

Journal of Applied Hydrography

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

10/2025

HN 132

Vermessung
der
Küstenzone



Fluggestützte Topobathymetrie flacher Küstengewässer

Von der Datenaufnahme zum digitalen Abbild in HydroVISH

Ein Beitrag von RAMONA BARAN, WOLFGANG DOBLER, WERNER BENDER und FRANK STEINBACHER

Küstenzonen sind Hotspots mit komplexen Wechselwirkungen zwischen marinen, terrestrischen und klimatischen Prozessen. Aufgrund ihrer zumeist dichten Besiedlung sind die Auswirkungen des Klimawandels unter anderem über einen steigenden Meeresspiegel hier besonders kritisch und oft auch katastrophal. Für effektive Schutzmaßnahmen sowie zur Erhaltung bedeutsamer Ökosysteme, wie dem Wattenmeer in der Nordsee, ist eine genaue und hochaufgelöste Vermessung der Flachwasserbathymetrie sowohl zur Planung von Schutzmaßnahmen als auch für ein verbessertes Prozessverständnis unerlässlich. In unserem Beitrag konzentrieren wir uns daher auf die effiziente Auswertung fluggestützter Topobathymetriedaten in unserer Software HydroVISH und beleuchten hierzu spezifische Arbeitsschritte näher. Dies vor allen Dingen um zu zeigen, wie aus den gewonnenen Daten ein möglichst optimaler Nutzen im Sinne des Küstenschutzes gezogen werden kann.

Topobathymetrie | Full Waveform | Klassifizierung | Küstenmorphologie | DGM
topobathymetry | full waveform | classification | coastal morphology | DTM

Coastal zones are hotspots with complex interactions between marine, terrestrial and climatic processes. Due to their mostly dense population, the effects of climate change, including a rising sea level, are particularly critical and often catastrophic. For effective protective measures and the preservation of important ecosystems, such as the Wadden Sea in the North Sea, accurate and high-resolution surveying of shallow water bathymetry is essential both for planning protective measures and for improving our understanding of the processes involved. In our article, we therefore focus on the efficient evaluation of flight-based topographic bathymetry data in our software HydroVISH and highlight specific processing steps in more detail. The main aim is to show how the data obtained can be used to achieve the best possible benefits in terms of coastal protection.

Autoren

Dr. Ramona Baran, Dr. Wolfgang Dobler, Dr. Werner Bender und Dr. Frank Steinbacher arbeiten bei der Airborne HydroMapping GmbH in Innsbruck.

r.baran@ahm.co.at

1 Einleitung

In den letzten 10 bis 15 Jahren hat sich die luftgestützte Laserbathymetrie (ALB) sowohl von flachen Küsten- als auch Binnengewässern zu einem State-of-the-Art-Instrument in der allgemeinen Gewässervermessung entwickelt. Damit wird die räumliche (Daten-)Lücke zwischen dem klassischen topografischen Airborne Laserscanning (ALS) und der zur Vermessung der tieferen Bathymetrie eingesetzten Echolotung effektiv geschlossen. Die möglichst engmaschige Vermessung insbesondere von Küstengebieten als einem der am dichtesten besiedelten Lebensräume, wo die Auswirkungen des Klimawandels unter anderem über einen steigenden Meeresspiegel oder Sturmfluten quasi unmittelbar auf Land treffen, gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung.

Zum einen bilden topobathymetrische Vermessungsergebnisse dabei eine wesentliche Arbeits-

grundlage im modernen Küstenschutz, denn aus den Messdaten in Form von Punktwolken werden zuallererst und zumeist hochauflösende Geländemodelle abgeleitet (Abb. 1). Mit diesen lassen sich dann beispielsweise küstennahe Sedimenttransport- und Erosionsprozesse sowie Morphodynamiken von Stränden, Dünen und Wattflächen detailliert analysieren. In diesem Kontext werden topobathymetrische Daten unter anderem verwendet für:

- hydraulische Modellierungen von Sturmfluten und Überflutungsereignissen,
- Dimensionierung und Planung von Schutzbauwerken wie Deichen, Buhnen, Wellenbrechern und Ähnlichem,
- Monitoring und Quantifizierung von Küstenerosion oder -anlandungen bei wiederholten Vermessungen eines Küstenabschnittes,

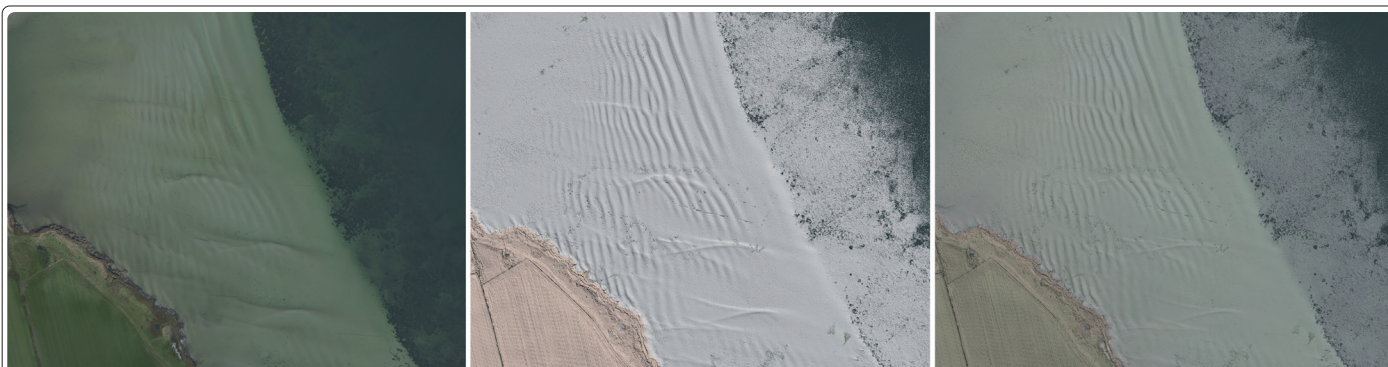


Abb. 1: Ausschnitt eines Küstenbereiches mit typischen wellen- und strömungsbedingten morphologischen Strukturelementen (links Orthobild, Mitte DGM, rechts Überlagerung DGM und Orthobild)

- Bewertung der Wirksamkeit von spezifischen Maßnahmen wie Sandaufspülungen,
- ökologische Bewertung küstennaher Renaturierungsmaßnahmen, z. B. Rückverlegung von Schutzdeichen ins Landesinnere zur Schaffung natürlicher Pufferzonen in Form von Überflutungsflächen.

Topobathymetrische Lasersysteme zeichnen sich insbesondere durch einen kleinen Footprint (Radius 25 cm) und hohe Pulsraten aus, wodurch hochaufgelöste und komplexe Punktwolken erzeugt werden. Unter klaren Wasserbedingungen können so am Ende auch kleinräumige morphologische Details der Gewässersohle bis in eine Wassertiefe von 25 m abgebildet werden (Abb. 1). Die äußeren Witterungs- und Wasserbedingungen sind entscheidende Einflussfaktoren, die die Ergebnisse von ALB-Vermessungen wesentlich beeinträchtigen können. An Meeresküsten führt insbesondere auflandiger Wind schon ab Windstärke 4 zu Wellengang mit Weißwasserbildung und dann zu teilweiser Mobilisierung der Gewässersohle, was zu Trübung führt. Des Weiteren können selbst bei ruhigen Wetterbedingungen andere Prozesse zu Trübung führen, dazu gehören etwa das Auftreten von Ebbe und Flut oder der Eintrag von Trübung an Flussmündungen. Auch die Eigenschaften der Gewässersohle selbst haben Einfluss auf das Messergebnis, eine dunkle Sohle reflektiert weniger gut als ein heller, sandiger Meeresgrund wie in Abb. 1. Wie Vegetation an Land bei der ALS-Vermessung hat auch Unterwasservegetation einen abschattenden Effekt für die Vermessung der Gewässersohle, das heißt, in Bereichen mit dichter Unterwasservegetation kann die Sohle nur lückenhaft erfasst werden. So ist beispielsweise in Abb. 1 im rechten Teil des Orthobilds Unterwasservegetation erkennbar und in genau diesem Bereich zeigen sich beim Vergleich mit dem DGM kleinräumige Lücken (Abb. 1, Mitte).

In solchen Fällen sind dann nicht nur die Laserkonfiguration selbst und die Signaldigitalisierung durch den Sensor während der Datenaufnahme

– das sogenannte Online Waveform Processing (OWP) – von Bedeutung, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, sondern auch die Datenprozessierung nach der Vermessung ist entscheidend, um die Eindringung in den Wasserkörper zu erhöhen und damit die räumliche Abdeckung der Gewässersohle zu erhöhen (Abb. 2). Letzteres wird durch die Auswertung der für alle Lasersignale mit aufgezeichneten Full Waveform (FWF) unmittelbar nach der Datenaufnahme erreicht (z. B. Schwarz et al. 2017 oder Steinbacher et al. 2021).

Die bei der Datenaufnahme und -verarbeitung auflaufenden Datenmengen sind enorm. Bei der Vermessung von größeren Küstenbereichen mit einer zu erfassenden Fläche von ca. 500 km² liegt die Datengröße allein für die aufgezeichneten Rohdaten ohne weitere Prozessierung im Durchschnitt bei 3,5 bis 4 Terabyte (RXP-Format bei Befliegung mit VQ880-G, Riegl LMS). Auch die Komplexität der Daten – zeitliche Verläufe (FWF) und direkte räumliche Information (OWP-Punkte), abgespeichert im selben Datensatz (Abb. 2) – sowie die Notwendigkeit bestimmter Arbeitsschritte bei der ALB-Datenprozessierung – Berechnung der Refraktionskorrektur für Punkte unterhalb des Wasserspiegels zur Ermittlung der korrekten Gewässersohlgeometrie bezüglich Lage und Tiefe/Höhe – stellen einige Herausforderungen an die Verarbeitung und Speicherung topobathymetrischer Daten.

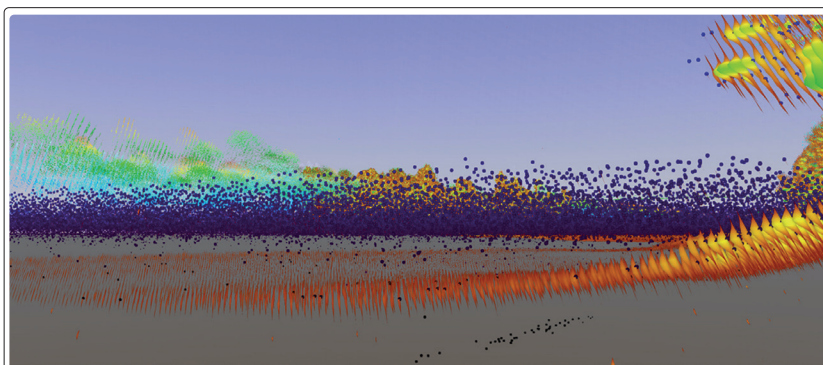


Abb. 2: Visualisierte Full Waveform im Kontext der OWP-Punktwolke zeigt den Mehrgewinn an Information über den Sohlverlauf im Gewässerquerschnitt

Die Airborne HydroMapping GmbH wurde 2010 ursprünglich als akademisches Spin-off der Universität Innsbruck gegründet. Von Anfang an verstanden und verstehen wir uns als spezialisierter Serviceprovider für topobathymetrische Daten, angefangen bei der fluggestützten Datenerhebung, über die spezifische Datenprozessierung mit der hauseigenen Software HydroVISH bis hin zur finalen Berechnung von DGMs als eine der nötigen Arbeitsgrundlagen des modernen Küstenschutzes. Einer der wesentlichen Arbeitsschwerpunkte in den letzten Jahren waren und sind großräumige Vermessungen an der deutschen sowie dänischen Nord- und Ostseeküste sowie auch der westlichen Atlantikküste von Grönland nahe Nuuk. Auf Grundlage früherer (Dobler et al. 2013) und der zuletzt gesammelten Projekterfahrungen stellen wir im Folgenden beispielhaft ausgewählte Arbeitsschritte in unserer hauseigenen Software HydroVISH dar, um optimale Ergebnisse bei der topobathymetrischen Datenauswertung zu erreichen.

2 Hintergrund zu HydroVISH

Durch die Komplexität sowohl der aufgezeichneten ALB-Daten selbst als auch der notwendigen Prozessierungsschritte sind die Anforderungen an geeignete – das heißt skalierbare – Dateiformate für eine effiziente und umfassende Datenspeicherung sowie an Softwarelösungen, die eine interaktive, schnelle und integrierte Datenverarbeitung ermöglichen, gestiegen. Verfügbaren Softwaretools fehlen oft bestimmte notwendige Datenverarbeitungsschritte oder die verwendeten Dateiformate sind zu spezialisiert und daher zu begrenzt, um den gesamten Informationsgehalt der aufgezeichneten Rohdaten während der gesamten Verarbeitungskette zu erhalten (Steinbacher et al. 2021). Darüber hinaus müssen zusätzliche Datenattribute berücksichtigt werden können, um die Analyse topobathymetrischer Punktwolken zu erleichtern. RGB-Werte aus zeitgleich aufgenommenen Luftbildern, räumliche Informationen zu Bodentypen,

Trübungs- und Wasserstandmesswerte von Pegelstationen eines untersuchten Gewässers während der Datenaufnahme sind nur einige dieser Attribute. Die Möglichkeit der Kombination mit weiteren 3D-Daten der Gewässersohle beispielsweise aus Echolotvermessungen erhöht den Mehrwert für eine ganzheitliche Prozessbetrachtung dabei erheblich. HydroVISH (z.B. Benger et al. 2007, 2017) ist die hauseigene Software zur Verarbeitung von topobathymetrischen Daten mit leistungsstarken Visualisierungsansätzen für detaillierte Einblicke und Analysemöglichkeiten dieser Daten (Abb. 2). Es sind keine weiteren Softwarepakete notwendig – alles erfolgt aus einer Hand.

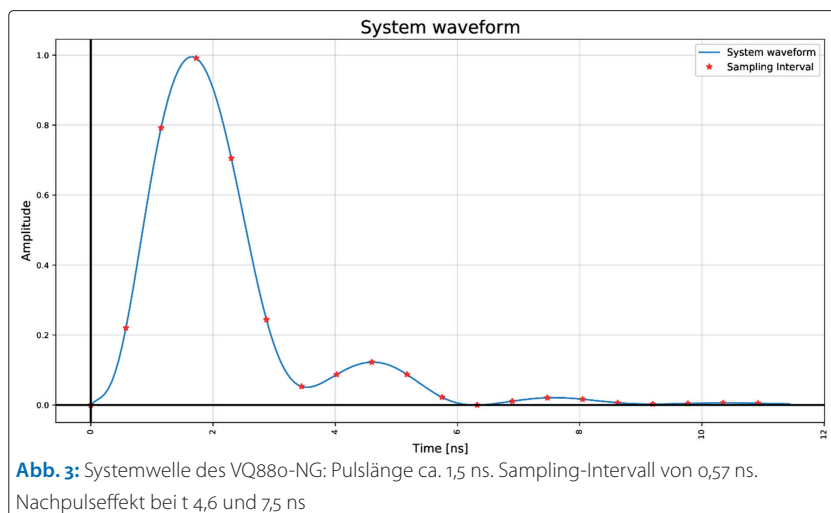
3 FWF-Auswertemethoden für die Peak-Detektion

Die aufgezeichneten Wellenformen sind eine Amplituden-Zeit-Funktion mit einem Sampling-Intervall von 0,57 ns. Die Form der aufgezeichneten Wellenformen hängt auch von der Systemwelle ab, die vom Hersteller vorgegeben ist und besteht hier aus einem möglichst kurzen, gaußähnlichen Puls (Abb. 3). Der Nachpulsereffekt (zweites und drittes Aufschwingen bei $t = 4,6$ und $7,5$ ns) ist hardwarebedingt und lässt sich nicht vermeiden. Dieser Effekt erschwert nicht die Peak-Detektion an sich, sondern vielmehr die Unterdrückung von detektierten Peaks, die nicht vom Hauptmaximum stammen.

Die vom Sensor ausgesendete Systemwelle trifft nun auf ein Objekt am Boden, den beleuchteten Target-Querschnitt (Laserfootprint) und es kommt zu einer Rückstreuung des Signals. Dieses wird von den Fotodioden im Sensor detektiert und in weiterer Folge abgespeichert. Das Zusammenspiel der Systemwelle mit dem Target-Querschnitt wird als Faltung bezeichnet. Das Ergebnis der Faltung ist daher eine durch die Systemwelle leicht geglättete Wellenform mit geringerer zeitlicher Auflösung, die bei einer Pulslänge von $\sim 1,5$ ns dann 0,45 m beträgt, damit zwei Objekte nicht überlappen. Um nun den Effekt der Systemwelle aus der Wellenform herauszurechnen, wird die aufgezeichnete Wellenform entfaltet. Die Entfaltung der FWF ist nicht immer möglich, da das Rauschen dadurch massiv verstärkt wird. Es gibt jedoch zahlreiche Möglichkeiten, wie der Target-Querschnitt rückgerechnet werden kann (z.B. Roncat et al. 2010; Schwarz et al. 2017). In HydroVISH sind vier Methoden implementiert:

- lineares Fitten von einzelnen Gaußkurven,
- Gauß'sche Zerlegung,
- Entfaltung nach Richardson und Lucy,
- hybrider Ansatz aus Gauß'scher Zerlegung und Entfaltung nach Richardson und Lucy.

Das primäre Prinzip der erwähnten Methoden ist eine genauere bzw. verlässlichere Entfernungsbe-



stimmung mit Hilfe der aufgezeichneten Wellenformen (Roncat 2016).

3.1 Ansatz mit Gauß-Funktionen

Die Entfaltung der Wellenformen wird mit Hilfe von eingepassten Gauß-Funktionen angenähert:

$$y_t = A e^{-\frac{(t - \mu)^2}{2s^2}}$$

Dabei ist t die Zeit, A die Amplitude, μ die temporale Peak-Position und s die Pulsweite oder auch Standardabweichung. Dies erfolgt unter der Annahme, dass der rückstreuende Querschnitt sich aus einer Summe von Gauß-Funktionen beschreiben lässt, die auch als Gauß'sche Zerlegung bekannt ist (Wagner et al. 2006). Drei Schritte werden dazu durchgeführt und in den nächsten Abschnitten genauer erläutert:

- Schätzen von lokalen Maxima μ ,
- Schätzen der Gauß-Parameter μ , s und A ,
- nicht lineares Fitten der Gauß-Kurven mit der Methode der kleinsten Quadrate.

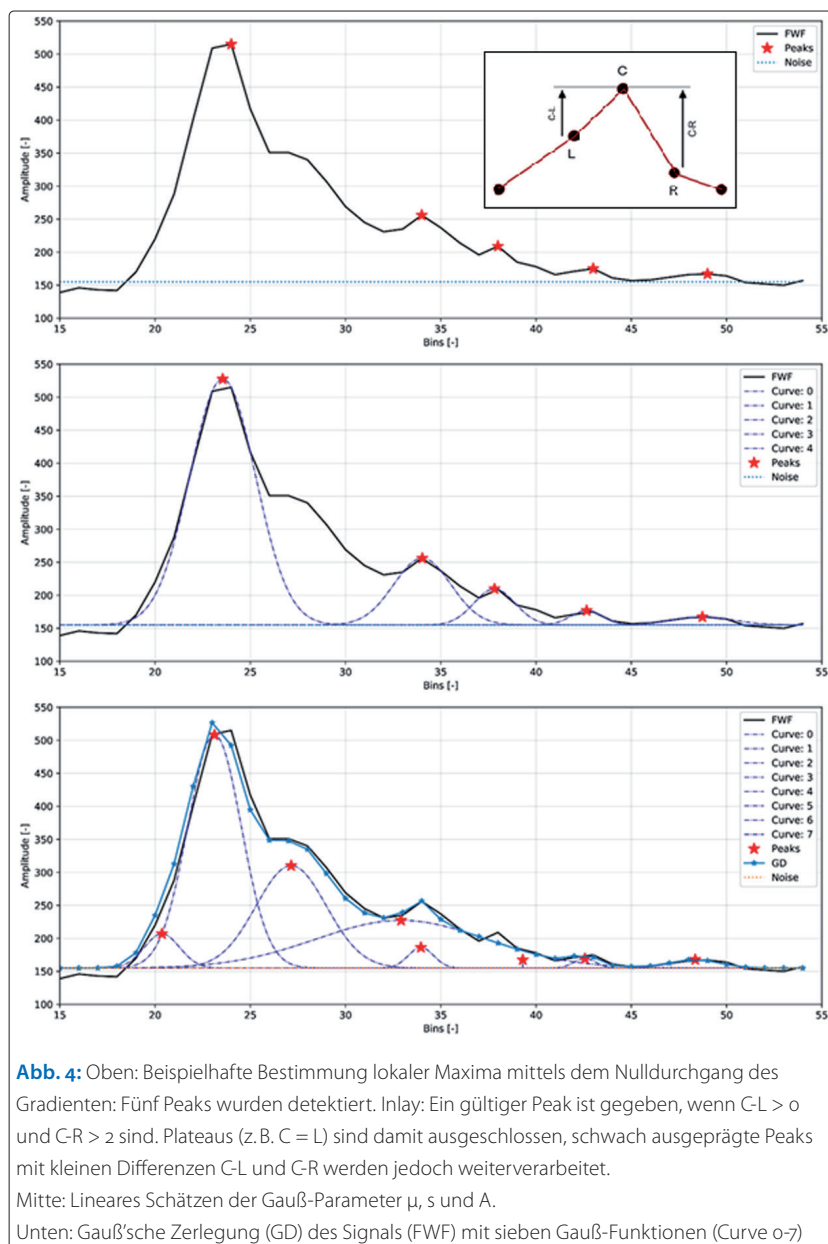
Unter dem zweiten Punkt werden als schnelle und einfache Methode (lineares Fitten von einzelnen Gauß-Kurven) dabei immer anhand von drei Punkten die Gauß-Parameter nach Caruana et al. (1986) geschätzt. Diese Ergebnisse werden dann im dritten Punkt als Startbedingung für das klassische, nicht lineare Fitten nach Wagner et al. (2006) verwendet.

3.2 Bestimmen von lokalen Maxima

Um eine Gauß'sche Zerlegung durchzuführen, wird zunächst nach potenziellen Peaks in der FWF gesucht. Die verwendete Methode ist dabei der Nulldurchgang des Gradienten, der eine gute Abschätzung der zeitlichen Lage des Peaks ergibt und auch nahe beieinander liegende Peaks noch unterscheiden kann (Wagner et al. 1999). Peaks, die durch den Nulldurchgang des Gradienten bestimmt werden, werden nur dann nicht weiter berücksichtigt, wenn sie zu einem Plateau gehören (Inlay in Abb. 4, oben) oder unterhalb des Rauschlevels liegen. Nachdem der Schwellenwert für das Rauschen nur knapp oberhalb davon liegt, werden tendenziell zu viele Peaks detektiert, die dann mit der anschließenden Klassifikation gelöscht werden müssen. Damit erreicht man aber, dass auch sehr schwach ausgeprägte Peaks detektiert werden, die sonst nur durch Nutzung anderer Verfahren wie dem Waveform-Stacking gefunden werden können. Ein Beispiel für die Bestimmung lokaler Maxima ist mit der Detektion von fünf Peaks in Abb. 4 (oben) dargestellt.

3.3 Lineares Schätzen der Gauß-Parameter mit drei Punkten

Mit der Abschätzung der zeitlichen Lage in der Wellenform (Abb. 4, oben) wird für jeden Peak eine



Gauß-Funktion eingepasst. Anhand dieser werden die Parameter μ , s und A geschätzt, die dann im Weiteren für die Gauß'sche Zerlegung verwendet werden. Für das Einpassen wird mit Hilfe des natürlichen Logarithmus die Gauß-Funktion linearisiert (Caruana et al. 1986) und anschließend über drei benachbarte Amplitudenwerte (L , C und R im Inlay in Abb. 4, oben) mit einer QR-Zerlegung gelöst. In Abb. 4 (Mitte) sind die so geschätzten Gauß-Kurven für das Beispiel aus Abb. 4 (oben) abgebildet. Nachdem die zeitliche Position μ , mit der die XYZ-Koordinate des zugehörigen Punktes bestimmt wird, eine ähnliche Lagegenauigkeit aufweist wie der OWP-Punkt, ist das lineare Schätzen als erste Auswertemethode festgelegt worden.

3.4 Gauß'sche Zerlegung

Für die Gauß'sche Zerlegung wird mit den zuvor geschätzten Parametern μ , s und A ein nicht lineares

res Fitten mittels Levenberg-Marquardt-Algorithmus durchgeführt. Dabei werden die Differenzen zwischen der Wellenform und den superponierten Gauß-Funktionen minimiert (Wagner et al. 2006). Sollten nach der ersten Iteration noch Differenzen zwischen den superponierten Gauß-Funktionen und der Wellenform vorhanden sein, werden mit den Differenzen neue Peaks detektiert und anschließend ein weiterer Iterationsprozess gestartet. Abb. 4 (unten) zeigt das Resultat dieses iterativen Prozesses, durch den im Vergleich zu Abb. 4 (Mitte) mit fünf Funktionen drei weitere Gauß-Funktionen ermittelt wurden.

3.5 Entfaltung nach Richardson und Lucy

Der Target-Querschnitt kann wie oben erwähnt durch eine Entfaltung der FWF mit der Systemwel-

le berechnet werden. Der iterative Algorithmus nach Richardson und Lucy ist rechenintensiver als die Gauß'sche Zerlegung, liefert dafür aber bessere Ergebnisse (Wu et al. 2011). Zusätzlich werden die Wellenform und die Systemwelle mittels linearer Interpolation um den Faktor 5 feiner aufgelöst, um die in analytischer Form vorliegende Systemwelle (Abb. 3) besser abzubilden. Das Ergebnis für ein analytisches Testbeispiel mit der Entfaltung nach Richardson und Lucy ist in Abb. 5 (oben) illustriert. Der Target-Querschnitt (dunkelgrün, leicht verdeckt) stellt einen Wasserkörper dar, der am Ende mit zwei Peaks versehen ist. Dieser wird mit der Systemwelle (hellgrün) gefaltet und man erhält die aufgezeichnete FWF (blau), an deren Ende nur noch ein einzelner Peak erkennbar ist. Wenn nun diese Wellenform mit der Systemwelle nach Richardson und Lucy entfaltet wird, erhält man wieder den ursprünglichen Target-Querschnitt (rot) mit dem Doppelpeak am Ende der Kurve. Ein weiterer wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens ist, dass der durch die Systemwelle bedingte Nachpulsereffekt in der Wellenform im Target-Querschnitt nicht mehr auftritt. Nachdem durch das oben beschriebene Sub-Sampling die Auflösung der Wellenform um das Fünffache erhöht wurde, erhält man im Ergebnis eine »geschärfte« Wellenform (Abb. 5, Mitte), die eine einfache und genaue Peak-Detektion mit der im Inlay von Abb. 4 (oben) gezeigten vereinfachten Methode ermöglicht. Im Ergebnis wird die Gewässersohle nach der Entfaltung im Vergleich zur OWP räumlich deutlich besser erfasst.

4 Automatische Klassifizierung von Punktwolken

4.1 Klassifizierung über aufgezeichnete und berechnete Punkattribute

Die Klassifizierung von ALB-Daten konzentriert sich in erster Linie auf die Definition von Gelände- und Wasseroberflächenpunkten. Dabei werden eine Reihe von Klassifikationsansätzen integriert, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Hilfreiche Parameter für die Klassifizierung sind bei der Aufnahme abgespeicherte Punkattribute, wie z. B. die Return Number in Kombination mit der Number of Returns für jeden Punkt. Insbesondere die Vor-Klassifizierung von trockenem Gelände ist durch die Verwendung von Single Returns möglich (Abb. 6). In einem weiteren Schritt müssen Punkte für die Gewässersohle unterhalb der Wasseroberfläche definiert werden. Aufgrund von Ausreißern unterhalb des Geländes, die durch die FWF-Verarbeitung induziert werden, ist eine Punktklassifizierung allein über geometrische Merkmale nicht möglich. Die FWF-Verarbeitung liefert nicht nur eine bessere Abdeckung des Gewässerbodens, sondern eben auch eine dickere Wassersäule und

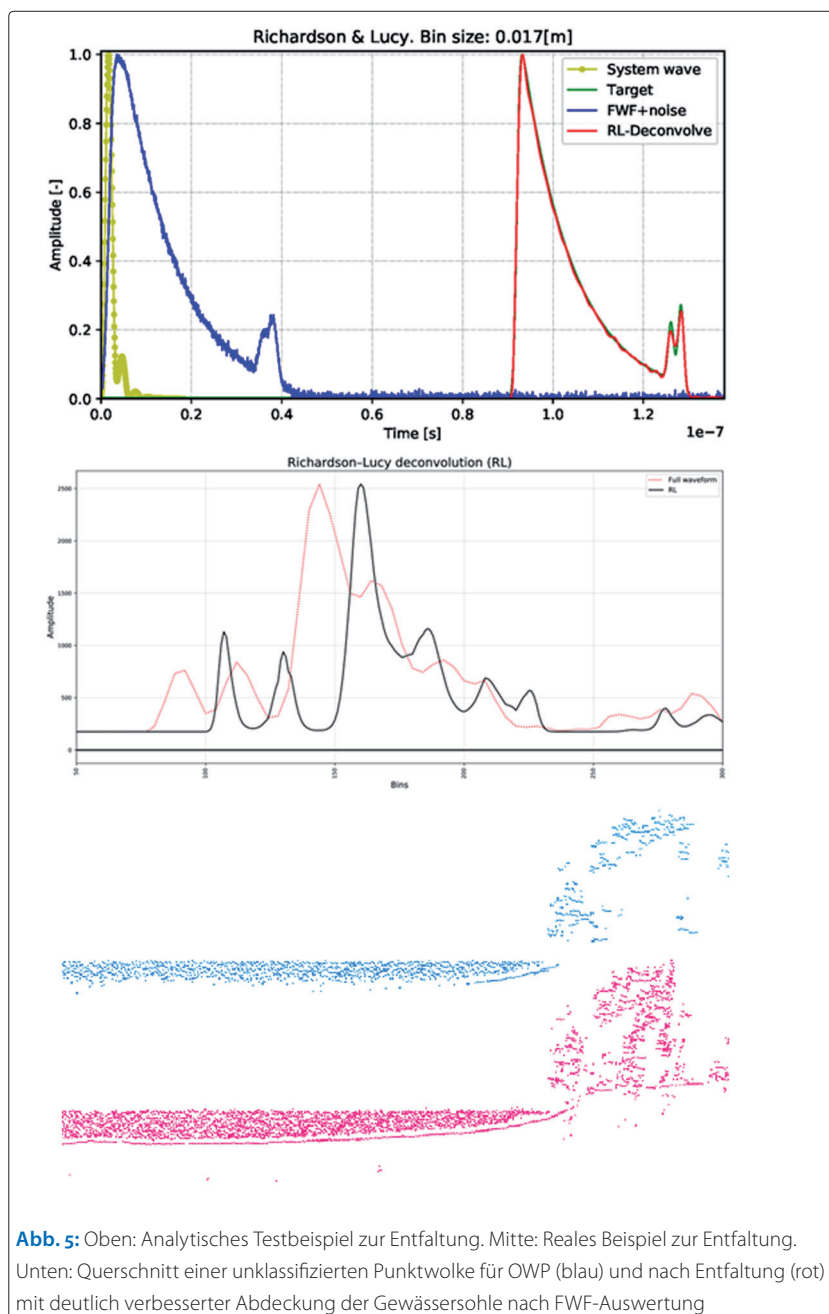


Abb. 5: Oben: Analytisches Testbeispiel zur Entfaltung. Mitte: Reales Beispiel zur Entfaltung. Unten: Querschnitt einer unklassifizierten Punktwolke für OWP (blau) und nach Entfaltung (rot) mit deutlich verbesserter Abdeckung der Gewässersohle nach FWF-Auswertung

gegebenenfalls mehr Ausreißer. Hierfür ist die Amplitude als weiteres Punkattribut gut geeignet. In Abb. 7 (unten) ist der Geländeverlauf unterhalb der Wasseroberfläche als ein Bereich mit Punkten lokaler Amplitudenmaxima sichtbar, unabhängig von der Anzahl und Verteilung der darunter liegenden Ausreißer.

Zur Geländedetektion in ALS/ALB-Punktwolken werden der Zusammenfassung von Lohani und Ghosh (2017) folgend unter anderem morphologische Filter (z.B. Sithole 2001; Meng et al. 2009) und oberflächenbasierte Filter (z.B. Kraus und Pfeifer 1997; Lohmann et al. 2000) und deren Erweiterungen sowie Varianten eingesetzt. Hier werden geometrische Eigenschaften wie die Planarität berechnet, die angibt, wie sehr ein lokaler Bereich in der Punktwolke einer Ebene ähnelt (Abb. 8). Außerdem können mit Hilfe der lokalen planaren Regression Vegetationspunkte in der Punktwolke sehr gut von der Geländeklassifizierung entfernt werden. Diese Attribute und Methoden bieten hilfreiche Indikatoren für die Bereinigung der zuvor extrahierten Geländepunkte, um damit dann die automatische Klassifizierung der Geländepunkte über und unter Wasser abzuschließen (Abb. 9). Gebäude und insbesondere Dächer werden über dreidimensionalen Alpha Shapes identifiziert. Diese lineare Approximation des Datensatzes rekonstruiert die allgemeine Form der Punktwolke. Mit einer guten Schätzung der Alpha-Shape-Werte ist es möglich, nur Geländepunkte zu erfassen und so Gebäude und andere Strukturen von der Geländeklassifizierung zu trennen.

4.2 Klassifizierung mit Random Forest

Der in HydroVISH implementierte Random-Forest-Algorithmus (Breiman 2001) ist eine leistungsstarke Methode des maschinellen Lernens, die insbesondere für die Verarbeitung von ALB/ALS-Punktwolken verwendet wird (Ni et al. 2017). Er funktioniert, indem er eine Vielzahl von Entscheidungsbäumen kombiniert, um ein robustes Modell zu erstellen. Diese Bäume werden unabhängig voneinander trainiert, wobei jeder Baum auf einem zufälligen Unterdatensatz des Gesamtdatensatzes arbeitet. Dieser Ansatz trägt dazu bei, Überanpassung zu vermeiden und die Vorhersagegenauigkeit der Klassifizierung zu verbessern.

Für die Verarbeitung von ALB/ALS-Punktwolken können verschiedene Merkmale bzw. Datenattribute verwendet werden, um den Random-Forest-Algorithmus zu trainieren. Dazu gehören beispielsweise räumliche Positionen, der Normalenvektor oder die Amplitude der Rückkehrsignale, da sie in gewissem Maß Information über die Gelände- und Oberflächenbeschaffenheit und über deren Umgebung beinhalten.

Der entscheidende Vorteil des Random-Forest-Algorithmus ist hierbei die Fähigkeit, mit großen

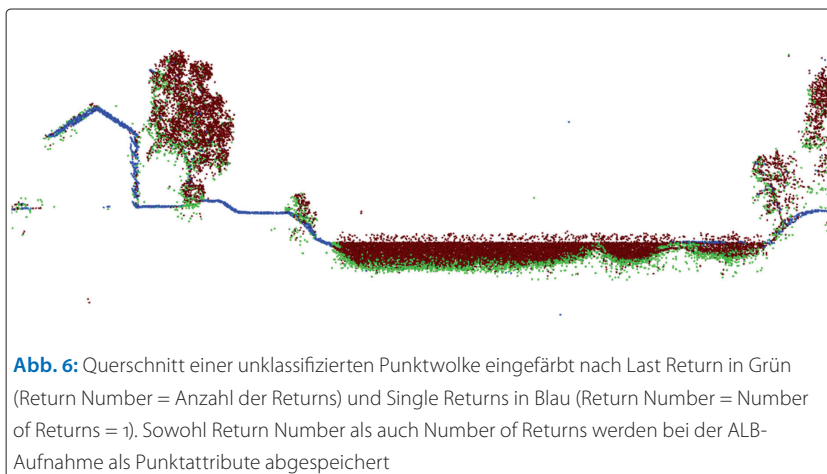


Abb. 6: Querschnitt einer unklassifizierten Punktwolke eingefärbt nach Last Return in Grün (Return Number = Anzahl der Returns) und Single Returns in Blau (Return Number = Number of Returns = 1). Sowohl Return Number als auch Number of Returns werden bei der ALB-Aufnahme als Punkattribute abgespeichert

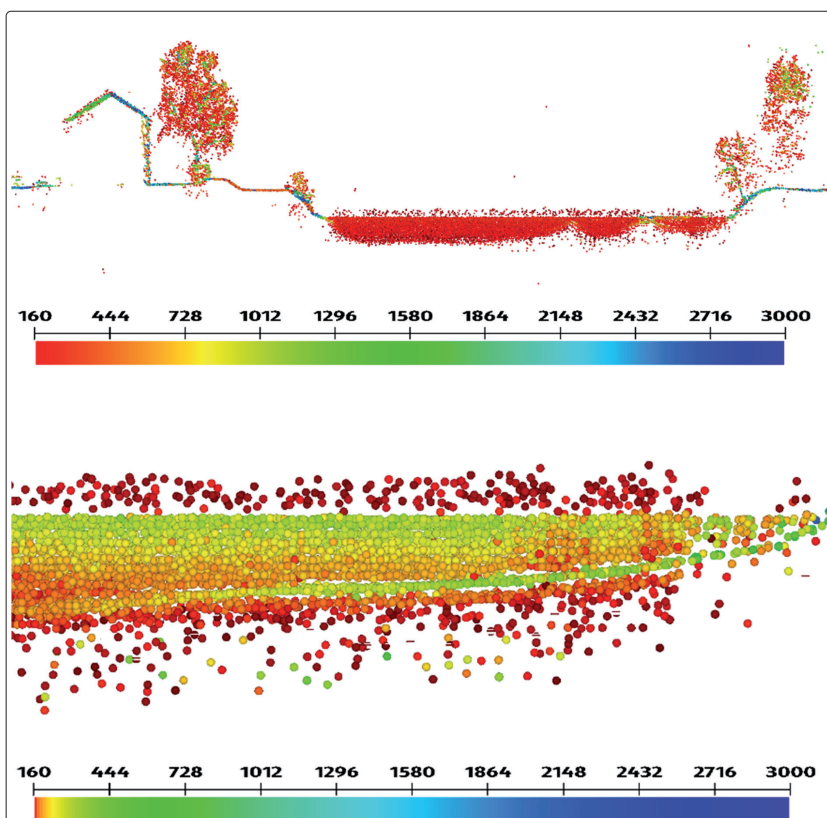


Abb. 7: Querschnitt (oben) und Detailquerschnitt (unten) einer unklassifizierten Punktwolke, eingefärbt nach Amplitude

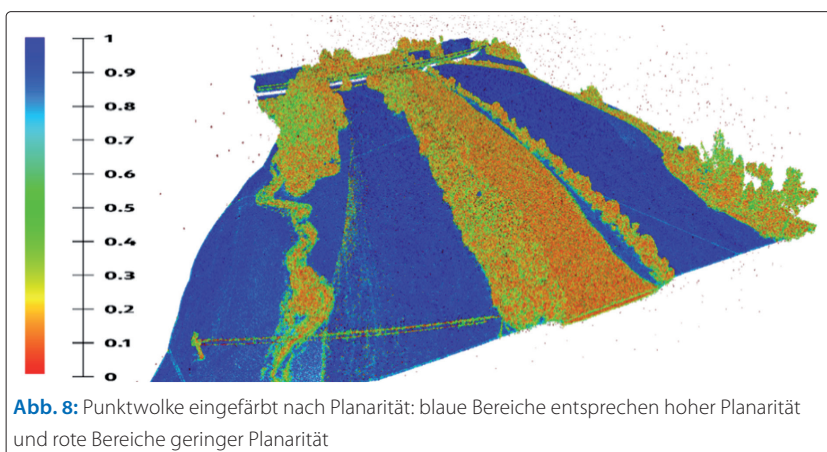
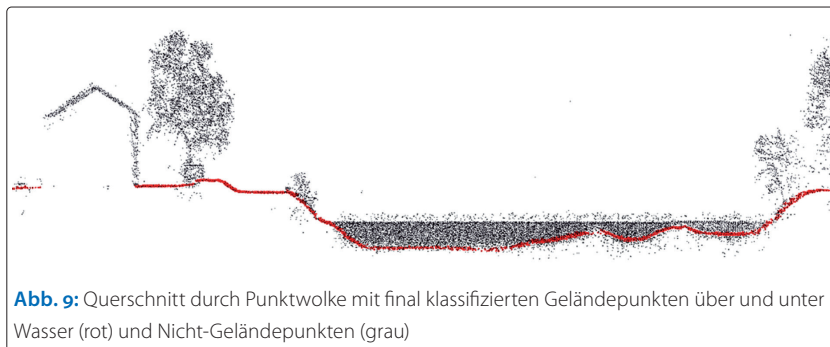


Abb. 8: Punktwolke eingefärbt nach Planarität: blaue Bereiche entsprechen hoher Planarität und rote Bereiche geringer Planarität

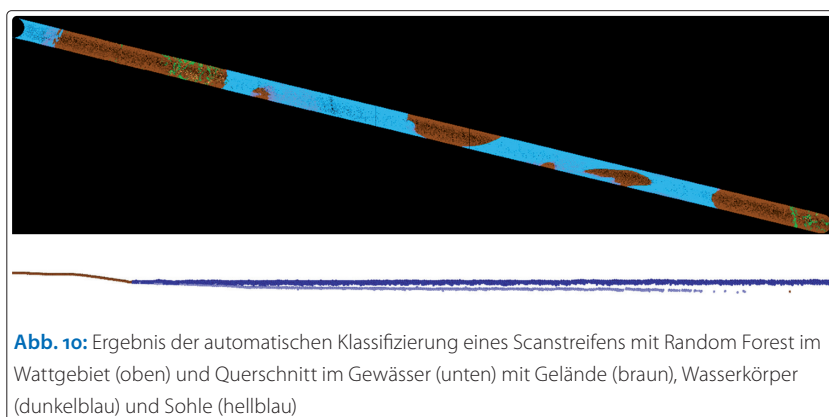


Datensätzen effizient umzugehen, ohne dass eine aufwendige Vorverarbeitung erforderlich ist. Durch die Kombination der Vorhersagen vieler Bäume kann der Random-Forest-Algorithmus präzise Ergebnisse liefern, wie Abb. 10 beispielhaft anhand eines Scanstreifens zeigt. Die Vorklassifizierung erfolgt streifenweise in die grundlegenden Klassen:

- 2 = Boden trocken,
- 4 = Vegetation,
- 6 = Gebäude,
- 8 = Wasser (Wasserspiegel + Wasserkörper),
- 10 = Sohle.

5 Manuelle Editierung von Punktwolken

Die automatische Klassifizierung von ALB-Punktwolken ist nicht fehlerfrei und weist dann lokal begrenzte Fehler auf, z.B. als Wasseroberfläche/ Wasserkörper klassifizierte Gewässersohle (Abb. 11, oben) oder in urbanem Gebiet als Vegetation klassifizierte Hausfassaden sowie vice versa und als Boden klassifizierte Dachflächen (Abb. 11, unten). Zudem kann in besonderen Fällen der geforderte Detailgrad der Punktklassen bezüglich spezifischer Objekte insbesondere von wasserbaulicher Relevanz wie z.B. Buhnen, Brückenpfeilern, Dalben, Brücken usw. bisher nicht ausreichend über automatische Ansätze abgebildet werden. Daher werden die automatischen Klassifizierungsergebnisse der ALB-Punktwolke in HydroVISH grundsätzlich visuell geprüft und entsprechend den jeweiligen Anforderungen manuell korrigiert.



Dafür sind ein effizientes manuelles Toolkit zur Bearbeitung von Punktwolken sowie eine schnelle und flexible Visualisierung und Navigation in Punktwolken unabhängig von der Dateigröße wichtige Voraussetzungen, um den manuellen Korrekturaufwand für Klassifizierungsergebnisse zu minimieren. Manuelle Bearbeitungswerkzeuge sind oft Standardkomponenten verschiedener verfügbarer ALS/ALB-Softwarepakete, wie beispielsweise Terrasolid (Terrasolid Ltd.) oder RiProcess (RIEGL LMS; Steinbacher et al. 2021). Hier stellen wir kurz die in HydroVISH integrierten manuellen Editierwerkzeuge vor (Benger et al. 2023).

5.1 Interaktive Navigation und Selektion

Um für den Benutzer die Orientierung und Navigation in einem globalen ALB-Datensatz für oftmals lokal begrenzt notwendige Korrekturen der automatischen Klassifizierung in HydroVISH zu erleichtern, ist die 3D-Anzeige und Navigation sowohl im gesamten Datensatz als auch in kleineren durch den Benutzer definierbaren großen Teilabschnitten möglich (Abb. 12, oben). Wie in der Bildbearbeitung kann zur Punktauswahl ein Umriss auf dem Bildschirm gezeichnet werden, der dann in den 3D-Raum projiziert wird, um tatsächliche Punkte auszuwählen (Abb. 12, Mitte). Das Programm bietet mehrere Funktionen:

- Polygon: Mit jedem Mausklick wird ein weiterer Punkt hinzugefügt, die Punkte werden durch gerade Linien verbunden.
- Freihand: Während die Maustaste gedrückt gehalten wird, werden der Form Punkte hinzugefügt, während die Maus bewegt wird.
- Eine zuvor unter anderem via Polygon oder Freihand definierte Form kann über den Bildschirm gezogen werden, ähnlich wie ein Pinsel in Adobe Photoshop (Abb. 12, Mitte).

Das Zeichenwerkzeug bietet Auswahlaktionen, die so konfiguriert werden können, dass sie je nach Wahl des Benutzers verschiedene Datenbearbeitungsaktionen ausführen:

- Ohne Konfiguration muss zum Zeichnen einer Auswahl in der Benutzeroberfläche eine bestimmte Schaltfläche angeklickt werden, um Punkte auszuwählen. Dieser Modus ist nützlich, wenn der Benutzer zuerst sorgfältig eine Form zeichnen möchte, bevor er eine Auswahl trifft.
- Die Auswahl kann sofort bei jeder Änderung der Form vorgenommen werden, sowohl beim Hinzufügen weiterer Punkte zur Umrissform (Polygon/Freihand) als auch beim Bewegen einer definierten Form über den Bildschirm (Pinsel).
- Die Auswahl kann vorgenommen werden, wenn die Umrisszeichnung geschlossen ist, das heißt wenn der letzte Punkt eines Umrisses gezeichnet wurde und der Umriss gelöscht wurde,

um eine neue Zeichenoperation zu starten. Dies geschieht in der Regel mit einem modifizierten Mausklick, z. B. Alt + linke Maustaste oder rechte Maustaste, um diesen Vorgang vom Zeichnen der Form zu unterscheiden.

5.2 Klassenbezogene Editierung und Nachvollziehbarkeit

Die Kennzeichnung von Punkten durch Zuweisung ganzzahliger Werte ist das Ergebnis eines Klassifizierungsprozesses zur Identifizierung von Objekten in einer Punktwolke (Abschnitt 4.). Die manuelle Korrektur verbessert die Klassifizierung und liefert die wesentlichen Grundlagendaten für ein verfeinertes Training von Algorithmen via Machine Learning wie mit Random Forest (Abschnitt 4.2.). Bei solchen vorab klassifizierten Datensätzen müssen in der Regel nur wenige Punkte neu gekennzeichnet werden (Abb. 11). Daher ist es wünschenswert, Klassen in »editierbar« oder »nicht edi-

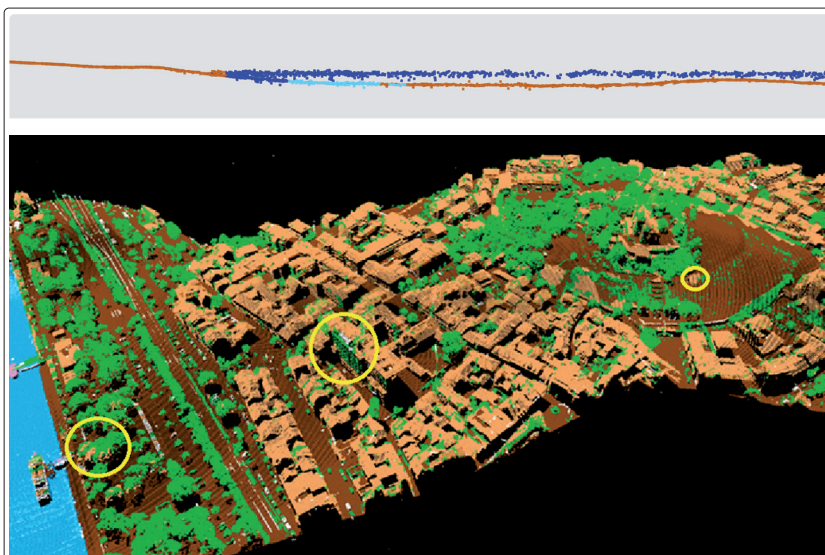


Abb. 11: Beispiele für lokale Fehlklassifizierungen in ALB-Punktwolken im Gewässer (oben) und in urbanem Gebiet (unten). Erläuterung im Text

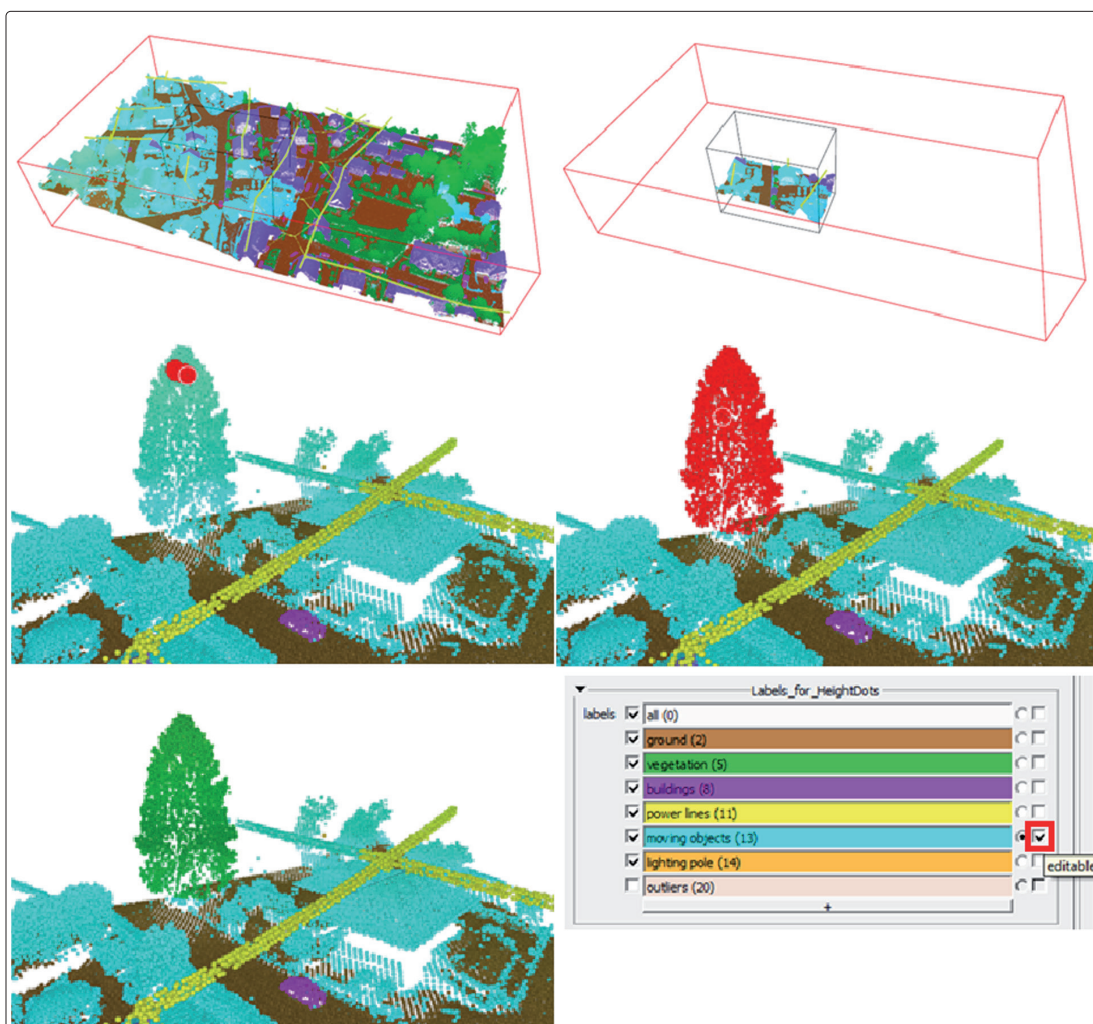


Abb. 12: Oben: Möglichkeit der manuellen Bearbeitung der Punktwolkenklassifizierung entweder in gesamter Punktwolke (links) oder in durch den Benutzer frei dimensionierbaren Teilabschnitten (rechts). Mitte: Manuelle Punktauswahl in HydroVISH via Pinsel-Modus mit Kreisform (rot). Unten: Finale Zuweisung der korrekten Klasse (grün) für zuvor ausgewählte Punkte sowie Festlegung der Editierbarkeit einzelner Punktklassen

tierbar« zu unterscheiden (Abb. 12, unten rechts). Nach Fertigstellung der Punktauswahl kann die korrekte Klasse über eine vom Benutzer definierte Tastenkombination oder eine Schaltfläche der Benutzeroberfläche den ausgewählten Punkten zugewiesen werden (Abb. 12, unten links).

Aber auch bei der manuellen Korrektur der Klassifizierung können Fehler passieren. Um diese auch im Nachgang nachvollziehen zu können, können sämtliche via HydroVISH durchgeführten Korrekturschritte zur Klassifizierung einer Punktwolke gespeichert werden und sind auch nach späterem Neustart des Programmes reproduzierbar. Undo/Redo-Operationen während der manuellen Bearbeitung sind in vielen Anwendungen üblich und in HydroVISH persistent verfügbar als (optionaler) Teil der verarbeiteten Daten. Das bedeutet, wenn festgestellt wird, dass bei der Bearbeitung ein Fehler gemacht wurde, kann dieser mit der Undo-Funktion auch nachträglich behoben und der Klassifizierungsstand vor dem Fehler wiederhergestellt werden. Der Undo-Modus funktioniert dabei auch über eine konfigurierbar beliebige Anzahl von Korrekturschritten hinweg und bleibt im Datensatz nachvollziehbar gespeichert. Gleiches gilt für durchgeführte Redo-Operationen während der manuellen Korrektur. Das Vorgehen und der datentechnische Hintergrund dazu sind in Benger et al. (2023) detailliert beschrieben.

6 Geplante Entwicklungen: Bestimmung minimaler Wassertiefe

In den etablierten Standardanwendungen werden Sohlpunkte bestimmt und daraus ein Unterwasser-DGM. Jedoch liefert die FWF auch in jenen Regionen Information, wo keine Sohlpunkte identifiziert werden können, da die Länge der FWF und damit die Eindringtiefe bekannt ist. Sofern das Signal der FWF durch ausreichende Reflexion im

Wasserkörper (das heißt Trübung) signifikant über dem instrumentellen Rauschen liegt, lässt sich damit – unter Berücksichtigung der Refraktion – die minimale Tiefe der Wassersäule bestimmen, was beispielsweise für die Schifffbarkeit des entsprechenden Gewässers von Bedeutung sein kann. Mangels Nachfrage sind derartige Erweiterungen der FWF-Auswertung bislang noch nicht ausreichend untersucht, jedoch durchaus Forschungsgegenstand weiterer Entwicklungen.

7 Abschließende Bemerkungen

Die Prozessierung topobathymetrischer Daten umfasst noch weitere, hier jedoch nicht näher erläuterte Arbeitsschritte wie die MTA-Berechnung (Multiple Time Around), den Streifenabgleich, die Berechnung der Refraktion oder Qualitätsnachweise. Aber die hier herausgestellten Schritte zeigen, wie komplex der Umgang mit derlei Daten tatsächlich ist und wie wichtig dabei jeder einzelne Arbeitsschritt für optimale Ergebnisse ist. Mit der Verarbeitung topobathymetrischer Daten in HydroVISH wird eine konsistente Prozesskette ausgehend vom Rohdatensatz bis zum finalen Datenprodukt wie einem DGM ermöglicht, ohne in ein anderes Softwarepaket zu wechseln. Dabei ist es auch möglich, in HydroVISH Datensätze weiterer topobathymetrischer Sensoren ausgehend vom entsprechenden Rohdatenformat durch die Implementierung einer jeweiligen Schnittstelle zu prozessieren. Nachdem sich über die luftgestützte Topobathymetrie bisherige Datenlücken in der Flachwasserzone zwischen dem Vorland hin zur mittels Echolot vermessenen tieferen Bathymetrie schließen lassen, ist die Kombination der Messergebnisse aus beiden Vermessungen für die ganzheitliche Betrachtung eines Küstenraums die optimale Lösung und auch dies ist mit HydroVISH effizient möglich (z. B. Dobler et al. 2013). //

Literatur

- Benger, Werner; Georg Ritter; René Heinzl (2007): The Concepts of VISH. 4th High-End Visualization Workshop, Berlin. Lehmanns Media-LOB.de, Obergurgl, Austria, pp. 26–39
- Benger, Werner; Wolfgang Dobler; Frank Steinbacher; Ramona Baran (2017): New technical opportunities for efficient management and integration of big data from topobathymetric projects in applications, data processing and management: Teradot rendering Bavaria in HydroVISH, KomVISH. Hydro 2017 Conference Proceedings, p. 6
- Benger, Werner; Anca Voicu; Ramona Baran; Cosmin Barna; Frank Steinbacher; Loredana Gonciulea (2023): The Method of Mixed States for Interactive Editing of Big Point Clouds. Proceedings of the WSCG 2023 Conference, DOI:10.24132/CSRN.3301.21
- Breiman, Leo (2001): Random Forests. Machine Learning 45, DOI: 10.1023/A:1010933404324
- Caruana, Richard A.; Roger B. Searle; Thomas Heller; Saul I. Shupack (1986): Fast Algorithm for the Resolution of Spectra. Analytical Chemistry, DOI: 10.1021/ac00297a041
- Dobler, Wolfgang; Ramona Baran; Frank Steinbacher; Marcel Ritter; Manfred Niederwieser; Werner Benger; Markus Aufleger (2013): Die Verbindung moderner und klassischer Gewässervermessung – Airborne Hydromapping und Echolotvermessung entlang der Ostseeküste nordöstlich von Kiel. Hydrographische Nachrichten, Nr. 95, pp. 16–22
- Kraus, Karl; Norbert Pfeifer (1997): A new method for surface reconstruction from laser scanner data. In: IAPRS, XXXII, 3/2W3, Haifa, Israel
- Lohani, Bharat; Suddhasheel Ghosh (2017): Airborne LiDAR technology: A review of data collection and processing systems. Proceedings of the National Academy of Sciences, DOI: 10.1007/s40010-017-0435-9

Lohmann, Peter; Andreas Koch; Michael Schäffer (2000):

Approaches to the filtering of laser scanner data. The International Archive of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIII (B3/1), pp. 540–547

Meng Xuelian; Le Wang; José Luis Silván-Cárdenas; Nate Currin

(2009): A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2008.09.001

Ni, Huan; Xiangguo Lin; Jixian Zhang (2017): Classification of ALS point cloud with improved point cloud segmentation and random forests. Remote Sensing, DOI: 10.3390/rs9030288

Roncat, Andreas; Gunther Bergauer; Norbert Pfeifer (2010):

Retrieval of the backscatter cross-section in full-waveform LIDAR data using B-splines. Proceedings of the International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII (3B), pp. 137–142

Roncat, Andreas (2016): Full-Waveform-Laserscanning:

Moment(e), da geht noch mehr! Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI), Nr. 104(4), S. 167–177

Schwarz, Roland; Norbert Pfeifer; Martin Pfennigbauer;

Andreas Ullrich (2017): Exponential Decomposition with Implicit Deconvolution of Lidar Backscatter from the Water Column. Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, DOI: 10.1007/s41064-017-0018-z

Sithole, George (2001): Filtering of laser altimetry data using

a slope adaptive filter. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV (3/4), pp. 203–210

Steinbacher, Frank; Wolfgang Dobler; Werner Benger;

Ramona Baran; Manfred Niederwieser; Wolfgang Leimer (2021): Integrated Full-Waveform Analysis and Classification Approaches for Topo-Bathymetric Data Processing and Visualization in HydroVISH. Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, DOI: 10.1007/s41064-021-00150-3

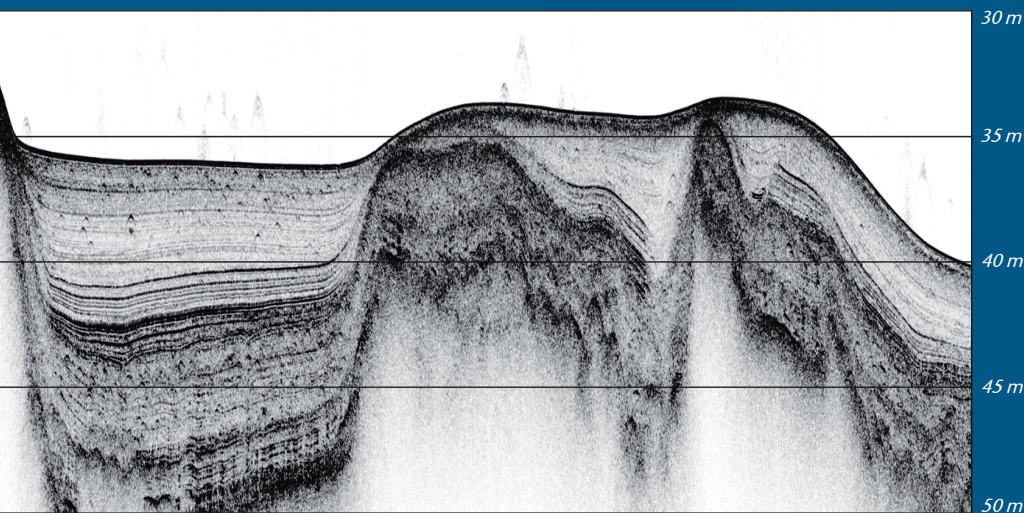
Wagner, Wolfgang; Andreas Ullrich; Thomas Melzer; Christian Briebe; Karl Kraus (1999): From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: Potential and practical challenges.

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXV

Wagner, Wolfgang; Andreas Ullrich; Vesna Ducic; Thomas Melzer; Nick Studnicka (2006): Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2005.12.001

Wu, Jiaying; J. A. N. van Aardt; Gregory P. Asner (2011): A comparison of signal deconvolution algorithms based on small-footprint LiDAR waveform simulation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, DOI: 10.1109/TGRS.2010.2103080

www.innomar.com



Data Example from a Norwegian Fjord (Innomar "standard" SBP, 10 kHz)

Innomar Parametric Sub-Bottom Profilers

- ▶ Discover sub-seafloor structures and buried objects (cables, pipelines)
- ▶ Acquire unmatched hi-res sub-seabed data with excellent penetration
- ▶ Cover all depth ranges from less than one metre to full ocean depth
- ▶ Highly portable equipment for fast and easy mobilisation
- ▶ User-friendly data acquisition and post-processing software
- ▶ Used worldwide for various applications by industry, authorities, science

Next User Workshop "Seabed Acoustics" 5/6. Nov. 2025, Rostock / DE

Innomar Technologie GmbH • Schutower Ringstr. 4 • DE-18069 Rostock • Germany

▶ Shallow-Water Solutions



▶ High-Power Solutions



▶ Remotely-Operated Solutions



▶ Multi-Transducer Solutions



Innomar



A NORBIT Company