

Detektion und Extraktion von Gewässersohlenpunkten aus Laserbathymetriedaten unter Nutzung von Full-Waveform-Stacking

DAVID MADER¹, KATJA RICHTER¹, PATRICK WESTFELD²,
ROBERT WEIß³ & HANS-GERD MAAS¹

Zusammenfassung: Laserbathymetrie erlaubt eine effiziente und flächenhafte Erfassung einer Gewässersohle. Die Messmethode wird jedoch durch die Gewässertrübung stark limitiert, sodass eine zuverlässige Detektion von Gewässersohlenpunkten bei stärkerer Trübung oder in tieferen Bereichen nicht mehr möglich ist. Dies führt zu einer unvollständigen Erfassung der Gewässersohle. In diesem Beitrag werden erweiterte Auswertemethoden vorgestellt, welche im Vergleich zu Ergebnissen einer Standardprozessierung die Eindringtiefe erhöhen und die zuverlässige Extraktion und Detektion von Gewässersohlenpunkten in tieferen Gewässerbereichen ermöglicht. Die Methodik basiert auf der Analyse von korrelierten Nachbarschaftsinformationen unter Annahme einer stetigen Gewässersohle. Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Erhöhung der Eindringtiefe bei einer hohen Zuverlässigkeit der zusätzlich extrahierten Gewässersohlenpunkte.

1 Einleitung

Zu den Aufgaben der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung gehört ein aktives Wasserstraßenmanagement, das eine optimale Wasserbewirtschaftung sicherstellt. Dabei müssen die Auswirkungen bautechnischer Veränderungen wie Bühnenabsenkungen, Bühnenfeldberäumungen und Streichlinienaufweitung auf das Gewässerbett dokumentiert werden. Moderne Laserbathymetrie-systeme (Airborne LiDAR Bathymetry, ALB) sind in der Lage, die Geometrie von Wasserwechselzonen und anderen Flachwasserbereichen effizient zu erfassen. Im Vergleich zu konventionellen hydroakustischen Messverfahren wie Echolot- und Fächerlotmessungen kann dabei die Wirtschaftlichkeit deutlich erhöht werden. Das Potential des Messverfahrens wird allerdings durch die Gewässertrübung stark limitiert. Bei stärkerer Gewässertrübung oder in tieferen Bereichen kann der Gewässerboden nicht mehr zuverlässig detektiert werden.

Die Abbildungen 1 und 2 verdeutlichen die Problematik am Beispiel der Gewässersohle der Bundeswasserstraße Elbe, welche zur Erfüllung der oben genannten Aufgaben möglichst lückenlos zu erfassen ist. Abbildung 1 zeigt den Bereich der Fahrrinne, der mit konventionellen Echolotsensoren vermessen wurde. Die Echolot-Messungen sind dabei Messprinzip-bedingt auf die Fahrrinne begrenzt. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Datenerfassung mit einem Laserbathymetriesystem visualisiert. Zur Auswertung der Full-Waveform Daten wurden Standardprozessierungsmethoden (online waveform processing) genutzt. Da die Elbe eine hohe Gewässertrübung aufweist,

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

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

³ Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz

konnte der Gewässerboden im Flachwasserbereich auf diese Weise nicht vollständig detektiert werden.

Ziel des Beitrags ist die Entwicklung von erweiterten Auswertelgorithmen, welche im Kern auf einer Analyse von korrelierten Nachbarschaftsinformationen und der Annahme einer stetigen Gewässersohle basieren. Dadurch soll eine höhere Eindringtiefe, eine höhere Datendichte und damit einhergehend eine größere Gewässersohlenabdeckung mit einer hohen Zuverlässigkeit erreicht werden. In diesem Beitrag werden die Methodik und die Ergebnisse vorgestellt, diskutiert und abschließend Ziele für weiterführende Arbeiten genannt.



Abb. 1: Abschnitt der Elbe bei Elster (Elbe). Die aus Echolotmessungen des Vermessungsschiffes ROSSLAU extrahierten Gewässersohlenpunkte der Fahrrinne sind farbcodiert dargestellt. (Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde)

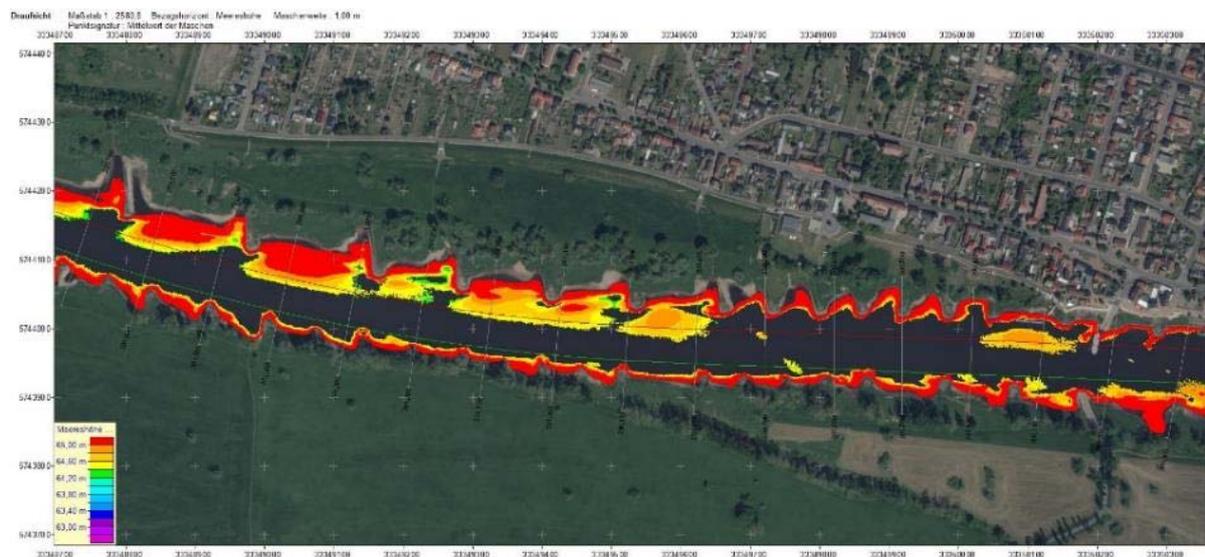


Abb. 2: Abschnitt der Elbe bei Elster (Elbe). Gewässersohlenpunkte aus der Online-Prozessierung des RIEGL VQ880-G sind farbcodiert dargestellt. (Quelle: Bundesanstalt für Gewässerkunde)

2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

Das Untersuchungsgebiet umfasst die Elbe zwischen Klöden und Elster. Zur Evaluierung der entwickelten Methoden wurden drei Teilgebiete ausgewählt, die in Abbildung 3a dargestellt sind. Die Befliegung des Gebietes fand im Frühjahr 2015 mit einem RIEGL VQ-880-G statt. Während der Messungen wurde das zurückgestreute Signal am Empfänger in Form einer Full-Waveform digitalisiert und aufgezeichnet (RIEGL 2017). Die aufgenommenen Full-Waveforms bestehen aus 60 bis 200 Samples (Intensitätswerte) mit einem konstanten Abtastintervall von $5,75 \cdot 10^{-10}$ Sekunden. Es wurde dabei eine Datendichte für Gewässersohlenpunkte von bis zu 35 Punkten/m² erreicht. Die zu prozessierenden Gebiete umfassen das Gewässer und den angrenzenden trockenen Uferstreifen mit einer Breite von bis zu 20 m.

Für die Entwicklung, Ausführung und Auswertung der erweiterten Methodik kamen die Full-Waveform-Daten (Abb. 3b), die Trajektorie (Abb. 3c) und die aus Standardprozessierung resultierende (klassifizierte) Punktwolke (Abb. 3d) zur Anwendung. Die Evaluierung der Ergebnisse erfolgte auf Grundlage der mit Standardmethoden extrahierten Gewässersohlenpunkte (Abb. 3e) sowie der Echolotdaten der Fahrrinne (Abb. 3f), welche vom Vermessungsschiff ROSSLAU im Frühjahr 2014 aufgenommen wurden.

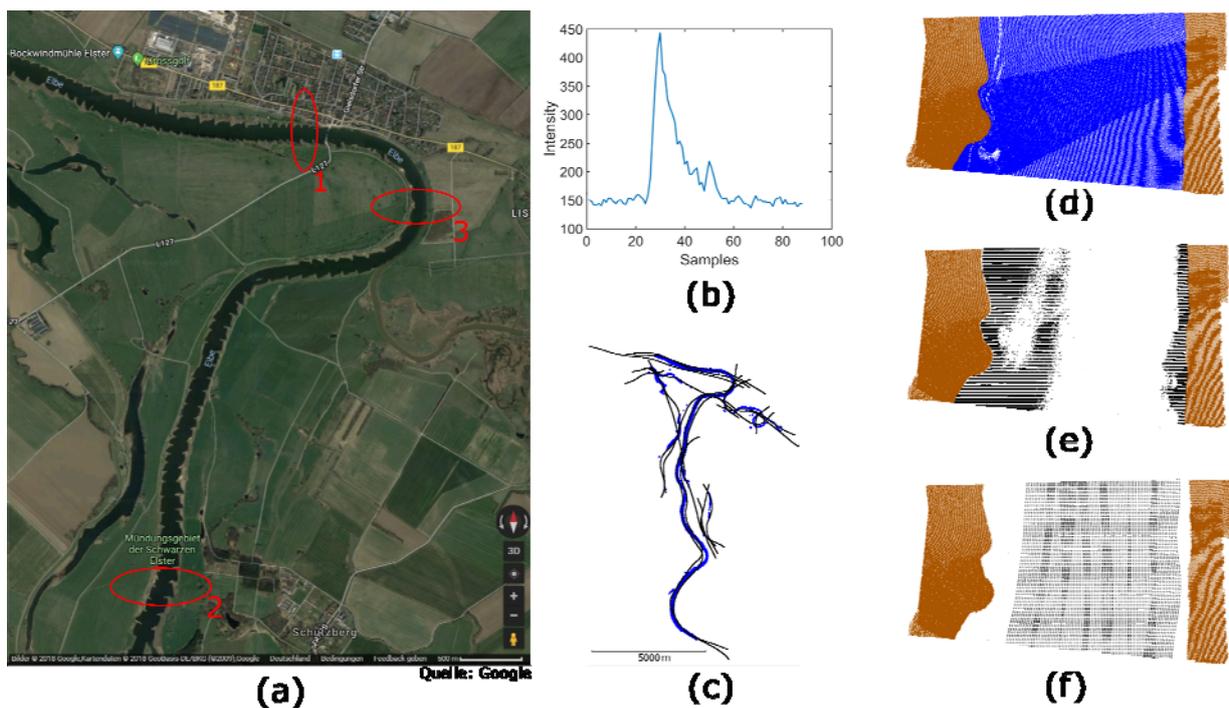


Abb. 3: Lage der Evaluationsgebiete Elbe Nord (a1), Elbe Süd (a2) und Elbe Ost (a3). Für die erweiterte Prozessierung sind Full-Waveform-Daten (b), Position des Laserbathymetrysystems (c) und mit Standardverfahren extrahierte Wasseroberflächen- sowie Landpunkte nötig (d). Für die Evaluierung der Ergebnisse werden bereits detektierte Gewässersohlenpunkte (e) sowie Echolotdaten (f) verwendet.

3 Methodik

3.1 Allgemeiner Ablauf der Prozessierung

Das Potential der Auswerteverfahren für die ALB-Daten ist stark von der Trübung des Gewässers abhängig (GUENTHER et al., 1978). D.h., je trüber ein Gewässer ist, desto schwächer wird das zurückkommende Bodensignal bei größer werdenden Gewässertiefe sein – mit der Folge, dass Bodenpunkte nicht mehr zuverlässig von Rauschsignalen separierbar sind. Durch die Nutzung von korrelierten Nachbarschaftsinformationen sollen Lage und Weite des Bereichs im Full-Waveform-Signal bestimmt werden, wo das Bodenecho erwartet wird. Damit stellt eine geeignete Nachbarschaftsanalyse die Grundlage für eine zuverlässige Detektion und Extraktion von Gewässerbodenpunkte in der Prozessierung dar.

Die Bearbeitung der Daten erfolgt in vier Prozessierungsschritte (Abb. 4). In einem ersten Schritt wird das Untersuchungsgebiet in Rasterzellen unterteilt (Kap. 3.2), welche im weiteren Verlauf sequentiell abgearbeitet werden. Anschließend werden die Informationen zur Gewässertiefe von benachbarten Rasterzellen erfasst, um eine grobe Näherung der Gewässertiefe für die zu bearbeitende Rasterzelle zu ermitteln (Kap. 3.3). Durch Anwendung eines Full-Waveform-Stacking-Ansatzes (Zusammenfassung von mehreren Full-Waveforms zu einer Gesamtwellenform) über alle Full-Waveforms innerhalb einer Rasterzelle wird der Suchbereich für das (schwache) Bodensignal weiter eingegrenzt (Kap. 3.4). Die durchgeführte Nachbarschaftsanalyse bildet die Grundlage für die abschließende Bestimmung der Gewässersohlenpunkte aus den jeweiligen Full-Waveforms (Kap. 3.5).

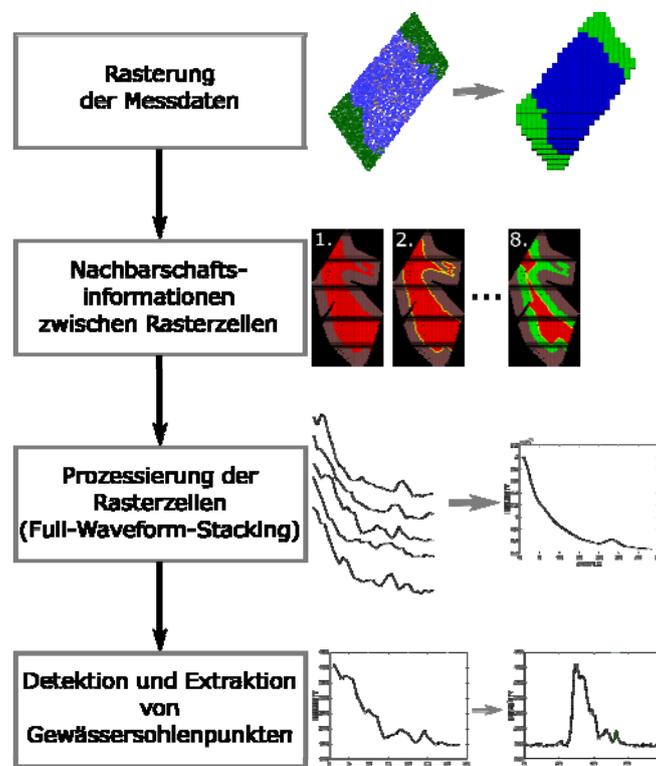


Abb. 4: Workflow für die Detektion und Extraktion von Gewässersohlenpunkten auf Basis redundanter Nachbarschaftsinformationen.

3.2 Rasterung des der Messdaten

Die Grundidee des Auswerteverfahrens beruht auf der Analyse und Nutzung korrelierter Nachbarschaftsinformationen. Ausgehend davon, dass benachbarte Full-Waveforms ähnliche Eigenschaften (z.B. Gewässerbodenpunkte) besitzen, können durch eine gemeinsame Auswertung die Gewässertiefe zuverlässiger bestimmt und Fehler im Signalverlauf besser identifiziert werden. Dazu ist es notwendig, eine geeignete Definition von Nachbarschaft bzgl. Anzahl, räumlicher Entfernung, und Verteilung von potentiell benachbarten Messdaten (bestehend aus Full-Waveform, Gewässeroberflächenpunkt und Ursprung der Pulsemission) festzulegen.

Die vorliegende Messkampagne weist im Allgemeinen eine gleichmäßige Punktverteilung und eine hohe Punktdichte mit bis zu 35 Punkten pro Quadratmeter auf. Für die erste Entwicklung der erweiterten Auswerteverfahren kam daher zunächst die leicht zu implementierende Methode der Rasterung zur Anwendung (Abb. 5). Für die Bestimmung der Rasterzellengröße spielt die Punktdichte und die Gewässerbodentopographie eine wichtige Rolle. Mit zunehmender Rasterzellengröße steigt die Anzahl an Full-Waveforms und damit die Zuverlässigkeit des Ergebnisses. Andererseits sinkt die Korrelation zwischen den Messdaten mit zunehmendem Abstand zueinander. Dies kann ähnlich wie bei einer Tiefpassfilterung zu einer Art Verschmierungseffekt führen, wodurch Gewässerbodensignale beim Full-Waveform-Stacking nicht korrekt oder gar nicht mehr identifiziert werden können. Für den hier vorgestellten Fall ergaben empirische Untersuchungen eine geeignete Rasterzellengröße zwischen $2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m}$ bis $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ und daraus resultierend 218 bis 315 Messdaten pro Rasterzelle.

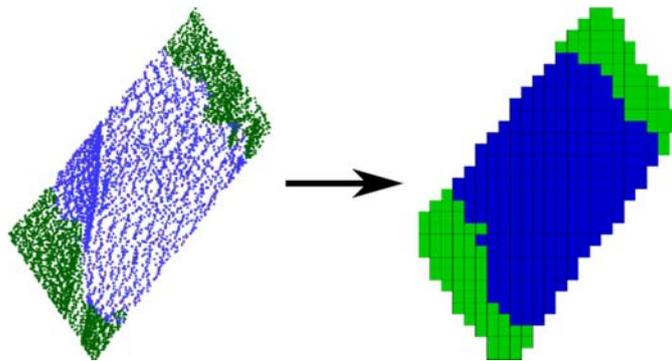


Abb. 5: Aufteilung der Messdaten in Rasterzellen.

Nach der Definition des Rasters erfolgt die auf der räumlichen Lage basierende Zuordnung der Messdaten zu den Rasterzellen. Folglich enthalten die Rasterzellen Oberflächenpunkte aus der Standardprozessierung (Abb. 3d) sowie die dazugehörigen Full-Waveforms (Abb. 3b) und Laserscannerpositionen zum Zeitpunkt der Pulsemission (Abb. 3c). Zusätzlich erfolgt auf Grundlage der Oberflächenpunkte eine Klassifizierung der Rasterzellen in Land- und Wasser-Rasterzellen. Eine grobe Näherung der Gewässertiefe basierend auf den Informationen der Nachbarrasterzellen (Kap 3.3) sowie eine stacked Full-Waveform (Kap 3.4) werden im Verlauf der Prozessierung ermittelt, der jeweiligen Rasterzelle zugeordnet und für die Detektion des Bodensignals verwendet. Die verwendete Methode zur Rasterung der Daten erwies sich als zweckmäßig für die hier vorgestellte Messkampagne. Dennoch ist die empirische Bestimmung der Rasterzellengröße nicht optimal und bei der Auswertung von Gewässersohlen unterschiedlicher Charakteristik auch nicht praktikabel. Eine automatische Definition der Rasterzellengröße basierend auf den Eigenschaften der

Messdaten ist aufgrund des großen Einflusses der unbekanntenen Gewässerbodentopographie nicht trivial, sodass weitere Möglichkeiten einer räumlichen Aufteilung der Daten untersucht werden müssen. Dabei können folgende Varianten in Betracht gezogen werden:

- eine flexible Anpassung der Rasterzellengröße während der Prozessierung, in Abhängigkeit der Gewässertiefe und gegebenenfalls des Trübungsgrades; geringe Trübung und geringe Gewässertiefen führen zu kleineren Rasterzellen und umgekehrt
- die Ermittlung einer vorgegebenen Anzahl der räumlich nächstgelegenen Messdaten für jede zu prozessierende Full-Waveform
- die Einbeziehung aller Messdaten, die eine maximale Lage-Distanz aufweisen

3.3 Nachbarschaftsinformation zwischen Rasterzellen

Die Prozessierung der Messdaten einer Rasterzelle (Kap. 3.4) kann zu mehreren möglichen Gewässertiefen als Ergebnis führen, wodurch eine fehlerhafte Bestimmung der Gewässertiefe nicht ausgeschlossen ist. Um dem entgegenzuwirken, wird vor der Prozessierung der einzelnen Rasterzellen näherungsweise die wahrscheinliche Gewässertiefe der Rasterzelle unter Einbeziehung von Informationen über die Nachbarschaft der umliegenden Rasterzellen bestimmt.

Dazu wird zuerst für jede Wasser-Rasterzelle geprüft, wie viele direkt benachbarte Rasterzellen bereits über Gewässertiefeninformationen verfügen. Weist eine Wasser-Rasterzelle zwei oder mehr Nachbarn mit bekannten bzw. prozessierten Gewässertiefeninformationen auf, erfolgt eine Eingrenzung der möglichen Gewässertiefe für diese Rasterzelle, und es wird anschließend ein Full-Waveform-Stacking mit allen inkludierten Full-Waveform-Daten durchgeführt (Kap. 3.4). Gefälle oder Anstiege der Gewässersohle werden durch einen definierbaren Toleranzbereich bzgl. der zulässigen Gewässertiefe berücksichtigt.

Anfänglich werden keine Wasser-Rasterzellen mit Informationen über Gewässertiefen vorliegen, sodass die Rasterzellen am Ufer als erstes prozessiert werden. Die Gewässertiefe der Land-Rasterzellen wird für die Berechnungen mit 0,0m festgesetzt. Aufbauend darauf erfolgt iterativ die Bearbeitung der verbleibenden Rasterzellen zur Gewässermitte hin (Abb. 6), bis alle Rasterzellen prozessiert wurden. Als Ergebnis erhält jede Rasterzelle eine genäherte Gewässertiefe, welche für die Prozessierung der Rasterzellen selber (Kap. 3.4) als Kontrolle dient.

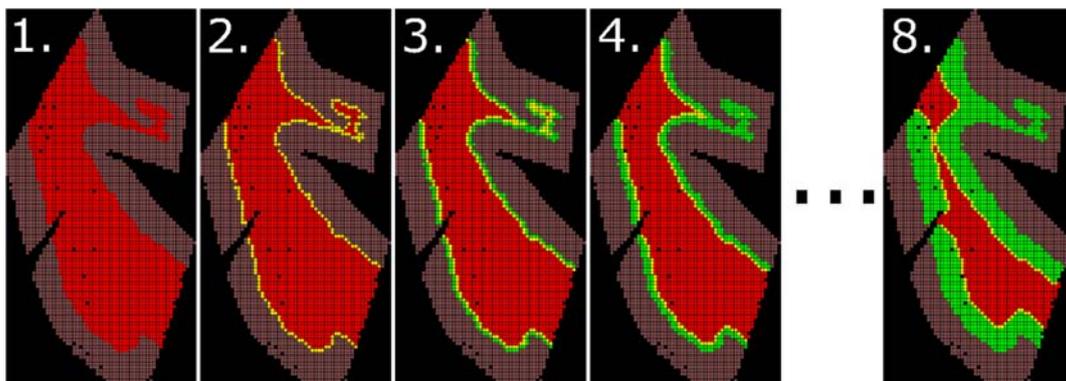


Abb. 6: Iterative Prozessierung der Rasterzellen unter Hinzunahme von Nachbarschaftsinformationen, beginnend am Uferbereich hin zur Gewässermitte. Braun=Land-Rasterzellen mit einer Gewässertiefe gleich 0,0 m. Gelb = zu prozessierende Rasterzellen. Rot = noch nicht prozessierte Rasterzellen. Grün = bereits prozessierte Rasterzellen.

3.4 Prozessierung der Rasterzellen – Full-Waveform-Stacking

Zur Bestimmung der Gewässertiefe der einzelnen Rasterzellen werden redundante Informationen aller in der Rasterzelle liegenden Full-Waveform-Daten in Form eines Full-Waveform-Stacking Ansatzes, ähnlich wie in STILLA et al. (2007), RONCAT et al. (2016) und PLENKERS et al. (2013), verarbeitet. Hierfür werden alle Full-Waveforms der jeweiligen Rasterzelle zueinander ausgerichtet (z.B. am Wasseroberflächen-Peak) und aufaddiert (Abb. 7). Durch das Zusammenfassen von Full-Waveforms wird der zufällige Rauschanteil des zurückkommenden Signals und erratische Rückstreuungseffekte innerhalb der Wassersäule stark reduziert bzw. eliminiert. Wiederkehrende Merkmale (u.a. Gewässersohlenpunkte) mit einer schwachen Signalintensität werden verstärkt und sind somit besser und zuverlässiger detektierbar.

Als Ergebnis wird eine mittlere Sampleanzahl zwischen Wasseroberfläche und Gewässersohle bestimmt, wodurch die Detektion des eigentlichen Bodensignals in den einzelnen Full-Waveforms gestützt wird. Diese Vorgehensweise ist insofern vorteilhaft, da – insbesondere bei unebenem Boden – Verschmierungseffekte durch das Full-Waveform-Stacking vermieden werden.

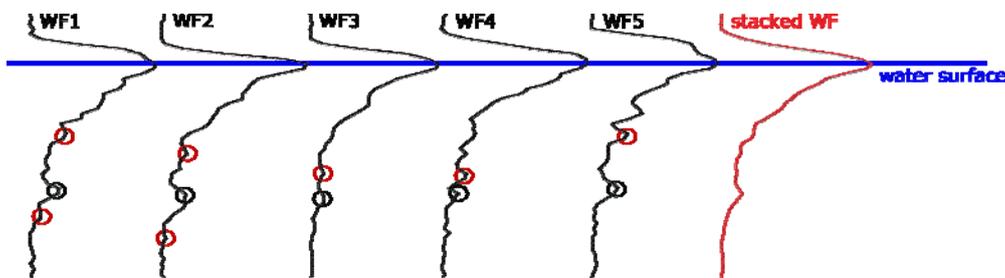


Abb. 7: Prinzipskizze zum Full-Waveform-Stacking. „WF1-WF5“ repräsentieren einzeln aufgenommene Full-Waveforms, während die „stacked WF“ die Summe der „WF1-WF5“ darstellt. Der grüne Bereich zeigt den resultierenden Suchbereich innerhalb jeder einzelnen Full-Waveform. Rote Kreise = „falsche“ Bodensignale. Schwarze Kreise = korrekte Bodensignale.

3.5 Detektion und Extraktion der Gewässersohlenpunkte

Basierend auf den Ergebnissen des Full-Waveform-Stackings kann der wahrscheinlichste Gewässersohlenpunkt extrahiert werden. Dazu wird im ermittelten Suchbereich die Full-Waveform analysiert und, sofern vorhanden, das lokale Maximum detektiert. Anhand der bekannten Strahlengometrie und der Sampleanzahl bzw. der Laufzeit des Laserstrahls zwischen Wasseroberfläche und Gewässersohle können die Punktkoordinaten berechnet werden.

$$\mathbf{P}_{GS} = \mathbf{P}_{WO} + t_2 * c_W * \mathbf{X}_2 \quad (1)$$

Abbildung 8 und Gleichung 1 beschreiben den prinzipiellen Weg vom Wasseroberflächenpunkt \mathbf{P}_{WO} zum Gewässersohlenpunkt \mathbf{P}_{GS} . Die Koordinaten des Wasseroberflächenpunktes werden aus der Standardprozessierung übernommen. Der Richtungsvektor \mathbf{X}_1 wird aus dem Ursprung der Pulsemmission \mathbf{P}_{LS} und dem Wasseroberflächenpunkt \mathbf{P}_{WO} ermittelt. Auf Grundlage des Richtungsvektors \mathbf{X}_1 sowie der aus Nachbarpunkten der Wasseroberfläche berechneten lokalen Wasseroberflächennormalen (RICHTER et al. 2018) erfolgt die Refraktionskorrektur nach dem Gesetz von Snellius. Folglich kann die neue Ausbreitungsrichtung \mathbf{X}_2 für den Laserstrahl bestimmt werden. Mit der ermittelten Laufzeit t_2 , entsprechend der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Wasser c_W angepasst, wird der Gewässersohlenpunkt berechnet.

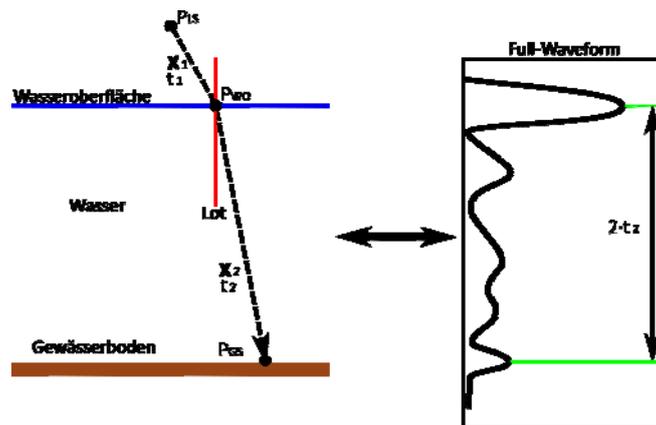


Abb. 8: Schematische Visualisierung zur Berechnung eines Gewässersohlenpunktes.

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt erfolgt die Präsentation und Auswertung der Ergebnisse der drei gezeigten Teilgebiete, um Aussagen bzgl. Genauigkeit und Zuverlässigkeit treffen zu können. Grundlage hierfür bilden Referenzdaten mit einer übergeordneten Genauigkeit, welche für die vorliegenden Echolotdaten und die Bodenpunkte aus der Standardprozessierung jedoch nicht gewährleistet werden kann. In Konsequenz werden sie somit als Vergleichsdaten gegenübergestellt.

Bei der Auswertung der Daten kam eine Rasterzellengröße von $2,5\text{ m} \times 2,5\text{ m}$ mit bis zu 218 Punkten pro Rasterzelle zur Anwendung. Eine erste visuelle Analyse der Ergebnisse anhand eines für das Untersuchungsgebiet repräsentativen Profils (Abb. 9) zeigt, dass die neudetektierten Bodenpunkte große Teile der Gewässersohle mit Eindringtiefen von bis ca. 2,0 m sehr gut und zuverlässig abbilden (im Vergleich zu ca. 1,65 m für die Standardprozessierung).

Für eine Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanalyse der Resultate dienen die Root-Mean-Square (RMS) Abweichung der Höhenkomponenten zwischen Ergebnis- und Vergleichsdaten (Tab. 1, Zeile 1). Für eine Einschätzung der Güte der neudetektierten Gewässersohlenpunkte wurde als Genauigkeitsanforderung die in VOSELMANN & MAAS (2010) angegebene mittlere Höhengenaugigkeit von $\pm 0,25\text{ m}$ bei ebener Wasseroberfläche für Airborne LiDAR Bathymetrie verwendet. Dies wird durch die International Hydrographic Organization bekräftigt, welche eine zulässige Unsicherheit von 0,25 m als Minimum Standard for Hydrographic Surveys angibt (IHO 2011). Zudem erfolgt die Prüfung der Zuverlässigkeit der neudetektierten Gewässersohlenpunkte, indem der prozentuale Anteil jener Punkte ermittelt wird, welche in der Höhekomponente 0,25 m und weniger von den Vergleichsdaten abweichen (Tab. 1, Zeile 2).

Die Ergebnisanalyse der Untersuchungsgebiete bestätigt eine gute Repräsentation der Gewässersohle durch die neudetektierten Bodenpunkte. Die RMS-Abweichungen bzgl. der Höhenkomponente zu den Vergleichsdaten liegen zwischen 0,14 m bis 0,18 m (Abb. 10 und Tab. 1). Der Punktanteil, welcher eine Höhenabweichung von 0,25 m nicht überschreitet, beträgt 83,48 % bis 91,08 %. Die gute Höhengenaugigkeit und die hohe Zuverlässigkeit sowie eine erreichte Eindringtiefe von bis zu 2,0 m führen zu einer weitläufigeren Erfassung der Gewässerbodentopographie (Abb. 11a-c). Für eine komplette Erfassung der Gewässersohle durch neuprozessierte ALB- und Echolot-Daten wären höhere Eindringtiefen nötig gewesen (Abb. 11d-f).

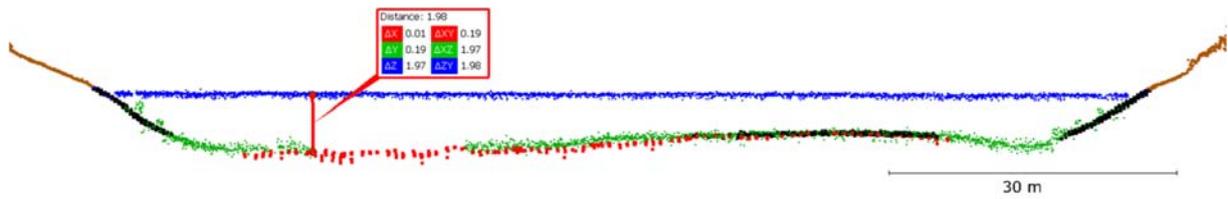


Abb. 9: In der Breite gestauchtes Profil durch die Elbe. Blau= Wasseroberfläche, Rot = Echolotdaten, Schwarz = Gewässersohle aus Standardprozessierung, Grün = Gewässersohle aus Full-Waveform-Stacking Ansatz.

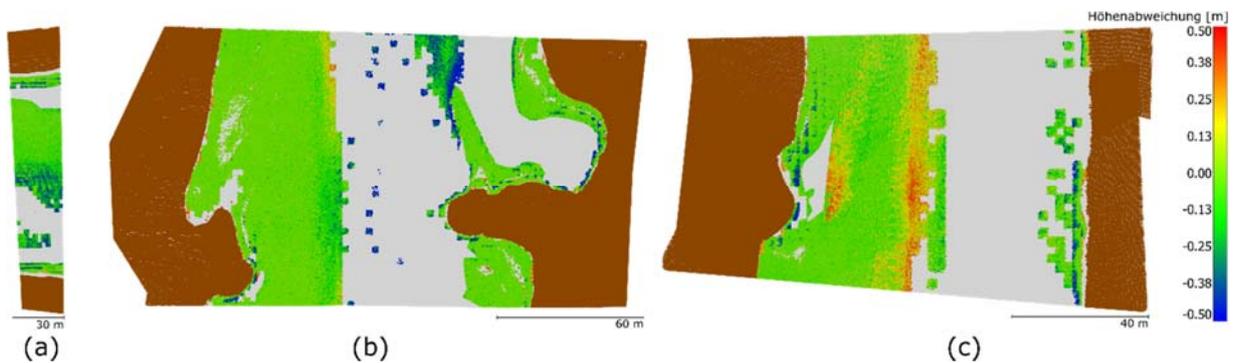


Abb. 10: Farbcodierte Darstellung der RMS-Höhenabweichungen für (a) Elbe Nord, (b) Elbe Süd und (c) Elbe Ost. Braun = Landpunkte.

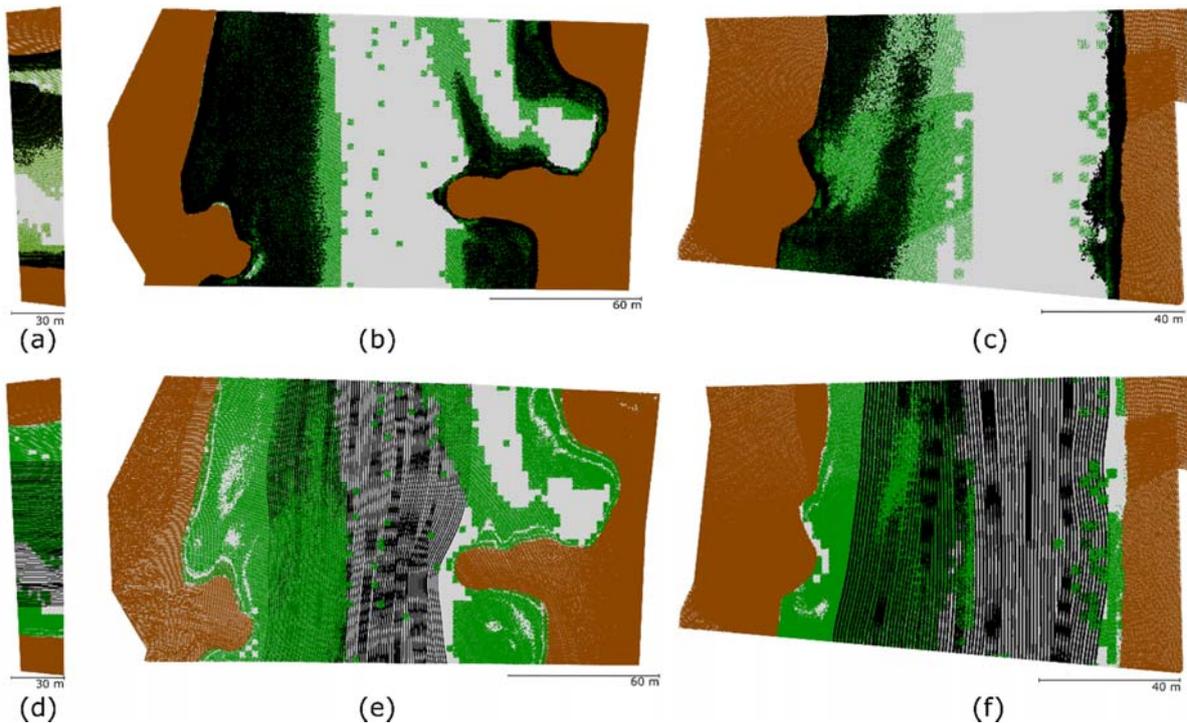


Abb. 11: Abdeckung durch die neudetektierten Punkte im Gebiet Elbe Nord (a, d), Elbe Süd (b, e) und Elbe Ost (c, f). Braun = Landpunkte, Schwarz = Punkte der Standardprozessierung (a - c); Echolot-Daten (d - f) und Grün = Punkte der Full-Waveform-Stacking Prozessierung.

Tab. 1: Zeile 1: RMS-Höhenabweichungen zwischen neudetektierter Bodenpunkten und Vergleichsdaten.
 Zeile 2: Anzahl der Punkte, die eine Höhenabweichung von max. 25 cm zu den Vergleichsdaten aufweisen, sowie prozentualer Anteil zur Gesamtpunktzahl.

	Elbe Nord	Elbe Süd	Elbe Ost
RMS	0,14 m	0,15 m	0,18 m
max. $\pm 0,25$ m	54642 / 60457 Punkte 90,38 %	77053 / 84600 Punkte 91,08 %	108870 / 130414 Punkte 83,48 %

5 Fazit & Ausblick

Die Zielstellung einer erhöhten Eindringtiefe und einer höheren Datendichte sowie damit einhergehend einer vollständigen Erfassung der Gewässersohle bei einer hohen Zuverlässigkeit wurde zu einem Großteil erreicht. Die Ergebnisse demonstrieren die sehr gute Anwendbarkeit der entwickelten Methoden auf die gegebenen Daten. Die Erhöhung der Eindringtiefe von ca. 1,65 m auf bis zu 2,0 m entspricht einem Zuwachs um 21 %. Dies bewirkt gleichzeitig eine flächenmäßig deutlich ausgedehntere Repräsentation des Gewässerbodens durch die neudetektierten Punkte. Anhand der Untersuchungen mit den Vergleichsdaten der Gewässersohle konnte eine hohe Zuverlässigkeit bei der Verwendung von Full-Waveforms als Datenbasis nachgewiesen werden. Etwa 87,33 % der detektierten Punkte haben eine Höhenabweichung von 25 cm zu den Vergleichsdaten nicht überschritten. Die RMS Abweichungen in der Höhenkomponente für alle neudetektierten Punkte lag bei 0,16 m und zeigt eine gute Höhengenaugigkeit.

Die Lücke zu den Echolot-Messungen konnte dennoch nicht immer geschlossen werden, da dafür Eindringtiefen größer 2,0 m nötig gewesen wären. Dennoch stellen die prozessierten Daten eine signifikante Verbesserung bzw. Erweiterung zu den bereits vorhandenen Daten dar.

Die entwickelten Methoden bieten Potential für weitere Anpassungen und Verbesserung, sodass in zukünftigen Arbeiten nachstehende Ziele verfolgt werden:

- Adaptive Definition von Nachbarschaften bei der Auswahl von Full-Waveforms für das Full-Waveform-Stacking
- Test des Potentials einer alternativen räumlichen Aufteilung der Prozessierungsgebiete in Verbindung mit dem Full-Waveform-Stacking (siehe Abschnitt 3.2)
- Verbesserung der Erfassung von dynamischeren Gewässerbodentopographien, um u. a. die Probleme im Uferbereich zu beheben
- Entwicklung weiterer Strategien zur Steigerung der Zuverlässigkeit
- Weiterführende Untersuchungen bzgl. der Verwendung von signaldämpfungskorrigierten Rückstreuquerschnitten für eine zusätzliche Erhöhung der Eindringtiefe

Zudem soll das Potential der hier vorgestellten erweiterten Auswertemethoden bei Anwendung auf maritime Gewässer untersucht werden. In maritimen Gewässern kann im Allgemeinen von einer geringeren Trübung und somit von einer höheren Eindringtiefe ausgegangen werden. Derzeit erfolgt eine Erfassung der Gewässerbodentopographie meist mit hydroakustischen Verfahren wie Vertikal- und Fächerecholot. Dennoch kommen in küstennahen Regionen vermehrt Methoden der Laserbathymetrie zur Anwendung (CHRISTIANSEN 2016; ELLMER et al. 2014). Es ist zu erwarten, dass die Übertragung der vorgestellten Auswertemethoden auf maritime ALB-Daten zu einer signifikanten Verbesserung der Erfassung von Meeresbodentopographien führt.

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 Dresden (WSA Dresden) für die Unterstützung unserer Forschungsarbeiten sowie der Firma Airborne Hydro Mapping GmbH (AHM) für die gute Zusammenarbeit bei der Aufbereitung der Befliegungsdaten.

7 Literaturverzeichnis

- CHRISTIANSEN, L., 2016: New techniques in capturing and modelling of morphological data. *Hydrographische Nachrichten*, HN 105, 20-23.
- ELLMER, W., ANDERSON, R. C., FLATMAN, A., MONONEN, J., OLSON, U. & ÖIÄS, H., 2014: Feasibility of laser bathymetry for hydrographic surveys on the Baltic Sea. *The International Hydrographic Review*, (12), 33-50.
- GUENTHER, G. C. & GOODMAN, L. R., 1978: Laser applications for near-shore nautical charting. *Proc. SPIE Ocean Optics V*, **160**, 174-184.
- INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION, 2011: *Manual on Hydrography*, Publication C-13. International Hydrographic Bureau Monaco, Feb. 2011.
- PLENKERS, K., RITTER, J. R. & SCHINDLER, M., 2013: Low signal-to-noise event detection based on waveform stacking and cross-correlation: application to a stimulation experiment. *Journal of Seismology*, **17**(1), 27-49.
- RICHTER, K., MADER, D., WESTFELD, P. & MAAS, H.-G., 2018: Numerical simulation and experimental validation of wave pattern induced coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, **42**(2), 961-967.
- RIEGL, 2017: *Waveform Extraction Library*. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH. Printed: 31.03.2017.
- RONCAT, A. & MANDLBURGER, G., 2016: Enhanced detection of water and ground surface in airborne laser bathymetry data using waveform stacking. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, **18**, 17016.
- STILLA, U., YAO, W. & JUTZI, B., 2007: Detection of weak laser pulses by full waveform stacking. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **36**(3-W49A).
- VOSSelman, G. & MAAS, H.-G., 2010: *Airborne and terrestrial laser scanning*. CRC, 2010.