

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Dobler, Wolfgang; Steinbacher, Frank; Baran, Ramona; Bengler, Werner; Leimer, Wolfgang**

## **Das Potential der Full-Waveform-Prozessierung topo-bathymetrischer LiDAR-Daten**

VAW Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

**ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108431>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Dobler, Wolfgang; Steinbacher, Frank; Baran, Ramona; Bengler, Werner; Leimer, Wolfgang (2021): Das Potential der Full-Waveform-Prozessierung topo-bathymetrischer LiDAR-Daten. In: Boes, Robert (Hg.): Wasserbau-Symposium 2021. Wasserbau in Zeiten von Energiewende, Gewässerschutz und Klimawandel. Band 2. VAW Mitteilungen 263. Zürich: ETH Zürich, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. S. 419-427.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

Verwertungsrechte: CC BY 4.0



# Das Potential der Full-Waveform-Prozessierung topo-bathymetrischer LiDAR-Daten

*The potential of applying full waveform processing on topo-bathymetric LiDAR data*

**Wolfgang Dobler, Frank Steinbacher, Ramona Baran, Werner Benger, Wolfgang Leimer**

## Kurzfassung

Moderne topo-bathymetrische Laserscanner (grüne Wellenlänge mit 532nm) speichern neben der diskreten Punktwolke aus der Online-Waveform-Prozessierung (OWP) auch die zeitgleich aufgezeichneten gesamten Full-Waveform-Daten (FWF) ab. Bei der luftgestützten Gewässervermessung unter Verwendung entsprechender Sensoren wie beispielsweise dem VQ880G von Riegl LMS liefern die FWF-Daten zusätzliche, intrinsische Informationen, die einen vertieften Einblick in die Geometrie der Sohle erlauben. Der besondere Fokus liegt dabei in jenem Bereich der Sohle, der in den OWP-Daten teilweise eben nicht mehr erfasst werden kann. In unserer Software HydroVISH ist nun eine komplette Prozessierungskette zur FWF-Analyse topo-bathymetrischer Daten implementiert. Diese beginnt bei der direkten räumlichen Verknüpfung und Visualisierung der diskreten OWP-Punkte mit den zugehörigen FWF, um das Potenzial einer detaillierten FWF-Analyse für einen betreffenden Datensatz einfach einschätzen zu können. Im Weiteren kann eine einfache Vorklassifizierung des Wasserkörpers mittels e-Funktionsfitting der FWF durchgeführt werden, da Licht im Wasser exponentiell gedämpft wird. Dabei können im Idealfall Wasseroberflächensignale von Sohlensignalen getrennt werden. Um aus der FWF weitere Sohlpunkte zu extrahieren, wird ein Waveform-Stacking durchgeführt, um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Anschließend werden dann mit dem Gradienten der FWF und einem variablen Schwellenwert Peaks in der FWF gesucht und in 3D-Punktkoordinaten überführt. Es sind zudem weitere FWF-Analyseansätze in HydroVISH verfügbar, z.B. Entfaltung der FWF mit der Systemwelle über die Nutzung des Wiener-Filter u.ä. In einem Forschungsprojekt mit den bundesdeutschen Wasserbehörden (WSV, BfG & BAW) wurde für einen Abschnitt der Elbe das Potential der FWF-Analyse für die Gewässervermessung insbesondere hinsichtlich größerer Eindringtiefen und damit einer Verbesserung der räumlichen Sohlbedeckung evaluiert. An der Elbe konnten dabei die nominelle Eindringtiefe

von 1.5 m (OWP) auf 2 m (mit FWF) verbessert sowie die Abdeckung der Sohle um 20-30 % erweitert werden.

## **Abstract**

Modern topo-bathymetric laser scanners (green wavelength of 532 nm) do not only record the discrete point cloud based on online-waveform-processing (OWP) but also the simultaneously acquired full-waveform data (FWF). When such sensors as the VQ880G (Riegl LMS) are used for airborne hydromapping purposes, the FWF data contain additional intrinsic information to gain an extended insight into the geometry of the water ground. In this context, the focus is laid on that part of the bathymetry, which cannot be detected in the OWP data. In our software HydroVISH, we implemented a complete processing chain for the FWF analysis of topo-bathymetric LiDAR data. The direct spatial connection and visualization of the discrete OWP points and associated FWF allows for a simple evaluation of the FWF analysis potential regarding a specific dataset. Furthermore, a simple pre-classification of the waterbody can be performed using e-function fitting concerning the FWF, because light is exponentially damped in water. In the ideal case, signals from the water surface can be separated from those of the water ground. For extracting additional water ground points, a waveform stacking is applied to improve the signal-to-noise-ratio, and using the gradient of the FWF with a variable threshold, peaks within the FWF are detected and converted to 3d point coordinates. Further FWF-analysis approaches, such as deconvolution of the FWF with the system wave using the Wiener filter, are available in HydroVISH. For a joined research project with the German water authorities (WSV, BfG & BAW), the potential of the FWF analysis was evaluated for a section of the Elbe river especially concerning the improvement of penetration depth and thus the spatial coverage of water ground detection. For the Elbe river, the penetration depth increased from 1.5 m (OWP) to 2 m (FWF), and the spatial coverage was improved by 20-30%.

## **1 Einleitung**

Während eines topo-bathymetrischen Laserscanflugs (Steinbacher & Aufleger, 2013) verarbeitet die OWP des Riegl-Lasers VQ880G in Echtzeit die FWF zu geometrischen Koordinaten. Da die Aufnahmefrequenz 550 kHz beträgt, können bei der OWP keine rechenintensiven Auswertelgorithmen angewendet werden, um möglichst viele Objekte im Zielgebiet zu erfassen und als Punktkoordinaten auszugeben. Hier bietet die nachträgliche Offline-Prozessierung (Guenther *et al.*, 2000) die Möglichkeit für eine genauere Auswertung. Der Fokus der Auswertung liegt hier vor allem auf größeren Wassertiefen und einer höheren Punktdichte in tieferen Bereichen, in der die OWP nur geringe oder keine Sohlpunkte ausgibt.

Einzelne Schritte für die zusätzliche FWF-Auswertung werden im Folgenden dargestellt und sind Bestandteil einer fertig implementierten Prozessierungskette in der Software HydroVISH.

## 2 Voruntersuchung der FWF

Die Offline-Prozessierung macht nur dann Sinn, wenn in den FWFs optisch ein Bodensignal zu erkennen ist. Hierfür werden mit dem Softwarepaket HydroVish der AHM GmbH (Derivat von Vish; Benger *et al.*, 2007) alle FWFs entlang ihrer Richtungsvektoren gerendert. In Abbildung 1 ist dabei klar zu erkennen, dass über die OWP nicht alle Sohlpunkte in Koordinaten umgesetzt wurden und eine vertiefende Analyse der FWFs sinnvoll ist.

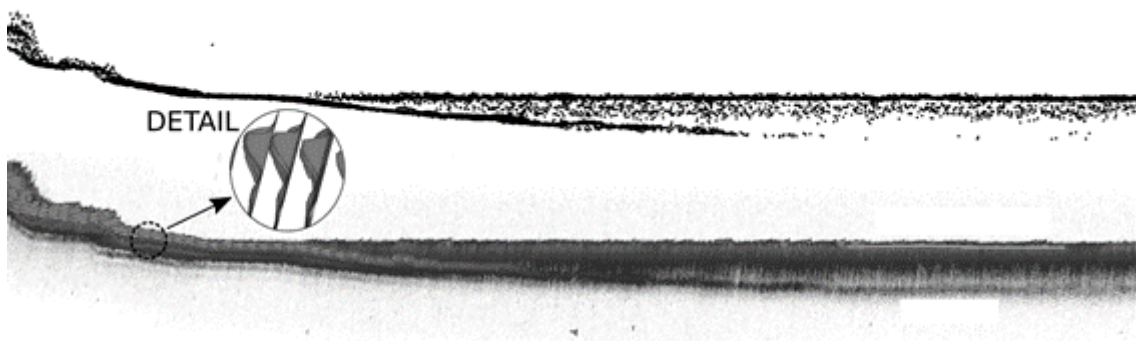


Abb. 1: Oben: Querschnitt entlang der Elbe aus der OWP. Unten: Gerenderte FWFs entlang der Strahlrichtung. Sohlpeaks sind sichtbar, die wesentlich mehr umfassen als in der OWP.

## 3 Vorklassifizierung des Wasserkörpers

Der vom Flugzeug aus emittierte Laserpuls wird als erstes an der Luft-Wasser-Grenze teilweise reflektiert. Diese Reflexion ist meistens ein markanter Peak in der FWF und hängt vom Einfallswinkel und der Rauigkeit der Wasseroberfläche durch Wellenbildung ab. Das restliche Laserlicht, das in den Wasserkörper eindringt, wird exponentiell gedämpft (Petzold, 1972). Wenn genügend Laserlicht bis zur Sohle vordringt, ist ein zweiter -vor allem bei tieferen Gewässern- wesentlich kleinerer Peak in der FWF zu finden. Der Amplitudenverlauf im Wasserkörper folgt dem Lambert-Beer'schen Gesetz:

$$A_s = A_0 e^{-\kappa s} \quad [1],$$

wobei  $A_s$  die Amplitude,  $s$  der Weg der FWF,  $A_0$  die Anfangsamplitude und  $\kappa$  der Dämpfungskoeffizient ist. Durch umformen erhält man  $\kappa$ :

$$-\ln \left( \frac{A_s}{A_0} \right) \frac{1}{s} =: \kappa(s) \quad [2].$$

Mit Gleichung (2) wird für jede Amplitude der FWF ein  $\kappa$  berechnet und aus der Funktion  $\kappa(s)$  der Median für  $\kappa$  als repräsentativer Wert für die diskret gegebenen Werte  $s$  verwendet. Beispielhaft wurde in Abbildung 2 das Einpassen der e-Funktion in eine FWF des Wasserkörpers dargestellt. Als Kriterium für ein erfolgreiches Einpassen der e-Funktion wird die integrierte absolute Differenz zwischen Amplitude  $A_s$  und dem dazugehörigen Wert aus der e-Funktion verwendet. Mit einem Schwellwert für die Differenz wird dann festgelegt, ob es sich hier um einen Wasserkörper handelt (Abb. 3).

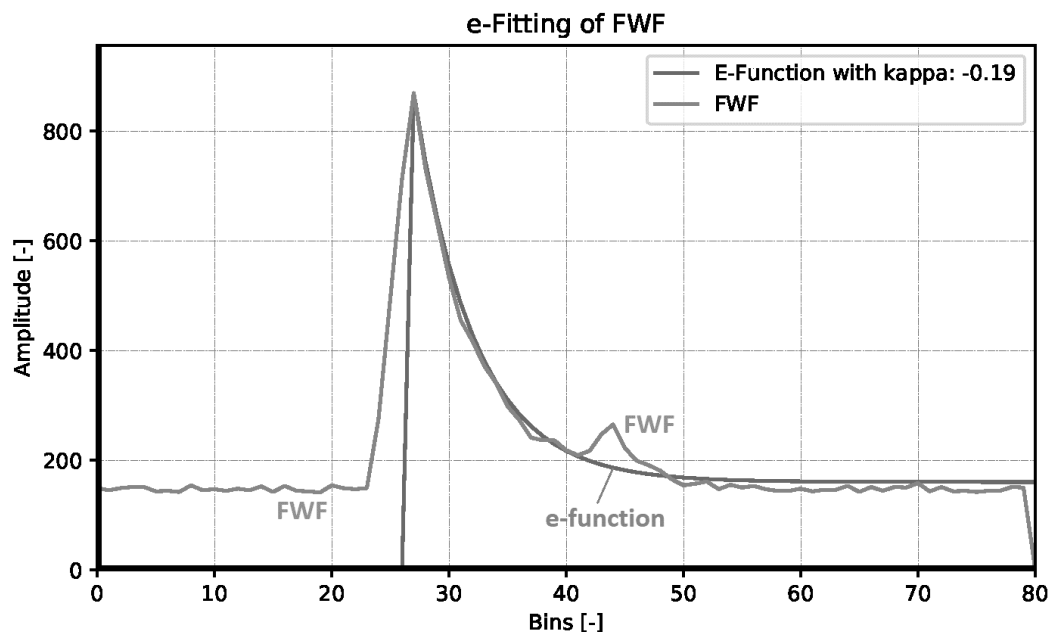


Abb. 2: Eingefügte e-Funktion am größten Peak der FWF.



Abb. 3: Klassifizierung des Wasserkörpers in perspektivischer Ansicht (aufgrund eines Schwellwertes für die Abweichung vom exponentiellen Verlauf der FWF-Amplitude: schwarz kein Wasserkörper (Vorland & Vegetation); dunkelgrau (letzter Peak in FWF) bzw. hellgrau (erster Peak in FWF) in der Bildmitte ist Wasserkörper).

## 4 Stapelung von benachbarten FWF

Die Sohlpeaks einer FWF sind zumeist nur gering ausgeprägt, z.B. in größeren Wassertiefen oder bei starker Trübung. Die Amplitudenhöhe dieser Sohlpeaks ist dann nur geringfügig größer als das Rauschen. Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern, wird eine Stapelung von Wellenformen durchgeführt (Stilla *et al.*, 2007). Dabei werden benachbarte Wellenformen (max. Entfernung 25 cm, ähnlicher Richtungswinkel) addiert und ein Mittelwert gebildet. Zusätzlich werden die FWFs zum Hauptpeak verschoben. Es werden nur solche FWFs für die Stapelung berücksichtigt, die vorab als Wasserkörper klassifiziert worden sind (Abb. 4 oben). Im Ergebnis erhält man eine gemittelte FWF, wobei diese FWF (Abb. 4 unten) dann einen rauschverminderten Verlauf sowie zwei prominente Peaks aufweist (Übergang Luft/ Wasser & Sohlpeak) gegenüber der Referenz-FWF (Abb. 4 unten).

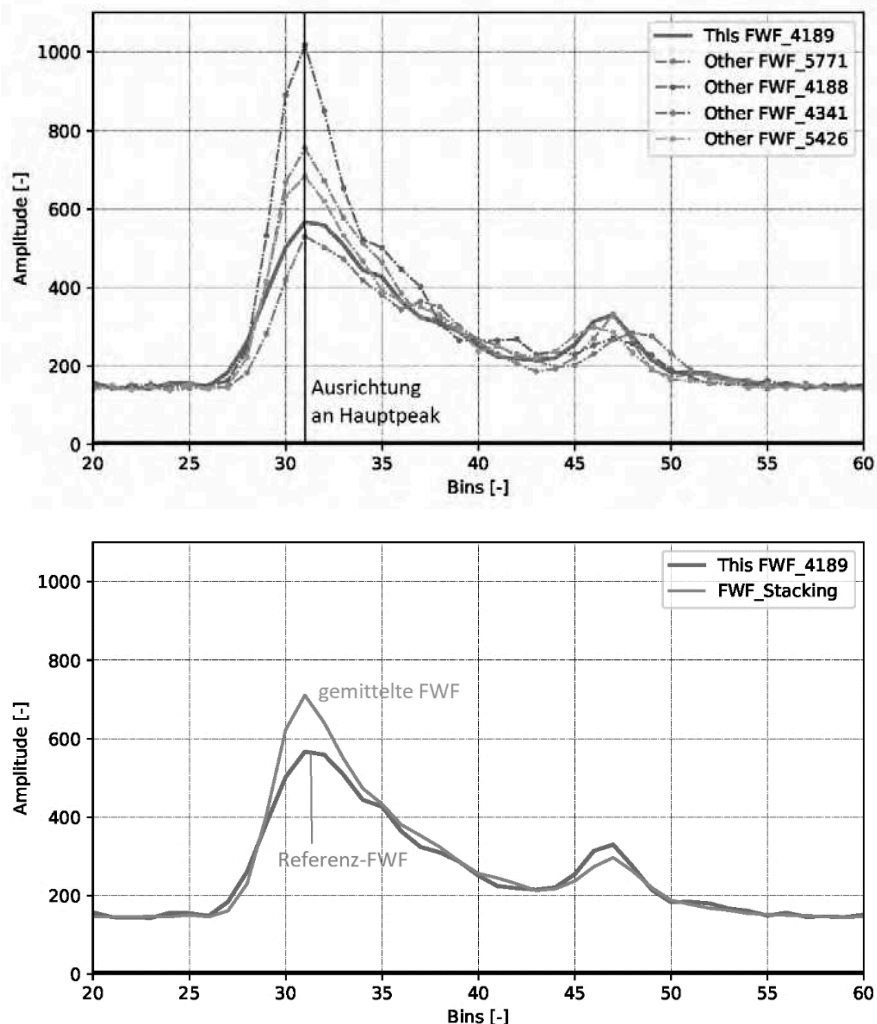


Abb. 4: Oben: Mit der Referenz-FWF (Nr. 4189, dicke Linie) werden benachbarte FWFs gesucht (strichpunktierte Linien) und entlang des Hauptpeaks ausgerichtet. Unten: Die gemittelte FWF weist einen ruhigeren Verlauf auf als die Referenz-FWF.

## 5 Peak-Detektion in FWF

Aus den FWFs werden Punktkoordinaten abgeleitet. Der verwendete Algorithmus basiert auf dem Gradientenfeld der FWF, in dem abhängig von einem Schwellwert Peaks detektiert werden. Der Schwellwert wird zudem in tieferen Gewässern geringer angesetzt, um auch die schwach ausgeprägten Sohlpeaks zu detektieren (Abb. 5).

Im Vergleich zeigt sich, dass über die OWP der Beginn der Sohle angezeigt wird, weiter Richtung Flussmitte werden jedoch keine Sohlpunkte mehr detektiert (Abb. 6). Mit der Gradientenauswertung der FWF werden mehr Sohlpunkte gefunden, auch wenn noch ein deutliches Rauschen um die Sohle vorhanden ist. Wesentlich besser ist die Auswertung mit zusätzlicher Stapelung der FWFs, bei der ein geringeres Rauschen zu erkennen ist (Abb. 6). Für die erweiterte FWF-Auswertung in HydroVISH über die Entfaltung mit der Systemwelle, u.a. mit dem Algorithmus nach Richardson-Lucy (Wu *et al.*, 2011), ist soweit keine wesentliche Verbesserung zu erkennen, auch wenn tendenziell das Rauschen etwas geringer ist.

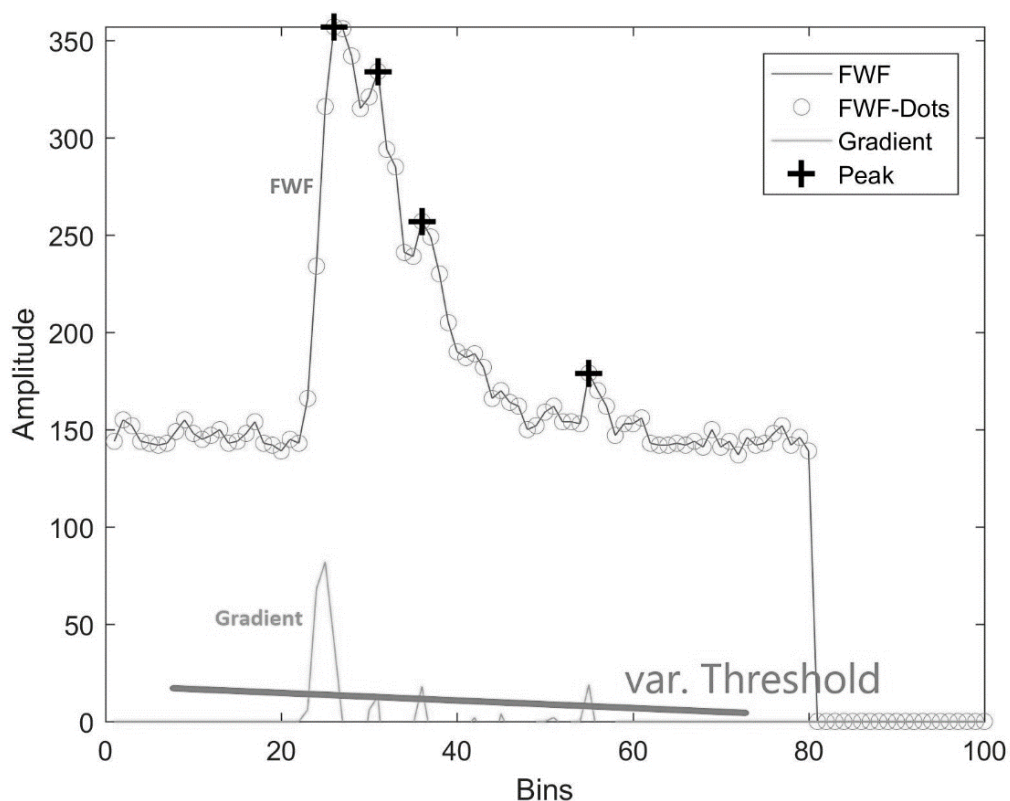


Abb. 5: Mit einem variablen Schwellwert werden im Gradientenfeld der FWF Peaks detektiert.



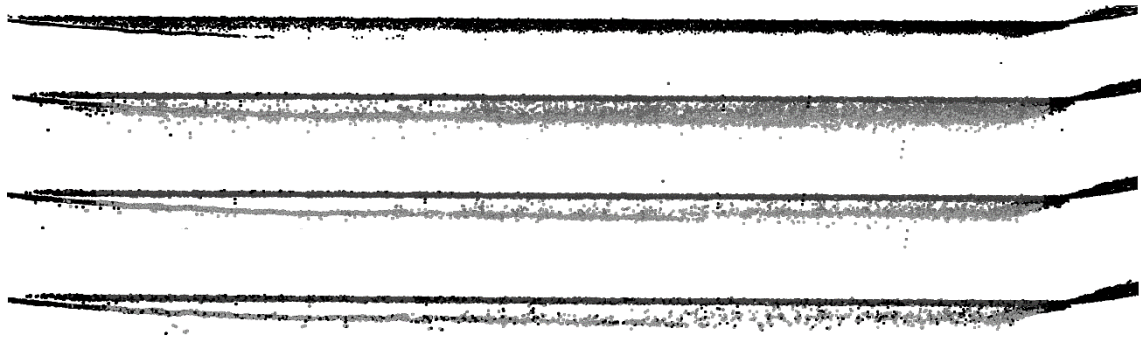


Abb. 6: Vergleich der OWP mit den verschiedenen FWF-Auswertemethoden in der Reihenfolge von oben nach unten: online; Peak Detection; Peak Detection + Wave Stacking; Peak Detection + Wave Stacking + RL Deconvolution.

## 6 FWF-Ergebnisse für die Elbe

Mit der gezeigten Vorgehensweise wurden die FWF-Daten eines 20km langen Abschnittes der Elbe bei Klöden inklusive einiger Nebengewässer ausgewertet. Die Befliegung erfolgte am 07. September 2015 unter Verwendung des VQ880G. Die Daten der OWP wurden bereits im Rahmen eines Pilotprojektes zur DGM-W-Modellierung verwendet (für WSA, BFG & BAW). Es wurden FWFs für 18 Streifenpaare (Vor- & Rückstreifen) ausgewertet. An Hand dieser Auswertung wird der Mehrgewinn durch die nachträgliche Offline-Prozessierung der FWF mehr als deutlich (Abb. 7). In einem Profilschnitt wurden zudem die klassifizierte FWF-Sohlpunkte den OWP-Sohl- und den Echolotpunkten aus 2015 gegenübergestellt (Abb. 8). Lücken zwischen den OWP-Geländepunkten und Echolot 2015 werden mit den FWF-Sohlpunkten geschlossen bzw. deren Größe wird deutlich reduziert. Zudem zeigt sich bei visueller Betrachtung eine gute Übereinstimmung zwischen FWF-Sohle und Echolot 2015 (Abb. 8) und die Differenz zwischen FWF-Sohle und Echolot 2015 weist eine Standardabweichung von 9 cm auf (Abb. 9). Insgesamt betrachtet konnten an der Elbe die nominelle Eindringtiefe von 1.5 m (OWP) auf 2 m (mit FWF) erhöht sowie die räumliche Abdeckung der Sohle um 20-30% verbessert werden.

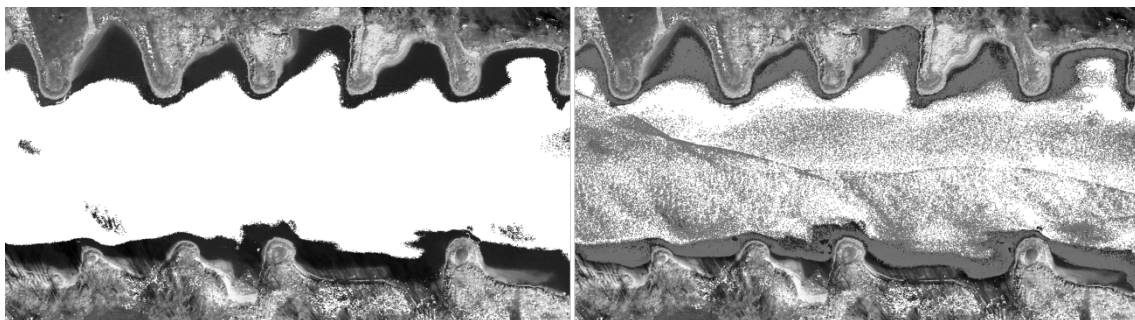


Abb. 7: Draufsicht Elbe. Links: Sohl- und Bodenpunkte aus der OWP. Rechts: Sohlpunkte aus der FWF-Prozessierung in hellgrau.



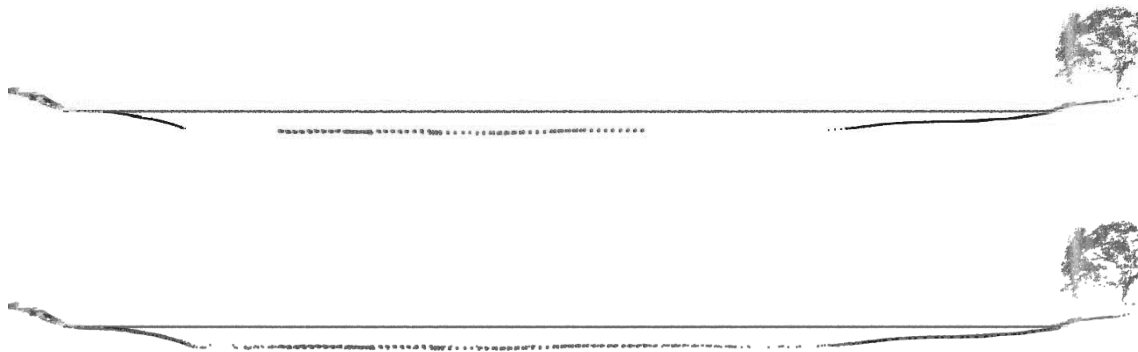


Abb. 8: Oben: Elbe-Querschnitt mit OWP-Punkten (Gelände & Vegetation) eingefärbt nach RGB sowie Wasserspiegel und Echolot 2015 in der zentralen Fahrrinne (oben). Unten: Zum Vergleich zusätzlich dargestellt sind die klassifizierten FWF-Sohlpunkte.

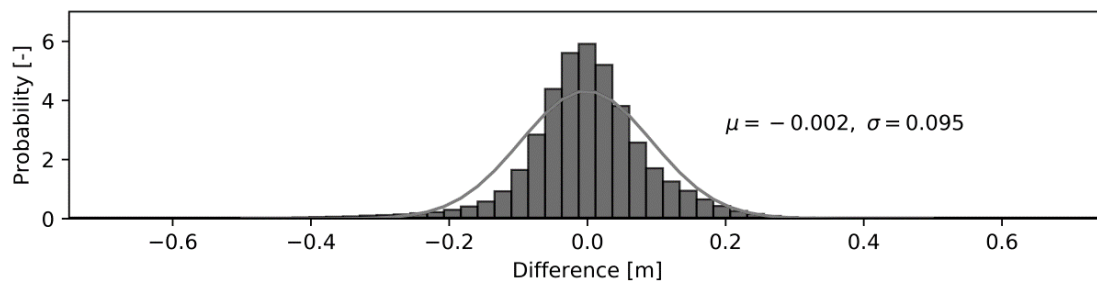


Abb. 9: Differenzen zwischen den Echolot-Daten 2015 und FWF-Sohlpunkten an der Elbe haben eine Standardabweichung von 9 cm.

## Referenzen

- Benger, W., Ritter, G., & Heinzl, R. (2007). The Concepts of VISH. In 4. High-End Visualization Workshop, Obergurgl, Tyrol, Austria, June 18-21, 2007 (pp. 26–39). Berlin, Lehmanns Media-LOB.de.
- Guenther, G.C., Cunningham, A.G., Larocque, P.E., & Reid, D.J. (2000). Meeting the Accuracy Challenge in Airborne Lidar Bathymetry. EARSel EProceedings.
- Petzold, T. (1972). Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters. Scripps Institution of Oceanography. <https://doi.org/10.5811/westjem.2013.7.18472>
- Steinbacher, F., & Aufleger, M. (2013). Airborne hydromapping: A new approach to manage hydraulics, morphology and ecology. International Journal on Hydropower and Dams, 20, 74–77.
- 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.
- Wu, J., Van Aardt, J.A.N., & Asner, G.P. (2011). A comparison of signal deconvolution algorithms based on small-footprint LiDAR waveform simulation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2103080>.

## **Adresse der AutorInnen**

Dr. Wolfgang Dobler (korrespondierender Autor)

DI Frank Steinbacher, Dr. Ramona Baran, Dr. Werner Bengler, Wolfgang Leimer

Airborne HydroMapping GmbH

A-6020 Innsbruck, Feldstr.1b

[w.dobler@ahm.co.at](mailto:w.dobler@ahm.co.at)