Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 932

David Mader

Entwicklung von Full-Waveform Stackingverfahren zur Detektion schwacher Gewässerbodenechos in der Laserbathymetrie

München 2024

Bayerische Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5344-1

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:
Qucosa – Dokumenten- und Publikationsserver der Sächsischen Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek (SLUB)
https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-860998, Dresden 2023

Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C Dissertationen Heft Nr. 932

Entwicklung von Full-Waveform Stackingverfahren zur Detektion schwacher Gewässerbodenechos in der Laserbathymetrie

Von der Fakultät Umweltwissenschaften

der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. David Mader

München 2024

Bayerische Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5344-1

Diese Arbeit ist gleichzeitig veröffentlicht in:

Qucosa – Dokumenten- und Publikationsserver der Sächsischen Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek (SLUB)

https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa2-860998, Dresden 2023

Adresse der DGK:

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

Alfons-Goppel-Straße 11 ● D – 80 539 München

Telefon +49 - 331 - 6264 1685 ● E-Mail post@dgk.badw.de

http://www.dgk.badw.de

Prüfungskommission:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Martin Horwath

Referent: Prof. Dr. sc. techn. habil. Hans-Gerd Maas

Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Sörgel (Universität Stuttgart)
Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gottfried Mandlburger (TU Wien, Österreich)

Tag der mündlichen Prüfung: 21.10.2022

© 2024 Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5344-1

Erklärung der Übereinstimmung mit dem Original

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

„Entwicklung von Full-Waveform Stackingverfahren zur Detektion schwacher Gewässerbodenechos in der Laserbathymetrie“

wird hiermit bestätigt

Dresden, den 13.Juli 2022

David Mader

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel „Entwicklung von Full-Waveform Stackingverfahren zur Detektion schwacher Gewässerbodenechos in der Laserbathymetrie“ selbstständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter verfasst habe. Es wurden keine anderen als in dieser Arbeit angegebenen Hilfsmittel und Quellen verwendet. Die wörtlichen und sinngemäß übernommenen Zitate habe ich als solche gekennzeichnet. Es waren keine weiteren Personen an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit beteiligt. Mir ist bekannt, dass die Nichteinhaltung dieser Erklärung zum nachträglichen Entzug des Hochschulabschlusses führen kann.

Dresden, den 13.Juli 2022

David Mader

VIELEN DANK

an meinen Doktorvater Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas für die Ermöglichung und Betreuung meiner Doktorarbeit, die zahlreichen sowie hilfreichen fachlichen Diskussionen und Meetings und für die langjährige Unterstützung meiner Arbeit insgesamt.

an die Gutachter Ass. Prof. Dr. Gottfried Mandlburger und Prof. Dr.-Ing. Uwe Sörgel für die Übernahme des Korreferats und den damit verbundenen Aufwand sowie die fachlichen Diskussionen auf Konferenzen.

an die Koautor/-innen der Publikationen für den hohen Zeitaufwand beim kritischen Begutachten der Publikation vor der Einreichung.

an Robert Blaskow, Hannes Sardemann, Katja Richter, Patrick Westfeld, Christian Mulsow und Melanie Elias, die mich jederzeit unterstützt haben und bei Fragen oder Problemen sofort zur Stelle waren.

und nochmals vielen Dank an Katja Richter für das sehr gründliche Korrekturlesen dieser Arbeit und den vielen sehr hilfreichen fachlichen Anmerkungen und Kritiken, welche zur deutlichen Verbesserung der Qualität dieser Arbeit beigetragen haben.

an die aktuellen und ehemaligen Kollegen des IPFs, die jederzeit für Fragen und fachliche Diskussionen zur Verfügung standen.

an die Bundesanstalt für Gewässerkunde, das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe (ehem. Dresden) für die Kooperation und Bereitstellung von Messdaten.

an die Mitarbeiter/-innen der Airborne HydroMapping GmbH und Milan Geoservice GmbH für die gute Kooperation und Hilfestellung bei der Bereitstellung der Befliegungsdaten.

an die Mitarbeiter/-innen der Penta Ocean Company für die Kooperation, die Bereitstellung von Daten und das Interesse an unseren Forschungsarbeiten.

an meine Kinder, die mir meine gelegentliche (geistige oder körperliche) Abwesenheit nicht übelgenommen haben und meiner Ehefrau Jenny, die mich jederzeit unterstützt und mir in stressigen Phasen den Rücken freigehalten hat.

an meinen Vater Olaf Hannig und vor allen an meine Mutter Ines Mader für alles!

Beitrag des Autors

Dieser Abschnitt soll den Anteil der wissenschaftlichen Arbeit des Autors zu den Beiträgen dieser Dissertation darlegen. Die Nutzung von allgemein verfügbaren C++ Bibliotheken (z.B. Eigen, Ceres) oder MATLAB Toolboxen (z.B. Geodetic Toolbox) wird dabei nicht explizit angegeben, einzelne Skripte hingegen schon. Für jeden Beitrag werden folgende Kategorien angegeben:

- **Konzeption der Forschung** meint sowohl die Entwicklung von eigenen Methoden als auch die Umsetzung und Anpassung von in der Literatur veröffentlichte Methoden für diese Arbeit.
- **Umsetzung und Implementierung** gibt an, welche Skripte für die Prozessierung eingesetzt wurden.
- **Auswertung und Analyse der Ergebnisse** gibt an welche Werkzeuge für die Auswertung der Ergebnispunktwolken zum Einsatz kamen.
- **Manuskript** gibt alle Beteiligungen bei der Verfassung des Manuskriptes an.
- **Sonstiges** umfasst Anmerkungen, die in keine der oberen Kategorien passen.

Beitrag 1: Detection and Extraction of Water Bottom Topography from Laserbathymetry Data by Using Full-Waveform-Stacking Techniques, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019

- **Konzeption der Forschung:** größtenteils durch Autor; Unterstützung durch fachlichen Diskussionsrunden mit Katja Richter, Patrick Westfeld und Hans-Gerd Maas sowie Fachkonferenz
- **Umsetzung und Implementierung:** MATLAB Skripte des Autors; MATLAB Skript für die Refraktion nach Glassner (1989) von Christian Mulsow
- **Auswertung und Analyse der Ergebnisse:** MATLAB Skripte des Autors; CloudCompare Funktionen (z.B. Punktwolkenvergleiche)
- **Manuskript:** vom Autor verfasst; gegengelesen sowie mit fachlichen Anmerkungen verbessert von Katja Richter, Patrick Westfeld und Hans-Gerd Maas
- **Sonstiges:** Visualisierung von Punktwolken mittels CloudCompare

Beitrag 2: Potential of a Non-linear Full-Waveform Stacking Technique in Airborne LiDAR Bathymetry, *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 2021

- **Konzeption der Forschung:** durch den Autor; aufbauend auf Beitrag 1
- **Umsetzung und Implementierung:** C++ Skripte vom Autor; C++ Skript Delaunay-Triangulation von GEOMPACK - Delaunay Triangulation von John Burkardt basierend auf Joe (1991); C++ Skript Akima Interpolation von J.-P. Moreau basierend auf Ruckdeschel (1981); Skript zur Refraktion nach Glassner übersetzt von MATLAB (Beitrag 1) in C++; Unterstützung bei der Implementation von ressourcenschonenden Raster Basisstrukturen durch Frank Liebold

- **Auswertung und Analyse der Ergebnisse:** Nutzung von C++ und MATLAB-Skripten des Autors
- **Manuskript:** vom Autor verfasst; gegengelesen sowie mit fachlichen Anmerkungen verbessert von Katja Richter, Patrick Westfeld und Hans-Gerd Maas
- **Sonstiges:** Visualisierung von Punktwolken mittels CloudCompare

Beitrag 3: Volumetric Nonlinear Ortho Full-Waveform Stacking in Airborne LiDAR Bathymetry for Reliable Water Bottom Point Detection in Shallow Waters, *bei einem Fachjournal eingereicht (2022)*

- **Konzeption der Forschung** durch den Autor
- **Umsetzung und Implementierung:** C++ Skripte des Autors; Nutzung und Anpassung einiger C++ Skripte aus Beitrag 2; Implementation der Voxelraumstruktur baut auf der Rasterstruktur aus Beitrag 2 auf
- **Auswertung und Analyse der Ergebnisse:** Nutzung von C++ und MATLAB Skripten des Autors
- **Manuskript:** Großteil vom Autor verfasst (90 %); Unterstützung von Katja Richter (10 %); gegengelesen sowie mit fachlichen Anmerkungen verbessert von Katja Richter, Patrick Westfeld und Hans-Gerd Maas
- **Sonstiges:** Visualisierung von Punktwolken mittels CloudCompare

Beitrag 4: Laserbathymetrie in küstennahen Bereichen der Nordsee: Entwicklung erweiterter Auswerteverfahren und deren Qualitätssicherung, *DVW - Schriftenreihe: Hydrographie – Messen mit allen Sinnen*, 2022

- **Konzeption der Forschung** durch den Autor; aufbauend auf Beitrag 2 und 3
- **Umsetzung und Implementierung:** C++ Skripte des Autors (aus Beitrag 2 und 3)
- **Auswertung und Analyse der Ergebnisse:** CloudCompare Funktionen
- **Manuskript** Großteil vom Autor verfasst (90 %); Unterstützung durch Patrick Westfeld (10 %); gegengelesen sowie mit fachlichen Anmerkungen verbessert von Katja Richter, Patrick Westfeld und Hans-Gerd Maas
- **Sonstiges:** Visualisierung von Punktwolken mittels CloudCompare

Beitrag 5: 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*, 2021

- **Konzeption der Forschung** aufbauend auf Richter et al. (2017); gemeinsam durch Katja Richter und den Autor
- **Umsetzung und Implementierung:** C++ Skripte des Autors; Ceres-Tutorial „Curve Fitting “ (Agarwal et al., 2022)

- **Auswertung und Analyse der Ergebnisse:** Katja Richter und der Autor; C++ Skripte des Autors; Skript zur Berechnung der Korrelationsanalyse basiert auf MATLAB Skript von Katja Richter
- **Manuskript** von Katja Richter verfasst; Zuarbeit des Autors vor allem durch Grafiken; gegengelesen sowie mit fachlichen Anmerkungen verbessert von Patrick Westfeld, Hans-Gerd Maas und dem Autor
- **Sonstiges:** Visualisierung von Punktwolken mittels CloudCompare

Kurzfassung

Airborne Laserbathymetrie stellt eine effiziente und flächenhafte Messmethode für die Erfassung der sich ständig im Wandel befindlichen Gewässersohlen von Inlandgewässern und küstennahen Flachwasserbereichen dar. Bei diesem Verfahren wird ein kurzer grüner Laserpuls ausgesandt, welcher mit allen Objekten entlang des Laserpulspfades interagiert (z.B. Wasseroberfläche und Gewässerboden). Die zum Sensor zurückgestreuten Laserpulsanteile (Echos) werden in einem zeitlich hochaufgelösten Messsignal (Full-Waveform) digitalisiert und gespeichert. Allerdings ist das Messverfahren aufgrund von Gewässertrübung in seiner Eindringtiefe in den Wasserkörper limitiert. Die Gewässerbodenechos werden bei zunehmender Gewässertiefe schwächer, bis sie nicht mehr zuverlässig detektierbar sind.
Diese Arbeit zeigt, wie mit neuartigen Methoden schwache Gewässerbodenechos in Full-Waveforms detektiert werden können, welche durch die Standardauswerteverfahren nicht mehr berücksichtigt werden. Im Kernstück der Arbeit werden zwei Verfahren vorgestellt, die auf einer gemeinsamen Auswertung dicht benachbarter Messdaten basieren. Unter der Annahme eines stetigen Gewässerbodens mit geringer bis moderater Geländeneigung führt die Zusammenfassung mehrerer Full-Waveforms zu einer Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses und einer Verstärkung von schwachen Gewässerbodenechos, welche folglich zuverlässiger detektiert werden können.
Die Ergebnisse zeigen eine erhebliche Erhöhung der auswertbaren Gewässertiefe (bis zu +30 %), wodurch eine deutlich größere Fläche des Gewässerbodens abgedeckt werden konnte (Flächenzuwachs von bis zu +113 %). In umfassenden Analysen der Ergebnisse konnte nachgewiesen werden, dass die hinzugewonnenen Gewässerbodenpunkte eine gute Repräsentation des Gewässerbodens darstellen. Somit leisten die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren einen wertvollen Beitrag zur Steigerung der eingangs beschriebenen Effizienz der Airborne Laserbathymetrie.

Abstract

Airborne laser bathymetry is an efficient and area-wide measurement method for the detection of the permanently changing water bottoms of inland waters and shallow water areas close to the coast. In this method, a short green laser pulse is emitted, which interacts with all objects along the laser pulse path (e.g. water surface and bottom). The backscattered laser pulse components (echoes) are digitized and stored in a high temporal resolution measurement signal (full-waveform). However, the measurement method is limited in its penetration depth into the water body due to water turbidity. The water bottom echoes become weaker as the water depth increases until they are no longer reliably detectable.
This work shows how novel methods can be used to detect weak water bottom echoes in full-waveforms that are no longer accounted for by standard processing methods. In the core of the work, two methods are presented which are based on a joint evaluation of closely adjacent measurement data. Under the assumption of a steady water bottom with low to moderate slope, the combination of several full-waveforms leads to an improvement of the signal-to-noise ratio and an enhancement of weak water bottom echoes, which consequently can be detected more reliably.
The results show a significant increase in the analyzable water depth (up to +30 %), allowing a much larger area of the water bottom to be covered (increase up to +113 %). Comprehensive analyses of the results proved that the added water bottom points are a good representation of the water bottom. Thus, the methods developed in this work constitute a valuable contribution to increase the efficiency of airborne laser bathymetry described at the beginning.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung . . . 8
Abstract . . . 8

1 Einleitung **11**
1.1 Motivation . . . 11
1.2 Ziele der Dissertation . . . 13
1.3 Aufbau der Arbeit . . . 13

2 Einführung in bathymetrische Messverfahren **15**
2.1 Hydrographie und Bathymetrie . . . 15
2.2 Airborne LiDAR Bathymetrie . . . 17
2.2.1 Grundlagen Airborne Laserscanning . . . 17
2.2.2 Der Pfad des Laserpulses . . . 23
2.2.3 Fehlereinflüsse . . . 26
2.3 Die Full-Waveform . . . 27
2.3.1 Aufbau und Merkmale einer Full-Waveform . . . 27
2.3.2 Systemwaveform . . . 29
2.3.3 Full-Waveform Auswerteverfahren . . . 29
2.4 Hydroakustische Messverfahren . . . 31
2.4.1 Messprinzip . . . 31
2.4.2 Echolot Varianten . . . 32
2.4.3 Fehlereinflüsse . . . 32

3 Nichtlineare Full-Waveform Stacking-Verfahren zur Detektion und Extraktion von Gewässerbodenpunkten – Beitrag 1, Beitrag 2, Beitrag 3 **33**
3.1 Signalbasiertes nichtlineares Full-Waveform Stacking . . . 34
3.2 Volumetrisches nichtlineares Ortho-Full-Waveform Stacking . . . 63

4 Anwendung von nichtlinearen Full-Waveform Stacking-Methoden auf maritime Gewässer – Beitrag 4 **89**
4.1 Studiengebiet in der Nordsee . . . 89
4.2 Datengrundlage . . . 89
4.3 Erste Ergebnisse einer Pilotstudie in küstennahen Bereichen der Nordsee . . . 91
4.4 Untersuchungsgebiet . . . 102
4.5 Klassifikation der Wasseroberflächenpunkte . . . 102
4.6 Visualisierung der Ergebnisse . . . 103
4.7 Genauigkeit und Zuverlässigkeit . . . 104
4.8 Mehrwert der Verfahren . . . 106

5 Potential der Full-Waveform Stacking-Methoden zur Ableitung der Gewässertrübung – Beitrag 5 **111**

6 Diskussion und weiterführende Arbeiten **121**
6.1 Geometrische Modellierung der Laserpulsausbreitung 121
6.2 Einfluss der Gewässereigenschaften auf die Gewässerbodenbestimmung 122
6.3 Unterschätzung der Wasseroberfläche 124
6.4 Nutzung von Gewässertrübungsinformation für die Beurteilung der Zuverlässigkeit der Gewässertiefenbestimmung 125
6.5 Auswirkung der Nachbarschaftsdefinition beim signalbasiertem Full-Waveform Stacking 125
6.6 Gegenüberstellung signalbasiertes und volumetrisches Full-Waveform Stacking . . 128
6.7 Erweiterung des Full-Waveform Stackings mit dem Multi-Layer-Ansatz 128

7 Fazit der Dissertation **133**
7.1 Zusammenfassung 133
7.2 Einordnung der Dissertation 134
7.3 Mehrwert der Dissertation 135

Literaturverzeichnis **137**

Abbildungsverzeichnis **145**

Tabellenverzeichnis **153**

Symbolverzeichnis **156**

Abkürzungsverzeichnis **161**

1 Einleitung

Dieses Kapitel beginnt mit der Motivation, welche die Notwendigkeit sowie die Probleme und Herausforderung der Gewässerbodenvermessung zeigt. Danach werden die Ziele dieser Dissertation genannt, welche zu einer Steigerung der Gewässerbodenabdeckung führen sollen. Zum Schluss wird der Aufbau der Arbeit gezeigt.

1.1 Motivation

Gewässerbodentopographien unterliegen einem ständigen Wandel, welcher sowohl auf natürliche Prozesse als auch auf menschliches Handeln zurückzuführen ist. Bei Flüssen findet aufgrund des ständigen Wasserdurchflusses und dem damit verbundenen Sedimenttransport eine kontinuierliche Veränderungen der Gestalt des Gewässerbettes statt (Charlton, 2007). Weiterhin tragen menschliche Aktivitäten, wie z.B. Flussbegradigungen und -regulierungen, zu veränderten Gewässerbodentopographien bei. Eine besondere Rolle spielen auch Hochwasserereignisse (Benito und Hudson, 2010), die zum Teil enorme Auswirkungen auf die Gewässerbodentopographie haben. Um die Sicherheit der Binnenschifffahrt gewährleisten zu können und den ökologischen Zu-

Abb. 1.1 Messdaten des Gewässerbodens im Bereich der Fahrrinne, aufgenommen mittels schiffsgestützter hydroakustischer Messverfahren (bereitgestellt von der Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG).

stand zu erhalten oder auch zu verbessern, wird ein aktives Wasserstraßenmanagement notwendig (Kühne, 2021). Die dafür nötigen geometrischen Informationen werden unter anderem durch wiederholte Messungen des Gewässerbodens bereitgestellt. Die Messung der Gewässersohle innerhalb der Fahrrinne erfolgt dabei routinemäßig mittels schiffsgestützten hydroakustischen Messverfahren (Echolotung) mit einer hohen Genauigkeit. Abbildung 1.1 zeigt Echolot-Messungen eines

Vertical Sweep Echolotungssystems entlang der Fahrrinne des Flusses Elbe. Laut de Jong et al. (2002) erfüllt diese Art eines Echolotsystems in der Regel die Special Order Vorgabe der International Hydrographic Organization bzgl. Genauigkeit und Abdeckung, was für diesen Fall eine Tiefenungenauigkeit (TVU) von maximal 0,25 m (bei einem Konfidenzniveau von 95 %) und eine 100 %ige Erfassung des Gewässerboden innerhalb des Messbereichs des Systems bedeutet (International Hydrographic Organization, 2020). Dies wird in Weiß und Wirth (2015) mit der Angabe einer Gesamtunsicherheit der Einzelmessungen mit etwa 0,064 m im Bereich der ebenen Gewässersohle bestätigt. Die Vermessung der Gewässerbodentopographie in ufernahen Bereichen ist herausfordernd, da die zum Teil komplexen Formen (z.B. Buhnenfelder) nicht mit Schiffen befahren werden können. Eine Möglichkeit wäre die Messung mit einem Uncrewed Water Vehicle (UWV), ausgestattet mit Positionierungs- und Echolotsensoren (Sardemann et al., 2018). Dies erlaubt die Messung des Gewässerbodens mit einer Gewässertiefe beginnend im unteren einstelligen Dezimeterbereich, was jedoch bei der Erfassung größerer Flächen sehr zeitaufwändig ist. Eine deutlich effizientere Messmethode für die Akquisition großer Flächen stellt die Airborne Laserbathymetrie dar. Abbildung 1.2 zeigt die erfassten Bereiche zwischen Fahrrinne und Ufer mittels Laserbathymetrie-Messverfahren. Bei Betrachtung der beiden Abbildungen 1.1 und 1.2, sind jedoch noch Datenlücken insbesondere in den Bereichen der Buhnenfelder zu erkennen.

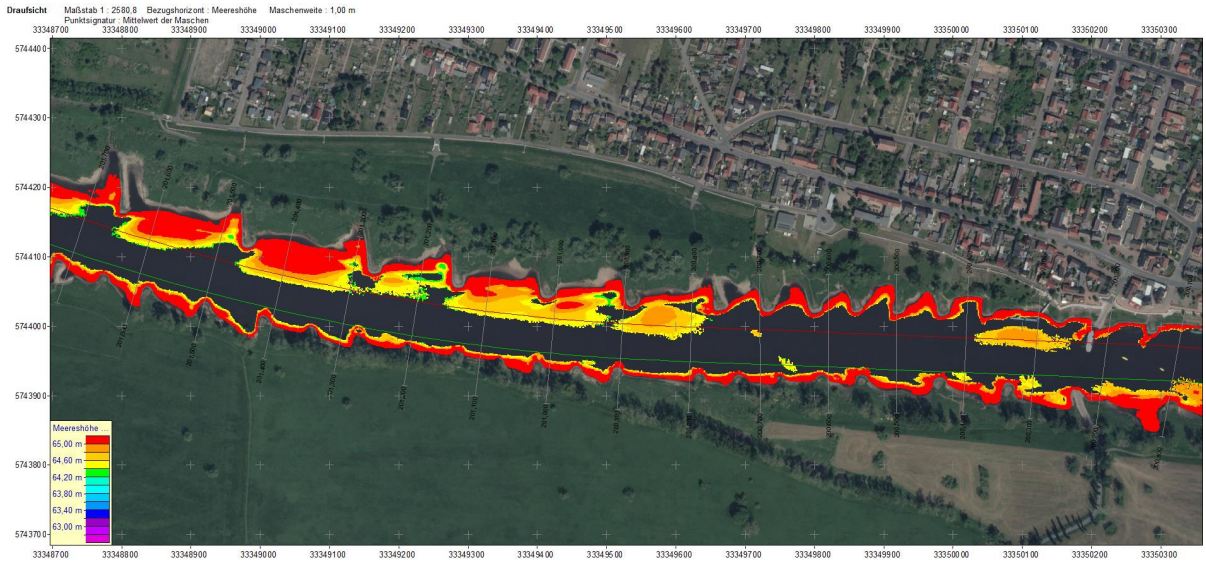


Abb. 1.2 Messdaten des Gewässerbodens im Bereich zwischen Fahrrinne und Ufer, aufgenommen mittels Laserbathymetrie Messverfahren (bereitgestellt von der BfG).

Küstennahe Flachwasserbereiche in der Nord- und Ostsee verändern sich ebenfalls stetig aufgrund von Seegang, Gezeiten, Strömungen und Stürmen. Die Vermessungen komplexer Flachwasserbereiche mit kleineren Messbooten ist aufgrund von Gezeiten sehr eingeschränkt möglich und erfordert logistisch einen hohen Zeit- und Ressourcenaufwand. Hier wird der Mehrwert und die Bedeutung der Airborne Laserbathymetrie deutlich, die allerdings auch als ergänzende bzw. komplementäre Messmethode zu hydroakustischen Messverfahren zu verstehen ist.
Die Limitierung der Airborne Laserbathymetrie liegt in der begrenzten Eindringtiefe des Laserpulses in Folge starker Abschwächungen innerhalb der Wassersäule. Dies äußert sich zunächst in einer deutlichen Abnahme der Punktdichte bis hin zu Lücken in der Erfassung des Gewässerbodens. Die Überwindung dieser Limitierungen erfordert die Entwicklung neuer Auswertemethoden, mit denen die im Datensatz enthaltenen Informationen besser zugänglich gemacht werden können.

1.2 Ziele der Dissertation

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Entwicklung von Verfahren zur zuverlässigen Detektion und Extraktion von schwachen Gewässerbodenechos, welche von Standardauswertemethoden (kommerzielle Auswertesoftware von Geräteherstellern, professionelle Softwarefirmen, u.a.) nicht mehr erfasst werden. Dabei sollen diese Verfahren als Erweiterung zu den Standardauswertemethoden verstanden werden. Gewässerbodenteile, welche durch Standardauswerteverfahren bereits gut repräsentiert sind, werden durch die hier vorgestellte Prozessierung weder in Genauigkeit noch in Zuverlässigkeit verbessert. Die entwickelten Methoden zur Prozessierung von Laserbathymetriedaten werden erst für Gewässerbodenteile interessant, bei denen die Standardauswertemethoden an ihre Grenzen stoßen. Für diese Dissertation ergeben sich folgende Ziele:

1. Erhöhung der Eindringtiefe und damit einhergehend eine Optimierung der Erfassung der Gewässerbodentopographie; infolgedessen Erhöhung der geometrischen Auflösung bzw. Punktdichte in tieferen Gewässertiefen und Erfassung weiterer Teile des Gewässerbodens;

2. Entwicklung und Adaption von Analysemethoden zur Gewinnung von möglichst vielen Informationen aus Full-Waveform-Daten für eine verbesserte Prozessierung;

3. Entwicklung von Filteralgorithmen zur Elimination unzuverlässiger oder falscher Gewässerbodeninformationen;

4. Ableitung geeigneter Parameter der Prozessierung direkt aus den Messdaten oder Sensoreigenschaften (Punktabstand, Scanmuster, Überlappungsbereich von Scanstreifen, Abtastzeitintervall der Full-Waveform, ...) für eine weitestgehende Automatisierung der Prozessierungsabläufe zur Erzielung optimaler Ergebnisse bei minimaler Interaktion und Vorwissen des Nutzers;

5. Entwicklung einer geeigneten Strategie zur Validierung der erzielten Ergebnisse für eine realistische Einschätzung des Potentials und des Mehrwerts der Full-Waveform Stacking-Methoden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine kumulative Dissertation, welche fünf Publikationen bzw. Beiträge umfasst. Die Beiträge 1-3 bilden den Kern der Arbeit (Kap. 3), in welchem die erweiterten Prozessierungsverfahren basierend auf dem signalbasierten (**Beitrag 1** und **Beitrag 2**) und dem volumetrischen Full-Waveform Stacking (**Beitrag 3**) und deren Validierung vorgestellt werden. **Beitrag 4** ist Teil des anschließenden Kapitels 4, welches die Ergebnisse der Anwendung der Full-Waveform Stacking Verfahren auf maritime Messdaten und deren Mehrwert zeigt. Das Kapitel 5 befasst sich in Form des **Beitrags 5** mit der Eignung der stacked Full-Waveform (signalbasiertes Full-Waveform Stacking) und der Ortho-Full-Waveform (volumetrisches Full-Waveform Stacking) für die Ableitung von Gewässertrübungsparameter.
Die Beiträge sind in einen Rahmentext eingebettet beginnend mit einem Einleitungskapitel (Kap. 1), welches sich aus einer Motivation (Kap. 1.1), den Zielen (Kap. 1.2) und den Aufbau dieser Dissertation (Kap. 1.3) zusammensetzt. Danach folgt ein Grundlagenkapitel (Kap. 2) zu bathymetrischen Messverfahren, in dem vor allem Aspekte beleuchtet werden sollen, die in den wissenschaftlichen Veröffentlichungen nur kurz behandelt werden konnten. Dieses Kapitel beginnt mit einer kurzen Einordnung der Begriffe Hydrographie und Bathymetrie (Kap. 2.1) und konzentriert sich anschließend auf die Grundlagen der Airborne Laserbathymetrie (Kap. 2.2),

Aufbau, Charakteristik und Auswertung von Full-Waveforms (Kap. 2.3) und hydroakustischen Messverfahren (Kap. 2.4).
Die Darstellung der Methoden und deren Validierung erfolgt, wie am Anfang dieses Abschnitts dargestellt, in den Kapiteln 3 - 5 anhand von fünf wissenschaftlichen Beiträgen. Kapitel 6 diskutiert allgemeine Aspekte zur geometrischen Modellierung der Laserpulsausbreitung (Kap. 6.1), den Einfluss der Gewässereigenschaften auf die Koordinaten der Gewässerbodenpunkte (Kap. 6.2) und die Unterschätzung der Wasseroberfläche durch die Messungen des grünen Lasers (Kap. 6.3). Kapitel 6.4 behandelt die Rolle der Gewässertrübung für die Zuverlässigkeitsbeurteilung der Full-Waveform Stacking Punktwolken. Kapitel 6.5 zeigt die Problematik der Nachbarschaftsdefinition des signalbasiertem Full-Waveform Stackings bei größeren Gewässertiefen. Eine Gegenüberstellung des signalbasierten und des volumetrischen Full-Waveform Stackings erfolgt in Kapitel 6.6. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels (Kap. 6.7) behandelt eine mögliche Verfahrenserweiterung bei Trübungsschichten.
Das letzte Kapitel diese Arbeit gibt ein Fazit zu dieser Dissertation (Kap. 7). Nach einer Zusammenfassung der Arbeit (Kap. 7.1) erfolgt eine Einordnung der Arbeit (Kap. 7.1). Abschließend wird der Mehrwert dieser Dissertation für die Airborne LiDAR Bathymetrie gezeigt (Kap. 7.3).

2 Einführung in bathymetrische Messverfahren

Das folgende Kapitel behandelt einige für diese Arbeit notwendige Grundlagen, beginnend mit der Einordnung der Begriffe *Hydrographie* und *Bathymetrie* (Kap. 2.1). Anschließend erfolgt ein Grundlagenteil zur Airborne Laserbathymetrie (Kap. 2.2). In Kapitel 2.3 wird etwas detaillierter auf Form, Eigenschaften und Charakteristiken von Full-Waveforms eingegangen, da diese den Kernpunkt der erweiterten Prozessierungsmethoden bilden. Abschließend erfolgt ein kleiner Exkurs zu hydroakustischen Messverfahren aufgrund ihrer Bedeutung für die Validierung der Airborne Laserbathymetrie Prozessierungsergebnisse (Kap. 2.4).

2.1 Hydrographie und Bathymetrie

Die Hydrographie (griech. „hydor“= *Wasser*; „graphos“= *Beschreibung*) ist eine Disziplin, die sich mit der Beschreibung des Wassers/Wasserkörpers befasst, womit ein sehr weitreichendes Themenfeld abgedeckt wird. Anhand der folgenden Auszüge aus den Definitionen der International Hydrographic Organization (IHO) und der Deutschen Hydrographischen Gesellschaft (DHyG) soll der Zusammenhang zwischen Hydrographie und Bathymetrie (griech. „bathys“= *tief*; „metron“= *Maß*) kurz erläutert sowie die Relevanz dieser Arbeit für die Hydrographie und Bathymetrie hergestellt werden. Zunächst folgende Definitionen:

Definition des Begriffs Hydrographie aus Sicht der IHO:
„Hydrography is the branch of applied sciences which deals with the measurement and description of the physical features of oceans, seas, coastal areas, lakes and rivers, as well as with the prediction of their change over time, for the primary purpose of safety of navigation and in support of all other marine activities, including economic development, security and defence, scientific research, and environmental protection. “(IHO, 2019)

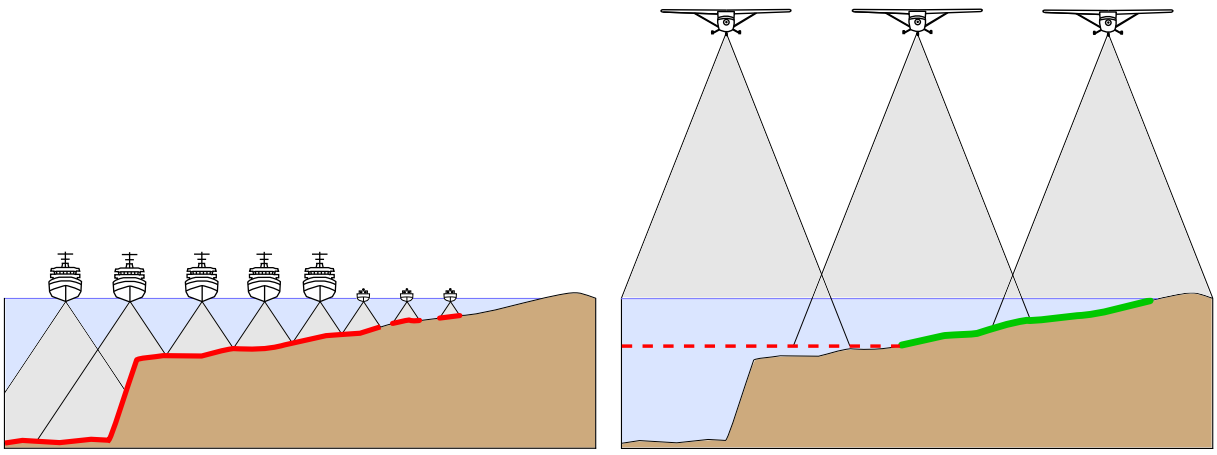
Definition des Begriffs Hydrographie aus Sicht der DHyG:
„Hydrographie ist eine Teildisziplin des Vermessungs- und Geoinformationswesens. Sie untersucht die Oberflächengewässer der Erde und trägt die zugehörigen Daten und Informationen zusammen. Ihr Ziel ist es, das Wissen über die Gewässer zu erweitern, um sie verantwortungsvoll und sicher nutzen zu können und als Lebensraum zu schützen. “(DHyG, 2022)

Darüber hinaus wird als einer von drei wesentlichen Tätigkeitsbereichen „Das Vermessen der Gewässer und das Erfassen der gewässerbezogenen Daten“ aufgeführt. „Nach der Untersuchung eines Oberflächengewässers stellt die Hydrographie Informationen über den aktuellen Zustand des Gewässers bereit und über die zurückliegenden und zukünftigen Veränderungen. “

Zu diesen Gewässerinformationen zählt die DHyG unter anderem:

- die Gewässertiefen in Relation zu einem Bezugshorizont,
- die Form und Struktur des Gewässerbodens,
- den Höhenverlauf der Gewässeroberfläche (orthometrische Höhe),
- den Aufbau des Wasserkörpers.

Für diese Arbeit ist vor allem die Messung von Gewässertiefen bzw. die Bestimmung der Gewässerbodentopographie relevant, welche in beiden Definitionen einen der Schwerpunkte bildet. Während in der Definition der IHO die Gewässertiefenbestimmung im Term „measurement and description of the physical features“ inkludiert ist, bezeichnet die DHyG die Gewässertiefe und die Gewässerbodentopographie direkt als Gewässerinformation, welche über die Bathymetrie, also die Messung der Tiefe, erhoben werden kann. Damit kann die Bathymetrie als Teildisziplin der Hydrographie verstanden werden. Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit ist die Ableitung von Trübungsparameter, welche Rückschlüsse auf den Zustand des Gewässers zulassen und ebenfalls in das Gebiet der Hydrographie fallen. Als relevante Gewässertypen werden in der IHO-Definition Ozeane, Meere, Küstengebiete, Seen und Flüsse genannt.
Für die Messung von Gewässertiefeninformationen bzw. Gewässerbodentopographie kommen unter anderem hydroakustische Messverfahren und Airborne Laserbathymetrie zum Einsatz (Abb. 2.1). Neben dem Begriff *Laser* wird auch häufig die Bezeichnung Light Detection and Ranging (LiDAR) verwendet (wie auch im Folgendem dieser Arbeit).



(a) Hydroakustische Messverfahren **(b)** Airborne LiDAR Bathymetrie

Abb. 2.1 Messverfahren für bathymetrische Messungen (Abbildung in Anlehnung an Guenther et al. (2000)). Hydroakustische Messverfahren können jede Gewässertiefe erreichen, sind aber in der Effizienz der Flächenabdeckung von der Gewässertiefe abhängig. Mit der Airborne LiDAR Bathymetrie kann innerhalb kurzer Zeit sehr viel Fläche gescannt werden, dieses Verfahren ist jedoch limitiert bzgl. der Eindringtiefe in den Wasserkörper (rote gestrichelte Linie in **b**. Die rote Linie in **a** und die grüne Linie in **b** symbolisieren die erfassten Teile des Gewässerbodens.

2.2 Airborne LiDAR Bathymetrie

Die flugzeuggestützte Laserbathymetrie (Airborne LiDAR Bathymetrie, ALB) ist ein sehr effizientes Werkzeug zur Erfassung von großen Flächen. ALB-Systeme senden dazu kurze Laserpulse aus, welche mit der Wasseroberfläche, der Wassersäule und dem Gewässerboden interagieren. Dabei werden Teile der Laserpulsenergie zum Sensor zurückgestreut. Die zurückkommenden Signalanteile werden ausgewertet und daraus Wasseroberflächen- und Gewässerbodenpunkte abgeleitet.

Dieses Kapitel gibt einen allgemeinen Überblick zur ALB, beginnend mit den Grundlagen des Airborne Laserscannings (ALS), welche zum Großteil auch für die ALB gelten (Kap. 2.2.1). Die Unterschiede zwischen ALS und ALB und die daraus nötigen Anpassungen werden in Kapitel 2.2.2 vorgestellt. In Kapitel 2.2.3 werden die wichtigsten Fehlereinflüsse der ALB kurz zusammengefasst.

2.2.1 Grundlagen Airborne Laserscanning

Dieser Abschnitt gibt einen kurzen Überblick über die wichtigsten Eigenschaften von Laserscannern (Messverfahren, Scanmechanismus, Wellenlänge, Echodigitalisierung) und Anmerkung bzgl. Eignung und Nutzung für bathymetrische Laserscannermessungen. Abschließend wird eine kurze Übersicht zu typischen Sensoreigenschaften aktueller bathymetrischer Laserscanner gegeben.

Messprinzip

Laserscanning ist ein Messverfahren, welches auf Distanz- und Winkelmessung basiert. Dabei sendet ein Laserscanner einen kurzen Laserpuls mit einem Auslenkwinkel Φ_{da} aus, welcher mit der Oberfläche von Objekten (Gelände, Boden, ...) interagiert (Abb. 2.2). Ein Teil der Laserpulsenergie wird so zum Laserscannersystem zurückgestreut und dort registriert. Die Distanzmessung zum Objekt erfolgt auf Basis des Time-of-Flight-Verfahrens (ToF), bei der die exakte Laufzeit t_{rt} eines gerichteten Laserpulses zum Zielobjekt und zurück gemessen wird (Beraldin et al., 2010). Anhand der Lichtgeschwindigkeit c im entsprechendem Medium (Luft, Wasser) kann die Distanz D zwischen Sensor und Zielobjekt mit Gleichung 2.1 berechnet werden (Reintjes und Coate, 1952).

$$D = c \cdot \frac{t_{rt}}{2} \tag{2.1}$$

Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist aufgrund der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Licht (in Luft $c_L \approx 300\,000\,\mathrm{km\,s^{-1}}$; in Wasser $c_W \approx 225\,000\,\mathrm{km\,s^{-1}}$) maßgeblich von der Genauigkeit der Zeitmessung abhängig (Petrie und Toth, 2018a).

Für das ALS und die ALB kommen üblicherweise Flugzeuge, Hubschrauber oder auch Uncrewed Aerial Vehicles (UAV) zum Einsatz, wobei bei letzterem auch die Begriffe UAV-borne Laserscanning oder UAV-borne LiDAR Bathymetrie genutzt werden können. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Nutzung von Messdaten, die von flugzeuggestützten bathymetrischen Laserscannersystemen akquiriert wurden. Für ALS und ALB kommen unter anderem kleinere bemannte Flugzeuge zum Einsatz, welche in Flughöhen von 350 m bis 1000 m operieren. Für die Georeferenzierung der Flugplattformen kommen inertiale Messeinheiten (IMU) und Positionierungssensoren zum Einsatz, welche mit dem Globalen Navigationssatellitensystem (GNSS) die Flugzeugtrajektorie im Weltkoordinatensystem messen (Wehr und Lohr, 1999).

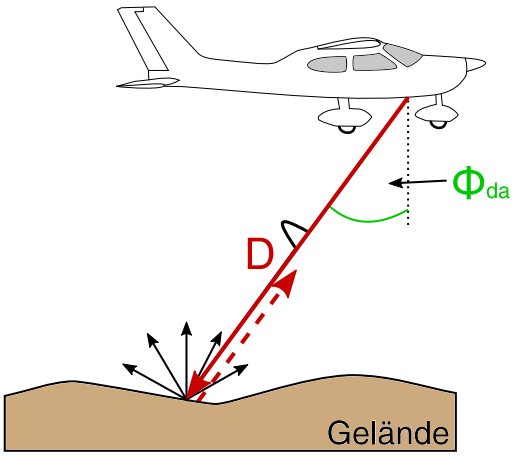


Abb. 2.2 ALS-Messprinzip.

Koordinatensysteme

Von den ALB-Messwerten (Distanz D und Winkel Φ_{da}) hin zu einer georeferenzierten 3D-Punktwolke sind entsprechende Koordinatenumformungen und Koordinatentransformationen notwendig (Abb. 2.3). Im Folgendem werden die dafür relevanten Koordinatensysteme gezeigt und die nötigen Kenngrößen beschrieben.
Das Laserscannersystem als solches erfasst die Distanz und den räumlichen Auslenkwinkel (sphärische Koordinaten) des Laserpulses. Diese Messgrößen können nach dem Prinzip *polares Anhängen* zu 3D-Punkten $\mathbf{X}^{SCS}$ mit kartesischen Koordinaten im Sensorkoordinatensystem (SCS) umgerechnet werden (Lichti und Skaloud, 2010). Dabei hängt die Form der Umrechnung stark von der Definition des SCS ab, sodass an dieser Stelle keine Umrechnungsvorschrift angegeben wird. Der Lever-Arm ($\mathbf{X}^{PCS}_{0,SCS}$) und die Boresight-Winkel (Rotationsmatrix $\mathbf{R}^{PCS}_{SCS}$) stellen den geometrische Zusammenhang zwischen den Punktkoordinaten $\mathbf{X}^{SCS}$ im SCS und den Punktkoordinaten im Plattformkoordinatensystem (PCS, $\mathbf{X}^{PCS}$) mittels einer Helmerttransformation her (Gl. 2.2); (Lichti und Skaloud, 2010).

$$\mathbf{X}^{PCS} = \mathbf{X}^{PCS}_{0,SCS} + \mathbf{R}^{PCS}_{SCS} \cdot \mathbf{X}^{SCS} \tag{2.2}$$

Der Lever-Arm setzt sich aus den Distanzen in X, Y und Z zwischen Ursprung des SCS und GNSS Antennenphasenzentrum zusammen. Die Borsight-Winkel beschreiben die Rotation bzw. Verdrehung zwischen PCS und SCS. Lever-Arm und Boresight-Winkel werden über eine Kalibrierung bestimmt und müssen während einer Messung unverändert bleiben. Anschließend erfolgt die Transformation der Koordinaten vom PCS in das Navigationskoordinatensystem (NCS) anhand der gemessenen Winkel ω, ϕ, κ der IMU. Das NCS ist ein sich mitbewegendes Koordinatensystem mit Ursprung in der aktuellen Position der Sensorplattform mit einer festen Ausrichtung (z.B. North-East-Down) (Bäumker und Heimes, 2001; Lichti und Skaloud, 2010). Bei der Transformation erfolgt eine Rotation um die gemessenen IMU-Winkel ($\mathbf{R}^{NCS}_{PCS}(\omega, \phi, \kappa)$). Die Berechnung der Punktkoordinaten von $\mathbf{X}^{NCS}$ ist in Gleichung 2.3 dargestellt.

$$\mathbf{X}^{NCS} = \mathbf{R}^{NCS}_{PCS}(\omega, \phi, \kappa) \cdot \mathbf{X}^{PCS} \tag{2.3}$$

Abschließend erfolgt anhand der GNSS-Position $\mathbf{X}^{WCS}_{0,PCS}$ und der geographischen Breite (lat) und Länge (lon) des Nullpunktes des PCS die Transformation in das globale Koordinatensystem (WCS) mit Gleichung 2.4.

$$\mathbf{X}^{WCS} = \mathbf{X}^{WCS}_{0,PCS} + \mathbf{R}(lat + \frac{\pi}{2}) \cdot \mathbf{R}(lon)^T \cdot \mathbf{X}^{NCS} \tag{2.4}$$

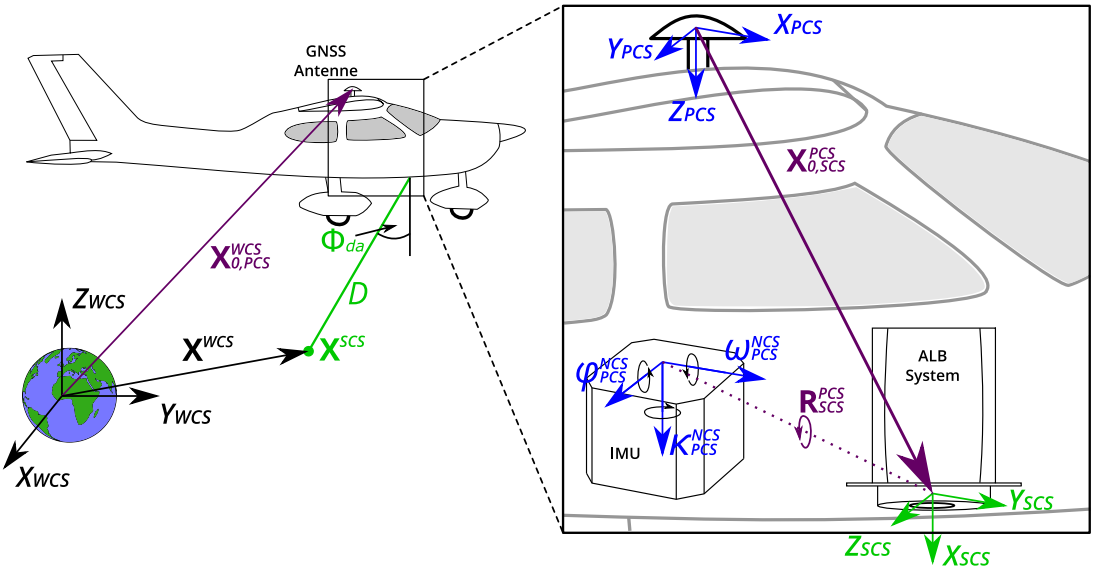


Abb. 2.3 Relevanten Koordinatensysteme vom ALB-Sensor bis zum globalem Koordinatensystem.

Als WCS kommen geodätische Koordinatenreferenzsysteme wie z.B. das International Terrestrial Reference System (ITRS), das European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS 89) oder das World Geodetic System 1984 (WGS84) zur Anwendung. Typische Bezugsrahmen für die Ausgabe der Punktwolken im WCS ($\mathbf{X}^{WCS}$) sind Earth Centered Earth Fixed Koordinaten (ECEF), geographische Länge und Breite oder Universal Transverse Mercator (UTM) Koordinaten. Bei den beiden letzteren werden die Höhen meist als ellipsoidische Höhen oder als amtliche Höhen (in Deutschland: Höhen über Normalhöhen-Null im Deutschen Haupthöhennetzes 2016; DHHN2016) angegeben. Eine detaillierte Beschreibung der Transformation zwischen dem SCS und WCS ist enthalten in Bäumker und Heimes (2001), Lichti und Skaloud (2010) und Pfeifer et al. (2017).

Strahldivergenz

Der Laserpuls von LiDAR-Systemen wird schon beim Verlassen der Sendeoptik mit einem konstanten Winkel optisch aufgeweitet (engl. beam divergence). Trifft der Laserpuls orthogonal auf ein homogen ausgedehntes Ziel ist der Durchmesser der beleuchteten Fläche am Ziel (D_{fp}; engl. footprint) abhängig von der Flughöhe H, der Strahldivergenz γ_s und dem Auslenkwinkel Φ_{da} (Abb. 2.4a)(Beraldin et al., 2010). Bei einem Schrägeinfall des Laser auf ein Ziel weist die beleuchtete Fläche zudem einen elliptischen Charakter auf. Je nach Topographie hat die Strahldivergenz Auswirkungen auf die Genauigkeit der Messungen. Bei Diskontinuitäten (Hänge, Kanten, Klippen, einzelne Objekte, Abb. 2.4b und 2.4c) oder stark bewegtem Gelände (Abb. 2.4d) führt die Strahldivergenz dazu, dass der gemessenen Bodenpunkt die tatsächliche Bodentopographie schlecht repräsentiert (Lichti und Skaloud, 2010). Die Beispiele in den Abbildungen 2.4b - 2.4d sind auch bei Gewässerböden zu finden. Auch dort kann es zur Glättung von topographischen Abbruchkanten, falschen Höhenbestimmungen bis hin zur Eliminierung von kleineren Objekten am Gewässerboden kommen.

Wellenlänge

Im luftgestützten Laserscanning kommen je nach Anwendung verschiedene Wellenlängen für das Laserlicht zum Einsatz. So eignet sich für topographische Zwecke typischerweise Licht mit einer

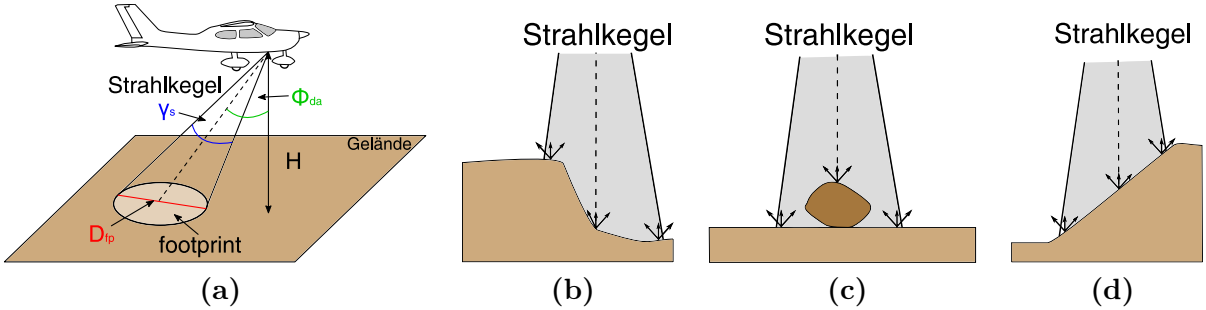


Abb. 2.4 Strahldivergenz: **a** Parameter der Strahldivergenz. Problematische Topographien, die im Zusammenhang mit der Strahldivergenz zu fehlerhaften Punktkoordinaten führen können: **b** Geländediskontinuitäten (Klippen, Abbrüche), **c** größere Objekte und **d** Geländeneigungen.

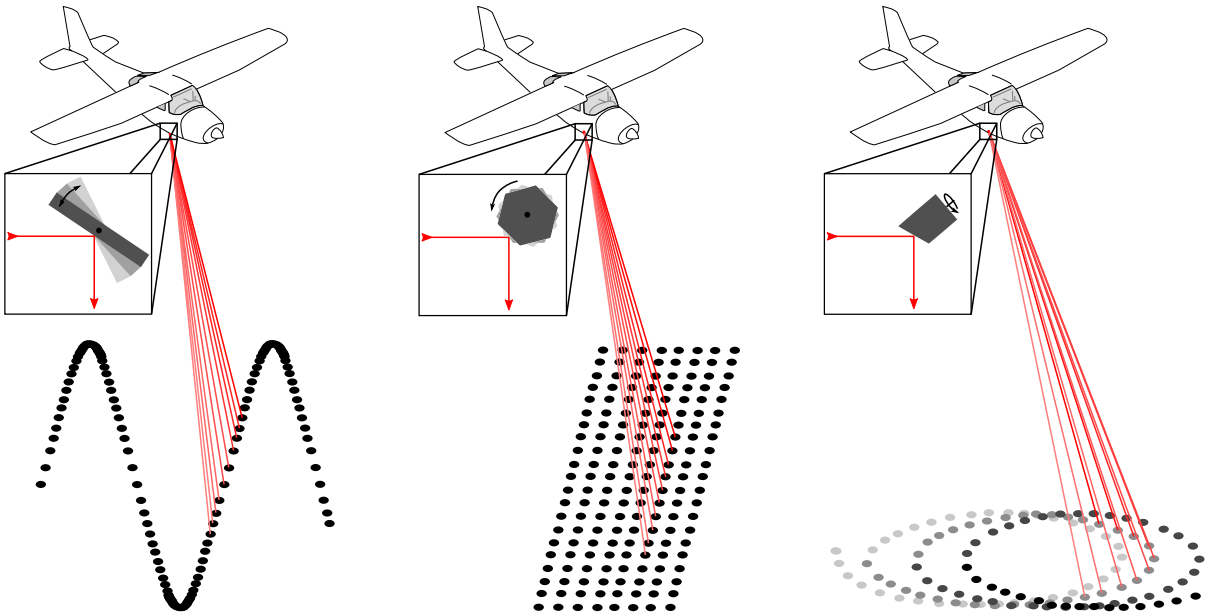
Wellenlänge von 800 nm bis 1550 nm (Wehr und Lohr, 1999; Beraldin et al., 2010), wobei die Wellenlängen 905 nm, 1064 nm oder 1550 nm bei sehr vielen Laserscannern zu finden sind. Die reflektiven Charakteristika von topographischen Objekten sind vorteilhaft in diesem nahinfraroten Wellenlängenspektrum (Wehr und Lohr, 1999). Diese Wellenlängen sind jedoch nicht für die Erfassung von Gewässerböden geeignet, da sie Wasser nicht gut bis gar nicht durchdringen können. Daher wird bei bathymetrischen Laserscannersystemen grünes Licht z.B. mit einer Wellenlänge von 532 nm (Nd:YAG Second Harmonic Generation) verwendet, wodurch eine deutlich höhere Eindringtiefe in die Wassersäule erreicht werden kann (Guenther et al., 2000).

Scanmechanismus

ALS-Systeme verwenden eine Laserlichtquelle mit einer festen und stabilen Wellenlänge, welche gepulstes Licht in eine definierte Richtung emittieren. Wird dieser Laserpuls von einem Objekt zurückgestreut, kann dies in Form eines Echos von einem geeigneten Empfänger registriert werden. Dieser einfache Aufbau wird auch Laser Range Finder (LRF) genannt und ist in dieser Form nicht für die effiziente Erfassung großer Flächen geeignet. Durch den Einsatz auf mobilen Plattformen und einer sehr hohen Anzahl an Messungen pro Sekunde (engl. pulse repetition rate; PPR) ist die Erfassung von Profilen möglich (Petrie und Toth, 2018a). Erst durch die Nutzung von reflektiven oder refraktiven Umlenkmechanismen für die Auslenkung des Laserpulses können große Flächen zeiteffizient und mit einer hohen Punktdichte erfasst bzw. gescannt werden (Petrie und Toth, 2018a).
In Beraldin et al. (2010) und Pfeifer et al. (2017) werden unter anderem folgende übliche Varianten von Umlenkspiegel-Mechanismen und die daraus resultierenden Scanmuster vorgestellt:

- oszillierender Spiegel führt zu einem „Zick-Zack-Muster“ (Abb. 2.5a)
- ein rotierender Polygonspiegel führt zu parallel verlaufenden Scanlinien (Abb. 2.5b)
- ein nutierender Spiegel führt zu dem sogenannten Palmer-Scanmuster (Abb. 2.5c)

Der Vollständigkeit halber sollen noch Fiberglass Scanner und Solid State LiDAR Scanner genannt werden, wobei der Einsatz dieser Scanmechanismen in ALB-Systemen selten ist (z.B. Single Photon LiDAR Systeme) und somit für diese Arbeit keine große Rolle spielt. Für bathymetrische Messungen kommt häufig ein nutierender Umlenkmechanismus (→ Palmer-Scanmuster) mit



(a) Zick-Zack-Muster (b) Parallele Scanlinien (c) Palmer-Muster

Abb. 2.5 ALS-Scanmuster (adaptiert aus Beraldin et al. (2010)).

einem Auslenkwinkel von 20° zur Anwendung (Quadros, 2013). Dieser Winkel hat sich als geeigneter Kompromiss erwiesen; zum einen für die Detektion der Wasseroberfläche und zum anderen für die Durchdringung der Wassersäule zur Gewässerbodenerfassung (Pfeifer et al., 2017).

Signaldigitalisierung und Speicherung

Für die Registrierung des vom Objekt zurückgestreuten Echos gibt es verschiedene Methoden. Im Folgenden werden das konventionelle LiDAR, Geiger-Mode LiDAR und Single Photon LiDAR vorgestellt und deren Charakteristik kurz beschrieben. Die Bezeichnung der Sensortypen wurde aus Degnan (2016) und Mandlburger et al. (2019) übernommen.
Die konventionellen LiDAR-Systeme werden unter anderem auch Multi-Photon LiDAR (Degnan, 2016) oder Linear-Mode LiDAR (Ullrich und Pfennigbauer, 2016) genannt und weisen bzgl. des ausgesandten Laserpulses eine Pulslänge zwischen 0,85 ns und 7 ns sowie Pulsenergien von 0,02 mJ bis 7 mJ auf (siehe Kapitel 2.2.1 – „Bathymetrische Laserscanner“). Der Detektor besteht meist aus einer Avalanche Photo Diode (APD) (Wehr und Lohr, 1999), welche den zum Empfänger zurückgestreuten Laserpuls in ein analoges Spannungssignal umwandelt. Die APD arbeitet im linearen Modus, womit die optische Leistung und die Stärke des analogen Ausgangssignals einen linearen Zusammenhang aufweisen (Mandlburger et al., 2019). Anschließend wird das analoge Signal mit einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert. Die weitere Auswertung hängt vom LiDAR-System ab. Entweder werden mit Hilfe von Schwellwertoperatoren bzgl. der Signalstärke einzelne Echos extrahiert und gespeichert (Discrete Echo System), oder die komplette Form des ankommenden Signals wird zeitlich hochauflösend gespeichert (Full-Waveform) (Beraldin et al., 2010; Maas, 2010). Für die Detektion diskreter Objektechos bzw. für die digitalisierte Full-Waveform müssen mehrere hundert Photonen auf dem Detektor ankommen (Degnan, 2016). Konventionelle LiDAR-Systeme können mehrere Rückstreuer erkennen bzw. aufzeichnen (Multi-Echo-Funktionalität) und eignen sich diesbezüglich gut für bathymetrische Messzwecke.
Geiger-Mode LiDAR-Systeme senden eine stark aufgeweiteten Laserpuls aus. Der Detektor, des-

sen Fläche im Gegensatz zu konventionellen LiDAR-Systemen kleiner als der ausgesandte Laserpuls ist, besteht aus einer Matrix von sensitiven Empfängerelementen, welche im binären Modus (oder Geiger Modus) arbeiten. Treffen wenige oder auch nur ein Photon auf ein Empfängerelement, wird die Laufzeit des Pulses im Empfänger gestoppt. Allerdings kann das Empfängerelement nur ein Echo bzw. Event pro ausgesandtem Laserpuls registrieren. Geiger-Mode LiDAR-Systeme haben keine Multi-Echo-Funktionalität und sind für die Gewässerbodenbestimmung ungeeignet (Ullrich und Pfennigbauer, 2016; Mandlburger et al., 2019).
Single Photon LiDAR-Systeme senden einen sehr kurzen Laserpuls aus (Pulsdauer beim konventionellen LiDAR ist ein Vielfaches länger), der in 10 × 10 sehr schmale Teilstrahlen geteilt wird. Die Detektorfläche setzt sich ebenfalls aus 10 × 10 unabhängigen Detektoren (engl. beamlets) zusammen, welche wiederum aus sehr vielen sensitiven Geiger-Mode Empfängerelementen bestehen. Die Beamlets können mehrere Echos pro ausgesandten Laserpuls empfangen und verarbeiten (Degnan, 2016; Mandlburger et al., 2019), womit sich Single Photon LiDAR-Systeme prinzipiell für die Aufnahme von Gewässerböden eignen. Single Photon LiDAR-Systeme zeichnen keine Full-Waveform-Daten auf und sind Discrete Echo Systems.

Bathymetrische Laserscanner

Anhand der Spezifikationen der ALB-Systeme kann meist zwischen Tiefwassersysteme (bzw. Deep-Water; Deep-Bathy) und Flachwassersysteme (bzw. Shallow-Water; Shallow-Bathy) ALB-Systeme unterschieden werden (Petrie und Toth, 2018b). In Tabelle 2.1 sind die Kerneigenschaften von Deep-Bathy und Shallow-Bathy ALB-Systemen gegenübergestellt. Die Werte dieser Tabelle wurden aus Quadros (2013), Richter (2018) und Mandlburger (2020) sowie den Datenblättern des RIEGL VQ-880-GII (RIEGL, 2022) und Leica Chiroptera II (Leica, 2015) entnommen. Die größten Unterschiede sind in der Pulswiederholrate, der abgestrahlten Energieleistung und der Strahldivergenz zu sehen. Deep-Bathy ALB-Systeme sind in der Regel auf eine höhere Eindringtiefe in Gewässern bei einer niedrigeren Anzahl an Punkten pro Quadratmeter ausgelegt. Einige bathymetrische ALB-Systeme sind mit nahinfraroten Laserscannern ausgestattet, welche für eine genauere Erfassung der Wasseroberfläche genutzt werden können. Die Wahl des Sensors für eine Befliegung hängt von der Anwendung und von den Anforderungen für die Befliegung ab. Für diese Arbeit wurden Daten der Shallow-Bathy ALB-Systeme RIEGL VQ-880-G I (Kap. 3 und 5), RIEGL VQ-880-G II (Kap. 4) und Leica Chiroptera II (Kap. 6.7) verwendet.

Tab. 2.1 Allgemeine Charakteristika von Deep-Bathy und Shallow-Bathy ALB-Systemen. Die Shallow-Bathy ALB-Systeme RIEGL VG 880-G I/II und der Leica Chiroptera II werden aufgrund ihrer Relevanz für diese Arbeit extra aufgeführt.

ALB-System	Deep-Bathy	Shallow-Bathy	RIEGL VQ 880-G I/II	Leica Chiroptera II
Pulsbreite [ns]	3 - 7	0,85 - 4	1,5	4
Pulsenergie [mJ]	3 - 7	0,02 - 0,4	k.A.	0,1
PRR [kHz]	1 - 40	10 - 700	550 / 700	35
Strahlaufw. [mrad]	7	0,7 - 2	0,7 - 2,0	k.A.
Flughöhe [m]	300 - 1000	300 - 800	600 - 700	400 - 600
Secchi-Tiefe	2 - 3	1 - 2,5	1,5	1,5
Streifenbreite [m]	60 - 585	182 - 582	437 - 510	291 - 437
Scanmuster	gebogenes Zick-Zack, parallele Scanlinien, Palmer-Scanmuster		Palmer-Scanmuster	

2.2.2 Der Pfad des Laserpulses

In Kapitel 2.2.1 wurden die allgemeinen Grundlagen des ALS behandelt. Bei bathymetrischen Messung kommt es jedoch zu weiteren Effekten bzw. sind gewisse Anpassungen notwendig, die im Folgenden gezeigt werden. Das Kapitel beschreibt den Weg des Laserpulses in fünf Etappen (Emission des Laserpulses, Atmosphäre, Wasseroberfläche, Wassersäule, Gewässerboden und Rückweg) und stellt dabei auch den Bezug zur LiDAR Gleichung nach Abdallah et al. (2012) her. Auf die geometrische Modellierung des Laserpulsweges mit Refraktionskorrektur und Anpassung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Wasser wurde an dieser Stelle verzichtet, da dies im nachfolgenden Kapitel 3 (Beiträge 2 und 3) behandelt wird.

Die bathymetrische LiDAR-Gleichung

Für das ALS bildet die LiDAR Gleichung (2.5) für jeden ausgesandten Laserpuls den Zusammenhang zwischen ausgehender Pulsenergie (P_S) und ankommender Pulsenergie (P_E) ab (Pfeifer et al., 2017).

$$P_E = \frac{P_S}{(\gamma_S \cdot R)^2 \cdot \pi/4} \cdot \sigma \cdot \frac{D_E^2 \cdot \pi/4}{4 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \eta_{ATM} \cdot \eta_{SYS}. \tag{2.5}$$

mit

$$\begin{aligned}
P_E &= \text{ankommende Pulsenergie} \\
P_S &= \text{ausgehende Pulsenergie} \\
\gamma_S &= \text{Strahldivergenz} \\
R &= \text{Entfernung Laserscanner - Objekt} \\
\sigma &= \text{Rückstreuquerschnitt, der die Objekteigenschaften beschreibt} \\
D_E &= \text{Durchmesser der Apertur} \\
\eta_{ATM} &= \text{atmosphärischer Transmissionsgrad} \\
\eta_{SYS} &= \text{optischer Transmissionsgrad des Messsystems}
\end{aligned}$$

Dieser Gleichung ist jedoch nur für topographische Messungen geeignet, da die Effekte der Wasseroberfläche und der Wassersäule nicht berücksichtigt sind. Die Erweiterung zur „bathymetrischen“ LiDAR Gleichung ist komponentenweise in Gleichung 2.6 dargestellt, wobei der Teil P_O der Gleichung 2.5 entspricht (Abdallah et al., 2012; Pfeifer et al., 2017).

$$P_E = P_O + P_W(z) + P_B + P_{HG} + P_{DR} \tag{2.6}$$

mit

$$\begin{aligned}
P_O &= \text{zurückgestreute Signalstärke von der Wasseroberfläche} \\
P_W(z) &= \text{zurückgestreute Signalstärke aus der Wassersäule in} \\
&\quad\ \text{Abhängigkeit der Gewässertiefe } z \\
P_B &= \text{zurückgestreute Signalstärke des Gewässerbodens} \\
P_{HG} &= \text{Signalstärke des Hintergrundrauschens} \\
P_{DR} &= \text{Detektorrauschen}
\end{aligned}$$

Die einzelnen Komponenten der Gleichung 2.6 werden in den folgenden Abschnitten ausführlicher behandelt.

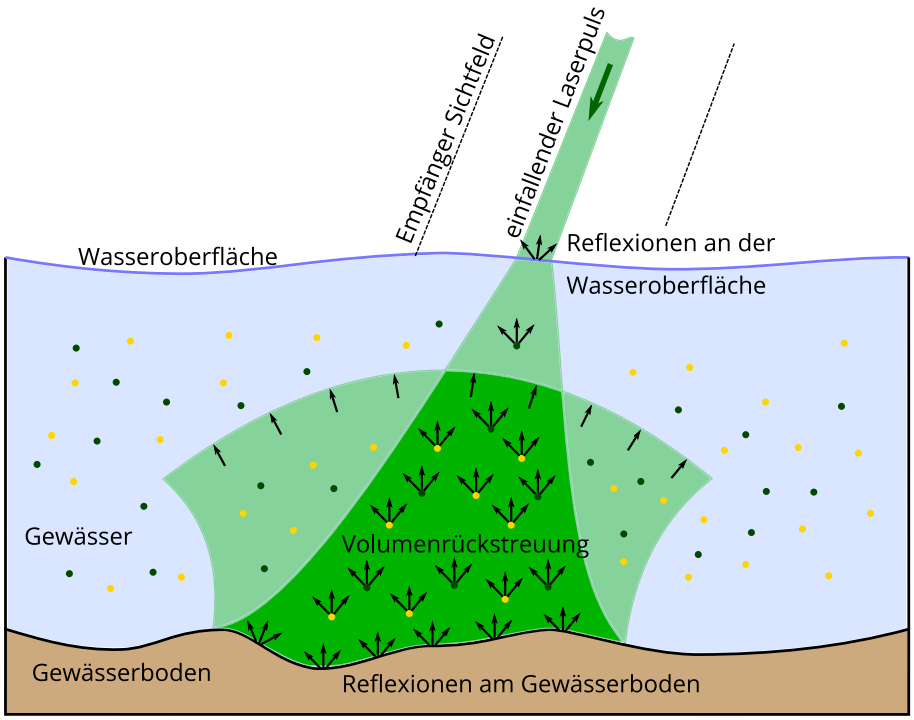


Abb. 2.6 Ausbreitung des Laserpulses in Wasser (Abbildung in Anlehnung an Guenther et al. (2000)). Gewässertrübung wird durch gelbe Punkte (Gelbstoffe) und grüne Punkte (Phytoplankton) repräsentiert. Schwarzen Pfeile symbolisieren die Rückstreuung an der Gewässeroberfläche, an den Partikeln in der Wassersäule und am Gewässerboden.

Emission des Laserpulses

Bei Laserscanning-Systemen wird mittels einer Lichtquelle ein gerichteter Laserpuls mit einer festen Wellenlänge und der Pulsenergie P_S emittiert. Der emittierte Laserpuls trifft innerhalb des Sensorsystems auf einen Umlenkspiegel und wird somit aus dem Sensor ausgesandt (Kap. 2.2.1). Mit Emission des Laserpulses startet die Laufzeitmessung. Bei Full-Waveform-Systemen wird unter Umständen die sogenannte Systemwaveform (Kap. 2.3.2) aufgezeichnet.

Atmosphäre

Der Laserpuls legt durch die Atmosphäre die größte Distanz zurück. Dabei wird er aufgrund von Streuung (z.B. Rayleigh-Streuung) und Absorption abgeschwächt. Der Grad der Abschwächung ist abhängig von den Wetterverhältnissen (Bewölkung, Luftfeuchtigkeit, u.a.) und von der Wellenlänge des ausgesandten Laserpulses. Die atmosphärisch bedingte Signalabschwächung wird in Gleichung 2.7 mit T_{ATM} und der Weg durch die Atmosphäre mit der Flughöhe H sowie dem Einfallswinkel α_L berücksichtigt (Pfeifer et al., 2017).

Wasseroberfläche

Nach Durchlaufen der Atmosphäre trifft der Laserpuls auf die Wasseroberfläche. Je nach Strahldivergenz variiert dabei der auf der Wasseroberfläche beleuchtete Footprint. An dieser Stelle wird in der Regel ein Signalteil direkt reflektiert oder zurückgestreut (Albedo-Effekt L_O) und als Echo an der Empfangseinheit des Laserscanners detektiert (Guenther, 1985). Ausnahmen

bilden sehr klare Gewässer mit einer sehr ruhigen Wasseroberfläche, bei welchen die Echos von der Wasseroberfläche ausbleiben können (Drop Outs; Mandlburger et al. (2017)).
Der Weg des Laserpulses durch die Atmosphäre und die Reflexion an der Wasseroberfläche werden mit Gleichung 2.7 in der angepassten LiDAR Gleichung 2.6 berücksichtigt.

$$P_O = \frac{P_S \cdot T_{ATM}^2 \cdot A_E \cdot \eta_S \cdot \eta_E \cdot L_O \cdot \cos^2(\alpha_L)}{\pi \cdot H^2} \tag{2.7}$$

Die Parameter A_E (Fläche des Detektors), η_S (Wirkungsgrad der Sendeoptik) und η_E (Wirkungsgrad der Empfangsoptik) beziehen sich alle auf Eigenschaften des ALB-Sensors.

Wassersäule

Der Signalteil, der von der Wasseroberfläche nicht zurückgestreut wird, dringt in die Wassersäule ein. Die korrekte Bestimmung der Grenzfläche Luft $\leftrightarrow$ Wasser spielt eine wichtige Rolle, da an dieser Stelle die Refraktion des Laserpulses nach dem Brechungsgesetz von Snellius und die Anpassung der Lichtgeschwindigkeit des Laserpulses in Wasser erfolgt. Für die Berücksichtigung der Refraktion müssen folgende Variablen bekannt sein: der Inzidenzwinkel α_L zwischen luftseitigem Laserpulspfad und Wasseroberflächennormale, der Brechungsindex vom Wasser n_W, die Wasseroberflächennormale am Durchstoßpunkt und die Koordinaten des Durchstoßpunktes. Bei annähernd horizontalen Wasseroberflächen kann die Wasseroberflächennormale mit vertikalem Verlauf angenommen werden. Bei bewegten Wasseroberflächen muss auf die Modellierung der entsprechenden Wasseroberflächenelementen zurückgegriffen werden. In Richter et al. (2021a) werden dazu verschiedenen Varianten von horizontalen Wasseroberflächenelementen mit Berücksichtigung der Höhe der Dünung über die Anwendung geneigter Wasseroberflächenelementen bis hin zur Modellierung der Wasseroberfläche mittels Freiformflächen und anschließender Ableitung der Flächennormalen aus diesen Wasseroberflächenmodellen vorgestellt.
Beim Durchdringen der Wassersäule verliert der Laserpuls einen größeren Anteil an Energie. Die Signalabschwächung erfolgt zum einem durch das Medium Wasser und zum anderen durch Absorption und Streuung des Laserlichtes an Gelbstoffen, Phytoplankton und feinen Schwebstoffen innerhalb der Wassersäule. Die Absorption und Streuung an den Partikeln in der Wassersäule wird auch Gewässertrübung genannt. Die Signalabschwächung des Laserpulses wird mit dem Dämpfungskoeffizient k beschrieben (Guenther, 1985; Abdallah et al., 2012). Die Streuung innerhalb der Wassersäule bewirkt eine starke Aufweitung des Strahls, welche laut Guenther (1985) etwa zu einer Vergrößerung des Footprints gleich der halben Gewässertiefe führt. Dadurch gehen wiederum große Anteile der Laserpulsenergie verloren und gelangen nicht mehr zur Empfangseinheit des Laserscanners. Die Strahldivergenz innerhalb der Wassersäule kann in diesem Kontext vernachlässigt werden (Guenther, 1985). Damit stellen die Streu- und Absorptionseffekte des Laserpulses und infolge dessen die Gewässertrübung und Strahlaufweitung die größte Limitierung für die Airborne LiDAR Bathymetrie dar. Die Tatsache, dass Wasser ein Volumenrückstreuer ist, wird mit der Volumenstreuungsfunktion $\beta(\phi)$ berücksichtigt. Am Übergang zwischen Luft und Wasser ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserpulses und die Ausbreitungsrichtung (Brechungswinkel α_W), was bei der Berechnung der Koordinaten der Gewässerbodenpunkte beachtet werden muss.
Die zurückgestreuten Signalanteile der Wassersäule werden in Abhängigkeit der Wassertiefe z mit Gleichung 2.8 beschrieben:

$$P_W(z) = \frac{P_S \cdot T_{ATM}^2 \cdot A_E \cdot \eta_S \cdot \eta_E \cdot F \cdot (1 - L_O)^2 \cdot \beta(\phi) \cdot e^{\frac{-2 \cdot k \cdot z}{\cos(\alpha_W)}}}{\left(\frac{n_W \cdot H + z}{\cos(\alpha_L)}\right)^2} \tag{2.8}$$

mit

F =ein Verlustfaktor (Berücksichtigung, dass nicht das gesamte zurückgestreute Signal(stärke)/Energie am Detektor ankommt)

Gewässerboden und Rückweg

Am Ende der Wassersäule trifft der Laserpuls auf den Gewässerboden und wird diffus reflektiert. Die Beschaffenheit des Bodens beeinflusst auch die Signalstärke des Laserpulses. Ein Faktor ist dabei die Reflektivität des Gewässerboden (R_B; Albedo), welche bei dunklem Bodenmaterial zu einer stärkeren Signalabschwächung führt als bei hellen Bodenmaterialen. Des Weiteren wirkt sich auch die Rauigkeit des Bodens auf die Signalstärke aus. Gewässerbodenneigungen führen wiederum zu einer Aufweitung des Laserpulses, was eine Verteilung des zurückgestreuten Signals auf eine längere Zeitperiode zur Folge hat. Dadurch nimmt die maximale Amplitude des Gewässerbodenechos ab, was aber nicht zwangsläufig bedeutet, dass weniger Signalenergie zum Detektor gelangt. Dieser Effekt kann zu einem breiteren Gewässerbodenecho in der Full-Waveform führen (Höfle und Hollaus, 2010). Die am Gewässerboden zurückgestreute Energie wird mit Gleichung 2.9 beschrieben:

$$P_B = \frac{P_S \cdot T_{ATM}^2 \cdot A_E \cdot \eta_S \cdot \eta_E \cdot F \cdot (1 - L_O)^2 \cdot R_B \cdot e^{\frac{-2 \cdot k \cdot D_{GW}}{\cos(\alpha_W)}}}{\pi \cdot \left(\frac{n_W \cdot H + D_{GW}}{\cos(\alpha_L)}\right)^2} \tag{2.9}$$

mit

D_{GW} = gesamte Gewässertiefe.

Auf dem Rückweg des Laserpulses vom Gewässerboden bis zur Empfangseinheit des Laserscanners wirken alle bereits beschriebenen Effekte (Signaldämpfung in der Wassersäule, Refraktion an der Grenzfläche Wasser - Luft, atmosphärische Signaldämpfung) wiederholt, wodurch das Signal weiter abgeschwächt wird. Die letzten verbleibenden Signalanteile, die auf der Detektorfläche der Empfängereinheit des Laserscanners auftreffen, werden auf verschiedene Weisen verarbeitet und ausgewertet (Discrete Echo System oder Full-Waveform; Abschnitt 2.2.1→ Signaldigitalisierung und Speicherung). Zusätzlich zu der zurückgestreuten Laserpulsenergie kommen noch die Einflüsse der Sonnenstrahlung und der Detektorelektronik hinzu, welche in Gleichung 2.6 mit P_{HG} und P_{DR} berücksichtigt werden. Bei stärker ausgeprägten Gewässerbodenechos spielen diese beiden Effekte sicherlich keine Rolle. Je kleiner jedoch der Unterschied zwischen Echosignalstärke und Signalstärke des Hintergrundrauschens (P_{HG}) und des Detektorrauschens (P_{DR}) wird, desto unzuverlässiger wird die Gewässerbodendetektion bis hin, dass das Gewässerbodenecho nicht mehr vom Rauschsignal unterschieden und somit auch nicht mehr detektiert werden kann.

2.2.3 Fehlereinflüsse

Bei der Bestimmung der Gewässerbodenpunkte gibt es verschiedene Aspekte, die die Genauigkeit der Koordinaten beeinflussen und einschränken. Die folgende Auflistung gibt einen Überblick über einige relevante Einflussfaktoren:

- Georeferenzierung des ALB-Systems (GNSS, IMU)
- Kalibriergenauigkeit von Lever-Arm und Boresight-Alignment zwischen ALB-Sensor (SCS) und Plattform (PCS)

- Berücksichtigung von Welleneffekte in Kombination mit der Strahldivergenz (Westfeld et al., 2017)
- ungenaue Bestimmung der Grenzschicht Luft ↔ Wasser (Unterschätzung der Wasseroberfläche) (Mandlburger et al., 2013)
- Fehlereinflüsse durch die Wasseroberflächenmodellierung (Richter et al., 2018, 2021a)
- Charakteristik der Gewässerbodentopographie in Kombination mit der Strahlaufweitung (Höfle und Hollaus, 2010)

Der Einfluss der einzelnen Aspekte auf die Genauigkeit der Punktbestimmung hängen dabei z.B. von der eingesetzten Hardware/Sensorik, von den Wetterbedingungen (bzgl. Welleneffekten) und vom Zustand des Gewässers ab.

2.3 Die Full-Waveform

Die vom Sensor aufgezeichneten Full-Waveform Messdaten bilden die Prozessierungsgrundlage für die Full-Waveform Stacking-Methoden. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Aufbau, Form und Eigenschaften von Full-Waveforms (Kap. 2.3.1), zeigt die Charakteristik von Systemwaveforms (Kap. 2.3.2) und gibt einen Überblick über Full-Waveform Auswerteverfahren (Kap. 2.3.3).

2.3.1 Aufbau und Merkmale einer Full-Waveform

Im Kapitel 2.2.2 wurde der Zusammenhang von emittierter und empfangener Pulsenergie dargestellt, ohne Berücksichtigung der verschiedenen Zeitpunkte der zurückgestreuten Signalanteile. D.h., P_E ist die gesamte ankommende Energie des ausgesandten Pulses, unabhängig davon zu welchem Zeitpunkt die Energie am Empfänger ankommt. In Abbildung 2.6 ist jedoch deutlich zu erkennen, dass der von der Wasseroberfläche zurückgestreute Signalanteil zu einem anderen Zeitpunkt auf den Detektor des Empfängers auftreffen wird, als die Signalanteile der Wassersäule und des Gewässerbodens. Durch die Digitalisierung des ankommenden Signals in Abhängigkeit von der Zeit kann somit die Historie des zurückgestreuten Signals erfasst werden. Diese Form der Aufzeichnung wird Full-Wavform Digitalisierung genannt. Das bedeutet, dass die in Kap. 2.2.2 genannten Vorgänge und Effekte die Erscheinungsform der Full-Waveform beeinflussen, bzw. die Full-Waveform damit den Pfad des Laserpulses und damit auch die Charakteristik des Gewässers repräsentiert. Die dominantesten Komponenten bei bathymetrischen Full-Waveforms sind in Abbildung 2.7b mit der Wasseroberfläche, der Wassersäule und dem Gewässerboden schematisch dargestellt. Diese Informationen spielen für die im Zuge dieser Dissertation entwickelten Auswertemethoden eine bedeutende Rolle.
Eine Full-Waveform besteht aus mehreren Samples (Abtastwerten), welche über einen Zeitstempel t_s und eine Amplitude A_s (bzw. Signalstärke) verfügen. Die Samples sind dabei zeitlich alle gleichabständig. Die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Samples wird Abtastzeitintervall (engl. sample time interval; t_{si}) genannt (Abb. 2.7a). Die Anzahl der Samples zwischen zwei bestimmten Echos wird in den Beiträgen Sampleanzahl (engl. number of samples) bezeichnet. Die zurückkommende Energie wird in der Full-Waveform als Amplitude in Digital Numbers (DN) gespeichert. Die letzten Samples von Full-Waveforms enthalten in der Regel keine Objektechos mehr, sodass dieser Teil der Full-Waveform zur Ableitung der Signal/Rausch Charakteristik genutzt werden kann (Guenther, 1985; Zhu et al., 2011).

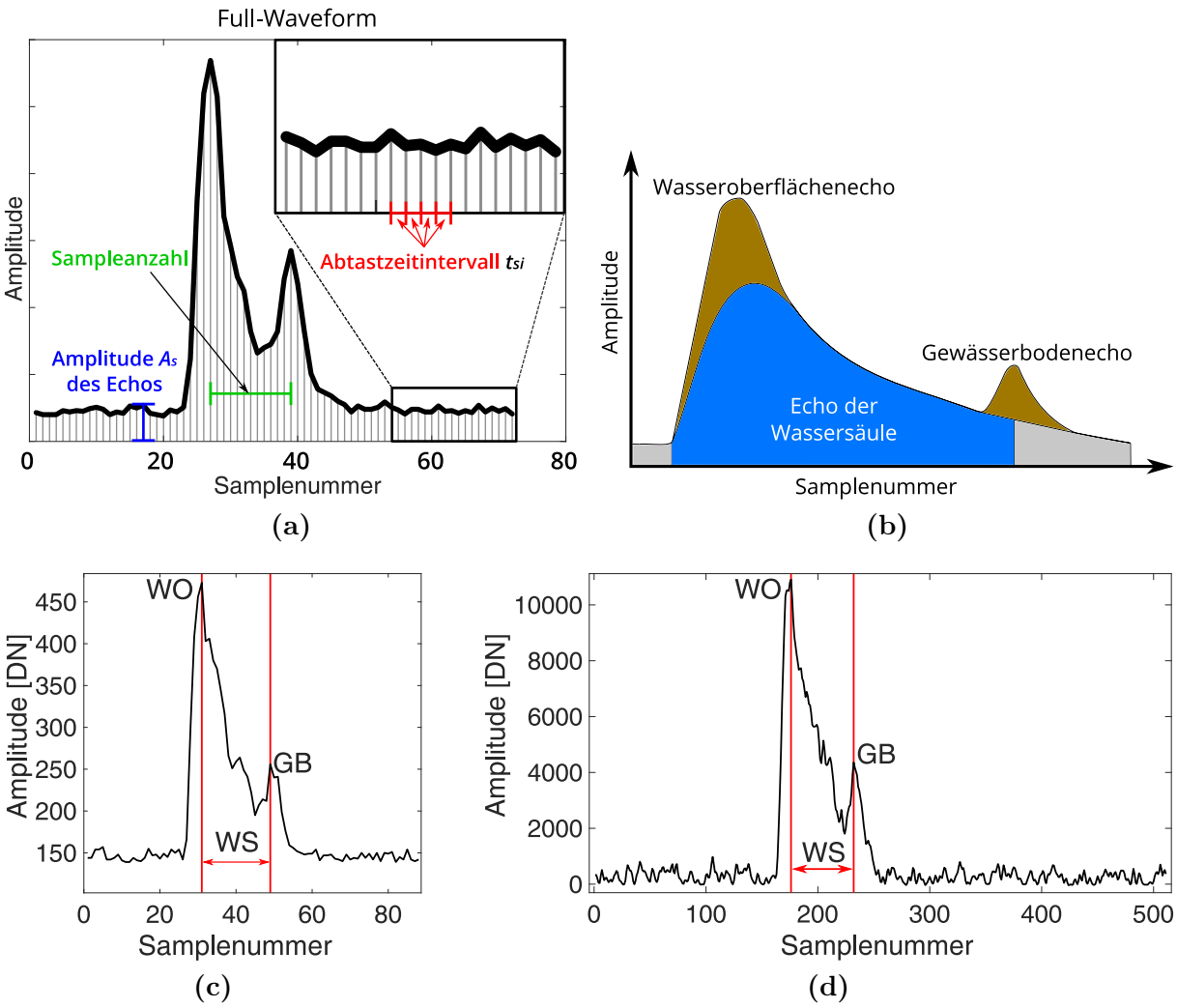


Abb. 2.7 Aufbau einer Full-Waveform **a** mit zwei Objektechos. **b** zeigt schematisch eine bathymetrische Full-Waveform mit den drei Signalkomponenten nach Guenther et al. (2000). Beispielhafte Full-Waveform eines **c** RIEGL VQ-880 ALB-Systems und eines **d** AHAB Chiroptera ALB-Systems. WO = Wasseroberflächenecho; WS = Echo der Wassersäule; GB = Gewässerbodenecho.

Full-Waveforms aus ALB-Messungen bestehen, wie bereits erwähnt, im Wesentlichen aus den Echos der Wasseroberfläche, der Wassersäule (Volumenrückstreuer) und des Gewässerbodens (Abb. 2.7b). Dabei überlagern sich die Signalanteile von Wasseroberflächenecho und Wassersäule partiell. Ist der Abstand zwischen Wasseroberfläche und Gewässerboden zu gering, kann es auch zu Überlagerungen von Wasseroberflächenecho und Gewässerbodenecho kommen, wodurch diese deutlich schwieriger voneinander zu trennen sind (Guenther, 1985). Bei gleichzeitiger Abtastung des Gebietes mit einem nahinfraroten und einem grünen Laserscanner können diese durch das in Allouis et al. (2010) beschriebene Verfahren getrennt werden.

Die Abbildung 2.7c und 2.7d zeigen zwei beispielhafte Full-Waveforms von zwei verschiedenen Sensoren. Bei beiden Full-Waveforms ist die Charakteristik einer bathymetrischen Full-Waveform gut zu erkennen. Darüber hinaus wird ebenfalls deutlich, dass sowohl der Amplitudenbereich als auch die Anzahl der gespeicherten Samples abhängig vom Sensor sind, was gegebenenfalls bei der Prozessierung mit den Full-Waveform-Daten berücksichtigt werden muss.

2.3.2 Systemwaveform

Die Systemwaveform oder auch emittierte Waveform ist das aufgenommene, digitalisierte und gespeicherte Signal des vom Sensor emittierten Laserpulses. In der Systemwaveform entspricht die Form des ausgesandten Pulses in der Regel einer Gauß'schen Glockenkurve, woraus sich sensorspezifische Eigenschaften wie Pulsdauer bzw. Pulslänge und Pulsenergie ableiten lassen. Die Abbildungen 2.8a und 2.8b zeigen exemplarisch die Systemwaveforms zweier bathymetrischer Laserscanner. In beiden Systemwaveforms ist die Glockenform des ausgesandten Pulses gut er-

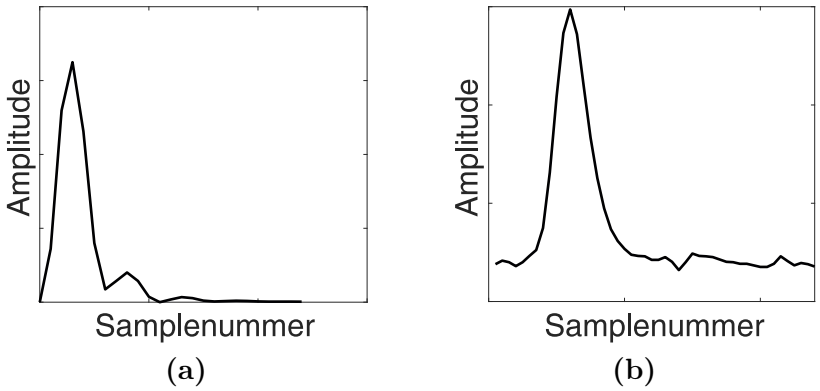


Abb. 2.8 Systemwaveform **a** des RIEGL VQ-880 (exemplarisch; bereitgestellt durch AHM GmbH) und **b** des AHAB Chiroptera.

kennbar. In Abbildung 2.8a sind zudem nach dem ersten Peak zwei weitere deutlich schwächere Peaks zu sehen, welche auf Effekte der Sensorhardware zurückzuführen sind und „ringing effect“ genannt werden (Mallet et al., 2008). Diese schwächeren Echos können bei der späteren Auswertung in wenigen Fällen problematisch sein, wenn diese auch noch in der empfangenen Full-Waveform vorkommen und durch die Auswerteverfahren fälschlicherweise als Gewässerbodenecho detektiert werden.

2.3.3 Full-Waveform Auswerteverfahren

Online Waveform Processing

Die Begriffe *Online Waveform Processing* (OWP) und *Standardprozessierung* werden in dieser Arbeit gleichgesetzt mit der Echtzeitauswertung oder dem Post-Processing durch Herstellersoftware und andere kommerzielle Softwarepakete. Wie genau die Prozessierung in diesen Softwarepaketen erfolgt, ist nur zum Teil bekannt (Pfennigbauer et al., 2009; Pfennigbauer und Ullrich, 2010). Der Autor geht von einer weitgehend unabhängigen bzw. isolierten Auswertung aller Messungen aus.

Bestimmung des differentiellen Rückstreuquerschnittes – Entfaltung und Dekomposition

Für die Detektion und Extraktion von Objektechos kommen neben Peakdetektoren, wie Schwellwertoperatoren, Amplitudenmaximum oder Wendepunkt der aufsteigenden Flanke (Wagner et al., 2004; Wang et al., 2015), auch Entfaltungs- und Dekompositionsverfahren zur Anwendung. Ziel der Entfaltungs- und Dekompositionsverfahren ist die Rekonstruktion des differentiellen Rückstreuquerschnitts (engl. differential backscatter cross-section; dBCS). Der dBCS ist ein Signal, welches die Eigenschaften eines Objektes beschreibt (Roncat et al., 2011) und frei von

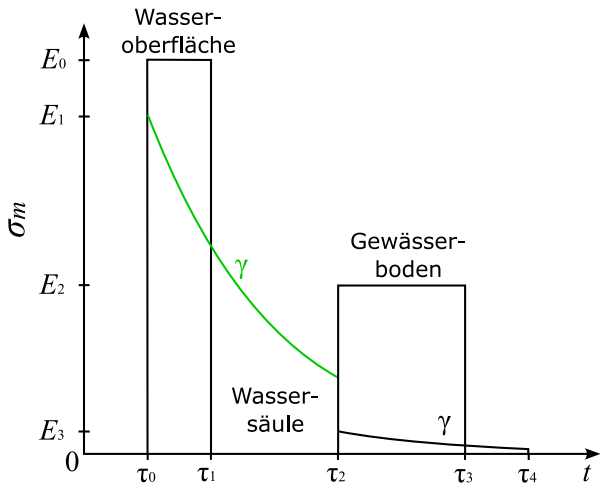


Abb. 2.9 Aufbau des Surface-Volume-Bottom Modells (Abbildung aus Schwarz et al. (2019); leicht abgeändert). σ_m ist der modellierte dBCS; τ_i sind die Zeitintervallgrenzen der dBCS Segmente; und E_i die Amplitudenwerte des σ_m.

Sensoreinflüssen ist (Azadbakht et al., 2013). Dadurch wird ein Vergleich von Daten verschiedener Epochen und Sensoren möglich (Roncat et al., 2011). Durch die Rekonstruktion des dBCS kann auch der exakte Zeitpunkt der Interaktion von Laserpuls und Objekt und damit die genaue Distanz bestimmt werden.
Die Faltung ist eine mathematische Operation, mit der zwei Funktionen zu einer Funktion verknüpft werden (Richter, 2018). Die Entfaltung ist entsprechend die Umkehrfunktion. Die Faltung bzw. Entfaltung kann auch auf Signale wie Full-Waveforms angewendet werden, so ergibt die Faltung von Systemwaveform und dBCS die empfangene Full-Waveform. Durch die Entfaltung von empfangener Full-Waveform und Systemwaveform wird entsprechend der dBCS ermittelt. Geläufige Verfahren im ALS sind u.a. die Wiener-Filter-Methode (Jutzi und Stilla, 2006) und der Richardson-Lucy Algorithmus (Wang et al., 2015).
Dekompositionsmethoden passen ein funktionales Modell (z.B. die Gauß'schen Glockenkurve) in den Teil der empfangenen Full-Waveform ein, in dem ein Objektecho vermutet wird. Damit ist bei dieser Methode nicht grundsätzlich die Kenntnis der Systemwaveform erforderlich. Ein Beispiel für die Dekomposition ist die Gauß'sche Dekomposition in Wagner et al. (2006).

Exponentielle Dekomposition

Die in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Methoden sind für bathymetrische Full-Waveforms nur bedingt geeignet, da der Einfluss der Wassersäule auf die Full-Waveform nicht berücksichtigt wird. In Schwarz et al. (2017) wird ein neues Dekompositions-Verfahren für die Bestimmung der Position der Wasseroberfläche und des Gewässerbodens beschrieben, wobei Wasseroberfläche, Wassersäule und Gewässerboden durch abfallende Exponentialfunktionen beschrieben werden. In Schwarz et al. (2019) wird dieses Modell spezifiziert zu dem Surface-Volume-Bottom Modell (SVB). Die Wasseroberfläche (Surface) und der Gewässerboden (Bottom) werden durch Boxcar-Funktionen (Dämpfungskoeffizient $\gamma = 0$; Abb. 2.9) und die Wassersäule (Volume) durch zwei Exponentialsegmente ($\gamma \neq 0$) approximiert. Der dBCS wird bei diesem Ansatz anhand von zehn Parametern komplett beschrieben (Abb. 2.9), mit dem Ziel, die Position der Wasseroberfläche und des Gewässerbodens genau bestimmen zu können. Zusätzlich ermöglicht dieses Modell die Ableitung des Dämpfungskoeffizients γ (Teil der Parametrisierung), welcher in Richter et al. (2021b) für die Ableitung der Gewässertrübungsparameter genutzt wurde.

2.4 Hydroakustische Messverfahren

Hydroakustische Messdaten bzw. Echolotdaten werden häufig für die Validierung von ALB-Daten herangezogen. In diesem Kapitel werden Messprinzip (Kap. 2.4.1), Varianten der Echolotung (Kap. 2.4.2) und Fehlereinflüsse (Kap. 2.4.3) beschrieben.

2.4.1 Messprinzip

Das Messprinzip basiert auf der Distanzmessung des Schalls durch die Wassersäule. Dabei wird vom im Wasser befindlichen Transducer ein Schallpuls emittiert. Der Puls durchläuft die Wassersäule bis dieser an einem Objekt (Fische, Vegetation, Wrack, Gewässerboden, u.a.) zurückgestreut wird (Abb. 2.10). Auf dem Rückweg durchläuft der zurückgestreute Puls nochmals die Wassersäule bis zur Empfangseinheit des Echolotsystems, wird dort verstärkt und als Echo an den Recorder weitergeleitet (de Jong et al., 2002). Im Sensor wird dabei die Laufzeit t_{rts} von Emission des Schallpulses bis zum Empfang des Echos gemessen. Hydroakustische Sensoren erreichen in Wasser Distanzen von bis zu 11 000 m (Kongsberg, 2022).

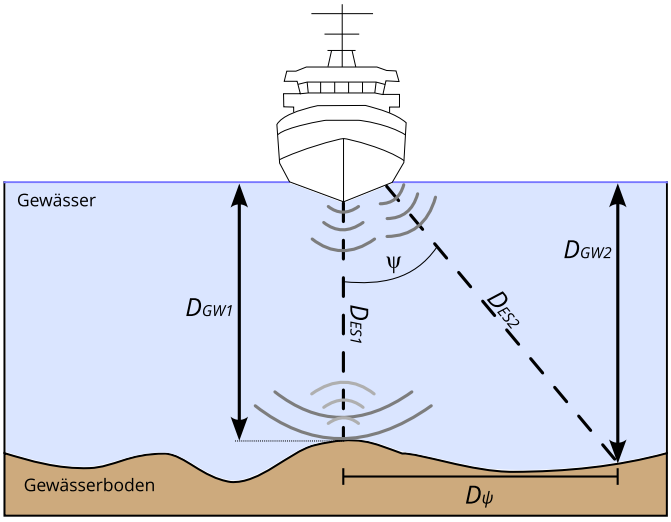


Abb. 2.10 Messprinzip der hydroakustischen Messung für vertikale und schräge Echolotung.

Die Bestimmung der Distanz D_{ES} erfolgt mit Gleichung 2.10 (de Jong et al., 2002) unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit des Schalls in Wasser c_{sw} und entspricht dem ToF-Prinzip beim ALS bzw. bei der ALB (siehe Gleichung 2.1).

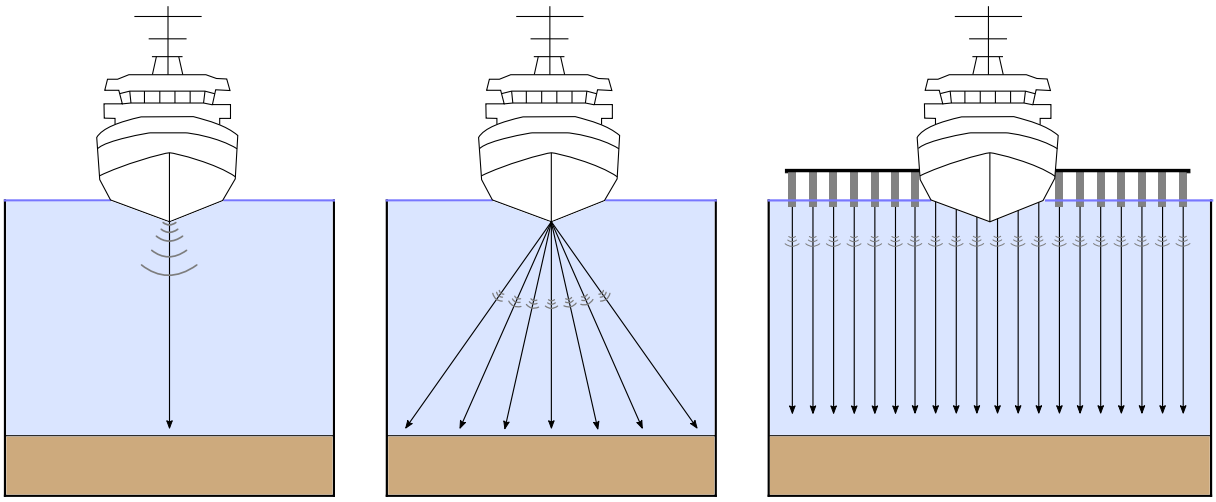
$$D_{ES} = c_{sw} \cdot \frac{t_{rts}}{2} \tag{2.10}$$

Für den Fall, dass das Echolot genau vertikal misst, kann aus der Distanz D_{ES} und der Eintauchtiefe des Transducers direkt die Gewässertiefe D_{GW} abgeleitet werden. Bei schräger Ausrichtung muss zur Bestimmung von D_{GW} die Gleichung 2.10 um den Neigungswinkel Ψ erweitert werden zu Gleichung 2.11 (Flemming et al., 1982) unter der Annahme eines horizontalen Wasseroberflächenmodells.

$$D_{GW} = c_{sw} \cdot \frac{t_{rts}}{2} \cdot \cos \Psi \tag{2.11}$$

Die daraus resultierende horizontale Auslenkung D_Ψ am Gewässerboden wird mit Gleichung 2.12 bestimmt (Flemming et al., 1982).

$$D_\Psi = c_{sw} \cdot \frac{t_{rts}}{2} \cdot \sin \Psi \tag{2.12}$$



(a) SBES Vertikallot **(b)** MBES Fächerlot **(c)** MBES Ausleger mit Vertikallottransducer

Abb. 2.11 Verschiedene Anordnungen von Echolot Sensoren.

2.4.2 Echolot Varianten

Für die Erfassung von Gewässerböden kommen verschiedene Varianten von Echolotsystemen zum Einsatz. So werden entweder ein Einzel-Echolot Schwinger (engl. single beam echosounder; SBES) oder mehrere Echolot-Schwinger (engl. multi beam echosounder; MBES) an einer schwimmenden Trägerplattform (Schiff oder Boot) installiert. SBES Schwinger werden aufgrund ihrer Kompaktheit eher auf kleinen Messbooten oder UWV eingesetzt (Abb. 2.11a). MBES-Systeme kommen dafür eher bei größeren Messschiffen zum Einsatz, wobei hier laut de Jong et al. (2002) zwischen Fächerecholot-Systemen (vertikale und schräge Echolotung, Abb. 2.11b) und Vertical Sweep Systemen mit mehreren vertikal ausgerichteten SBES Schwinger unterschieden werden kann (Abb. 2.11c).

2.4.3 Fehlereinflüsse

In den Beiträgen in Kapitel 3 und 4 wurden für die Validierung der Ergebnisse der erweiterten ALB-Prozessierung Echolot-Messungen herangezogen. Aufgrund ihrer begrenzten Messgenauigkeit wurden sie nicht als Referenzmessungen, sondern als Vergleichsdaten genutzt.
Folgende Fehlerquellen schränken die Genauigkeit der Echolot-Messungen ein:

- Positionierungsgenauigkeit des Messschiffes/Messbootes (GNSS und IMU Sensoren)
- Lever-Arm und Boresight-Alignment – Kalibriergenauigkeit der Position der Echolot-Schwinger und der Positionierungssensoren GNSS und IMU
- Unterschiedliche Geschwindigkeiten des Schalls entlang der Wassersäule – sog. Schallgeschwindigkeitsprofile (Geng und Zielinski, 1999)
- ungenaue Bestimmung der Refraktionskorrekturen an Wasserschichten innerhalb der Wassersäule bei schrägen Echolotmessungen (z.B. Fächerecholot) (Nistad und Westfeld, 2022)

3 Nichtlineare Full-Waveform Stacking-Verfahren zur Detektion und Extraktion von Gewässerbodenpunkten

Dieses Kapitel behandelt die entwickelten nichtlinearen Full-Waveform Stacking basierten Prozessierungsansätze. Der Begriff Full-Waveform Stacking ist als Akkumulation/Mittelung von Signal (-anteilen) mehrerer Full-Waveforms zu einer gemeinsamen alle individuellen Full-Waveforms repräsentierenden Pseudo-Full-Waveform zu verstehen. Die Pseudo-Full-Waveforms weisen zwischen den Samples ein konstantes Abtastzeitintervall auf. Ziel ist die Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses und folglich die Verstärkung von schwachen Gewässerbodenechos für eine einfachere sowie zuverlässiger Detektion. In dieser Arbeit wird dabei zwischen stacked Full-Waveform und Ortho-Full-Waveform unterschieden.
Den Haupteil dieses Abschnittes bilden drei Beiträge, in denen die Entwicklung des signalbasierten Full-Waveform Stackings (sigFWFS) aufbauend auf stacked Full-Waveforms und die Entwicklung des volumetrischen Full-Waveform Stackings (volFWFS) mit Ortho-Full-Waveforms gezeigt wird. Neben den Full-Waveform Stacking-Methoden wurden auch weitere Methoden zur Analyse der Eigenschaften der Full-Waveforms und der Filterung der Ergebnisse implementiert, teilweise erweitert und für die vorliegenden Full-Waveform-Daten angepasst. Die ersten beiden Beiträge behandeln die Funktionsweise und den Prozessierungablauf des sigFWFS. Der dritte Beitrag stellt das volFWFS vor. Beide Full-Waveform Stacking-Verfahren dienen der Gewinnung von zuverlässigen Gewässertiefeninformationen, sind aber in der Herangehensweise unterschiedlich. Beim sigFWFS basiert die Prozessierung von der Akkumulation der Full-Waveforms bis zur Bestimmung des Suchbereichs fast ausschließlich auf den Full-Waveform Signalen ohne Berücksichtigung von geometrischen Eigenschaften. Lediglich die lagebasierte Nachbarschaft zwischen den individuellen Full-Waveforms an der Wasseroberfläche wird berücksichtigt. Das volFWFS hingegen berücksichtigt den geometrischen Laserpulsverlauf der kompletten individuellen Full-Waveform von der Wasseroberfläche bis zum Gewässerboden. Trotz der unterschiedlichen Prozessierungsweise stellen diese Methoden keine konkurrierenden Verfahren dar, sondern zwei Möglichkeiten, zusätzliche Gewässerbodenpunkte zu extrahieren.
In alle Beiträgen wird das Potential der erweiterten Prozessierungsmethoden an ALB-Befliegungsdaten eines Abschnittes des Flusses Elbe zwischen Klöden und Elster untersucht. Für die Evaluierung der Prozessierungsergebnisse kamen zum einem die Gewässerbodenpunkte der OWP und Daten von schiffgestützten hydroakustischen Vermessungen (MBES) zum Einsatz. Aufgrund der fehlenden übergeordneten Genauigkeit der OWP-Daten und der Echolotmessungen sind diese Daten als Vergleichsdaten zu betrachten.

3.1 Signalbasiertes nichtlineares Full-Waveform Stacking

Beitrag 1 – Signalbasierte Full-Waveform Stacking-Methode

Der erste Beitrag konzentriert sich auf die Vorstellung der Funktionsweise des sigFWFS. Zudem zeigen erste Untersuchungen an kleineren Testgebieten sowie ein Vergleich der Ergebnispunktwolken mit Echolotdaten, dass der Einsatz des sigFWFS für den verwendeten ALB-Datensatz zu einer Steigerung der auswertbaren Eindringtiefe und zu einer Erhöhung der Gewässerbodenabdeckung mit ALB-Punkten geführt hat und somit ein Mehrwert erzielt werden konnte. Für die Prozessierung kamen zum Teil einfache Methoden bzgl. Filterung, horizontaler Wasseroberflächenelementen und Auswertung der Ergebnisse zur Anwendung.

Der Beitrag wurde veröffentlicht in: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* mit dem Titel **„Detection and Extraction of Water Bottom Topography from Laserbathymetry Data by Using Full-Waveform-Stacking Techniques“**

Art des Beitrages:	Konferenzbeitrag (ISPRS GeoSpatialWeek 2019 in Enschede (NL))
Autoren:	David Mader[1], Katja Richter[1], Patrick Westfeld[2], Robert Weiß[3], Hans-Gerd Maas[1] [1]Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden, DE [2]Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Rostock, DE [3]Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, DE
Publikations-verlauf:	Abstract im Februar 2019 eingereicht und im März 2019 angenommen, kompletter Beitrag am 05.Juni 2019 veröffentlicht
vollständige Referenz:	Mader, D., Richter, K., Westfeld, P., Weiß, R. und Maas, H.-G. (2019). "Detection and Extraction of Water Bottom Topography from Laserbathymetry Data by Using Full-Waveform-Stacking Techniques". *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 1053–1059
ISSN:	2194-9034
DOI:	10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1053-2019

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 2019
ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands

DETECTION AND EXTRACTION OF WATER BOTTOM TOPOGRAPHY FROM LASERBATHYMETRY DATA BY USING FULL-WAVEFORM-STACKING TECHNIQUES

D.Mader[1,*], K. Richter[1], P. Westfeld[2], R. Weiß[3], H.-G. Maas[1]

[1] Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität Dresden, Germany
(david.mader, katja.richter1, hans-gerd.maas)@tu-dresden.de
[2] Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH), Section Geodetic-hydrographic Techniques and Systems, Germany
patrick.westfeld@bsh.de
[3] German Federal Institute of Hydrology, Germany - weiss@bafg.de

Commission II - WG II/9

KEY WORDS: LiDAR, bathymetry, full-waveform processing, full-waveform-stacking

ABSTRACT:

Airborne LiDAR bathymetry allows an efficient and area-wide acquisition of water bottom points in shallow water areas. However, the measurement method is severely limited by water turbidity, impending a reliable detection of water bottom points at higher turbidity or in deeper water bodies. This leads to an incomplete acquisition of the water bottom topography. In this contribution, advanced processing methods are presented, which increase the penetration depth compared to the original processed data and enable a reliable extraction and detection of bottom points in deeper water bodies. The methodology is based on the analysis of correlated neighborhood information assuming a steady water bottom. The results confirm a significantly higher penetration depth with a high reliability of the additionally extracted water bottom points along with a larger coverage of the water bottom topography.

1. INTRODUCTION

Changes in water bottom topography can result from both, natural causes as well as human-induced activities. For instance, riverbeds underlie permanent natural change processes due to water currents and sedimentation. In addition, waterways are an important mode of transport and in Germany, for instance, the German Waterway and Shipping Administration (WSV) is responsible for their maintenance and an active waterway management (e.g. lowering of groin, clearing out of groin fields, widening of streaklines). For this purpose and for scientific applications, such as investigations of the German Federal Institute of Hydrology (BfG), reliable information about changes are required. Similarly, coastal areas undergo constant modifications affected by natural erosion processes. The monitoring of these morphologic changes are important for coastal protection purposes (Christiansen, 2016). For water bottom acquisition several measurement methods are available, such as echo sounders, airborne LiDAR bathymetry (ALB) and multimedia photogrammetry. Echo sounder sensors use the propagation of acoustic waves under water to determine the topography of water bottoms (similar to the laser scanning time of flight principle). It is an established method for a reliable acquisition of shallow water (e.g. riverbeds) and deep water (e.g. seabeds) bottom topographies in compliance with the minimum standards for hydrographic surveys (International Hydrographic Burea, 2011). The measurements are carried out from a vessel equipped with high-precision and high performance GNSS and IMU sensors for an accurate estimation of the position and orientation. With this measurement system a comprehensive data acquisition is time-consuming and expensive, but for deep water bodies without alternative. Airborne LiDAR bathymetry provides an area-wide measurement of the water bottom topography in shallow waters, enabling an efficient monitoring of change processes. For that purpose, the water body is scanned by ALB systems with green laser wavelength, whereby a near-infrared laser can be optionally used to support water surface detection. A green laser pulse emitted at a known position and orientation interacts with all objects along the pathway. The backscattered

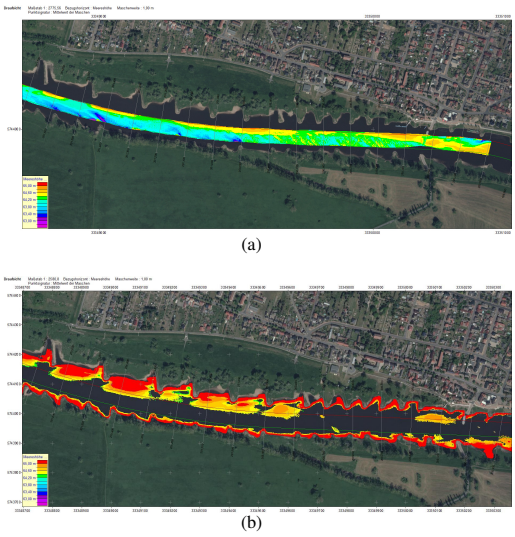


Figure 1. Water bottom points displayed color-coded by their height coordinate of a part of the river Elbe based on (a) echo sounders and (b) ALB measurements. Source: German Federal Institute of Hydrology (BfG) and Waterways and Shipping Office Dresden (WSA)

*Corresponding author

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 2019
ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands

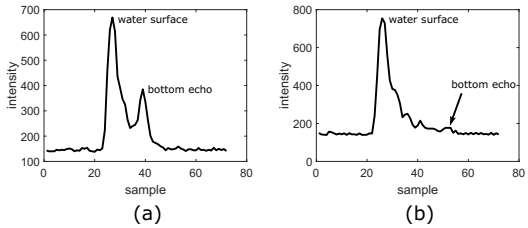


Figure 2. Full-waveforms with (a) two clearly visible signals for the water surface echo and the bottom echo as well as (b) water surface echo and bottom echo with less intensity.

signal is recorded by the sensor's detector using full-waveform digitization. Optionally, discrete 3D point coordinates can be derived by online data processing. Figure 1 shows echo sounders and airborne LiDAR bathymetry data of a part of the river Elbe. Due to the measurement principle the echo sounders data is limited to the waterway but has no data gaps. The result of the standard processed ALB measurements covers partially shallow waters areas, however, the water bottom is not captured completely. Obviously, the technology is mainly limited by water turbidity (Guenther , Goodman, 1978), preventing a reliable extraction of bottom points in turbid and deep waters, as the signal strength of the bottom echo is attenuated by the water column. In an ideal case, the full-waveform would show two clearly detectable signals, the water surface echo and the water bottom echo (fig. 2a). In turbid and deeper water bodies, many full-waveforms contain more than one potential weak bottom peak, so that the correctness of the detected bottom point cannot be guaranteed (fig. 2b). The goal of this contribution is the development of an extended processing approach considering correlated neighborhood information to increase (1) the penetration depth of the water body, (2) the coverage of captured water bottom topography and (3) the density of bottom points with a high reliability.

2. STUDY AREA AND DATA ACQUISITION

For the development and evaluation of the extended approach, measurement data of a part of the river Elbe between the German towns Klöden and Elster was used. Several subregions were selected, which are shown in Figure 3. The aerial survey of the region took place in spring 2015 with the bathymetry laser scanner RIEGL VQ-880-G. Additionally to the provided 3D point cloud, the backscattered signal at the receiver was digitized and recorded as a full-waveform (RIEGL, 2017). The recorded full-waveforms consist of 60 to 200 samples (intensity values) with a constant sampling interval of 0.575 ns, corresponding to 6.45 cm sampling distance under water. A data density for the water body of up to 35 points/m^2 was achieved. The processing areas include the water body and the close shore area. For the development and execution of the extended methodology, the full-waveform data (fig. 4(a)), the (classified) point cloud resulting from standard processing (fig. 4(b)) and the trajectory (fig. 4(c)) was used. The evaluation of the results was carried out on the basis of the water bottom points obtained from the provider (fig. 4(d)) as well as the echo sounder data of the waterway (fig. 4(e)), acquired by the vessel ROSSLAU of the German Federal Waterways and Shipping Office Dresden (WSA) in spring 2015.

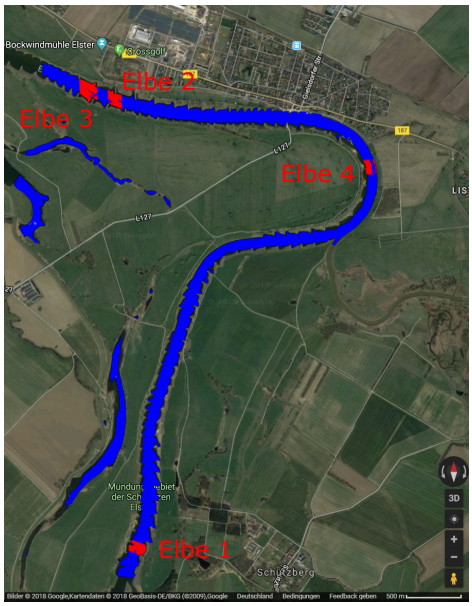


Figure 3. The study area (part of the river Elbe) including subregions for development and evaluation of the extended approach. (Map data ©2018 Google)

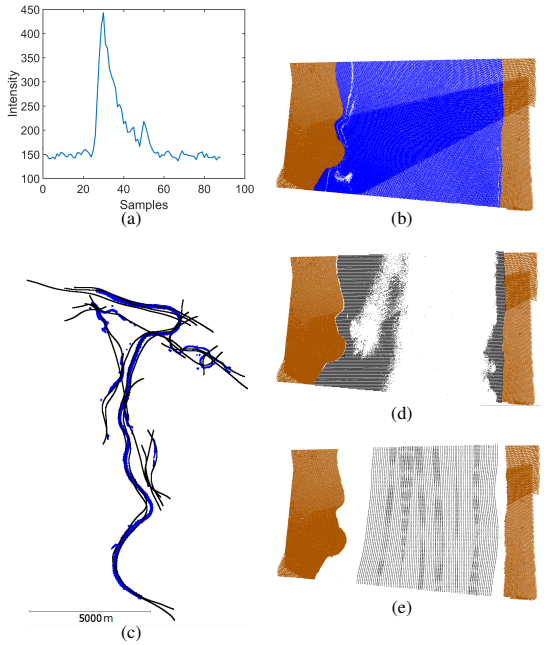


Figure 4. Data used for the analysis: (a) full-waveform data, (b) the points of water surface from the standard processing and (c) the trajectory. For the evaluation of the results of the extended approach (d) ALB bottom points from standard processing and (e) echo sounder data are used.

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 2019
ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands

3. METHODS

The basic idea of our approach is the limitation of the search range for the bottom echo in the full-waveforms based on an analysis of correlated neighborhood information for a reliable water bottom point extraction by using the data shown in section 2. The main data processing chain can be divided into three work steps (fig. 5). Firstly, the acquired data is mapped into a regular grid, whose size is adapted to the data density and the expected bottom topography (sec. 3.1). In the next step, an analysis of neighbor information related to the water depth is executed. In detail, all measured full-waveforms within a grid cell are processed by full-waveform-stacking techniques with the goal of defining a small search corridor, which is applied for water bottom echo detection in each full-waveform (sec. 3.2). Thereby averaging effect should be avoided. This is supported by information on the water depth of surrounding grid cells (sec. 3.3) to detect gross errors. Finally, the results from the neighborhood analysis are used for a reliable detection of the water bottom echo in every single full-waveform followed by the extraction of the water bottom point (sec. 3.4).

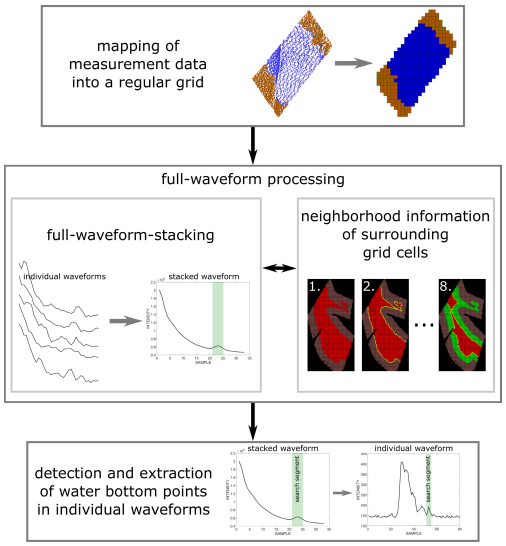


Figure 5. Workflow of extended processing of full-waveform data.

3.1 Mapping of survey data

The combined analysis and usage of neighborhood information is founded on the assumption that adjacent full-waveforms have similar or correlated properties (e.g. water bottom spots). A joint evaluation leads to a more reliable determination of water depths and a better identification of errors in the waveform. For this purpose, it is necessary to specify a suitable definition of neighborhood with regard to the number, spatial distance, and distribution of potentially adjacent measurement data. The present measurement campaign generally has a rather uniform point distribution and a high point density of up to 35 points/m^2. For the first development and evaluations, a simple mapping of the measurement values into a regular grid related to the water surface points was used (fig. 6). The point density and water bottom topography are important factors for the determination of the grid cell size. By expanding this, the

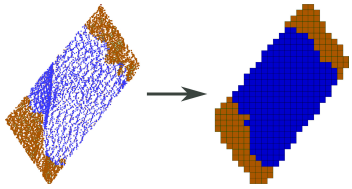


Figure 6. Mapping of measurement data to grid cells and their classification in land grid cells (brown) and water grid cells (blue).

number of full-waveforms and thus the reliability of the results increases. On the other hand, the correlation between the measured data decreases with increasing distance to each other. This can lead to a kind of smoothing effect, similar to a low-pass filtering. As a consequence, water bottom echoes might be identified potentially either incorrect or not at all. For the case presented here, empirical investigations revealed a suitable grid cell size between 2.5 m × 2.5 m to 3 m × 3 m resulting in 218 to 315 measurement values per grid cell. After creating a regular grid, the measured data is assigned to the grid cells depending on their spatial position. Therefore, the raster cells contain:

- the measured full-waveforms (fig. 4(a))
- original processed data obtained from the provider (fig. 4(b))
- origin of the pulse emission (fig. 4(c))
- classification (land/water) on basis of surface points (first echoes)

In the course of the processing, a rough approximation of the water depth based on the information of the surrounding grid cells (section 3.3) as well as a stacked full-waveform (section 3.2) are determined. The mapping method worked properly for the measurement campaign presented here. Nevertheless, the empirical determination of the grid cell size is not optimal and for the processing of water bottom topographies with different characteristics also not practicable. An automatic definition of the grid cell size based on the properties of the measured data is not trivial due to the great influence of the unknown water bottom topography. Further investigation on the spatial distribution of the data is required. The following variants can be considered:

- a flexible adaptation of the grid cell size during processing, depending on the depth of the water body and, if applicable, the degree of turbidity; low turbidity and low water depths lead to smaller grid cells and vice versa
- the determination of a predetermined number of the spatially closest measured data for each full-waveform to be processed
- the inclusion of all measurement data that has a maximum position distance in lateral direction at the water surface

3.2 Full-waveform-stacking

The determination of the water depth of a single grid cell is based on using correlated information of all full-waveform data, included in such a grid cell. A suitable and efficient method of

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 2019
ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands

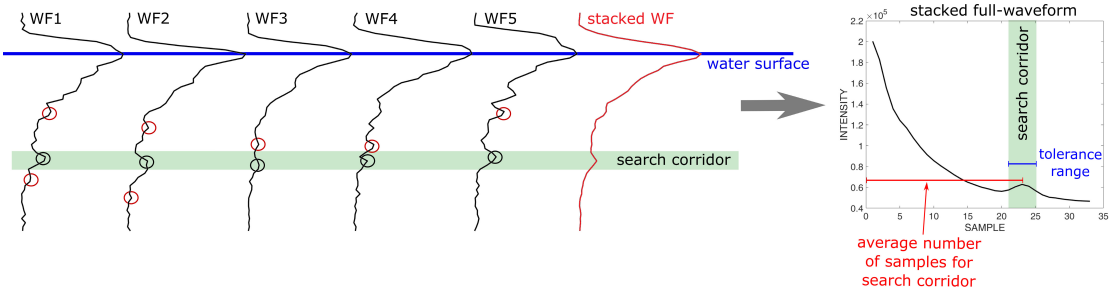


Figure 7. Basic principle of full-waveform-stacking applied to ALB pulse echo waveforms. The green marked area corresponds to the reduced search corridor for water bottom echoes in the original full-waveforms (black), based on the analysis of the stacked full-waveform (red).

combining the measured full-waveforms is a stacking approach, similar to the approaches presented by (Stilla et al., 2007), (Roncat , Mandlburger, 2016) and (Plenkers et al., 2013). For this purpose, all full-waveforms of the respective grid cell are firstly aligned to each other (for example, at the water surface peak) and secondly summed up (Figure 7). The analysis of such averaged full-waveforms reduces the random noise component of the returning signal and erratic backscatter effects within the water column. Recurring features (including water bottom points) with weak signal intensity are maintained and are in consequence better and more reliably detectable. As a result, a search corridor is defined by an average number of samples between the water surface and the assumed bottom plus a tolerance range, whereby the detection of the actual bottom echo in the individual full-waveform in section 3.4 is supported.

3.3 Neighborhood relation between grid cells

A reliable grid cell processing (sec. 3.2) requires approximate values for the water depth to avoid ambiguities in water bottom point extraction. For this purpose, we use water depth information of surrounding grid cells to derive control values for the single grid processing. In principle, the processing of the measuring area is executed iteratively, where in every iteration step solely grid cells with surrounding water depth information are processed. After every iteration there are more grid cells with depth information available, which are used for the next iteration step. As there are no water grid cells with water depth information in the initial iteration step, the processing starts at the grid cells on the shore. The water depth of the land grid cells is set to 0.0 m for the calculations. Based on this, the remaining grid cells are processed iteratively towards the center of the water body (fig. 8) until all grid cells have been processed.

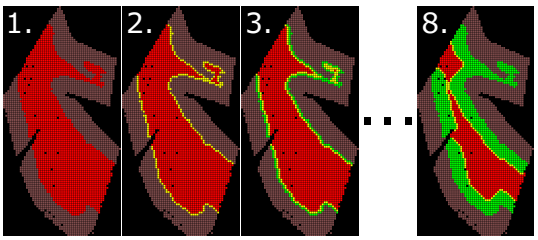


Figure 8. Iterative processing of the measuring area from shore to water center. Brown = land grid cells. Yellow = currently processed grid cell. Red = non processed grid cells. Green = processed grid cells.

3.4 Detection of bottom echo and extraction of bottom point

Based on the results of the full-waveform-stacking, the most likely position of the water bottom echo can be detected in each measured full-waveform. For this purpose, each full-waveform is analyzed in the determined search corridor and, if present, a local maximum is detected. The isolation of a small search corridor in the original full-waveform based on the full-waveform-stacking is advantageous here, as - especially on rough water bottom - that smoothing effects by the full-waveform-stacking method are minimized. Finally, the bottom point coordinates can be calculated by using the known beam geometry and the number of samples or running time of the laser beam between the water surface and the water bottom.

$$\mathbf{P}_{wb} = \mathbf{P}_{ws} + t_2 \cdot c_w \cdot \mathbf{X}_2 \tag{1}$$

Figure 9 and equation 1 illustrate the principal beam geometry from the origin of pulse emission $\mathbf{P}_{ls}$ via the water surface $\mathbf{P}_{ws}$ to the water bottom point $\mathbf{P}_{wb}$. The direction vector $\mathbf{X}_1$ results from the origin of the pulse emission $\mathbf{P}_{ls}$ and the water surface point $\mathbf{P}_{ws}$. The coordinates of the water surface point are taken from the original processed data obtained from the provider. On the basis of the direction vector $\mathbf{X}_1$ as well as the local water surface normal, calculated from neighboring water surface points (Richter et al., 2018), the refraction correction according to the Snell's Law is applied. Consequently, the new propagation direction $\mathbf{X}_2$ of the laser beam can be determined. With the transit time t_2, adjusted in accordance with the propagation velocity from light in water c_w, the water bottom point is calculated.

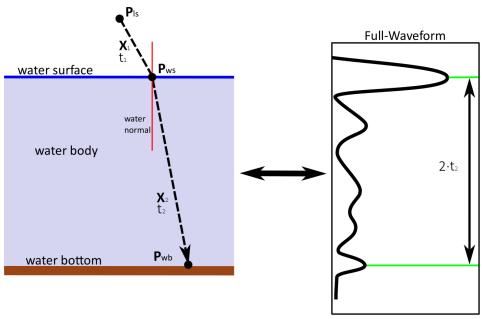


Figure 9. Schematic illustration of water bottom point calculation.

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 2019
ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands

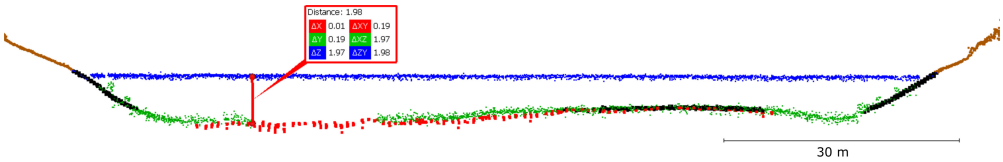


Figure 10. Profile of the riverbed of the river Elbe. Black = Points from online-waveform-processing. Blue = water surface points. Red = points from echo sounder reference. Green = points from full-waveform-stacking method.

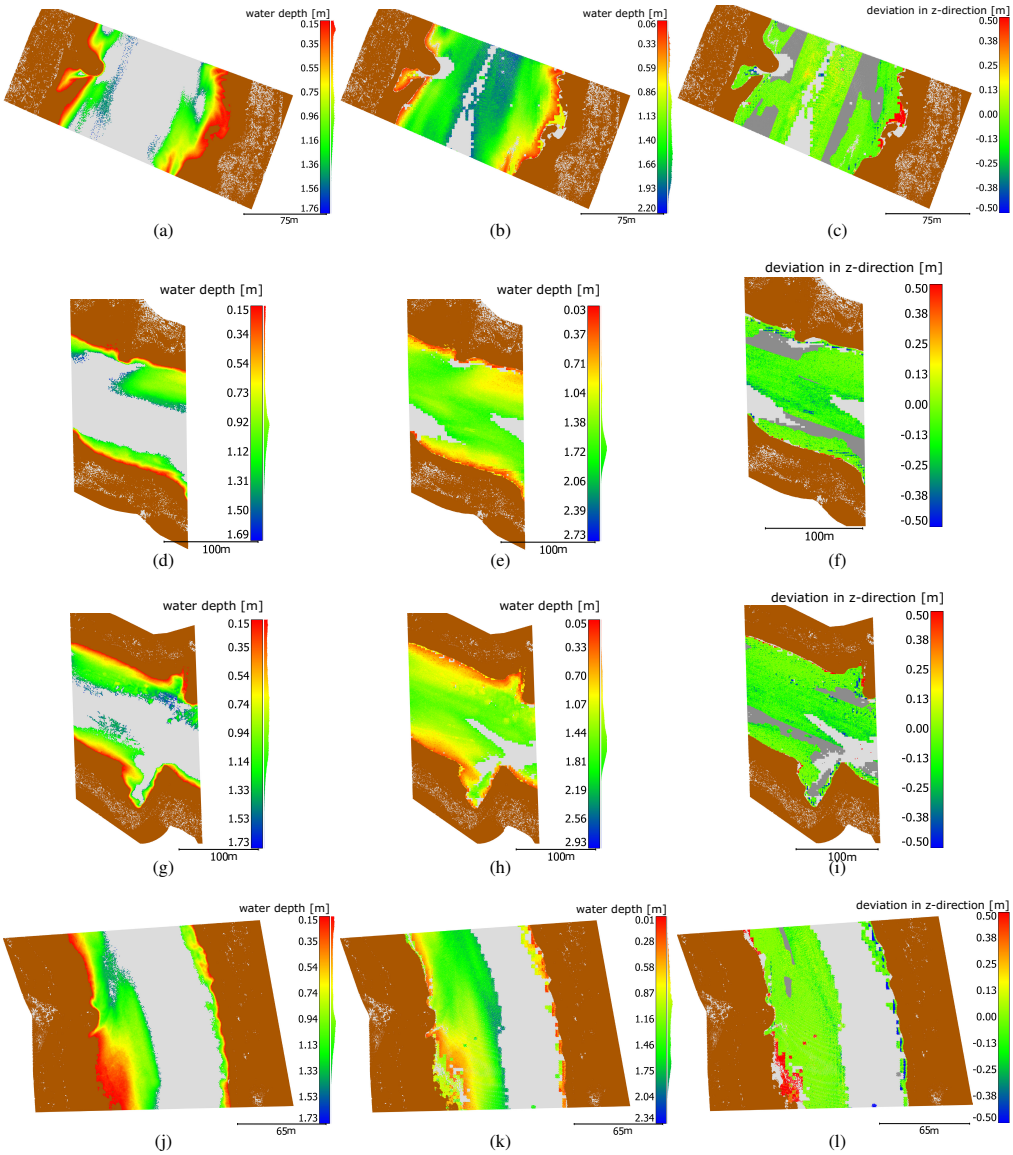


Figure 11. Evaluation of the results of Elbe 1 (a)-(c), Elbe 2 (d)-(f), Elbe 3 (g)-(i) and Elbe 4 (j)-(l). The left column shows the standard processed points with their water depth (color-coded) , the middle shows the new processed bottom points with their water depth (color-coded) and the right column shows the results of the comparison of both data related to the z-direction, where the dark-grey areas are incomparable new processed points (no comparative data available). Brown points are land points.

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 2019
ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands

Table 1. Line 1-2 show the mean deviation value and the RMS-deviation of the height component between new recognized points and the comparative data. Line 3-4 present the number of points with a max. height-deviation of 0.25 m related to the number of all recognized points and the percentage.

	Elbe 1	**Elbe 2**	**Elbe 3**	**Elbe 4**
mean deviation	0.039 m	0.046 m	0.042 m	0.058 m
RMS	0.13 m	0.10 m	0.10 m	0.18 m
max. 0.25 m	159374 / 169390	514209 / 529970	637071 / 659140	124951 / 136289
	94.09 %	97.03 %	96.65 %	91.68 %

4. RESULTS

In this section, the results of the processed subregions are presented and evaluated in regard to accuracy and reliability. For this, reference data with a significantly higher accuracy would be necessary but are not available. The data from standard processing and the echo sounder measurements probably have a similar error budget as the results. Consequently, they are thus used as comparative data. Furthermore, accuracy requirements have to be defined to assess the results regarding the reached accuracy. Therefor, the minimum standard for hydrographic surveys of 0.25 m released by the International Hydrographic Organization (International Hydrographic Burea, 2011) is used for the evaluation of the results.
The measured data was processed with a grid cell size of 2.5 m × 2.5 m with up to 218 points per grid cell. An initial visual analysis of the results using a profile of the study area (fig. 10) illustrates that the new bottom points represent large parts of the water bottom well and reliably with penetration depths of up to approximately 1.97 m, compared to 1.50 m for the standard processing. For the accuracy and reliability analysis of the results, the mean deviation value and the root mean square deviation (RMS) of the height components between results and comparative data is used (tab. 1, line 1-2). In addition, the reliability of the newly detected water bottom points is evaluated by determining the percentage of points, which deviation's is equal or less than 0.25 m in the height component (tab. 1, line 3-4). The analysis of the results of the study areas confirms a good representation of the water bottom topography by the newly detected ground points. The mean deviations in z-direction are all positive in a range of 3.9 cm and 5.8 cm, which means the new bottom points are by trend above the comparative points (considering the evaluation proceeded in a north-east-down coordinate system). The RMS deviations with respect to the height component to the comparative data are between 0.10 m and 0.18 m (fig. 11 and tab. 1). The percentage of points which do not exceed a height deviation of 0.25 m is 91.68 % to 97.03 %. The good height accuracy and the high reliability as well as an extended penetration depth of up to 1.95 m lead to a more extensive coverage of the water bottom topography (fig. 11).

5. FUTURE EXTENSION OF THE NEW APPROACH - CORRECTION OF SIGNAL ATTENUATION

The attenuation of the green laser pulse is mainly induced by absorption and scattering effects at water molecules in the water column. Depending on the degree of turbidity and the water depth, the water bottom echoes can become too weak for the reliable detection in a single waveform processing. To compensate the attenuation effects, Richter et al. (2017) presents an individual pulse history based attenuation correction for each laser pulse using the differential backscatter cross section. The basic idea of the correction method is the step-wise amplification of the signal intensities with an appropriate correction factor. The correction factor depends on the pulse history and is derived from the data set itself (fig. 12). However, the noise is amplified too, which is a disadvantageous factor for the detection of bottom points. In further work the method for correction of signal attenuation will be integrated and tested in our neighborhood-based approach.

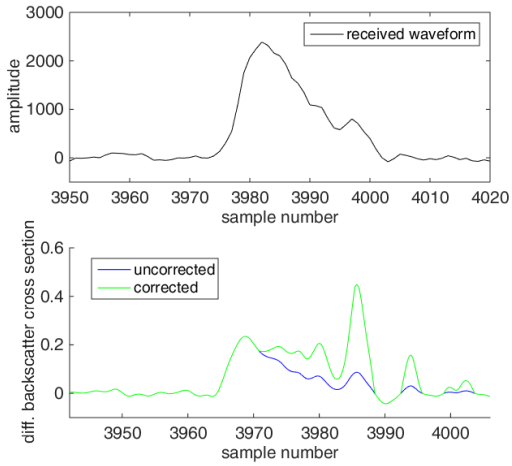


Figure 12. Recorded waveform (top), differential backscatter cross section (bottom blue) and attenuation-corrected differential backscatter cross section (bottom green) (Richter et al., 2017).

6. CONCLUSSION AND FUTURE WORK

The paper presents a novel approach for full-waveform processing of airborne LiDAR bathymetry data for detection and extraction of water bottom points. The basic idea is the inclusion of neighborhood information of each full-waveform by using full-waveform-stacking techniques. As a result of the full-waveform-stacking, there is a small search corridor applied for the water bottom detection. As a consequence of this procedure, averaging or smoothing effects during the extraction of the water bottom points can be minimized. The objective of an increased penetration depth and a higher data density, and thus a complete detection of the riverbed with a high reliability has been achieved to a high degree. The results demonstrate the good applicability of the developed method to the given data. The increase of the penetration depth from approx. 1.50 m up to 1.95 m corresponds to an improvement of 30 %. This directly leads to a larger coverage of the water body topography by the newly recognized points. The evaluation with the comparative data of the riverbed proves

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W13, 2019
ISPRS Geospatial Week 2019, 10–14 June 2019, Enschede, The Netherlands

the reliability by using full-waveforms as data basis. About 96.04 % of the detected points did not exceed a height deviation of 25 cm from the comparative data. The RMS deviations in the height component for all newly detected points was 0.11 m and shows a good height accuracy. However, the gap to the echo sounder measurements could not always be closed, since penetration depths greater than 1.95 m would have been necessary. Nevertheless, the processed data represent an improvement or extension of the data set resulting from standard processing. The methods developed offer potential for further adjustments and improvements so that the following goals are pursued in future work:

- adaptive neighborhood definition when selecting full-waveforms for full-waveform-stacking
- investigations of the potential of an alternative spatial division of the processing areas in conjunction with the full-waveform-stacking (see section 3.1)
- improving of the point detection and extraction of more dynamic water body topographies (e.g shore areas)
- developing additional strategies or statistical tests to increase the reliability for extracting water bottom points
- further investigations regarding the use of attenuation corrected data for an additional increase of the penetration depth (see section 5)
- extension of the approach to consider wave pattern induced systematic coordinate errors (Westfeld et al., 2017)

Furthermore, the potential of the advanced processing methods presented here for application to maritime waters will be investigated. In maritime waters, a lower turbidity and thus a higher penetration depth can often be assumed. In addition, other conditions such as the influence of maritime waves will represent new challenges. It is to be expected that the transfer of the presented processing methods to maritime ALB data leads to an improvement of the recording of seabed topographies.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

The research project on airborne LiDAR bathymetry is funded by the German Research Foundation (DFG). We also thank the German Federal Institute of Hydrology for the research assignment of a pilot study, which allowed intensive practical applications of the developed methods. Additionally, we thank the Waterways and Shipping Office Dresden (WSA) for the provision of the survey data, and the company Airborne Hydro Mapping GmbH (AHM) for the good cooperation in the preparation of the survey data.

REFERENCES

Christiansen, L., 2016. New techniques in capturing and modelling of morphological data. *Hydrographische Nachrichten*, HN 105, 20–23.

Guenther, G. C., Goodman, L. R., 1978. Laser applications for near-shore nautical charting. *Ocean Optics V*, 160, International Society for Optics and Photonics, 174–184.

International Hydrographic Burea, 2011. Manual on Hydrography, Publication C-13. International Hydrographic Organization.

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, 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. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.

Richter, Katja, Maas, Hans-Gerd, Westfeld, Patrick, Weiß, Robert, 2017. An approach to determining turbidity and correcting for signal attenuation in airborne lidar bathymetry. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85, 31–40.

RIEGL, 2017. Waveform Extraction Library. Technical report, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH.

Roncat, Andreas, Mandlburger, Gottfried, 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. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, W49A.

Westfeld, Patrick, Maas, Hans-Gerd, Richter, Katja, Weiß, Robert, 2017. Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128, 314–325.

Beitrag 2 – Signalbasierte Full-Waveform Stacking-Prozessierung

Dieser Beitrag nutzt das sigFWFS-Verfahren aus Beitrag 1 und stellt eine verbesserte Gesamtprozessierung bzgl. Filtermethoden und Full-Waveform Analysen vor. Des Weiteren wurden großflächigere Untersuchungsgebiete des Flusses Elbe prozessiert und eine tiefgründigere Validierung bzw. Analyse mit Echolotmessungen (Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsangaben in Abhängigkeit der Gewässertiefe) durchgeführt, mit dem Ziel repräsentativere Ergebnisse zu erhalten und das Potential dieses Verfahrens besser einschätzen zu können.

Der Beitrag wurde veröffentlicht in: *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* mit dem Titel **„Potential of a Non-linear Full-Waveform Stacking Technique in Airborne LiDAR Bathymetry“**

Art des Beitrages:	begutachteter wissenschaftlicher Artikel, Fachzeitschrift
Autoren:	David Mader[1], Katja Richter[1], Patrick Westfeld[2], Hans-Gerd Maas[1] [1]Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden, DE [2]Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Rostock, DE
Publikations-verlauf:	am 29. Dezember 2020 eingereicht, am 25. März 2021 angenommen, am 02.Juni 2021 veröffentlicht und am 08.Juli.2022 korrigiert
vollständige Referenz:	Mader, D., Richter, K., Westfeld, P. und 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(2), 139–158
ISSN:	2512-2789 (Print) und 2512-2819 (Online)
DOI:	10.1007/s41064-021-00147-y

PFG (2021) 89:139–158
https://doi.org/10.1007/s41064-021-00147-y

ORIGINAL ARTICLE

Potential of a Non-linear Full-Waveform Stacking Technique in Airborne LiDAR Bathymetry

Demonstration of Full-Waveform Stacking Techniques on Data from the Elbe River

David Mader[1] · Katja Richter[1] · Patrick Westfeld[2] · Hans-Gerd Maas[1]

Received: 29 December 2020 / Accepted: 25 March 2021 / Published online: 2 June 2021
© The Author(s) 2021, corrected publication 2022

Abstract
Airborne LiDAR bathymetry is an efficient measurement method for area-wide acquisition of water bottom topography in shallow water areas. However, the method has a limited penetration depth into water bodies due to water turbidity. This affects the accuracy and reliability of the determination of water bottom points in waters with high turbidity or larger water depths. Furthermore, the coverage of the water bottom topography is also limited. In this contribution, advanced processing methods are presented with the goal of increasing the evaluable water depth, resulting in an improved coverage of the water bottom by measurement points. The methodology moves away from isolated evaluation of individual signals to a determination of water bottom echoes, taking into account information from closely adjacent measurements, assuming that these have similar or correlated characteristics. The basic idea of the new processing approach is the combination of closely adjacent full-waveform data using full-waveform stacking techniques. In contrast to established waveform stacking techniques, we do not apply averaging, which entails low-pass filtering effects, but a modified majority voting technique. This has the effect of amplification of repeating weak characteristics and an improvement of the signal-noise-ratio. As a consequence, it is possible to detect water bottom points that cannot be detected by standard methods. The results confirm an increased penetration water depth by about 27% with a high reliability of the additionally extracted water bottom points along with a larger coverage of the water bottom topography.

Keywords LiDAR · Bathymetry · Full-waveform processing · Full-waveform stacking

Zusammenfassung
Potential nicht-linearer Full-Waveform Stacking Methoden in der Airborne LiDAR-Bathymetrie. Die Airborne LiDAR-Bathymetrie ist eine effiziente Messmethode zur flächendeckenden Erfassung der Gewässersohlentopographie in Flachwasserbereichen. Allerdings ist die Eindringtiefe der Methode aufgrund der Gewässertrübung limitiert. In Gewässern mit hoher Trübung oder größerer Wassertiefe wird dadurch die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der bestimmten Gewässerbodenpunkte beeinträchtigt. Darüber hinaus ist auch die Erfassung der Gewässersohlentopographie begrenzt. In diesem Beitrag werden Methoden zur Verarbeitung der Messdaten vorgestellt, die auf eine Erhöhung der auswertbaren Wassertiefe sowie auf eine verbesserte Erfassung des Gewässerbodens durch Messpunkte abzielen. Statt der isolierten Auswertung von Einzelsignalen erfolgt die Bestimmung von Wasserbodenechos unter Berücksichtigung von Informationen aus dicht benachbarten

✉ David Mader
david.mader@tu-dresden.de

Katja Richter
katja.richter1@tu-dresden.de

Patrick Westfeld
patrick.westfeld@bsh.de

Hans-Gerd Maas
hans-gerd.maas@tu-dresden.de

[1] Technische Universität Dresden, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Helmholtzstr. 10, 01069 Dresden, Germany

[2] Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH), Section Geodetic-hydrographic Techniques and Systems, Neptunallee 5, 18057 Rostock, Germany

Messungen, wobei davon ausgegangen wird, dass diese ähnliche oder korrelierte Eigenschaften aufweisen. Grundidee des neuen Verarbeitungsansatzes ist die Kombination dicht benachbarter Full-Waveformdaten unter Nutzung von Full-Waveform Stacking Methoden. Im Gegensatz zu etablierten Full-Waveform Stacking Verfahren erfolgt keine Mittelwertbildung, die eine Tiefpassfilterung bewirkt, sondern ein modifiziertes Mehrheitsverfahren. Auf diese Weise werden sich wiederholende schwache Merkmale verstärkt und das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert. Infolgedessen ist es möglich, Wasserbodenpunkte zu detektieren, die mit Standardmethoden nicht erkannt werden können. Die Ergebnisse bestätigen eine um etwa 27% erhöhte Eindringtiefe bei hoher Zuverlässigkeit der zusätzlich extrahierten Wasserbodenpunkte sowie eine verbesserte Abbildung der Gewässerbodentopographie.

1 Introduction

Water bodies are often subject to significant dynamic changes and may therefore require continuous monitoring. On the one hand, changes in water bottom topography are the result of human activities, e.g., river regulation or cross structures for shipping to raise water levels (Anderer et al. 2011). On the other hand, riverbeds are subject to natural changes due to erosion and sedimentation caused by the flow of water, river floods, or sudden changes caused by natural disasters (Charlton 2007; Benito and Hudson 2010). Thus, permanent monitoring of the riverbed is a required waterway management task to guarantee the good condition of the river. If necessary, hydraulic engineering interventions such as lowering of groins, clearing out groin fields, or widening of streaklines might become necessary. Similar effects occur in coastal areas after storm or flood events. For coastal protection purposes, monitoring of these morphologic changes is important (Christiansen 2016). Continuous measurement or monitoring of the water bottom topography is especially necessary in shallow water areas of the heavily trafficked North and Baltic Seas to guarantee safe navigation for shipping.

In Europe, the European Water Framework Directive (EuropeanUnion 2000) specifies that inland and coastal waters (surface waters) are to be protected, enhanced and restored [Art. 4, "Environmental objectives" in EuropeanUnion (2000)]. In addition, the EU member states are responsible for the permanent monitoring of the condition of the waters. For inland waters, for example, this includes the aforementioned active waterway management. Regarding the maritime areas, topographic surveying of the seabed and tidal flats, recording of underwater obstacles, and mapping of the coastline and other objects in the coastal area play an important role.

The most common and established measuring method for water bottom acquisition is shipborne multi-beam echo sounding (MBES) (Lurton 2002). Georeferencing is done by high-precision GNSS and IMU systems. The acquisition of large areas is very time consuming and therefore expensive, but due to its penetration depth in deeper water sections, it is indispensable for hydrographic surveys. Airborne LiDAR bathymetry (ALB) represents an alternative for the acquisition of water bottom topography of shallow water areas, where echo sounding is rather inefficient. The water body is scanned by ALB systems with green laser pulses. To support the water surface detection, optional use of a near-infrared laser is possible (Guenther et al. 2000). The green laser pulse is emitted from the ALB system at a known position and interacts with all objects along its path such as the water surface, small particles in the water column, and the water bottom (Fig. 1). In addition, the water itself affects the propagation speed of the laser beam. The backscattered signals arriving at the receiver are recorded by the ALB system's detector. The position and orientation of the laser scanner as well as the deflection of the emitted laser beam are also provided by high-precision GNSS, IMU sensors, and the mirror angle.

ALB systems come with the advantages of extensive and time-efficient water body measurement. However, the method has a limited penetration depth into the water body, affected by interactions of the emitted laser pulse with the water column. The signal strength is weakened by water turbidity to a high degree (Guenther and Goodman 1978). Diffuse scattering and absorption attenuate the signal strength within the water column (Guenther 1985). Furthermore, the scattering characteristics and the reflectivity of the water bottom lead to an additional attenuation of the signal. Finally, the power level and the divergence of the laser beam are device-specific properties that also have an influence on the signal energy. All of these facts have a great impact on full-waveform data processing and the subsequent detection of water bottom points. Figure 2 illustrates the issue using two exemplary signals. Figure 2a represents the ideal case with distinctive signal echoes from the water surface and water bottom enabling reliable detection of the water bottom echo. In contrast, Fig. 2b shows a typical full-waveform in turbid or deeper water bodies without a pronounced ground echo, where the bottom is thus not always reliably detectable.

In Richter et al. (2017), we presented an approach to improve the bottom echo detection in deep water areas by correcting the laser pulse history for attenuation effects. The approach is based on the individual processing of the recorded full-waveform signals. First, the signal decay coefficient is determined from the individual full-waveforms.

PFG (2021) 89:139–158

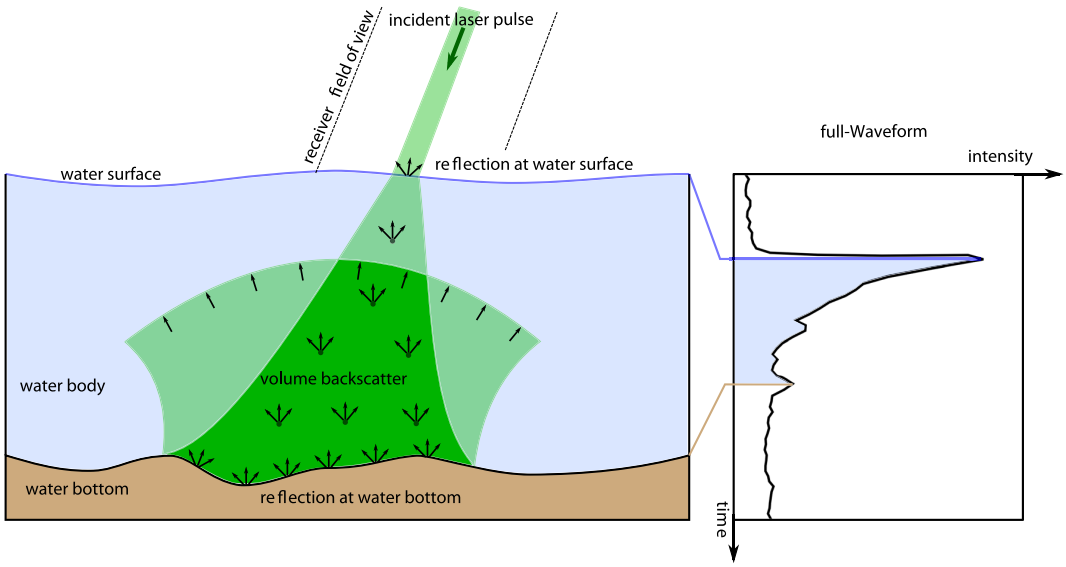


Fig. 1 Airborne LiDAR bathymetry beam propagation

Based on these coefficients, a correction model is applied on the raw full-waveforms, removing the turbidity effects from the received signal. As a result, weak water bottom echoes are amplified, facilitating the detection of water bottom points. Obviously, the amplification affects both ground echoes and noise, and thus, the developed method is limited to data sets with a high signal-to-noise ratio. In the presence of stronger noise, the amplification of the noise components in the signal again prevents reliable detection of weak bottom echoes.

Given that in an isolated analysis, a weak ground echo is hardly or not at all distinguishable from the detector's noise level, a reliable detection of these weak water bottom echoes requires further information. The combination of full-waveform data from closely adjacent measurements in the form of full-waveform stacking is a valuable possibility. In the literature, there are already various applications for the stacking of signals for peak detection purposes. Stilla et al. (2007) used full-waveform stacking in terrestrial laser scanning for weak pulse detection, which is below a noise-dependent threshold of pulse detection methods. In Plenkers et al. (2013), the stacking of seismic signals serves to detect local weak seismic activities. Roncat and Mandlburger (2016) use full-waveform stacking for the detection of water surfaces because the detection does not work reliably for data with a low signal-to-noise-ratio when using single laser shots. All of these applications clearly show the advantages of combining measured signals, namely, (1) the detection of weak events in recorded signals and (2) the increase or improvement of the signal-to-noise ratio. In Mader et al. (2019), the successful application of full-waveform stacking techniques to ALB measurement for water bottom detection and extraction was presented. By stacking closely adjacent full-waveforms, it was shown that the signal of weak water bottom peaks could be amplified and at the same time, the noise signal could be reduced. The methodology was applied iteratively from the shore to the middle of the water body. However, this approach was not optimal due to the unreliable determination of very shallow water depths that could lead to errors in further water bottom determinations.

This article presents an advancement of the approach presented in Mader et al. (2019) for processing bathymetric full-waveform data considering the correlated neighbour information and its application to a part of the Elbe River with a thorough evaluation of the results. Various methods were embedded in an extended processing scheme with the goal of improving the results regarding the detection of deeper water bottom points and the consequent increase of water bottom coverage. For this purpose, closely adjacent measurement data (full-waveforms) are evaluated and combined into a stacked full-waveform. Weak ground echo signals are amplified due their redundancy, and at the same time, the noise influence on the signal is reduced, allowing a more reliable detection of weak ground signals. This information is used in the individual full-waveform measurements for the extraction of the bottom signal and the associated determination of the water bottom point. Furthermore, analysis of the achieved results regarding the deviations compared to reference data (e.g., echo sounder measurements) is also an important aspect to prove the overall reliability of the approach.

The remainder of the paper is structured as follows. Section 2 contains information on the survey area, the

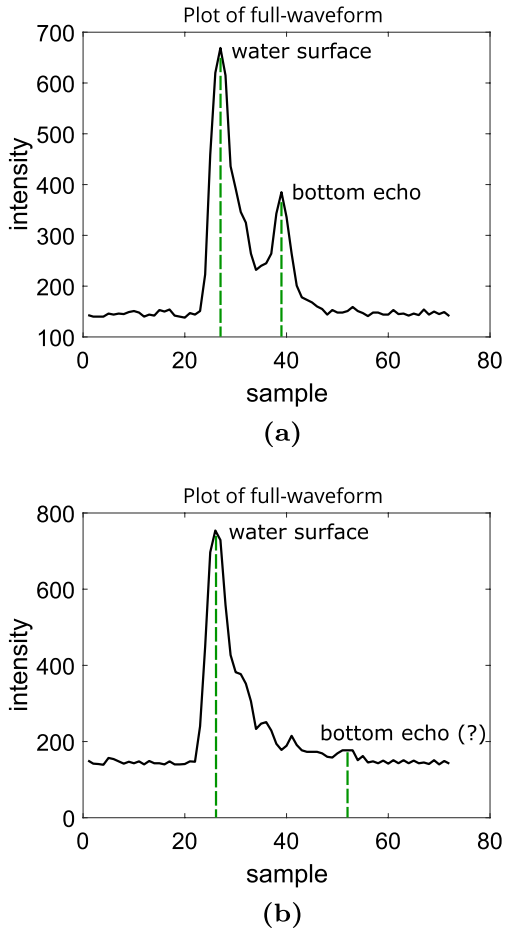


Fig. 2 Digitized ALB waveforms with **a** two clearly detectable echoes for water surface and water bottom. In **b**, water surface echo is clearly visible, but the weak water bottom echo is not reliably detectable

sensor specifications, and the data properties. In addition, the reference data and their accuracy for the evaluation of the results are presented. Section 3 explicates the applied methods with the main focus on combining the measurement data to realize the use of correlated neighbourhood information, i.e., the full-waveform stacking. Furthermore, this section details the tools for analysis, evaluation and filtering of the full-waveform stacking results, which should guarantee a high reliability. Section 4 presents the results of the extended processing algorithm using mean deviations, root mean square, mean absolute deviation (Hampel 1974; Sachs 1982), median absolute deviation (Sachs 1982) and reliability information compared to reference data. The article ends with a discussion about improvements and limits of the approach and a conclusion of this contribution.

2 Study Area and Data

The development and assessment of advanced full-waveform processing methods requires appropriate high-resolution full-waveform measurement data from a water body with adequate turbidity regarding the expected water depth. This means that a high expected water depth requires a low turbidity, and a low water depth allows a higher turbidity. Ideally, the evaluation of the developed methods is based on reference data for the water bottom topography that have superior accuracy. In our study, we used a data set of the Elbe River provided by the German Federal Waterways and Shipping Office Dresden (WSA) and the German Federal Institute of Hydrology (BfG). The study area is located between the German towns of Klöden and Elster. The data did not completely fulfil the criteria mentioned above, as highly accurate reference data are usually not available in natural water bodies. Nevertheless, the provided data have a high spatial resolution, and the water turbidity was sufficiently low at the time of data acquisition.

In addition to echo sounder measurements, the results of the standard processing method (online waveform processing) serve as validation data for evaluation purposes. The points of the online waveform processing contain the water bottom that reaches up to a water depth of approximately 1.65 m. Overall, the available data were well suited for the development and evaluation of our new processing methods. In the following, the study area, the ALB measurement system, the characteristics of the measurement data, and the comparative data used for control purposes are presented.

2.1 Study Area and Measurement Data

The ALB data acquisition of the study area took place in spring 2015 using a RIEGL VQ-880-G (RIEGL 2018) with a point density ranging from 11 points/m^2 up to 55 points/m^2 in a flying height of approximately 380 m above ground using a Palmer scan pattern with a 20° incidence angle. In addition to the 3D point cloud, the full-waveform was digitized and recorded (RIEGL 2017). Each full-waveform consists of 60–200 samples with a constant sample time interval of 0.575 ns that corresponds to an object distance under water of approximately 6.5 cm for a light velocity in water of 225,000 km s^{-1}.

For the development of the extended processing approach, several subregions were selected (Fig. 3). In this contribution, evaluation results of Elbe 3, 4, and 5 are presented. The properties and results of the areas Elbe 1, 2, and 3 are very similar, so the results of Elbe 3 are representative for these areas. In addition, Elbe 3 features a large number of validation points from ALB online processing and thus offers good control conditions. The Elbe 4 area includes deeper

subareas, and for Elbe 5 as well as Elbe 6, the measurement density is clearly lower (see Table 1) than the other investigation areas so that the results of these subareas allow conclusions about the potential and reliability of the new processing approach under rather difficult conditions.

2.2 Reference Data

To assess the results of the processed data, two data sets are available: the results of ALB online processing and echo sounder measurements. The echo sounder data were acquired in autumn 2015 by a vessel. This measurement vessel is equipped with a positioning system (Leica GX1200 RTK SAPOS Rover), an orientation system (Seatex MRU5), and an electroacoustic sounding frame (status: 2015). In detail, the electroacoustic frame consists of 37 single-beam transducer, which are distributed over a span of 12 m on two cantilevers. The echo sounders (manufactured by Dr. Fahrentholz, Kiel) operate with a frequency of 200 kHz and exhibit a depth resolution of 1 cm similar to the Kongsberg EA MCU system (Kongsberg 2009). The 3D point accuracy is stated in Weiß and Wirth (2015) with approximately 7.5 cm in embankment areas and 6.4 cm in the areas of the flat riverbed.

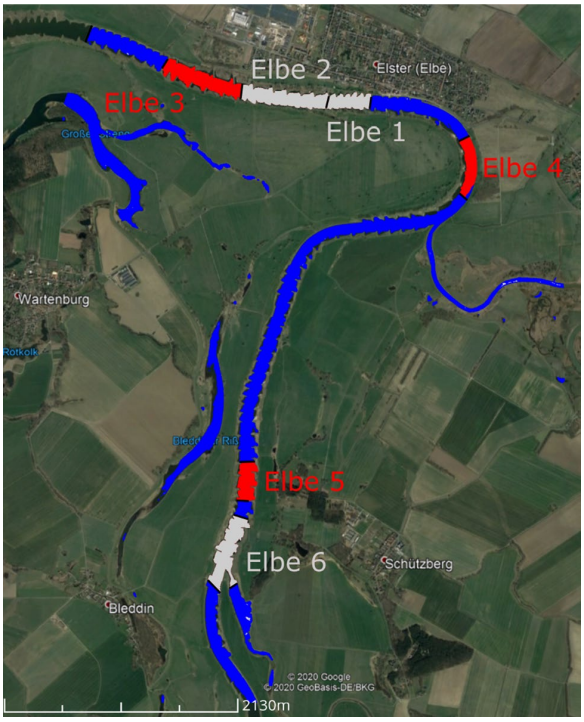


Fig. 3 The study area (part of the Elbe River) including subregions for development and evaluation of the extended approach. The results of the evaluation are shown for the red-coloured areas in this contribution. The grey-coloured areas were evaluated, but the results are similar to Elbe 3, 4 or 5 and are therefore not shown in this contribution. Blue areas present the acquired water bodies (Map data ©2020 Google)

Table 1 Approximate point density, length and width of the investigation areas

	Point density	Length	Width
Elbe 1	33 points/m^2	387 m	86–147 m
Elbe 2	38 – 43 points/m^2	779 m	87–148 m
Elbe 3	55 points/m^2	735 m	88–168 m
Elbe 4	35 – 45 points/m^2	550 m	86–100 m
Elbe 5	11 – 14 points/m^2	345 m	89–160 m
Elbe 6	20 points/m^2	664 m	79–160 m

3 Methods

The basic idea of our approach is the use of spatially adjacent information for a reliable detection of weak water bottom echoes in full-waveform data. The measured data are processed in several processing steps (Fig. 4), starting with the partitioning into processing units. This defines the immediate neighbourhood, which depends on the data density and the ground topography of the water body (Sect. 3.1). Beyond that, prior water–land classification of the processing unit reduces the processing effort on the water body units.

Following the partitioning, the full-waveform data are processed and the extraction of water bottom points from each individual full-waveform is performed. The core method of full-waveform processing is the full-waveform stacking approach, i.e., the combination of all full-waveforms of a processing unit to one stacked full-waveform. Each stacked full-waveform is analysed, and a search corridor for water bottom echoes is estimated. As a result, each processing unit has exactly one search corridor for further processing. These search corridors are applied to the individual full-waveforms to detect the water bottom echoes and calculate the water bottom points. A search corridor is a small section in a full-waveform in which water bottom peaks are searched. It is defined by the number of samples between water surface peak and water bottom peak (number of samples) as well as by the width of the water bottom peak (peak width, Sect. 3.4) as a tolerance range (Fig. 5). The full-waveform processing is performed for every processing unit (Sect. 3.1) and is divided into the following steps:

(1) detection of water surface echoes in all individual full-waveforms using analysis tools: detection of all local maxima (Sect. 3.2) and determination of their significance (Sect. 3.3);

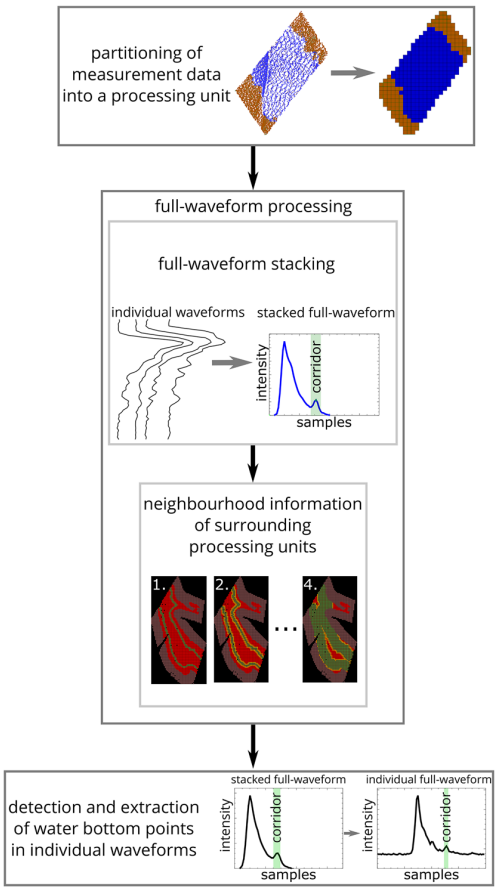


Fig. 4 Workflow of extended processing of full-waveform data

(2) full-waveform stacking over all full-waveforms of a processing unit (Sect. 3.5);
(3) analysis of the stacked full-waveform: detection of all local maxima and determination of their significance;
(4) determination of the bottom echo in the stacked full-waveform and derivation of the number of samples as well as peak width (Sect. 3.4);
(5) filtering of full-waveform stacking results including directly adjacent surrounding processing units using the search corridor as a check corridor (Sect. 3.6); and
(6) detection and extraction of the water bottom echo as well as the corresponding water bottom point in every individual full-waveform within the estimated search corridors of the stacked full-waveforms (Sect. 3.7).

All individual work steps are described in detail below. In the following, the water depth of a full-waveform is equal to the number of samples between the water surface and water bottom echo considering the laser beam passing obliquely the water column, the propagation speed of the light under water, and the sample time (= time from sample i to sample $i+1$).

3.1 Partitioning of Survey Data

The detection of weak water bottom echoes assumes that the measurement data are closely adjacent and have similar characteristics. For this, a suitable definition of neighbourhood is necessary. Based on the available data, the following partitioning methods could be considered, which refer only to the points of the water surface (regardless of the corresponding water bottom point's position):

(1) use of all data within a maximum distance in the lateral direction;
(2) use of surrounding vertices of a certain feature point of a triangulated irregular network (TIN);
(3) partitioning in a regular grid; and
(4) a flexible adaptation of the grid cell size depending on water depth and turbidity.

The abovementioned possibilities differ in their applicability with regard to point distribution, point density, characteristics of the water bottom, and calculation effort. The first two cases are applicable to all kinds of point distributions but entail a high processing effort. For each full-waveform, the neighbouring full-waveforms must be searched, and the full-waveform stacking is carried out. The high processing effort is caused by calculation of a stacked full-waveform for each individual full-waveform. The application of a TIN ensures the use of closely adjacent information, which is well distributed about the whole horizon. In the third case, a uniform point distribution and density are required. The full-waveforms must be assigned to the regular grid, and subsequently, one stacked full-waveform per grid cell will be estimated. As a consequence, the processing effort is low. In the fourth case, the grid cell size is adapted locally to the uneven point distribution. The processing effort increases because the point distribution and density must be analysed for the entire area beforehand.

The present data set of the Elbe River has a rather uniform point distribution and density, so utilization of a regular grid is sufficient. The non-uniformity of the point distribution of a Palmer scan pattern is taken into account by choosing a sufficiently large grid cell width. An important parameter for using a regular grid is the grid cell size, which depends on the data density and the ground topography characteristics (strong or quick changes in terrain slope). For optimal processing results, the following facts should be taken into account when choosing the grid cell size:

PFG (2021) 89:139–158

- a too small grid cell leads to a low redundancy of full-waveform data, which increases the risk of incorrect water bottom detections;
- an extension of the grid cell size results in a higher number of full-waveforms and therefore a higher reliability of the results; and
- a too large grid cell can affect a weakening of the water bottom echo in the stacked full-waveform because the correlation or similarity of full-waveform data decreases with increasing spatial distance. As consequence, water bottom echoes may not be detected.

An optimal grid cell size was empirically determined by testing different grid cell sizes and comparing the number, accuracy, and reliability of the detected points. The results are shown in Sect. 4.1.

3.2 Full-Waveform Analysis-Peak Detection

There are different approaches for the detection of backscattered object signals in airborne laser scanning. In Wagner et al. (2004) and Wang et al. (2015), several conventional peak detection methods are presented, which should represent the time of pulse reflection at the water bottom in the full-waveform data. Figure 5 shows the options: threshold, peak maximum, centre of gravity, and zero crossing of the second derivative. With the exception of the centre of gravity detector (due to the influence of the water column), these standard methods are suited for the detection of both the water surface and bottom echo in ALB-based full-waveform data. Another widespread and more complex method of pulse detection in airborne laser scanning (ALS) data is Gaussian decomposition (Wagner et al. 2006; Reitberger et al. 2009; Mallet and Bretar 2009). The method is characterized by fitting several parameterized models to the measured receiver signal. However, Gaussian decomposition is only partially applicable to ALB data, since the signal shape can only be approximated to a limited extent by a Gaussian function due to the influence of the water column on the signal. For ALB applications, an approach called exponential decomposition was presented in Schwarz et al. (2017), which considers of the characteristics of bathymetric full-waveforms using exponential functions. This takes into account the influence of the water column in the full-waveform. In Schwarz et al. (2019), the model is further specified by extracting the water surface, water column, and water bottom signals from the full-waveform.

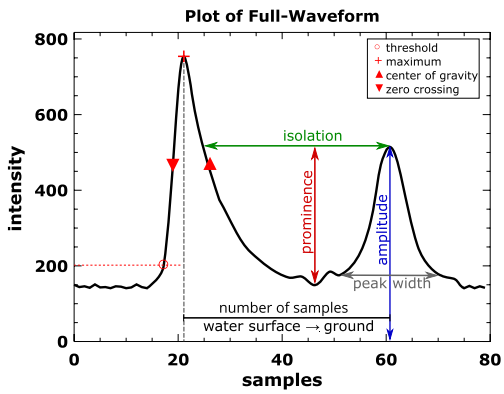


Fig. 5 Schematic representation of the parameter of a full-waveform analysis

For our approach, a simple maximum detector is sufficient for detecting and extracting the water surface and bottom peaks as a first approximation.

3.3 Full-Waveform Analysis-Peak Significance

In general, a full-waveform may have several peaks or local maxima, some of which are due to interaction with objects but also to noise and erratic effects (Fig. 2). The peak detection (Sect. 3.2) returns all detected peaks unfiltered so that the relevant peaks must be determined by suitable methods. The goal is to detect the two most significant peaks, which are assumed to represent the water surface and water bottom. For this purpose, the peak description parameters isolation, prominence, and amplitude are used (Fig. 5). The parameters isolation and prominence have been adopted from Kirmse and de Ferranti (2017), where they are introduced for the detection of significant mountain peaks in elevation data. For the exponential decomposition in Schwarz et al. (2019), this approach is used to detect the most significant peak in ALB full-waveforms for initial value estimating.

The isolation describes the shortest distance between a local maximum and the signal part with the same signal strength. The prominence indicates the largest intensity difference in the isolation area, and the amplitude is here equal to the signal strength/intensity of the corresponding local maximum. Based on these parameters, the significance of each local maximum of the full-waveform can be estimated by multiplication of the three parameters. This approach has the advantage that local maxima evoked by signal noise or erratic effects can be filtered easily in most cases. In consequence, the second-most significant peak usually represents the water bottom.

3.4 Full-Waveform Analysis-Peak Width

The stacked full-waveform combines several bathymetric measurements with possibly different water depths or number of samples. Different water depths are due to roughness or slopes of the water bottom. To take these cases into account for later evaluation, the parameter peak width was introduced, which functions as a tolerance range around

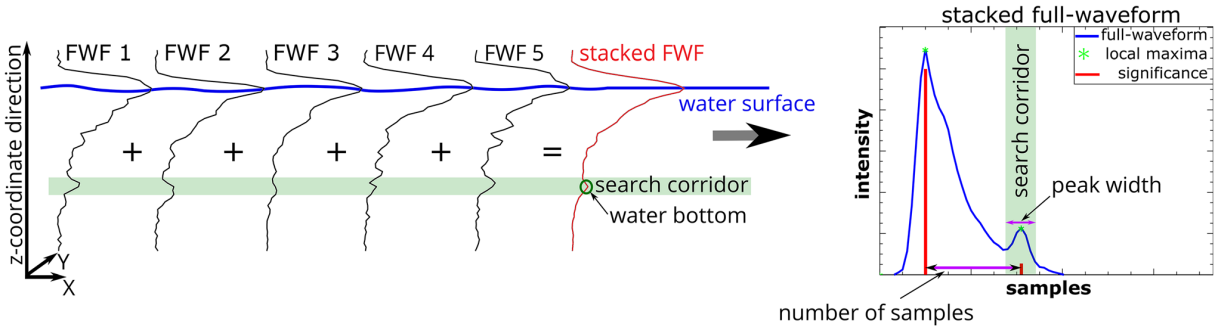


Fig. 6 Basic principle of full-waveform stacking applied to ALB pulse echo waveforms. The green marked area corresponds to the reduced search corridor for water bottom echoes in the original full-waveforms (black), based on the analysis of the stacked full-waveform (red)

the detected bottom peak of the stacked full-waveform (Fig. 6). This means that the search corridor is defined by the number of sample (water surface—bottom) and the peak width. The two parameters are determined using the stacked full-waveform.

It should be noted that by neglecting the terrain slope or underestimating the peak width, potential water bottom points could be lost. If the search corridor is too large, this can lead to ambiguities (more than one peak in the search corridor) and thus to incorrect detections of water bottom echoes in the individual full-waveforms. Water bodies with steep bottom topography require the consideration of additional information (Sect. 7).

The peak width is estimated by searching the local minimum between the bottom peak and the water surface peak that is closest to the bottom peak (Fig. 5). The number of samples between this minimum and the bottom peak's maximum is anticipated as the half peak width.

The peak width is used for filtering the full-waveform stacking results (Sect. 3.6) and for detection of water bottom echoes (Sect. 3.7).

3.5 Full-Waveform Stacking and Detection of Search Corridor

The joint processing of full-waveform data within a small spatial neighbourhood and consequently a similar laser pulse propagation path aims at a considerable reduction of signal noise and erratic backscatter effects within the water column. Herein, the difference in the forward and backward look of the Palmer scan pattern is not explicitly taken into account, but indirectly via the empirical determination of the processing unit size. In addition, the use of redundant information leads to an improved detection of weak water bottom echoes and consequently to a more reliable detection and extraction of deeper water bottom points. A faint water bottom echo candidate peak in an individual full-waveform is accepted if an according peak is present in the stacked full-waveform. This corresponds to a non-linear filtering, similar to the majority voting technique known from binary image processing. The basic requirement for combining full-waveforms is a correct alignment to each other with respect to the height coordinates (corresponding here to the z-coordinate; Fig. 6). This can be derived from the position of pulse emission, laser beam direction, and the laser pulse travel time. As this information was not available for our data, the maxima of the water surface echoes in the full-waveforms were used for vertical pulse alignment, with the assumption that the water surface approximately corresponds to a horizontal plane at the time of measurement. Subsequently, all measured full-waveforms signals of the respective processing unit are summed up resulting in a stacked full-waveform for every processing unit (Fig. 6). As mentioned above, the analysis of the stacked full-waveform is the basis for the determination of the search corridor for water bottom echoes.

3.6 Filtering of Full-Waveform Stacking Results

The full-waveform stacking is independently performed for each processing unit. The following ground echo detection works very reliably in stacked full-waveforms; but nevertheless, there are rare cases of incorrectly detected water bottom echoes. To handle these cases, the results of full-waveform stacking including the water bottom echo detection is checked iteratively in a filtering procedure using the information of neighbouring processing units. In every iteration step, all processing units, which are directly adjoined to processing units with reference water depth information or previously checked processing units, are searched and checked (Fig. 7). In detail, the approach averages out all checked or known number of samples (= water depths) as well as peak widths of adjoining processing units. This neighbouring information is then compared with the detected water depth or number of samples of the stacked full-waveform of the current processing unit. The use of the peak width enables

PFG (2021) 89:139–158

coping with a certain slope or depth variation of the water bottom between the processing units. The following cases are possible, whereby the search corridor serves as a check corridor (based on the known information of the surrounding processing units):

(1) the detected ground peak is within the search corridor;
(2) the detected ground peak is outside the search corridor, consequently the most significant peak within the search corridor is the new ground peak; and
(3) the detected ground peak is outside the search corridor and there are no peaks within the corridor range.

For cases (1) and (2), the processing units are considered as checked processing units, while for case (3), the processing units have no water depth information and are invalid for further iteration steps. This filtering mechanism is applied to all processing units classified as water.

To ensure reliable functioning of the procedure, the first iteration step requires processing units with reference water depths and the corresponding echoes in the full-waveform data. As reference values are not available in most cases, processing units with reliable water depth information have to be identified from the data set itself. Close to the shore, we know that the water depth is probably very shallow, but the determination of the water bottom echoes is not very reliable due to the superimposed water surface and water bottom echoes. Therefore, the use of the processing units near the shore poses a certain risk. In the middle of an unknown water body, water depth is likely to be too large for reliable water bottom echo detection. For this purpose, the parameters isolation, prominence, amplitude, and significance of the stacked full-waveform can help here as well. For reliable detection of water bottom echoes in full-waveforms, a clear separation (high isolation) and a clear distinction from the noise signal (high prominence) is advantageous. From this, it can also be deduced that a high significance indicates simple water bottom echo detection. To determine a suitable starting value of the water depth for filtering of the full-waveform stacking results, all stacked full-waveforms are used, and the parameters isolation, prominence as well as significance are analysed regarding their estimated water depth with the goal of finding either the water depth itself or at least processing units with the highest prominence and significance values. In detail, the mean of the prominence, isolation, and significance values are calculated as a function of their water depth. The starting water depth results from the maxima of the parameters. To consider that the stacked full-waveforms consist of a different number of measured full-waveforms, the isolation, prominence, and significance values are normalized regarding the water surface echo. The results of the start value estimation for the filtering algorithm are shown in Sect. 4.2.

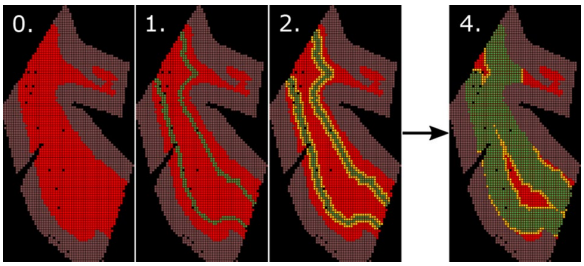


Fig. 7 Iterative processing of a part of the study area. Brown = land grid cells. Yellow = currently checked water grid cells. Red = not yet checked water grid cells. Green = known or checked water grid cells. Step 0 shows the unchecked study area. Step 1 shows the water grid cells featuring reference or reliable starting water depth information. The following iterative steps show the processing progress

3.7 Detection and Extraction of Bottom Point

Sections 3.5 and 3.6 focus on a reliable detection of the water bottom echo in stacked full-waveforms and subsequently the derivation of a search corridor. The final water bottom points are not derived from the stacked full-waveform itself as this leads to undesired smoothing effects (similar to a low-pass filtering) and a reduction of the bottom point resolution. Instead, the water bottom echoes are searched in the individual full-waveforms using the derived search corridor. In consequence, the estimated search corridor is used for the most likely water bottom echo in individual full-waveforms (Fig. 8a). Based on this information, the water bottom point of each individual full-waveform can be estimated.

First, the direction vector $\mathbf{X}_1$ (narrow laser beam) is calculated using the given points $\mathbf{P}_{ls}$ and $\mathbf{P}_{ws}$ (Fig. 8b). Then, the direction vector $\mathbf{X}_2$ is calculated by refraction of the direction vector $\mathbf{X}_1$ at the water surface according to Snell's law of refraction and the light transmission algorithm presented in Glassner (1989) (Eq. 1):

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_2 &= \eta \cdot \mathbf{X}_1 + (\eta \cdot C - \sqrt{1 + \eta^2 \cdot (C^2 - 1)}) \cdot \mathbf{N} \\ C &= -\mathbf{N} \cdot \mathbf{X}_1 \\ \eta &= n_{\text{air}}/n_{\text{water}}, \end{aligned} \tag{1}$$

with

n_{air}/n_{water} = refractive index air/water
$\mathbf{N}$ = water surface normal vector.

The water surface consists of measured water surface points and represents the optical interface between air and water. Due to a relatively high noise in the water surface points, a conversion into a regular grid was carried out to smooth the water surface. The laser beam is refracted at the smoothed water surface (air–water interface) using horizontal water

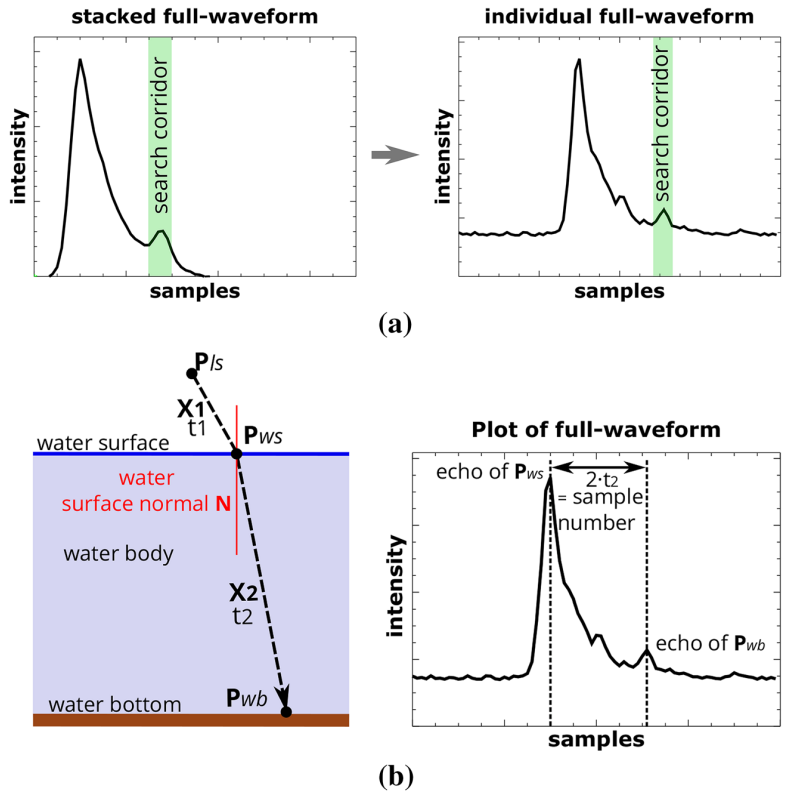


Fig. 8 **a** Smoothing effects in bottom point extraction can be avoided by applying the search range from the stacked full-waveform to the individual full-waveform. **b** Schematic illustration of water bottom point calculation

surface elements. The loss of accuracy compared to locally tilted water surface elements for low waves is negligible (see Sect. 5). Finally, the local maximum closest to the ground echo of the stacked full-waveform is used for calculation of the water bottom 3D-coordinates $\mathbf{P}_{wb}$:

$$\mathbf{P}_{wb} = \mathbf{P}_{ws} + t_2 \cdot c_w \cdot \mathbf{X}_2, \tag{2}$$

where t_2 is the estimated travel time from the water surface to the water bottom (equal to the half sample time between the surface and ground echo) and c_w is the light velocity in water.

4 Results

This section starts with the results of the determination of an appropriate grid cell size (used in this case as processing unit) and a suitable starting value for filtering the full-waveform stacking. After that, the results obtained from processing data of the study areas are presented and evaluated to assess the quality and potential of the extended approach. For this purpose, the height deviation of the points of full-waveform stacking processing (FWSP) to the points of ALB online processing (OWP) and echo sounder measurements (ES) are determined and used for accuracy analysis. Furthermore, the height deviations of FWSP points are compared against the total vertical uncertainty (TVU) of the Special Order released in the IHO Standards for Hydrographic Surveys (International Hydrographic Organization 2020):

$$\mathrm{TVU} = \sqrt{(0.25\,\mathrm{m})^2 + (0.0075 \cdot d)^2}, \tag{3}$$

with

d = water depth in [m].

The result analysis is carried out at first by visualization of the resulting point cloud to obtain first impressions regarding their plausibility and quality, followed by a quantitative comparison between FWSP points with existing water body bottom points (OWP and ES points). The quantitative evaluation contains the height deviation Δh, mean of height deviation $\overline{\Delta h}$, sigma mean height deviation $\sigma_{\overline{\Delta h}}$, root mean square RMS, the sigma mean absolute deviation $\sigma_{MAD(mean)}$, and the sigma median absolute deviation $\sigma_{MAD(median)}$ (Eqs. (4)–(9)) as well as reliability values that indicate the percentage of points not exceeding a given height difference:

$$\Delta h_i = h_i(ref) - h_i, \tag{4}$$

$$\overline{\Delta h} = \frac{\Sigma(h_i(ref) - h_i)}{N}, \tag{5}$$

$$\sigma_{\overline{\Delta h}} = \sqrt{\frac{\Sigma((\Delta h_i - \overline{\Delta h})^2)}{N}}, \tag{6}$$

$$\mathrm{RMS} = \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta h_i^2)}{N}}, \tag{7}$$

$$\sigma_{\mathrm{MAD(mean)}} = 1.2533 \cdot \frac{\sum |\Delta h_i - \overline{\Delta h}|}{N}, \tag{8}$$

$$\sigma_{\mathrm{MAD(median)}} = 1.4826 \cdot \mathrm{med}(|\Delta h_i - \mathrm{med}(\Delta \mathbf{h})|), \tag{9}$$

with

$i = 1 \ldots N$,
N = number of height deviations,
$h_i(ref)$ = height component of reference data,
h_i = height component of calculated data,
$\Delta \mathbf{h}$ = vector of height deviations,
Δh_i = height deviation,
$\overline{\Delta h}$ = mean of height deviations,
med($\mathbf{X}$) = median of a vector of values $\mathbf{X}$.

The information provided by the *RMS* and the *MAD* differ in that the *RMS* value still contains a possible systematic error or bias, whereas the *MAD* values are adjusted from these effects in the form of a mean or median value. The extension from *MAD* to $\sigma_{MAD(mean,median)}$ is carried out with the adjustment factors 1.2533 and 1.4826 because the height deviations are subject to a normal distribution.

The height deviation and reliability values are presented for all points of the corresponding study areas, which allows a first indication of the quality of the FWSP data. However, these values vary notably with the water depth and are only representative for a part of the riverbed, which will become obvious in the following evaluation. In consequence, an investigation of the height deviations and reliability values as a function of their water depth is necessary. In addition, the results regarding the determination of the appropriate grid cell size and the start value for filtering the full-waveform stacking results, which are necessary for the best possible processing sequence, are briefly presented first.

4.1 Estimation of Grid Cell Size

To find an appropriate grid cell size for full-waveform stacking, different grid cell sizes from 1.5 m × 1.5 m to 3.0 m × 3.0 m were tested and compared regarding the number of extracted points, reliability and mean height deviation. The results are shown in Tables 2 and 3 whereby the bold-printed columns are absolute results and the other columns show the differences from the bold-printed columns.

A grid cell size of 2.0 m × 2.0 m (approx. 80–220 full-waveforms per grid cell) delivers the best results for the investigated study areas Elbe 1 to 4 and Elbe 6 (Table 2). For Elbe 5, a grid cell size of 2.5 m × 2.5 m (approx. 79 full-waveforms per grid cell) was necessary due to a lower point density with 11 to 14 points/m^2 (Table 3). Investigations for this data set showed worse reliability results for smaller grid cell sizes and thus more incorrect estimated points. In contrast, using greater grid cell sizes, the number of FWSP points decrease considerably. The selected grid cell sizes thus represent a suitable compromise for good results.

Table 2 Results of investigation of the optimal grid cell size for the areas Elbe 1–4, Elbe 6. All values are differences related to the grid cell size of 2.0 m x 2.0 m

Grid cell size	1.5 m × 1.5 m	**2.0 m × 2.0 m**	2.5 m × 2.5 m	3.0 m × 3.0 m
Extracted FWSP points	+ 2.01%	**5297,629 pts.**	– 0.12%	– 0.92%
Reliability for $\Delta h \leq 25$ cm	– 1.10%	**96.69%**	+ 0.06%	+ 0.13%
Mean height deviation $\overline{\Delta h}$	– 0.5 cm	**– 1.3 cm**	– 0.1 cm	– 0.2 cm

The columns with bold values represent absolute measures and serve as the basis for the relative values reported in the remaining columns

Table 3 Results of investigation of the optimal grid cell size for the areas Elbe 5. All values are differences related to the grid cell size of 2.5 m x 2.5 m

Grid cell size	1.5 m × 1.5 m	2.0 m × 2.0 m	**2.5 m × 2.5 m**	3.0 m × 3.0 m
Extracted FWSP points	+ 20.49%	+ 19.63%	**162,253 pts.**	– 5.18%
Reliability for $\Delta h \leq 25$ cm	– 16.20%	– 10.34%	**92.43%**	+ 3.37%
Mean height deviation $\overline{\Delta h}$	– 10.2 cm	– 6.2 cm	**–4.8 cm**	+ 1.6 cm

The columns with bold values represent absolute measures and serve as the basis for the relative values reported in the remaining columns

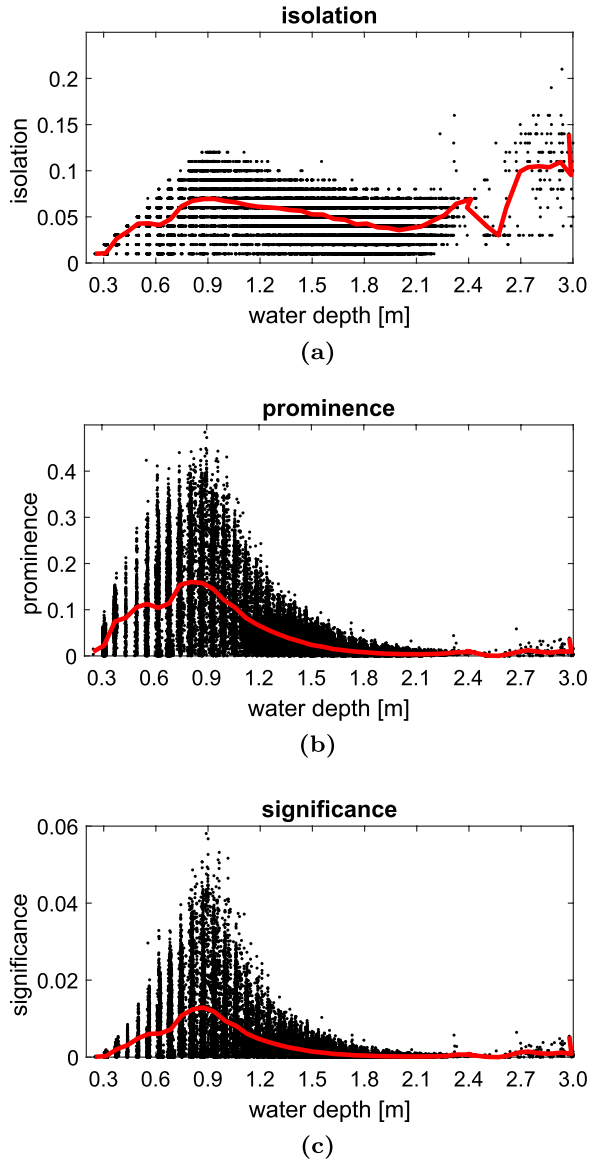


Fig. 9 Results of evaluation of optimal start depth for full-waveform stacking filtering: **a** isolation, **b** prominence, and **c** significance as a function of their water depth. The black points are the single values, and the red line presents the mean trend. The vertical stripe pattern in the shallow water depths (0.3–0.9 m) is caused by the sample time interval (= resolution in laser beam direction of approximately of 6.5 cm) in the full-waveform data. At greater water depths, this effect is considerably weakened by the effect of the obliquely incident laser beam

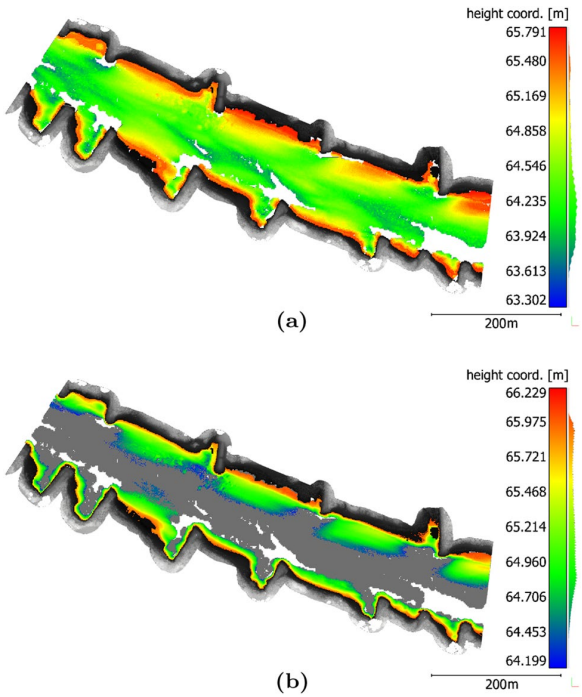


Fig. 10 Results of full-waveform stacking for investigation area Elbe 3. **a** The FWSP points are colour-coded corresponding to their height component (z-coordinate). **b** Illustration of the improved coverage of the riverbed by FWSP point cloud (dark grey). The OWP points are presented colour-coded corresponding to their height coordinate

4.2 Estimation of the Start Value for Filtering of Full-Waveform Stacking Results

To estimate a water depth for the filtering module (Sect. 3.6), the prominence, isolation, and significance of the water bottom candidates of all stacked full-waveforms were investigated as function of the water depth. As described in Sect. 3.6, high values for prominence, isolation, and consequently significance of an echo peak are good indicators for a reliable water bottom echo detection. Figure 9 shows the (a) isolation, (b) prominence, and (c) significance of large parts of the available data set (Elbe 1– Elbe 6), where the grid cells with a water depth of 0.75 up to 0.90 m have the highest values. Because an increasing water depth makes the separation of the water surface and water bottom echo more reliable, 0.9 m served as a starting value for the filtering algorithm.

4.3 Visualization of the Results

Figure 10a presents the resulting point cloud of the extended processing approach for the study area, where the points are colour-coded regarding their height coordinates. Compared to the data processed online, the results indicate an improved coverage of the riverbed (Fig. 10b) in larger depths. The other investigation areas feature similar results. The river cross sections in Fig. 11 confirm how well the FWSP points represent the actual bottom of the river. The following facts are already clearly visible in the visualization:

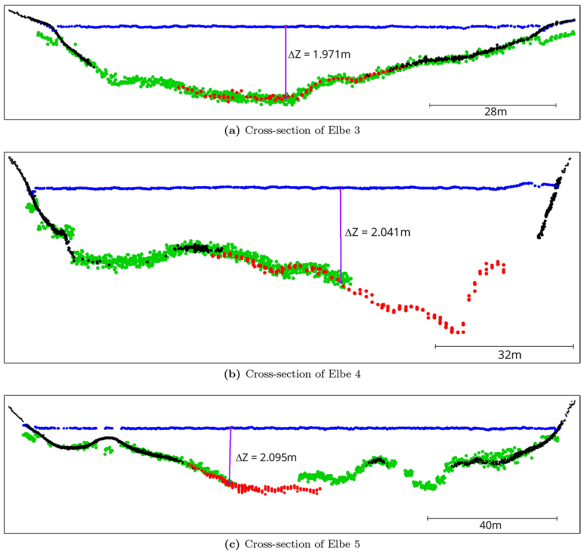


Fig. 11 Cross section of the Elbe River. Black = OWP points, Blue = water surface points, Red = ES points, Green = FWSP points

- problems in the transition area between the river bank (0.0 m) and very shallow water bottom (approx. 0.7 m) because of superimposing echoes from the water surface, water column, and the water bottom (see Sect. 5.1);
- good representation of the riverbed from 0.7 up to approx. 2.1 m; and
- improved coverage of the riverbed.

The visual impressions will be proven in the following by evaluating the FWSP data with regard to height deviation and reliability.

4.4 Analysis of Height Deviation

This section deals with the quantitative evaluation of the comparisons between FWSP points and reference points (OWP and ES points). The OWP points are mainly restricted to the shallower sections of the river, and the ES points mainly cover the deeper parts of the river due to vessel accessibility. The evaluation of both sets of comparison data is performed separately starting with the OWP points.

Table 4 shows the results of the comparison with the OWP point cloud regardless of the water depth. According to the mean height deviations $\overline{\Delta h}$, the FWSP points are slightly deeper (1.2–2.9 cm), but $\overline{\Delta h}$ is not significant in regard to $\sigma_{\overline{\Delta h}}$ (significance level $\alpha = 5\%$). The *RMS* of 11–12 cm and the $\sigma_{MAD(median)}$ of 6.7–7.1 cm indicate small deviations across all investigation areas. In contrast, Fig. 13 shows a large variation of the height deviations between the OWP points and the FWSP points. The deviations in height seem to depend on the water depth. In particular, the large deviations in the transition zone from land to water are clearly visible. The FWSP points tend to be estimated too deep in this area. Therefore, Fig. 12 presents the statistical values (a) $\overline{\Delta h}$, (b) *RMS*, (c) $\sigma_{MAD(mean)}$ and (d) $\sigma_{MAD(median)}$ as function of their water depth. The dependency between deviation measures and water depth is obvious. In detail, the points appear up to 0.3 m too deep in the shallower water section up to a water depth of 0.7 m. For water depths of approximately 0.7–1.8 m, the height deviations are small. In addition, the $\sigma_{\overline{\Delta h}}$ values were mostly in the millimetre range so that the majority of the values shown in Fig. 12a were also significantly determined ($\alpha = 5\%$) and consequently more representative, as in Table 4. Furthermore, in Elbe 5, the deviations increase, starting from a water depth of 1.6 m. However, there are very few comparison points from OWP in these areas (blue dashed line in Fig. 12a–d), so this effect is difficult to prove.

Table 5 presents the statistics of the comparison between FWSP and ES points regardless of the water depth. The FWSP points are determined approximately 1–5 cm too high. The $\overline{\Delta h}$ is not significant ($\alpha = 5\%$) for the entire study area, similar to the comparison between FWSP and OWP points. The *RMS* values of 9.4–15 cm and the $\sigma_{MAD(median)}$ values of 8.7–9.9 cm are slightly larger than the comparison with the OWP points, but the FWSP points still have small height deviations. Figure 14 exhibits the height deviations of the FWSP points compared to the ES points, and again a large variation of height deviations is clearly visible. The evaluation as a function of the water depth is presented in Figure 15. Up to a water depth of 2.1 m, the deviation values are 10 cm or less. For a water depth of 2.2 m, the values are approximately 15 cm, but the number of detected FWSP points is already decreasing rapidly.

4.5 Reliability

For the evaluation of the reliability, the inlier rate estimation (Litman et al. 2015) was used, as the comparative data do not fulfil the requirements of ground truth data. The inlier rate indicates the portion of points whose height deviation does not exceed a given limit. As a limit orientation, the TVU value of the Special Order of the IHO for hydrographic surveying (0.25 m) was used. In addition, the evaluation was also performed for limit values ±10 cm around the IHO value.

Tables 6 and 7 show the number of extracted FWSP points that do not exceed a given maximum deviation from the comparison points (15 cm, 25 cm, 35 cm). Regarding the OWP data (Table 6) the FWSP points show a high inlier rate of 94.38% for a deviation of 25 cm or less. A

Table 4 Accuracy values compared to OWP points considering all height deviations of an evaluation area independent of their water depth

	$\overline{\Delta h}$	$\sigma_{\overline{\Delta h}}$	RMS	$\sigma_{MAD(mean)}$	$\sigma_{MAD(mean)}$
Elbe 3	0.029 m	0.11 m	0.11 m	0.089 m	0.068 m
Elbe 4	0.023 m	0.11 m	0.11 m	0.092 m	0.071 m
Elbe 5	0.012 m	0.12 m	0.12 m	0.097 m	0.067 m

maximum deviation of 15 cm is undercut by 88.80% of the FWSP points, and at a limit of 35 cm, the percentage of points increases to 97.51%. Similar results are obtained by comparison with the ES points (Table 7). For 15 cm, there was an inlier rate of 89.20 up to 99.34% of the points with a deviation of less than or equal 35 cm. As with the analysis of the height deviations, it is worth taking a look at the inlier rates in relation to water depth. Figure 16a–c shows the results of the reliability analysis with the OWP points, and Figure 16d–f shows those with the ES points. In general, a high inlier rate in areas with a water depth of 0.7 up to 2.1 m can be derived from all graphs, confirming the analysis of the height deviations. The problems in the transition area between land and water are also evident here. Furthermore, a strong decrease of the inlier rate can be observed from a water depth of 2.1 to 2.2 m, where approximately 11% of all extracted FWSP points were deeper than 2.1 m or approximately 2% deeper than 2.2 m. The considerable deterioration of the inlier rate as well as the already observed decrease in the number of extracted FWSP points suggest a maximum evaluable water depth of approximately 2.1 m, also confirming the height deviation analysis. It should be noted that this latter value only holds for the data set at hand, acquired in a rather turbid river.

5 Discussion

In the following, the results, observed problems, and additional information regarding the error budget are discussed to assess the results and to evaluate the potential of the full-waveform stacking approach.

5.1 Comparison Results

Good results (RMS of 9–15 cm or $\sigma_{MAD(median)}$ of 6–10 cm) as well as high inlier rates (or reliability) were obtained for water depths from 0.7 cm to 2.1 m. At larger water depths, the height deviations and inlier rates became worse in our

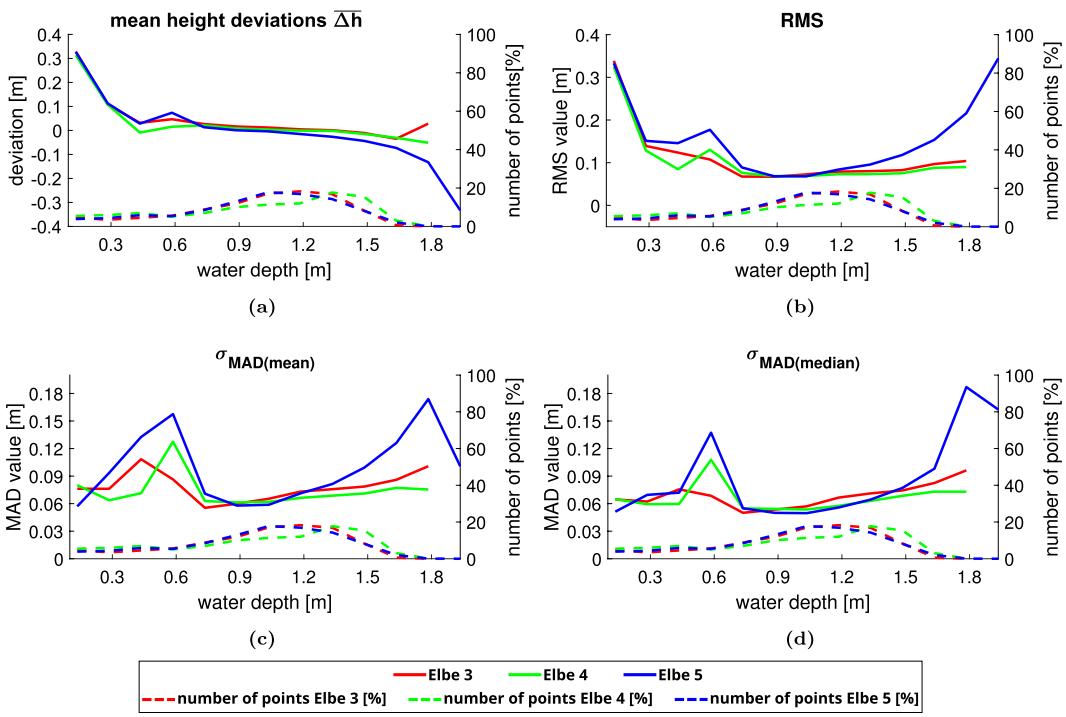


Fig. 12 Results of comparison with OWP points: **a** mean height deviations, **b** root mean square, **c** mean absolute deviation and **d** median absolute deviations as a function of their water depth. Solid lines correspond to the left axis and dashed lines to the right axis

PFG (2021) 89:139–158

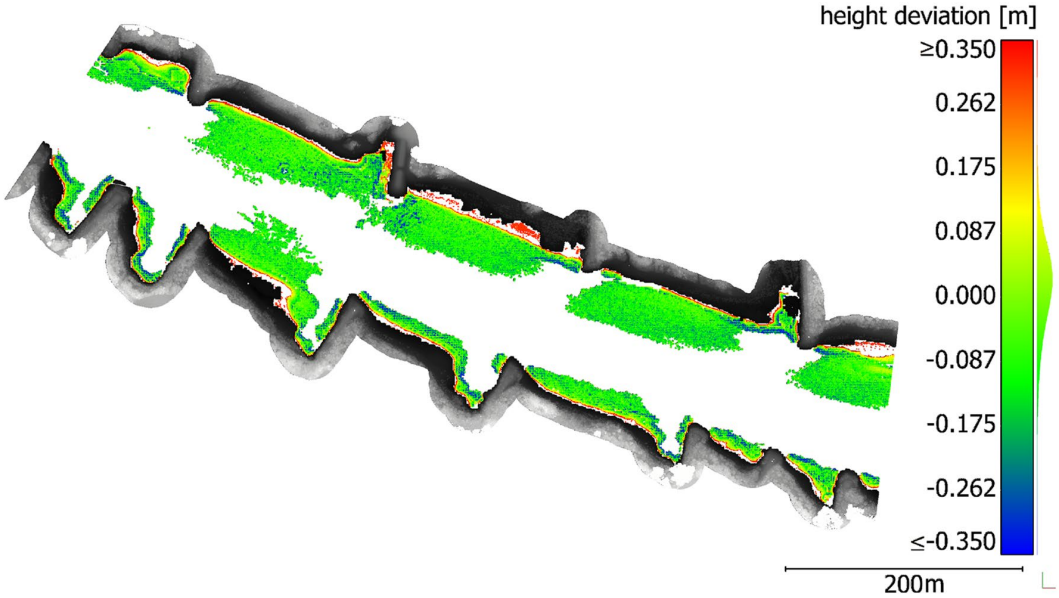


Fig. 13 Elbe 3: Height deviations compared between OWP points and FWSP points. The compared points are colour-coded corresponding to their deviation. FWSP points with positive height deviations are estimated as deep, and points with negative height deviations are estimated as high

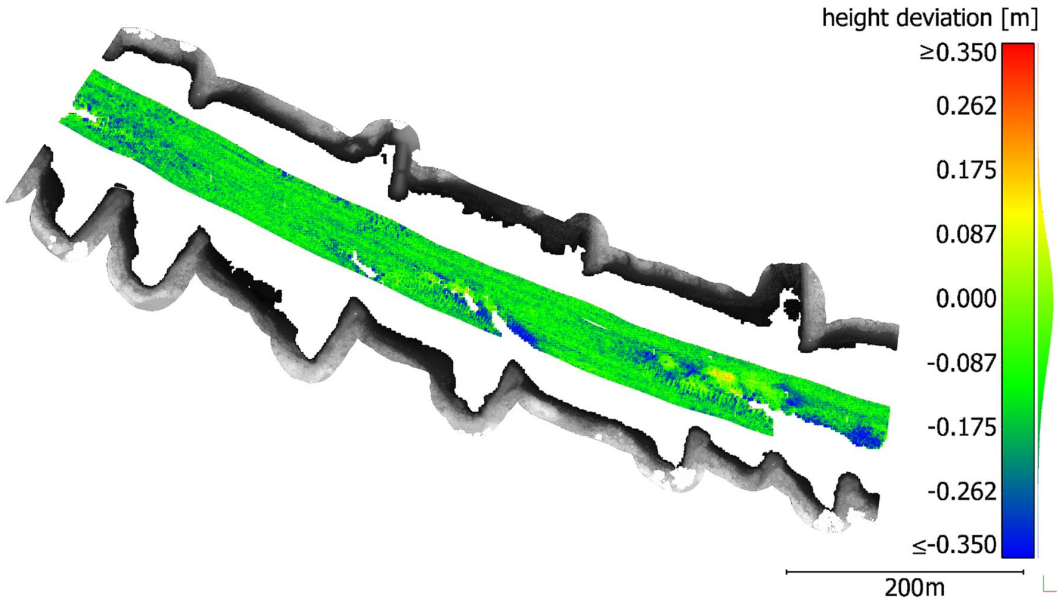


Fig. 14 Elbe 3: Height deviations between ES points and FWSP points. The compared points are colour-coded corresponding to their deviation. FWSP points with positive height deviations are estimated as deep, and points with negative height deviations are estimated as high

Table 5 Accuracy values compared to ES points considering all height deviations of an evaluation area independent of their water depth

	$\overline{\Delta h}$	$\sigma_{\overline{\Delta h}}$	RMS	$\sigma_{MAD(mean)}$	$\sigma_{MAD(median)}$
Elbe 3	–0.011 m	0.093 m	0.094 m	0.091 m	0.087 m
Elbe 4	–0.022 m	0.11 m	0.11 m	0.10 m	0.095 m
Elbe 5	–0.048 m	0.14 m	0.15 m	0.12 m	0.099 m

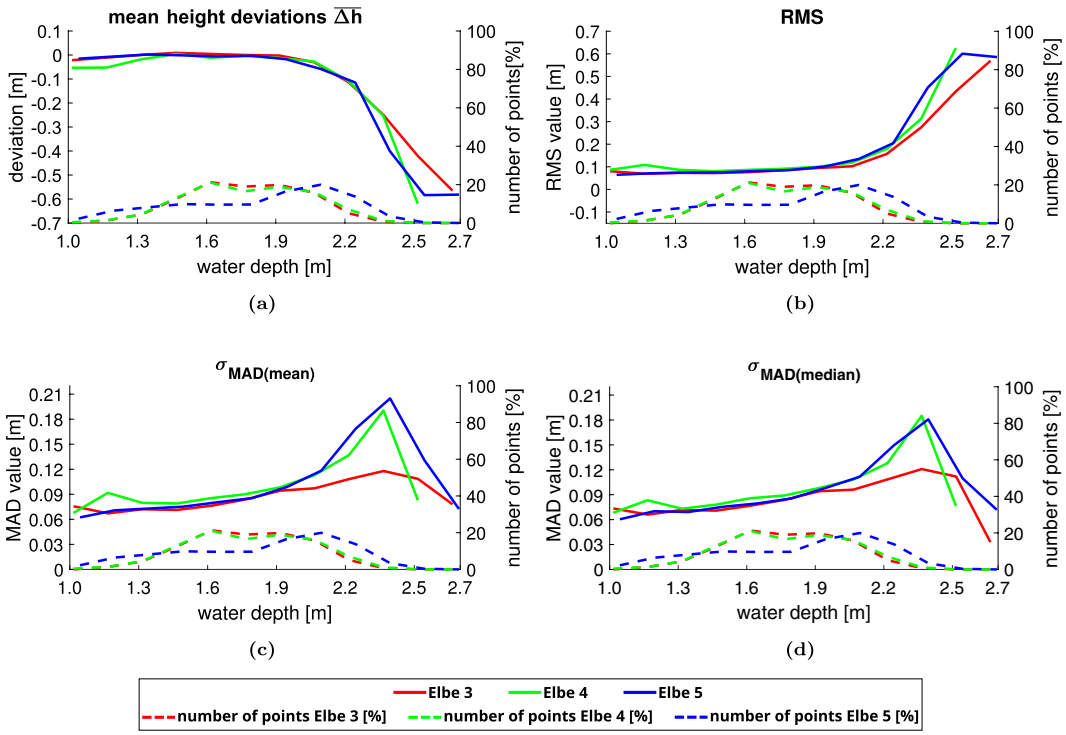


Fig. 15 Results of comparison with ES points: **a** mean height deviations, **b** root mean square, **c** mean absolute deviation and **d** median absolute deviations as a function of their water depth. Solid lines correspond to the left axis and dashed lines to the right axis

pilot study data set with rather turbid river water, with the number of extracted points decreasing rapidly.

The poor results in the range of water depths from 0.0 to 0.7 m can be caused by problems with the interpretation of superimposing echoes (scatterer cluster) from the water surface, water column and water bottom. This problem with superimposing echoes is also shown in Wagner et al. (2006) and Ullrich and Pfennigbauer (2011). In addition, the shape of the system full-waveform (shown in Schwarz et al. (2017)) leads to false detected water bottom echoes. In detail, the water bottom echo is superimposed either by the water surface or the volume backscatter. Consequently, the backscatter of the second peak of the emitted system full-waveform (with a low intensity) or another weak echo has a higher significance (Sect. 3.3) and is detected as water bottom echo. In this specific case, the ground points are mostly determined too deep in this area (Fig. 12a), attributed to a misallocation of the detected ground echo in the full-waveform. Commercial software packages, including those from the device manufacturers themselves, provide very good and plausible solutions in these cases so that the focus for the extended processing method remains in larger depths, where conventional methods show their limitations in finding correct water bottom echoes. Thus, a combination of the results from the standard OWP and from the full-waveform stacking will provide a good representation of the water bottom for water depths from 0.0 to 2.1 m in this case.

5.2 Error of Maximum Peak Detector

The use of the maximum peak detector for the detection of the water surface echo and the water bottom echo was simple to implement and suitable for first test purposes.

PFG (2021) 89:139–158

Table 6 Inlier rates of the comparison from FWSP points to OWP points considering all height deviations of an evaluation area independent of their water depth

	$\Delta h \leq 15$ cm		$\Delta h \leq 25$ cm		$\Delta h \leq 35$ cm	
Elbe 3	987,677 / 1104,825	**89.39%**	1045,465 / 1104,825	**94.63%**	1077,333 / 1104,825	**97.51%**
Elbe 4	378,891 / 428,282	**88.47%**	404,642 / 428,282	**94.48%**	417,891 / 428,282	**97.57%**
Elbe 5	151,081 / 175,910	**85.89%**	162,895 / 175,910	**92.60%**	171,201 / 175,910	**97.32%**
Elbe 3/4/5	1517,649 / 1709,017	**88.80%**	1613,002 / 1709,017	**94.38%**	1666,425 / 1709,017	**97.51%**

Table 7 Inlier rates of the comparison from FWSP points to ES points considering all height deviations of an evaluation area independent of their water depth

	$\Delta h \leq 15$ cm		$\Delta h \leq 25$ cm		$\Delta h \leq 35$ cm	
Elbe 3	1987,587 / 2204,673	**90.15%**	2170,162 / 2204,673	**98.43%**	2197,828 / 2204,673	**99.69%**
Elbe 4	347,788 / 401,173	**86.69%**	389,712 / 401,173	**97.14%**	397,196 / 401,173	**99.01%**
Elbe 5	133,767 / 162,253	**82.44%**	149,963 / 162,253	**92.43%**	154,808 / 162,253	**95.41%**
Elbe 3/4/5	2469,142 / 2768,099	**89.20%**	2709,837 / 2768,099	**97.90%**	2749,832 / 2768,099	**99.34%**

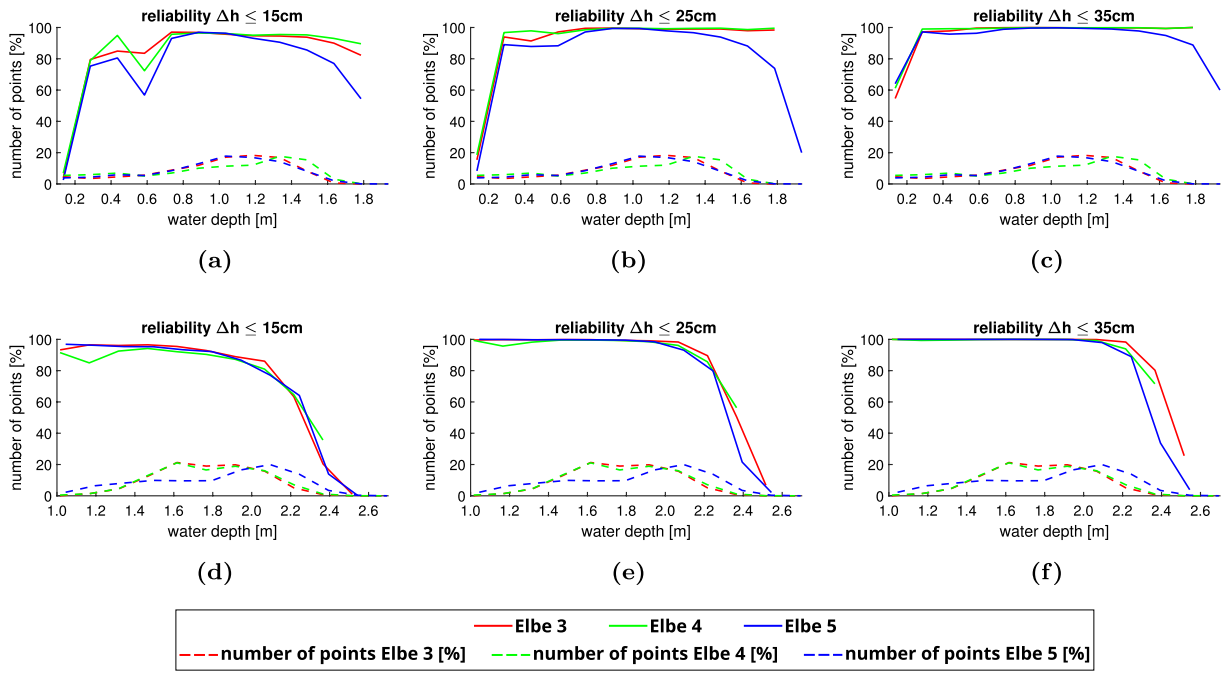


Fig. 16 Inlier rates in regard to their water depths of the comparison from the FWSP to (**a**–**c**) OWP points and (**d**–**f**) ES points

Furthermore, it already showed good accuracies compared to the echo sounder measurement. However, with this method, there is the risk that the real echo maximum is located between two samples so that for a detected maximum peak, the worst-case error must be assumed with the half sample width. Related to the specification in Sect. 2, the resulting height error for one detected peak is approx. 0.032 m in water and approx. 0.043 m in air. The exponential decomposition (presented in Schwarz et al. (2017, 2019)) reflects the reality in a better way, and an increase in accuracy of the 3D coordinates of the ground points is expected.

5.3 Accuracy of Water Surface Points

Another important aspect that has been neglected in this article so far is the accuracy of the water surface point, which plays an elementary role in the consideration of the water bottom point accuracy. Equation 2 shows that the starting point for calculating the water bottom point is the water surface point. The water surface point in turn is indirectly obtained from the measured water surface points of OWP (Sect. 3.7), which are also subject to error influences due to the properties of the green laser. An empirical study Mandlburger et al. (2013) investigated the near water surface penetration of green laser signals and noticed a penetration depth into the water column of 10–25 cm. Furthermore, the authors stated that an underestimation of the water surface of 3 cm leads to a height deviation of 1 cm of the water bottom points. The derivation of the correct water surface could be achieved by statistical analysis and aggregation of neighbouring information.

5.4 Error Budget of the Water Surface Model

Moreover, the error budget caused by the wave pattern and the used water surface model has to be considered. With regard to the measured water surface points (e.g., in Fig. 11) the geometrical error budget of a water surface with smooth, rippled sea swell or small wavelets (wave height of 0.1–0.2 m) is considered. In Westfeld et al. (2017), the *RMSE* of lateral coordinate displacements (ΔXY) and of the height coordinate displacement (Δh) is specified with 2.5–3.8% and 0.35–0.58% of the water depth respectively. Applied to the presented results, this means that for a water depth of 2.1 m, there is a lateral coordinate displacement of 0.053–0.08 m and a height error of 0.0074–0.012 m. To quantify the influence of the water surface model on the bottom point accuracy, further investigations were carried out with a bathymetry simulation tool with regard to the same wave types (Richter et al. 2018, 2021). The results show that water surface modelling with horizontal water surface elements implemented in this study delivers small coordinate displacements at the water bottom with a lateral displacement of 1.0% of water depth and a depth displacement of 0.25% corresponding to 0.021 m and 0.0053 m at a water depth of 2.1 m respectively.

6 Conclusion

Airborne LiDAR bathymetry is an efficient area-wide measuring method for the determination of water bottom elevation models in shallow water areas. Due to water turbidity and the resulting limited penetration depth of the green laser beam into the water body, the full-waveform signal decreases with increasing water depth until a reliable detection of the water bottom in the measurement signals is no longer possible. To date, the maximum penetration depth is characterized by the reliable detectability of these echoes. In this article, an approach for the reliable detection of very weak water bottom echoes was presented with the goal to increase the penetration depth and therefore improve water bottom topography extraction. In contrast to the approaches focusing on isolated evaluation of full-waveforms, information from surrounding measurement data is used for this purpose, with the assumption that they show similar properties and characteristics. In the introduced non-linear full-waveform stacking techniques, closely neighbouring full-waveforms are combined to a stacked full-waveform, analysed, and the results are used for the determination of water bottom echoes in the individual full-waveforms to avoid smoothing effects.

For the evaluation of the processing results, visualizations, an analysis of the height deviations, and inlier rates were used to show the potential of the presented approach. According to the shown results, a good representation of the riverbed can be assumed. In detail, the method shows small height deviations for water depths of 0.7–2.1 m ($RMS \leq 14\,\text{cm}$, $\sigma_{MAD(median)} \leq 8\,\text{cm}$) and high inlier rates (94.38–97.90% with $\Delta h \leq 25\,\text{cm}$). Based on the results of the evaluation, it can be stated that the penetration depth into the water body could be increased by 27.3% from approximately 1.65 m to approximately 2.1 m, which obviously leads to an improved coverage of the riverbed (approximately 204% related to the OWP covered area). It should be noted that the above quantitative statements are valid only for the present data set at hand, which was acquired in a rather turbid river.

7 Outlook and Future Work

In the work presented here, waveform stacking was applied to generate stacked full-waveforms, in which bottom echoes were detected by a technique analysing the peak parameter isolation, prominence and amplitude. A detected peak in an individual waveform was accepted (i.e., confirmed), if it was within a search corridor around the peak in the corresponding stacked waveform. This works well if there is only one local maximum (or peak) within this search corridor. To enhance the applicability to waterbodies with steep bottom topography, the technique will be extended by non-horizontal or non-planar search corridors obtained from neighbouring stacked full-waveforms.

In addition to the integration and evaluation of further methods to improve the shown approach, the applicability of the processing method for data sets from other ALB scanners and the potential for processing coastal data has to be investigated.

Regarding the adaptivity of the full-waveform stacking approach, a detailed investigation with clearly less neighbourhood information would be interesting because some bathymetry scanners acquire data with a considerably lower spatial resolution. In our own first experiments, data from the bathymetry scanner AHAB Chiroptera were processed with the full-waveform stacking approach, with an increase of the evaluable water depth up to 10%. The measurement resolution of the available data was less than 2 points/m^2, requiring a considerably larger raster cell size. Another promising measuring system is the compact topo-bathymetric laser scanner Riegl VQ-840-G (RIEGL 2020). This measuring system is designed for use on an unmanned aerial vehicle, covers a square metre with approximately 20–50 points (Mandlburger et al. 2020) and achieves a maximum water penetration depth of twice the Secchi depth. The special feature of this laser scanner is the fact that for each emitted pulse, the complete full-waveform is recorded and stored, regardless of whether the online processing detects an object echo or not. Here, it is interesting to investigate whether object points can be detected and extracted from supposedly irrelevant measurement data.

Another aspect of future work will be the applicability of the methods to coastal waters, where lower turbidity and thus higher penetration depth can be expected. However, other conditions such as the impact of ocean waves to water bottom point estimation will represent new challenges. Therefore, the use of enhanced water surface modelling and consideration of wave-induced systematic errors are necessary. It is expected that the transfer of the presented processing methods to maritime ALB data will lead to an improvement in the acquisition of seabed topographies.

Acknowledgements The research project on airborne LiDAR bathymetry is funded by the German Research Foundation (DFG). We also thank the German Federal Institute of Hydrology for the research assignment of a pilot study, which allowed intensive practical applications of the developed methods. In addition, we thank the Waterways and Shipping Office Dresden (WSA) for the provision of the survey data and the Airborne Hydro Mapping GmbH (AHM) company for the good cooperation in the preparation of the survey data. This research was supported by Deutsche Forschungsgemeinschaft (Grant 390023295).

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

References

Anderer P, Dumont U, Massmann E, Keuneke R (2011) Wasserkraftnutzung in Deutschland: Wasserrechtliche Aspekte, ökologisches Modernisierungspotential und Fördermöglichkeiten. Technical report. Umweltbundesamt, Deutschland

Benito G, Hudson PF (2010) Flood hazards: the context of fluvial geomorphology. Geomorphological hazards and disaster prevention, pp. 111–128

Charlton R (2007) Fundamentals of fluvial geomorphology. Routledge

Christiansen L (2016) New techniques in capturing and modelling of morphological data. Hydrographische Nachrichten 105:20–23

EuropeanUnion (2000) Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Technical report, The European Parliament and the Council

Glassner AS (1989) An introduction to ray tracing. Academic Press, London

Guenther GC, Goodman LR (1978) Laser applications for near-shore nautical charting. In Ocean Optics V, volume 160, Pp. 174–184. International Society for Optics and Photonics

Guenther GC (1985) Airborne laser hydrography: system design and performance factors. Technical report. National Oceanic and Atmospheric Administration, Rockville

Guenther GC, Cunningham AG, LaRocque PE, Reid DJ (2000) Meeting the accuracy challenge in airborne bathymetry. Technical report. National Oceanic Atmospheric Administration/NESDIS, Silver Spring

Hampel FR (1974) The influence curve and its role in robust estimation. J Am Stat Assoc 69(346):383–393

International Hydrographic Organization (2020) IHO Standards for Hydrographic Surveys, 6th Edition, IHO Publication No. 44. International Hydrographic Organization

Kirmse A, de Ferranti J (2017) Calculating the prominence and isolation of every mountain in the world. Prog Phys Geogr 41(6):788–802

Kongsberg (2009) EA MCU Flächenecholot - Ein hochgenaues Echolotsystem für die Flachwasservermessung und Hindernisse

Litman R, Korman S, Bronstein A, Avidan S (2015) Inverting RANSAC: Global Model Detection via Inlier Rate Estimation. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)

Lurton X (2002) An introduction to underwater acoustics: principles and applications. Springer Science & Business Media

Mader D, Richter K, Westfeld P, Weiß R, Maas H-G (2019) Detection and extraction of water bottom topography from laserbathymetry data by using full-waveform-stacking techniques. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci XLII–2/W13:1053–1059

Mallet C, Bretar F (2009) Full-waveform topographic lidar: state-of-the-art. ISPRS J Photogramm Remote Sens 64(1):1–16

Mandlburger G, Pfennigbauer M, Pfeifer N (2013) Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry—a case study at the River Pielach. ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci 5:W2

Mandlburger G, Pfennigbauer M, Schwarz R, Flöry S, Nussbaumer L (2020) Concept and performance evaluation of a novel UAV-borne topo-bathymetric LiDAR sensor. Remote Sens 12(6):986

Plenkers K, Ritter JR, Schindler M (2013) Low signal-to-noise event detection based on waveform stacking and cross-correlation: application to a stimulation experiment. J Seismolog 17(1):27–49

Reitberger J, Schnörr C, Krzystek P, Stilla U (2009) 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. ISPRS J Photogramm Remote Sens 64(6):561–574

Richter K, Maas H-G, Westfeld P, Weiß R (2017) An approach to determining turbidity and correcting for signal attenuation in airborne lidar bathymetry. PFG-J Photogramm Remote Sens Geoinf Sci 85(1):31–40

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. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci 42(2)

Richter K, Mader D, Westfeld P, Maas H-G (2021) Refined geometric modeling of laser pulse propagation in airborne LiDAR bathymetry. PFG-J Photogramm Remote Sens Geoinf Sci 89(2)

RIEGL (2017) Waveform Extraction Library. Technical report, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH

RIEGL (2018) Datasheet RIEGL VQ-880-G

RIEGL (2020) Datasheet RIEGL VG-840-G

Roncat A, Mandlburger G (2016) Enhanced detection of water and ground surface in airborne laser bathymetry data using waveform stacking. EGU General Assembly Conf Abstracts 18:17016

Sachs L (1982) Applied statistics: a handbook of techniques. Springer-Verlag

Schwarz R, Pfeifer N, Pfennigbauer M, Ullrich A (2017) Exponential decomposition with implicit deconvolution of lidar backscatter from the water column. PFG-J Photogramm Remote Sens Geoinf Sci 85(3):159–167

Schwarz R, Mandlburger G, Pfennigbauer M, Pfeifer N (2019) Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters. ISPRS J Photogramm Remote Sens 150:1–10

Stilla U, Yao W, Jutzi B (2007) Detection of weak laser pulses by full waveform stacking. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci 36(Part 3):W49A

Ullrich A, Pfennigbauer M (2011) Echo digitization and waveform analysis in airborne and terrestrial laser scanning. Photogramm Week 11:217–228

Wagner W, Ullrich A, Melzer T, Briese C, Kraus K (2004) From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci 35:201–206

Wagner W, Ullrich A, Ducic V, Melzer T, Studnicka N (2006) Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS J Photogramm Remote Sens 60(2):100–112

Wang C, Li Q, Liu Y, Wu G, Liu P, Ding X (2015) A comparison of waveform processing algorithms for single-wavelength LiDAR bathymetry. ISPRS J Photogramm Remote Sens 101:22–35

Weiß R, Wirth H (2015) BfG-1861 Erprobung der Laserbathymetrie im Binnenbereich. Technical report, Bundesanstalt für Gewässerkunde

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 J Photogramm Remote Sens 128:314–325

3.2 Volumetrisches nichtlineares Ortho-Full-Waveform Stacking

Beitrag 3 – Volumetrische Full-Waveform Stacking-Prozessierung

Der dritte Beitrag präsentiert die Funktionsweise des volFWFS, welcher sich in einigen Aspekten zum sigFWFS unterscheidet (Tab. 3.1). Die größte Veränderung betrifft dabei die geometrische Berücksichtigung des Pfades des Laserpulses. Bestehende Prozessierungsmethoden zur Filterung der Full-Waveform Stacking Ergebnisse und der Wasseroberflächenmodellierung wurden weiterentwickelt und die Modellierung des Gewässerbodens umgesetzt. Für die Validierung der Ergebnisse wurde ein größeres Untersuchungsgebiet der Elbe aus Beitrag 2 mit dem volFWFS prozessiert und ein Vergleich mit OWP-Punkten und Echolotmessungen durchgeführt. Es kamen die Validierungsmethoden aus Beitrag 2 zur Anwendung.

Tab. 3.1 Unterschiede zwischen der sigFWFS- und volFWFS-Prozessierung.

Kriterium	**sigFWFS**	**volFWFS**
Definition der Nachbarschaft	Anhand der Wasseroberflächenpunkte (Raster)	Mapping der Full-Waveform Amplitudenwerte in einen Voxelraum (=Wasserkörper)
Berücksichtigung des geometrischen Verlaufs des Laserpulses	Nachbarschaft der Messwerte nur an der Wasseroberfläche gegeben (Kap. 6.5)	Nachbarschaft wird in der gesamten Wassersäule eingehalten
Bezeichnung und Erstellung der Pseudo Full-Waveform	stacked Full-Waveform = Akkumulation der kompletten gemessenen Full-Waveforms	Ortho-Full-Waveform = Amplituden einer vertikalen Voxelsäule in abh. der Wassertiefe
Voraussetzung an die Wasseroberfläche	näherungsweise unbewegte Wasseroberfläche	bewegte Wasseroberfläche möglich

Der Beitrag trägt den Titel: **„Volumetric Nonlinear Ortho Full-Waveform Stacking in Airborne LiDAR Bathymetry for Reliable Water Bottom Point Detection in Shallow Waters“**

Art des Beitrages:

Autoren: David Mader[1], Katja Richter[1], Patrick Westfeld[2], Hans-Gerd Maas[1]

[1]Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden, DE
[2]Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Rostock, DE

Publikationsverlauf: Ersteinreichung: 02.März 2022; Revision wird begutachtet

vollständige Referenz:

ISSN:

DOI:

Volumetric Nonlinear Ortho Full-Waveform Stacking in Airborne LiDAR Bathymetry for Reliable Water Bottom Point Detection in Shallow Waters

D. Mader[a,*], K. Richter[a], P. Westfeld[b], H.-G. Maas[a]

[a] *Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden, Germany*
[b] *Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH), Neptunallee 5, 18057 Rostock, Germany*

Abstract

Airborne LiDAR bathymetry allows an efficient and area-wide measurement of the water bottom topography in shallow waters. However, the maximum water depth range of this method is mainly limited by water turbidity, resulting in a reduced coverage of the water bottom topography in deeper waters. Water turbidity causes attenuation effects and hampers the reliable detection of water bottom echoes in the digitized full-waveform signal, and consequently, deeper water depths are not analyzable by using standard processing methods. To increase the analyzable water depth, an extended full-waveform processing method was developed with the goal of enhancing the reliable extraction and detection of bottom points in deeper waters. This volumetric nonlinear ortho full-waveform stacking approach is based on the analysis of information from closely adjacent measurements under the assumption that the water depth is locally steady. A combined analysis of closely adjacent measurements has the advantage that the influence of sensor noise and erratic nonbottom object echoes is significantly reduced so that weak water bottom echoes are better detectable. The results of the combined analysis were finally applied for water bottom echo detection in individual measurements, thus avoiding smoothing effects. For evaluation purposes, the detected water bottom points were compared with points derived from the standard processing method and with echo sounder measurements. The results of a pilot study in a river with high turbidity showed that the application of the extended full-waveform processing increased the analyzable water depth from approximately 1.65 m to approximately 2.20 m, leading to an approximately 210 % increase in the number of detected water bottom points (related to the number of standard processing) and an improved coverage of the water bottom by newly processed points.

Keywords: LiDAR, Bathymetry, Full-waveform processing, Full-waveform stacking, Voxelization, Ortho full-waveform

1. Introduction

The submerged topography of inland waters and coastal zones is subject to permanent dynamic changes, which are partly caused by natural factors and partly by human intervention. Natural changes in the topography of water bodies are a result of erosion and sedimentation caused by normal flow processes or natural disasters such as floods or storm surges (Charlton, 2007; Benito and Hudson, 2010). Human-made changes result from water construction measures such as river regulation or dredging of navigation channels as well as coastal protection measures or marine gravel and sand extraction.

The continuous monitoring of submerged topography is important since accurate information on the geometry of the water bottom is essential for safe inland shipping, maritime navigation and harbor security. Furthermore, the mapping of the water bottom provides the basis for the planning, implementation and assessment of active waterway management measures (e.g., groyne optimization, river engineering modifications, extension of navigation channels) and environmental protection measures (e.g., coastal protection (Christiansen, 2016), river restoration, seminatural hydraulic engineering) as well as for the ecological investigation of benthic habitats (Collin et al., 2008; Chust et al., 2010). The European Water Framework Directive also demands permanent monitoring of the condition of inland and coastal

*Corresponding author.
Email addresses: david.mader@tu-dresden.de (D. Mader), katja.richter1@tu-dresden.de (K. Richter), patrick.westfeld@bsh.de (P. Westfeld), hans-gerd.maas@tu-dresden.de (H.-G. Maas)

Preprint submitted to

Table 1: Overview LiDAR bathymetry concepts. References: a = Parrish et al. (2019); b = NASA-ICESat2 (2022); c = Mandlburger (2020); d = Quadros (2013); e = RIEGL (2021) ; f = RIEGL RiParameter Software. Sensors: I = ICESat-2; II = Leica/AHAB HawkEye IIB; III = Optech SHOALS-1000T; IV = RIEGL VQ-820-G; V = Leica/AHAB Chiroptera; VI = RIEGL VQ-840-G.

	AGL	Laser footprint	typical point spacing	Depth performance
Space-borne LiDAR bathymetry (photon counting LiDAR)	500 km[a]	17 m[a]	0.7 m × 3300 m[b, I]	1 × Secchi depth[a]
Airborne LiDAR deep bathymetry	500 m–1000 m[c]	2 m–6 m[III, II]	0.5 m × 0.5 m– 5 m × 5 m[d, II, III]	3 × Secchi depth[c]
Airborne LiDAR shallow-bathymetry	500 m–1000 m[c]	< 1 m[IV]	0.2 m × 0.2 m– 1 m × 1 m[d, IV, V]	1.5–2.5 × Secchi depth[c]
UAV LiDAR shallow-bathymetry	50 m–150 m[c]	0.05 m–0.15 m[e, IV]	0.04 m × 0.04 m– 0.4 m × 0.4 m[f, VI]	1.5–3.0 × Secchi depth[c]

waters (EuropeanUnion, 2000).

The most common bathymetric measurement method is echo sounding, which can determine the water bottom topography at depths of 0.2 m–11,000 m (de Jong et al., 2002; Lurton, 2002). In shallow water, however, the use of echo sounders is very time-consuming and cost-intensive due to their limited swath width. LiDAR bathymetry is an alternative measurement technology for the efficient recording of the depth and topography of shallow inland and coastal waters with water depths from 0 m–60 m. Current LiDAR bathymetry systems differ in terms of sensor and platform concepts (Mandlburger, 2020). Space-borne instruments such as ICESat-2 are suitable for nearshore bathymetric mapping in discrete profiles (Parrish et al., 2019). Airborne LiDAR bathymetry (ALB), which includes deep-bathy systems and shallow-bathy systems, allows for area-wide recording of the underwater topography. Deep-bathy systems provide a high depth penetration of up to 60 m with low spatial resolution (Mandlburger, 2020). Shallow-bathymetric systems are designed for the simultaneous acquisition of topography and bathymetry and offer a high measurement-point density with limited penetration depth (Mandlburger, 2020). The highest spatial resolution is achieved by shallow-bathymetric UAV LiDAR systems operated at low altitudes from manned and unmanned platforms (Mandlburger et al., 2020, 2021). Table 1 summarizes the characteristics of the different concepts.

LiDAR bathymetry is based on the simultaneous scanning of the water surface, water column and water bottom. For this purpose, the systems emit short green laser pulses with a wavelength of (532 nm) and record the complete full-waveform of the backscattered signal. To derive object information, water surface echo and water bottom echo must be detected in the resulting full-waveform. Subsequently, the water bottom coordinates can be calculated from the signal travel time, propagation velocity, position and direction of the pulse emission (Philpot, 2019). In this context, the change in propagation direction and velocity at the air–water interface and further propagation-induced effects must be taken into account (Guenther and Thomas, 1983; Richter et al., 2021a).

Currently, the depth performance of LiDAR bathymetry systems is limited to 1–3 Secchi depths. The reason for this limitation is the diffuse scattering and absorption of the laser pulses within the water body, which causes a strong attenuation of the signal amplitude (Guenther, 1985; Guenther and Goodman, 1978). In the case of higher water turbidity or greater water depth, the bottom echo in the signal is therefore very weak. The detection of such weak water bottom echoes is currently a major challenge. Section 1.1 summarizes conventional methods for evaluating full-waveform data and reviews recent developments. Section 1.2 highlights the contribution of this article to the research field.

1.1. Related work

There are a variety of methods for evaluating and obtaining object information from full-waveform data. Wagner et al. (2004) and Wang et al. (2015) presented basic methods for object echo detection (threshold, peak maximum, center of gravity, and zero crossing of the second derivative). In addition, there are more complex methods for the estimation of peak position, peak amplitudes and peak sharp parameters. Gaussian decomposition methods (Wagner et al., 2006; Reitberger et al., 2009; Mallet and Bretar, 2009) are not very suitable for the analysis of ALB data due to their specific signal characteristics. However, Schwarz et al. (2017)

Table 2: Overview of previous work and current article.

	Mader et al. (2019)	Mader et al. (2021)	current article
Neighborhood definition			
Regular raster grid	✓	✓	×
Regular voxel grid	×	×	✓
Full-waveform stacking			
Accumulation of individual full-waveforms	✓	✓	×
Volumetric stacking (ortho full-waveform)	×	×	✓
Full-waveform analysis			
Peak maxima	✓	✓	✓
Peak significance	×	✓	✓
Determination of the mean water depth			
Directly in stacked full-waveform	✓	✓	×
From derived water surface and water bottom model	×	×	✓
Filtering of false detections			
Neighboring cell check from the shore	✓	×	×
Neighboring cell check from reference water depth	×	✓	×
Analysis of full-waveform characteristics	×	×	✓
water surface model			
Horizontal water surface	✓	✓	×
Curved water surface	×	×	✓

and Schwarz et al. (2019) presented approaches that allow the extraction of the water surface, water column, and water bottom from the full-waveform signal by exponential decomposition. Further information can be derived from the detected peaks. Schwarz et al. (2019) used *isolation*, *prominence* and *amplitude* parameters to derive statements about the *significance* of a peak. The *prominence* and *isolation* parameters were adapted from the work of Kirmse and de Ferranti (2017), in which mountain peaks were detected and characterized. Höfle and Hollaus (2010) used peak width to derive information about the vertical variation or roughness of the object. All methods mentioned are based on the isolated evaluation of the full-waveforms. Without additional information on water depth, weak peaks near the signal noise cannot be reliably detected with these methods. This can be remedied by novel evaluation methods based on the intelligent use of neighborhood information. Related work has shown that a combination of closely adjacent full-waveforms using full-waveform stacking is conducive to the detection of weak echoes (Stilla et al., 2007; Plenkers et al., 2013; Roncat and Mandlburger, 2016). In Mader et al. (2019), we presented our first approach for applying nonlinear full-waveform stacking techniques to airborne LiDAR bathymetry data. The aim of the combined evaluation of closely adjacent full-waveforms is the amplification of weak echoes due to their redundancy together with an improvement in the signal-to-noise ratio. The first step is to define a local neighborhood. Subsequently, all full-waveforms in this neighborhood are evaluated together, resulting in a mean water depth of the neighborhood. In a filtering procedure, incorrectly determined water depths can be detected and eliminated. In the last step, the mean water depth of the neighborhood is used for the reliable extraction of the water bottom echo in each individual full-waveform. In Mader et al. (2021), an extension of the approach was presented, which contains several improvements regarding full-waveform analysis and filtering. Table 2 (Columns 2 and 3) provides an overview of the methods implemented in Mader et al. (2019) and Mader et al. (2021), in which the analyzable water depth could be increased by 27 % in a concrete example. The results are very promising and show a significant increase in depth performance. However, the approach is limited by the following aspects:

(1) Methodology is based on the assumption of a horizontal water surface, which has only limited validity for coastal waters;

(2) neighborhood definition is performed at the water surface, e.g., the direction of the laser beam (Palmer scan pattern and overlapping flight strips) is neglected; and

(3) filter parameters are determined interactively.

Limitations due to neighborhood definition can be clearly reduced by using voxel space representations. The research of Hosoi et al. (2013), Wang et al. (2007), and Richter and Maas (2022) shows the great potential of regular voxel structure as a data structure for volumetric analysis methods and data representation.

Pan et al. (2016) proposed an approach for deriving water information from full-waveform data using image-processing methods. Since the slanted ray directions are problematic for this approach, the full-waveform data are transformed into a voxel structure, with vertical voxel columns referred to as orthorectified waveforms (*orthowaveforms*). The voxel structure is analyzed using support vector regression image-processing techniques to derive bathymetry and turbidity information. Support vector regression requires data-driven machine learning techniques and thus training datasets for its application.

The limitation due to the horizontal water surface can be overcome by introducing more complex water surface models. In Richter et al. (2021a), different modeling strategies and their effect on the accuracy of the water bottom points were discussed. A suitable modeling approach was presented in Kraus (2000) with the terrain model with composite linear bivariate polynomials or the finite element method, which is similar to the locally tilted water surface model in Richter et al. (2021a). This becomes more relevant as newer ALB sensor systems operate with high pulse rates and smaller beam divergences to achieve a high lateral resolution. Older systems used larger beam divergences with the assumption that the wave effects within the footprint are averaged out ('passive wave correction', Guenther (1985); Westfeld et al. (2017)). This results in a lower measurement resolution, but this was not important due to the low pulse rates.

1.2. Contribution

As described earlier, turbidity is a significant factor in the attenuation of the bottom echo, impeding the reliable detection of weak bottom echoes. This leads to the focus of this article: How can bottom points reliably be extracted from full-waveforms with weak water bottom echoes, without the limitations of the approach from Mader et al. (2019, 2021)? This article proposes an approach for processing ALB full-waveforms in shallow water with the following objectives:

- reliable extraction of water bottom information from weak echoes (i.e., increase in the analyzable water depth);
- avoiding smoothing effects and a reduction in measurement resolution;
- optimization of the extraction of the water bottom from existing datasets (without hardware-specific adaptations); and
- high reliability of the results due to suitable filtering methods.

The volumetric full-waveform stacking processing (VFWSP) makes additional water depth information accessible by a combined analysis of closely neighboring ALB measurement data. The most important difference from previous studies by the authors is the geometric consideration of the propagation direction of the laser pulse throughout the water column. For this purpose, the measured ALB full-waveforms are transferred into a voxel space. Then, very similar to Pan et al. (2016), a pseudo full-waveform (ortho full-waveform) is generated from the vertical voxel columns. This pseudo full-waveform is also very similar to the stacked full-waveform presented in Mader et al. (2019, 2021); thus, the full-waveform analysis and filtering tools from previous work are applicable for deriving initial water depths. This information is used to detect water bottom echoes in the individual full-waveforms. The proposed processing method should reduce smoothing (low-pass filter effects) and prevent a reduction in the original measurement resolution.

This article is structured in six sections beginning with an introduction in Section 1. Section 2 presents the shallow-water LiDAR bathymetry dataset used in the study, the available reference data, and the evaluation methods. Section 3 provides a detailed description of the ortho full-waveform stacking methodology. The results of the investigation are presented in Section 4. Section 5 discusses the results and their accuracy and reliability. The article is completed by a conclusion and future work in Section 6.

2. Datasets and evaluation methods

The methods presented in this article require practical validation to assess and evaluate their functionality, accuracy, reliability and potential. For this, on the one hand, a suitable data basis and, on the other hand, appropriate validation methods and reference data are needed. For our investigations, measurement data from the Elbe River (Germany) were available. Raw data, the results of the standard processing, and echo sounder data for evaluation purposes were provided by the German Federal Waterways and Shipping Office Elbe (WSA) and

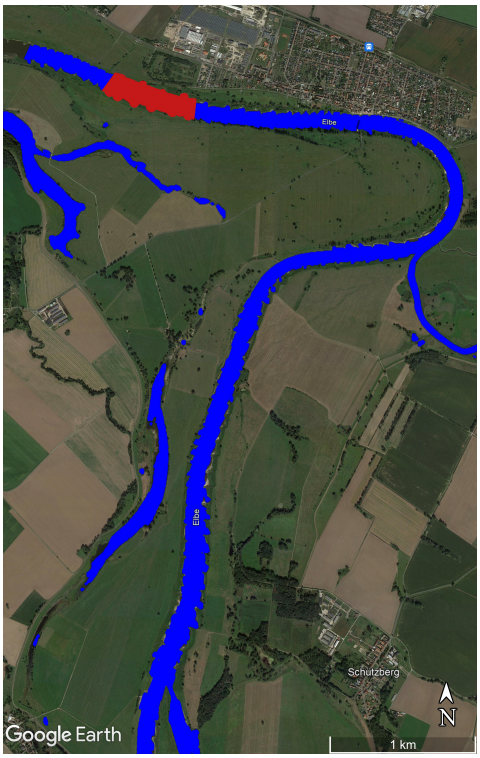


Figure 1: The study area (part of the Elbe River). The red area is the investigation area in this article. (Map data ©2021 Google)

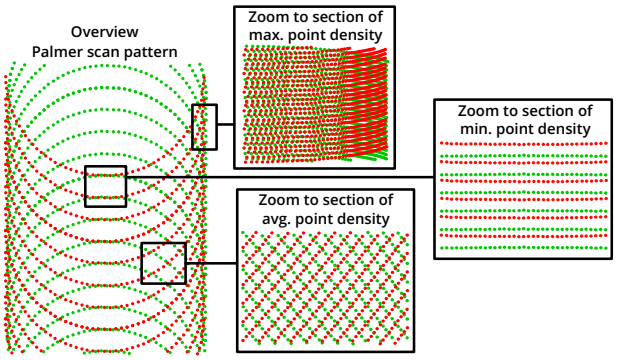


Figure 2: Schematic Palmer scan pattern (adapted from RIEGL Ri-Parameter software) showing the heterogeneous point density. Green points = forward look and red points = backward look.

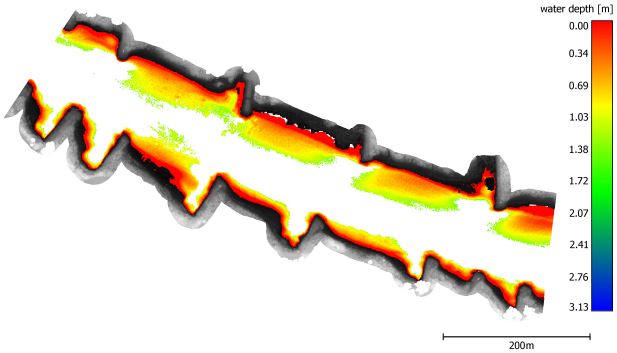


Figure 3: The online processed data of the investigation area are color-coded according to their water depth. Land points = gray.

the German Federal Institute of Hydrology (BfG). The study area, the characteristics of measurement data and the echo sounder data are presented in Section 2.1-2.3. The validation methods are described in Section 2.4.

2.1. Study area

The study area on the Elbe River is located between the German towns of Klöden and Elster. For the development and evaluation of the new methods, ALB measurements of a section (Fig. 1) of the Elbe River with a length of approximately 735 m and a varying width of approximately 88 m to 168 m were used. The same study area was already processed in Mader et al. (2021) with nonlinear full-waveform stacking, i.e., the results of the current article are comparable.

2.2. Measurement data

The ALB data were acquired in Spring 2015 using the RIEGL VQ-880-G ALB system (RIEGL, 2018). The area was scanned at a mean flying altitude of approximately 380 m above ground and a mean flying speed of approximately 155 km h^{-1} using a Palmer scan pattern (Fig. 2) with 20° opening angle, resulting in a point density of up to 55 points m^{-2}. The used beam divergence of 1.1 mrad led to laser spot diameters on the water surface of approximately 0.44 m.

In addition to the points derived from online waveform processing (OWP; Pfennigbauer and Ullrich (2010)), the corresponding full-waveform data were recorded and digitized. In the full-waveform, all backscatterers were mapped in units of 60-200 samples (sample blocks) with a time resolution of 0.575 ns (sample time interval). This corresponds to a 3D distance of approximately 6.5 cm in water at a light propagation speed in water of 225.000 km s^{-1}. The maximum water depth achieved with OWP is approximately 1.65 m (Fig. 3).

Please note that the ALB system has an optional near-infrared (NIR) channel to the green channel, but we did not have NIR data available for our developments and processing.

2.3. Echo sounder data

The echo sounder data (ES) were acquired in Autumn 2015 by a measurement vessel, which was equipped

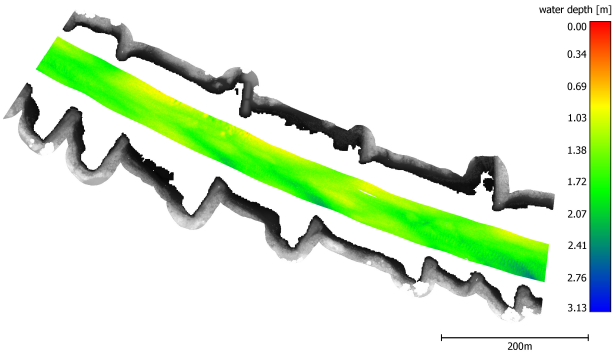


Figure 4: The echo sounder data of the investigation area are color-coded according to their water depth. Land points = gray.

with a positioning system (Leica GX1200 RTK SAPOS Rover), an orientation system (Seatex MRU5), and a vertical sweep echo sounder system (de Jong et al., 2002) realized with an electroacoustic sounding frame (status: 2015). The electroacoustic sounding frame consists of 37 single-beam transducers distributed on two cantilevers over a span of 12 m. The echo sounders operate with a frequency of 200 kHz and exhibit a depth resolution of 1 cm. The 3D point accuracy is stated in Weiß and Wirth (2015) with approximately 7.5 cm in embankment areas and 6.4 cm in areas with flat riverbeds. The actual maximum ES water depth measures approximately 2.7 m (Fig. 4).

2.4. Evaluation methods

For evaluation purposes, the height deviation between the water bottom points resulting from volumetric full-waveform stacking processing and those resulting from OWP and ES were examined. In addition, the model points of an initial water bottom model (Section 3.6) were also evaluated. The OWP data cover water depths of 0.0 – 1.6 m, while the ES data are available in water depths of 1.0 – 2.7 m. In contrast to the OWP points, which are based on the same measurement data as the VFWSP points, the ES points offer the possibility of comparison with an independent measurement method. As a consequence, the comparison with the OWP shows the similarity of the results of the established and proposed processing methods in regions where both deliver bottom points, and the comparison with the ES points validates the accuracy potential of the method.

A comprehensive evaluation of the processing results was performed by using the height deviation Δh, mean height deviation $\overline{\Delta h}$, sigma mean height deviation $\sigma_{\overline{\Delta h}}$, root mean square RMS, sigma mean absolute deviation $\sigma_{MAD(mean)}$ (Hampel, 1974; Sachs, 1982), and sigma median absolute deviation $\sigma_{MAD(median)}$ (Sachs, 1982), calculated in Eq. (1) - Eq. (6).

$$\Delta h_i = h_i(ref) - h_i \tag{1}$$

$$\overline{\Delta h} = \frac{\Sigma(h_i(ref) - h_i)}{N} \tag{2}$$

$$\sigma_{\overline{\Delta h}} = \sqrt{\frac{\Sigma((\Delta h_i - \overline{\Delta h})^2)}{N}} \tag{3}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\Sigma(\Delta h_i^2)}{N}} \tag{4}$$

$$\sigma_{MAD(mean)} = 1.2533 \cdot \frac{\sum |\Delta h_i - \overline{\Delta h}|}{N} \tag{5}$$

$$\sigma_{MAD(median)} = 1.4826 \cdot \mathrm{med}(|\Delta h_i - \mathrm{med}(\mathbf{\Delta h})|) \tag{6}$$

with

$i = 1 \ldots N$
N = number of height deviations
$h_i(ref)$ = height component of reference data
h_i = height component of calculated data
$\mathbf{\Delta h}$ = vector of height deviations
Δh_i = height deviation
$\overline{\Delta h}$ = mean of height deviations
$\mathrm{med}(\mathbf{X})$ = median of a vector $\mathbf{X}$.

The RMS value and the σ_{MAD} value may differ because the RMS value contains possible systematic errors or biases. The MAD values are adjusted from these effects by using mean or median values. In the case of a normal distribution of the height differences, $\sigma_{MAD(mean,median)}$ is usually used for estimating the quality of the results to avoid a too optimistic accuracy statement.

To assess the quality of the developed methods as comprehensively as possible, reliability measures were also used in addition to the accuracy analysis. For this purpose, inlier rates (Litman et al., 2015) were used, which indicate the proportion of points that do not exceed a specified limit value. As an orientation for this limit, we used the total vertical uncertainty (TVU) defined in the Special Order provided in the IHO Standards for Hydrographic Surveys (International Hydrographic Organization, 2020):

$$\mathrm{TVU} = \sqrt{(0.25\,\mathrm{m})^2 + (0.0075 \cdot d)^2} \tag{7}$$

with

$$d = \text{water depth in [m]}. \tag{8}$$

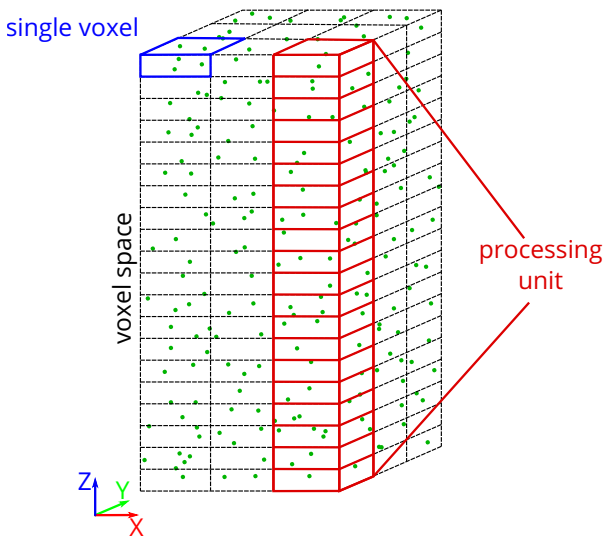


Figure 5: Schematic illustration of a voxel space (dashed black lines), single voxel (blue), processing unit (red) and point cloud, which consists of the geo-referenced local waveform peak data (green).

For the data at hand, the TVU was 0.25 m. Additionally, to obtain a better impression of the reliability of the results, the inlier rates for 0.15 m and 0.35 m are also shown. For a first overall impression of how the evaluation method works, the determination of the statistical values was initially carried out for all VFWSP points. However, the accuracies as well as the reliability measures can vary with respect to the water depth; therefore, they were also analyzed depending on the water depth.

3. Methods

This section addresses the volumetric nonlinear ortho full-waveform stacking processing and its methods for the detection and extraction of water bottom points from ALB full-waveform data. The basic idea of full-waveform stacking processing is a joint evaluation and analysis of closely neighboring measurement data to realize reliable detection and extraction of weakly pronounced water bottom echoes in full-waveform data. The method is based on the assumption that adjacent measurement data have similar properties with respect to the water surface echo and the water bottom echo. The combination of closely neighboring measurements was realized by transforming the measurement data into a voxel space. A prerequisite for this was the modeling of the water surface (both height and slope), which was needed to take refraction into account (Section 3.1). First, all full-waveform information was mapped into a voxel space (voxelization; Section 3.2). Then, vertically stacked voxels were combined into a vertical voxel column (vertical water column), which corresponds to a processing unit (Fig. 5). Subsequently, the water column information was extracted into a signal (very similar to a full-waveform), which has advantageous properties for subsequent processing, namely, an improved signal-to-noise ratio and a strictly vertical direction (Section 3.3). This signal is called the ortho full-waveform in the following. Based on an ortho full-waveform analysis (Section 3.4-3.6), search corridors for the detection of water bottom echoes in the individual full-waveforms can be derived (Section 3.7). In this way, water bottom points can be extracted that were not considered in the standard processing. In Fig. 6, an overview of the presented methods, their results and the corresponding section in the methods section are given. The presentation of the workflow starts with the

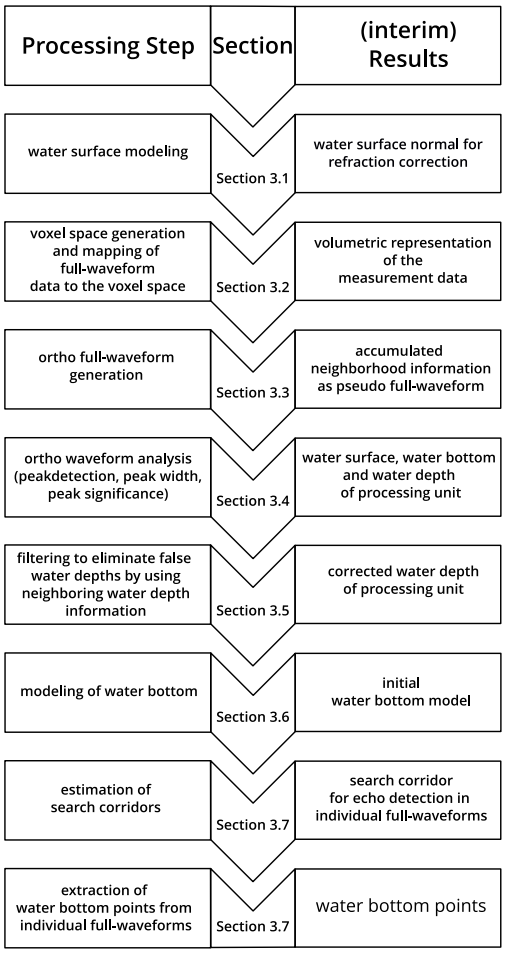


Figure 6: Workflow of volumetric nonlinear full-waveform stacking processing. On the left side are the methods, in the middle the corresponding sections and on the right the interim results.

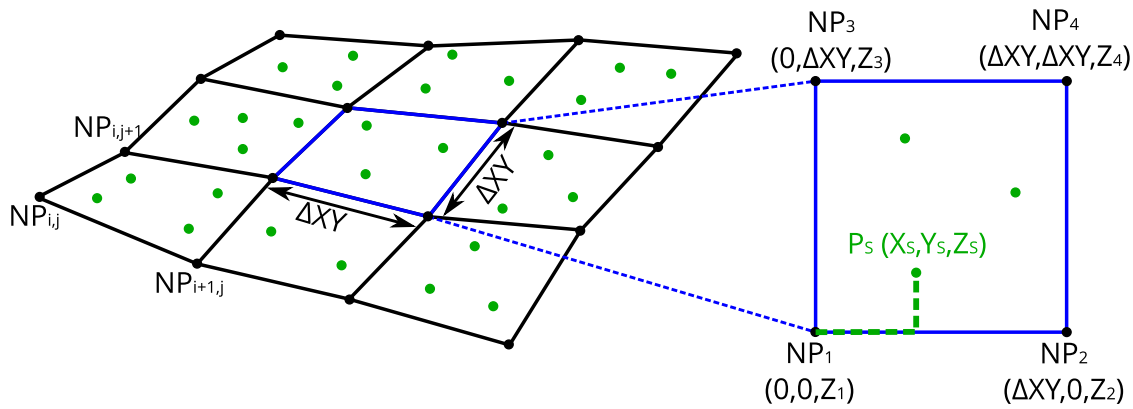


Figure 7: Principle of the terrain model with composite linear bivariate polynomials (Kraus, 2000). The X-Y-coordinates of P_S are local coordinates related to the origin of the grid cell ($\mathbf{NP}_1$).

processing of the ALB data and does not consider any preprocessing steps, such as importing the data, online waveform processing or classification. The individual methods will be presented in the following section in the order of the workflow.

3.1. Water surface modeling

The volumetric full-waveform stacking approach aims to generate results with the highest possible accuracy and reliability. To achieve an accurate geometric representation of the water bottom, the refraction and change in propagation speed according to Snell's law must be considered in ALB data processing. Therefore, the following three aspects are important: (1) the precise position of the water surface, (2) an accurate determination of the water surface normals and (3) an exact definition of the search corridor for the water bottom echo detection in the individual full-waveform, including the information of neighboring processing units.

The water surface and water bottom are basically represented by XYZ-points (irregularly distributed measurement points or gridded result points). However, the representation by points is not sufficient for the above purposes; therefore, description of a continuous surface becomes necessary. For this purpose, the terrain model with composite linear bivariate polynomials or the finite element method (FEM) (Fig. 7) from Kraus (2000) was used for both water surface and water bottom modeling (Section 3.6). The basis is a regular lateral grid. The vertices $\mathbf{NP}_i$ of the grid cells are nodes or nodal points with lateral X-Y-coordinates defined by the regular grid and Z-coordinates to be determined in an adjustment by using Eq. 9.

$$r_s = \left(1 - \frac{\overline{X}_s}{\Delta XY} - \frac{\overline{Y}_s}{\Delta XY} + \frac{\overline{X}_s\overline{Y}_s}{\Delta XY^2}\right) \cdot Z_1 + \left(\frac{\overline{X}_s}{\Delta XY} - \frac{\overline{X}_s\overline{Y}_s}{\Delta XY^2}\right) \cdot Z_2 + \left(\frac{\overline{Y}_s}{\Delta XY} - \frac{\overline{X}_s\overline{Y}_s}{\Delta XY^2}\right) \cdot Z_3 + \left(\frac{\overline{X}_s\overline{Y}_s}{\Delta XY^2}\right) \cdot Z_4 - Z_s \quad (9)$$

with

X_s, Y_s, Z_s = coordinates of measuring point
ΔXY = grid cell width
Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 = Z-coordinates of node points
r_s = residuum

The nodal points of the water surface model were determined from the OWP water surface points, which are expected to be slightly lower than the actual water surface due to a mixture of interface return and near-surface volume backscattering. The following conditional equations for the curvature in the X- and Y-directions are introduced to account for slope differences (Kraus, 2000):

$$r_{curve} = \frac{1}{\Delta XY} \cdot (Z_{j-1} - 2 \cdot Z_j + Z_{j+1}) \quad (10)$$

with

r_{curve} = residual of curve constrain
ΔXY = grid cell size
Z_{j-1}, Z_j, Z_{j+1} = Z-coordinates of consecutive node points

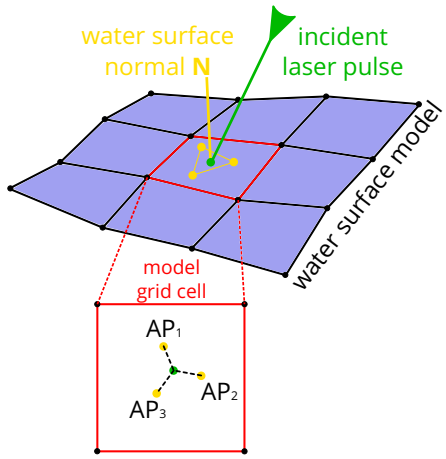


Figure 8: Principle of water surface normal calculation. Green point = intersection point of laser beam and water surface model. Yellow points = auxiliary points (AP_1, AP_2, AP_3). Yellow triangle = auxiliary plane for calculating the water surface normal.

After estimating the nodal points, the model can be used to determine the water surface normal. For this purpose, the intersection of the laser beam (narrow laser beam model) and the water surface model is calculated by inserting Eq. 11 into Eq. 9 and solving for t.

$$\begin{pmatrix} X_{isp} \\ Y_{isp} \\ Z_{isp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + t \cdot \begin{pmatrix} X_{dir} \\ Y_{dir} \\ Z_{dir} \end{pmatrix} \tag{11}$$

with

$X_{isp}, Y_{isp}, Z_{isp}$ =coordinates of intersection point
X_0, Y_0, Z_0 =coordinates of the origin of the laser pulse emission
$X_{dir}, Y_{dir}, Z_{dir}$ =normalized direction vector
t =distance traveled in air

Finally, the water surface normal was determined by using three auxiliary points, calculated in the radius of the laser beam spot around the intersection point (Fig. 8). Since the auxiliary points are part of the water surface, the elevation coordinates are calculated with Eq. 9 by using the corresponding nodal points. These auxiliary points can be used to determine a plane and thus also the plane normal **N**.

3.2. Partitioning of survey data – voxelization

The volumetric full-waveform stacking approach is based on the transformation of the laser bathymetry data into a local Cartesian voxel space representation. Thus, instead of accumulating individual full-waveforms that

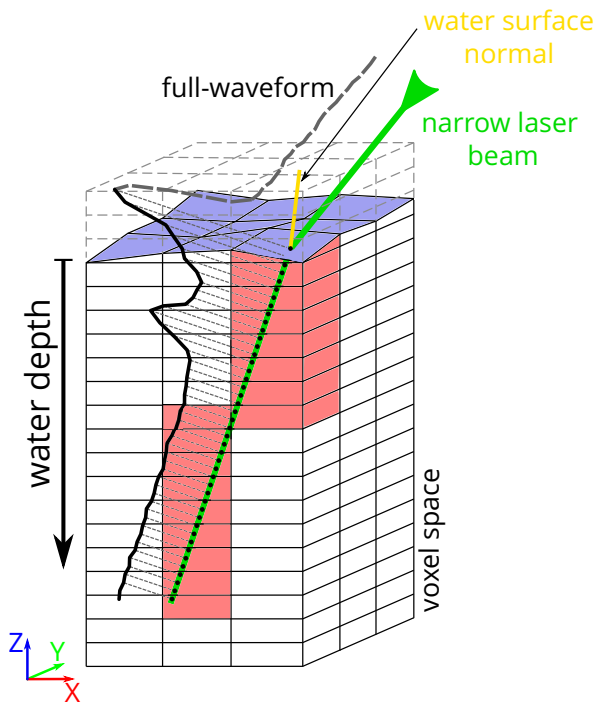


Figure 9: Voxelization of full-waveform data: Principle of transfer from individual full-waveform samples to voxel space.

are only closely adjacent at the water surface into a stacked full-waveform, the individual full-waveforms are geometrically mapped into a voxel space. In detail, this means that the signal amplitudes of the georeferenced samples of each full-waveform are transferred and resampled into the voxel space (Fig. 9). For this purpose, first, the direction vector $\mathbf{X}_1$ from the point of pulse emission $\mathbf{P}_{ls}$ to the predetected water surface point $\mathbf{P}_{ws}$ is calculated (Fig. 10). Subsequently, the intersection point $\mathbf{P}_{wsm}$ of the vector with the water surface model (Section 3.1) and the corresponding water surface normal **N** are determined. At point $\mathbf{P}_{wsm}$, refraction correction is applied, and the underwater direction vector $\mathbf{X}_2$ is calculated (Eq. 12; Glassner (1989)).

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_2 &= \eta \cdot \mathbf{X}_1 + (\eta \cdot C - \sqrt{1 + \eta^2 \cdot (C^2 - 1)}) \cdot \mathbf{N} \\ C &= -\mathbf{N} \cdot \mathbf{X}_1 \\ \eta &= n_{air}/n_{water} \end{aligned} \tag{12}$$

with

n_{air}/n_{water} = refractive index air / water
$\mathbf{N}$ = water surface normal vector

Finally, for each sample i of the full-waveform, the number of samples NoS_i (water surface echo to current

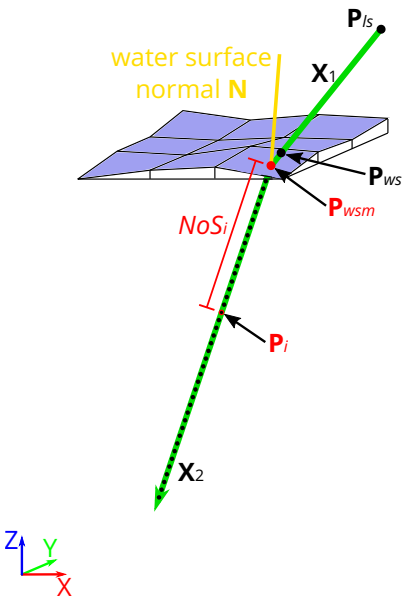


Figure 10: Principle of geo-referencing of single full-waveform samples.

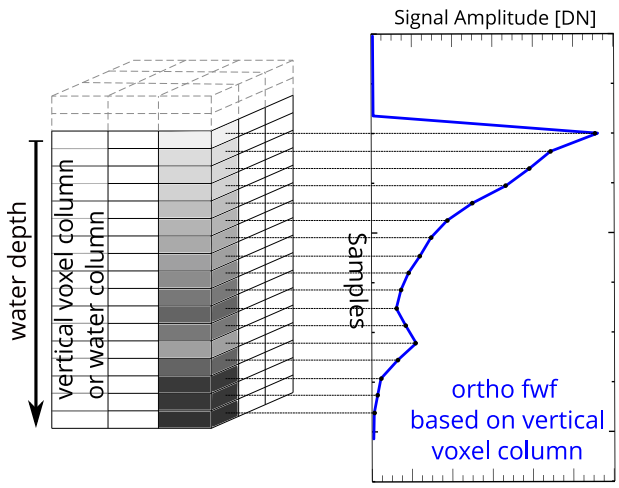


Figure 11: Generation of an ortho full-waveform from the vertical voxel column.

sample) can be determined, and the corresponding 3D point $\mathbf{P}_i$ can be calculated (Eq. 13).

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_{wsm} + 0.5 \cdot NoS_i \cdot t_{sti} \cdot c_w \cdot \mathbf{X}_2 \qquad (13)$$

with

$$t_{sti} = \text{sample time interval}$$
$$c_w = \text{velocity of light in water}$$

The assignment to the voxels is decided by the shortest 3D distance to the voxel center (nearest neighbor resampling). The approach may also be extended to bi/trilinear or higher-order resampling methods. If a voxel is filled with more than one sample, the signal amplitude values are averaged. Empty voxels are avoided by the choice of appropriate voxel dimensions. The divergence of the laser beam is neglected, as proper handling of dispersion and wave effects would drastically enhance complexity (Westfeld et al., 2017).

3.3. Volumetric nonlinear full-waveform stacking – generation of an ortho full-waveform

This section describes the basic methodology for evaluating neighborhood information to detect weak water bottom echoes. In volumetric full-waveform stacking, the neighborhood is defined by the vertical voxel column. To be able to use the proven full-waveform analysis methods for nonlinear waveform stacking from Mader et al. (2021), the information from the vertical voxel column is converted into a similar form as the stacked full-waveforms. For this purpose, an artificial full-waveform is created by interpreting each voxel of the processing unit as a sample of the artificial full-waveform (Fig. 11). This pseudo full-waveform is called an ortho full-waveform in the following sections and is very similar to the *orthowaveform* in Pan et al. (2016). The ortho full-waveform can be considered a representative signal of the processing unit. The properties of an ortho full-waveform can be summarized as follows:

- Strictly speaking, the ortho full-waveform is not a full-waveform in the true sense because it does not consist of recorded and digitized backscatter signals by a receiver (Vosselman and Maas, 2010). Consequently, the laser-radar equation (Wagner et al., 2006) cannot be applied to this signal. The ortho full-waveform is a signal based on the amplitude values of the voxel column; therefore, it is a pseudo full-waveform.

- The ortho full-waveform is composed of parts of individual full-waveforms (those that have passed the voxels of the corresponding voxel column).

- The sample distance can be simplified to the vertical voxel size.

- Since the assignment between the samples of the ortho full-waveform and the voxels in the voxel space is simple, the water depth can be determined easily.

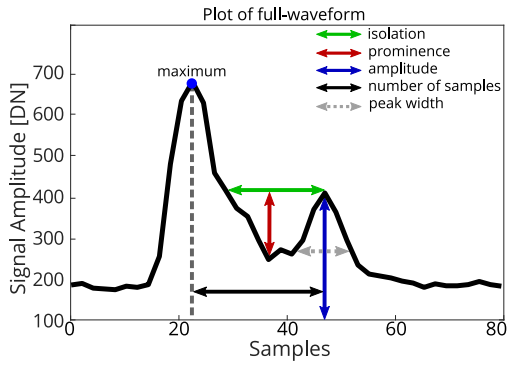


Figure 12: Schematic representation of the parameters of a full-waveform analysis.

- The methods of full-waveform analysis (Section 3.4) can be applied.

3.4. Analysis of full-waveforms

For the evaluation of the ortho full-waveform or full-waveforms in general, the methods presented in Mader et al. (2021) were employed. For the sake of completeness and to ensure a complete understanding of the methods regarding volumetric full-waveform stacking, they are briefly repeated here.

3.4.1. Peak detection

In full-waveform data, the interactions with objects are represented as echoes or local maxima (or peaks). Between two echoes, the time of the signal can be estimated (time-of-flight), which in turn is important information for the calculation of 3D points. For an accurate estimation of the peak-to-peak time, an appropriate detection of those echoes is necessary. In this article, we use the peak maximum method for the detection of water surface and water bottom echoes because it is simple to implement, has a short processing time, works reliably and has shown good accuracy in previous work (worst case scenario: half sampling time interval = approximately 0.032 m (Z-direction) in water depending on the ALB system used). Furthermore, the focus of this article is on the development and evaluation of full-waveform stacking techniques.

3.4.2. Peak significance

Each peak or local maximum of a full-waveform signal can be characterized with the parameters *isolation*, *prominence*, *amplitude* and *significance* (Fig. 12). The *isolation* describes the number of samples until the next signal part with at least the same amplitude and is a measure of how unique/special this echo is in the surrounding signal part. The *prominence* is the difference between the current peak and the local minimum in the isolation area and indicates how present an echo is compared to the surrounding signal amplitudes. The *amplitude* is the received and digitized part of the backscattered signal (emitted by the sensor) on the receiver. The product of *isolation*, *prominence* and *amplitude* results in *significance*, whereby the parameters can be weighted differently if needed. With this approach, peaks of signal noise and other erratic signals can be reliably filtered in most cases. Consequently, it can be assumed that, related to ALB data, the most significant peak represents the water surface echo and the most significant peak after the water surface represents the water bottom echo, unless there is underwater vegetation.

3.4.3. Peak width

Terrain slopes and resulting different water depths have an influence on the shape of the water bottom peak when closely adjacent full-waveforms are combined. Assuming all measurements have the same water depth, this would be represented by a stronger and more narrow distinct water bottom echo in the ortho full-waveform. If changes in water bottom topography and thus water depth occur more frequently and on a larger scale, the water bottom echo becomes weaker and wider and is also more difficult to detect. This must also be considered when determining the search corridor in the individual full-waveform; otherwise, the water bottom echoes cannot be detected correctly or not at all because they are located outside the search corridor or tolerance range. To consider the height variation, the peak width was introduced and used. The determination of the width of the water bottom peak for each ortho full-waveform was performed in the following way:

1. determination of the maximum of the water bottom echo;
2. determination of the first minimum between the water surface and water bottom echo starting from the water bottom echo; and
3. the number of samples between the water bottom echo (1.) and minimum (2.) is equal to half the peak width.

3.5. Filtering of volumetric full-waveform stacking results

Initially, the ortho full-waveforms were generated independently for each separate voxel column. The results

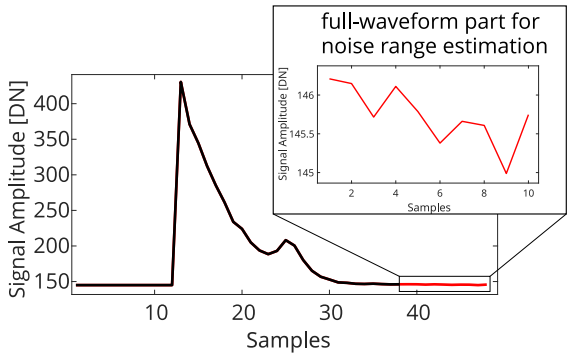


Figure 13: Full-waveform stacking results (black) with full-waveform part for noise range estimation (red). Black curve = Complete ortho full-waveform. Red curve = part for noise range estimation.

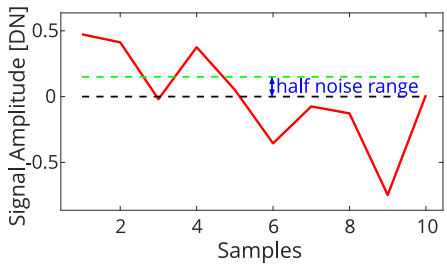


Figure 14: Estimation of noise range. Red line = tail part of the full-waveform. Black dashed = zero line. Green dashed = upper part of the noise range.

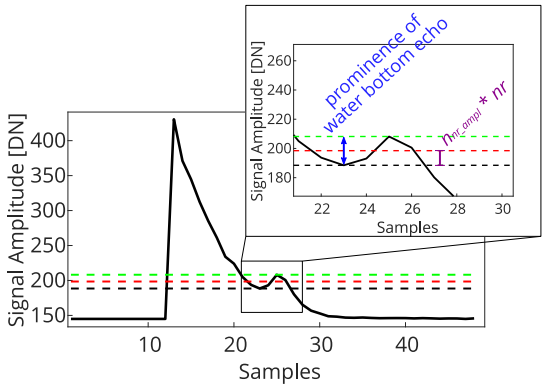
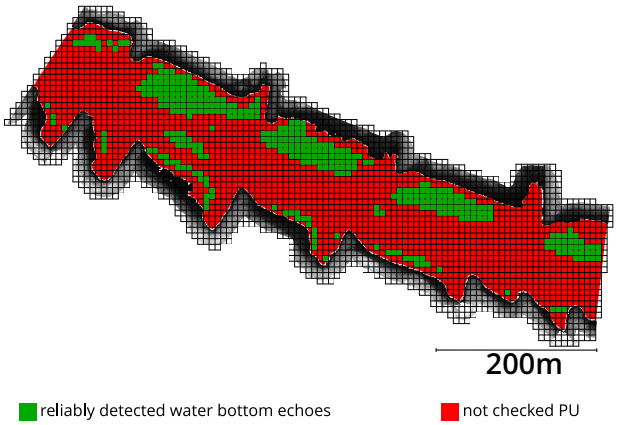


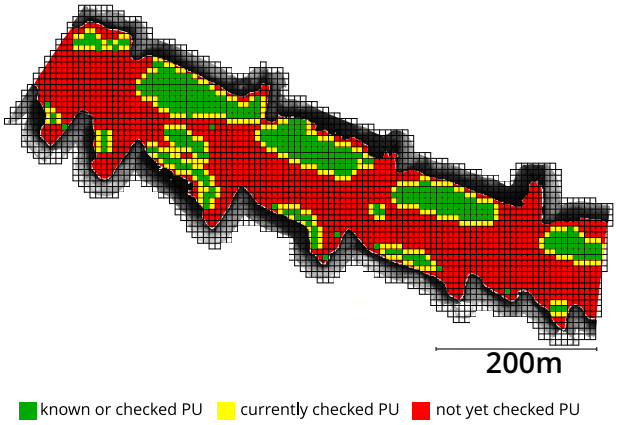
Figure 15: Application of multiple noise ranges (n_{nr_ampl}=factor) for checking the reliability of the water bottom echo. Black dashed line = amplitude of local minimum. Red dashed line = amplitude threshold ($n_{nr_ampl} \cdot nr$). Green dashed line = amplitude of the water bottom peak.

of the ortho full-waveform analysis are mostly very reliable. However, false detections of water bottom echoes may still occur, especially in deeper areas when the amplitude of the water bottom echo is close to the noise level. These false detections were eliminated in a filtering process. For this purpose, the results were checked and validated by comparing the *prominence* of all detected water bottom echoes with the noise characteristics. Reliably determinable water bottom echoes were flagged as validated. Subsequently, all other echoes were iteratively compared with directly adjacent validated processing units to find false detections. Prerequisites for this are either processing units with reliably determined water bottom echoes or processing units with known water depths (reference values). The latter case rarely occur; therefore, processing units with reliably detected water bottom echoes were used for this purpose.

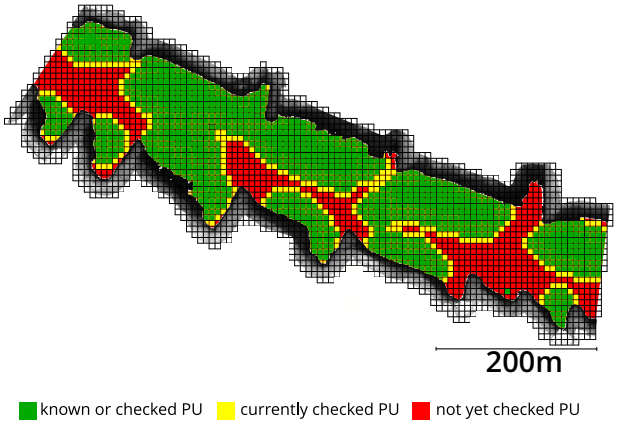
The comparison of the water bottom *prominence* of the ortho full-waveforms with their noise behavior requires the investigation of the noise characteristics. For this purpose, the tail part of the full-waveform was used, which should not contain any echoes from objects (Fig. 13; (Guenther, 1985)). The application of the last samples of a full-waveform to determine noise characteristics was described in Zhu et al. (2011) in the context of denoising. For this part of the full-waveform, the offset was first removed, i.e., the mean value over all sample amplitudes was determined and subtracted from each sample amplitude. Then, the median value of all offset-adjusted peak amplitudes was determined, which here corresponds to the noise characteristics describing parameter *nr* (Fig. 14). To guarantee that only significant water bottom echoes are detected, this value should be larger than or equal to the minimum amplitude resolution of the individual full-waveform (for this dataset = 1). If the *nr* parameter is lower, it is set to 1. A comparison of the *prominence* of the water bottom echo with a multiple of the noise range gives information about the reliability of the found water bottom echo (Fig. 15). If the *prominence* is larger than $n_{nr_ampl} \cdot nr$, the echo can reliably be assumed to be a water bottom echo and used for filtering of the surrounding processing units (Fig. 16a). The factor n_{nr_ampl} should be set in such a way that, on the one hand, the reliability of the water bottom detection is maximized and, on the other hand, enough processing units are found for filtering. Afterward, the iterative filtering of the remaining processing units could be performed. In the first iteration step, all direct neighbors to the already validated processing units were determined, and their water depth (= number of samples) was checked by using search corridors (Fig. 16b). This means that all surrounding known water depths were averaged and compared to the number of samples of the current processing unit. The mean peak width over all ortho full-waveforms was used as a tolerance range of the search corridor to account for possible slopes or depth variation of the water bottom.



(a) Iteration step 0 of 14



(b) Iteration step 1 of 14



(c) Iteration step 4 of 14

Figure 16: Principle of iterative filtering of the processing units (PU) in the study area (for this example, 14 steps). For case (a), green = grid cells with reliably detected water bottom echoes. For cases (b) and (c), green = known or checked PU. Gray = land PU. Yellow = currently checked PU. Red = not yet checked PU.

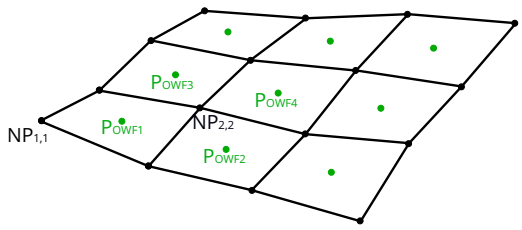


Figure 17: Calculating node points (black points) from ortho full-waveform analysis results (green points).

Three cases can occur during comparison:

1. The current bottom peak is within the search corridor → the water bottom peak is validated and will be used for validation of other neighbors in the following iterations.

2. The current bottom peak is outside the search corridor → in the current ortho full-waveform the most significant peak within a search corridor is set as the water bottom echo and used in the following iteration for validation purposes.

3. The current bottom peak is outside the search corridor, and no peak was found in the current ortho full-waveform within the search corridor → the current ortho full-waveform is invalid and discarded for further processing.

After additional processing units were validated, all unchecked processing units that had validated neighbors were checked in the next iteration step. This was repeated until all processing units were checked (Fig. 16). To minimize the few remaining incorrect grid cells after filtering, the entire filtering process was repeated in a slightly different manner by comparing all checked grid cells again with the surrounding known/checked cells.

3.6. Water bottom modeling

The modeling of the water bottom was based on the results of volumetric full-waveform stacking. For this purpose, the ortho water bottom points (resulting from the ortho full-waveform analysis) were transferred in a regular grid equal to the XY grid of the voxel space and were located in the center of the bottom model grid cells (Fig. 17). The Z-coordinate of the nodal points results from the mean of the Z-coordinates of the ortho waveform points in the surrounding grid cells. For example, the Z-coordinate of nodal point $\mathbf{NP}_{2,2}$ is the result of the average of the Z-coordinates of the ortho full-waveform points $\mathbf{P}_{OWF1}$, $\mathbf{P}_{OWF2}$, $\mathbf{P}_{OWF3}$ and $\mathbf{P}_{OWF4}$ (Fig. 17). To preserve local elevation differences, the

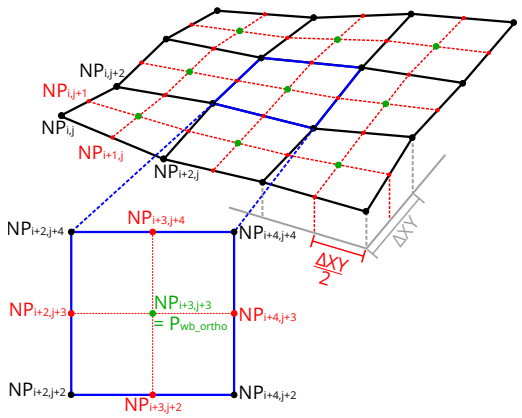


Figure 18: Inclusion of the ortho waveform points into the initial water bottom model. Black $\mathbf{NP}_{i,j}$ = origin nodal points. Red $\mathbf{NP}_{i,j}$ = new nodal points. ΔXY = original grid cell size.

ortho full-waveform-based points were introduced into the model directly. For this purpose, a model cell was divided into four subcells by making the ortho water bottom points also nodal points (Fig. 18). The heights of the additional nodal points (red points in Fig. 18) result from linear interpolation between the existing nodal points. In the following section, all nodal points of the initial water bottom model were used with Eq. 9 to define the search corridor for detecting the water bottom echo in the individual full-waveform.

3.7. Detection and extraction of water bottom points

The results of the volumetric full-waveform stacking form the basis for the final detection of the water bottom points. The final derivation of the water bottom points are not carried out directly in the ortho full-waveform but separately in each individual full-waveform. Consequently, a modified majority vote was applied here rather than averaging, thus avoiding lowpass filter effects. This is the reason for using the term volumetric nonlinear ortho full-waveform stacking approach.

Fig. 19 illustrates the process of detection and extraction of water bottom points from individual full-waveforms. The starting point is the penetration point of the laser beam through the water surface $\mathbf{P}_{wsm}$ (Section 3.1) and the direction vector of the laser beam underwater $\mathbf{X}_2$ (Section 3.2). Below, the intersection of the vector $\mathbf{X}_2$ and the initial water bottom model (Section 3.6) is calculated and results in the point $\mathbf{P}_{wbm}$. Thus, the number of samples between the water surface and bottom point NoS_{wb} can be determined with a very good approximation. Subsequently, a search corridor is defined (similar to Section 3.5) whose tolerance range can be derived from the peak width of the processing

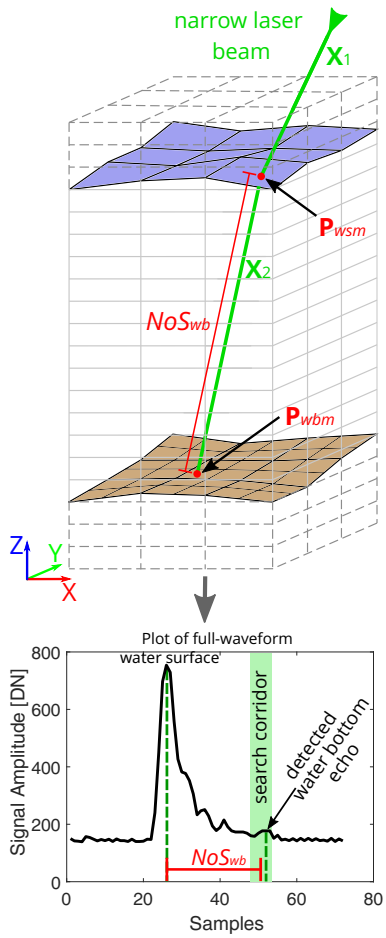


Figure 19: Detection of weak water bottom echoes in individual full-waveforms by using ortho full-waveform analysis results (initial water bottom model).

unit (Section 3.4). The echo that is closest to NoS_{wb} within the search corridor is finally detected as the water bottom echo. Using the initial water bottom model for search corridor determination has a great advantage in that information from the neighboring processing units is included in the determination of the search corridor and thus also takes into account water bottom slopes to a certain degree.

4. Results

This section presents and validates the results of the extended full-waveform processing obtained in a pilot study. In this context, we first discuss the determination of an appropriate voxel size, which has a significant influence on the results (Section 4.1). This is followed by a visual presentation of the processing results, which

provides initial information on the coverage of the water bottom, the quality with respect to the reference data and problematic areas in the study area (Section 4.2). The section finishes with a quantitative evaluation of the achieved processing results and the reference data based on their height differences (Section 4.3 and 4.4).

4.1. Estimation of voxel size

The voxel size has a direct influence on the ortho full-waveform and on the definition of the search corridor, and thus on the final result of the processing. In the following section, the voxel size is separated into lateral components (X and Y) and vertical components (Z), and their influence on the accuracy and reliability values of the result is examined with the help of a representative subarea of the present study area. The voxel shape is usually noncubic with Z significantly smaller than X and Y.

To investigate the influence of the lateral size, the study area was processed with different voxel sizes. The evaluation of the results was performed with the methods presented in Section 2.4.

4.1.1. Lateral voxel size

The lateral size plays a major role in the number of full-waveforms included in a processing unit. If the lateral size is too small, there will be less redundancy, and the signal-to-noise ratio may be poor. Weak water bottom peaks thus become more difficult to detect. If the lateral size is too large, there is a risk of introducing undesirable smoothing effects similar to a lowpass filter. However, this also depends on the water bottom topography. Table 3 summarizes the number of extracted points, mean height difference ($\overline{\Delta h}$), accuracy (RMS), and reliability (inlier rate with $|\Delta h| \leq 0.25$ m). As the voxel size increases, the number of extracted points decreases. The accuracy values improve, but the change is marginal beyond a lateral size of 2 m × 2 m. Even in the areas with minimum point density (cf. Fig. 2), a lateral voxel size of 1 m × 1 m provides sufficient redundancy.

Table 3: Results of the investigation of different lateral voxel sizes. The vertical voxel size was 10 cm. Only VFWSP points that could be compared with OWP and ES points were considered.

lateral size	extracted points	$\overline{\Delta h}$	RMS	$\lvert\Delta h\rvert \leq$ 0.25 m
1 m × 1 m	1,210,441	2.1 cm	0.14 m	95.54 %
2 m × 2 m	1,173,356	1.3 cm	0.12 m	96.63 %
3 m × 3 m	1,138,589	0.8 cm	0.11 m	96.67 %
4 m × 4 m	1,060,344	0.2 cm	0.11 m	96.34 %

Thus, 2 m × 2 m is applied for the lateral voxel size, as more points were extracted at a negligible loss in precision and reliability. The lateral voxel size depends on scanner parameters, water turbidity and bottom topography and may thus be different for other datasets.

4.1.2. Vertical voxel size

The vertical voxel size depends on the sampling interval of the ALB system. If the vertical voxel size is too small, this can lead to very weakly occupied or even empty voxels in the processing unit. If the voxels are only filled with a few entries, the redundancy required to eliminate the noise signal is missing. Filling empty voxels by interpolation methods does not provide any additional information. If the vertical voxel size is set too large, several consecutive samples will fall into the same voxel, and smoothing effects may occur in the same way as with lateral voxel sizes that are too large. This further attenuates weak signals or even make them disappear.

Table 4: Results of the investigation of different vertical voxel sizes. The lateral voxel size applied for this was 2 m × 2 m. Only VFWSP points that could be compared with OWP and ES points were considered.

vertical size	extracted points	$\overline{\Delta h}$	RMS	$\lvert\Delta h\rvert \leq$ 0.25 m
0.065 m	1,156,801	5.5 cm	0.21 m	90.91 %
0.08 m	1,215,089	2.7 cm	0.17 m	94.50 %
0.10 m	1,173,356	1.3 cm	0.12 m	96.63 %
0.12 m	1,118,190	2.4 cm	0.12 m	96.64 %
0.14 m	1,016,103	2.3 cm	0.10 m	96.71 %

To investigate the influence of the vertical size, the test area was processed with different voxel sizes, starting with 6.5 cm, which corresponds to the maximum vertical distance between two samples of an individual full-waveform underwater with slight deviations depending on the wave-affected incidence angle. The investigation of vertical voxel sizes smaller than 6.5 cm was omitted since no informative results regarding a suitable voxel size are expected here. Table 4 shows the results of the investigation. As the vertical voxel size increases, the number of extracted water bottom points decreases. The accuracy and reliability are lowest for vertical voxel sizes of 6.5 cm and 8.0 cm. Starting from a value of 10.0 cm, the statistical values are better and remain very similar until 14.0 cm. Since a vertical voxel size of 10.0 cm leads to the highest number of extracted points with good accuracy and reliability, this value was used for the following processing. Again, the value may be slightly different for different datasets.

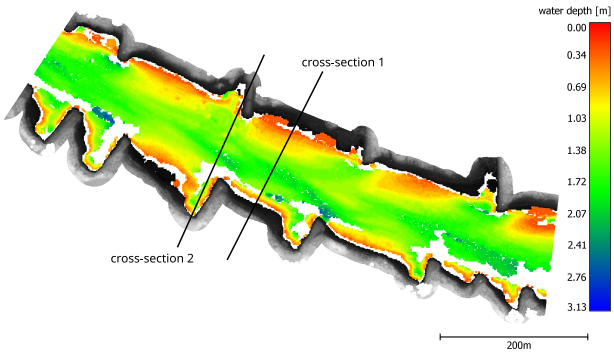
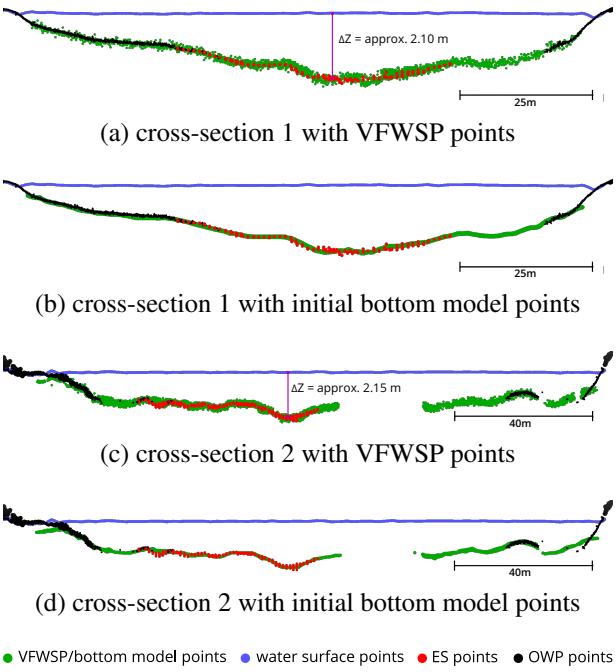


Figure 20: VFWSP points color-coded by their water depth. Cross-section 1 is shown in Fig. 21a, b, and the cross-section is shown in Fig. 21c, d.

4.2. *Visualization of the results*

Fig. 20 shows the VFWSP points color-coded by their height coordinate. Compared to the OWP points in Fig. 3, the VFWSP points cover a clearly larger area of the riverbed, resulting from an increased analyzable water depth obtained by the extended processing method. The VFWSP points seem visually plausible, as the same elevation contours can be identified as in the OWP and ES data in Fig. 3 and 4.



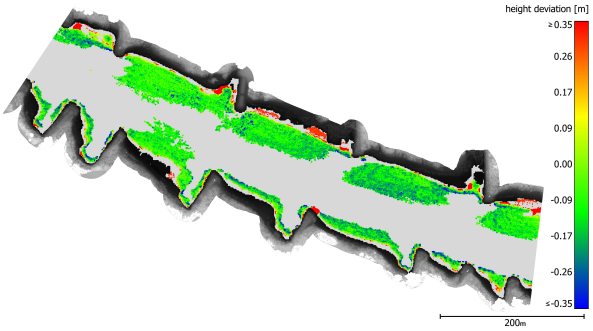
(a) cross-section 1 with VFWSP points

(b) cross-section 1 with initial bottom model points

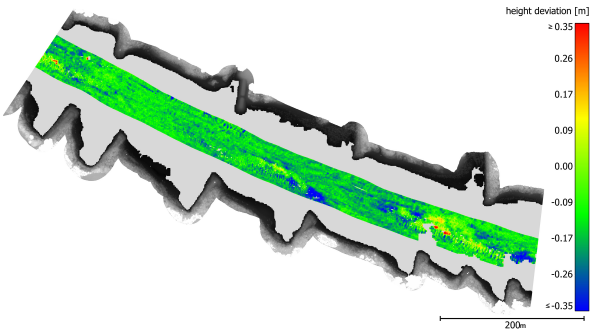
(c) cross-section 2 with VFWSP points

(d) cross-section 2 with initial bottom model points

Figure 21: Cross-sections through the Elbe River. The height coordinate is exaggerated by a factor of 6. The location of both cross-sections are shown in Fig. 20.



(a) Comparison VFWSP points and OWP points



(b) Comparison VFWSP points and ES points

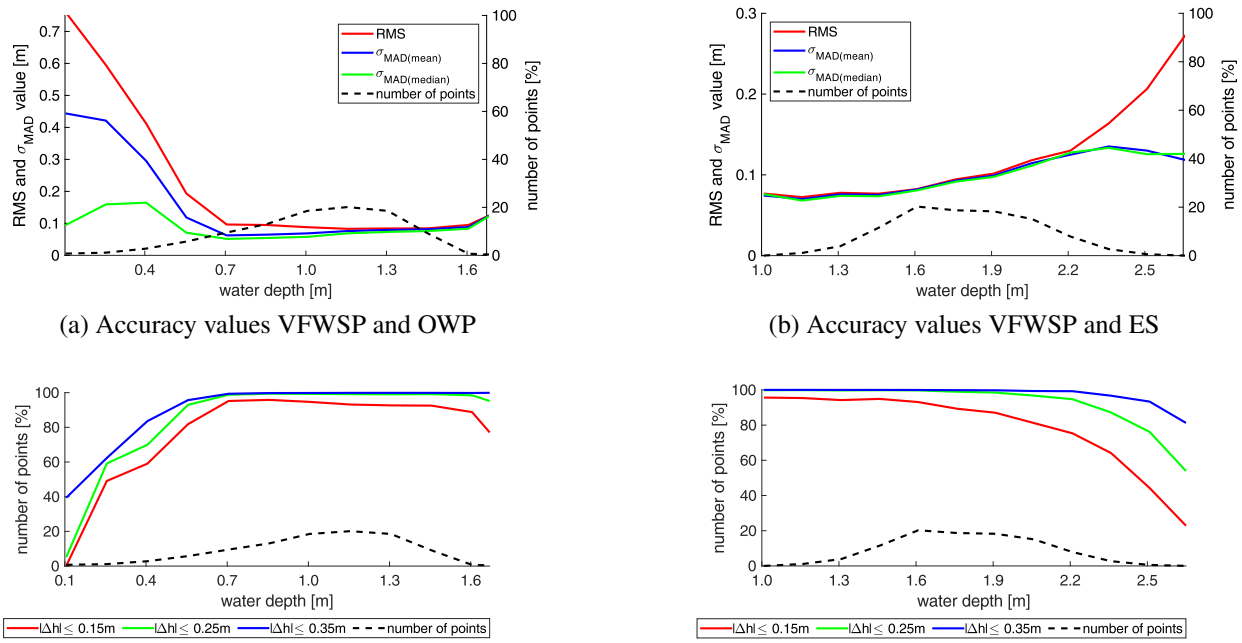
Figure 22: Color-coded height deviation of VFWSP points and (a) OWP points as well as (b) ES points.

Fig. 21 shows an example of two cross-sections, which are aligned approximately perpendicular to the flow direction of the Elbe River (Fig. 20). For each cross-section, the VFWSP points (Fig. 21a and c) and the bottom model points (Fig. 21b and d) are shown. The VFWSP points represent the riverbed very well. Larger deviations are only evident in the near-bank area. This applies to the VFWSP points of Cross-section 2 (Fig. 21c) and the bottom model points in general (Fig. 21b and d). In the cross-sections of the VFWSP results, a water depth of approximately 2.10 m (Fig. 21a) and 2.15 m (Fig. 21c) was measured. The bottom model points also represent the water bottom very well. The comparison between VFWSP and water bottom model points clearly shows that the water bottom model points are less noisy than the VFWSP points.

It is also noticeable that in Cross-section 1, the bottom of the water body could be determined completely, whereas this was not possible in Cross-section 2. Since no reference data are available for this area, the actual reason remains unclear. Potential explanations are an unsteady bottom, changed reflectivity of the bottom, higher turbidity or the bottom being too deep.

Table 5: Accuracy values and inlier rates (Section 2.4) of the comparison VFWSP points vs. OWP points (all points; points with a water depth ≤ 0.7 m; points with a water depth > 0.7 m) and VFWSP vs. ES points. wd = water depth.

	all OWP	OWP with wd ≤ 0.7 m	OWP with wd > 0.7 m	ES
Accuracy				
$\overline{\Delta h}$	0.030 m	0.13 m	0.0094 m	−0.0020 m
$\sigma_{\overline{\Delta h}}$	0.15 m	0.27 m	0.086 m	0.10 m
RMS	0.15 m	0.30 m	0.087 m	0.10 m
$\sigma_{MAD(mean)}$	0.091 m	0.19 m	0.074 m	0.098 m
$\sigma_{MAD(median)}$	0.066 m	0.075 m	0.065 m	0.094 m
Inlier Rate				
$\lvert\Delta h\rvert \leq 15$ cm	91.01 %	77.94 %	93.76 %	87.29 %
$\lvert\Delta h\rvert \leq 25$ cm	96.83 %	85.61 %	99.19 %	98.05 %
$\lvert\Delta h\rvert \leq 35$ cm	98.23 %	90.63 %	99.83 %	99.63 %



(a) Accuracy values VFWSP and OWP

(b) Accuracy values VFWSP and ES

(c) Inlier rates of VFWSP and OWP

(d) Inlier rates of VFWSP and ES

Figure 23: Accuracy values and inlier rates for the comparison between VFWSP and OWP points as well as ES points depending on the water depth.

4.3. *Analysis of height deviation – VFWSP points from individual full-waveforms*

This subsection addresses the comparison between the resulting point cloud from the volumetric nonlinear ortho full-waveform stacking and the OWP respective ES points. Ideally, reference data with superior accuracy should be used for the analysis. The OWP and ES data, however, are considered comparative data due to their accuracy but are also called reference data in this article.

Fig. 22 shows the height deviations between VFWSP points and OWP points (Fig. 22a) as well as ES points (Fig. 22b) for the corridor with available echo-sounding data. The majority of the points have very small height

Table 6: Accuracy values and inlier rates (Section 2.4) of the comparison VFWSP model points vs. OWP points (all points; points with a water depth ≤ 0.7 m; points with a water depth > 0.7 m) and ES points. wd = water depth.

Accuracy	all OWP	OWP with wd ≤ 0.7 m	OWP with wd > 0.7 m	ES
$\overline{\Delta h}$	0.052 m	0.17 m	0.013 m	0.018 m
$\sigma_{\overline{\Delta h}}$	0.17 m	0.28 m	0.073 m	0.071 m
RMS	0.18 m	0.33 m	0.074 m	0.073 m
$\sigma_{MAD(mean)}$	0.096 m	0.21 m	0.055 m	0.061 m
$\sigma_{MAD(median)}$	0.055 m	0.082 m	0.050 m	0.051 m
Inlier Rate				
$\lvert\Delta h\rvert \leq 15$ cm	91.39 %	71.06 %	98.06 %	95.10 %
$\lvert\Delta h\rvert \leq 25$ cm	95.18 %	81.85 %	99.55 %	99.00 %
$\lvert\Delta h\rvert \leq 35$ cm	96.81 %	87.67 %	99.80 %	99.73 %

differences. Higher deviations are observed in the riverbank areas, where the VFWSP points are too deep (red areas near the shore in Fig. 22a). This effect is also clearly visible in Cross-section 2 (Fig. 21c). Furthermore, the locations where the new method operates at its limits with respect to the maximum analyzable water depth show larger height deviations (blue areas in Fig. 22b). The red areas in the middle of the river result from incorrectly determined water depths in the ortho full-waveform and could not be successfully filtered by the advanced processing (Fig. 22b). The heterogeneous distribution of the height differences confirms the necessity of the water depth resolved evaluation.

Table 5 shows the results of the comparison with a distinction of the water depth between less than and greater than 0.7 m, since investigations presented later will show that the method has problems in a range of 0.0 m to 0.7 m. OWP points are only available in the shallow-water area with a water depth between 0.0 m and 1.65 m, and the $\overline{\Delta h}$ value is positive; consequently, the VFWSP points are too deep. With the ES points, it is the opposite, where the $\overline{\Delta h}$ value is negative and therefore the VFWSP points are too high. However, the values are statistically insignificant according to the sigma value (significance level $\alpha = 5\,\%$). The RMS values of 10 cm to 15 cm or $\sigma_{MAD(median)}$ with 6.6 cm to 9.4 cm basically confirm that the extended processing method works well. This is additionally confirmed by the large values of the inlier rate of 96.83 % to 98.05 % for VFWSP points with height deviation of 25 cm or less.

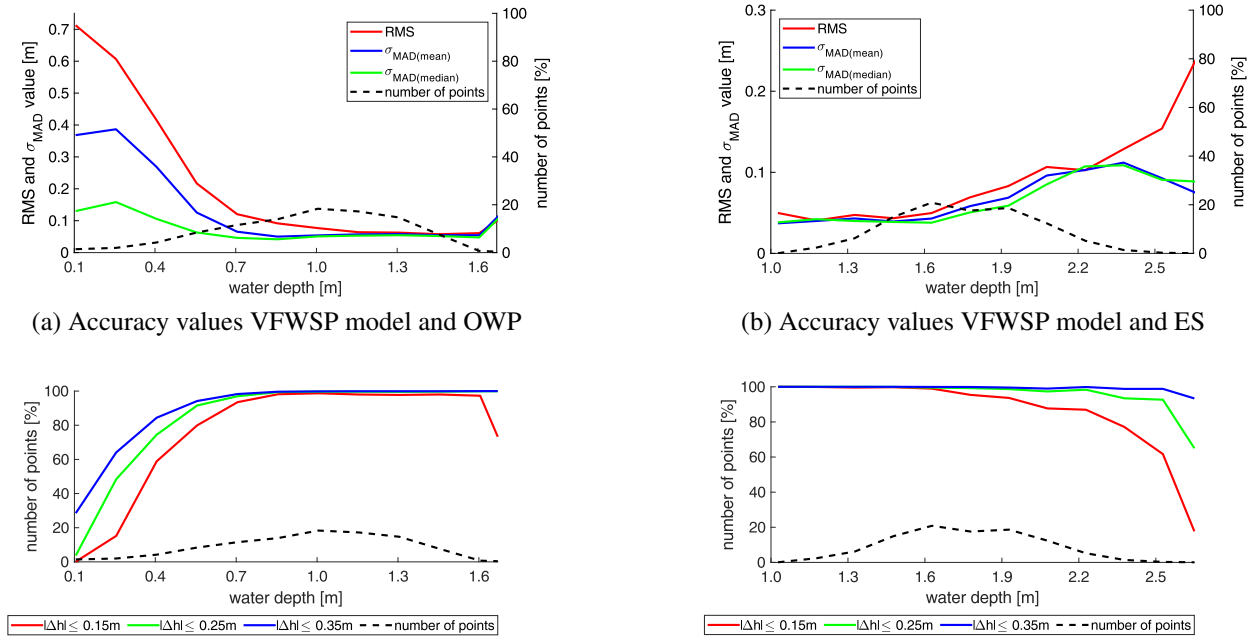
In addition, a depth-dependent accuracy assessment was performed. Starting with a comparison of the VFWSP points and OWP points, Fig. 23a shows the accuracy measures, and Fig. 23c shows the reliability measures. For both curves, it is obvious that the VFWSP points with a water depth up to 0.5 m do not fit well with the OWP points. In the water depth range between 0.5 m to 0.7 m, the height differences decrease, and from 0.7 m, the VFWSP points fit the OWP points very well, which corresponds to Table 5.

The comparison of the VFWSP points with the ES points also shows very good agreement of both point clouds with respect to accuracy (Fig. 23b) and inlier rates (Fig. 23d). Up to a water depth of approximately 2.20 m, the RMS and σ_{MAD} values remain smaller than 0.15 m. With further increasing water depth, both the accuracy and inlier rate decrease noticeably. However, at this depth, the number of VFWSP points decreases rapidly; therefore, the method seems to operate at its limit.

4.4. Analysis of height deviation – VFWSP model points

Based on the ortho full-waveform results, an initial surface model was determined for the water bottom (Section 3.6). This subsection discusses the question of whether this model is also suitable for representing the water bottom. For this purpose, model points with a spacing of 0.2 m were calculated, and their accuracy and reliability were tested by a comparison with OWP and ES points.

Table 6 presents the results of the investigation. Regarding the comparison of model points with OWP points, $\sigma_{MAD(mean)}$ and $\sigma_{MAD(median)}$ have values less than 10 cm. The inlier rates are all above 90 %. When compared to the ES points, the accuracy values are even better and are entirely in the single-digit centimeter range. The inlier rate for a threshold of 0.25 m is very good here with 99.00 %. This is confirmed by the



(a) Accuracy values VFWSP model and OWP

(b) Accuracy values VFWSP model and ES

(c) Inlier rates of VFWSP model and OWP

(d) Inlier rates of VFWSP model and ES

Figure 24: Accuracy values and inlier rates for the comparison between VFWSP model points and OWP points as well as ES points depending on the water depth.

water depth dependent evaluation illustrated in Fig. 24. As expected, the results are poor up to a water depth of 0.7 m (Table 6 column: OWP with wd ≤ 0.7 m).

The points in the remaining water depths have small height deviations validated by RMS, $\sigma_{MAD(mean)}$ and $\sigma_{MAD(median)}$ values less than 0.15 m (Fig. 24a,b) as well as high inlier rates of 86.95 % for a threshold of 0.15 m, respectively, 98.36 % for a threshold of 0.25 m in a water depth of approximately 2.20 m (Fig. 24c, d).

5. Discussion

This section first addresses the obtained results. In addition, the VFWSP results are compared to the waveform stacking method (FWSP) published in Mader et al. (2021), and the pros and cons of either method are discussed. Finally, the limitations of the individual methods and possible improvements for future work are discussed.

5.1. Results

The evaluation in Table 5 and Fig. 23 shows that the volumetric nonlinear ortho full-waveform stacking worked well for the dataset at hand for water depths between 0.7 m and approximately 2.2 m. This is confirmed by the accuracy values (RMS, $\sigma_{MAD(mean)}$, $\sigma_{MAD(median)}$ smaller than 0.13 m) and by the inlier rates (min. 94 % at $\Delta h \leq 0.25$ m). The poor accuracy values for water depths from 0.0 m to 0.7 m were already observed in Mader et al. (2021) and explained by superimposing signals from the water surface, water column, and water bottom echo (Wagner et al. (2006); Ullrich and Pfennigbauer (2011)). In addition, the influence of the system waveform, which has a second much weaker peak after the main peak ('ringing effect'; Mallet et al. (2008)), can cause problems, especially in shallow-water areas. If this second peak occurs with sufficient backscattered amplitude in the received full-waveform, there is a risk that it will be detected as a water bottom echo. However, the focus of volumetric nonlinear ortho full-waveform stacking is to increase the analyzable water depth to extract water bottom points in deeper parts of the water body. Consequently, a depth-dependent combination of OWP and VFWSP points provides the best representation of the riverbed.

5.2. Notes on full-waveform stacking methods

In Mader et al. (2021), the detection of weak bottom peaks was based on the evaluation of a stacked full-waveform, which is basically an accumulation of closely adjacent individual full-waveforms neglecting the direction of the laser beam. The neighborhood was defined purely by the horizontal position at the water surface, neglecting other properties of the employed scan mechanism (forward and backward look within a flight strip) and integrating beams from multiple, overlapping flight strips. Thus, the stacked full-waveform represents the corresponding individual full-waveforms only conditionally. For waters with low water depths, this does not play a major role. However, since this method is also applied to waters with deeper water depths (maritime waters), neglecting the laser beam direction can lead to inaccuracies. Consequently, consideration of the laser beam pathway is necessary.

In the volumetric approach, the propagation direction of the individual laser beams is rigorously integrated into the processing pipeline, starting with voxelization (Section 3.2). The voxel structure allows the geometric consideration of slanted laser beams with different propagation directions. Thus, the characteristics of the Palmer scan pattern, the effects of combining measurement data from different strips and the propagation direction of the laser beam within the water body are considered in the voxel column and consequently also in the ortho full-waveform. In contrast to Mader et al. (2021), the lateral extent of the processing unit is the same at the water surface and at the water bottom. From a geometric point of view, this procedure should also be applicable to waters with greater depths and for data from different strips, whereby potential water surface dynamics must be considered (Section 5.5). Due to its strictly vertical orientation, the ortho full-waveform is well suited for the determination of inertial water bottom models (Section 3.6).

Regarding the analyzable water depth (approximately 2.1 m-2.2 m), accuracy (RMS of $9-15$ cm or $\sigma_{MAD(median)}$ of $6-10$ cm) and reliability values (94.38 %–98.05 % with $|\Delta h| \leq 0.25$ m), very similar results were obtained with both methods. This shows that both stacking methods work similarly well for the studied dataset. The advantages of volumetric full-waveform stacking are expected for deeper and wavy waters; therefore, very similar results of both full-waveform stacking methods were anticipated for this dataset.

In comparison with the FWSP shown in Mader et al. (2021), the VFWSP approach shown here provides the advantage of a more regular water bottom representation with the option of nonlinearly filtered grid representation. The ortho full-waveform data also provide a basis for the derivation of water turbidity variations (Richter et al., 2021b, 2022). Voxelization and the generation of ortho full-waveforms from voxel columns eliminates the need to align full-waveforms at the water surface echoes. Thus, the initial water bottom model can be determined based on the ortho full-waveforms with a dynamic water surface. These advantages make the technique suitable for processing maritime coastal water airborne LiDAR bathymetry data.

In Mader et al. (2022), the applicability of both full-waveform stacking methods to coastal waters was tested in a study area in the North Sea. In this study, the measurable water depth range could be increased by approximately 16 % (to approximately 2.95 m), resulting in a significant increase in the point density and coverage of additional parts of the water bottom. The achieved RMS value of 0.12 m is similar to that for the Elbe dataset. A more detailed evaluation of the potential of the method for marine waters is planned in a future study.

An obvious disadvantage is the significantly larger computational effort connected with ortho full-waveform projection, which may pose practical limits when processing large datasets.

5.3. Voxel sizes

In section 4.1, it was already stated that the voxel size has a certain influence on the quality of the results. However, the investigation in section 4.1 shows that small variations in the voxel size have no prominent influence on the accuracy and reliability, which are very similar for lateral sizes from $2.0\,\mathrm{m} \times 2.0\,\mathrm{m}$ to $4.0\,\mathrm{m} \times 4.0\,\mathrm{m}$ and for vertical sizes from 0.10 m to 0.14 m for this dataset (Table 3 and 4). Nevertheless, the appropriate voxel size has thus far been determined empirically, which may be rather time-consuming. Ideally, the lateral voxel size could be derived from the spatial resolution and distribution of the measured data, as well as possible prior knowledge of the water bottom topography. The waveform digitizing interval of the sensor used is decisive for the vertical voxel size.

5.4. Narrow laser beam

The determination of accurate water bottom coordinates in LiDAR bathymetry requires the correction of refraction (angle and change in propagation velocity) and other propagation-induced effects (Guenther and Thomas, 1983; Richter et al., 2021a). Since the interaction of the divergent laser pulse with the wavy water surface, turbid water body, and water bottom is very

complex, geometric models for the water surface, laser pulse, scattering in the water column, and diffuse reflection at the water bottom must be introduced, which are based on different simplifications. Common simplifications used in most conventional evaluation methods are (i) the hypothesis of a narrow laser beam, (ii) the neglect of scattering in the water body, and (iii) the assumption of diffuse reflection at the water bottom. This can lead to inaccuracies in water bottom determination, especially in the case of wavy water surfaces. In Westfeld et al. (2017) and Richter et al. (2018, 2021a), the effect of the simplifications on the accuracy of the water bottom coordinates was investigated and more complex models for strictly geometric modeling of laser pulse propagation were presented.

The approach presented in this article is also based on the narrow laser ray model. Since the voxels are $2\,\mathrm{m} \times 2\,\mathrm{m} \times 0.1\,\mathrm{m}$, beam divergence is only relevant for the laser pulses that pass through the voxel near the boundary to the next voxel. In such a case, strictly speaking, the amplitude of the samples is distributed between two neighboring voxels. However, since the voxel attributes are calculated from the average of all sample amplitudes in the voxel anyway, the influence of beam divergence on the shape of the ortho full-waveform is small. Nevertheless, it would in principle be possible to introduce more complex geometric models. This would result in a tremendous increase in processing time for the VFWSP approach, which would make it less practical for large-area processing. Consequently, the integration of refined models into the presented approach first requires a comprehensive analysis of the relevant signal parts of the laser footprint. Specifically, this means that which parts of the expanded footprint (on the ground; Guenther (1985)) actually arrive back at the sensor and are registered must be investigated. Thus, it can be assumed that the energetically very weak edge regions of the laser footprint will not play a role in the recorded full-waveform signal and thus do not have to be considered. This optimization would represent a compromise between increasing the complexity of the geometric model and acceptable processing effort.

5.5. Water surface modeling

Refraction correction requires water surface information; for instance, derived from the scanned water surface points. In the case of inland waters, it is usually acceptable to assume nearly horizontal water surfaces with only small wave movements, which justifies the use of steady water surface models. This also applies to the present dataset of the Elbe River. Furthermore, dynamic water surfaces are in principle not problematic for the estimation of the initial water surface model since only the water bottom echo is searched for in the ortho full-waveform. However, for the determination and application of the search corridor, a locally valid water surface model should be used, which can be determined for each record or half strip (as in RiHydro (RIEGL, 2020)).

In this article, a terrain model with composite linear bivariate polynomials was used for the model determination of the water surface because the model parameters (nodal points) can be calculated quickly and effectively. This method worked well for the data in this article. However, there is a risk that undersampling surface features (waves) may lead to an inaccurate model. To cope with this, the grid cell size must be adjusted to the surface characteristics. For very smooth water surfaces, large grid cell sizes are sufficient, while rough water surfaces require smaller grid cells. Richter et al. (2021a) presented an alternative approach for modeling curved water surfaces with freeform surfaces. It allows even small details to be included in the surface model. However, modeling with freeform surfaces is very time-consuming in larger study areas, as all measurement points are included in the calculation of a water surface model point. A combined approach with the FEM method with a significantly reduced number of points for bridging smaller data gaps (e.g., few processing units) would be conceivable here.

5.6. Error influences of the water surface on the VFWSP approach

This section briefly discusses sources of error related to the water surface and their impact on VFWSP processing. The first point concerns the correct determination of the water surface point. Due to the deflection angle of the Palmer scan pattern and the property of green light penetrating water, water surface points are mostly extracted based on volume-scattering signals below the real air–water interface. A pilot study by Mandlburger et al. (2013) investigated this effect and stated an underestimation of the water surface of 10 cm to 25 cm. According to the author, a water surface height deviation of 3 cm thereby leads to a water bottom height deviation of 1 cm. Naturally, this also affects the correct assignment of the sample amplitude of the individual full-waveforms to the voxels, which may thus be assigned to lower-lying voxels (Section 3.2). The effect of the water surface penetration error here cannot be readily determined due to the lack of sufficiently accurate reference measurements from the water bottom or near-infrared laser-scanning data from the water surface. The water

surface modeling used in this article does not account for this possible error.

The second point addresses the principle applicability of the VFWSP approach to datasets with moving or nonsteady water surfaces. For approximately horizontal water surfaces, the detection of the two most significant echoes in the ortho full-waveform (first echo = water surface; second echo = water bottom) works very well, as shown by the Elbe River dataset. Moving or nonsteady water surfaces could be represented by a superimposed or disturbed echo in the ortho full-waveform, which cannot be evaluated in this way. With a slight modification, this does not play an important role in the VFWSP approach since only the initial water bottom model is to be extracted from the ortho full-waveform. Because the voxels and, therefore, also the ortho full-waveform samples are georeferenced, the sample range with water surface echoes in the ortho full-waveform can be ignored, and the echo detection can be reduced to the water bottom echo.

5.7. Water bottom model points as representation of the water bottom

To assess the suitability of the inertial water bottom model as a representation of the water bottom, the model points were compared with the OWP and ES points in Section 4.4. The water bottom model points (not VFWSP points) used for the comparison were calculated based on the initial water bottom model from Section 3.6 and are uniformly distributed with a constant spacing of 0.2 m in the X- and Y-directions. The analysis showed good results; therefore, the water bottom model points are definitely a good representation for this area. The point cloud appears less noisy than the VFWSP points, and the use of the model offers the possibility to represent the water bottom in a regular point grid with rather grid spacing. In summary, the use of water bottom models has several advantages (uniform point distribution and provision of dense point clouds are possible, without gaps within a processing unit). For the present dataset with a flat water bottom, the models represent the water bottom very well. We expect that this will no longer be the case for moving terrain but cannot yet validate this due to a lack of suitable datasets.

6. Conclusion and future work

Airborne LiDAR bathymetry scans the water bottom topography with a green laser beam. The attenuation of the laser beam in medium water is significantly increased by water turbidity, thus limiting the analyzable water depth. Consequently, parts of the water bottom often cannot be detected by standard ALB processing methods. In this article, an extended processing method for full-waveform data is presented, which moves away from the isolated evaluation of full-waveform data to a joint evaluation of closely adjacent data: the volumetric nonlinear ortho full-waveform stacking method. The goal of the joint evaluation of closely adjacent full-waveforms is to increase the signal-to-noise ratio, i.e., to reduce or eliminate random signal components (such as noise from the sensor). Consequently, the water bottom echo is more prominent against the noise signal due to repeating echoes at the same location in the full-waveforms, thus enabling detection and evaluation of a weak water bottom peak. For the joint evaluation, local voxel space representations and the resulting ortho full-waveforms were used. Ortho full-waveforms are pseudo full-waveforms, which are generated from vertical voxel columns (voxels arranged vertically on top of each other). Based on the ortho full-waveforms, an initial water bottom model can be generated and used for the detection of weak water bottom echoes in individual full-waveforms. The extraction of the water bottom points from the individual full-waveforms is then a modified majority voting technique.

The results show that the volumetric nonlinear ortho full-waveform stacking approach works very well for water depths larger than 0.7 m. The validation was performed by analyzing the height deviations between VFWSP points and the online waveform processed points and respective echo sounder points. The evaluation delivered RMS values of 0.15 m and 0.10 m and a $\sigma_{MAD(median)}$ of 0.066 m and 0.094 m for the online waveform processed and echo sounder points. This is confirmed by good inlier rates, which state that 96.83 % to 98.05 % of the points have a maximum height deviation of 0.25 m from the reference data. Due to the poor accuracies of the VFWSP points for water depths up to approximately 0.7 m, the online waveform processed and VFWSP points should be used in a complementary manner to obtain an optimal representation of the water bottom topography. The analyzable water depth could be increased with the new method to approximately 2.20 m, which leads to an improved coverage of the riverbed of approximately 213 % (related to the coverage of the online waveform processed results).

The presented methods offer potential for further adaptation and improvement. Therefore, the following goals will be pursued in future work:

- automatic estimation of the appropriate voxel size based on the characteristics of the measured data

(spatial resolution and distribution of the measured data, sensor properties, and prior knowledge of the characteristics of the water bottom topography);

- investigation of the dependence of the processing method on sensor and full-waveform characteristics;
- investigation of the influence of beam divergence on the results of full-waveform stacking processing and, based on this, development of an optimized laser beam model to account for the relevant signal components in the VFWSP (Section 5.4);
- further development of the water surface model (closing of data gaps and consideration of possible nonsteady water surfaces/dynamic water surfaces; Section 5.5 and 5.6); and
- investigation of the potential in water bodies with deeper water depths and visual depths.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research project on airborne LiDAR bathymetry is funded by the German Research Foundation (DFG; Grant 390023295). Parts of the methodology presented here were developed as part of the contract research "ALB-Nordsee - Laserbathymetrie in küstennahen Bereichen der Nordsee" funded by the Federal Maritime and Hydrographic Agency of Germany (BSH). We also thank the German Federal Institute of Hydrology and the Waterways and Shipping Office Elbe (WSA) for the provision of the survey data, which allowed intensive practical applications of the developed methods. In addition, we thank the Airborne Hydro Mapping GmbH (AHM) company for the good cooperation in the preparation of the survey data.

References

Benito, G., Hudson, P.F., 2010. Flood hazards: the context of fluvial geomorphology. Geomorphological hazards and disaster prevention , 111–128.

Charlton, R., 2007. Fundamentals of fluvial geomorphology. Routledge.

Christiansen, L., 2016. New techniques in capturing and modelling of morphological data. Hydrographische Nachrichten HN 105, 20–23.

Chust, G., Grande, M.and Galparsoro, I., Uriarte, A., Borja, Á., 2010. Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: A case study within a Basque estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science 89, 200–213.

Collin, A., Archambault, P., Long, B., 2008. Mapping the shallow water seabed habitat with the SHOALS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 46, 2947–2955.

EuropeanUnion, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Technical Report. The European Parliament and the Council.

Glassner, A.S., 1989. An introduction to ray tracing. Academic Press, London.

Guenther, G.C., 1985. Airborne laser hydrography: system design and performance factors. Technical Report. National Oceanic and Atmospheric Administration Rockville MD.

Guenther, G.C., Goodman, L.R., 1978. Laser applications for near-shore nautical charting, in: Ocean Optics V, International Society for Optics and Photonics. pp. 174–184.

Guenther, G.C., Thomas, R., 1983. System design and performance factors for airborne laser hydrography, in: Proceedings OCEANS'83, IEEE. pp. 425–430.

Hampel, F.R., 1974. The influence curve and its role in robust estimation. Journal of the American Statistical Association 69, 383–393.

Höfle, B., Hollaus, M., 2010. Roughness Parameterization Using Full-Waveform Airborne LiDAR Data, in: EGU General Assembly Conference Abstracts, p. 2528.

Hosoi, F., Nakai, Y., Omasa, K., 2013. Voxel tree modeling for estimating leaf area density and woody material volume using 3-D LIDAR data. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci 5, 115–120.

de Jong, C.D., Elema, I.A., Lachapelle, G., Skone, S., 2002. Hydrography. DUP Blue Print.

Kirmse, A., de Ferranti, J., 2017. Calculating the prominence and isolation of every mountain in the world. Progress in Physical Geography 41, 788–802.

Kraus, K., 2000. Photogrammetrie: Topographische Informationssysteme. volume 3. Walter de Gruyter.

Litman, R., Korman, S., Bronstein, A., Avidan, S., 2015. Inverting RANSAC: Global Model Detection via Inlier Rate Estimation, in: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).

Lurton, X., 2002. An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications. Springer Science & Business Media.

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.

Mader, D., Richter, K., Westfeld, P., Weiß, R., Maas, H.-G., 2019. Detection and extraction of water bottom topography from laser-bathymetry data by using full-waveform-stacking techniques. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W13, 1053–1059.

Mader, D., Westfeld, P., Richter, K., Maas, H.-G., 2022. Laserbathymetrie in küstennahen Bereichen der Nordsee: Entwicklung erweiterter Auswerteverfahren und deren Qualitätssicherung, in: DVW e.V. (Hrsg.): Hydrographie – Messen mit allen Sinnen, DVW-Schriftenreihe. pp. 117–126.

Mallet, C., Bretar, F., 2009. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64, 1–16.

Mallet, C., Soergel, U., Bretar, F., 2008. Analysis of full-waveform lidar data for classification of urban areas. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences XXXVII-B3a, 85–91.

Mandlburger, G., 2020. A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters. Hydrographische Nachrichten - Journal of Applied Hydrography HN 116, 6–15.

Mandlburger, G., Monetti, D., Hollaus, M., Wimmer, M., Otepka-Schremmer, J., Pfeifer, N., 2021. A case study for detection and modelling of submerged deadwood from UAV-borne topo-bathymetric LiDAR point clouds, in: Proceedings of the SilviLaser

Conference 2021, pp. 195–197.

Mandlburger, G., Pfennigbauer, M., Pfeifer, N., 2013. Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry - A case study at the River Pielach. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 5, W2.

Mandlburger, G., Pfennigbauer, M., Schwarz, R., Flöry, S., Nussbaumer, L., 2020. Concept and Performance Evaluation of a Novel UAV-Borne Topo-Bathymetric LiDAR Sensor. Remote Sensing 12, 986.

NASA-ICESat2, 2022. Technical Specs – Key ICESat-2/ATLAS Performance Specifications. URL: `https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/specs`.

International Hydrographic Organization, 2020. IHO Standards for Hydrographic Surveys, 6th Edition, IHO Publication No. 44. International Hydrographic Organization.

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, 4165–4177.

Parrish, C.E., Magruder, L.A., Neuenschwander, A.L., Forfinski-Sarkozi, N., Alonzo, M., Jasinski, M., 2019. Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance. Remote Sensing 11, 1634.

Pfennigbauer, M., Ullrich, A., 2010. Improving quality of laser scanning data acquisition through calibrated amplitude and pulse deviation measurement, in: Laser Radar Technology and Applications XV, SPIE. pp. 463–472.

Philpot, W., 2019. Airborne Laser Hydrography II.

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, 27–49.

Quadros, N.D., 2013. Unlocking the characteristics of bathymetric lidar sensors. LiDAR Magazine 3, 62–67.

Reitberger, J., Schnörr, C., Krzystek, P., Stilla, U., 2009. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64, 561–574.

Richter, K., Maas, H.-G., 2022. Radiometric enhancement of full-waveform airborne laser scanner data for volumetric representation in environmental applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 183, 510–524.

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. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 42.

Richter, K., Mader, D., Westfeld, P., Maas, H.-G., 2021a. Refined Geometric Modeling of Laser Pulse Propagation in Airborne LiDAR Bathymetry. PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science 89, 121–137.

Richter, K., Mader, D., Westfeld, P., Maas, H.-G., 2021b. 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.

Richter, K., Mader, D., Westfeld, P., Maas, H.-G., 2022. Determination of 3D Water Turbidity Parameter Fields from LiDAR Bathymetry Data by Volumetric Data Analysis. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 43, 945–951.

RIEGL, 2018. Datasheet RIEGL VQ-880-G. URL: `http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-880-G_Datasheet_2018-09-28.pdf`.

RIEGL, 2020. Airborne Data Processing Software Addon RiHYDRO for commercial hydrographic and bathymetric surveying. URL: `http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet_RiHYDRO_2020-07-27.pdf`.

RIEGL, 2021. Datasheet RIEGL VG-840-G. URL: `http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-840-G_Datasheet_2023-01-19.pdf`.

Roncat, A., Mandlburger, G., 2016. Enhanced detection of water and ground surface in airborne laser bathymetry data using waveform stacking, in: EGU General Assembly Conference Abstracts, p. 17016.

Sachs, L., 1982. Applied Statistics: A Handbook of Techniques. Springer-Verlag.

Schwarz, R., Mandlburger, G., Pfennigbauer, M., Pfeifer, N., 2019. Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 150, 1–10.

Schwarz, R., Pfeifer, N., Pfennigbauer, M., Ullrich, A., 2017. Exponential decomposition with implicit deconvolution of lidar backscatter from the water column. PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science 85, 159–167.

Stilla, U., Yao, W., Jutzi, B., 2007. Detection of weak laser pulses by full waveform stacking. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36, W49A.

Ullrich, A., Pfennigbauer, M., 2011. Echo digitization and waveform analysis in airborne and terrestrial laser scanning, in: Photogrammetric Week, pp. 217–228.

Vosselman, G., Maas, H.-G., 2010. Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing.

Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., Studnicka, N., 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60, 100–112.

Wagner, W., Ullrich, A., Melzer, T., Briese, C., Kraus, K., 2004. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. 35, 201–206.

Wang, C., Li, Q., Liu, Y., Wu, G., Liu, P., Ding, X., 2015. A comparison of waveform processing algorithms for single-wavelength LiDAR bathymetry. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 101, 22–35.

Wang, Y., Weinacker, H., Koch, B., 2007. Development of a procedure for vertical structure analysis and 3D-single tree extraction within forests based on LiDAR point cloud. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36, W52.

Weiß, R., Wirth, H., 2015. BfG-1861 Erprobung der Laserbathymetrie im Binnenbereich. Technical Report. Bundesanstalt für Gewässerkunde.

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 128, 314–325.

Zhu, J., Zhang, Z., Hu, X., Li, Z., 2011. Analysis and application of LiDAR waveform data using a progressive waveform decomposition method. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-5/W12, 31–36.

4 Anwendung von nichtlinearen Full-Waveform Stacking-Methoden auf maritime Gewässer

In Kapitel 3 wurde die Entwicklung des sigFWFS und des volFWFS sowie dessen erste Validierung am Fluss Elbe umfassend präsentiert. Dieses Kapitel zeigt die Anwendbarkeit von Full-Waveform Stacking-Verfahren auf maritime Gewässer. Dazu wurden das sigFWFS und das volFWFS auf Laserbathymetriedaten eines küstennahen Studiengebietes in der Nordsee angewendet, wobei die sigFWFS-Prozessierung im Vergleich zu Mader et al. (2021) um folgende Punkte weiterentwickelt wurde:

- Nutzung einer FEM-modellierten Wasseroberfläche für die Bestimmung der 3D Koordinaten des Wasseroberflächenpunktes
- Anpassung der Filtermethode der Full-Waveform Stacking Ergebnisse an die Filtermethode aus Mader et al. (2023)

Als erstes wird das gesamte Studiengebiet zwischen den Nordseeinseln Sylt und Amrum vorgestellt (Kap. 4.1 und 4.2). Anschließend zeigt ein Tagungsbeitrag (Beitrag 4; Mader et al. (2022b)) anhand der Prozessierung eines sehr kleinen Gebiets, dass die Full-Waveform Stacking-Verfahren grundsätzlich funktionieren. Für umfassendere und repräsentativere Ergebnisse wird in den Kapiteln 4.4 bis 4.8 ein größeres Untersuchungsgebiet vorgestellt und die Ergebnisse der Prozessierungen mit den Full-Waveform Stacking-Verfahren umfassend analysiert.

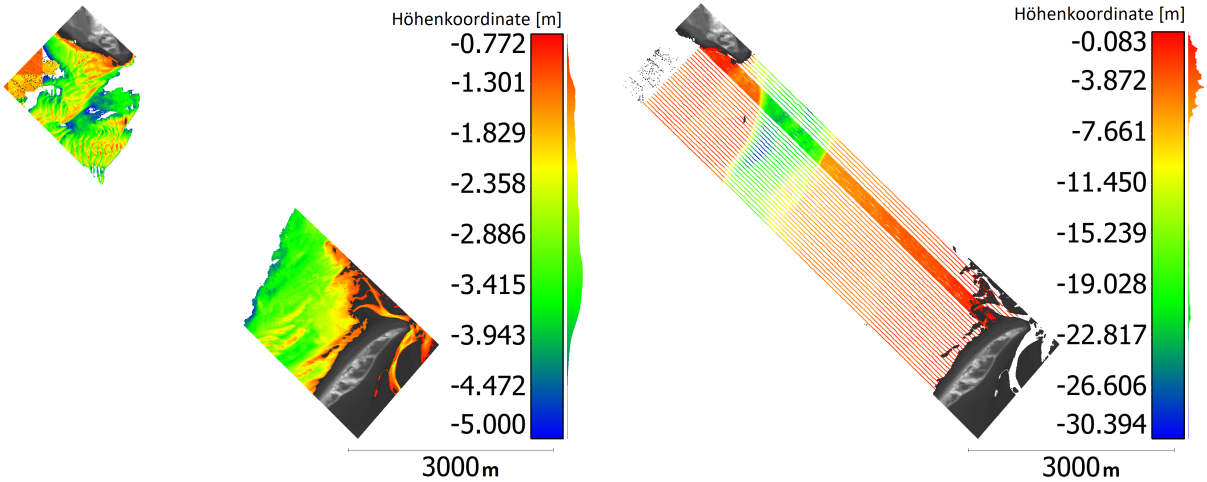
4.1 Studiengebiet in der Nordsee

Die ALB-Daten des in Abbildung 4.1 rot markierten Gebietes wurden im Zuge des Projektes „Laserbathymetrie in küstennahen Bereichen der Nordsee“ (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), TU Dresden) Mitte August 2021 mit dem ALB-System RIEGL VQ-880-G II in einer mittleren Flughöhe von etwa 540 m aufgenommen. Das beflogene Gebiet hat eine Ausdehnung von etwa 7,5 km × 1,9 km und wurde in zwölf überlappenden Flugstreifen und zwei Querstreifen erfasst. Eine stichprobenartige Untersuchung der Punktdichte an der Wasseroberfläche ergab je nach Flugstreifen eine minimale Punktdichte von 13 Punkten/m^2 bis 19 Punkten/m^2, sodass für das Befliegungsgebiet aufgrund von Überlappung und der Eigenschaften des Palmer-Scanmusters durchgehend von einer minimalen Punktdichte von 30 Punkten/m^2 ausgegangen werden kann.

4.2 Datengrundlage

Abbildung 4.2a zeigt die Ergebnispunktwolke der OWP vom Befliegungsdienstleister. Die klassifizierten Gewässerbodenpunkte sind farbkodiert bzgl. ihrer Höhenkoordinate (DHHN2016) dargestellt. Die Landpunkte sind grau eingefärbt. Obwohl die OWP-Daten bereits eine große Fläche

Abb. 4.1 Messgebiet in der Nordsee zwischen den Nordseeinseln Sylt und Amrum aufgenommen am 12.08.2021 mit 12 überlappenden Scanstreifen und zwei Querstreifen.



(a) OWP-Daten **(b)** Echolotmessungen

Abb. 4.2 Visualisierung der **a** OWP-Punkte und der **b** Echolotmessungen farbkodiert bzgl. der Höhenkoordinate (DHHN2016).

des Befliegungsgebietes abdecken, stößt das Verfahren in der Mitte des Gebietes an seine Grenzen, was zu einer Datenlücke führt.
Für die Validierung der Full-Waveform Stacking Ergebnisse kommen die bereits genannten Echolotmessungen zum Einsatz (Abb. 4.2b). Diese wurden innerhalb von ein bis drei Wochen nach der Befliegung durch Messboote des BSH durchgeführt, wobei es in diesem Zeitraum keine Unwetterereignisse im Messgebiet gab, welche eine stärkere Änderung der Gewässerbodentopographie bewirkt hätten. Die Messboote waren mit GNSS und IMU Sensoren für die Georeferenzierung sowie mit einem Vertikalecholot (SBES) für die Gewässertiefenmessung ausgestattet. Das Mess-

gebiet wurde in Profilen mit größtenteils 50 m Querabstand aufgenommen, wobei auch ein etwa 200 m breiter Streifen mit einem Profilquerabstand von ca. 10 m befahren wurde. Eine Analyse der Echolotmessungen durch das BSH deutet auf ein morphologisch anspruchsvolles Gebiet hin („Morphologie im Flachwasserbereich sehr wechselhaft und kleinteilig“, Bericht des BSH zu Vertikalecholotmessungen vom 14.06.2022). Für die spätere Validierung hat dies zur Folge, dass ein Vergleich nur zwischen Echolotprofilen und Ergebnispunkten mit geringem Abstand zu den Profilen für die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanalyse sinnvoll ist.

4.3 Erste Ergebnisse einer Pilotstudie in küstennahen Bereichen der Nordsee

Dieser Beitrag erläutert zu Beginn kurz die möglichen Vorteile gegenüber hydroakustischer Messverfahren und stellt anschließend das signalbasierte und volumetrische Full-Waveform Stacking kurz zusammenfassend vor. Zum Schluss werden erste Ergebnisse einer Prozessierung von einem kleinem Testgebiet (im südlichen Teil innerhalb des Streifens mit den dichteren Echolotmessungen) präsentiert, womit die Anwendbarkeit der Full-Waveforms Stacking-Verfahren auf die ALB-Nordseedaten nachgewiesen werden konnte.

Beitrag 4 – Laserbathymetrie in küstennahen Bereichen der Nordsee

Der Fokus dieses Beitrages liegt auf der Erprobung der prinzipiellen Funktionsweise des signalbasiertem und volumetrischem Full-Waveform Stackings bei maritimen ALB-Messdaten. Eine einfache Auswertung der Ergebnisse deutet bereits den Mehrwert gegenüber den OWP-Daten an.
Der Beitrag wurde veröffentlicht in: *Tagungsband des 35.Hydrographentag & 204. DVW-Seminar* mit dem Titel **„Laserbathymetrie in küstennahen Bereichen der Nordsee: Entwicklung erweiterter Auswerteverfahren und deren Qualitätssicherung“**

Art des Beitrages:	Extended Abstract im Tagungsband des DVW Band 102/2022 (kein ISI ranking)
Autoren:	David Mader[1], Patrick Westfeld[2], Katja Richter[1], Hans-Gerd Maas[1] [1]Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden, DE [2]Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Rostock, DE
Publikations-verlauf:	am 11. April 2022 eingereicht und am 14. Juni 2022 veröffentlicht
vollständige Referenz:	Mader, D., Richter, K., Westfeld, P. und Maas, H.-G. (2022). "Laserbathymetrie in küstennahen Bereichen der Nordsee: Entwicklung erweiterter Auswerteverfahren und deren Qualitätssicherung". *DVW e.V. (Hrsg.): Hydrographie – Messen mit allen Sinnen. DVW-Schriftenreihe*, Band 102, Augsburg, S. 117–126
ISSN:	0940-4260
DOI:	-

Laserbathymetrie in küstennahen Bereichen der Nordsee: Entwicklung erweiterter Auswerteverfahren und deren Qualitätssicherung

David Mader | Patrick Westfeld | Katja Richter | Hans-Gerd Maas

1 Motivation

Die Bathymetrie der Nord- und Ostsee ist einem stetigen Wandel unterworfen. Insbesondere die küstennahen, flachen Gebiete werden in Folge von Gezeiten und Seegang fortlaufend in ihrer Gestalt verändert. Hinzu kommt, dass die Watten der Nordsee durch ausgeprägte Prielsysteme und Sandbänke strukturiert werden, während die sandigen Küsten der Ostsee von küstenparallelen Transportprozessen dominiert und von Steinen durchsetzt sind.

Zur Erfassung der Gewässerbodentopografie kommen beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), dem hydrographischen Dienst Deutschlands, routinemäßig hydroakustische Verfahren zum Einsatz, die auf der Messung der Laufzeit eines Schallimpulses beruhen (Dehling und Ellmer 2012). Die Vermessung komplexer Flachwasserbereiche mit schiffsgestützten hydroakustischen Aufnahmeverfahren ist jedoch herausfordernd: von durch Tide beeinflusste Gewässer sind nur bei Flut in sehr engen Zeitfenstern zu erreichen; es kommt häufig zu langen Transitfahrten vom Mutterschiff in das Messgebiet; die Vermessung mit kleineren Booten ist stark wetterabhängig. Wegen der hohen Variabilität des Geländes sowie der Relevanz für die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt (vor allem in schiffbarer Fahrwassernähe) und der sonstigen Nutzung, müssen jedoch gerade für diese Flächen sehr häufig Wiederholungsvermessungen stattfinden.

Flugzeuggestützte Laserbathymetrie (Airborne Lidar Bathymetry, ALB) ist ein sehr effizientes und zu schiffsgestützten hydroakustischen Vermessungen komplementäres Messverfahren. Laserbathymetriesysteme senden kurze Laserpulse aus, die mit der Wasseroberfläche, der Wassersäule und dem Gewässerboden interagieren. Ein Teil der ausgesendeten Energie wird zurückgestreut und vom ALB-System empfangen. Die Signalform des Laserpulsechos wird mit hoher zeitlicher Auflösung digitalisiert und in Form einer sogenannten Full-Waveform (FWF) gespeichert (Abb. 1). Dieser Vorgang wiederholt sich mit einer hohen Frequenz von 1 kHz bis 30 kHz bei bathymetrischen Laser-

© Wißner-Verlag

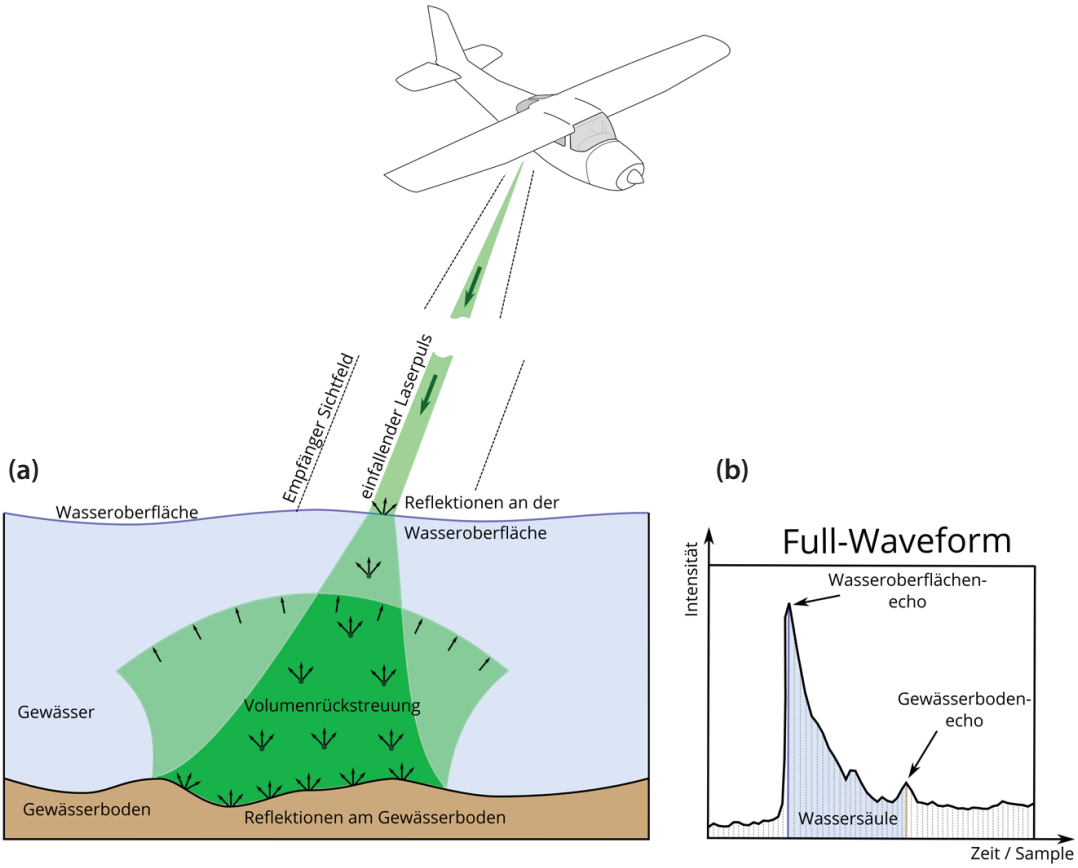


Abb. 1: Messprinzip eines ALB-Systems: (a) Ausbreitung des Laserpulses in Wasser und (b) am Sensor detektierte Signalform (Full-Waveform)

scannern (Tiefwassersysteme) bis zu 700 kHz für topo-bathymetrische Laserscanner (Flachwassersysteme). Zusätzlich wird der Laserpuls durch einen Scanmechanismus ausgelenkt.

Auf diese Weise können beim Überflug große Gebiete sehr effizient flächendeckend erfasst werden. In jeder FWF werden die Echos von der Wasseroberfläche und dem Gewässerboden detektiert und über die Laufzeit sowie den bekannten Auslenkwinkel des Laserpulses die zugehörigen 3D-Koordinaten abgeleitet. Messprinzip-bedingt bewirkt die Gewässertrübung in der Wassersäule eine Abschwächung des Laserpulses (Guenther und Goodman 1978), wodurch die auswertbare Eindringtiefe des Verfahrens limitiert ist.

In Mader et al. (2021, 2022) wurden neuartige Ansätze zur Prozessierung von ALB-FWF-Daten vorgestellt, mit denen die auswertbare Eindringtiefe von ALB-Systemen und damit auch die Abdeckung des Gewässerbodens mit gemessenen 3D-Punkten erhöht werden kann. Im Folgenden wird ein Überblick über die entwickelten Prozessierungsmethoden gegeben (Abschnitt 2), und die Ergebnisse der Auswertungen von ALB-Daten im Bereich der Nordsee werden präsentiert (Abschnitt 3).

© Wißner-Verlag

2 Methoden

Bei konventionellen Auswertemethoden werden alle FWFs unabhängig voneinander verarbeitet. Das Gewässerbodenecho wird bei größerer Trübung und Eindringtiefe stark abgeschwächt. Im weiteren Verlauf der Signalverarbeitung kann es folglich häufig nicht mehr zuverlässig detektiert und der zugehörige Gewässerbodenpunkt nicht extrahiert werden. Die in Mader et al. (2021, 2022) entwickelten FWF-Stacking-Methoden rücken von der isolierten Auswertung der FWFs ab hin zu einer kombinierten Prozessierung eng benachbarter FWFs. Das Ziel ist die zuverlässige Detektion schwacher, bisher nicht detektierter Gewässerbodenechos, um die maximal auswertbare Eindringtiefe in die Wassersäule zu erhöhen und folglich weitere Gewässerbodenpunkte zu extrahieren.

Dieser Abschnitt stellt kurz die Vorgehensweise der FWF-Stacking-Prozessierung auf Grundlage der beiden entwickelten Methoden vor. Beim signalbasierten FWF-Stacking werden die einzelnen FWFs „gestapelt“ zu einer sogenannten stacked FWF (Mader et al. 2021). Das volumetrische FWF-Stacking fasst die FWFs in vertikal ausgerichtete Ortho-FWFs zusammen (Mader et al. 2022). Beide Methoden unterscheiden sich insofern, als das volumetrische FWF-Stacking die Laserpulsausbreitung innerhalb der Wassersäule geometrisch berücksichtigt, was beim signalbasierten FWF-Stacking nicht der Fall ist. Dies kann beim signalbasierten FWF-Stacking dazu führen, dass die Detektion des Gewässerbodens mit steigender Gewässertiefe ungenauer wird. Andererseits ist die geometrische Berücksichtigung der Laserpulsausbreitung deutlich aufwändiger und führt zu einer zeit- und ressourcenintensiveren Prozessierung der ALB-Daten.

2.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die grundsätzliche Prozessierung kann in drei Schritte unterteilt werden. Im ersten Schritt werden dicht benachbarte Messungen (geringe Abstände in der Lage) in Prozessierungseinheiten eingeteilt. Alle Messdaten einer Prozessierungseinheit werden im folgenden Bearbeitungsschritt gemeinsam ausgewertet. Dabei wird angenommen, dass benachbarte Messdaten (und hier insbesondere die Charakteristik der zugehörigen FWFs) sehr ähnliche Eigenschaften aufweisen. In einem zweiten Schritt erfolgt die kombinierte Auswertung der Messdaten mittels FWF-Stacking-Methoden. Dadurch sollen zufällige Rauschsignale des Sensors und andere erratische Effekte deutlich abgeschwächt oder gar eliminiert sowie wiederkehrende Echos verstärkt werden. Die Detektion von schwachen Gewässerbodenechos ist so einfacher und zuverlässiger möglich. Im dritten und letzten Bearbeitungsschritt werden die Gewässerbodenechos in der gemessenen FWF auf Basis der FWF-Stacking-Ergebnisse gesucht und der Gewässerbodenpunkt extrahiert.

2.2 Signalbasiertes Full-Waveform Stacking durch Nutzung von stacked Full-Waveforms

Die Zuordnung von dicht benachbarten Messungen erfolgt durch die Anwendung eines auf die Wasseroberfläche bezogenen regelmäßigen lateralen Rastergitters (Abb. 2). Alle FWFs, deren Wasseroberflächenpunkt innerhalb einer Gitterzelle liegt, werden für die nachfolgenden Prozessierungsschritte zu einer Prozessierungseinheit zusammengefasst. Die Größe einer Gitterzelle hängt von den Eigenschaften der gemessenen Daten (räumliche Auflösung und Verteilung der Daten) und von der Charakteristik des Gewässerbodens (schwache oder starke Bodenneigungen) ab.

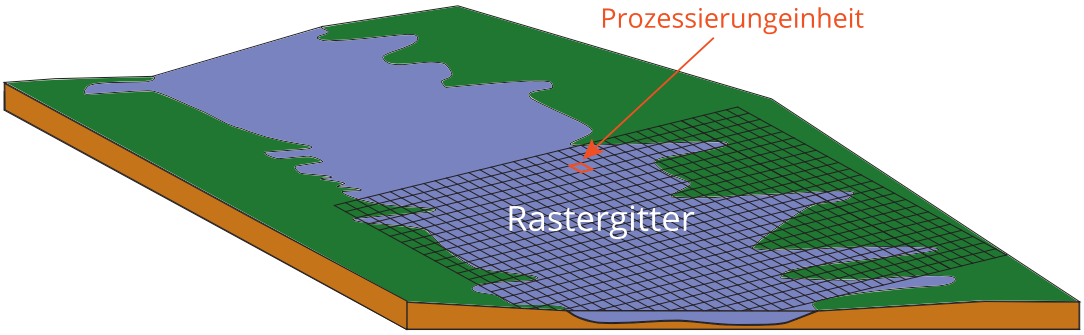


Abb. 2: Schematische Darstellung eines Gewässers mit überlagertem Rastergitter. Jede Rasterzelle des Rastergitters ist eine Prozessierungseinheit.

Nachdem die Prozessierungseinheiten gebildet wurden, erfolgt die kombinierte Analyse der Messdaten. Zuerst werden die FWFs einer Prozessierungseinheit zueinander ausgerichtet. Dies erfolgt auf Basis der Maxima der Wasseroberflächenechos (Abb. 3). Danach werden die FWFs durch Aufsummieren der Intensitätswerte zu einer stacked FWF zusammengefasst (Stilla et al. 2007, Plenkers et al. 2013, Roncat und Mandlburger 2016). Anschließend erfolgt die Detektion aller Echos bzw. lokalen Maxima in der stacked FWF und die Bestimmung ihrer Signifikanz nach Kirmse und de Ferranti (2017) sowie Schwarz et al. (2019). Das signifikanteste Echo nach dem Wasseroberflächenecho wird als wahrscheinlichstes Gewässerbodenecho detektiert und dessen Breite bestimmt (Abb. 3). Die Anzahl der Samples zwischen den Echos der Wasseroberfläche und des Gewässerbodens sowie deren Breite dienen der Definition des Suchkorridors, welcher dann auf die einzelnen gemessenen FWFs angewendet wird (Abschnitt 2.4). Zusätzliche Filter- und Kontrollmethoden (z. B. Anwendung eindeutig bestimmbarer Gewässerbodenechos als Kontrollwerte, gegenseitige Kontrolle der Eindringtiefen von Prozessierungseinheiten) sichern die zuverlässige Detektion der Gewässerbodenechos in der stacked FWF.

© Wißner-Verlag

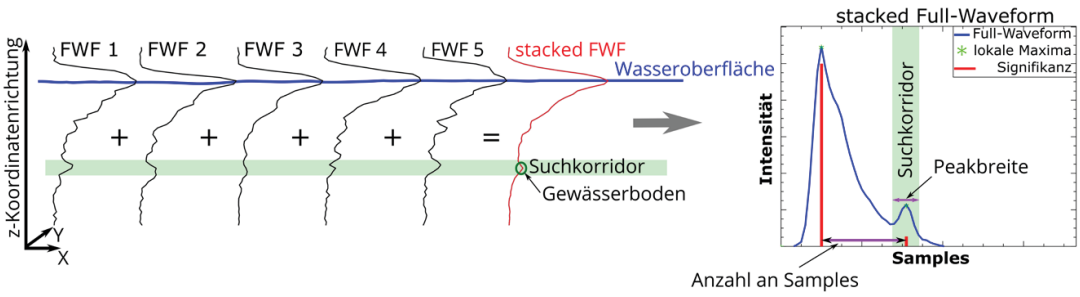


Abb. 3: Grundprinzip des signalbasierten FWF-Stackings, angewandt auf ALB-FWFs (Mader et al. 2021): Nach einer Analyse der stacked FWF (rot) wird um das darin gefundene Pseudo-Gewässerbodenecho ein Suchkorridor definiert (grün). Innerhalb dieses Bereichs werden Wasserbodenechos in den ursprünglichen FWFs gesucht (schwarz; Abschnitt 2.4).

2.3 Volumetrisches Full-Waveform Stacking durch Nutzung von Ortho-Full-Waveforms

Beim volumetrischen FWF-Stacking wird die Zuordnung dicht benachbarter ALB-Messung mittels einer lokalen Voxelraumrepräsentation realisiert (Abb. 4). Im Gegensatz zum signalbasiertem FWF-Stacking (Abschnitt 2.2), ist die Nachbarschaftsdefinition der FWFs nicht mehr nur auf die Wasseroberfläche begrenzt, sondern kann in einem kartesischen System für die gesamte Wassersäule gewährleistet werden.

Die Überführung der FWF-Daten in den Voxelraum erfolgt über die Georeferenzierung der Intensitätsinformationen der FWF-Daten durch eine Projektion in das entsprechende Voxel (Abb. 5a). Als Prozessierungseinheit werden verti-

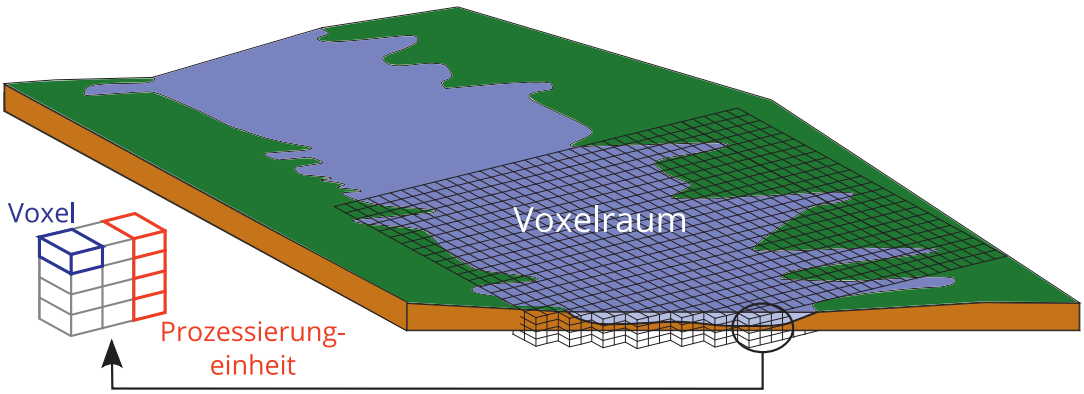


Abb. 4: Schematische Darstellung eines Gewässers im Voxelraum: Vertikal angeordnete Voxel bilden eine die Wassersäule repräsentierende Voxelsäule, welche als Prozessierungseinheit verwendet wird.

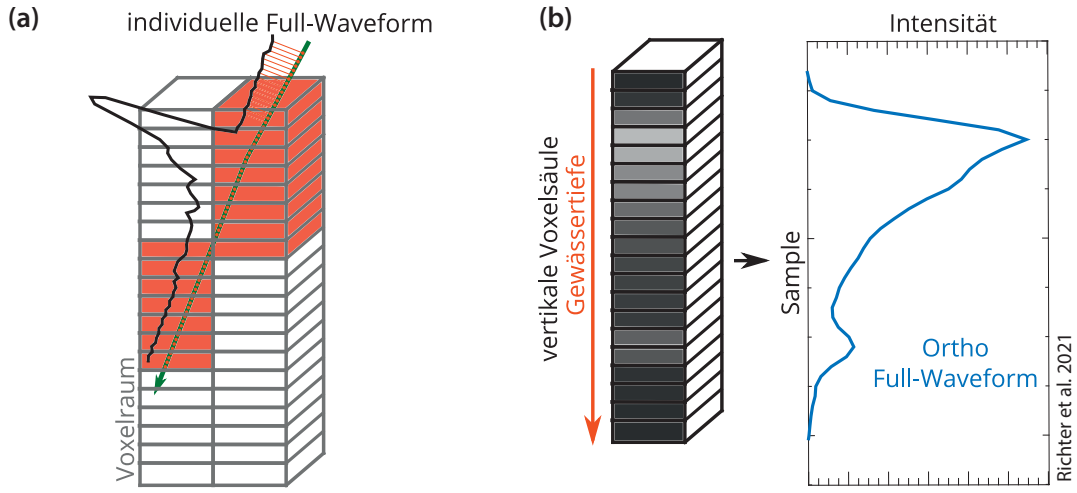


Abb. 5: (a) Überführung der FWF-Intensitäten in den Voxelraum. (b) Generierung einer Ortho-FWF aus einer vertikalen Voxelsäule

kale Voxelsäulen verwendet, welche die Basis für die Ortho-FWF-Generierung darstellen (Abb. 5b; Pan et al. 2016).

Die anschließende Analyse der Ortho-FWF zur Bestimmung der Sampleanzahl zwischen Wasseroberflächenecho und Gewässerbodenecho sowie die Bestimmung der Echobreite des Gewässerbodenechos erfolgt analog zum signalbasiertem FWF-Stacking (Abschnitt 2.2).

2.4 Detektion und Extraktion von Gewässerbodenpunkten

In einem letzten Bearbeitungsschritt wird der im Abschnitt 2.2 oder Abschnitt 2.3 ermittelte Suchkorridor für die Einschränkung des Suchbereichs des Gewässerbodenechos in der gemessenen FWF genutzt (Abb. 6). Diese Vorgehensweise reduziert die für den Gewässerboden in Frage kommenden Echos deutlich. Somit

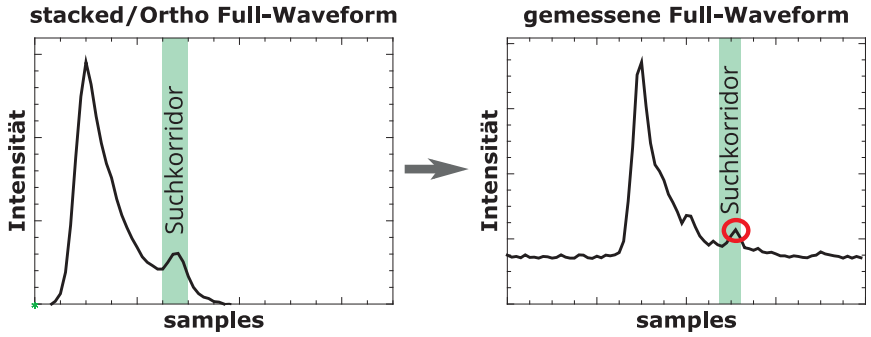


Abb. 6: Nutzung des aus der stacked FWF extrahierten Suchkorridors für eine zuverlässigere Detektion und Extraktion des Gewässerbodenpunktes in der gemessenen FWF (roter Kreis)

© Wißner-Verlag

können die Gewässerbodenechos in den gemessenen FWFs detektiert und die Gewässerbodenpunkte bestimmt werden.

Der nicht-lineare Ansatz unter Anwendung eines Suchkorridors auf die einzelnen gemessenen FWFs zur Stützung der Detektion und Extraktion der Gewässerbodenpunkte ist insofern vorteilhaft, da zum einem Verschmierungseffekte durch das FWF-Stacking vermieden werden und der Gewässerboden durch eine größere Anzahl an 3D-Punkte repräsentiert wird.

3 Ergebnisse

Für die Untersuchung des Potenzials der FWF-Stacking-Methoden stehen ALB-Daten eines ungefähr 10 km² großen Gebietes zwischen den Nordseeinseln Sylt und Amrum zur Verfügung. Für diesen Beitrag wurde ein Teilgebiet mit beiden FWF-Stacking-Methoden prozessiert. Die folgende Auswertung konzentriert sich auf ein ca. 300 m × 100 m großen Abschnitt des prozessierten Gebietes, in welchen sowohl die Grenzen bzgl. der auswertbaren Eindringtiefe der Standardauswertemethode als auch beider FWF-Stacking-Methoden erreicht wurden. Anhand dieses Untersuchungsgebietes soll das Potenzial der FWF-Stacking-Methoden gezeigt werden. Zuerst erfolgt eine visuelle Darstellung der Ergebnisse, welche anschließend mit quantitativen Werten gestützt wird.

In Abb. 7a und 7b sind die Punktwolken der FWF-Standardprozessierung (Prozessierung erfolgte durch den Befliegungsdienstleister) und der zeitgleich zur Befliegung stattgefundenen Vertikalecholotmessung zu sehen. Die Punktwolken sind bzgl. der Gewässertiefe farbkodiert dargestellt. Die angegebenen

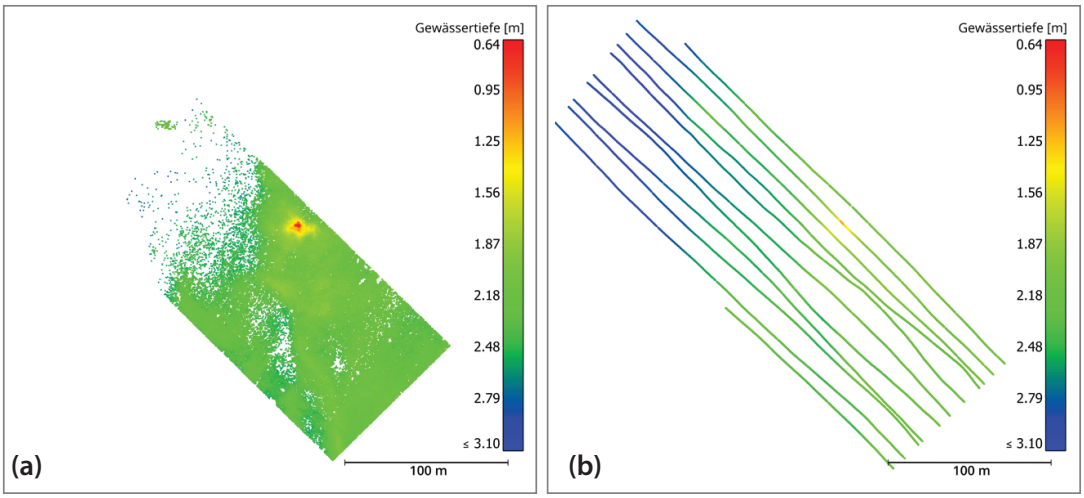


Abb. 7: Ergebnisse der (a) ALB-Standardprozessierung und (b) Vertikalecholotmessung. Beide Punktwolken sind bzgl. ihrer Gewässertiefe farbkodiert dargestellt mit Bezug auf die Höhe der Wasseroberfläche zum Befliegungszeitpunkt.

Gewässertiefen beziehen sich auf die Wasseroberfläche zum Zeitpunkt der Befliegung (12.08.2021; 08:36 Uhr bis 08:47 Uhr). Die Wasseroberfläche des Untersuchungsgebietes war annähernd horizontal (ruhige, gekräuselte See) und hatte zum Befliegungszeitpunkt eine mittlere Höhe von 1,43 m unter Normalhöhennull (DHHN2016; Niedrigwasser am Pegel Amrum-Odde).

Die Charakteristik der Gewässerbodentopographie aus Abb. 7 ist in den Ergebnissen der FWF-Stacking-Prozessierungen gut erkennbar (Abb. 8). Im Vergleich zu der Punktwolke der Standardprozessierung ist klar ersichtlich, dass die

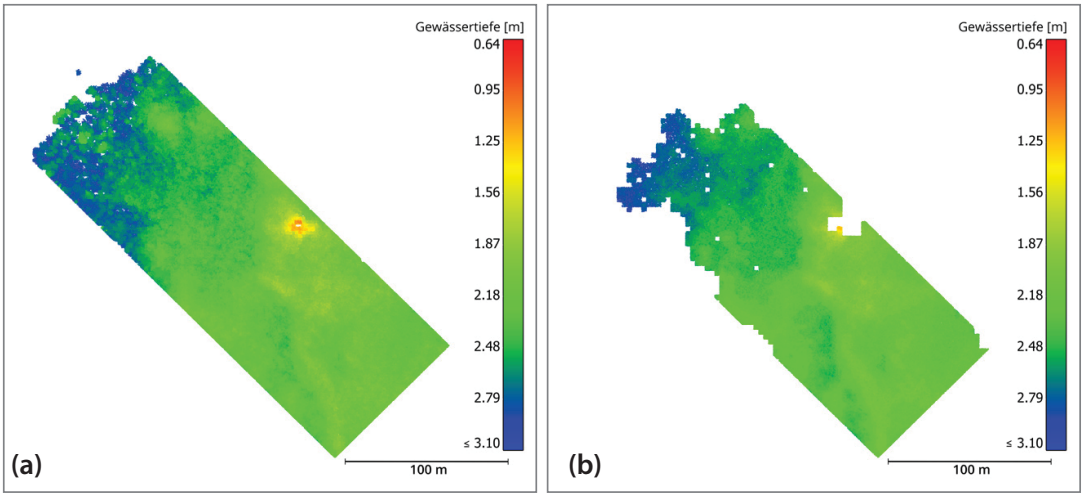


Abb. 8: Ergebnisse des (a) signalbasierten und (b) volumetrischen FWF-Stackings. Beide Punktwolken sind bzgl. ihrer Gewässertiefe farbkodiert dargestellt mit Bezug auf die Höhe der Wasseroberfläche zum Befliegungszeitpunkt.

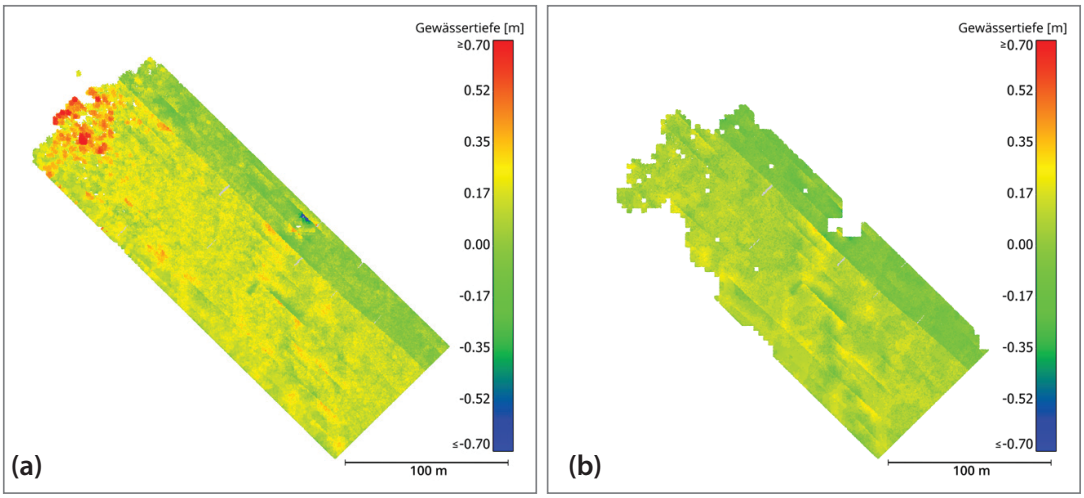


Abb. 9: Höhenabweichungen zwischen den Ergebnissen der Vertikalecholotmessung und des (a) signalbasierten sowie (b) volumetrischen FWF-Stackings, farbkodiert bzgl. der Höhenabweichung.

© Wißner-Verlag

Punktdichte teilweise erhöht und weitere, tiefer liegende Teile des Gewässerbodens detektiert sowie extrahiert werden konnten.

Die Auswertung der Ergebnispunktwolken zeigt eine Erhöhung der Eindringtiefe. Während bei den standardprozessierten Daten Eindringtiefen von ungefähr 2,55 m (für vereinzelte Punkte auch bis zu 2,80 m) erreicht wurden, gibt es in den FWF-Stacking prozessierten Daten flächendeckende Bereiche mit Gewässertiefen bis ca. 2,95 m. Dadurch konnte eine zusätzliche Fläche von etwa 75 m × 100 m des Gewässerbodens erfasst werden. Bezogen auf das exemplarisch gewählte Untersuchungsgebiet entspricht dies 25 % mehr Flächenleistung.

Die Validierung der Ergebnisse anhand der Vertikalecholotmessungen hat gezeigt, dass die Punkte des signalbasierten FWF-Stacking minimal zu tief (–0,0026 m) bestimmt wurden, bei einer mittleren quadratischen Abweichung (RMS) von 0,13 m. Zudem ist auffällig, dass die Höhenabweichungen deutlich zunehmen, wenn das Verfahren an seine Grenzen stößt (Abb. 9a; nördlicher Bereich). Die Punkte des volumetrischen FWF-Stacking wurden tendenziell zu tief bestimmt (–0,052 m) mit einem RMS Wert von 0,12 m. Die Höhenabweichungen sind im Gegensatz zu dem signalbasiertem FWF-Stacking homogener (Abb. 9b).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch Anwendung der signalbasierten und volumetrischen FWF-Stacking-Methoden die Eindringtiefe um ca. 16 % erhöht wurde. Dies bewirkt in einigen Bereichen eine Erhöhung der Punktdichte und führt außerdem zu der Erfassung weiterer Teile des Gewässerbodens (bezogen auf das exemplarisch gewählte Untersuchungsgebiet ca. 25 % zusätzliche Fläche). Die RMS-Werte von 0,13 m respektive 0,12 m zeigen, dass die erzielten Ergebnisse den Gewässerboden gut repräsentieren können, wenngleich beim signalbasiertem FWF-Stacking die Abweichung größer waren, sobald das Verfahren an seine Grenzen stößt. In zukünftigen Arbeiten müssen weitere Gebiete prozessiert werden, um die bisherigen Ergebnisse zu bestätigen und die Verfahren gezielt weiterzuentwickeln.

Danksagung

Wir danken dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) für die Förderung unserer Forschungsarbeiten sowie der Firma MILAN Geoservice GmbH für die gute Zusammenarbeit bei der Aufbereitung der Befliegungsdaten.

Literatur

Dehling, T., Ellmer, W. (2012): Zwanzig Jahre Seevermessung seit der Wiedervereinigung. AVN 119 (7). https://gispoint.de/artikelarchiv/avn/2012/avn-ausgabe-72012/2463-zwanzig-jahre-seevermessung-seit-der-wiedervereinigung.html.

Guenther, G.C., Goodman, L.R. (1978): Laser Application For Near-Shore Nautical Charting. In: Ocean Optics V, Vol. 160, International Society for Optics and Photonics, 174–184. DOI: 10.1117/12.956863.

Kirmse, A., de Ferranti, J. (2017): Calculating the prominence and isolation of every mountain in the world. In: Progress in Physical Geography 41, 788–802. DOI: 10.1177/0309133317738163.

Mader, D., Richter, K., Westfeld, P., Maas, H.-G. (2021): Potential of a Non-linear Full-Waveform Stacking Technique in Airborne LiDAR Bathymetry. In: PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 89(2), 139–158. DOI: 10.1007/s41064-021-00147-y.

Mader, D., Richter, K., Westfeld, P., Maas, H.-G. (2022): Volumetrisches Full-Waveform Stacking zur Ableitung der Gewässerbodentopographie aus Laserbathymetriedaten – Erste Ergebnisse einer Pilotstudie am Fluss Elbe. Tagungsband Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF, Band 30. 127–139. www.dgpf.de/src/tagung/jt2022/proceedings/start.html.

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. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 54, 4165–4177. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2538089.

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. J Seismlog, 17(1):27–49. DOI: 10.1007/s10950-012-9284-9.

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. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, XLIII-B2-2021, 681–688. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-681-2021.

Roncat, A., Mandlburger G. (2016): Enhanced detection of water and ground surface in airborne laser bathymetry data using waveform stacking. EGU General Assembly Conf Abstracts, 18:17016. https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_249010.pdf

Schwarz, R., Mandlburger, G., Pfennigbauer, M., Pfeifer, N. (2019): Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 150, 1–10. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.002.

Stilla, U., Yao, W., Jutzi, B. (2007): Detection of weak laser pulses by full waveform stacking. In: Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci, XXXVI (3)/W49A, 25–30. www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W49/PartA/papers/25_pia07.pdf.

Kontakt

Dipl.-Ing. David Mader | Dr.-Ing. Katja Richter | Prof. Dr. habil. Hans-Gerd Maas
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden
Helmholtzstraße 10, 01062 Dresden
david.mader@tu-dresden.de | katja.richter1@tu-dresden.de |
hans-gerd.maas@tu-dresden.de

Dr.-Ing. Patrick Westfeld
Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH)
Neptunallee 5, 18057 Rostock
patrick.westfeld@bsh.de

© Wißner-Verlag

4.4 Untersuchungsgebiet

Bei der Auswahl eines Bereichs, welcher für die Erprobung der Full-Waveform Stacking-Methoden geeignet ist, bietet sich unter Berücksichtigung der Echolotmessungen (Abb. 4.2b) zunächst der südliche Teil aufgrund einer geringeren Neigung des Gewässerbodens (langsamer Anstieg der Gewässertiefe) an. Im Gegensatz dazu ist im nördlichen Teil ein sehr stark abfallender Gewässerboden erkennbar, der für die Full-Waveform Stacking-Verfahren zunächst eine größere Herausforderung darstellt und Bestandteil weiterführende Untersuchungen werden muss.
Für die Full-Waveform Stacking-Prozessierung der ALB-Daten wurde ein Teilgebiet mit handhabbarer Datengröße und langsam ansteigender Gewässertiefe ausgewählt, mit dem Ziel, das Potential der Full-Waveform Stacking-Verfahren in maritimen Gewässern zeigen zu können. Abbildung 4.3 zeigt die Lage des 900 m langen und zwischen 180 m und 260 m breiten Untersuchungsgebietes im Befliegungsgebiet. Die Messdaten wurden sowohl mit dem sigFWFS als auch mit dem volFWFS prozessiert. Aufgrund der Ähnlichkeit zum Datensatz der Elbe in Kapitel 3 (bzgl. ALB-Sensor, Scanmuster, Punktdichte) haben die Rasterzellen (2,5 m × 2,5 m) und Voxel (2,5 m × 2,5 m × 0,1 m) eine ähnliche Größenordnung, wurden allerdings etwas größer gewählt, um mit der größeren Datenmenge besser umzugehen. Untersuchungen in Mader et al. (2021) und Mader et al. (2023) zeigen einen minimalen Einfluss dieser Änderungen auf die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte.

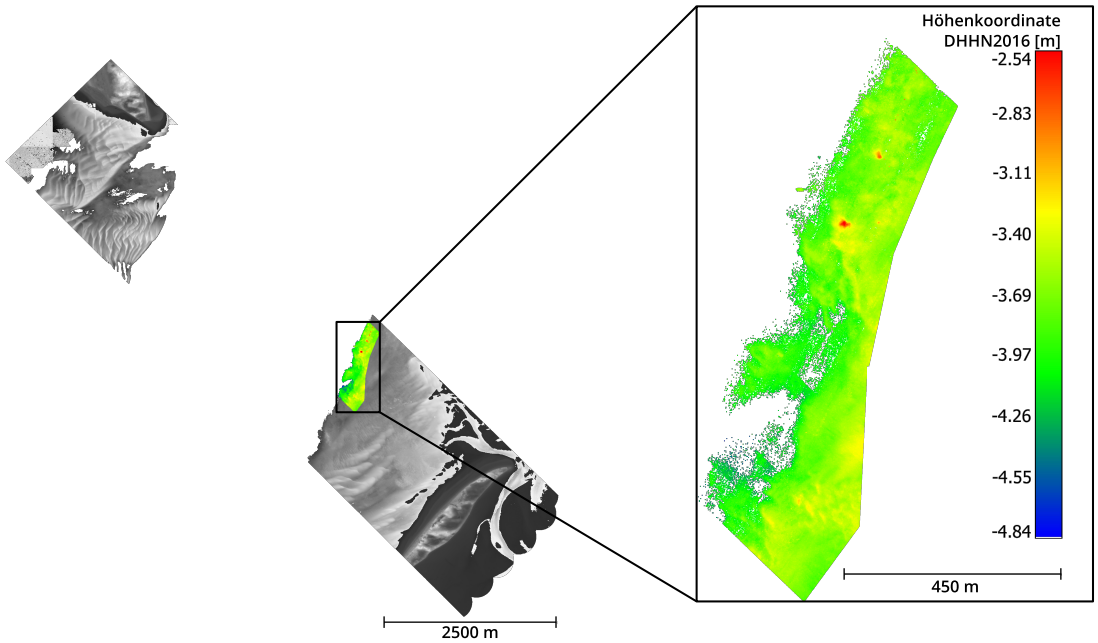


Abb. 4.3 Untersuchungsgebiet farbkodiert bzgl. der Höhenkoordinate (DHHN2016).

4.5 Klassifikation der Wasseroberflächenpunkte

Vor der Prozessierung der ALB-Daten erfolgte zunächst die Extraktion der Wasseroberflächenpunkte in Form einer einfachen Klassifizierung. Dafür wurden zunächst lediglich die first echo Punkte der OWP-Daten herangezogen und in der Punktwolke alle für die Wasseroberfläche infrage kommenden Punkte isoliert. Eine Analyse der Höhenkoordinaten der Kandidaten lieferte die mittlere Wasseroberflächenhöhe. Anschließend wurden alle Punkte mit einer Höhe gleich

der mittleren Wasseroberfläche ± 10 cm für die Berücksichtigung von Welleneffekten (entspricht leichtem Seegang; Westfeld et al. (2017)) als Wasseroberflächenpunkte klassifiziert und in der Prozessierung als solche genutzt (Abb. 4.4).

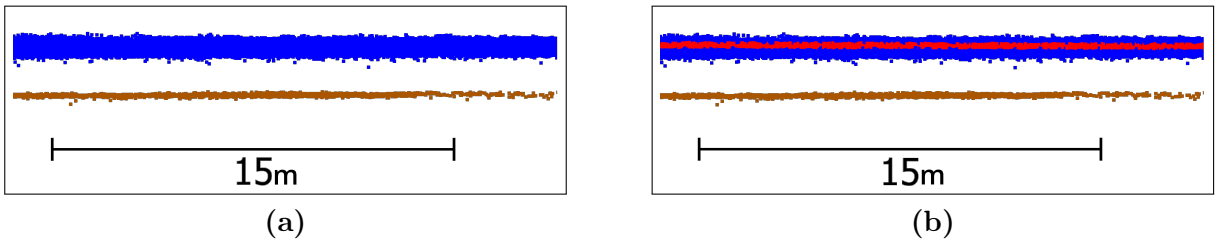


Abb. 4.4 Klassifikation der Wasseroberfläche. Seitenansicht der Punktwolke im **a** unklassifizierten und **b** klassifizierten Zustand. Blaue Punkte = Kandidaten für die Wasseroberfläche; Braune Punkte = Gewässerbodenpunkte der OWP; Rote Punkte = klassifizierte Wasseroberflächenpunkte.

4.6 Visualisierung der Ergebnisse

Die Punktwolken der Full-Waveform Stacking-Prozessierungen sind in Abbildung 4.5a und 4.5c dargestellt. Sie weisen die gleichen Höhenkonturen wie die OWP-Daten in Abbildung 4.3 auf. Eine Gegenüberstellung der Gewässerbodenabdeckung zwischen neuprozessierten Punkten und OWP-Punkten (Abb. 4.5b und 4.5d) zeigt einen deutlichen Zugewinn an Gewässerbodenpunkten für beide Verfahren. Das Profil in Abbildung 4.6 bestätigt visuell zum einem die gute Repräsentation und zum anderen die Erfassung weiterer Teile des Gewässerbodens durch die Full-Waveform Stacking-Verfahren. Sowohl die Erhöhung (relativ mittig) als auch die kleineren Bodenwellen (auf der linken Seite) sind in den sigFWFS und volFWFS Punktwolken gut zu erkennen.

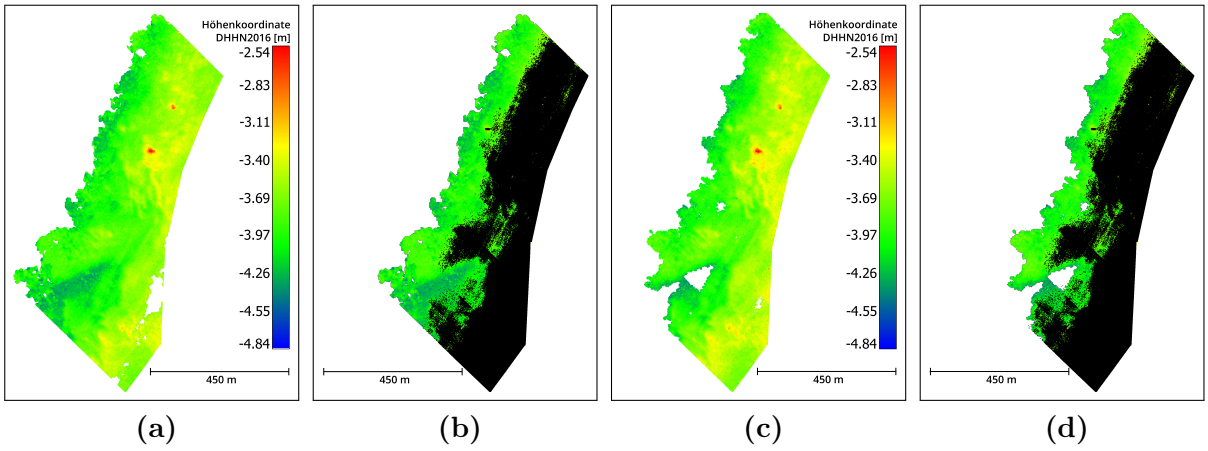
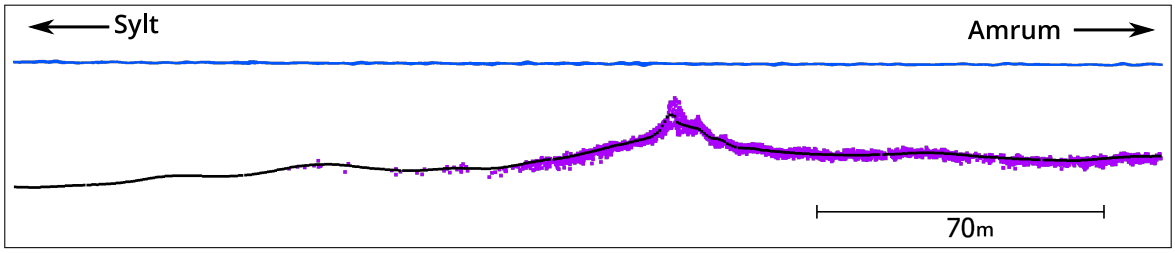
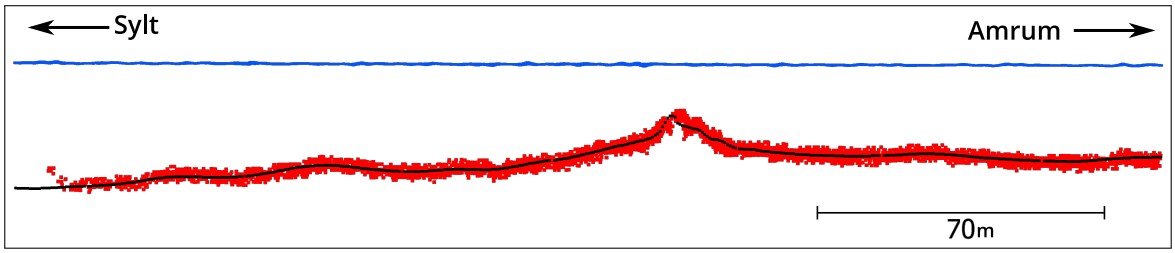


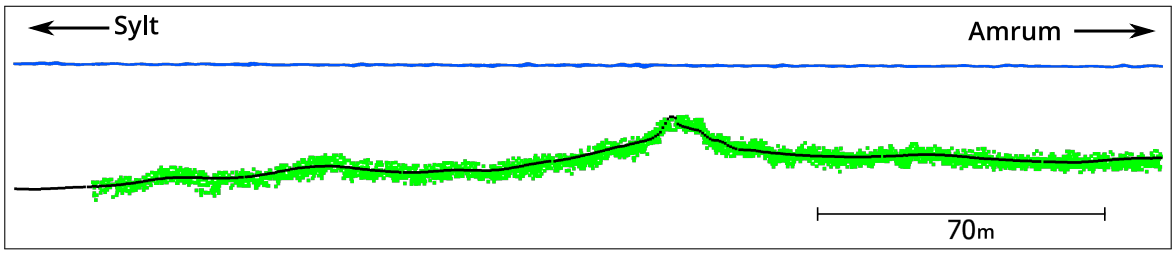
Abb. 4.5 Visualisierung der Prozessierungsergebnisse des signalbasiertem (**a, b**) und des volumetrischen Full-Waveform Stackings (**c, d**). **a** und **c** zeigen die Ergebnispunktwolke der Full-Waveform Stacking-Prozessierung farbkodiert bzgl. der Höhenkoordinate (DHHN2016). Der mittlere Wasserspiegel lag zum Zeitpunkt der Befliegung zwischen −1,38 m und −1,45 m (DHHN2016). **b** und **d** stellt den Flächenvergleich zwischen Abb. **a** bzw. **c** und den OWP-Daten (schwarze Punkte) dar.



(a) OWP



(b) sigFWFS



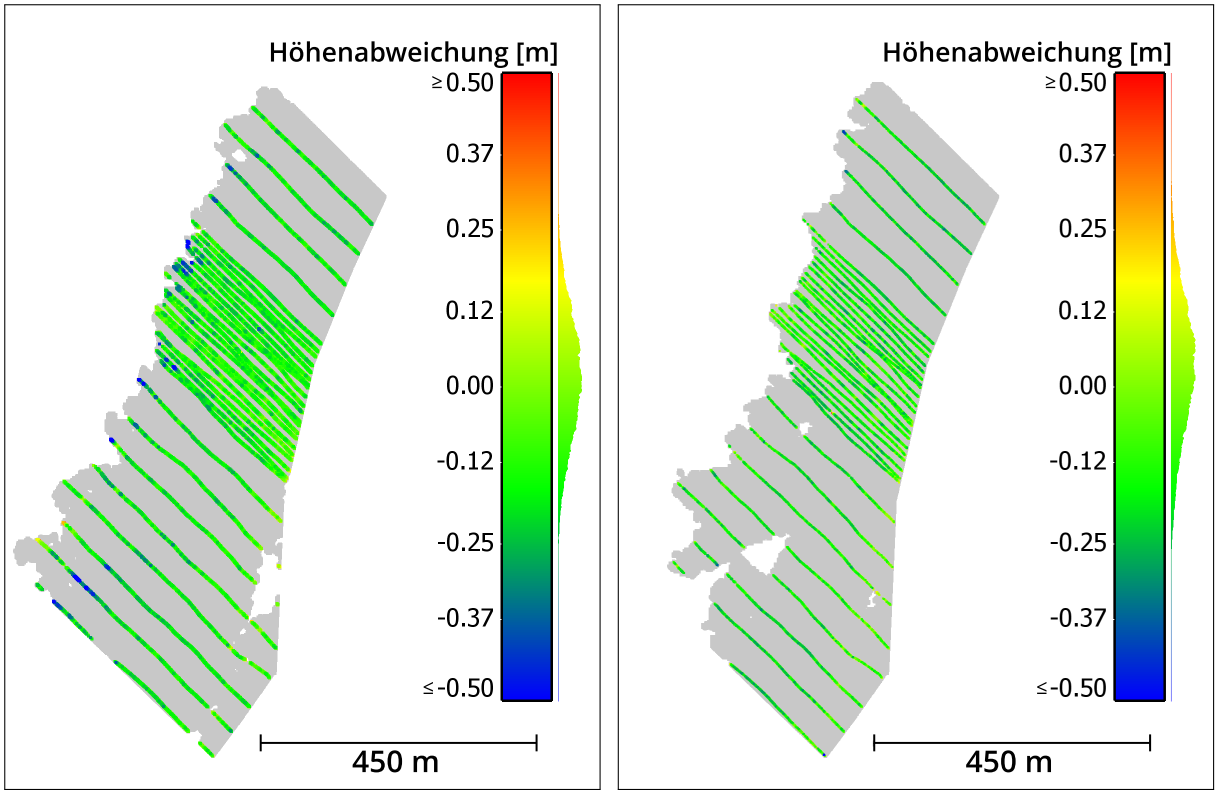
(c) volFWFS

Abb. 4.6 Profil durch das Untersuchungsgebiet. Blauen Punkte = Wasseroberfläche; schwarze Punkte = Echolotmessungen; rote Punkte = sigFWFS Punkte; grüne Punkte = volFWFS Punkte. Die Höhenkoordinate wurde 10fach überhöht.

4.7 Genauigkeit und Zuverlässigkeit

Als nächstes erfolgt die quantitative Untersuchung der Ergebnisse, um die guten visuellen Eindrücke aus Abbildung 4.5 und 4.6 zu bestätigen und die Funktionsweise beider Full-Waveform Stacking-Verfahren für diesen ALB-Datensatz besser bewerten zu können. Im Folgendem werden die Ergebnisse der Full-Waveform-Prozessierung mit den Echolotmessungen verglichen und die Genauigkeit und Zuverlässigkeit auf Basis der Höhenabweichungen zwischen den Punktwolken untersucht. Für die Genauigkeit kommen die mittlere Höhenabweichung ($\overline{\Delta h}$), der Root Mean Square Wert (RMS), das Sigma der Mean Absolute Deviation ($\sigma_{MAD(mean)}$) und das Sigma der Median Absolute Deviation ($\sigma_{MAD(median)}$) sowie für die Zuverlässigkeit die Inlier Rate zur Anwendung (Hampel, 1974; Sachs, 1982; Litman et al., 2015). Das Vorgehen für die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanalyse entspricht der Analyse in Mader et al. (2021) und Mader et al. (2023).

Abbildung 4.7 stellt die Höhenabweichungen für beide Full-Waveform Stacking-Verfahren dar, wobei die Abweichung für das volFWFS homogener wirken. Die globalen Genauigkeitswerte in Tabelle 4.1 zeigen, dass durch das sigFWFS mehr Punkte generiert wurden und diese bzgl. $\overline{\Delta h}$ etwas geringere Abweichungen zu den Echolotmessungen aufweisen. Die anderen Genauigkeits-



(a) sigFWFS **(b)** volFWFS

Abb. 4.7 Höhenabweichung der resultierenden Punktwolken der beiden Full-Waveform Stacking-Verfahren verglichen mit den Echolot Profilmessungen. Die Punktwolken sind farbkodiert bzgl. der Höhenabweichung. Punkte mit positiver Höhenabweichung werden zu tief und Punkte mit negativer Höhenabweichung zu hoch geschätzt.

werte (RMS, $\sigma_{MAD(mean,median)}$) variieren zwischen den Verfahren nur um 1 cm. Die Abbildung 4.8 illustriert die erzielten Genauigkeitswerte in Abhängigkeit der Gewässertiefe, welche sich für die Gewässertiefen zwischen 2,0 m und 3,2 m nahezu komplett auf einem konstant niedrigen Level bewegen. Die einzige Ausnahme bildet der RMS Wert des sigFWFS, welcher für die Gewässertiefen zwischen 2,9 m und 3,3 m von 0,11 m auf 0,38 m anwächst.
Bezüglich der globalen Zuverlässigkeitswerte in Tabelle 4.1 gibt es eine deutliche Diskrepanz bei der Inlier Rate für die Punkte mit $|\Delta h| \leq 0{,}15$ m zwischen sigFWFS (84,94 %) und volFWFS (79,88 %). Bei den anderen Inlier Rates zeigen beide Verfahren sehr hohe Werte, die sich voneinander nur geringfügig unterscheiden. Die Inlier Rates in Abhängigkeit der Gewässertiefe (Abb. 4.8c und 4.8d) zeigen ein konstant gutes Level für Gewässertiefen zwischen 2,0 m und 3,2 m, wobei die Werte beim sigFWFS ab einer Gewässertiefe von 2,9 m sichtbar schlechter werden. Bei einer Gewässertiefe von 3,04 m haben immerhin noch 91,08 % der Punkte eine Höhenabweichung $\leq 0{,}25$ m, bei 3,19 m sind es noch 65,55 %.
Die Analyse der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der erzielten Ergebnisse zeigt, dass der Gewässerboden bis zu einer Gewässertiefe von etwa 3,04 m (sigFWFS) bzw. 3,2 m (volFWFS), verglichen mit den Echolotmessungen, gut repräsentiert wird. Es muss angemerkt werden, dass die 3,2 m bei den Punkten des volFWFS nicht der maximal erreichten Gewässertiefe des Verfahren entspricht, sondern nur bis zu dieser Gewässertiefe Vergleiche zwischen volFWFS Punkten und Echolotmessungen durchgeführt werden konnten.

Tab. 4.1 Globale Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte des Vergleichs Echolotmessungen und sigFWFS bzw. volFWFS. Der Punktanteil gibt an, wieviel Punkte (prozentualer Anteil) der neuprozessierten Punktwolken (absoluten Zahlen) für die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanalyse herangezogen wurden (Begründung siehe Kap. 4.2).

Genauigkeitswerte	sigFWFS	volFWFS
Punktanteil	3,3 % von 7738063	3,2 % von 6322879
$\overline{\Delta h}$	0,012 m	0,033 m
$\sigma_{\overline{\Delta h}}$	0,11 m	0,11 m
RMS	0,11 m	0,12 m
$\sigma_{MAD(mean)}$	0,10 m	0,11 m
$\sigma_{MAD(median)}$	0,10 m	0,11 m
Inlier Rate		
$\lvert\Delta h\rvert \leq 0{,}15\,\mathrm{m}$	84,94 %	79,88 %
$\lvert\Delta h\rvert \leq 0{,}25\,\mathrm{m}$	98,15 %	96,80 %
$\lvert\Delta h\rvert \leq 0{,}35\,\mathrm{m}$	99,68 %	99,67 %

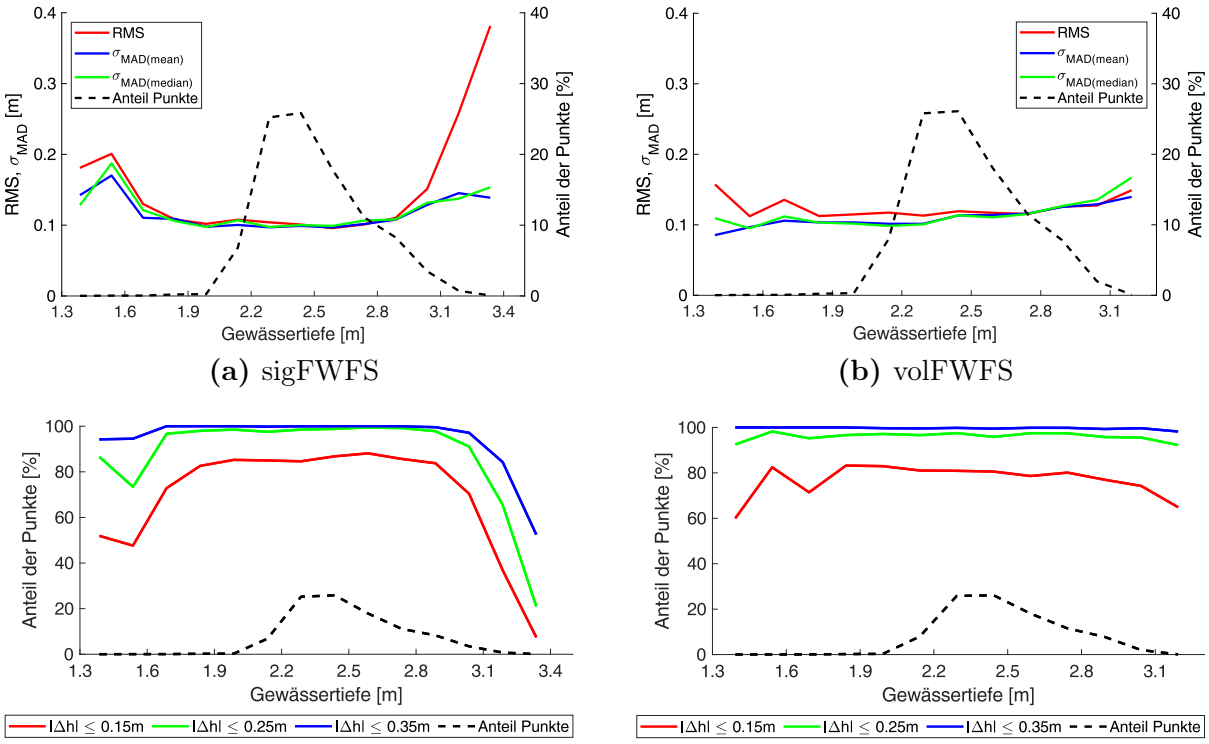
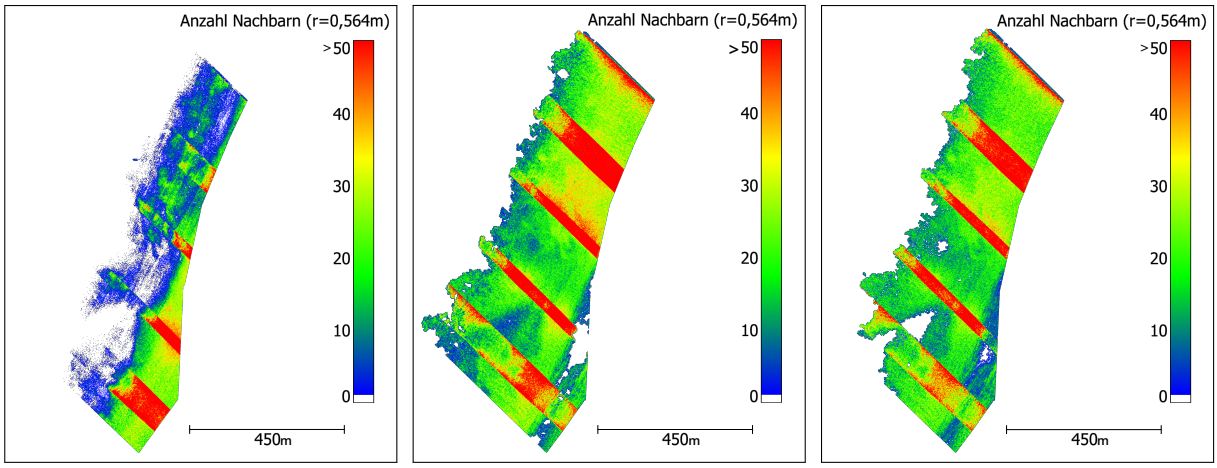


Abb. 4.8 Darstellung der **a**, **b** Genauigkeitswerte und der **c**, **d** Inlier Rates. Bei **a** und **b** beziehen sich die durchgezogenen Linien auf die linke und die gestrichelte Linie auf die rechte Achse.

4.8 Mehrwert der Verfahren

In diesem Abschnitt wird der Mehrwert der Full-Waveform Stacking-Verfahren im Vergleich zu konventionellen Auswertemethoden untersucht. Dafür liegt es nahe, den Zugewinn an abgedeck-

ter Fläche am Gewässerboden und auswertbarer Gewässertiefe zu analysieren. Prinzipiell sind beide Angaben zur Beurteilung des Mehrwertes geeignet, allerdings ist die zusätzliche Fläche auch stark von der Charakteristik des Gewässerbodens abhängig. In einem Untersuchungsgebiet mit flach abfallenden Gewässerboden ist ein deutlich höherer Flächenzugewinn zu erwarten, als in einem Gebiet, in dem die Gewässertiefe rapide zunimmt. Zudem gibt es keine dem Autor bekannten Festlegungen, ab welcher Anzahl an Punkten pro Quadratmeter von einer flächigen Repräsentation des Gewässerbodens gesprochen werden kann. Bei der erreichten Gewässertiefe besteht ein sehr ähnliches Problem. In den Punktwolken (OWP und Full-Waveform Stacking) kommen gelegentlich vereinzelt Punkte mit größeren Gewässertiefen vor, welche jedoch nicht unbedingt repräsentativ für die gesamte Punktwolke sein müssen. Daher wird für die Bewertung der Verfahren neben den beiden genannten Größen zusätzlich die Punktdichte eingeführt. Zur Bestimmung der Punktdichte wird um jeden Gewässerbodenpunkt ein Kreis mit einem definierten Radius gezogen. Die Anzahl aller Punkte innerhalb dieses Kreises wird als Punktdichte für den entsprechenden Punkt angegeben (Funktion der Software CloudCompare). Zur aussagekräftigen Beurteilung des Flächenzugewinns wird nur die Fläche der Punkte mit einer vorgegebenen Punktdichte berücksichtigt. Gleiches gilt für die Gewässertiefe. Für den untersuchten Datensatz wird eine minimale Punktdichte von 5 Punkten/m^2 gewählt. Als Radius für den Kreis der Punktdichtebestimmung wird der Wert $r = 0{,}564$ m (entspricht 1,0 m^2) verwendet, wobei für die Punktdichtebestimmung die Anzahl der Punkte innerhalb des definierten lateralen Abstandes (2D-Nachbarschaft) herangezogen wurde.



(a) OWP **(b)** sigFWFS **(c)** volFWFS

Abb. 4.9 Punktdichte der Ergebnispunktwolken.

In Abbildung 4.9 sind die von OWP, sigFWFS und volFWFS erzielten Punktdichten dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass zusätzlich zur Steigerung der Flächenabdeckung auch in einigen Bereichen die Punktdichte erhöht werden konnte. Anhand der Punktdichteinformation wurden alle Punkte mit einer Punktdichte von < 5 Punkte/m^2 herausgefiltert, die verbleibenden Punkte in die XY-Ebene projiziert und abschließend vermascht. Die vermaschte Punktwolke ermöglicht somit die Bestimmung der Flächen, welche in Tabelle 4.2 aufgelistet sind.
Für die Ermittlung eines aussagekräftigeren Flächenvergleichs müssen jedoch die OWP-Punkte zwischen dem Untersuchungsgebiet und dem Landbereich von Amrum hinzugezogen werden (Abb. 4.10), womit sich der Flächenzuwachs bei einer Mindestpunktdichte von 5 Punkten/m^2 beim sigFWFS auf 14 % und beim volFWFS auf 12 % relativiert.
Für die Bestimmung der auswertbaren Gewässertiefe wird auf die Daten in Abbildung 4.9 zu-

Tab. 4.2 Angaben zur erreichten Eindringtiefe und Flächenvergleich von sigFWFS und volFWFS Punktwolken relativ zu der Fläche der OWP für das Untersuchungsgebiet (mit Funktionen der Software CloudCompare) basierend auf den Punkten mit einer minimalen Punktdichte von 5 Punkten/m^2. Für eine realistischere Angabe des Flächenzuwachses wurde das Gebiet zwischen Untersuchungsgebiet und dem Landbereich vor Amrum hinzugezogen.

Flächenvergleich (relativ zu OWP)	OWP	sigFWFS	volFWFS
Untersuchungsgebiet (Abb. 4.3)	100 %	252 %	231 %
erw. Untersuchungsgebiet (Abb. 4.10)	100 %	114 %	112 %
Erreichte Gewässertiefe			
bezogen auf Wasseroberfl. von -1,45 m	2,69 m	3,31 m	3,36 m

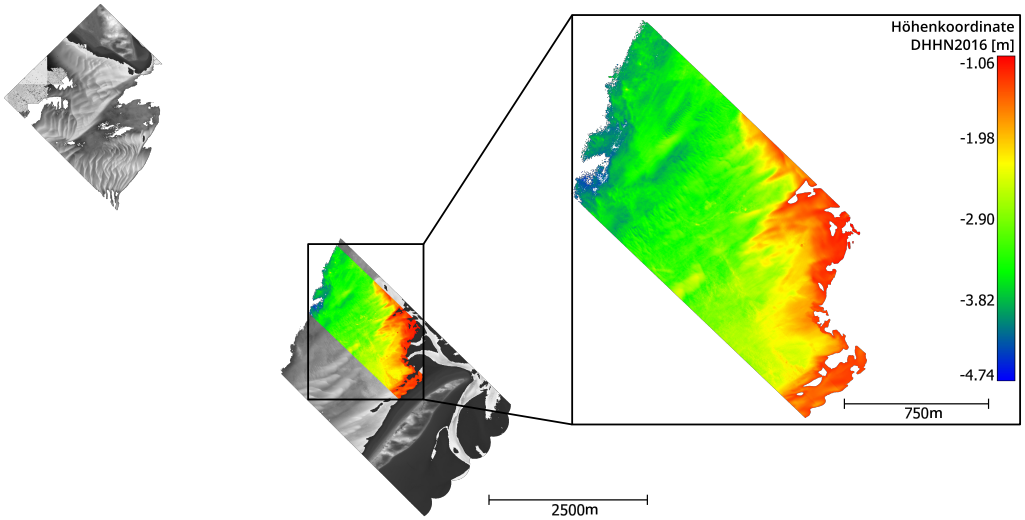
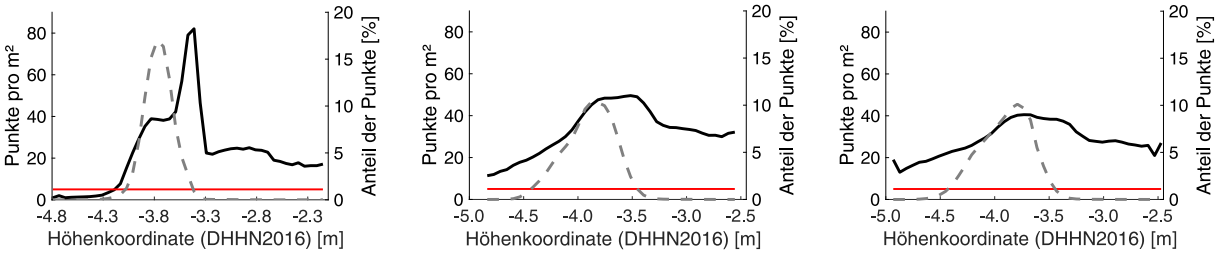


Abb. 4.10 Erweitertes Untersuchungsgebiet für die Ermittlung des absoluten Flächenzuwachses. Die Punktwolke ist farbkodiert bzgl. ihrer Höhenkoordinaten (DHHN2016).

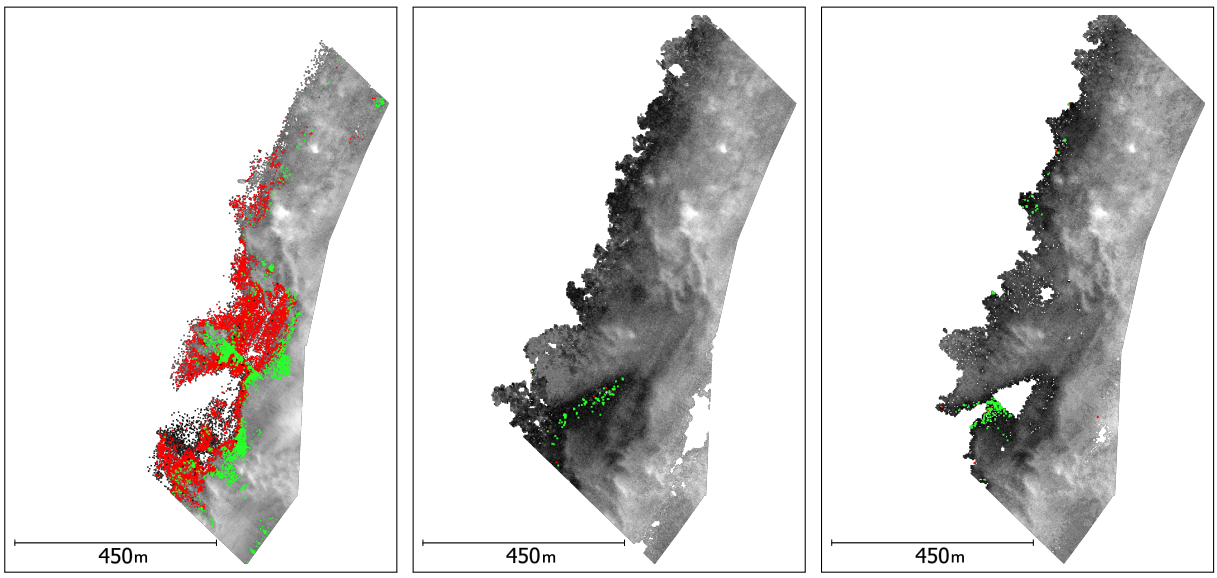


(a) OWP **(b)** sigFWFS **(c)** volFWFS

Abb. 4.11 Mittlere Punktdichte in Abhängigkeit der Gewässertiefe. Die horizontal rote Linie stellt die Grenze von 5 Punkte/m^2 dar. Der Anteil der Punkte bezieht sich auf die Gesamtpunktzahl der jeweiligen Punktwolke. Die Anzahl der Punkte pro m^2 ist in schwarz und der Anteil der Punkte als gestrichelte graue Linie dargestellt.

rückgegriffen. Abbildung 4.11 zeigt die Punktdichte in Abhängigkeit der Höhenkoordinate. Durch Berücksichtigung einer Gewässeroberflächenhöhe von -1,45 m kann die Gewässertiefe für die jeweilige Punktdichte abgeleitet werden. Die Höhe der Gewässeroberfläche des Untersuchungsge-

bietes änderte sich während der Befliegung aufgrund der Tide von -1,38 m auf -1,45 m. Für die Ermittlung der Gewässertiefe wurde hier der niedrigste Wert verwendet. Die erreichten Gewässertiefen für eine minimale Punktdichte von 5 Punkte/m^2 sind in Tabelle 4.2 dargestellt, wobei diese aufgrund der Streuung der Gewässerbodenpunkte (siehe $\sigma_{MAD(mean,median)}$) eher zu groß geschätzt werden. Die tiefsten detektierten Stellen werden in Abbildung 4.12 gezeigt.



(a) (b) (c)

Abb. 4.12 Darstellung der Punkte mit der größten Gewässertiefe. **a** zeigt die OWP-Punkte mit Gewässertiefen zwischen 2,64 m und 2,74 m; **b** zeigt die sigFWFS Punkte mit Gewässertiefen zwischen 3,26 m und 3,36 m; **c** zeigt die volFWFS Punkte mit Gewässertiefen zwischen 3,31 m und 3,41 m. Rote Punkte haben eine Punktdichte < 5 Punkte/m^2; Grüne Punkte haben eine Punktdichte ≥ 5 Punkte/m^2.

Zusammenfassend konnte somit die auswertbare Gewässertiefe für das sigFWFS um 23 % und für das volFWFS um 25 % erhöht werden, was zu einem Flächenzuwachs von 14 % respektive 12 % und partiell zu einer Erhöhung der Punktdichte führt. Die gegenläufigen Tendenzen bei Gewässertiefe und Flächenzuwachs lassen darauf schließen, dass bei gleicher Gewässertiefe beim sigFWFS mehr Gewässerbodenpunkte extrahiert und somit eine höhere Flächenabdeckung erzielt werden, als beim volFWFS. Tabelle 4.1 belegt die Unterschiede in der Anzahl an extrahierten Punkten.

5 Potential der Full-Waveform Stacking-Methoden zur Ableitung der Gewässertrübung

Die stacked Full-Waveforms und die Ortho-Full-Waveforms dienen nicht nur zur Detektion schwacher Gewässerbodenechos, sondern können auch Information zur Gewässertrübung liefern. Die Gewässertrübung führt zu einem kontinuierlichen Abfall der Signalstärke zwischen Wasseroberflächenecho und Gewässerbodenecho (Kapitel 2.3.1; Abb. 2.7b). Die Analyse dieses Signalabfalls erlaubt im Umkehrschluss Aussagen zur Gewässertrübung. Der nachfolgende Beitrag zeigt auf Basis verschiedener Full-Waveform Varianten zwei Möglichkeiten zur Bestimmung des Dämpfungskoeffizienten, welcher den kontinuierlichen Abfall der Signalstärke beschreibt (Richter et al., 2017).

Beitrag 5 – Ableitung von Gewässertrübungsparametern auf Basis von Full-Waveform-Daten

Dieser Beitrag stellt zwei Ansätze zur Trübungsparameterbestimmung vor, die Exponential Function Approximation (EFA) und das SVB. Beide Methoden werden auf verschiedene Full-Waveform Typen (individuelle, stacked Full-Waveform und Ortho-Full-Waveforms) angewendet mit dem Ziel, Gewässertrübungsinformationen abzuleiten. Abschließend werden die Ergebnisse aller Kombinationen von Methoden und Full-Waveform Typen dargestellt und miteinander verglichen.

Der Beitrag wurde veröffentlicht in: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* mit dem Titel **„Water Turbidity Estimation from LiDAR Bathymetry Data by Full-Waveform Analysis – Comparison of Two Approaches“**

Art des Beitrages:	Konferenzbeitrag (ISPRS Congress 2021, Nizza (F); virtual event)
Autoren:	Katja Richter[1], David Mader[1], Patrick Westfeld[2], Hans-Gerd Maas[1] [1]Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Dresden, DE [2]Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Rostock, DE
Publikations-verlauf:	Abstract am 29. Januar 2021 eingereicht und am 09. März 2021 angenommen, kompletter Beitrag am 28. Juni 2021 veröffentlicht
vollständige Referenz:	Richter, K., Mader, D., Westfeld, P. und Maas, H.-G. (2021). "Water Turbidity Estimation from LiDAR Bathymetry Data by Full-Waveform Analysis – Comparison of Two Approaches". *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2021, 681–688
ISSN:	2194-9034
DOI:	10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-681-2021

WATER TURBIDITY ESTIMATION FROM LIDAR BATHYMETRY DATA BY FULL-WAVEFORM ANALYSIS - COMPARISON OF TWO APPROACHES

K. Richter[1,*], D. Mader[1], P. Westfeld[2], H.-G. Maas[1]

[1] Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Technische Universität Dresden, Germany - (katja.richter1, david.mader, hans-gerd.maas)@tu-dresden.de
[2] Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH), Section Geodetic-hydrographic Techniques and Systems, Germany - (patrick.westfeld@bsh.de)

Commission II, WG II/9

KEY WORDS: full-waveform analysis, volume backscatter, exponential decay coefficient, exponential function approximation, SVB algorithm.

ABSTRACT:

Airborne LiDAR bathymetry is an efficient technique for surveying the bottom of shallow waters. In addition, the measurement data contain valuable information about the local turbidity conditions in the water body. The extraction of this information requires appropriate evaluation methods examining the decay of the recorded waveform signal. Existing approaches are based on several assumptions concerning the influence of the ALB system on the waveform signal, the extraction of the volume backscatter, and the directional independence of turbidity.
The paper presents a novel approach that overcomes the existing limitations using two alternative turbidity estimation methods as well as different variants of further processed full-waveform data. For validation purposes, the approach was applied to a data set of a shallow inland water. The results of the quantitative evaluation show, which method and which data basis is best suited for the derivation of area wide water turbidity information.

1. INTRODUCTION

Airborne LiDAR bathymetry (ALB) allows the efficient surveying of shallow water bodies (Mandlburger, 2020). Laser bathymetry beam propagation is characterized by scattering and absorption effects in the water column, resulting in a continuous decrease of the received signal intensity (Churnside, 2014). The degree of intensity decrease mainly depends on the turbidity of the water body (Walker and McLean, 1999). Inverting this relation, statements on the local level of turbidity in the water body may be obtained by analyzing the decay of the recorded waveform signal.

Area-wide information on water turbidity provides an essential input for a wide range of ecological studies (e.g. Devlin et al. (2008); Gippel (1995)). Common techniques for turbidity measurement can be divided into in-situ methods (e.g. measuring of visibility depth with a Secchi-disk (Secchi, 1864), measuring of down welling irradiance with submersible quantum sensors, measuring of a beam attenuation coefficient with transmissometers) and laboratory methods (analyzing fixed volume samples with absorptiometers or nephelometers). The obvious disadvantages of all these techniques are the large effort, the high weather dependence, and the point-wise character of the measurements.

Phillips et al. (1984) and Billard et al. (1986) present an approach for the area-wide derivation of water turbidity from full-waveform (fwf) data of a large footprint profiling deep water ALB system, designed to capture ocean waters. They use the amplitude and the decay of the backscattered signal to determine the absorption and scattering coefficients of sea water. The determination of the scattering coefficient requires a system calibration with in-situ reference data.

In Richter et al. (2017), we presented a first approach on the determination of area-wide turbidity information from small-footprint full-waveform airborne LiDAR bathymetry data. The method is based on the analysis of the recorded waveform signals by fitting an exponential function. Herein the exponential decay coefficient depicts an integral measure describing turbidity. The results are very promising and show a high correlation with turbidity measurements obtained by conventional techniques. However, the approach is limited by the following aspects:

(a) Using the signal part after the maximum for exponential function approximation may lead to a bias of the turbidity parameters due to dominant water bottom echoes.

(b) Deriving turbidity parameters from received waveforms leads to a distortion of the turbidity parameters due to the influence of the system waveform.

(c) The turbidity parameters obtained from single full-waveforms signals may be strongly affected by signal noise.

(d) The signal propagates obliquely through the water column, i.e. in contrast to common techniques, turbidity is determined in the direction of the laser pulse propagation and not vertically downwards.

In this contribution, we want to overcome these limitations and therefore present a refined approach that uses only the volume backscatter segment of the full-waveform signal for turbidity

* Corresponding author

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B2-2021
XXIV ISPRS Congress (2021 edition)

derivation (a). Additionally, the surface-volume-bottom (SVB) algorithm presented in Schwarz et al. (2019) has been implemented, which was developed to reconstruct the differential backscatter cross section (dBCS) from bathymetric waveforms. The dBCS allows for the determination of turbidity information free from influences of the system waveform (b). To handle problems with signal noise and to enable a vertical derivation of turbidity parameters (c and d), we combine individual full-waveform signals to stacked full-waveforms (Mader et al., 2021) as well as ortho full-waveforms (Pan et al., 2016) resulting from a voxel-based data representation.

Our study compares the performance of the two approaches exponential function approximation (Section 2.1) and SVB algorithm (Section 2.2) to estimate the turbidity. For this purpose, we use individual full-waveforms, stacked full-waveforms, and ortho full-waveforms (Section 3) of a shallow inland water data set. In Section 4.1 the results are presented and discussed. Since no ground truth data are available, the comparison is based on a quantitative evaluation of the derived turbidity parameters. The evaluation is described in Section 4.2. The contribution ends with the conclusion in Section 5.

2. WATER TURBIDITY ESTIMATION METHODS

Bathymetric waveforms result from the interaction of the laser signal with the water surface, the water column and the bottom of the water body (Abdallah et al., 2012; Pfeifer et al., 2016). Figure 1 shows a schematic representation of the signal components. Analyzing the signal decay and the amplitude of the water column segment of the waveform allows for statements on turbidity. Essentially, the volume exponential decay coefficient k approximates the volume absorption coefficient a for large receiver apertures (Guenther et al., 2000). Moreover, it is almost identical with the diffuse attenuation coefficient (Gordon, 1982). The amplitude of the volume backscatter is indicative of the scattering coefficient b. Since the exact determination of b requires a calibration of the ALB system (Muirhead and Cracknell, 1986), it is not the subject of this work. Sections 2.1 and 2.2 explain the methods used to derive the volume exponential decay coefficient k.

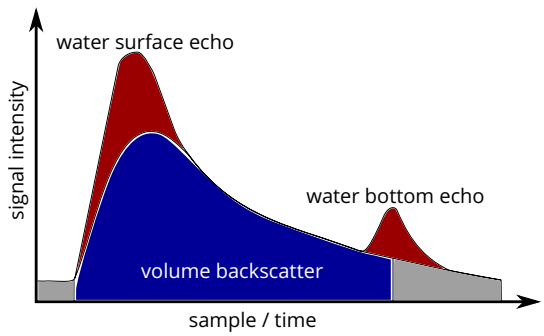


Figure 1. Schematic full-waveform representing the three signal components according to Guenther et al. (2000).

2.1 Exponential function approximation

First, the volume backscatter must be extracted from the full-waveform. For this purpose, the volume backscatter is defined as the signal part after the maximum of the water surface echo to the local minimum before the water bottom echo. The detection of the water surface echo and the water bottom echo is carried out by the full-waveform processing approach presented in Mader et al. (2019, 2021). Subsequently, an exponential function is fitted into the volume backscatter signal, in order to determine the signal decay:

$$f(x) = b_{BS} \cdot e^{(-k \cdot x)} \tag{1}$$

where x is the distance below the water surface and b_{BS} describes the backscatter. The function approximation delivers an estimate of the volume exponential decay coefficient k. Figure 2 shows a schematic representation of the volume backscatter extraction and the exponential function approximation.

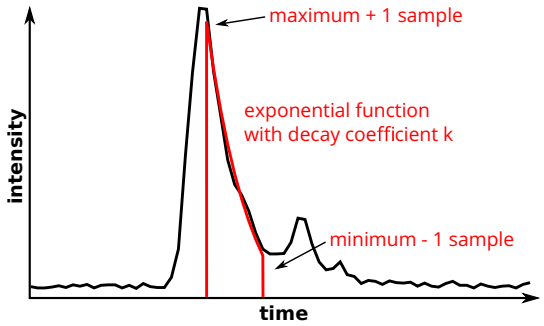


Figure 2. Schematic representation of volume backscatter extraction and exponential function approximation.

2.2 SVB algorithm

The SVB algorithm extracts the echoes of water surface, water column and water bottom (Schwarz et al., 2019). It is based on the exponential decomposition proposed in Schwarz et al. (2017), which is a waveform decomposition method using a physically motivated model of the dBCS and a record of the system waveform. The dBCS model is composed of two boxcar shaped function segments for water surface and bottom as well as one exponential function segment for the water column (Figure 3, green). The SVB algorithm minimizes the differences between the model of the received signal $p_m(t_n, \rho)$ (Figure 3, red) sampled at $t = t_n$ (defined by the convolution of system waveform and dBCS model and the received signal p (Figure 3, black):

$$\sum_{n=1}^{N} \left(p_m(t_n, \rho) - p(t_n) \right)^2 \rightarrow min \tag{2}$$

where t_n are the sampling time instances of the sample set of size N. The SVB algorithm delivers the parameters ρ of the dBCS model. The exponential decay coefficient of the function segment for the water column is used as a measure of water turbidity. The approach has the advantage that neither the backscatter at the water surface nor that at the water bottom distort the determination of the decay coefficient. Furthermore, the influence of the system waveform on the turbidity determination is eliminated.

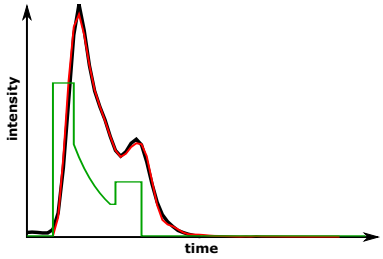


Figure 3. Schematic representation of SVB algorithm; green: dBCS model; red: model of the received signal; black: received signal.

3. DATA

For practical evaluation we used a LiDAR bathymetry dataset of the Elbe River, provided by German Federal Waterways and shipping Office Dresden (WSA) and the German Federal Institute of Hydrology (BfG). The Elbe River is a shallow inland water regulated by numerous groynes in the study area. A 156 m long and 154 m wide river section was selected for the investigations, with a water depth of about 2.1 m in the shipping channel. In the selected test area, there is also a groyne which influences the flow velocity. The ALB data was acquired in spring 2015 with a RIEGL VQ-880-G (Riegl, 2021) using a palmer scan pattern with 20° incidence angle in a flying height of 380 m above ground. The point density is about 55 points/m^2 caused by overlapping flight strips.

The two water turbidity estimation methods are applied both to the original measurement data (individual full-wavforms) and to further processed data (stacked full-waveforms and ortho full-wavforms). The data processing and characteristics of the full-wavform types are described in 3.1 to 3.3.

3.1 Individual full-waveforms

The individual full-waveforms are the unprocessed recorded full-waveforms consiting of 60 to 200 samples (intensity values). The constant sampling interval is 0.575 ns, corresponding to a sampling distance of 6.45 cm under water. The full-waveform signals result from the propagation of the laser pulse in the water column, which is oblique. Therefore, turbidity parameters derived from those signals do not correspond to turbidity in the vertical direction. Figure 4 shows a typical individual full-waveform, which is affected by some noise.

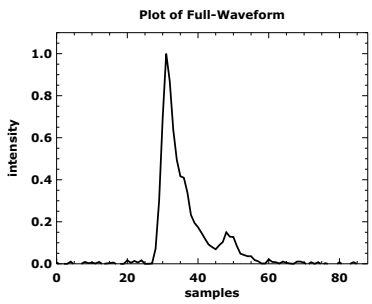


Figure 4. Example for individual full-waveform.

3.2 Stacked full-waveforms

Stacked full-waveforms are obtained by aggregating closely adjacent individual full-waveforms with similar properties with regard to the water depth. As presented in Mader et al. (2019, 2021), data processing starts with the partitioning of the measured data into a regular grid. The grid cell size depends on the data density and the ground topography characteristics (strong or quick changes in terrain slope). A grid cell size of 2 m × 2 m was used for the present data set, resulting in 109 to 144 waveforms per cell.

Combining the individual full-waveforms in a grid cell requires the correct alignment to each other with respect to the height coordinates. Since information on the position of pulse emission, laser beam direction and the laser pulse travel time was not available for our data, the vertical pulse alignment was realized using the maxima of the water surface echoes in the full-waveforms. This approach is based on the assumption that the water surface approximately corresponds to a horizontal plane at the time of measurement. Subsequently, all measured full-waveform signals of the respective grid cell are summed up resulting in a stacked full-waveform (Figure 5).

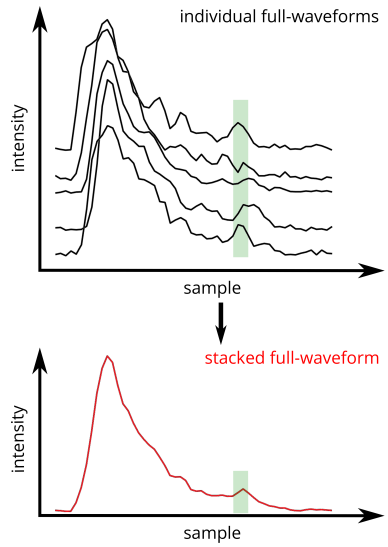


Figure 5. Principle of waveform stacking.

Figure 6 shows a typical stacked full-waveform, which has a significantly lower signal noise than an individual full-waveform. Due to the principle of the full-waveform stacking approach, full-wavforms of the forward look and the backward look of the palmer scan are jointly evaluated. Therefore, the stacked full-waveform signals result from the averaging of different oblique laser beam directions. The derivation of turbidity parameters from stacked full-waveforms is thus based on the assumption that the turbidity within the grid cell is independent of the angle of incidence of the laser pulse.

3.3 Ortho full-waveforms

An alternative approach of the combined evaluation of full-waveforms is the generation of ortho full-waveforms (Pan et al., 2016). For this purpose, the individual full waveforms are

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B2-2021
XXIV ISPRS Congress (2021 edition)

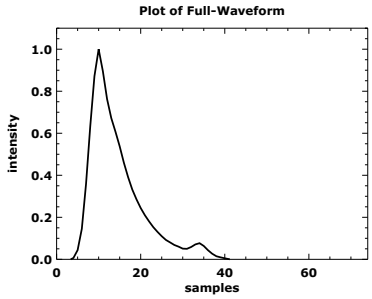


Figure 6. Example for stacked full-waveform.

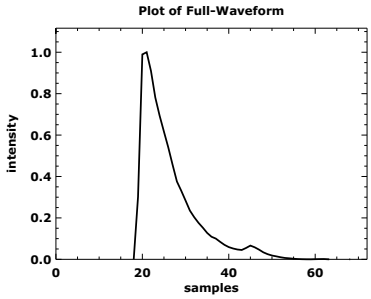


Figure 8. Example for ortho full-waveform.

integrated into a voxel space. The basic idea is the voxelization of the irregular point cloud, which consists of the georeferenced samples of all individual full-waveforms, i.e. the approach is based on a narrow laser beam model (Richter et al., 2021). The voxel attributes result from the mean intensity of the samples included in the voxel. In order to generate ortho full-waveforms, we analyze the vertically superimposed voxels representing the vertical water column. More precisely, an artificial full-waveform is assembled from the voxel attributes of each voxel space column. Figure 7 visualizes the principle of ortho full-waveforms generation.

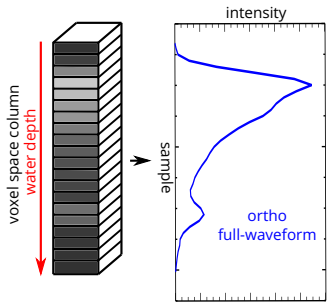


Figure 7. Principle of ortho full-waveform generation from voxel-based data representation. Bright gray value = high intensities; dark gray value = low intensities.

For the present data set the voxel size was set non-cubic to $2\,\mathrm{m} \times 2\,\mathrm{m} \times 0.1\,\mathrm{m}$. The vertical extent of the voxels was chosen to be larger than the sampling interval of the individual full-waveforms to ensure that a waveform is represented at least once in each voxel along the voxel space column. The number of individual full-waveforms used to generate one ortho full-waveforms is not clearly defined. Due to the oblique beam path, an individual full-waveform can intersect several voxel columns. Between 174 to 446 individual waveforms contribute to a ortho full-waveform. The ortho full-waveforms initially have a sampling distance of 0.1 m, corresponding to the vertical extension of the individual voxels. The application of the SVB algorithm requires re-sampling in order to adapt the sampling interval to that of the system waveform.

Figure 8 shows a typical ortho full-waveform, which is characterized by an improved signal-to-noise ratio compared to individual full-waveforms. The use of ortho full-waveforms enables the strictly vertical derivation of turbidity information.

4. RESULTS AND DISCUSSION

The two methods for deriving turbidity parameters were applied to all three waveform types. The results are presented and discussed in Section 4.1. Section 4.2 presents the results of the quantitative evaluation.

4.1 Turbidity estimation

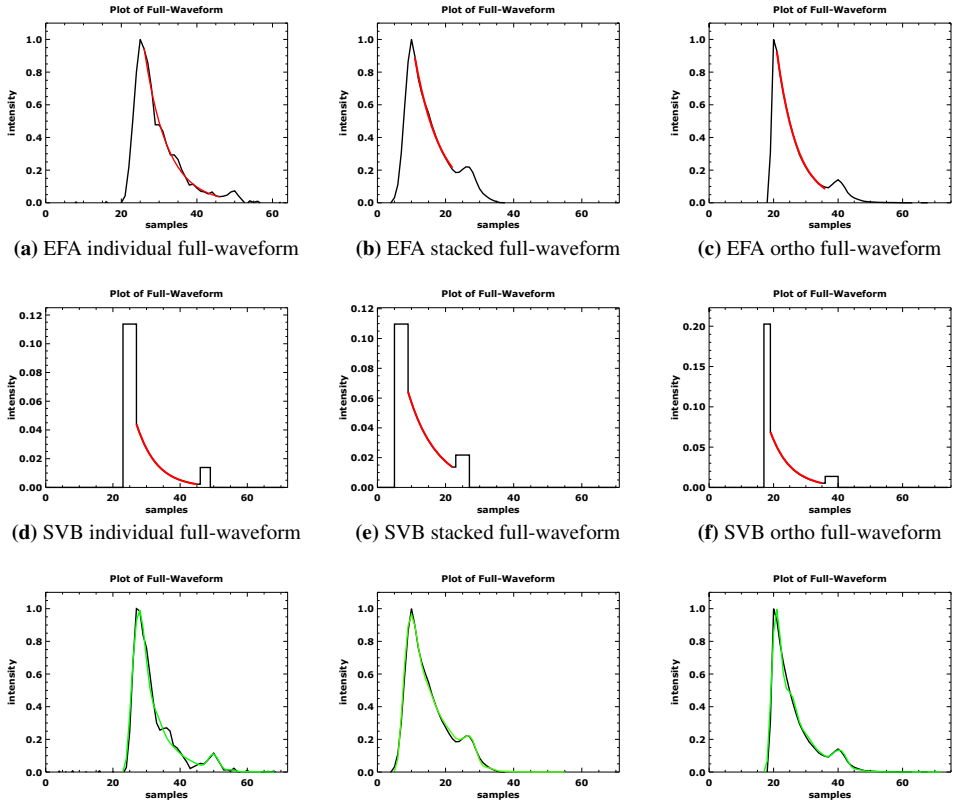
Figure 9 shows the derivation of the turbidity parameters with exponential function approximation (top) and SVB algorithm (middle and bottom). The high signal noise of the individual full-waveform influences both the quality of the exponential function approximation and the determination of the volume backscatter with the SVB algorithm. Using stacked full-waveforms and ortho full-waveforms comes with the advantage of lower signal noise, providing a more reliable determination of turbidity.

Strictly speaking, the SVB algorithm based on the exponential decomposition is only suitable for the application to individual full-waveforms that have a direct physical relation between received waveform and system waveform. The application of the algorithm to further processed waveform data is based on the assumption that the influence of the system waveform on the received waveform is not changed by stacking or voxelization.

The exponential function approximation works correctly for the majority of the individual, stacked, and ortho full-waveforms. However, there may be problems when the water column has not been reliably extracted. This concerns especially the water bottom echo. For the ortho full-waveforms, there is currently no control and correction of a possibly incorrectly determined water bottom echo, as it is done for the individual full-waveforms and stacked full-waveforms.

With the SVB algorithm, problems occur more frequently. In many cases, the echoes from the water surface, water column and water bottom are not extracted correctly. As a result, the estimated model of the received signal does not approximate the received signal well. This affects the derivation of the exponential decay coefficient of the volume backscatter. We expect that the overall performance of the SVB algorithm can be improved by optimizing the determination of approximate values. Further investigations are necessary to adapt the algorithm to the available data.

In addition, problems arise in the shore area where the waveforms deviate from the characteristic signal shape due to the



(a) EFA individual full-waveform **(b)** EFA stacked full-waveform **(c)** EFA ortho full-waveform

(d) SVB individual full-waveform **(e)** SVB stacked full-waveform **(f)** SVB ortho full-waveform

(g) SVB individual full-waveform **(h)** SVB stacked full-waveform **(i)** SVB ortho full-waveform

Figure 9. Turbidity estimation by exponential function approximation (EFA) and SVB algorithm (SVB); (a-c) full-waveform signal (black) and approximated exponential function (red); (d-f) dBCS model (black) and volume backscatter (red); (g-i) model of full-waveform signal (green) and full-waveform signal (black).

shallow water depth. In very shallow water, the echoes from the water surface, water column, and bottom superimpose strongly (Wagner et al., 2006; Ullrich and Pfennigbauer, 2011). In some cases, the echo from the water bottom even has a larger amplitude than the echo from the water surface. In these special cases, the derivation of the decay coefficient fails. However, the developed method is able to detect such cases automatically.

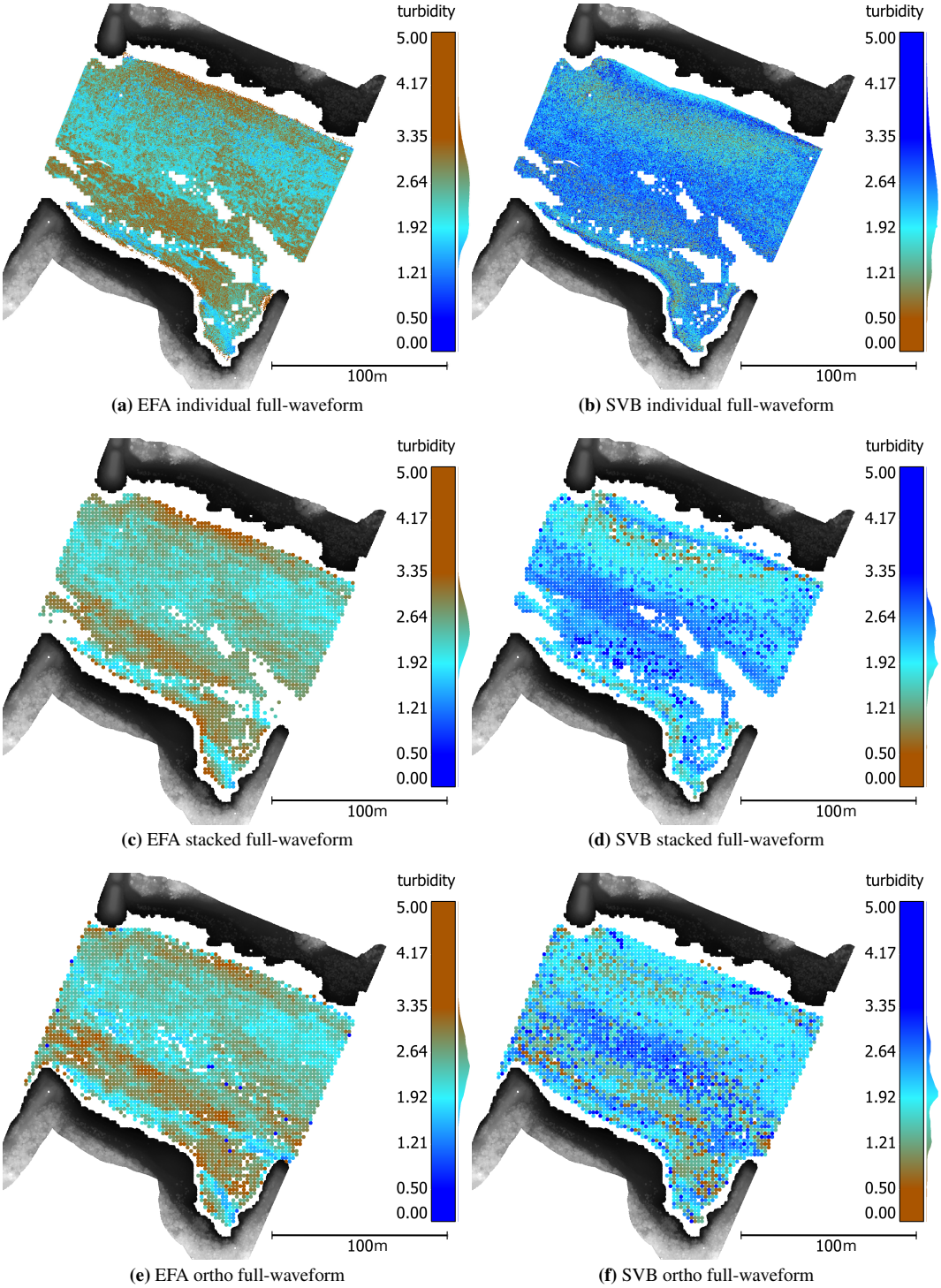
Figure 10 shows the results of the turbidity estimation in the study area in a color-coded visualization. The XY-coordinates correspond to the water surface points, the decay coefficient k is color-coded from blue (low turbidity $\rightarrow$ clear water) to brown (high turbidity $\rightarrow$ turbid water). For the exponential function approximation, a small value for k indicates low turbidity and a large value indicates high turbidity. In the SVB method it is the opposite. The stronger the exponential decay in the received model, the weaker the decay in the dBCS (see figure 9). A small value for k indicates a high turbidity and vice versa. For this reason, the color bar is inverted in the SVB algorithm. Due to the correlation of the decay parameter with other water column parameters of the dBCS model, further investigations are necessary.

The evaluation of individual full-waveforms achieves a significantly higher spatial resolution than the evaluation of stacked full-waveforms and ortho full-waveforms. Compared to common in-situ measurement methods, which only allow a pointwise detection of turbidity parameters, the resolution of the further processed full-waveform types is still very high. The results show some local turbidity variations within the river. Noticeable are the clearer areas in the middle as well as near the groyne. Basically, the determined turbidity values are similar for the different full-waveform types as well as for the two turbidity estimation methods.

With the exponential function approximation applied to individual full-waveforms, the values for k range from $1.3\,\mathrm{m}^{-1}$ to $3.4\,\mathrm{m}^{-1}$. As expected, the results for stacked full-waveforms and ortho full-waveforms show a lower spread. They have a similar range from $1.8\,\mathrm{m}^{-1}$ to $3.2\,\mathrm{m}^{-1}$. The small differences can be explained by the vertical derivation of the turbidity parameters for the ortho full-waveforms.

The SVB algorithm generally provides less plausible results, characterized by a strong noise. For the stacked full-waveforms and the ortho full-waveforms, the turbidity values are in the same range as for the exponential function approximation. The values for the individual full waveforms vary between $0.5\,\mathrm{m}^{-1}$ and $3.5\,\mathrm{m}^{-1}$. The local turbidity variations are basically comparable to the results obtained with the exponential function approximation.

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B2-2021
XXIV ISPRS Congress (2021 edition)



(a) EFA individual full-waveform

(b) SVB individual full-waveform

(c) EFA stacked full-waveform

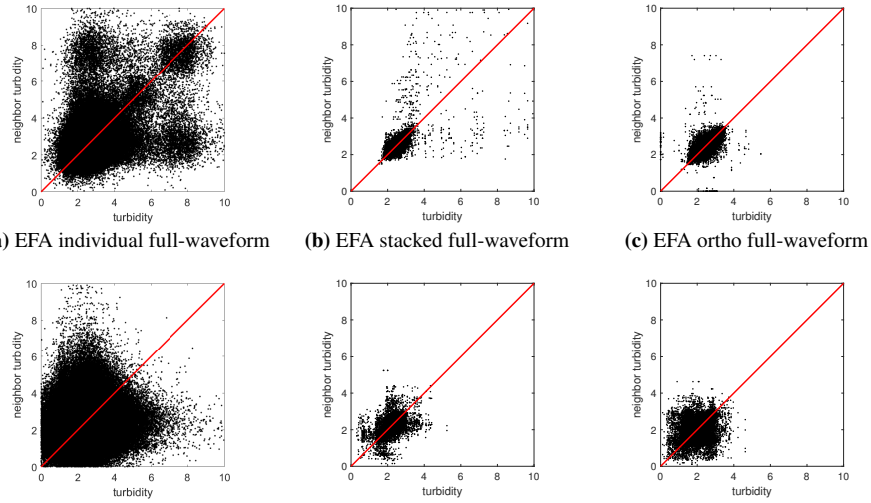
(d) SVB stacked full-waveform

(e) EFA ortho full-waveform

(f) SVB ortho full-waveform

Figure 10. Visualization of determined volume exponential decay coefficients; (a,c,e) exponential function approximation; (b,d,f) and SVB algorithm.

This contribution has been peer-reviewed.
https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-681-2021 | © Author(s) 2021. CC BY 4.0 License.



(a) EFA individual full-waveform **(b)** EFA stacked full-waveform **(c)** EFA ortho full-waveform

(d) SVB individual full-waveform **(e)** SVB stacked full-waveform **(f)** SVB ortho full-waveform

Figure 11. Scatter plot of adjacent decay coefficients.

4.2 Evaluation

The area-wide collection of turbidity ground truth data requires a dense grid of in-situ measurements. The acquisition of these data is very time-consuming and cost-intensive. Furthermore, it must take place at the same time as the flight. In addition, conventional turbidity measurement methods determine different optical properties of the water whose physical relationship to the turbidity parameters obtained from ALB data is not trivial. In our study no turbidity ground truth data are available. Therefore, the comparison of the turbidity estimation methods applied on the different waveform types is based on a quantitative evaluation of the derived turbidity parameters.

For evaluation purposes, the correlations between adjacent turbidity parameters are investigated. Since the turbidity in the medium water will not change abruptly, neighboring full-waveforms should deliver a similar turbidity. To investigate the correlation we form pairs of values consisting of turbidity parameter and neighboring turbidity parameter. For individual full-waveforms we use the nearest neighbor, while for stacked full-waveforms and ortho full-waveforms all 8 neighbors in the grid are considered separately. Each pair of values is taken into account only once.

Figure 11 and Table 1 show the results of the correlation analysis. Please note that a complete agreement between the turbidity parameters derived from neighboring full-waveforms cannot be achieved since a small change in turbidity parameters is expected due to local turbidity variations.

Method	individual fwf	stacked fwf	ortho fwf
EFA	0.42	0.58	0.54
SVB	0.12	0.53	0.26

Table 1. Correlation coefficient.

Looking at Figure 11 one can notice that the majority of the data points in the scatter plots generally form a cluster. In addition, there are a number of data points that deviate more or less strongly from the 1:1 line. In principle, the cluster is more compact with the exponential function approximation and the spread of the data points is smaller.

The correlation coefficient values (Table 1) range between 0.12 and 0.58. The correlations for the SVB algorithm are relatively poor for individual and ortho full-waveforms. The SVB algorithm applied on stacked full-waveforms results in similar correlation like the exponential function approximation. The highest correlation occurs with exponential function approximation applied on stacked full-waveforms and ortho full-waveforms. This indicates that the neighboring turbidity values are very similar proving the plausibility of the results.

5. CONCLUSION

Airborne LiDAR bathymetry represents an interesting option for the derivation of area-wide turbidity information for applications in both limnological studies of inland waters as well as oceanographic studies. Analyzing the voulme backscatter of the ALB full-waveforms allows for the determination of the signal decay, which represents a measure for water turbidity. Compared to conventional point-wise turbidity estimation methods, a higher degree of automation and an area-wise data capture at a much higher spatial resolution can be achieved.

The paper compares two different methods for the estimation of the exponential decay coefficient k, namely the exponential function approximation and the SVB algorithm. Both approaches are applied to three different full-waveform types (individual, stacked, and ortho full-waveform). Due to the lack of ground truth data, an external validation of the methods was not possible yet. However, a quantitative evaluation of the results showed that the exponential function approximation applied on stacked full-waveforms and ortho full-waveforms and the SVB algorith apllied on stacked full-waveforms performs best for the derivation of turbidity parameters. Since the use of ortho full-waveforms enables the vertical derivation of turbidity parameters we favor the exponential function approximation applied on ortho full-waveforms.

The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B2-2021
XXIV ISPRS Congress (2021 edition)

The aim of future work is to confirm the validity of the turbidity determination in further experiments by acquiring terrestrial reference data. In addition, the extraction of the water column from the ortho full-waveforms will be improved by developing volumetric approaches to derive water bottom information. Moreover, test areas with a water depth larger than 2 m will be investigated. There, the volume backscatter consists of significantly more samples, enabling a more reliable derivation of the turbidity parameters. At the moment the exponential function approximation is limited to the derivation of one turbidity parameter per waveform assuming a uniform turbidity distribution within the vertical water column. Future work will focus on vertical variations in turbidity by examining the volume backscatter segment-wise.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research project on airborne LiDAR bathymetry is funded by the German Research Foundation (DFG). We also thank the German Federal Institute of Hydrology for the research assignment of a pilot study, which allowed intensive practical applications of the developed methods. Additionally we thank the Waterways and Shipping Office Dresden (WSA) for the provision of the survey data and the company Airborne Hydro Mapping GmbH (AHM) for the good cooperation in the preparation of the survey data.

References

Abdallah, H., Baghdadi, N., Bailly, J.-S., Pastol, Y., Fabre, F., 2012. Wa-LiD: A new LiDAR simulator for waters. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4), 744–748.

Billard, B., Abbot, R. H., Penny, M. F., 1986. Airborne estimation of sea turbidity parameters from the WRELADS laser airborne depth sounder. *Applied Optics*, 25(13), 2080–2088.

Churnside, J. H., 2014. Review of profiling oceanographic LiDAR. *Optical Engineering*, 53(5).

Devlin, M., Barry, J., Mills, D., Gowen, R., Foden, J., Sivyer, D., Tett, P., 2008. Relationships between suspended particulate material, light attenuation and Secchi depth in UK marine waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79(3), 429–439.

Gippel, C. J., 1995. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrological Processes*, 9(1), 83–97.

Gordon, H. R., 1982. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering. *Applied Optics*, 21(16), 2996–3001.

Guenther, G. C., Cunningham, A. G., LaRocque, P. E., Reid, D. J., 2000. Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop*.

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(2).

Mader, D., Richter, K., Westfeld, P., Weiß, R., Maas, H.-G., 2019. Detection and Extraction of Water Bottom Topography from Laserbathymetry Data by using Full-Waveform-Stacking Techniques. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 1053-1059.

Mandlburger, G., 2020. A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters. *Hydrographische Nachrichten*, 116(06/2020), 6-15.

Muirhead, K., Cracknell, A., 1986. Airborne lidar bathymetry. *International Journal of Remote Sensing*, 7(5), 597–614.

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.

Pfeifer, N., Mandlburger, G., Glira, P., 2016. Laserscanning. C. Heipke (ed.), *Photogrammetrie und Fernerkundung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1–51.

Phillips, D. M., Abbot, R. H., Penny, M. F., 1984. Remote sensing of sea water turbidity with an airborne laser system. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 17(8), 1749–1758.

Richter, K., Maas, H.-G., Westfeld, P., Weiß, R., 2017. An approach to determining turbidity and correcting for signal attenuation in airborne lidar bathymetry. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85(1), 31–40.

Richter, K., Mader, D., Westfeld, P., Maas, H.-G., 2021. Refined geometric modeling of laser pulse propagation in airborne LiDAR bathymetry. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 89(2).

Riegl, 2021. Datasheet RIEGL VQ-880-G.

Schwarz, R., Mandlburger, G., Pfennigbauer, M., Pfeifer, N., 2019. Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 150, 1–10.

Schwarz, R., Pfeifer, N., Pfennigbauer, M., Ullrich, A., 2017. Exponential decomposition with implicit deconvolution of lidar backscatter from the water column. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85(3), 159–167.

Secchi, P. A., 1864. Relazione delle esperienze fatte a bordo della pontificia pirocorvetta Imacolata Concezione per determinare la trasparenza del mare. *Memoria del PA Secchi. Il Nuovo Cimento Giornale de Fisica, Chimica e Storia Naturale, Ottobre 1864, Published 1865*, 20, 205–237.

Ullrich, A., Pfennigbauer, M., 2011. Echo digitization and waveform analysis in airborne and terrestrial laser scanning. *Photogrammetric Week*, 11, 217–228.

Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T., Studnicka, N., 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(2), 100–112.

Walker, R. E., McLean, J. W., 1999. Lidar equations for turbid media with pulse stretching. *Applied Optics*, 38(12), 2384–2397.

6 Diskussion und weiterführende Arbeiten

In diesem Kapitel erfolgt zunächst die Diskussion bezüglich der geometrischen Vereinfachung der Laserpulsausbreitung (Kap. 6.1). Danach werden die Auswirkungen der Vernachlässigung von Gewässereigenschaften (Salzgehalt und Temperatur) auf die Gewässerbodenpunktskoordinaten dargelegt (Kap. 6.2). Anschließend wird anhand eines Vergleichs von Wasseroberflächenpunktwolken des grünen und des nahinfraroten Laserscanners die erwartete Unterschätzung der Wasseroberfläche am Beispiel der Nordsee nachgewiesen und quantifiziert (Kap. 6.3). Im nächsten Abschnitt wird der mögliche Nutzen von Gewässertrübungsparametern zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von prozessierten Gewässerbodenpunkten dargestellt (Kap. 6.4). In Kapitel 6.5 werden Effekte der Nachbarschaftsdefinition bei Anwendung des sigFWFS in tieferen Gewässern gezeigt. In einer Gegenüberstellung der beiden Full-Waveform Stacking-Verfahren werden kurz die Vor- und Nachteile des sigFWFS und des volFWFS zusammengefasst (Kap. 6.6). Abschließend erfolgt die Vorstellung des Multi-Layer-Ansatz, mit welchem prinzipiell Trübungsschichten in Gewässern überwunden werden können. Das Verfahren wurde im Zuge einer Pilotstudie entwickelt, bedarf aber weiterer Validierung anhand geeigneter ALB-Daten (Kap. 6.7).

6.1 Geometrische Modellierung der Laserpulsausbreitung

Die Interaktion des Laserpulses mit der Wassersäule ist sehr komplex. Laut Richter et al. (2021a) ist für die genaue Bestimmung von Gewässerbodenkoordinaten die Berücksichtigung (1) der Refraktion und Anpassung der Ausbreitungsgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche, (2) der Streuung in der Wassersäule und (3) der diffusen Reflexion am Gewässerboden notwendig. Beim sigFWFS und volFWFS wird der Pfad des Laserpulses geometrisch als eine gerade Linie modelliert. Die Effekte der Strahldivergenz und der Refraktion an einer bewegten Wasseroberfläche sowie die starke streuungsbedingte Strahlaufweitung innerhalb der Wassersäule werden bei diesem Modell vernachlässigt. Solche Vereinfachungen können zu Ungenauigkeiten in der Lage und Höhe der Gewässerbodenpunkte führen. Die Auswirkungen auf die Koordinaten der Gewässerbodenpunkte wurden in Westfeld et al. (2017) und Richter et al. (2018, 2021a) untersucht. Darauf aufbauend wurden in den genannten Arbeiten verfeinerte Modelle zur Berücksichtigung des Einflusses von Strahldivergenz, Wellenmuster und der diffusen Reflexion am Gewässerboden entwickelt und präsentiert. Diese Arbeiten zeigen zudem auch, dass die Modellierung von Laserbündeln und Wellenmustern sehr aufwändig und komplex ist. Bezogen auf die Full-Waveform Stacking-Prozessierung würde eine angemessene Berücksichtigung von Streuungs- und Welleneffekten die Komplexität des geometrischen Modells drastisch erhöhen und wäre gerade bei der volFWFS-Prozessierung enorm ressourcen- und zeitintensiv. Daher sollte eine Reduzierung der Modellkomplexität vor einer Integrierung in die Full-Waveform Stacking-Prozessierung angestrebt werden. Dazu könnte, unter Einbeziehung der Abschwächung des Laserpulses in der Wassersäule, von der aktuellen Vereinfachung aus der Komplexitätsgrad sukzessive erhöht werden. Eine Analyse für jede Erhöhung des Komplexitätsgrades zeigt, ob die erzielte Genauigkeitssteigerung des Gewässerbodenpunktes den zusätzlichen Prozessierungsaufwand rechtfertigt oder ob die Genauigkeitssteigerung zu marginal ist.

In Abbildung 6.1 ist die Energieverteilung des Laserspots zum einem an der Wasseroberfläche und zum anderem am Gewässerboden dargestellt. Die Energieverteilung des Laserspots an der Wasseroberfläche ist symmetrisch, wobei sich im Zentrum die meiste Energie befindet und diese zu den Rändern stark abfällt. Am Gewässerboden ist bei der Energieverteilung keine Symmetrie mehr zu erkennen. Weiterführende Untersuchungen müssen zeigen, welche Energieanteile trotz der starken Abschwächung durch die Wassersäule noch zum Sensor zurückkommen und somit für die geometrische Modellierung des Pfades des Laserpulses eine Rolle spielen. Zusätzlich muss auch untersucht werden, welcher Bereich des Gewässerbodens den noch verbliebenen stärksten Anteil der Reflexion repräsentiert. In weiterführenden Arbeiten muss das Ziel sein, einen geeigneten Kompromiss zwischen Erhöhung der Komplexität und vertretbarem Prozessierungsaufwand zu finden.

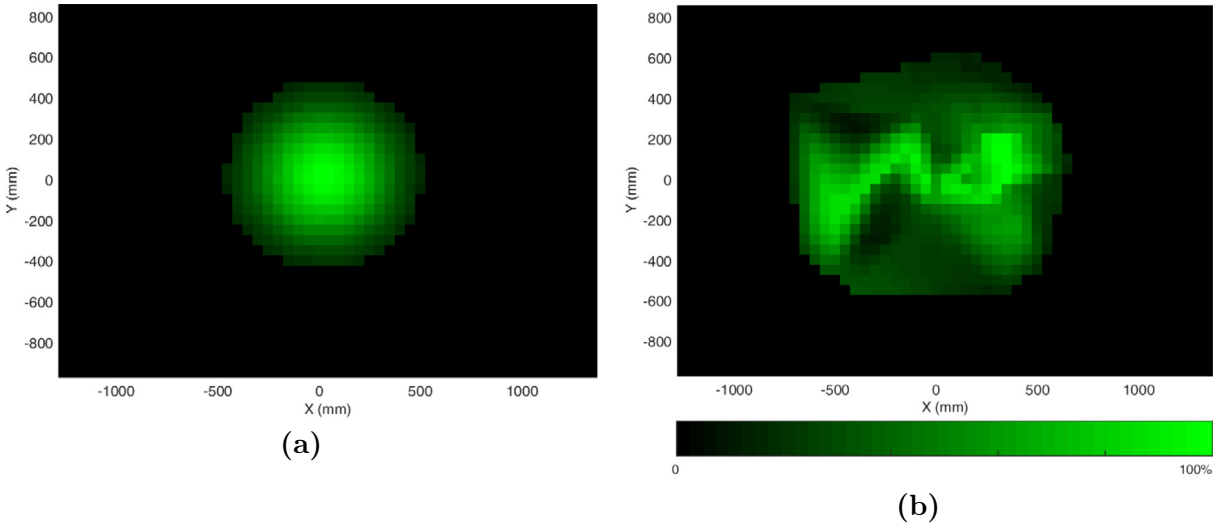


Abb. 6.1 Energieverteilung der Laserspots **a** an der Wasseroberfläche und **b** am Gewässerboden (Westfeld et al., 2017).

6.2 Einfluss der Gewässereigenschaften auf die Gewässerbodenbestimmung

Beim Übergang des Laserpulses von Luft in Wasser ist eine Anpassung der Ausbreitungsrichtung (α_W) und der Ausbreitungsgeschwindigkeit (c_W) notwendig. Beide Korrekturen können anhand des Brechungsgesetzes von Snellius (Gl. 6.1) ermittelt werden, bei welchem unter anderem der Brechungsindex von Wasser n_W eingeht.

$$\frac{sin(\alpha_L)}{sin(\alpha_W)} = \frac{n_W}{n_L} = \frac{c_L}{c_W} \tag{6.1}$$

mit

α_L = luftseitiger Winkel zwischen Wasseroberflächennormale und Laserpuls

α_W = wasserseitiger Winkel zwischen Wasseroberflächennormale und Laserpuls

n_L, n_W = Brechungsindex in Luft bzw. in Wasser

c_L, c_W = Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft bzw. in Wasser

Dabei wird n_W in der Regel gleich 1,33 bzw. 1,333 und folglich $c_W = 225\,000\,000\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ gesetzt. Allerdings sind der Brechungsindex und damit auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit abhängig von den Eigenschaften des Gewässers (Salzgehalt, Temperatur und Druck) und der Wellenlänge des Lichtes. In Schwarz et al. (2020) wurde zudem gezeigt, dass für die Ausbreitungsgeschwindigkeit des grünen Laserpulses in Wasser die Gruppengeschwindigkeit (anstatt der Phasengeschwindigkeit) anzunehmen und damit ein höherer Brechungsindex anzusetzen ist.
Die beiden Gewässer in Kapitel 3 (Elbe) und Kapitel 4 (Nordsee) wurden mit $n_W = 1{,}33$ ohne Berücksichtigung der verschiedenen Eigenschaften vor allem bei Temperatur und Salzgehalt prozessiert. Auch wenn der Einfluss gegenüber anderen Fehlerquellen eher vernachlässigbar ist, soll an dieser Stelle dennoch eine kurze Genauigkeitsbetrachtung für die beiden Messkampagnen durchgeführt werden. Dafür wird zunächst die Laufzeit eines Pulses für eine Strecke von 2,0 m für die Elbe bzw. 3,0 m für die Nordsee (entspricht ungefähr den erreichten Eindringtiefen) mit der oben genannten Lichtgeschwindigkeit c_W berechnet. Anschließend erfolgt die Bestimmung der Brechungsindizes für die Elbe und Nordsee nach der Faustformel von Höhle (1971) (Gl. 6.2):

$$n_W = 1,338 + 4 \cdot (486 - \lambda - T + 0,003 \cdot D_{GW} + 5 \cdot S) \cdot 10^{-5} \tag{6.2}$$

Die Abhängigkeit vom Druck wird dabei durch die Wassertiefe (D_{GW}; [m]) berücksichtigt. In dieser Gleichung ist der lineare Zusammenhang aller Parameter zu erkennen, wobei eine Verringerung der Temperatur (T; [°C]) sowie eine Steigerung der Gewässertiefe und des Salzgehaltes (S; [‰]) zu einer Erhöhung des Brechungsindex führen und vice versa. Den größten Effekt auf den Brechungsindex hat dabei der Salzgehalt und den geringsten Einfluss die Gewässertiefe. Da für die Messdaten weder der Elbe noch für die Nordsee Angaben zu den Gewässereigenschaften bekannt sind, müssen bzgl. Temperatur und Salzgehalt Annahmen getroffen werden, welche in Tabelle 6.1 dargestellt sind. Für die Wellenlänge (λ; [nm]) wurde 532 nm eingesetzt.

Tab. 6.1 Exemplarische Gewässerparameter: Salzgehalte entsprechen üblichen Angaben zu Süßwasser bzw. Nordsee. Die mittleren Temperaturen der Elbe und Nordsee der jeweiligen Befliegungsmonate entstammen den entsprechenden Klimatabellen von FeiReu GbR (2022).

	Elbe (März)	Nordsee (August)
Salzgehalt	0 ‰	35 ‰
Temperatur	6 °C	18 °C
Gewässertiefe	2,0 m	3,0 m
resultierendes n_W	1,3359	1,3424
resultierendes c_W	$224\,411\,430\,\mathrm{m\,s^{-1}}$	$223\,321\,512\,\mathrm{m\,s^{-1}}$

Die Bestimmung der angepassten Lichtgeschwindigkeit c_W erfolgt mit Gleichung 6.3:

$$c_W = c_L / n_W. \tag{6.3}$$

Für die Elbe ergab sich durch Verwendung des angepassten c_W eine Verkürzung der gemessenen Distanz um 0,005 m. Bei der Nordsee ist der Unterschied mit 0,022 m deutlich größer. Die Auswirkungen auf den wasserseitigen Auslenkwinkel betragen 0,0676° für die Elbe und 0,1413° für die Nordsee-Messung. Die Unterschiede in der Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. im wasserseitigen Brechungswinkel führen bei horizontaler Gewässeroberfläche und einem luftseitigen Einfallswinkel von 20° zu den in Tabelle 6.2 gezeigten Koordinatenabweichungen.
Wie Eingangs bereits erwähnt spielen diese Abweichungen für die vorliegenden Messdaten keine besondere Rolle. Aufgrund der starken Abhängigkeit des Brechungsindex vom Salzgehalt und

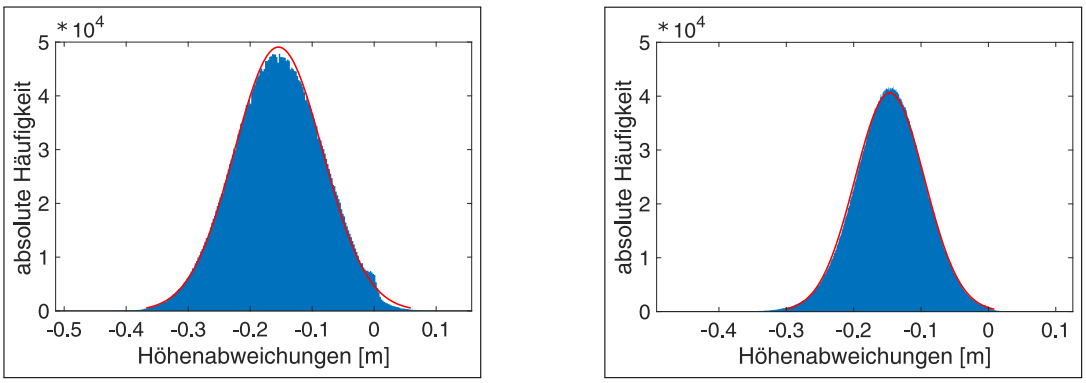
Tab. 6.2 Einfluss der Berücksichtigung der Gewässereigenschaften auf die Messdaten der Elbe und der Nordsee. Die Differenzen sind gleich Standardwerte minus angepasste Werte.

	Elbe	Nordsee
Δn_W	$-0,0059$	$-0,0124$
Δc_W	0,26 %	0,75 %
→ Δ Distanz	0,0052 m	0,022 m
$\Delta \alpha_W$	0,0676°	0,1413°
→ lateraler Versatz	0,0023 m	0,0072 m
→ Höhenversatz	−0,000 61 m	−0,0019 m

der Tatsache, dass sich die Abweichung linear mit der gemessenen Distanz vergrößert, sollte bei Befliegungen von entsprechenden Gewässern dennoch der Einfluss eines angepassten Brechungsindex geprüft werden.

6.3 Unterschätzung der Wasseroberfläche

Bei der Abtastung der Wasseroberfläche mit einem grünen Laser kommt es nicht unmittelbar an der Wasseroberfläche zur Rückstreuung von Laserpulsanteilen zum Sensor, sondern erst nach dem Durchdringen der Grenzschicht Luft ↔ Wasser. Dies führt in der Regel zu einer Unterschätzung der Wasseroberfläche (Mandlburger et al., 2013). Der Umstand, dass für die Datenakquirierung des Nordseegebietes sowohl der grüne als auch der nahinfrarote Laserscanner zum Einsatz kamen (beide im RIEGL VQ-880-GH II kombiniert), ermöglicht die Bestimmung der Unterschätzung der Wasseroberfläche. Allerdings operieren beide Laserscanner unabhängig voneinander und mit verschiedenen Scanmustern, sodass es keine koaxial akquirierten Daten im grünen und nahinfraroten Wellenlängenbereich für die einzelnen Messpunkte gibt. Dennoch kann die Unterschätzung der Wasseroberfläche durch den grünen Laserscanner durch einen Vergleich mit der im nahinfrarotem gemessenen Wasseroberfläche bestimmt werden. Für diesen Vergleich kamen die klassifizierten Punktwolken aus Kapitel 4.5 und das aus der Full-Waveform-Prozessierung resultierende Wasseroberflächenmodell (für sigFWFS und volFWFS nahezu identisch) zur Anwendung. Der



(a) **(b)**

Abb. 6.2 Histogramm der Höhenabweichung zwischen der Wasseroberfläche der nahinfraroten Laserscannermessungen und **a** den OWP-Punkten (des grünen Laserscanners) bzw. **b** dem Wasseroberflächenmodell basierend auf den OWP-Punkten. Rote Kurve zeigt den Histogrammfit.

Mittelwert der Höhenabweichungen ergab eine Unterschätzung der Wasseroberfläche von 15 cm. Die Histogrammanalyse der Höhenabweichung in Abbildung 6.2 zeigen sogar eine Unterschätzung von etwa 18 cm für die klassifizierte Punktwolke und für das Wasseroberflächenmodell, was nach der Faustformel aus Mandlburger et al. (2013) einen Fehler von etwa 5 cm bis 6 cm für die Gewässerbodenpunkte nach sich zieht. Eine geometrische Berücksichtigung dieses systematischen Fehlers bzgl. Anpassung der Koordinaten des Durchstoßpunktes und der Laserpulslaufzeit unter Wasser führt zu einer Verbesserung der Genauigkeit der Gewässerbodenpunkte. In zukünftigen Weiterentwicklungen der Prozessierung sollte dieser Effekt daher berücksichtigt werden. Voraussetzung ist die Verfügbarkeit von NIR-Daten zur Ableitung der Unterschätzung der Wasseroberfläche.

6.4 Nutzung von Gewässertrübungsinformation für die Beurteilung der Zuverlässigkeit der Gewässertiefenbestimmung

In Kapitel 5 wird die Ableitung von Gewässertrübungsinformationen u.a. anhand von stacked Full-Waveforms und Ortho-Full-Waveforms vorgestellt. Diese Informationen können möglicherweise für die Beurteilung der Zuverlässigkeit der detektierten Gewässerbodenpunkte genutzt werden. Wie bereits mehrfach erwähnt, ist die Gewässertrübung der limitierende Faktor für die ALB. Durch eine Quantifizierung der Gewässertrübung sollte es theoretisch möglich sein, die maximal auswertbaren Gewässertiefen des sigFWFS und des volFWFS zu bestimmen, analog zu den Herstellerangaben bei der maximalen Eindringtiefe eines ALB-Messsystems. Folglich könnte die maximal auswertbare Gewässertiefe für die Einschätzung der Zuverlässigkeit der detektierten Gewässerbodenpunkte herangezogen werden. Gewässerbodenpunkte mit Gewässertiefen kleiner der maximalen Gewässertiefe gelten somit als zuverlässig und Gewässerbodenpunkte mit größeren Gewässertiefen als weniger zuverlässig bestimmt. Bei Kenntnis der maximal bestimmbaren Gewässertiefe können auch Aussagen zu Full-Waveform-Messungen ohne detektierten Gewässerbodenpunkt in dem Sinne getroffen werden, dass bis zu einer bestimmten Gewässertiefe kein Gewässerboden zu erwarten ist. Diese Information kann insofern wertvoll sein, da für Schiffe in diesen Bereichen bis zu einer bestimmten Gewässertiefe keine Hindernisse zu erwarten sind.
Ob sich in der Praxis ein Zusammenhang zwischen zuverlässig erreichbarer Gewässertiefe und Gewässertrübungsinformation herstellen lässt, wie dieser Zusammenhang mathematisch beschrieben werden kann und welche Abhängigkeiten dabei eine Rolle spielen (z.B. Sensoreigenschaften), muss jedoch erst in weiterführenden Arbeiten an verschiedenen Datensätzen untersucht und validiert werden.

6.5 Auswirkung der Nachbarschaftsdefinition beim signalbasiertem Full-Waveform Stacking

Die Einteilung der Messdaten in die Prozessierungseinheiten (bzw. Rasterzellen) beim sigFWFS auf Grundlage der lateralen Lage der Wasseroberflächenpunkte ist aus geometrischer Sicht problematisch. Durch die Vernachlässigung der Ausbreitungsrichtung der Laserpulse in der Wassersäule, ist die Fläche A_{GB}, welche von allen Full-Waveforms einer Prozessierungseinheit getroffen wird, nicht bekannt (Abb. 6.3b). Im Idealfall hat A_{GB} in etwa die gleiche Größe, wie die Fläche der Prozessierungseinheit A_{PE} auf der Wasseroberfläche. Im schlechtesten Fall ist A_{GB} ein Vielfaches größer, was bei stark bewegten Gewässerbodentopographien zu einer Verbreiterung und Abschwächung des Gewässerbodenechos in der stacked Full-Waveform führen kann. Folglich ist

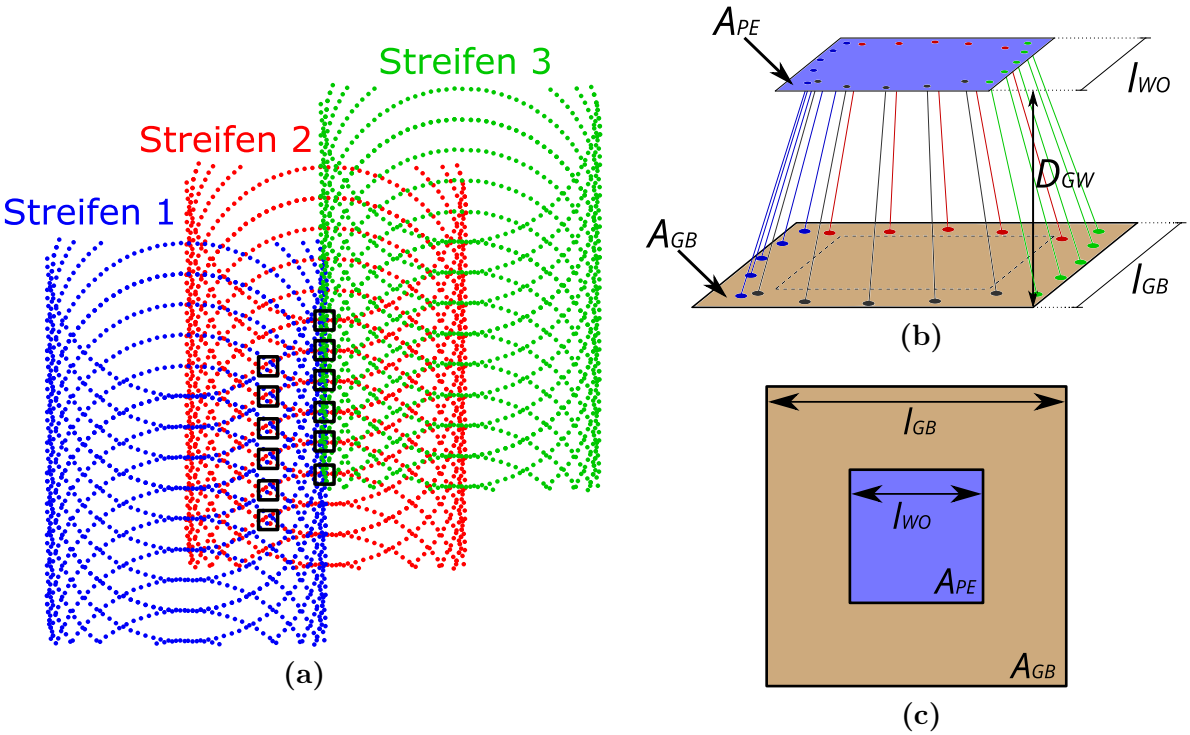


Abb. 6.3 Schematische Darstellung der Vergrößerung der Prozessierungseinheitenfläche durch eine ungünstige Strahlkonstellation, in der drei Flugstreifen involviert sind. **a** zeigt die Befliegungsstreifen. Stellen, wo die ungünstigste Strahlkonfiguration vorkommen kann sind schwarz umrandet. **b** Die dargestellte Strahlkonfiguration basiert auf dem Palmer-Scanmuster und setzt sich wie folgt zusammen: grüne Punkte = seitlicher Teil des Scanmusters Streifen 1; rote Punkte = Vorwärtsblick Streifen 2; dunkelgraue Punkte = Rückwärtsblick Streifen 2; blaue Punkte = seitlicher Teil des Scanmusters Steifen 3. **c** Draufsicht auf Prozessierungszelle. Blaue Fläche = Fläche Prozessierungseinheit A_{PE}; Braune Fläche = Fläche am Gewässerboden A_{GB}; WD = Gewässertiefe.

die Detektion des Bodenechos in der stacked Full-Waveform deutlich schwieriger oder gar nicht mehr möglich. In dem Beitrag Mader et al. (2021) wird dieser Effekt bei geringen Gewässertiefen als vernachlässigbar angegeben bzw. durch die empirische Bestimmung einer geeigneten Rasterzellengröße berücksichtigt. In diesem Abschnitt wird untersucht, welche Auswirkungen die ungünstigste Strahlenkonfiguration auf die Größe der Prozessierungseinheit am Gewässerboden haben kann. Die Refraktion eines Laserpulses mit einem luftseitigen Einfallswinkel von 20° an einer horizontalen Wasseroberfläche führt zu einem wasserseitigen Winkel von 14,87° zwischen der Ausbreitungsrichtung des Laserpulses und Wasseroberflächennormalen. Der daraus resultierende laterale Versatz beträgt das 0,2655-fache der Gewässertiefe D_{GW}. Bei entsprechender Ausbreitungsrichtung der Strahlen im Randbereich einer Prozessierungseinheit verlässt der Laserpuls die lateralen Grenzen der Prozessierungseinheit. Es kommt zu einer Vergrößerung von A_{GB} in Abhängigkeit der Gewässertiefe. Bedingt durch das Palmer-Scanmuster mit Vorwärts- und Rückwärtsblick sowie überlappenden Flugstreifen ist eine Expansion von A_{GB} in alle Richtungen möglich (Abb. 6.3) und stellt den ungünstigsten Fall dar (unter Vernachlässigung von Welleneffekten).

Auch wenn dieses Szenario sicher nicht den Großteil der Messungen betrifft, wird es im Folgenden näher betrachtet, um das mögliche Fehlerpotential aufzuzeigen. Die laterale Vergrößerung wird

mit Gleichung 6.4 beschrieben.

$$l_{GB} = l_{WO} + 0,2655 \cdot D_{GW} \tag{6.4}$$

Tabelle 6.3 zeigt den Flächenzuwachs von A_{GB} von einer 2,0 m × 2,0 m großen Prozessierungseinheit in Abhängigkeit der Gewässertiefe. Der Plot der Werte in Abbildung 6.4 zeigt einen nichtlinearen Anstieg der Fläche A_{GB} mit steigender Gewässertiefe.

Bei einer Gewässertiefe von 2,0 m entspricht A_{GB} dem 2,34-fachen von A_{PE}, was bei Gewässerböden mit geringer bis moderater Geländeneigung vertretbar ist. Bei einer Gewässertiefe von 10,0 m wird am Gewässerboden bereits das 13,36-fache von A_{PE} abgedeckt und für die Erstellung der stacked Full-Waveform verwendet. Die Annahme, dass alle Full-Waveform-Messungen einer Prozessierungseinheit ähnliche Charakteristika bezüglich der Gewässertiefe aufweisen, trifft somit weniger gut zu.

Die Untersuchung und die Ergebnisse in Mader et al. (2021) und Kapitel 4 zeigen, dass die Annahme für flache Gewässer gerechtfertigt ist. Bei tieferen Gewässern sollten die Prozessierungsergebnisse aber durchaus kritischer betrachtet werden, da die stacked Full-Waveform im Prinzip eine immer größere Fläche des Gewässerbodens repräsentiert. Dadurch sind ungenauere oder gar fehlerhafte Gewässerbodenrepräsentationen durch die prozessierten Gewässerbodenpunkte möglich. Bei bewegten Gewässeroberflächen können die zuvor gezeigten Effekte sogar verstärkt werden. Um diesen Effekt zu reduzieren, könnte die Nachbarschaftsdefinition dahingehend geändert werden, dass entweder nur Zeilennachbarn oder nur lateral und zeitlich dicht benachbarte Messungen ($knn \rightarrow k : x, y, t$; David et al. (2008)) zu stacked Full-Waveforms zusammengefasst und ausgewertet werden. Dadurch hätten die gemeinsam prozessierten Laserpulse sehr ähnliche Ausbreitungsrichtungen.

Tab. 6.3 Entwicklung der Fläche mit ansteigender Gewässertiefe.

Gewässertiefe	Fläche	Flächenzuwachs
0,0 m	4,0 m^2	1,0-fache
1,0 m	6,41 m^2	1,60-fache
2,0 m	9,38 m^2	2,34-fache
3,0 m	12,91 m^2	3,23-fache
4,0 m	17,01 m^2	4,25-fache
5,0 m	21,66 m^2	5,42-fache
6,0 m	26,89 m^2	6,72-fache
7,0 m	32,68 m^2	8,17-fache
8,0 m	39,03 m^2	9,76-fache
9,0 m	45,95 m^2	11,49-fache
10,0 m	53,43 m^2	13,36-fache

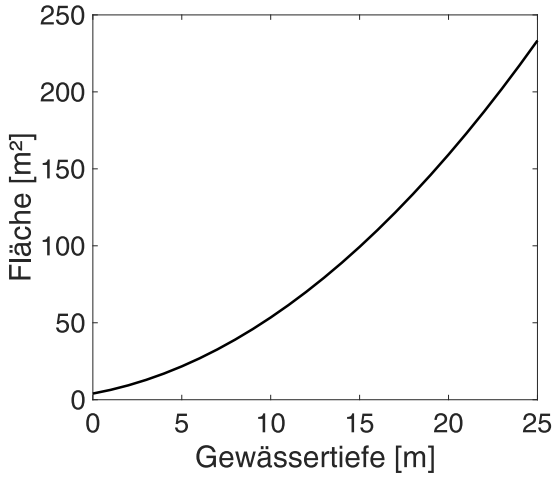


Abb. 6.4 Fläche der Prozessierungseinheit am Gewässerboden in Abhängigkeit der Gewässertiefe.

6.6 Gegenüberstellung signalbasiertes und volumetrisches Full-Waveform Stacking

Mit dem sigFWFS und dem volFWFS wurden Prozessierungsmethoden vorgestellt, welche dicht benachbarte Messdaten zusammenfassen und damit zusätzliche Informationen zur Gewässertiefe zugänglich machen. Beiden Verfahren konnten erfolgreich auf Binnengewässer und maritime Gewässer angewendet werden und erreichten in Flachwasserbereichen nachweislich eine Gewässertiefe von etwa 3,0 m und mehr. Dennoch gibt es Unterschiede, wodurch sich je nach Anwendung das eine oder andere Verfahren besser für die Prozessierung eines ALB-Datensatzes eignet. Anhand der bisherigen Erfahrungen und durchgeführten Untersuchungen werden kurz die Kerneigenschaften der Verfahren genannt und eine grobe Anwendungsempfehlung gegeben. Die Nicht-Berücksichtigung der Laserpulsausbreitung im sigFWFS kann ab einer bestimmten Gewässertiefe zu Ungenauigkeiten führen (Kap. 6.5), dafür ist die Prozessierungszeit wesentlich kürzer, wodurch relativ schnell Prozessierungsergebnisse verfügbar sind. Das volFWFS hat dagegen aufgrund der höheren Komplexität bei der Nachbarschaftsdefinition eine merklich längere Prozessierungsdauer und einen höheren Ressourcenbedarf. Dafür garantiert das volFWFS methodenbedingt die Einhaltung der festgelegten Nachbarschaft von der Wasseroberfläche bis zum Gewässerboden, wodurch höhere Gewässertiefen diesbezüglich zu keinen Ungenauigkeiten führen sollten. Der Vorteil bei höheren Gewässertiefen konnte aufgrund fehlender geeigneter Datensätze (ALB und Validierungsdaten) bisher nicht nachgewiesen werden. Darüber hinaus erlaubt die streng vertikale Ausrichtung von Ortho-Full-Waveforms die Ableitung von Trübungsparametern entlang der Wassersäule.

Zusammenfassend lässt sich ableiten, dass das sigFWFS für die Prozessierung großer Flachwasserbereiche mit geringer Gewässertiefe einsetzbar ist. Bei größeren auswertbaren Gewässertiefen oder zur Ableitung von Gewässertrübungsparametern sollte das volFWFS den Vorzug erhalten.

6.7 Erweiterung des Full-Waveform Stackings mit dem Multi-Layer-Ansatz

In Kapitel 2.2.2 wurden Gelbstoffe, Phytoplankton und andere Partikel in der Wassersäule als Ursachen für die Gewässertrübung genannt. Die Trübung muss nicht homogen sein, sondern kann lokal variieren. Nährstoff- oder auch Sedimenteinträge, z. B. durch Zuflüsse, können zu einer lokal erhöhten Partikelanreicherung und damit zu einer erhöhten Trübung in Teilen der Wassersäule führen (Sullivan et al., 2012). Diese Trübungsschichten können ein großes Problem für die Full-Waveform Stacking-Prozessierung darstellen. Einerseits schwächt eine erhöhte Partikelkonzentration die Signalstärke der Gewässerbodenechos in der Full-Waveform weiter ab, wodurch sich die auswertbare Gewässertiefe verringern kann. Andererseits kann eine stark ausgeprägte Trübungsschicht fälschlicherweise als Gewässerboden detektiert werden. Die Ursache hierfür ist methodenbedingt: Die vorgestellten Full-Waveform Stacking-Verfahren basieren auf der Annahme, dass das signifikanteste Echo nach dem Wasseroberflächenecho das Wasserbodenecho darstellt. Stärkere oder dichtere Trübungsschichten zwischen der Wasseroberfläche und dem Wasserboden können zu einem signifikanten Echo in der Full-Waveform führen, welches als Gewässerbodenecho erkannt wird und zu einem falschen Gewässerbodenpunkt führt.

Im Folgenden wird ein Ansatz zur verbesserten Gewässerbodendetektion für Gewässer mit Trübungsschichten vorgestellt, der im Zuge einer Pilotstudie entwickelt wurde. Ursprüngliches Ziel war die Anwendung von Full-Waveform Stacking Techniken (Mader et al., 2019, 2021) auf Messdaten eines Hafenbeckens um die Anzahl der zuverlässig extrahierten Bodenpunkte zu erhöhen.

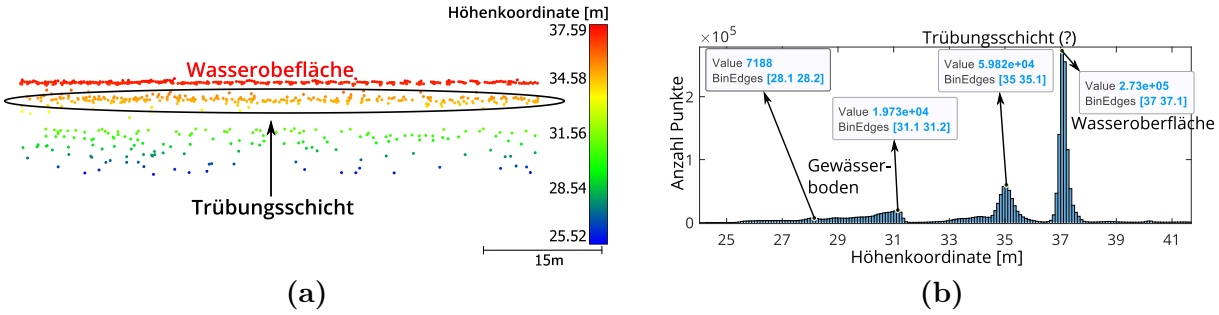


Abb. 6.5 Trübungsschicht in der Wassersäule. **a** Profilansicht einer Punktwolke eines Gewässers mit einer Trübungsschicht. **b** Histogramm bezüglich der vorkommenden Höhenkoordinaten.

Die Daten wurden mit einem Leica Chiroptera ALB-System aufgenommen. Für Teile des Gewässerbodens lagen Echolotdaten vor.
In Teilen des Untersuchungsgebiets wurde eine erhöhte Dichte von OWP-Punkten in Gewässertiefen zwischen 1,5 m und 4,0 m festgestellt, wobei sich die meisten Punkte in Gewässertiefen von 1,5 m und 2,5 m befanden (Abb. 6.5). Es wird angenommen, dass es sich bei dieser Schicht um eine Trübungsschicht handelt, die durch den Abfluss eines nahen gelegenen Flusses verursacht wird. Um den Einfluss der Trübungsschicht auf die Full-Waveform Stacking-Prozessierung zu kompensieren, wurde das Full-Waveform Stacking-Verfahren um den Multi-Layer (ML)-Ansatz erweitert, bei welchem signifikante Echos nach dem zweitstärksten Echo für die Detektion des Gewässerbodens berücksichtigt werden.
Die Erweiterung des Verfahrens führt dazu, dass die drei signifikantesten Echos nach der Gewässeroberfläche erkannt und die daraus resultierenden Punkte extrahiert werden (Layer 2, Layer 3, Layer 4; Layer 1 = Wasseroberfläche), wobei Layer 3 immer tiefer als Layer 2 und Layer 4 tiefer als Layer 3 liegt (Abb. 6.6). Daher liefert der ML-Ansatz separate Punktwolken für Layer 2 bis Layer 4. Abbildung 6.7a zeigt einen Querschnitt mit den farbkodierten Layern 2 bis 4. Der Gewässerboden (Echolotmessungen; REF Punkte) wird gelegentlich von jedem Layer getroffen, ist aber nicht gut durch einen einzelnen Layer repräsentiert. Daher wurde ein zusätzlicher Layer (Last Layer) eingeführt und ausgegeben. In den Last Layer werden die Punkte des letzten verfügbaren Layers gespeichert. Dieses Verfahren wird auf jede stacked Full-Waveform angewendet. Ein Beispiel für die Erstellung des Last Layers:

- bei Full-Waveform 1: Layer 2 bis Layer 4 werden detektiert → Punkt aus Layer 4 geht in den Last Layer;
- in Full-Waveform 2: Layer 2 und Layer 3 werden detektiert → Punkt aus Layer 3 geht in den Last Layer;
- in Full-Waveform 3: nur Layer 2 wird erkannt → Punkt von Layer 2 geht in den Last Layer.

Die ersten Ergebnisse des ungefilterten ML-Ansatzes (Last Layer) zeigen einige fehlerhafte Punkte in der Mitte der Wassersäule mit einem großen Abstand zum Gewässerboden (Abb. 6.7b). Daher ist ein zusätzlicher Verarbeitungsschritt erforderlich, um diese fehlerhaften Punkte zu korrigieren oder auszuschließen. Zu diesem Zweck wurde der Full-Waveform Stacking basierte Filterungsansatz aus Mader et al. (2019, 2021) modifiziert. Der Filteransatz basiert auf der Verwendung von Gewässertiefeninformationen aus umliegenden und kontrollierten oder bekannten Prozessierungseinheiten. Die Gewässertiefe der aktuellen Prozessierungseinheit wird dahingehend geprüft, ob sich diese innerhalb des Suchkorridors befindet (definiert durch die bekannten

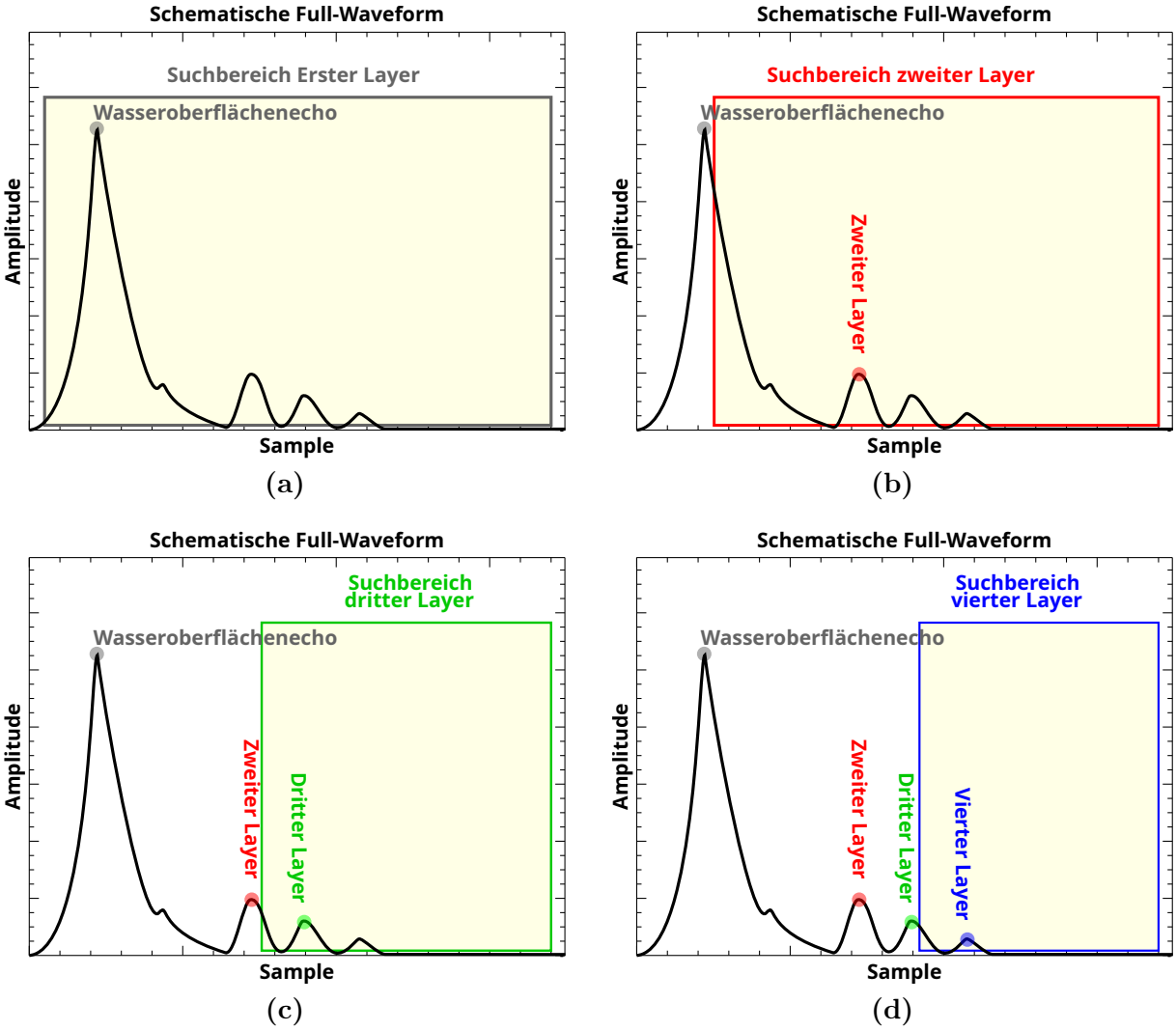


Abb. 6.6 Prinzip der Layer-Extraktion des ML-Ansatzes.

Gewässertiefen der Umgebung). Ist dies nicht der Fall, wird die Gewässertiefe für die aktuelle Prozessierungseinheit korrigiert. Zu diesem Zweck wird das bisher signifikanteste Gewässerbodenecho innerhalb des Suchkorridors ermittelt. Der modifizierte Filteransatz sieht vor, dass nur die detektierten Layer (Layer 2 - Layer 4) daraufhin überprüft werden, ob sie sich innerhalb des Suchkorridors befinden, anstatt nach alternativen Echos für die Bodenerkennung im Suchkorridor zu suchen. Wenn einer der Layer den Suchkorridor trifft, wird dieser Layer als letzter gefilterter Layer identifiziert. Andernfalls wird die Full-Waveform für die nachfolgenden Verarbeitungsschritte ausgeschlossen und ist nicht Teil der resultierenden Punktwolke. Die Filterung wird solange durchgeführt, bis alle Prozessierungseinheiten überprüft wurden. Nach der Filterung stellen die extrahierten Bodenpunkte den Gewässerboden wesentlich besser dar (Abb. 6.7c).

In einer weiteren Pilotstudie mit dem gleichen ALB-Sensor und einem anderen Gebiet (ohne erkennbare Trübungsschicht) hat sich der ML-Ansatz auch als geeignete Methode zur Filterung von falsch detektierten und extrahierten Gewässerbodenpunkten erwiesen. Sensorrauschen oder eine geringe Anzahl von Full-Waveforms können beim Full-Waveform Stacking zur Erkennung falscher Gewässerbodenpunkte führen. Die Anwendung des ML-Ansatzes führt zu einer Ein-

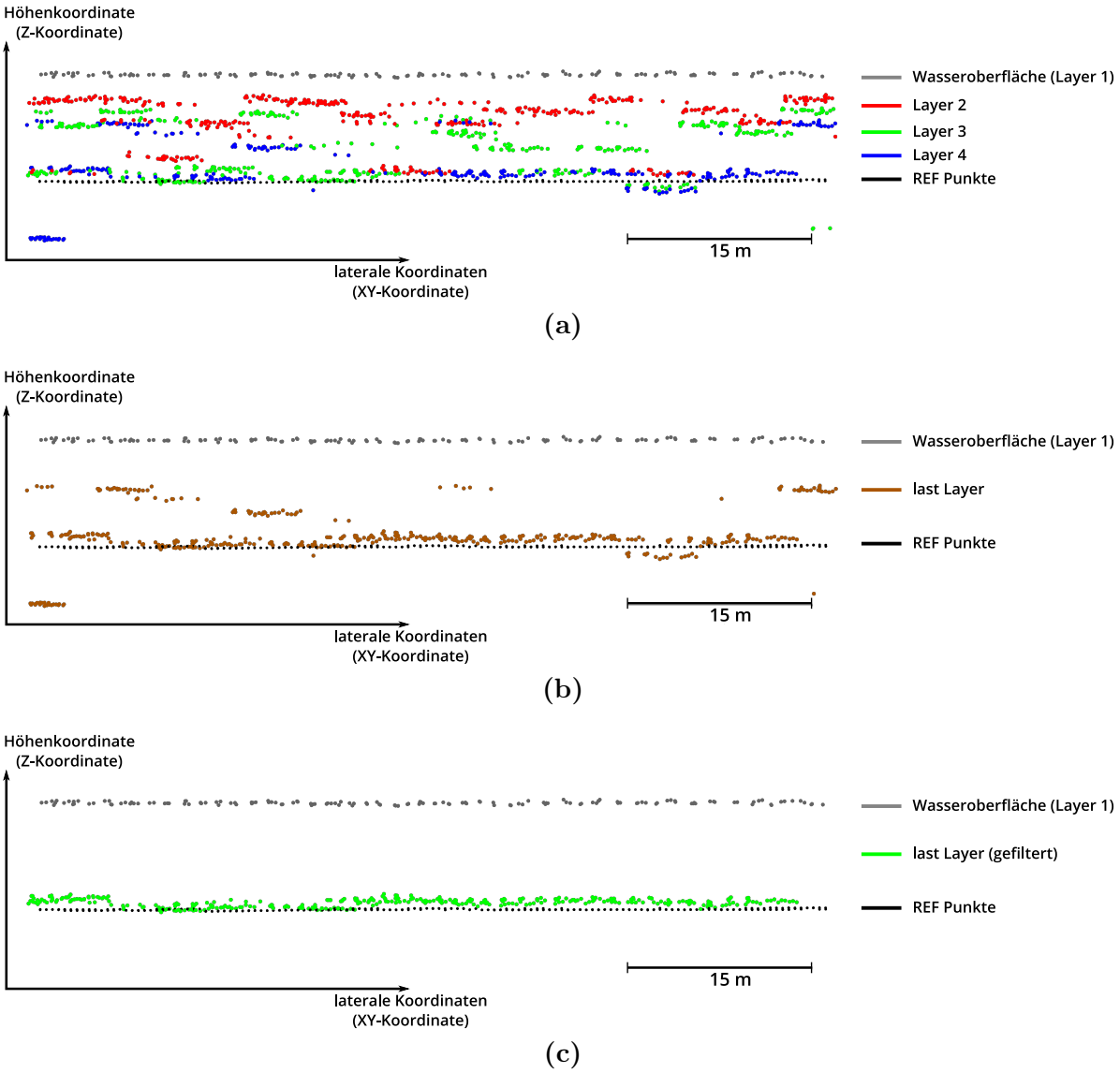


Abb. 6.7 Querprofil durch die resultierenden Punktwolken des ML-Ansatzes.

schränkung der Gewässerbodenkandidaten, was die Zuverlässigkeit der verarbeiteten Ergebnisse erhöhen kann. Der ML-Ansatz wurde im Rahmen der Pilotstudie nur für das sigFWFS implementiert. Die Integration in das volFWFS und die Validierung des ML-Ansatzes auf anderen ALB-Messdaten mit Trübungsschicht stehen noch aus.

7 Fazit der Dissertation

Dieses Kapitel fasst zuerst die in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren und dessen Ergebnisse zusammen (Kap. 7.1). Als nächstes erfolgt die Einordnung dieser Arbeit in den aktuellen Stand der Wissenschaft, indem kurz die relevanten Arbeiten für die jeweiligen Aspekte genannt werden (Kap. 7.2). Im letzten Abschnitt wird das Potential der Airborne LiDAR Bathymetrie für die Gewässerbodenerfassung im Allgemeinem und anschließend der Mehrwert dieser Arbeit für die Airborne LiDAR Bathymetrie gezeigt (Kap. 7.3).

7.1 Zusammenfassung

Die Airborne Lidar Bathymetrie (ALB) ist ein effizientes Messverfahren zur schnellen und flächendeckenden Erfassung der Gewässersohlentopographie von Flachwassergebieten (küstennahe Bereiche von maritimen Gewässern, Flüsse, Seen). Der dazu verwendete grüne Laserpuls wird allerdings in der Wassersäule, insbesondere durch die Gewässertrübung, abgeschwächt. Dies bewirkt auch eine starke Abschwächung der Amplitude der Gewässerbodenechos in den Full-Waveform-Daten, wodurch dieses möglicherweise nicht mehr vom Rauschsignal des Sensors unterschieden werden kann und somit nicht mehr detektierbar ist. Dies hat zur Folge, dass ALB-Standardauswerteverfahren in der auswertbaren Gewässertiefe stark eingeschränkt sind und die Gewässerbodentopographie nur unvollständig erfasst werden kann.
Diese Arbeit zeigt, dass durch geeignete Prozessierungsverfahren ein deutlicher Zugewinn an Information zur Gewässerbodentopographie erzielbar ist und Teile der Datenlücke geschlossen werden können. Es werden zwei Verarbeitungsmethoden präsentiert, die von der isolierten Auswertung der Full-Waveforms abrücken und zu einer gemeinsamen Auswertung von lateral dicht beieinanderliegenden Messdaten übergehen; das signalbasierte Full-Waveform Stacking und das volumetrische Full-Waveform Stacking. Die Akkumulation bzw. Zusammenfassung mehrerer Full-Waveforms zu einer repräsentativen Pseudo-Full-Waveform verfolgt das Ziel, dass Signal/Rausch-Verhältnis zu verbessern und das Gewässerbodenecho zu verstärken. Die zusätzlich gewonnenen Informationen zur Gewässertiefe führen zu einer zuverlässigeren Detektion von schwachen Gewässerbodenechos und infolgedessen zu einer Erhöhung der auswertbaren Gewässertiefe, welche sich wiederum vorteilhaft auf die Gewässerbodenabdeckung durch Gewässerbodenpunkte auswirkt. Die Verfahren basieren auf der Annahme, dass eine Vielzahl von Messdaten mit einer geringen lateralen Distanz zueinander ähnliche Gewässertiefen und folglich ähnliche Full-Waveform Verläufe aufweisen. Aus der Annahme resultieren gleichzeitig die Bedingungen für eine erfolgreiche Prozessierung: stetige Gewässerböden mit geringer bis moderater Geländeneigung und eine hohe Messdatenauflösung. Im Kern der Arbeit wird durch drei wissenschaftliche Veröffentlichungen die Entwicklung und Funktionsweise der Full-Waveform Stacking Ansätze detailliert vorgestellt. Darüber hinaus zeigen die Beiträge alle weiteren wichtigen Verarbeitungsschritte rund um die Full-Waveform Stacking-Prozessierung. Im Detail gehören dazu die Einteilung der Full-Waveforms in Rasterzellen und lokale Voxelraumdarstellungen, Full-Waveform Analysemethoden und Filterverfahren für eine hohe Zuverlässigkeit der erzielten Full-Waveform Stacking Ergebnisse. Die aus dem Full-Waveform Stacking abgeleiteten Gewässertiefen werden abschließend für die

Detektion der Gewässerbodenechos in den einzelnen Full-Waveforms und die Extraktion der Gewässerbodenpunkte genutzt. Auf diese Weise wird die hohe Punktdichte und die Punktverteilung der ALB-Messdaten erhalten sowie tiefpassähnliche Glättungseffekte weitestgehend vermieden.
Die Validierung der Verfahren erfolgte anhand von ALB-Messdaten der Elbe und eines küstennahen Bereichs der Nordsee. Als Vergleichsdaten kamen Echolotmessungen zur Anwendung. Eine Analyse der neuprozessierten Gewässerbodenpunkte mit einer dafür entwickelten Evaluationsstrategie belegt die hohe Qualität der Full-Waveform Stacking Ergebnisse. Im Detail konnte die auswertbare Gewässertiefe für die Elbe um 30 % (von 1,65 m auf 2,15 m) und für die Nordsee um 25 % (von 2,69 m auf 3,36 m) erhöht werden, was einen Flächenzuwachs durch die neuprozessierten Punkte für die Elbe von über 100 % und für die Nordsee von bis zu 14 % nach sich zog (Werte beziehen sich auf die Fläche der OWP-Daten). Zusätzlich konnten gerade für das Studiengebiet in der Nordsee punktarme Bereiche verdichtet werden. Die sehr gute Repräsentation des Gewässerbodens durch die Ergebnisse wurde visuell durch Profile und quantitativ durch gute Genauigkeitswerte (RMS von 10 cm - 15 cm; $\sigma_{MAD(median)}$ von 9 cm - 11 cm) sowie hohe Zuverlässigkeitswerte (97 % - 98 % der Punkte mit $|\Delta h| \leq 25$ cm) nachgewiesen.
Die Evaluation des Gewässerbodenmodells basierend auf der Prozessierung des volumetrischen Full-Waveform Stackings ergab einen RMS von 7,3 cm bzw. ein $\sigma_{MAD(median)}$ von 5,1 cm bei einer sehr hohen Inlier Rate von 99 % an Punkten mit $|\Delta h| \leq 25$ cm, sodass das Gewässerbodenmodell in diesem Fall sogar eine noch bessere Repräsentation des Gewässerbodens darstellt.
Im letzten Beitrag dieser Dissertation wurde die Eignung von gemessenen Full-Waveforms, stacked Full-Waveforms und Ortho-Full-Waveforms für die Ableitung von Gewässertrübungsparametern untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die stacked Full-Waveform und die Ortho-Full-Waveform u.a. aufgrund ihres guten Signal-Rausch Verhaltens sehr gut für die Gewässertrübungsparameterbestimmung geeignet sind. Die Anwendung der Ortho-Full-Waveforms hat dabei zusätzlich den Vorteil, dass die Trübungsparameter die Trübung entlang einer vertikal verlaufenden Voxel- bzw. Wassersäule repräsentieren, ähnlich wie bei klassischen Trübungsmessverfahren.
Die abschließende Diskussion verdeutlicht, dass das signalbasierte Full-Waveform Stacking deutlich geringere Prozessierungszeiten beansprucht, aber methodenbedingt nur für geringere Gewässertiefen zuverlässig nutzbar ist. Das volumetrische Full-Waveform Stacking eignet sich durch die geometrische Berücksichtigung der Laserpulsausbreitung in der Wassersäule auch für größere Gewässertiefen, was durch die Prozessierung weiterer Gebiete noch validiert werden muss.
Die Arbeit zeigt, dass die beiden entwickelten Full-Waveform Stacking-Verfahren prinzipiell für die Prozessierung von Binnengewässern und küstennahen maritimen Flachwasserbereichen sehr gut geeignet sind. Jedoch konnten für diese Arbeit nur zwei Gebiete prozessiert und tiefgründig ausgewertet werden, sodass weitere Prozessierungen und Untersuchungen von ALB-Daten anderer Gebiete und Sensoren für die Bestätigung des nachgewiesenen Potentials der Full-Waveform Stacking-Verfahren nötig sind.

7.2 Einordnung der Dissertation

Die Analyse von Full-Waveform-Daten verfolgt das Ziel, zusätzliche Informationen aus diesem Messsignal zu gewinnen. Wie in Kapitel 2.2.2 gezeigt wurde, gibt es einige Einflussfaktoren auf den Laserpuls die sich in der Full-Waveform wiederfinden. Die Interaktion mit der Wasseroberfläche, der Wassersäule und des Gewässerbodens sind solche Informationen die durch Peak- bzw. Echodetektoren nutzbar gemacht werden. Dabei haben sich die Analyse-Methoden stetig weiterentwickelt von konventionellen Schwellwertoperatoren und Amplitudenmaximumoperatoren hin zu Dekonvolution und Dekomposition-Verfahren. Ein weiteres Verfahren zur Charakterisierung der Full-Waveform Maxima (Peaks) basiert auf der Methode zur Bestimmung signifikanter Berg-

gipfel (Kirmse und de Ferranti, 2017) und wurde durch Schwarz et al. (2019) auf Full-Waveforms adaptiert, mit dem Ziel, Näherungswerte zur Position des Wasseroberflächen- und des Gewässerbodenechos zu extrahieren. In der vorliegenden Arbeit wurde dieser Ansatz aufgegriffen und konnte ebenfalls dafür erfolgreich eingesetzt werden. Darüber hinaus konnte die Eignung dieser Parameter für weitere Analyseverfahren, wie die Filterung, gezeigt werden.

Diese Parameter sind auch sehr gut für die Analyse der stacked Full-Waveform oder Ortho-Full-Waveform geeignet. Beide Full-Waveform Typen sind das Ergebnis der Zusammenfassung von gemessenen Full-Waveforms, was in dieser Arbeit im Allgemeinen Full-Waveform Stacking bezeichnet wird. Full-Waveform Stacking-Verfahren werden in der Literatur auf verschiedene Sachverhalte angewendet und zielen auf die Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses ab, um schwache Echos detektierbar zu machen. Beispiele dafür sind die Arbeiten von Plenkers et al. (2013) zur Detektion von Mikroseismiken, Stilla et al. (2007); Yao und Stilla (2010) zur Detektion von schwachen Oberflächenechos im Urbanen Raum und Roncat und Mandlburger (2016) für eine verbesserte Bestimmung der Grenzschicht der Wasseroberfläche. Die Eigenschaft, schwache Objektechos nutzbar zu machen, wurde in dieser Arbeit für die Detektion von Gewässerboden angewendet. Die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigen die mehrfach veröffentlichten Vorteile von Full-Waveform Stacking-Verfahren und belegen darüber hinaus die Anwendbarkeit für die Detektion von schwachen Gewässerbodenechos in Full-Waveforms.

In Richter et al. (2017) wurden ein Verfahren zur direkten Ableitung von Gewässertrübungsparametern aus Full-Waveform-Daten entwickelt. Dieser Ansatz wurde in der vorliegenden Arbeit wieder aufgegriffen und auf die stacked Full-Waveform und die Ortho-Full-Waveform angewendet. Die Ergebnisse sehen aufgrund des verbesserten Signal/Rausch-Verhältnisses weniger verrauscht und vielversprechend aus, allerdings konnten diese nicht mit Referenzmessungen validiert werden.

In Mandlburger et al. (2013) wurden die Durchdringungseigenschaften des grünen Lasers bzgl. der Wasseroberfläche untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die Wasseroberfläche aus grünen Laserbathymetriedaten tiefer als die reale Wasseroberfläche liegt, also unterschätzt wird. Im Zuge der vorliegenden Arbeit erfolgte die Prozessierung und Untersuchung eines küstennahen Gebiets der Nordsee, welches sowohl mit einem grünen als auch nahinfraroten Laserscanner beflogen wurde. Ein Punktwolkenvergleich beider resultierender Punktwolken zeigte eine Unterschätzung der „grünen“ Wasseroberflächenpunktwolke und bestätigt die Erkenntnisse aus Mandlburger et al. (2013).

7.3 Mehrwert der Dissertation

Die Airborne LiDAR Bathymetrie ist prinzipbedingt in der Eindringtiefe in Wasser limitiert und dadurch auf die Erfassung von Flachwasserbereichen beschränkt. In diesen Bereichen hat die Messmethode jedoch ein sehr hohes Potential, da die Gewässerbodentopographien schnell, großflächig und mit einer hohen Punktdichte erfasst werden können. Damit ist die Airborne LiDAR Bathymetrie trotz ihrer Einschränkung ein wichtiges und effizientes Werkzeug für großflächige Monitoringaufgaben. Die Erfassung von Flachwasserbereichen durch Laserscanning-Verfahren spielt insofern auch eine wichtige Rolle, da die Erfassung durch hydroakustische Messverfahren (vor allem Fächerecholot-Systeme) mit abnehmender Gewässertiefe ineffizienter wird. Ein weiteres Problem ist der zum Teil aufwändige bzw. schwierige Zugang zu diesen Bereichen, die für Messboote die Gefahr bergen, ungewollt festzulaufen, oder gar unzugänglich sind.

Diese Arbeit trägt wesentlich dazu bei, das Potential von Full-Waveform-Daten durch neu entwickelte Verfahren besser zugänglich zu machen. Erst durch die Full-Waveform Stacking basierten Prozessierungen wird die zuverlässige Extraktion von schwachen Gewässerbodenechos in größeren Gewässertiefen möglich, wodurch aus den Full-Waveform-Daten weitere Informationen bezüg-

lich der Gewässerbodentopographie extrahiert werden können. Dies bedeutet eine Verbesserung der Effizienz und damit eine Aufwertung der Airborne LiDAR Bathymetrie für z.B. Umweltmonitoring, ohne das ein Mehraufwand für die eigentliche Befliegung entsteht oder besondere Konfigurationen bzw. Weiterentwicklungen der Sensoren selber notwendig sind. Diese Tatsache ermöglicht zudem auch die Neu-Prozessierung von älteren Datensätzen, sofern diese die nötigen Full-Waveform-Daten bereitstellen. Abschließend kann diese Arbeit auch eine Motivation für die Entwicklung weiterer Methoden und Verfahren zur Extraktion zusätzlicher Gewässerinformationen aus Airborne LiDAR Bathymetrie Daten sein.

Literaturverzeichnis

H. Abdallah, N. Baghdadi, J.-S. Bailly, Y. Pastol, und F. Fabre. Wa-LiD: A new LiDAR Simulator for Waters. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(4):744–748, 2012.

S. Agarwal, K. Mierle, und The Ceres Solver Team. Ceres Solver, 3 2022.

T. Allouis, J.-S. Bailly, Y. Pastol, und C. Le Roux. Comparison of LiDAR waveform processing methods for very shallow water bathymetry using Raman, near-infrared and green signals. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 35(6):640–650, 2010.

P. Anderer, U. Dumont, E. Massmann, und R. Keuneke. Wasserkraftnutzung in Deutschland: Wasserrechtliche Aspekte, ökologisches Modernisierungspotential und Fördermöglichkeiten. Technical report, Umweltbundesamt, Deutschland, 2011.

M. Azadbakht, C. S. Fraser, C. Zhang, und J. Leach. Sparsity based regularization approaches in reconstructing the range and cross section in full-waveform LiDAR. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2:37–42, 2013.

M. Bäumker und F. J. Heimes. New calibration and computing method for direct georeferencing of image and scanner data using the position and angular data of an hybrid inertial navigation system. In *OEEPE Workshop, Integrated Sensor Orientation*, Seite 1–17, 2001.

G. Benito und P. F. Hudson. Flood hazards: the context of fluvial geomorphology. *Geomorphological hazards and disaster prevention*, Seite 111–128, 2010.

J.-A. Beraldin, F. Blais, und U. Lohr. Laser Scanning Technology. In G. Vosselman und H.-G. Maas, Editors, *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*, Seite 1–42. Whittles Publishing, 2010.

B. Billard, R. H. Abbot, und M. F. Penny. Airborne estimation of sea turbidity parameters from the WRELADS laser airborne depth sounder. *Applied optics*, 25(13):2080–2088, 1986.

R. Charlton. *Fundamentals of fluvial geomorphology.* Routledge, 2007.

L. Christiansen. New techniques in capturing and modelling of morphological data. *Hydrographische Nachrichten*, HN 105:20–23, 2016.

J. H. Churnside. Review of profiling oceanographic lidar. *Optical Engineering*, 53(5):051405, 2013.

G. Chust, I. Grande, M.and Galparsoro, A. Uriarte, und Á. Borja. Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: A case study within a Basque estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89(3):200–213, 2010.

A. Collin, P. Archambault, und B. Long. Mapping the shallow water seabed habitat with the SHOALS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(10):2947–2955, 2008.

N. David, C. Mallet, und F. Bretar. Library concept and design for lidar data processing. In *Proceedings of the GEOgraphic Object Based Image Analysis (GEOBIA) Conference, Calgary, AB, Canada*, Volume 58, 2008.

C. D. de Jong, I. A. Elema, G. Lachapelle, und S. Skone. *Hydrography.* DUP Blue Print, 2002.

J. J. Degnan. Scanning, multibeam, single photon lidars for rapid, large scale, high resolution, topographic and bathymetric mapping. *Remote Sensing*, 8(11):958, 2016.

T. Dehling und W. Ellmer. Zwanzig Jahre Seevermessung seit der Wiedervereinigung. *AVN*, 119(7), 2012.

M. J. Devlin, J. Barry, D. K. Mills, R. J. Gowen, J. Foden, D. Sivyer, und P. Tett. Relationships between suspended particulate material, light attenuation and Secchi depth in UK marine waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79(3):429–439, 2008.

Deutsche Hydrographische Gesellschaft DHyG. Was ist Hydrographie?, May 2022. URL `https://dhyg.de/index.php/13-hydrographie/43-hydrographie`.

EuropeanUnion. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Technical report, The European Parliament and the Council, 2000.

FeiReu GbR. www.wassertemperatur.org, July 2022. URL `http://www.wassertemperatur.org/`.

B. W. Flemming, P. N. Denbigh, und M. Klein. *Recent developments in side scan sonar techniques.* WGA Russell-Cargill, Central Acoustics Laboratory, University of Cape Town, 1982.

X. Geng und A. Zielinski. Precise multibeam acoustic bathymetry. *Marine Geodesy*, 22(3): 157–167, 1999.

C. J. Gippel. Potential of turbidity monitoring for measuring the transport of suspended solids in streams. *Hydrological processes*, 9(1):83–97, 1995.

A. S. Glassner. *An introduction to ray tracing.* Academic Press, London, 1989.

H. R. Gordon. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering. *Applied optics*, 21(16):2996–3001, 1982.

G. C. Guenther. Airborne laser hydrography: system design and performance factors. Technical report, National Oceanic and Atmospheric Administration Rockville MD, 1985.

G. C. Guenther und L. R. Goodman. Laser applications for near-shore nautical charting. In *Ocean Optics V*, Volume 160, Seite 174–184. International Society for Optics and Photonics, 1978.

G. C. Guenther und R. Thomas. System design and performance factors for airborne laser hydrography. In *Proceedings OCEANS'83*, Seite 425–430. IEEE, 1983.

G. C. Guenther, A. G. Cunningham, P. E. LaRocque, und D. J. Reid. Meeting the accuracy challenge in airborne bathymetry. Technical report, National Oceanic Atmospheric Administration/NESDIS Silver Spring, MD, 2000.

F. R. Hampel. The influence curve and its role in robust estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 69(346):383–393, 1974.

B. Höfle und M. Hollaus. Roughness Parameterization Using Full-Waveform Airborne LiDAR Data. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, Seite 2528, 2010.

J. Höhle. *Zur Theorie und Praxis der Unterwasser-Photogrammetrie.* Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1971.

F. Hosoi, Y. Nakai, und K. Omasa. Voxel tree modeling for estimating leaf area density and woody material volume using 3-D LIDAR data. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 5:115–120, 2013.

International Hydrographic Organization IHO. Definition and Importance of Hydrography, November 2019. URL `https://legacy.iho.int/srv1/index.php?option=com_content&view=\article&id=299&Itemid=289&lang=en`.

International Hydrographic Burau. *Manual on Hydrography, Publication C-13.* International Hydrographic Organization, 2011.

International Hydrographic Organization. *IHO Standards for Hydrographic Surveys, 6th Edition, IHO Publication No. 44.* International Hydrographic Organization, 2020.

B. Joe. GEOMPACK—a software package for the generation of meshes using geometric algorithms. *Advances in Engineering Software and Workstations*, 13(5-6):325–331, 1991.

B. Jutzi und U. Stilla. Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener Filter. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61(2):95–107, 2006.

A. Kirmse und J. de Ferranti. Calculating the prominence and isolation of every mountain in the world. *Progress in Physical Geography*, 41(6):788–802, 2017.

Kongsberg. EA MCU Flächenecholot - Ein hochgenaues Echolotsystem für die Flachwasservermessung und Hindernisse, September 2009. URL `https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/\ea-mcu---flachenecholot`.

Kongsberg. Multibeam Echo Sounders, June 2022. URL `https://www.kongsberg.com/maritime/products/ocean-science/mapping-systems/\multibeam-echo-sounders/`.

K. Kraus. *Photogrammetrie: Topographische Informationssysteme*, Volume 3. Walter de Gruyter, 2000.

E. Kühne. New Opportunities for Capturing the Topography of the River Elbe by Airborne Hydromapping in a Low Discharge Period 2018. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 89(2):177–182, 2021.

Leica. Leica Chiroptera II - The most cost-effective nearshore LiDAR sensor, 2015. URL `https://leica-geosystems.com/-/media/files/leicageosystems/products/datasheets/\leica_chiroptera_ii_ds.ashx?la=pt-br&hash=D0D5B243ED5A82C0C5FC00A55386DF7E`.

D. Lichti und J. Skaloud. Registration and Calibration. In G. Vosselman und H.-G. Maas, Editors, *Airborne and Terrestrial Laser Scanning.* Whittles Publishing, 2010.

R. Litman, S. Korman, A. Bronstein, und S. Avidan. Inverting RANSAC: Global Model Detection via Inlier Rate Estimation. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, June 2015.

X. Lurton. *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications.* Springer Science & Business Media, 2002.

H.-G. Maas. Forestry Applications. In G. Vosselman und H.-G. Maas, Editors, *Airborne and Terrestrial Laser Scanning.* Whittles Publishing, 2010.

D. Mader, K. Richter, P. Westfeld, R. Weiß, und H.-G. Maas. Detection and extraction of water bottom topography from laserbathymetry data by using full-waveform-stacking techniques. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13:1053–1059, 2019.

D. Mader, K. Richter, P. Westfeld, und H.-G. Maas. Potential of a Non-linear Full-Waveform Stacking Technique in Airborne LiDAR Bathymetry. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 89(2):139–158, 2021.

D. Mader, K. Richter, P. Westfeld, und H.-G. Maas. Volumetrisches Full-Waveform Stacking zur Ableitung der Gewässerbodentopographie aus Laserbathymetriedaten – Erste Ergebnisse einer Pilotstudie am Fluss Elbe. In *Tagungsband Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF*, Volume 30, Seite 127–139, 2022a.

D. Mader, P. Westfeld, K. Richter, und H.-G. Maas. Laserbathymetrie in küstennahen Bereichen der Nordsee: Entwicklung erweiterter Auswerteverfahren und deren Qualitätssicherung. In *DVW e.V. (Hrsg.): Hydrographie – Messen mit allen Sinnen*, Volume 102, Seite 117–126. DVW-Schriftenreihe, 2022b.

D. Mader, K. Richter, P. Westfeld, und H.-G. Maas. Volumetric Nonlinear Ortho Full-Waveform Stacking in Airborne LiDAR Bathymetry for Reliable Water Bottom Point Detection in Shallow Waters. In Review, 2023.

C. Mallet und F. Bretar. Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1):1–16, 2009.

C. Mallet, U. Soergel, und F. Bretar. Analysis of full-waveform lidar data for classification of urban areas. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, XXXVII-B3a:85–91, 2008.

G. Mandlburger. A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters. *Hydrographische Nachrichten - Journal of Applied Hydrography*, HN 116:6–15, June 2020. ISSN 1866-9204.

G. Mandlburger, M. Pfennigbauer, und N. Pfeifer. Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry - A case study at the River Pielach. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5:W2, 2013.

G. Mandlburger, N. Pfeifer, und U. Soergel. Water surface reconstruction in airborne laser bathymetry from redundant bed observation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W4:123–130, 2017.

G. Mandlburger, H. Lehner, und N. Pfeifer. A comparison of single photon and full waveform lidar. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4:397–404, 2019.

G. Mandlburger, M. Pfennigbauer, R. Schwarz, S. Flöry, und L. Nussbaumer. Concept and Performance Evaluation of a Novel UAV-Borne Topo-Bathymetric LiDAR Sensor. *Remote Sensing*, 12(6):986, 2020.

G. Mandlburger, D. Monetti, M. Hollaus, M. Wimmer, J. Otepka-Schremmer, und N. Pfeifer. A case study for detection and modelling of submerged deadwood from UAV-borne topo-bathymetric LiDAR point clouds. In *Proceedings of the SilviLaser Conference 2021*, Seite 195–197, 2021.

K. Muirhead und A. P. Cracknell. Airborne lidar bathymetry. *International Journal of Remote Sensing*, 7(5):597–614, 1986.

NASA-ICESat2. Technical Specs – Key ICESat-2/ATLAS Performance Specifications, February 2022. URL `https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/science/specs`.

J.-G. Nistad und P. Westfeld. Improved Techniques to Resolve the Water Column Sound Speed Structure for Multibeam Ray-Tracing. *International Hydrographic Review*, (27):35–54, 2022.

Z. Pan, C. L. Glennie, J. C. Fernandez-Diaz, C. J. Legleiter, und B. Overstreet. 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, 2016.

C. E. Parrish, L. A. Magruder, A. L. Neuenschwander, N. Forfinski-Sarkozi, M. Alonzo, und M. Jasinski. Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance. *Remote Sensing*, 11(14):1634, 2019.

G. Petrie und C. K. Toth. Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning. In *Topographic laser ranging and scanning*, Seite 1–28. CRC Press, 2018a.

G. Petrie und C. K. Toth. Airborne and spaceborne laser profilers and scanners. In *Topographic laser ranging and scanning*, Seite 89–157. CRC Press, 2018b.

N. Pfeifer, G. Mandlburger, und P. Glira. Laserscanning. In Christian Heipke, Editor, *Photogrammetrie und Fernerkundung – Handbuch der Geodäsie*, Seite 431–481. Springer Spektrum, 2017.

M. Pfennigbauer und A. Ullrich. Improving quality of laser scanning data acquisition through calibrated amplitude and pulse deviation measurement. In *Laser Radar Technology and Applications XV*, Volume 7684, Seite 463–472. SPIE, 2010.

M. Pfennigbauer, P. Rieger, N. Studnicka, und A. Ullrich. Detection of concealed objects with a mobile laser scanning system. In *Laser Radar Technology and Applications XIV*, Volume 7323, Seite 51–59. SPIE, 2009.

D. M. Philips, R. H. Abbot, und M. F. Penny. Remote sensing of sea water turbidity with an airborne laser system. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 17(8):1749, 1984.

W. Philpot. Airborne Laser Hydrography II, 2019.

K. Plenkers, J. R. Ritter, und M. Schindler. 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, 2013.

N. D. Quadros. Unlocking the characteristics of bathymetric lidar sensors. *LiDAR Magazine*, 3 (6):62–67, 2013.

J. F. Reintjes und G. T. Coate. *Principles of Radar*. McGraw-Hill New York, Third Edition, 1952.

J. Reitberger, Cl. Schnörr, P. Krzystek, und U. Stilla. 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(6): 561–574, 2009.

K. Richter. *Analyse von Full-Waveform Flugzeuglaserscannerdaten zur volumetrischen Repräsentation in Umweltanwendungen*. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2018.

K. Richter und H.-G. Maas. Radiometric enhancement of full-waveform airborne laser scanner data for volumetric representation in environmental applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 183:510–524, 2022.

K. Richter, H.-G. Maas, P. Westfeld, und R. Weiß. An approach to determining turbidity and correcting for signal attenuation in airborne lidar bathymetry. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85(1):31–40, 2017.

K. Richter, D. Mader, P. Westfeld, und H.-G. Maas. Numerical simulation and experimental validation of wave pattern induced coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42 (2), 2018.

K. Richter, D. Mader, P. Westfeld, und H.-G. Maas. Refined Geometric Modeling of Laser Pulse Propagation in Airborne LiDAR Bathymetry. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 89(2):121–137, 2021a.

K. Richter, D. Mader, P. Westfeld, und H.-G. Maas. 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, 2021b.

K. Richter, D. Mader, P. Westfeld, und H.-G. Maas. Determination of 3D water turbidity parameter fields from LiDAR bathymetry data by volumetric data analysis. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43:945–951, 2022.

RIEGL. Waveform Extraction Library. Technical report, RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2017.

RIEGL. Datasheet RIEGL VQ-880-G, 2018. URL `http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-880-G_Datasheet_2018-09-28.pdf`.

RIEGL. Airborne Data Processing Software Addon RiHYDRO for commercial hydrographic and bathymetric surveying, 2020. URL `http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/DataSheet_RiHYDRO_2020-07-27.pdf`.

RIEGL. Datasheet RIEGL VG-840-G, September 2021. URL `http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-840-G_Datasheet_2023-01-19.pdf`.

RIEGL. Datasheet RIEGL VQ-880-GII, 2022. URL `http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-880-GII_Datasheet_2022-04-04.pdf`.

A. Roncat und G. Mandlburger. Enhanced detection of water and ground surface in airborne laser bathymetry data using waveform stacking. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, Volume 18, Seite 17016, 2016.

A. Roncat, G. Bergauer, und N. Pfeifer. B-spline deconvolution for differential target cross-section determination in full-waveform laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(4):418–428, 2011.

F. R. Ruckdeschel. *Basic Scientific Subroutines, Volume II.* ERIC, 1981.

L. Sachs. *Applied Statistics: A Handbook of Techniques.* Springer-Verlag, 1982.

H. Sardemann, A. Eltner, und H.-G. Maas. Acquision of geomatrical data of small rivers with an unmanned water vehicle. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42:2, 2018.

R. Schwarz, N. Pfeifer, M. Pfennigbauer, und A. Ullrich. Exponential decomposition with implicit deconvolution of lidar backscatter from the water column. *PFG–Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 85(3):159–167, 2017.

R. Schwarz, G. Mandlburger, M. Pfennigbauer, und N. Pfeifer. Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 150:1–10, 2019.

R. Schwarz, N. Pfeifer, M. Pfennigbauer, und G. Mandlburger. Depth measurement bias in pulsed airborne laser hydrography induced by chromatic dispersion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 18(8):1332–1336, 2020.

P. A. Secchi. Relazione delle esperienze fatte a bordo della pontificia pirocorvetta Imacolata Concezione per determinare la trasparenza del mare. *Il Nuovo Cimento*, 20(1):205–238, 1864.

U. Stilla, W. Yao, und B. Jutzi. Detection of weak laser pulses by full waveform stacking. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(Part 3):W49A, 2007.

J. Sullivan, M. Twardowski, P. Donaghay, J. Rines, M. McFarland, S. Talapatra, J. Katz, J. Churnside, und A. Weidemann. Biological thin layers: history, ecological significance and consequences to oceanographic sensing systems. In Weilin Will Hou und Robert Arnone, Editors, *Ocean Sensing and Monitoring IV*, Volume 8372, Seite 238 – 246. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2012.

A. Ullrich und M. Pfennigbauer. Echo digitization and waveform analysis in airborne and terrestrial laser scanning. In *Photogrammetric Week*, Volume 11, Seite 217–228, 2011.

A. Ullrich und M. Pfennigbauer. Linear LIDAR versus Geiger-mode LIDAR: impact on data properties and data quality. In *Laser Radar Technology and Applications XXI*, Volume 9832, Seite 29–45. SPIE, 2016.

G. Vosselman und H.-G. Maas. *Airborne and terrestrial laser scanning.* Whittles Publishing, 2010.

W. Wagner, A. Ullrich, T. Melzer, C. Briese, und K. Kraus. From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 35:201–206, 2004.

W. Wagner, A. Ullrich, V. Ducic, T. Melzer, und N. Studnicka. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(2):100–112, 2006.

R. E. Walker und J. W. McLean. Lidar equations for turbid media with pulse stretching. *Applied Optics*, 38(12):2384–2397, 1999.

C. Wang, Q. Li, Y. Liu, G. Wu, P. Liu, und X. Ding. A comparison of waveform processing algorithms for single-wavelength LiDAR bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101:22–35, 2015.

Y. Wang, H. Weinacker, und B. Koch. Development of a procedure for vertical structure analysis and 3D-single tree extraction within forests based on LiDAR point cloud. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(Part 3): W52, 2007.

A. Wehr und U. Lohr. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3):68–82, 1999.

R. Weiß und H. Wirth. BfG-1861 Erprobung der Laserbathymetrie im Binnenbereich. Technical report, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2015.

P. Westfeld, H.-G. Maas, K. Richter, und R. Weiß. Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 128:314–325, 2017.

W. Yao und U. Stilla. Mutual enhancement of weak laser pulses for point cloud enrichment based on full-waveform analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48 (9):3571–3579, 2010.

J. Zhu, Z. Zhang, X. Hu, und Z. Li. Analysis and application of LiDAR waveform data using a progressive waveform decomposition method. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-5/W12:31–36, 2011.

Abbildungsverzeichnis

1.1 Messdaten des Gewässerbodens im Bereich der Fahrrinne, aufgenommen mittels schiffsgestützter hydroakustischer Messverfahren (bereitgestellt von der Bundesanstalt für Gewässerkunde, BfG). 11
1.2 Messdaten des Gewässerbodens im Bereich zwischen Fahrrinne und Ufer, aufgenommen mittels Laserbathymetrie Messverfahren (bereitgestellt von der BfG). . . 12

2.1 Messverfahren für bathymetrische Messungen (Abbildung in Anlehnung an Guenther et al. (2000)). Hydroakustische Messverfahren können jede Gewässertiefe erreichen, sind aber in der Effizienz der Flächenabdeckung von der Gewässertiefe abhängig. Mit der Airborne LiDAR Bathymetrie kann innerhalb kurzer Zeit sehr viel Fläche gescannt werden, dieses Verfahren ist jedoch limitiert bzgl. der Eindringtiefe in den Wasserkörper (rote gestrichelte Linie in **b**. Die rote Linie in **a** und die grüne Linie in **b** symbolisieren die erfassten Teile des Gewässerbodens. 16
2.2 ALS-Messprinzip. 18
2.3 Relevanten Koordinatensysteme vom ALB-Sensor bis zum globalem Koordinatensystem. 19
2.4 Strahldivergenz: **a** Parameter der Strahldivergenz. Problematische Topographien, die im Zusammenhang mit der Strahldivergenz zu fehlerhaften Punktkoordinaten führen können: **b** Geländediskontinuitäten (Klippen, Abbrüche), **c** größere Objekte und **d** Geländeneigungen. 20
2.5 ALS-Scanmuster (adaptiert aus Beraldin et al. (2010)). 21
2.6 Ausbreitung des Laserpulses in Wasser (Abbildung in Anlehnung an Guenther et al. (2000)). Gewässertrübung wird durch gelbe Punkte (Gelbstoffe) und grüne Punkte (Phytoplankton) repräsentiert. Schwarzen Pfeile symbolisieren die Rückstreuung an der Gewässeroberfläche, an den Partikeln in der Wassersäule und am Gewässerboden. 24
2.7 Aufbau einer Full-Waveform **a** mit zwei Objektechos. **b** zeigt schematisch eine bathymetrische Full-Waveform mit den drei Signalkomponenten nach Guenther et al. (2000). Beispielhafte Full-Waveform eines **c** RIEGL VQ-880 ALB-Systems und eines **d** AHAB Chiroptera ALB-Systems. WO = Wasseroberflächenecho; WS = Echo der Wassersäule; GB = Gewässerbodenecho. 28
2.8 Systemwaveform **a** des RIEGL VQ-880 (exemplarisch; bereitgestellt durch AHM GmbH) und **b** des AHAB Chiroptera. 29
2.9 Aufbau des Surface-Volume-Bottom Modells (Abbildung aus Schwarz et al. (2019); leicht abgeändert). σ_m ist der modellierte dBCS; τ_i sind die Zeitintervallgrenzen der dBCS Segmente; und E_i die Amplitudenwerte des σ_m. 30
2.10 Messprinzip der hydroakustischen Messung für vertikale und schräge Echolotung. 31
2.11 Verschiedene Anordnungen von Echolot Sensoren. 32

4.1 Messgebiet in der Nordsee zwischen den Nordseeinseln Sylt und Amrum aufgenommen am 12.08.2021 mit 12 überlappenden Scanstreifen und zwei Querstreifen. 90

4.2 Visualisierung der **a** OWP-Punkte und der **b** Echolotmessungen farbkodiert bzgl. der Höhenkoordinate (DHHN2016). 90

4.3 Untersuchungsgebiet farbkodiert bzgl. der Höhenkoordinate (DHHN2016). 102

4.4 Klassifikation der Wasseroberfläche. Seitenansicht der Punktwolke im **a** unklassifizierten und **b** klassifizierten Zustand. Blaue Punkte = Kandidaten für die Wasseroberfläche; Braune Punkte = Gewässerbodenpunkte der OWP; Rote Punkte = klassifizierte Wasseroberflächenpunkte. 103

4.5 Visualisierung der Prozessierungsergebnisse des signalbasiertem (**a, b**) und des volumetrischen Full-Waveform Stackings (**c, d**). **a** und **c** zeigen die Ergebnispunktwolke der Full-Waveform Stacking-Prozessierung farbkodiert bzgl. der Höhenkoordinate (DHHN2016). Der mittlere Wasserspiegel lag zum Zeitpunkt der Befliegung zwischen −1,38 m und −1,45 m (DHHN2016). **b** und **d** stellt den Flächenvergleich zwischen Abb. **a** bzw. **c** und den OWP-Daten (schwarze Punkte) dar. 103

4.6 Profil durch das Untersuchungsgebiet. Blauen Punkte = Wasseroberfläche; schwarze Punkte = Echolotmessungen; rote Punkte = sigFWFS Punkte; grüne Punkte = volFWFS Punkte. Die Höhenkoordinate wurde 10fach überhöht. 104

4.7 Höhenabweichung der resultierenden Punktwolken der beiden Full-Waveform Stacking-Verfahren verglichen mit den Echolot Profilmessungen. Die Punktwolken sind farbkodiert bzgl. der Höhenabweichung. Punkte mit positiver Höhenabweichung werden zu tief und Punkte mit negativer Höhenabweichung zu hoch geschätzt. 105

4.8 Darstellung der **a**, **b** Genauigkeitswerte und der **c**, **d** Inlier Rates. Bei **a** und **b** beziehen sich die durchgezogenen Linien auf die linke und die gestrichelte Linie auf die rechte Achse. 106

4.9 Punktdichte der Ergebnispunktwolken. 107

4.10 Erweitertes Untersuchungsgebiet für die Ermittlung des absoluten Flächenzuwachses. Die Punktwolke ist farbkodiert bzgl. ihrer Höhenkoordinaten (DHHN2016). . 108

4.11 Mittlere Punktdichte in Abhängigkeit der Gewässertiefe. Die horizontal rote Linie stellt die Grenze von 5 Punkte/m^2 dar. Der Anteil der Punkte bezieht sich auf die Gesamtpunktzahl der jeweiligen Punktwolke. Die Anzahl der Punkte pro m^2 ist in schwarz und der Anteil der Punkte als gestrichelte graue Linie dargestellt. . . . 108

4.12 Darstellung der Punkte mit der größten Gewässertiefe. **a** zeigt die OWP-Punkte mit Gewässertiefen zwischen 2,64 m und 2,74 m; **b** zeigt die sigFWFS Punkte mit Gewässertiefen zwischen 3,26 m und 3,36 m; **c** zeigt die volFWFS Punkte mit Gewässertiefen zwischen 3,31 m und 3,41 m. Rote Punkte haben eine Punktdichte < 5 Punkte/m^2; Grüne Punkte haben eine Punktdichte ≥ 5 Punkte/m^2. 109

6.1 Energieverteilung der Laserspots **a** an der Wasseroberfläche und **b** am Gewässerboden (Westfeld et al., 2017). 122

6.2 Histogramm der Höhenabweichung zwischen der Wasseroberfläche der nahinfraroten Laserscannermessungen und **a** den OWP-Punkten (des grünen Laserscanners) bzw. **b** dem Wasseroberflächenmodell basierend auf den OWP-Punkten. Rote Kurve zeigt den Histogrammfit. 124

6.3 Schematische Darstellung der Vergrößerung der Prozessierungseinheitenfläche durch eine ungünstige Strahlkonstellation, in der drei Flugstreifen involviert sind. **a** zeigt die Befliegungsstreifen. Stellen, wo die ungünstigste Strahlkonfiguration vorkommen kann sind schwarz umrandet. **b** Die dargestellte Strahlkonfiguration basiert auf dem Palmer-Scanmuster und setzt sich wie folgt zusammen: grüne Punkte = seitlicher Teil des Scanmusters Streifen 1; rote Punkte = Vorwärtsblick Streifen 2; dunkelgraue Punkte = Rückwärtsblick Streifen 2; blaue Punkte = seitlicher Teil des Scanmusters Steifen 3. **c** Draufsicht auf Prozessierungszelle. Blaue Fläche = Fläche Prozessierungseinheit A_{PE}; Braune Fläche = Fläche am Gewässerboden A_{GB}; WD = Gewässertiefe. 126
6.4 Fläche der Prozessierungseinheit am Gewässerboden in Abhängigkeit der Gewässertiefe. 127
6.5 Trübungsschicht in der Wassersäule. **a** Profilansicht einer Punktwolke eines Gewässers mit einer Trübungsschicht. **b** Histogramm bezüglich der vorkommenden Höhenkoordinaten. 129
6.6 Prinzip der Layer-Extraktion des ML-Ansatzes. 130
6.7 Querprofil durch die resultierenden Punktwolken des ML-Ansatzes. 131

Abbildungen – Beitrag 1

Figure 1. Water bottom points displayed color-coded by their height coordinate of a part of the river Elbe based on (a) echo sounders and (b) ALB measurements. Source: German Federal Institute of Hydrology (BfG) and Waterways and Shipping Office Dresden(WSA) 35
Figure 2. Full-waveforms with (a) two clearly visible signals for the water surface echo and the bottom echo as well as (b) water surface echo and bottom echo with less intensity. 36
Figure 3. The study area (part of the river Elbe) including subregions for development and evaluation of the extended approach. (Map data ©2018 Google) 36
Figure 4. Data used for the analysis: (a) full-waveform data, (b) the points of water surface from the standard processing and (c) the trajectory. For the evaluation of the results of the extended approach (d) ALB bottom points from standard processing and (e) echo sounder data are used. 36
Figure 5. Workflow of extended processing of full-waveform data. 37
Figure 6. Mapping of measurement data to grid cells and their classification in land grid cells (brown) and water grid cells (blue). 37
Figure 7. Basic principle of full-waveform-stacking applied to ALB pulse echo waveforms. The green marked area corresponds to the reduced search corridor for water bottom echoes in the original full-waveforms (black), based on the analysis of the stacked full-waveform (red). 38
Figure 8. Iterative processing of the measuring area from shore to water center. Brown = land grid cells. Yellow = currently processed grid cell. Red = non processed grid cells. Green = processed grid cells. 38
Figure 9. Schematic illustration of water bottom point calculation. 38
Figure 10. Profile of the riverbed of the river Elbe. Black = Points from online-waveform-processing. Blue = water surface points. Red = points from echo sounder reference. Green = points from full-waveform-stacking method. . . 39

Figure 11. Evaluation of the results of Elbe 1 (a)-(c), Elbe 2 (d)-(f), Elbe 3 (g)-(i) and Elbe 4 (j)-(l). The left column shows the standard processed points with their water depth (color-coded) , the middle shows the new processed bottom points with their water depth (color-coded) and the right column shows the results of the comparison of both data related to the z-direction, where the dark-grey areas are incomparable new processed points (no comparative data available). Brown points are land points. 39
Figure 12. Recorded waveform (top), differential backscatter cross section (bottom blue) and attenuation-corrected differential backscatter cross section (bottom green) (Richter et al., 2017). 40

Abbildungen – Beitrag 2

Fig. 1 Airborne LiDAR bathymetry beam propagation 45
Fig. 2 Digitized ALB waveforms with **a** two clearly detectable echoes for water surface and water bottom. In **b**, water surface echo is clearly visible, but the weak water bottom echo is not reliably detectable 46
Fig. 3 The study area (part of the Elbe River) including subregions for development and evaluation of the extended approach. The results of the evaluation are shown for the red-coloured areas in this contribution. The grey-coloured areas were evaluated, but the results are similar to Elbe 3, 4 or 5 and are therefore not shown in this contribution. Blue areas present the acquired water bodies (Map data ©2020 Google) 47
Fig. 4 Workflow of extended processing of full-waveform data 48
Fig. 5 Schematic representation of the parameter of a full-waveform analysis 49
Fig. 6 Basic principle of full-waveform stacking applied to ALB pulse echo waveforms. The green marked area corresponds to the reduced search corridor for water bottom echoes in the original full-waveforms (black), based on the analysis of the stacked full-waveform (red) 50
Fig. 7 Iterative processing of a part of the study area. Brown = land grid cells. Yellow = currently checked water grid cells. Red = not yet checked water grid cells. Green = known or checked water grid cells. Step 0 shows the unchecked study area. Step 1 shows the water grid cells featuring reference or reliable starting water depth information. The following iterative steps show the processing progress 51
Fig. 8 **a** Smoothing effects in bottom point extraction can be avoided by applying the search range from the stacked full-waveform to the individual full-waveform. **b** Schematic illustration of water bottom point calculation 52
Fig. 9 Results of evaluation of optimal start depth for full-waveform stacking filtering: **a** isolation, **b** prominence, and **c** significance as a function of their water depth. The black points are the single values, and the red line presents the mean trend. The vertical stripe pattern in the shallow water depths (0.3–0.9 m) is caused by the sample time interval (= resolution in laser beam direction of approximately of 6.5 cm) in the full-waveform data. At greater water depths, this effect is considerably weakened by the effect of the obliquely incident laser beam 54

Fig. 10 Results of full-waveform stacking for investigation area Elbe 3. **a** The FWSP points are colour-coded corresponding to their height component (z-coordinate). **b** Illustration of the improved coverage of the riverbed by FWSP point cloud (dark grey). The OWP points are presented colour-coded corresponding to their height coordinate 54
Fig. 11 Cross section of the Elbe River. Black = OWP points, Blue = water surface points, Red= ES points, Green = FWSP points 55
Fig. 12 Results of comparison with OWP points: **a** mean height deviations, **b** root mean square, **c** mean absolute deviation and **d** median absolute deviations as a function of their water depth. Solid lines correspond to the left axis and dashed lines to the right axis 56
Fig. 13 Elbe 3: Height deviations compared between OWP points and FWSP points. The compared points are colour-coded corresponding to their deviation. FWSP points with positive height deviations are estimated as deep, and points with negative height deviations are estimated as high 57
Fig. 14 Elbe 3: Height deviations between ES points and FWSP points. The compared points are colour-coded corresponding to their deviation. FWSP points with positive height deviations are estimated as deep, and points with negative height deviations are estimated as high 57
Fig. 15 Results of comparison with ES points: **a** mean height deviations, **b** root mean square, **c** mean absolute deviation and **d** median absolute deviations as a function of theirwater depth. Solid lines correspond to the left axis and dashed lines to the right axis 58
Fig. 16 Inlier rates in regard to their water depths of the comparison from the FWSP to (**a**–**c**) OWP points and (**d**–**f**) ES points 59

Abbildungen – Beitrag 3

Figure 1 The study area (part of the Elbe River). The red area is the investigation area in this article. (Map data ©2021 Google) 68
Figure 2 Schematic Palmer scan pattern (adapted from RIEGL Ri-Parameter software) showing the heterogeneous point density. Green points = forward look and red points = backward look. 68
Figure 3 The online processed data of the investigation area are color-coded according to their water depth. Land points = gray. 68
Figure 4 The echo sounder data of the investigation area are color-coded accor ding to their water depth. Land points = gray. 69
Figure 5 Schematic illustration of a voxel space (dashed black lines), single voxel (blue), the processing unit (red) and point cloud, which consists of the georeferenced local waveform peak data (green). 70
Figure 6 Workflow of volumetric nonlinear full-waveform stacking processing. On the left side are the methods, in the middle the corresponding sections and on the right the interim results. 70
Figure 7 Principle of terrain model with composite linear bivariate polynomials (Kraus, 2000). The X-Y-coordinates of P_S are local coordinates related to the origin of the grid cell (NP_1). 71

Figure 8 Principle of water surface normal calculation. Green point = intersection point of laser beam and water surface model. Yellow points = auxiliary points (AP_1, AP_2, AP_3). Yellow triangle = auxiliary plane for calculating the water surface normal. ... 72
Figure 9 Voxelization of full-waveform data; Principle of transfer from individual full-waveform samples to voxel space. ... 72
Figure 10 Principle of geo-referencing of single full-waveform samples. ... 73
Figure 11 Generation of an ortho full-waveform from the vertical voxel column. ... 73
Figure 12 Schematic representation of the parameters of a full-waveform analysis. ... 74
Figure 13 Full-waveform stacking results (black) with full-waveform part for noise range estimation (red). Black curve = Complete ortho full-waveform. Red curve = part for noise range estimation. ... 75
Figure 14 Estimation of noise range. Red line = Tail part of the full-waveform. Black dashed = zero line. Green dashed = upper part of noise range. ... 75
Figure 15 Application of multiple noise ranges (n_{nrampl}=factor) for checking the reliability of water bottom echo. Black dashed line = amplitude of local minimum. Red dashed line = amplitude threshold ($n_{nrampl} \cdot nr$). Green dashed line = amplitude of water bottom peak. ... 75
Figure 16 Principle of iterative filtering of the processing units (PU) in the study area (for this example, 14 steps). For case (a), green = grid cells with reliably detected water bottom echoes. For case (b) and (c), green = known or checked PU. Gray = land PU. Yellow = currently checked PU. Red = not yet checked PU. ... 76
Figure 17 Calculating node points (black points) from ortho full-waveform analysis results (green points). ... 76
Figure 18 Inclusion of the ortho waveform points into the initial water bottom model. Black $NP_{i,j}$ = origin nodal points. Red $NP_{i,j}$ = new nodal points. ΔXY = original grid cell size. ... 77
Figure 19 Detection of weak water bottom echoes in individual full-waveforms by using ortho full-waveform analysis results (initial water bottom model). ... 77
Figure 20 VFWSP points color-coded by their water depth. Cross-section 1 is shown in Fig. 21a, b, and the cross-section is shown in Fig. 21c, d. ... 79
Figure 21 Cross-sections through the Elbe River. The height coordinate is exaggerated by a factor of 6. The location of both cross-sections are shown in Fig. 20. 79
Figure 22 Color-coded height deviation of VFWSP points and (a) OWP points as well as (b) ES points. ... 79
Figure 23 Accuracy values and inlier rates for the comparison between VFWSP and OWP points as well as ES points depending on the water depth. ... 80
Figure 24 Accuracy values and inlier rates for the comparison between VFWSP model points and OWP points as well as ES points depending on the water depth. 82

Abbildungen – Beitrag 4

Abb. 1 Messprinzip eines ALB-Systems: (a) Ausbreitung des Laserpulses in Wasser und (b) am Sensor detektierte Signalform (Full-Waveform) ... 93
Abb. 2 Schematische Darstellung eines Gewässers mit überlagertem Rastergitter. Jede Rasterzelle des Rastergitters ist eine Prozessierungseinheit. ... 95

Abb. 3 Grundprinzip des signalbasierten FWF-Stackings, angewandt auf ALB-FWFs (Mader et al. 2021): Nach einer Analyse der stacked FWF (rot) wird um das darin gefundene Pseudo-Gewässerbodenecho ein Suchkorridor definiert (grün). Innerhalb dieses Bereichs werden Wasserbodenechos in den ursprünglichen FWFs gesucht (schwarz; Abschnitt 2.4). 96
Abb. 4 Schematische Darstellung eines Gewässers im Voxelraum: Vertikal angeordnete Voxel bilden eine die Wassersäule repräsentierende Voxelsäule, welche als Prozessierungseinheit verwendet wird. 96
Abb. 5 (a) Überführung der FWF-Intensitäten in den Voxelraum. (b) Generierung einer Ortho-FWF aus einer vertikalen Voxelsäule 97
Abb. 6 Nutzung des aus der stacked FWF extrahierten Suchkorridors für eine zuverlässigere Detektion und Extraktion des Gewässerbodenpunktes in der gemessenen FWF (roterKreis) 97
Abb. 7 Ergebnisse der (a) ALB-Standardprozessierung und (b) Vertikalecholotmessung. Beide Punktwolken sind bzgl. ihrer Gewässertiefe farbkodiert dargestellt mit Bezug auf die Höhe der Wasseroberfläche zum Befliegungszeitpunkt. 98
Abb. 8 Ergebnisse des (a) signalbasierten und (b) volumetrischen FWF-Stackings. Beide Punktwolken sind bzgl. ihrer Gewässertiefe farbkodiert dargestellt mit Bezug auf die Höhe der Wasseroberfläche zum Befliegungszeitpunkt. 99
Abb. 9 Höhenabweichungen zwischen den Ergebnissen der Vertikalecholotmessung und des (a) signalbasierten sowie (b) volumetrischen FWF-Stackings, farbkodiert bzgl. der Höhenabweichung. 99

Abbildungen – Beitrag 5

Figure 1 Schematic full-waveform representing the three signal components according to Guenther et al. (2000). 114
Figure 2 Schematic representation of volume backscatter extraction and exponential function approximation. 114
Figure 3 Schematic representation of SVB algorithm; green: dBCS model; red: model of the received signal; black: received signal. 115
Figure 4 Example for individual full-waveform. 115
Figure 5 Principle of waveform stacking. 115
Figure 6 Example for stacked full-waveform. 116
Figure 7 Principle of ortho full-waveform generation from voxel-based data representation. Bright gray value = high intensities; dark gray value = low intensi ties. 116
Figure 8 Example for ortho full-waveform. 116
Figure 9 Turbidity estimation by exponential function approximation (EFA) and SVB algorithm (SVB); (a-c) full-waveform signal (black) and approximated exponential function (red); (d-f) dBCS model (black) and volume backscatter (red); (g-i) model of full-waveform signal (green) and full-waveform signal (black). 117
Figure 10 Visualization of determined volume exponential decay coefficients; (a,c,e) exponential function approximation; (b,d,f) and SVB algorithm. 118
Figure 11 Scatter plot of adjacent decay coefficients. 119

Tabellenverzeichnis

2.1 Allgemeine Charakteristika von Deep-Bathy und Shallow-Bathy ALB-Systemen. Die Shallow-Bathy ALB-Systeme RIEGL VG 880-G I/II und der Leica Chiroptera II werden aufgrund ihrer Relevanz für diese Arbeit extra aufgeführt. 22

3.1 Unterschiede zwischen der sigFWFS- und volFWFS-Prozessierung. 63

4.1 Globale Genauigkeits- und Zuverlässigkeitswerte des Vergleichs Echolotmessungen und sigFWFS bzw. volFWFS. Der Punktanteil gibt an, wieviel Punkte (prozentualer Anteil) der neuprozessierten Punktwolken (absoluten Zahlen) für die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanalyse herangezogen wurden (Begründung siehe Kap. 4.2). 106

4.2 Angaben zur erreichten Eindringtiefe und Flächenvergleich von sigFWFS und volFWFS Punktwolken relativ zu der Fläche der OWP für das Untersuchungsgebiet (mit Funktionen der Software CloudCompare) basierend auf den Punkten mit einer minimalen Punktdichte von 5 Punkten/m^2. Für eine realistischere Angabe des Flächenzuwachses wurde das Gebiet zwischen Untersuchungsgebiet und dem Landbereich vor Amrum hinzugezogen. 108

6.1 Exemplarische Gewässerparameter: Salzgehalte entsprechen üblichen Angaben zu Süßwasser bzw. Nordsee. Die mittleren Temperaturen der Elbe und Nordsee der jeweiligen Befliegungsmonate entstammen den entsprechenden Klimatabellen von FeiReu GbR (2022). 123

6.2 Einfluss der Berücksichtigung der Gewässereigenschaften auf die Messdaten der Elbe und der Nordsee. Die Differenzen sind gleich Standardwerte minus angepasste Werte. 124

6.3 Entwicklung der Fläche mit ansteigender Gewässertiefe. 127

Tabellen – Beitrag 1

Table 1. Line 1-2 show the mean deviation value and the RMS-deviation of the height component between new recognized points and the comparative data. Line 3-4 present the number of points with a max. height-deviation of 0.25m related to the number of all recognized points and the percentage. 40

Tabellen – Beitrag 2

Table 1 Approximate point density, length and width of the investigation areas 47

Table 2 Results of investigation of the optimal grid cell size for the areas Elbe 1–4, Elbe 6. All values are differences related to the grid cell size of 2.0 m x 2.0 m . 53

Table 3 Results of investigation of the optimal grid cell size for the areas Elbe 5. All values are differences related to the grid cell size of 2.5 m x 2.5 m 53
Table 4 Accuracy values compared to OWP points considering all height deviations of an evaluation area independent of their water depth 56
Table 5 Accuracy values compared to ES points considering all height deviations of an evaluation area independent of their water depth 58
Table 6 Inlier rates of the comparison from FWSP points to OWP points considering all height deviations of an evaluation area independent of their water depth 59
Table 7 Inlier rates of the comparison from FWSP points to ES points considering all height deviations of an evaluation area independent of their water depth 59

Tabellen – Beitrag 3

Table 1 Overview LiDAR bathymetry concepts. References: a = Parrish et al. (2019); b = NASA-ICESat2 (2022); c = Mandlburger (2020); d = Quadros (2013); e = RIEGL (2021) ; f = RIEGL RiParameter Software. Sensors: I = ICESat-2; II = Leica/AHAB HawkEye IIB; III = Optech SHOALS-1000T; IV = RIEGL VQ-820-G; V = Leica/AHAB Chiroptera; VI = RIEGL VQ-840-G. ... 65
Table 2 Overview of previous work and current article. 66
Table 3 Results of the investigation of different lateral voxel sizes. The vertical voxel size was 10 cm. Only VFWSP points that could be compared with OWP and ES points were considered. 78
Table 4 Results of the investigation of different vertical voxel sizes. The lateral voxel size applied for this was 2 m × 2 m. Only VFWSP points that could be compared with OWP and ES points were considered. 78
Table 5 Accuracy values and inlier rates (Section 2.4) of the comparison VFWSP points vs. OWP points (all points; points with a water depth ≤ 0.7 m; points with a water depth > 0.7 m) and VFWSP vs. ES points. wd = water depth. 80
Table 6 Accuracy values and inlier rates (Section 2.4) of the comparison VFWSP model points vs. OWP points (all points; points with a water depth ≤ 0.7 m; points with a water depth > 0.7 m) and ES points. wd = water depth. 81

Tabellen – Beitrag 5

Table 1. Correlation coefficient. 119

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
A_E	Fläche des Detektors	[m^2]
A_{GB}	Fläche Prozessierungseinheit am Gewässerboden	[m^2]
A_{PE}	Fläche Prozessierungseinheit an der Wasseroberfläche	[m^2]
α_L	luftseitiger Inzidenzwinkel	[rad]
α_W	Brechungswinkel in Wasser	[rad]
AP_i	Hilfspunkte für Ebenenbestimmung	[m]
A_s	Amplitude des Full-Waveform Samples	[DN]
b_{BS}	Rückstreuung	-
$\beta(\Phi)$	Volumenstreufunktion Wasser	-
c	Lichtgeschwindigkeit (Medium nicht definiert)	[m s^{-1}]
c_L	Lichtgeschwindigkeit in Luft	[m s^{-1}], [km s^{-1}]
c_W	Lichtgeschwindigkeit in Wasser	[m s^{-1}], [km s^{-1}]
c_{sw}	Schallgeschwindigkeit in Wasser	[m s^{-1}]
γ	Dämpfungskoeffizient bei exponentielle Dekomposition	-
γ_s	Strahldivergenz	[m rad]
d	Gewässertiefe bei der Berechnung der TVU	[m]
D	Distanz	[m]
D_E	Durchmesser der Apertur	[m]
D_{ES}	Distanz der Echolotung	[m]
D_{fp}	Durchmesser Footprint	[m]
D_{GW}	Gewässertiefe	[m]
D_Ψ	horizontale Distanz Querdistanz aufgrund von Ψ	[m]
Δh	Höhendifferenz/Höhenabweichung	[m]
$\overline{\Delta h}$	mittlere Höhenabweichung	[m]
ΔXY	Seitenlänge Rasterzelle in X- und Y-Richtung (FEM)	[m]
E_i	die Amplitudenwerte des dBCS	[DN]
η_{ATM}	atmosphärischer Transmissionsgrad	-
η_E	Wirkungsgrad der Empfangsoptik	-
η_S	Wirkungsgrad der Sendeoptik	-
η_{SYS}	optischer Transmissionsgrad des Messsystems	-
F	Verlustfaktor in Abhängigkeit des Field of View	-
H	Flughöhe	[m]

Symbol	Beschreibung	Einheit
k	Dämpfungskoeffizient	-
$\kappa, \kappa_{PCS}^{NCS}$	IMU Winkel	[rad]
L_O	Albedo der Wasseroberfläche	-
lat	geographische Breite (engl. latitude)	[rad]
l_{GB}	Seitenlänge Prozessierungseinheit am Gewässerboden	[m]
lon	geographische Länge (engl. longitude)	[rad]
l_{WO}	Seitenlänge Prozessierungseinheit an der Wasseroberfläche	[m]
λ	Wellenlänge des Lichts	[nm]
MAD	Mean/Median Absolute Deviation	[m]
$\mathbf{N}$	Wasseroberflächennormale	-
NoS_i	Sampleanzahl	-
NoS_{wb}	Sampleanzahl Wasseroberfläche und Gewässerboden	-
$\mathbf{NP}_{i,j}$	Knotenpunkt	[m]
nr	Rauschbereich	[DN]
n_{nr_ampl}	Anpassungsfaktor für nr für die Filterung	-
n_L, n_{air}	Brechungsindex Luft	-
n_W, n_{water}	Brechungsindex Wasser	-
$\omega, \omega_{PCS}^{NCS}$	IMU Winkel	[rad]
P_B	zurückgestreute Signalstärke des Gewässerbodens	[J]
P_{DR}	Detektorrauschen	[J]
P_E	ankommende Pulsenergie	[J]
P_{HG}	Signalstärke des Hintergrundrauschens	[J]
$\mathbf{P}_{ls}$	Punkt der Pulsemission	[m]
P_O	zurückgestreute Signalstärke von der Wasseroberfläche	[J]
$\mathbf{P}_{OWF}$	Punkt der ortho Full-Waveform	[m]
P_S	ausgehende Pulsenergie	[J]
$\mathbf{P}_{wb}$	Punkt am Gewässerboden	[m]
$\mathbf{P}_{wb_ortho}$	Gewässerbodenpunkt der ortho Full-Waveform	[m]
$\mathbf{P}_{wbm}$	Punkt Gewässerbodenmodell	[m]
$\mathbf{P}_{ws}$	Punkt an der Wasseroberfläche	[m]
$\mathbf{P}_{wsm}$	Punkt Wasseroberflächenmodell	[m]
$P_W(z)$	zurückgestreute Signalstärke aus der Wassersäule	[J]
p	gemessener Wert des empfangenen Signals	[J]
p_m	Modellwert des empfangenen Signals	[J]

Symbol	Beschreibung	Einheit
ϕ, ϕ_{PCS}^{NCS}	IMU Winkel	[rad]
Φ_{da}	Auslenkwinkel Laserpuls (engl. deflection angle)	[rad]
Ψ	Auslenkwinkel Schallpuls zur Vertikalrichtung	[rad]
R	Entfernung Laserscanner – Objekt	[m]
$\mathbf{R}_{SCS}^{PCS}$	Rotationsmatrix der Boresight-Winkel	-
$\mathbf{R}_{PCS}^{NCS}(\omega, \phi, \kappa)$	Rotationsmatrix der IMU Winkel	-
R_B	Albedo Gewässerboden	-
RMS	mittlere quadratische Abweichung (engl. root mean square)	[m]
r	Radius (für Umkreis zur Punktdichtebestimmung)	[m]
r_{curve}	Residuum der Krümmungsbedingung	[m]
r_s	Residuum Flächenmodellierung	[m]
ρ	Parameter des dBCS	-
S	Salzgehalt	[‰]
σ	Rückstreuquerschnitt	[m^2]
$\sigma_{\overline{\Delta h}}$	Sigma der mittleren Höhenabweichung	[m]
σ_m	dBCS bei exponentieller Dekomposition	[m^2]
$\sigma_{MAD(mean)}$	Sigma der Mean Absolute Deviation	[m]
$\sigma_{MAD(median)}$	Sigma der Median Absolute Deviation	[m]
T	Temperatur	[°C]
T_{ATM}	Signalabschwächung Atmosphäre	-
TVU	Total Vertical Uncertainty	[m]
t	*Zeit*	[s]
t	Strecke des Laserpulses in Luft; Länge des normierten Vektors (Beitrag 3)	[m]
t_1	Pulslaufzeit $\mathbf{P}_{ls} \rightarrow \mathbf{P}_{ws}$	[s]
t_2	Pulslaufzeit $\mathbf{P}_{ws} \rightarrow \mathbf{P}_{wb}$	[s]
t_n	Abtastzeitpunkte im Signal (p, p_m)	[s]
t_{rt}	Laufzeit Laserpuls	[s]
t_{rts}	Laufzeit Schallpuls	[s]
t_s	Zeitstempel des Full-Waveform Samples	[s]
t_{si}, t_{sti}	Abtastintervall einer Full-Waveform	[s]
τ_i	Zeitintervallgrenzen der dBCS Segmente	[s]
$\mathbf{X}_1$	Vektor $\mathbf{P}_{ls}$ und $\mathbf{P}_{ws}$	[m]

Symbol	Beschreibung	Einheit
$\mathbf{X}_2$	Vektor $\mathbf{P}_{ws}$ und $\mathbf{P}_{wb}$	[m]
$\mathbf{X}^{NCS}$	Punkt im NCS	[m]
$\mathbf{X}^{PCS}$	Punkt im PCS	[m]
$\mathbf{X}^{SCS}$	Punkt im SCS	[m]
$\mathbf{X}^{WCS}$	Punkt im WCS	[m]
$\mathbf{X}^{PCS}_{0,SCS}$	Hebelarm (engl. lever arm)	[m]
$\mathbf{X}^{WCS}_{0,PCS}$	GNSS Position des PCS-Ursprungs	[m]
X_{isp},Y_{isp},Z_{isp}	Schnittpunkt Laserpuls mit Wasseroberflächenmodell	[m]
X_S, Y_S, Z_S	gemessener Punkt	[m]
X_0, Y_0, Z_0	Ursprung der Pulsemission	[m]
X_{dir},Y_{dir},Z_{dir}	Ausbreitungsrichtung Laserpuls; normierter Vektor	-
x	Abstand unter Wasser (Beitrag 5)	[m]
z	Gewässertiefe	[m]

Abkürzungsverzeichnis

AGL Höhe über Grund (engl. above ground level)

AHAB Airborne Hydrography AB (Firma)

AHM GmbH Airborne HydroMapping GmbH

ALS Airborne Laserscanning

ALB Airborne Laserbathymetrie / LiDAR Bathymetrie

APD Avalanche Photo Diode

BfG Bundesanstalt für Gewässerkunde

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

dBCS Differentieller Rückstreuquerschnitt (engl. differential backscatter cross-section)

DHHN2016 Deutsches Haupthöhennetz 2016

DHyG Deutsche Hydrographische Gesellschaft

ECEF Earth Centered Earth Fixed

EFA Exponentielle Funktionseinpassung (engl. exponential function approximation)

ES Echolot Messdaten

ETRS European Terrestrial Reference System

EU Europäische Union

FEM Finite Elemente Methode

FWF, fwf Full-Waveform

GNSS Globales Navigationssatellitensystem (engl. global navigation satellite system)

IHO International Hydrographic Organization

ITRS International Terrestrial Reference System

IMU Inertiale Messeinheit (engl. inertial measurement unit)

LRF Laser Range Finder

LiDAR Light Detection and Ranging

MBES Multiecholot (engl. multi beam echosounder)

ML Multi-Layer

NCS Navigationskoordinatensysten (engl. navigation coordinate system)

Nd:YAG Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser

NIR nahes Infrarot (engl. near-infrared)

OWP Standardprozessierung (engl. online waveform processing)

PCS Flugplattform-Koordinatensystem (engl. platform coordinate system)

PRR Pulswiederholrate (engl. pulse repetition rate)

PU Prozessierungseinheit (engl. processing unit)

RMS mittlere quadratische Abweichung (engl. root mean square)

RMSE Root Mean Square Error

SBES Vertikalecholot (engl. single beam echosounder)

SCS Sensorkoordinatensystem (engl. sensor coordinate system)

sigFWFS, FWSP signalbasiertes Full-Waveform Stacking

SVB Surface-Volume-Bottom Modell

TIN unregelmäßiges Dreiecksnetz (engl. triangulated irregular network)

ToF Time-of-Flight Verfahren

TVU Vertikale Gesamtunsicherheit (engl. total vertical uncertainty)

UAV Uncrewed Aerial Vevicle

UTM Universal Transverse Mercator

UWV Uncrewed Water Vehicle

volFWFS, VFWSP Volumetrisches Full-Waveform Stacking

WSA Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt

WCS Globales Koordinatensystem (engl. world coordinate system)

WGS84 World Geodetic System 1984

WSV Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes