potential of a Non-linear Full-Waveform Stacking Technique in Airborne LiDAR Bathymetry. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, **89**, 139-158.
- PAN, Z., GLENNIE, C. L., FERNANDEZ-DIAZ, J. C., LEGLEITER, C. J., OVERSTREET, B., 2016: Fusion of LiDAR orthowaveforms and hyperspectral imagery for shallow river bathymetry and turbidity estimation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **54**(7), 4165-4177.
- RICHTER, K., MADER, D., WESTFELD, P. & MAAS, H.-G., 2021: Water Turbidity Estimation from LiDAR Bathymetry Data by Full-Waveform Analysis Comparison of Two Approaches. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021, 681-688.
- SCHWARZ, R., MANDLBURGER, G., PFENNIGBAUER, M. & PFEIFER N., 2019: Design and evaluation of a full-waveform surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **150**, 1-10.
- WEIß, R. & WIRTH, H., 2015: BfG-1861 Erprobung der Laserbathymetrie im Binnenbereich. *Technischer Report*, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.