

Detailed Analysis of Complex Waveforms of a UAV Laser Bathymetric Profiler

Type: Conference contribution.

Status: Accepted February 18, 2019.

Version: German: Manuscript accepted for publication. English: Translated by Roland Schwarz after publication.

Copyright: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V.

Bibliography: Roland Schwarz and Martin Pfennigbauer. “Detaillierte Analyse komplexer Wellenformen eines UAV Laser Bathymetrie Profilmessgerätes.” In: *Publikationen der deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Band 28*. 2019. URL: https://www.dgpf.de/src/tagung/jt2019/proceedings/proceedings/papers/77_3LT2019_Schwarz_Pfennigbauer.pdf

Detailed Analysis of Complex Waveforms of a UAV Laser Bathymetric Profiler

ROLAND SCHWARZ¹, MARTIN PFENNIGBAUER¹

Abstract: Linear recording of profiles in hydrology and hydraulic engineering is still justified despite the availability of multidimensional modeling. The Bathycropter based on the BDF-1, developed by RIEGL, is a measuring device for profile acquisition especially suitable for small-scale, unmanned airborne applications. The primary expected result of a flight with this instrument is a topographic profile of a water body consisting of the lines of the ground and the water surface. With the recording technique used, the complete waveforms of the backscattered laser echoes are first recorded in order to extract the points of the surface and the ground in a post-processing. The recorded waveforms show a high level of detail which is currently unused and not yet fully understood. While the study of the course of backscattering in the atmosphere is part of the standard repertoire in laser measurement technology, the study of propagation details in the water column has not yet completely arrived in everyday technical life. A distinction between artefacts caused by the method itself and structures useful for the understanding of the water column could be a first step towards a utilization of these data, which are already generated by the method but are currently unused.

This text has been translated from German by one of the authors after publication to make it accessible to non-German readers. The original text appeared in „Publikationen der deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. Band 28, 2019“.

1 Introduction

The exact knowledge of the morphology of water bodies is of considerable importance for a variety of applications. For shipping, fishing, construction projects, environmental protection, assessment of risks from floods and storms or the recording of the damage caused, it is essential to repeatedly carry out high-resolution and precise surveys of the banks, water level, water bottom and the surrounding landscape. In the case of navigable waters, the bottom of the water body can be recorded by means of echo sounding. The acquired data can then be combined with those from land surveying, whereby the immediate bank area can usually not be recorded at all or only inadequately. This problem is solved by airborne laser scanning, where an almost complete survey of water bodies and their surroundings can be carried out from the air. For small, shallow waters or small-scale surveying projects, the traditional method of surveying by means of a measuring pole, which is directly equipped with a GPS receiver or whose position is surveyed from the land by means of a total station, is still used. Especially in the case of running waters, profiles are recorded in this way at predetermined, regular intervals.

Inspired by this classical method of surveying of water streams and taking into account the restrictions regarding weight, power consumption and size, RIEGL developed a laser rangefinder

¹ Riegl Research Forschungs Gesellschaft mbH, 3580 Horn, Austria, E-Mail: [mpfennigbauer, rschwarz]@riegl.com

for the acquisition of water profiles of unmanned flying platforms (UAVs). The rangefinder, which is equipped with a laser emitting at 532 nm, i.e. in the visible green wavelength range, is moved over the water body by the UAV and records the banks, water surface and bottom as far as the water quality and depth allow. By omitting a scanning mechanism, there is no way to capture the entire area of the terrain, but the size and weight of the measuring instrument can be kept small enough to be carried by small UAVs of the weight class < 25 kg. The low flight altitude when using UAVs of < 50 m allows to record the entire echo waveform for later post-processing with suitable software. In addition, the low velocity of typically a few m/s allows the echo signals of successive laser shots to be combined into one measurement. This results in echo waveforms with an improved signal-to-noise ratio compared to single measurements.

Die detaillierte Analyse dieser Wellenformen ergibt nicht nur Lage von Oberfläche und ggf. Grund sondern kann auch Informationen über die Wassersäule wie Absorptionskoeffizient aber auch etwaige Schichtungen liefern. Dies ist Gegenstand dieses Beitrags. Wir verwenden dazu einen Datensatz der auf Hawaii im Hafen von Hilo rund um einen Wellenbrecher aufgenommen wurde.

2 LIDAR Waveforms in Bathymetry

2.1 Full-Waveform LIDAR

For more than a decade, so-called "Full-Waveform" LIDAR (Light Detection and Ranging) systems have been in commercial use (MALLETT & BRETAR 2008). These systems are capable of digitizing the time course of a complete waveform of an emitted laser pulse scattered back from the target and recording it partially or completely. In post-processing, the data acquired in this way can be analyzed using algorithms of varying degrees of complexity and computing time. A standard procedure is the decomposition into Gaussian bell curves, (WAGNER et. al 2006) in which positions of single targets and their amplitudes can be calculated.

The shape of the received waveform depends on the target situation (single target, multiple target) as well as on the shape of the emitted laser signal and the filter characteristics of the receiver.

2.2 Superposition Principle

In case of incoherent detection of the received laser pulse as well as operation of the detector and its receiving electronics in the linear range, the validity of the superposition principle can be assumed. This principle states that the total signal is composed of the partial waves scattered back from individual targets by summation. The received signal

$$p_r(t) = B \sum_i \beta_i p_s(t - 2\frac{n}{c_0} z_i) \quad (2.1)$$

of a number of discrete targets at the distances z_i from the sensor with the backscatter coefficients β_i and a scaling constant B is formed from versions of the effective transmit pulse $p_s(t)$ shifted by twice the transit times $\frac{n}{c_0} z_i$. The constant B summarizes the properties of the sensor, such as transmit and receive aperture, gain of the receiver and the basic attenuation due to the distance between sensor and target. For n the value of the refractive index valid in the respective medium

has to be used, c_0 is the speed of light. Equation (2.1) is valid with good accuracy for targets whose size is small compared to the distance to the sensor. The effective transmission pulse is composed of the shape of the outgoing laser pulse and the impulse response of the receiving filter and is called system waveform in the following (WAGNER et al. 2006).

2.3 Distributed Backscatter from the Water Column

The laser pulse is damped when propagating in water and is scattered by inhomogeneities and particles. The amount of light scattered back towards the sensor is related to the inherent optical properties of water, the absorption coefficient a and the scattering coefficient b , as well as the beam properties and the field of view of the receiving optics. A simplified model, strictly valid

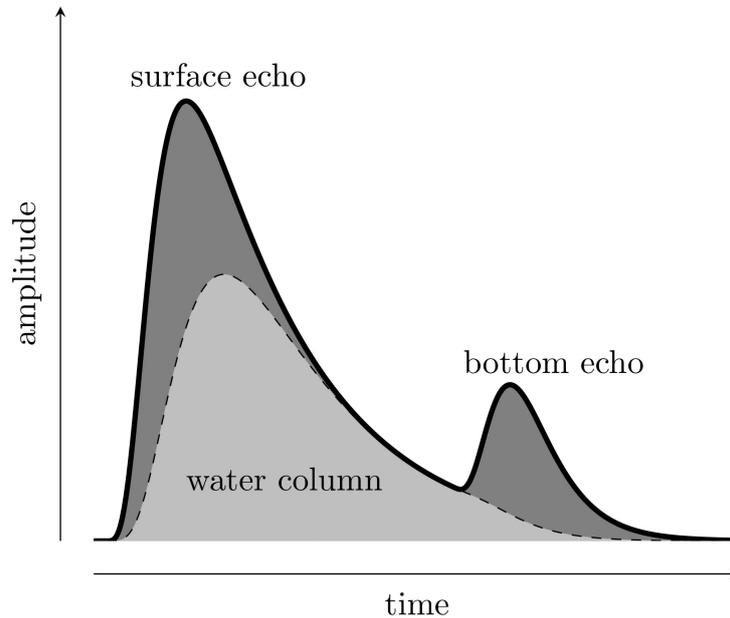


Fig. 1: Prototypical bathymetric waveform consisting of two interface echoes, surface and bottom, and the echo from the water column.

only for an infinitesimal small field of view and homogeneous infinite extended water column is

$$p_r(t) = B \int_{z_0}^{\infty} p_s(t - 2\frac{n(z)}{c_0}z) \beta e^{-2k(z-z_0)} dz \quad , \quad (2.2)$$

where z_0 is the distance to the water surface, β is the backscatter coefficient and $k = a + b$, is the attenuation coefficient, which is the sum of the absorption and scattering coefficient. The exponential relation according to equation (2.2) is the so called "Single Scattering" solution which is also relevant in the "Multiple Scattering" (GORDON 1982) case, although then the damping coefficient must be replaced by an effective damping coefficient. Considering that $n(z)$ for $z > z_0$ can be replaced by the refractive index of water n_w , which is assumed to be constant, (2.2) can be rewritten to

$$p_r(t) = B \int_{\tau_0}^{\infty} p_s(t - \tau) \frac{c_0}{2n_w} \beta e^{-k \frac{c_0}{n_w} (\tau - \tau_0)} d\tau \quad . \quad (2.3)$$

by variable substitution.

The model thus is composed of the sensor-dependent system waveform $p_s(t)$ and the exponential model for the water column by means of a convolution relationship. The system waveform, a device-specific parameter, is obtained by pointing the sensor towards a planar surface perpendicular to the laser beam axis with an extension greater than the laser footprint and then recording the resulting waveform.

2.4 Surface – Volume – Bottom

In contrast to the water column, water surface and bottom are discrete targets and therefore can be modeled as Dirac functions in a first approximation.

With

$$\sigma(z) = \beta_s \delta(z - z_0) + (u(z - z_0) - u(z - z_1)) \beta_v e^{-k(z - z_0)} + \beta_b \delta(z - z_1) \quad (2.4)$$

we get for the prototypical bathymetric waveform the expression

$$p_r(t) = \int_{z_0}^{\infty} p_s(t - 2 \frac{n_w}{c_0} z) \sigma(z) dz \quad (2.5)$$

where $u(z)$ is the Heaviside step function, z_0 is the distance to the water surface, z_1 is the distance to the bottom and $\beta_s, \beta_v, \beta_b$ are the associated backscatter coefficients.

Fig. 1 shows a prototype bathymetric waveform according to equations (2.4) and (2.5).

2.5 Fine Structure

Both absorption coefficient and scattering coefficient are subject to spatial variations. Therefore the model according to section 2.4 must be extended by additional components if necessary.

3 Datasets – Hilo Harbor

For the study, a data set was available that was acquired in June 2018 as part of an evaluation of the applicability of *Unmanned Laser Scanning* (ULS) for the regular inspection of the structural integrity of breakwater walls (LEWINTER et al. 2018). In addition to the recording of the breakwater wall in 3D, two flights with a bathymetric laser rangefinder were carried out. Details about the preprocessing of the trajectory and the data acquisition can be found in LEWINTER et al. (2018).

3.1 3D – Pointcloud

A total of three flights were performed with the topographic scanner RIEGL VUX-1LR. For this study, however, these data sets serve only illustrative purposes. In Fig. 2 the flight with the number 1 is shown as a white band in the lower right part of the picture. The flight altitude was 30 m with a duration of 30 minutes. The data were available as a RiPROCESS (a software of the company RIEGL) project.

3.2 2D – Profile Points

With the BDF-1 from RIEGL, two flights were performed, both at an altitude of 20 m and a duration of about 20 minutes. The BDF-1 is a sensor especially developed for bathymetry with a laser of the wavelength 532 nm to penetrate under the water surface. The nominal measuring rate of the BDF-1 is 4 kHz and the flight speed was 2 m s^{-1} . This results in a point distance of 0.5 mm

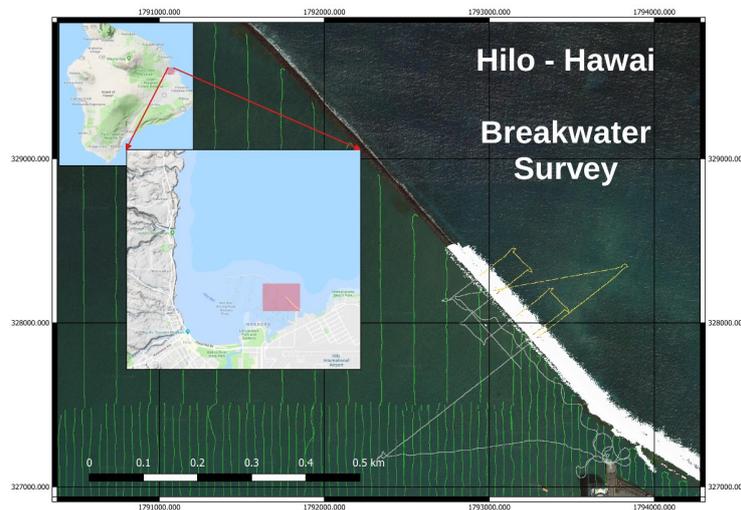


Fig. 2: Overview: Breakwater and measured profiles. White band: VUX-SYS; grey and yellow lines: BDF-1; green lines: echo soundings; Background image and maps: Imagery @2018 Google, Map data @2018 Google.

and after an averaging of 100 measurements a point distance of 5 cm. Water bodies on the port side and in the open sea were surveyed, the results were divided accordingly into two data sets. In Fig. 2 n grey the flights over the harbour basin and in yellow the flights over the open sea can be seen.

3.3 Echo Soundings

As a reference, measurements with the echo sounder from April 2016 were available, which were carried out after dredging work in the port basin (PORTLAND 2016). The soundings were available in a machine readable form. The vertical component was converted to a height coordinate by sign reversal and shifted by an offset of 69,511 *Surveying Foot* . (See section 5.1)

4 Methods

4.1 Preprocessing

In order to increase the performance of bathymetric sensors, high sensitivity is desirable. High sensitivity requires a high signal-to-noise ratio (SNR), which can be increased by averaging before analysis. The SNR increases when averaging M successive measurements according to $\text{SNR}_{avg} = \text{SNR}\sqrt{M}$. The high sensitivity of the sensor is also accompanied by an increased number of false echoes, which are triggered by spontaneous current pulses in the photodetector. To prevent the averaged waveforms from being corrupted by the outliers, they are removed before averaging by using only the 95th percentile of the samples of each sampling instant.

4.2 Decomposition and Classification of the Waveform

The basis for a model that provides additional degrees of freedom to adapt to waveforms caused by underwater structures was presented by SCHWARZ et.al (2017). This model, which consists exclusively of exponential terms, is extended by two elements and thus consists of the following three elements:

$$\begin{aligned}\sigma_E(z) &= (u(z - z_0) - u(z - z_0 - T))\beta_E e^{-K(z - z_0)} \\ \sigma_B(z) &= (u(z - z_0) - u(z - z_0 - T))\beta_B \\ \sigma_D(z) &= \delta(z - z_0)\beta_D\end{aligned}\tag{4.1}$$

σ_E for exponential segments, σ_B for boxcar segments und σ_D for pulse-shaped Dirac segments. The model for the received waveform is

$$p_r(t, \varphi) = \int_0^\infty p_s(t - 2\frac{nw}{c_0}) \sum_i \sigma_{Mi}(z) dz \quad .\tag{4.2}$$

The index M can take the values E, B, D for the different submodels and φ stands for a tuple, where the elements are the parameters of all subcomponents.

The samples of the received waveform at the discrete points in time t_n are designated $y(t_n) = y_n$. The decomposition of the waveform is now carried out step by step, adding a new component to the model in each step. Assuming that the model of the m - th substep is $p_{r,m}(t, \varphi_m)$ a waveform reduced by this value is first determined

$$y_{m+1}(t_n) = y_m(t_n) - p_{r,m}(t_n, \varphi_m) ,\tag{4.3}$$

by which a single element model according to equation (4.1) is selected and used to estimate parameter values. These parameters are appended to the tuple to create the new tuple φ_{m+1} . Using a non-linear "least squares" method, such as Levenberg-Marquardt, the entire new tuple parameter is now adjusted

$$\varphi_{m+1,opt} = \underset{\varphi_{m+1}}{\text{argmin}} \sum_n [y(t_n) - p_{r,m+1}(t_n, \varphi_{m+1})]^2 \quad .\tag{4.4}$$

The iteration is stopped if the root of the mean square residual error is in a comparable order of magnitude with the measurement errors or if no improvement is achieved between steps. Unlike

SCHWARZ et. al (2017), we allow overlapping positioning of the submodels within the model used here.

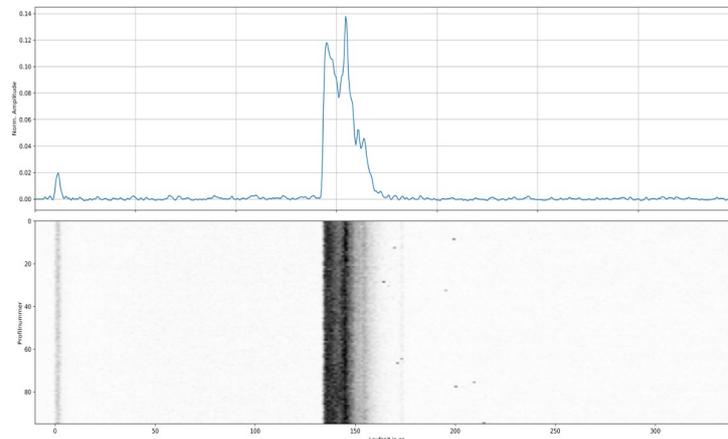


Fig. 3: Three-dimensional waveform display as waveform stack. Upper: Samples of a waveform profile. Lower: Successive waveform profiles with amplitudes coded as grey values. Dark spots correspond to large amplitude.

The parameters of the resulting tuple are used to generate a point cloud. The parameters corresponding to the z_0 are interpreted as target locations and the areas of the submodels are used as amplitudes. The additional parameters T, K are considered as additional attributes in the classification for surface and bottom. The empirically established classification algorithm initially considers only points whose attributes qualify wide targets ($T > 0$) with high amplitude.

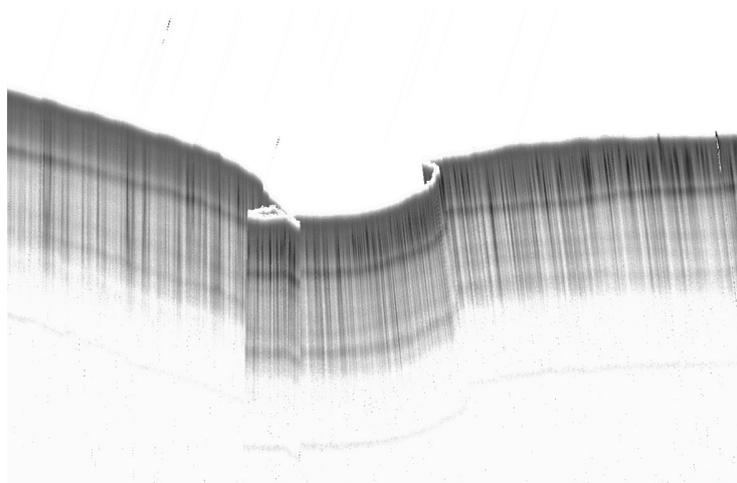


Fig. 4: Four-dimensional (curtain) representation of the waveforms as pseudo point cloud. Dark coloring means high amplitude, bright areas low amplitude. The upper edge of the *curtain* corresponds to the water surface.

If there is only one such item, it is considered a water column. If there are several points, the point with the second highest amplitude is used for the water column, but only if it is before the point with the highest amplitude. The water surface is then determined as the leading edge of the water column determined in this way. For the bottom, the point with the highest amplitude is then selected from the remaining points. The rest of the points remain without classification.

4.3 Waveform as Pseudo Point Cloud

For the consideration of the neighborhood relations of individual waveform profiles, a three-dimensional representation proves to be useful. The horizontal axis of the three-dimensional representation shows the time of flight and the vertical axis shows the sequence number of the waveform profile. The third dimension is defined by a gray value which corresponds to the

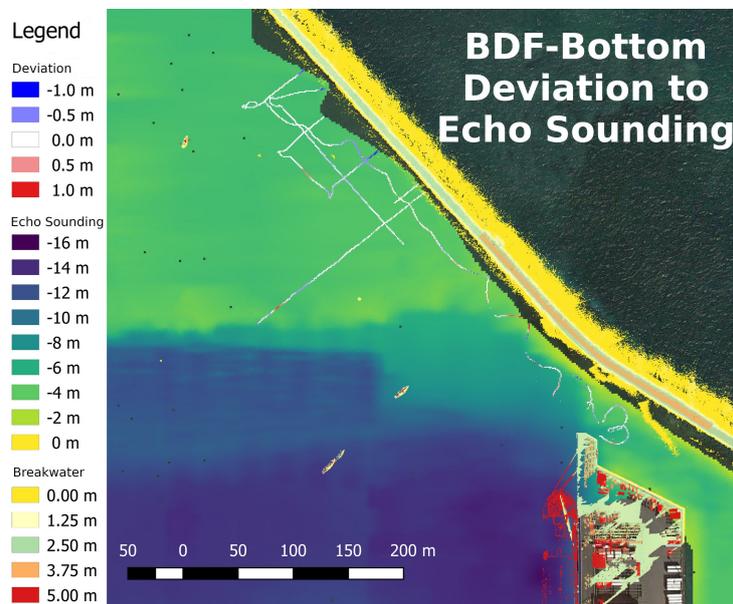


Fig. 5: BDF - Bottom deviation. The deviation is larger than 0.5 m only at a few places. Depths up to approximately 5 m to 6 m were covered.

amplitude of the sampled value of the waveform. Fig. 3 shows an exemplary representation of 100 waveform profiles as *waveform stacks*. Adding another, fourth dimension to this representation by bringing the grayscale waveform profiles from the sensor coordinate system (Fig. 3) into the project coordinate system results in a representation similar to a curtain as shown in Fig. 4.

5 Results and Discussion

5.1 Bottom of the Harbor

The main application of the BDF-1 is the surveying of underwater terrain. However, the available data was not collected for the purpose of a comprehensive survey of the harbour bottom, but only to estimate the potential of the sensor for such an application. The complex waveforms, see Fig. 6, with a high number of local maxima make the reliable detection of the bottom echo a non-trivial problem. With an algorithm based on the classification algorithm described in section 4.2 the surface and bottom echoes were determined.

An echo sounder survey from 2016 was available as a reference for the ground profiles of the BDF-1. Unfortunately, it was not possible to use these measurements for an absolute comparison, because despite reference to MLLW (Mean Lower-Low Water), in both cases, an unexplained vertical offset of more than 3m remained, as we were informed by the operator. We have therefore determined the mean distance between echo sounding and (refraction-corrected) BDF-1 ground points and subtracted it before comparison. The echo soundings were interpolated by resampling a triangulation with a density of $1Pkt./m^2$, triangulated again and smoothed with a Laplace kernel. The triangles were colored with a scale corresponding to the depth below the

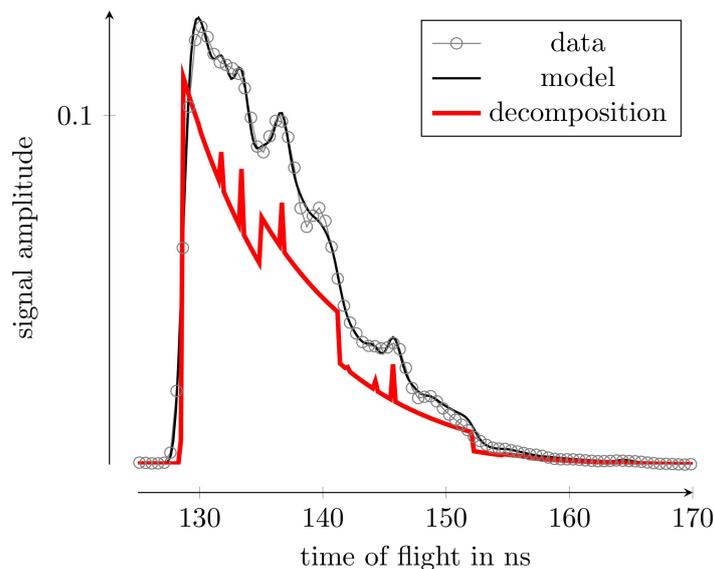


Fig. 6: Waveform decomposition. The model is obtained as the convolution of the system waveform and the decomposition.

project water level. The project water level was determined to coincide with the water surface of the BDF-1 measurement. In Fig. 5 the difference between the BDF-1 bottom points and the interpolated echo sounder area can be seen as a mainly white line. Although the structure of the ground is not very pronounced, it can be seen especially near the landing stage that the courses follow each other within a deviation of 0,5 m. In comparison with Fig. 2 it can be seen that depths greater than 5 m to 6 m were not captured.

5.2 Attenuation Coefficient

If the waveforms are decomposed as described in section 4.2, attenuation coefficients K are obtained. Fig. 6 shows an example of a decomposition. The convolution of the curve shown in red with the system waveform (not shown) produces the black solid line, called the model in the figure. The sampled values of the measurement are marked by circles, the model practically coincides with the sampled values in the diagram. It can be seen that smaller fluctuations are

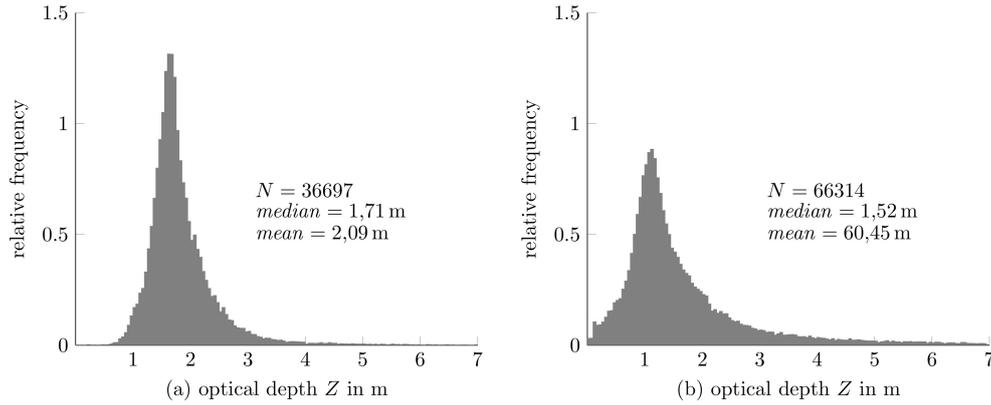


Fig. 7: Histogram of optical depths, (a) water surface, (b) underwater.

superimposed on an essentially exponential decay. The leading edge of the exponential body also defines the water surface.

The attenuation coefficients K have dimension m^{-1} and their reciprocal values $Z = 1/K$ can be interpreted as optical depth. This relationship makes K and Z interesting for the measurement of suspended solids (see e.g. ZHAO et. al (2018)). If one determines a histogram of all optical depths present in the data set, one initially obtains a distribution with two maxima. A separation of the optical depths into two classes, one class containing all the exponential terms defining the water surface and one class containing all the others leads to Fig. 7 (a) and (b).

For the present data set no reference measurements of water quality or a determination of the Secchi depth are available. If one considers the relation (GUENTHER 1985)

$$Z_s K = \eta \quad (5.1)$$

where Z_s is the Secchi depth and η is a value between 1,1 and 1,7, which depends in a complex manner on the inherent optical properties of attenuation and scattering of the water body, then

$$Z_s = \eta Z \quad (5.2)$$

For Z_s taking Fig. 7 (a) into account, values from 2,5 m to 3 m are obtained. From the observations in section 5.1, it follows that the achieved depth is approximately 5 m to 6 m, corresponding to

twice the Secchi depth, a value that is consistent with expectations about the possible performance of the sensor.

The distribution of optical depths in Fig. 7 (b) shows, in contrast to (a), a much higher asymmetry to larger values, but also (a) shows a non-Gaussian shape. While in case (a) the achieved depth performance provides a plausible explanation for the median resp. the mean value, we have no explanation for case (b). We therefore believe that a more detailed systematic

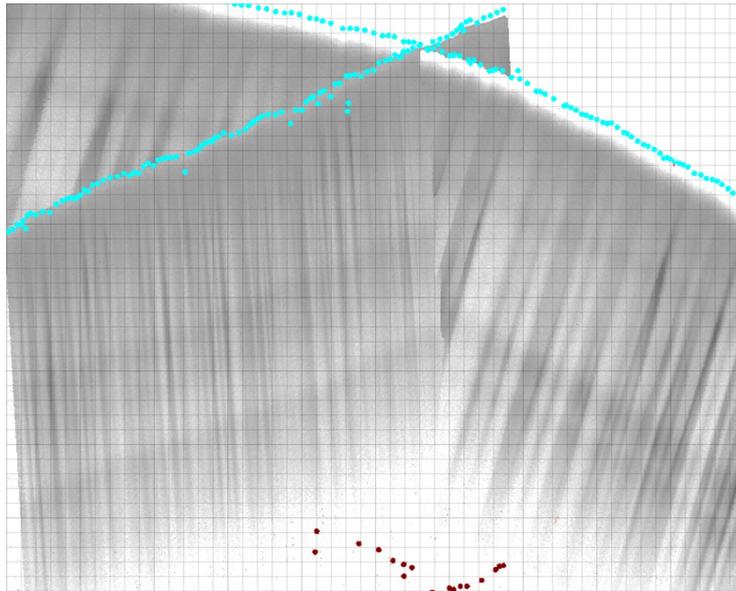


Fig. 8: *Curtain display* of the unaveraged waveforms. The time between profiles is 74 minutes. Superimposed on the *curtain display* are the determined surface (blue) and the bottom (brown).

investigation is worthwhile, especially in connection with the stratification discussed in the next section 5.3.

5.3 Stratification

The investigated data set shows variances that are superimposed upon the prototypical waveform (Fig. 1). These deviations are initially indistinguishable from random variations in the isolated waveform. An indication that these are not purely statistical disturbances, e.g. caused by the sensor electronics, is the fact that the deviations are clearly visible even after summing 100 successive waveforms. The base data in Fig. 6, show an averaged waveform of 100 data sets, corresponding to a time span of 25 ms resp. a distance of 5 cm. Fluctuations of the medium that occur faster or have a shorter length are considerably damped by the averaging process. The presence of the variances therefore suggests that these variations reveal structures of the medium, i.e. the water column. Fig. 8 shows two *waveform curtains* of the unaveraged waveforms, as described in section 4.3, on which the determined surface (blue) and the bottom (brown) were superimposed. A distinct horizontal layer structure can be seen which even appears before

averaging and does not appear to be caused by the measuring process. In addition, very slow changes can also be observed. The two profiles in Fig. 8 how a difference in the time of acquisition of 74 minutes and were selected because the intersection point shows that the stratification has changed during this period. At other intersections the stratification has remained unchanged.

In contrast to the horizontal structures the vertical structures are obviously correlated with the

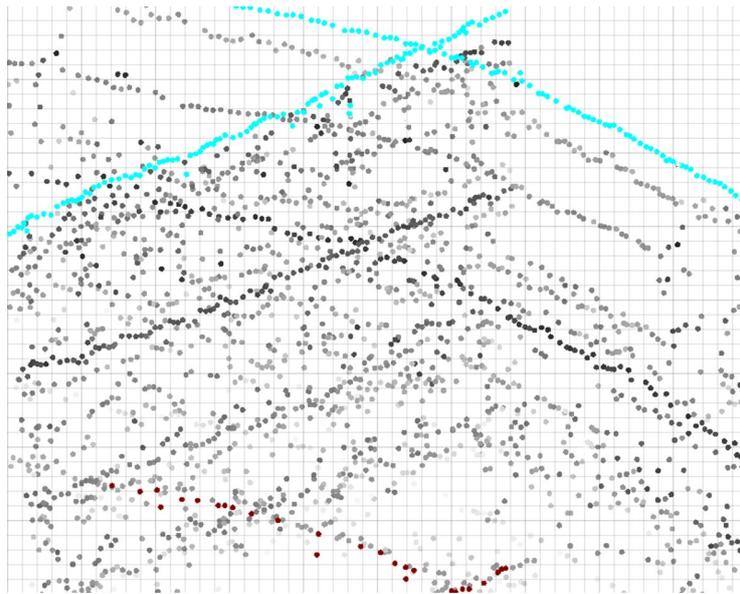


Fig. 9: Point cloud display of the waveform decomposition.

measuring process, they occur along the laser beam direction. Neighboring waveforms, however, are not simply similar to each other via scaling, which would indicate a varying sensitivity of the sensor, but also show structural differences.

When the waveform is decomposed, as described in section 4.2, besides the classification of the surfaces and bottom points, further discrete points and their associated amplitudes are generated. If these points are represented as a point cloud colored with the amplitude, one obtains Fig. 9, which shows the same image section as Fig. 8. Without doubt, this type of display as a pure point cloud does not necessarily increase clarity, but it does have the advantage that the influence of the system waveform has been compensated and the emerging line structure can be identified as concrete geometric locations under the water surface. An interesting extension of the representation beyond the point cloud would be the representation of the exponential and pulse segments found in the decomposition as linear, extended elements. We expect a more prominent layer structure, comparable to that shown in Fig. 8.

The emerging structures suggest that quantitative relationships with the concentration of suspended matter should be investigated. The question should also be asked whether there is a correlation with the temperature profile and whether the measured data can be used to determine the water quality.

5.4 Open Sea

The validity of the waveform decomposition according to section 4.2 is based on the fact that it can be assumed that the superposition law applies for the individual components. However, if the receiver's level is very high, which can occur at great optical depth or measurement on land, the prerequisite for the superposition law is no longer fulfilled. The upper part of Fig. 10 shows that the bottom echo in the open sea is so strong that the sensitive channel used for waveform

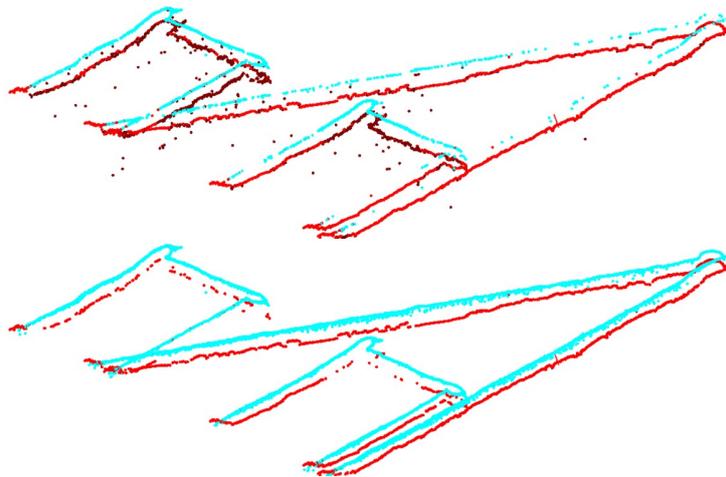


Fig. 10: Measurement profiles over open sea. In red the very strong bottom echo. Upper partial image: Water surface not determined due to overdrive. Lower partial image: By partial evaluation of the overdriven channel a determination of the water surface becomes possible.

decomposition is overdriven in such a way that a second, insensitive channel, shown in red in the figure, is used for the measurement. Despite overdrive, the waveforms continue to be recorded even in the sensitive channel. The occurrence of an overdrive can only corrupt signal values which are later than the time of the overdrive. Since the signal is received from the water surface before the overdrive time due to the bottom echo, the water surface can be determined using waveform decomposition in the sensitive channel. The lower part of Fig. 10 shows the water surface determined in this way, without which a refraction correction of the ground echoes is not possible.

6 Conclusion & Prospects

With the BDF-1, (Bathymetric Depth Finder) introduced by RIEGL two years ago, it is possible to record georeferenced profiles in water bodies. The complexity of the waveforms makes it difficult to determine the bottom echoes on the one hand, but on the other hand it shows a richness of detail in the spatial structures. We have shown that a stratified structure appears in the water column which must be assumed to be related to actual stationary inhomogeneities of the medium and not caused by signal noise and fluctuations. We expect that quantitative

correlations with the concentration of dissolved sediments or suspended solids below the surface can be established and we encourage experiments to uncover the laws that govern these relationships.

7 Acknowledgements

The work presented is based on data material provided by „US Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Remote Sensing/GIS Center of Expertise“ (Adam L. LeWinter, Peter J. Gadomski und David C. Finnegan). We thank our colleague Andrea Spitzer and the colleagues Alexander Haring and Christian Sevcik for their support.

8 References

- GORDON, H. R. (1982).** *Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering*, Applied Optics 21 : 2996.
- GUENTHER, G. C. (1985).** *Airborne laser hydrography system design and performance factors*, .
- LEWINTER, A.; PFENNIGBAUER, M.; GADOMSK, P. J.; FINNEGAN, D. C.; SCHWARZ, R.; TRUONG, M.-L. AND PODOSKI, J. H. (2018).** *Unmanned aircraft system-based lidar survey of structures above and below the water surface: Hilo Deep Draft Harbor Breakwater, Hawaii*, .
- MALLET, C. AND BRETAR, F. (2008).** *Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64 : 1-16.
- PORTLAND, D. C. O. E. (2016).** *Condition Survey, Hawaii Hilo Harbour*, .
- SCHWARZ, R.; PFEIFER, N.; PFENNIGBAUER, M. AND 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.
- WAGNER, W.; ULLRICH, A.; DUCIC, V.; MELZER, T. AND 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.
- ZHAO, X.; ZHAO, J.; ZHANG, H. AND ZHOU, F. (2018).** *Remote Sensing of Suspended Sediment Concentrations Based on the Waveform Decomposition of Airborne LiDAR Bathymetry*, Remote Sensing 10 : 247.

Detaillierte Analyse komplexer Wellenformen eines UAV Laser Bathymetrie Profilmessgerätes

ROLAND SCHWARZ¹, MARTIN PFENNIGBAUER¹

Zusammenfassung: Lineare Erfassung von Profilen in der Hydrologie und im Wasserbau hat trotz der Verfügbarkeit von mehrdimensionaler Modellierung nach wie vor seine Berechtigung. Der von RIEGL entwickelte Bathycropter, ein unbemannter Oktokopter ausgestattet mit dem Bathymetric Depth Finder RIEGL BDF-1, ist ein für die Profilerfassung speziell für die kleinräumige, unbemannt-luftgestützte Anwendung geeignetes UAV. Das primär erwartbare Ergebnis aus einer Befliegung mit diesem Vermessungs-UAV ist ein topografisches Profil eines Wasserkörpers bestehend aus den Linien des Bodens und der Wasseroberfläche. Bei der verwendeten Aufnahmetechnik werden dabei zunächst die kompletten Kurvenformen der rückgestreuten Laserechos aufgezeichnet, um in einer Nachverarbeitung die Punkte der Oberfläche und des Bodens zu extrahieren. Die aufgezeichneten Wellenformen zeigen dabei hohes Detailreichtum, der derzeit ungenutzt und noch nicht zur Gänze verstanden ist. Während das Studium des Verlaufs der Rückstreuung in der Atmosphäre zum Standardrepertoire in der Laser-Messtechnik zählt, ist die Beschäftigung mit den Ausbreitungsdetails in der Wassersäule noch nicht vollständig im technischen Alltag angekommen. Eine Unterscheidung von Artefakten, die durch das Verfahren selbst verursacht sind, und Strukturen, die für das Verständnis der Wassersäule nützlich sind, könnte ein erster Schritt zu einer Nutzbarmachung dieser durch das Verfahren ohnehin anfallenden und derzeit brachliegenden Daten sein.

1 Einleitung

Die genaue Kenntnis der Morphologie von Gewässern ist für eine Vielzahl von Anwendungen von erheblicher Bedeutung. Für die Schifffahrt, Fischerei, Bauprojekte, Umweltschutz, Abschätzung von Risiken durch Fluten und Stürme oder die Erfassung der entstandenen Schäden ist es unerlässlich, wiederholt hochauflösende und präzise Vermessungen von Ufer, Wasserspiegel, Gewässergrund und der umliegenden Landschaft durchzuführen. Bei schiffbaren Gewässern kann die Erfassung des Gewässergrunds mittels Echolot erfolgen. Die gewonnenen Daten können dann mit jenen von Landvermessung kombiniert werden, wobei der unmittelbare Uferbereich meist gar nicht oder nur unzulänglich erfasst werden kann. Dieses Problem wird durch Airborne Laserscanning gelöst, wo von der Luft aus eine nahezu lückenlose Erfassung von Gewässern und deren Umland erfolgen kann. Für kleine, seichte Gewässer oder kleinflächige Vermessungsprojekte kommt nach wie vor die traditionelle Methode der Vermessung mittels Messlanze, die direkt mit einem GPS Empfänger ausgestattet ist oder deren Position vom Land aus mittels Totalstation vermessen wird, zum Einsatz. Speziell bei Fließgewässern werden auf diese Art und Weise Profile in vorgegebenen, regelmäßigen Abständen erfasst.

Inspiziert durch diese klassische Methode der Vermessung von Fließgewässern und unter Berücksichtigung der Einschränkungen hinsichtlich Gewicht, Leistungsaufnahme und Größe ent-

¹ Riegl Research Forschungs Gesellschaft mbH, 3580 Horn, Austria, E-Mail: [mpfennigbauer, rschwarz]@riegl.com

wickelte RIEGL einen Laser-Entfernungsmesser zur Erfassung von Gewässerprofilen von unbemannten fliegenden Plattformen (UAVs) aus. Der mit einem bei 532 nm, also im sichtbaren grünen Wellenlängenbereich, emittierenden Laser ausgestattete Entfernungsmesser wird dabei von dem UAV über das Gewässer bewegt und erfasst dabei Ufer, Wasseroberfläche und Grund, soweit es die Wasserqualität und -tiefe zulassen. Durch Verzicht auf einen Scanmechanismus muss zwar auf die flächige Erfassung des Geländes verzichtet werden, dafür kann aber Größe und Gewicht des Messinstruments klein genug gehalten werden, um auch von small UAVs der Gewichtsklasse < 25 kg getragen werden zu können. Die geringe Flughöhe beim Einsatz von UAVs von < 50 m ermöglicht die Aufzeichnung der gesamten Echowellenform zur späteren Nachbearbeitung mit geeigneter Software. Darüber hinaus ergibt sich der Vorteil, dass aufgrund der geringen Fortbewegungsgeschwindigkeit von typisch wenigen m/s die Echosignale aufeinanderfolgender Laserschüsse zu einer Messung kombiniert werden können. Daraus ergeben sich Echo-Wellenformen mit gegenüber der Einzelmessung verbessertem Signal-Rauschverhältnis. Die detaillierte Analyse dieser Wellenformen ergibt nicht nur Lage von Oberfläche und ggf. Grund sondern kann auch Informationen über die Wassersäule, wie Absorptionskoeffizient aber auch etwaige Schichtungen liefern. Dies ist Gegenstand dieses Beitrags. Wir verwenden dazu einen Datensatz der auf Hawaii im Hafen von Hilo rund um einen Wellenbrecher aufgenommen wurde.

2 LIDAR Wellenformen in der Bathymetrie

2.1 Full-Waveform LIDAR

Seit mehr als einem Jahrzehnt sind so genannte „Full-Waveform“ LIDAR (Light Detection and Ranging) Systeme im kommerziellen Einsatz (MALLETT & BRETAR 2008) die in der Lage sind, den kompletten vom Ziel zurückgestreuten Wellenzug eines ausgesendeten Laserimpulses im zeitlichen Verlauf zu digitalisieren und teilweise oder vollständig aufzuzeichnen. In der Nachverarbeitung können die so erfassten Daten mit Hilfe von Algorithmen unterschiedlichen Komplexitätsgrades und Rechenzeitaufwandes analysiert werden. Ein Standardverfahren ist die Zerlegung in Gauss-Glockenkurven (WAGNER et. al 2006), bei dem Positionen von Einzelzielen sowie deren Amplituden ermittelt werden.

Die Gestalt der empfangenen Wellenform hängt sowohl von der Zielsituation (Einzelziel, Mehrfachziel) als auch von der Form des ausgesandten Lasersignals und der Filtercharakteristik des Empfängers ab.

2.2 Superpositionsprinzip

Bei inkohärenter Detektion des empfangenen Laserimpulses sowie bei Betrieb des Detektors und seiner Empfangselektronik im linearen Bereich kann die Gültigkeit des Superpositionsprinzips angenommen werden. Dieses Prinzip besagt, dass sich das Gesamtsignal aus den an einzelnen Zielen zurückgestreuten Teilwellen durch Summation zusammensetzt. Das Empfangssignal

$$p_r(t) = B \sum_i \beta_i p_s \left(t - 2 \frac{n}{c_0} z_i \right) \quad (1)$$

einer Anzahl diskreter Ziele an den Entfernungen z_i vom Sensor mit den Rückstreukoeffizienten β_i und einer Skalierungskonstanten B wird aus um die doppelten Laufzeiten $\frac{n}{c_0} z_i$ verschobenen Versionen des effektiven Sendepulses $p_s(t)$ gebildet. Die Konstante B fasst die Eigenschaften des Sensors, wie Sende- und Empfangsapertur, Verstärkungsfaktor des Empfängers und die Grunddämpfung zufolge der Distanz zwischen Sensor und Ziel zusammen. Für n ist der Wert des im jeweiligen Medium gültige Wert des Brechungsindex zu einzusetzen, c_0 ist die Lichtgeschwindigkeit. Gleichung (1) gilt mit guter Näherung für Ziele deren Ausdehnung klein gegen die Entfernung zum Sensor ist. Der effektive Sendepuls setzt sich dabei aus der Form des ausgehenden Laserpulses und der Impulsantwort des Empfangsfilters zusammen und wird im Folgenden als Systemwellenform bezeichnet (WAGNER et al. 2006).

2.3 Verteilte Rückstreuung aus der Wassersäule

Der Laserpuls erfährt bei der Ausbreitung im Wasser eine Dämpfung und wird an Inhomogenitäten und Partikeln gestreut. Die in Richtung zum Sensor zurückgestreute Lichtmenge steht im Zusammenhang mit den inhärenten optischen Eigenschaften von Wasser, dem Absorptionskoeffizient a und dem Streukoeffizient b , als auch den Strahleigenschaften und dem Sichtfeld der Empfangsoptik. Ein vereinfachtes Modell, streng nur gültig für ein infinitesimal kleines Sichtfeld und homogene unendliche ausgedehnte Wassersäule (GORDON 1982) lautet

$$p_r(t) = B \int_{z_0}^{\infty} p_s\left(t - 2 \frac{n(z)}{c_0} z\right) \beta e^{-2k(z-z_0)} dz \quad (2)$$

wobei z_0 die Entfernung bis zur Wasseroberfläche ist, β der Rückstreukoeffizient und $k = a + b$, der Dämpfungskoeffizient, der die Summe aus Absorptions- und Streukoeffizient ist. Der exponentielle Zusammenhang nach Gleichung (2) ist die so genannte „Single Scattering“ Lösung, die auch im „Multiple Scattering“ Fall Bedeutung hat, obwohl dann der Dämpfungskoeffizient durch einen effektiven Dämpfungskoeffizienten ersetzt werden muss. Unter Beachtung, dass $n(z)$ für $z > z_0$ durch den als konstant angenommenen Brechungsindex n_w von Wasser ersetzt werden kann, kann man die Gleichung 2 durch Variablensubstitution umschreiben zu

$$p_r(t) = B \int_{\tau_0}^{\infty} p_s(t - \tau) \frac{c_0}{2n_w} \beta e^{-k \frac{c_0}{n_w} (\tau - \tau_0)} d\tau. \quad (3)$$

Das Modell setzt sich demnach aus der vom Sensor abhängigen System Wellenform $p_s(t)$ und aus dem Exponentialmodell für die Wassersäule über eine Faltungsbeziehung zusammen. Die Systemwellenform, ein gerätespezifischer Parameter, gewinnt man indem man mit dem Sensor auf eine planare, im rechten Winkel zur Laserstrahlachse angeordnete, Fläche mit einer Ausdehnung größer als der Laserfootprint misst und die dabei gewonnene Wellenform aufzeichnet.

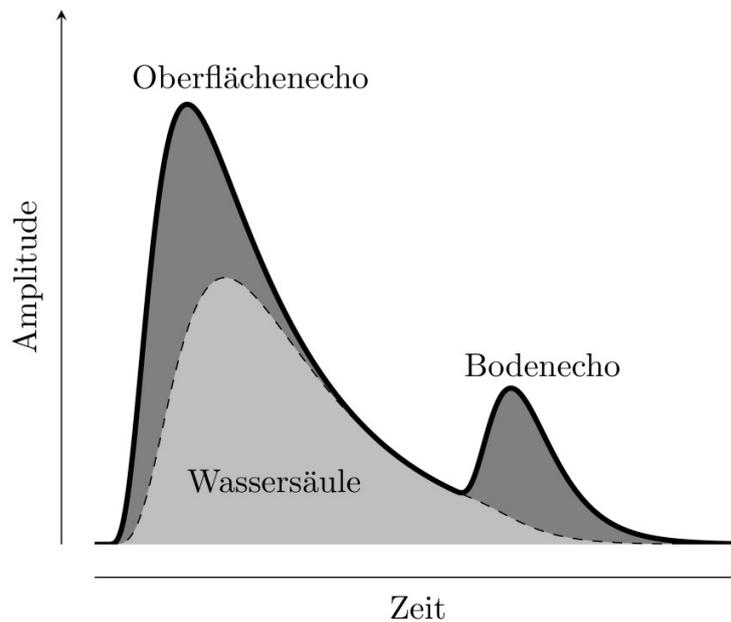


Abb. 1: Prototypische Bathymetrie Wellenform bestehend aus zwei Interface Echos, Oberfläche und Boden, sowie dem Echo der Wassersäule.

2.4 Oberfläche – Wassersäule – Boden

Wasseroberfläche und Boden sind im Unterschied zur Wassersäule diskrete Ziele und deshalb in erster Annäherung als Dirac Funktionen modellierbar.

Mit

$$\sigma(z) = \beta_s \delta(z - z_0) + (u(z - z_0) - u(z - z_1)) \beta_v e^{-k(z - z_0)} + \beta_b \delta(z - z_1) \quad (4)$$

erhält man für die prototypische Bathymetrie-Wellenform den Ausdruck

$$p_r(t) = \int_{z_0}^{\infty} p_s \left(t - 2 \frac{n_w}{c_0} z \right) \sigma(z) dz \quad (5)$$

wobei $u(z)$ die Heaviside'sche Sprungfunktion ist, z_0 die Distanz bis zur Wasseroberfläche, z_1 die Distanz bis zum Boden ist und $\beta_s, \beta_v, \beta_b$ die zugehörigen Rückstreuoeffizienten sind.

Abb. 1 zeigt eine prototypische Bathymetrie-Wellenform nach Gleichung (4) und Gleichung (5).

2.5 Feinstruktur

Sowohl Absorptionskoeffizient als auch Streukoeffizient unterliegen räumlichen Schwankungen. Das Modell nach Abschnitt 2.4 muss deshalb gegebenenfalls um zusätzliche Komponenten erweitert werden.

3 Datensätze – Hafen von Hilo

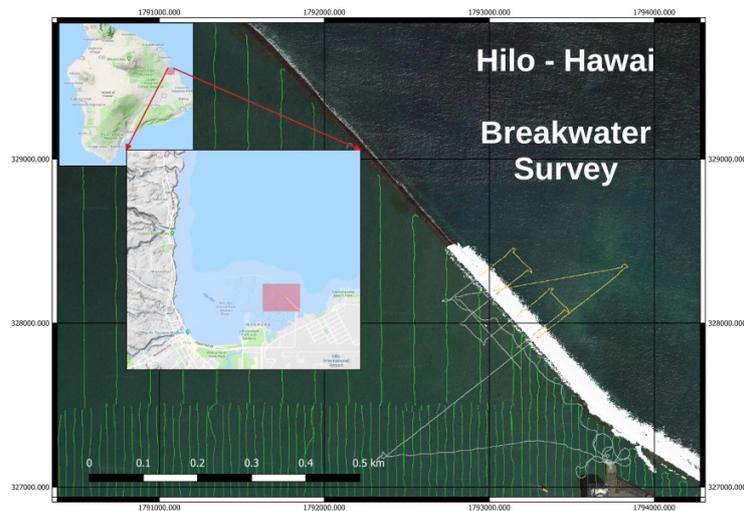


Abb. 2: Übersicht: Wellenbrecher und Messprofile. Weißes Band: VUX-SYS; graue und gelbe Linie: BDF-1; grüne Linien: Echolot; Hintergrund Bild und Karten: Imagery ©2018 Google, Map data ©2018 Google.

Für die Untersuchungen stand ein Datensatz zur Verfügung, der im Rahmen einer Evaluierung der Anwendbarkeit von Unmanned Laser Scanning (ULS) für die regelmäßige Prüfung der strukturellen Integrität von Hafenuauern im Juni 2018 aufgenommen wurde (LEWINTER et al. 2018). Neben der Erfassung der Hafenuauer in 3D wurden auch zwei Befliegungen mit einem bathymetrischen Laser-Entfernungsmesser durchgeführt. Details über die Vorverarbeitung der Trajektorie und die Datenerfassung können bei LEWINTER et al. (2018) nachgelesen werden.

3.1 3D – Punktwolke

Insgesamt wurden drei Befliegungen mit dem topographischen Scanner RIEGL VUX-1LR durchgeführt. Für diesen Bericht dienen diese Datensätze allerdings nur zu Illustrationszwecken. In Abb. 2 ist der Flug mit der Nummer 1 als weißes Band im rechten unteren Bildteil zu erkennen. Die Flughöhe betrug 30 m bei einer Dauer von 30 Minuten. Die Daten standen als RiPROCESS (eine Software der Firma RIEGL) Projekt zur Verfügung.

3.2 2D – Profilpunkte

Mit dem BDF-1 von RIEGL wurden zwei Flüge durchgeführt, beide in einer Flughöhe von 20 m und einer Dauer von ca. 20 Minuten. Der BDF-1 ist ein speziell für die Bathymetrie entwickelter Sensor mit einem Laser der Wellenlänge 532 nm, um unter die Wasseroberfläche eindringen zu können. Die nominale Messrate des BDF-1 beträgt 4 kHz und die Fluggeschwindigkeit lag bei 2 ms^{-1} . Daraus ergibt sich ein Punktabstand von 0,5 mm und nach einer Mittelung von je hundert Messungen ein Punktabstand von 5 cm. Vermessen wurden Wasserkörper auf der Hafenseite und im offenen Meer, die Ergebnisse wurden entsprechend auf zwei Datensätze aufgeteilt. In Abb. 2 sind die Flüge über dem Hafenbecken in Grau und die Flüge über dem offenen Meer in Gelb zu erkennen.

3.3 Echolot Messungen

Als Referenz standen Messungen mit dem Echolot vom April 2016 zur Verfügung, die nach Baggerarbeiten im Hafenbecken durchgeführt worden waren (PORTLAND 2016). Die Lotungen lagen in einer maschinenlesbaren Form vor. Die vertikale Komponente wurde durch Vorzeichenumkehr in eine Höhenkoordinate umgewandelt und um einen Offset von 69,511 Surveying Foot verschoben (Siehe Abschnitt 5.1).

4 Methodik

4.1 Vorverarbeitung

Um die Performance von Bathymetrie-Sensoren zu steigern, ist eine hohe Empfindlichkeit wünschenswert. Eine hohe Empfindlichkeit erfordert ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), das durch Mittelung vor der Analyse erhöht werden kann. Das SNR nimmt bei der Mittelung von M aufeinander folgenden Messungen gemäß $SNR_{avg} = SNR\sqrt{M}$ zu. Die hohe Empfindlichkeit des Sensors geht auch mit einer erhöhten Anzahl von Schein-Echos einher, die durch spontane Stromimpulse im Photodetektor ausgelöst werden. Um eine Verfälschung der gemittelten Wellenformen durch die Ausreißer zu verhindern, werden diese vor der Mittelung entfernt, indem nur das 95 Perzentil der Abtastwerte jedes Abtastzeitpunktes verwendet wird.

4.2 Zerlegung und Klassifikation der Wellenform

Die Basis für ein Modell, das zusätzliche Freiheitsgrade zur Verfügung stellt mit denen es an Wellenformen angepasst werden kann, die durch Unterwasserstrukturen verursacht werden, wurde von SCHWARZ et. al (2017) vorgestellt. Dieses Modell, das ausschließlich aus Exponentialtermen besteht, wird um zwei Elemente erweitert und besteht damit aus den folgenden drei Elementen:

$$\begin{aligned}\sigma_E(z) &= \left(u(z-z_0) - u(z-z_0-T) \right) \beta_E e^{-K(z-z_0)} \\ \sigma_B(z) &= \left(u(z-z_0) - u(z-z_0-T) \right) \beta_B \\ \sigma_D(z) &= \delta(z-z_0) \beta_D\end{aligned}\tag{6}$$

σ_E für Exponentialsegmente, σ_B für Rechtecksegmente und σ_D für impulsförmige Dirac Segmente. Das Model für die empfangene Wellenform lautet damit

$$p_r(t, \varphi) = \int_0^{\infty} p_s \left(t - 2 \frac{n_w}{c_0} \right) \sum_i \sigma_{Mi}(z) dz.\tag{7}$$

Der Index M kann dabei die Werte E, B, D für die verschiedenen Teilmodelle annehmen und φ steht für ein Tupel dessen Elemente die Parameter aller Teilkomponenten sind.

Die Abtastwerte der empfangenen Wellenform an den diskreten Zeitpunkten t_n werden mit $y(t_n) = y_n$ bezeichnet. Die Zerlegung der Wellenform wird nun schrittweise durchgeführt, wobei in jedem Schritt das Modell um eine weitere Komponente ergänzt wird. Angenommen das Modell des m -ten Teilschrittes lautet $p_{r,m}(t, \varphi_m)$ dann wird zunächst eine um diesen reduzierte Wellenform

$$y_{m+1}(t_n) = y_m(t_n) - p_{r,m}(t_n, \varphi_m) \quad (8)$$

ermittelt, anhand der ein einzelnes Elementmodell nach Gleichung (6) ausgewählt und benutzt wird, um Parameterwerte zu schätzen. Diese Parameter werden dem Tupel φ_m angehängt, so dass daraus das neue Tupel φ_{m+1} entsteht. Mittels einer nichtlinearen „Least Squares“-Methode, wie zum Beispiel Levenberg-Marquardt, wird nun das gesamte neue Parameter Tupel angepasst

$$\varphi_{m+1, opt} = \underset{\varphi_{m+1}}{\operatorname{argmin}} \sum_n \left[y(t_n) - p_{r,m+1}(t_n, \varphi_{m+1}) \right]^2. \quad (9)$$

Die Iteration wird abgebrochen, wenn die Wurzel aus dem mittleren quadratischen Restfehler mit den Messfehlern in einer vergleichbaren Größenordnung steht oder wenn keine Verbesserung zwischen den Schritten erreicht wird. Im Unterschied zu SCHWARZ et. al (2017) erlauben wir in dem hier verwendeten Modell überlappende Positionierungen der Teilmodelle.

Die Parameter des resultierenden Tupels werden für die Erzeugung einer Punktwolke herangezogen. Die Parameter, die den z_0 entsprechen werden als Zielorte interpretiert und die Flächen der Teilmodelle werden als Amplituden verwendet. Die zusätzlichen Parameter T, K fließen als zusätzliche Attribute in die Klassifikation für die Oberfläche und den Boden ein. Der empirisch ermittelte Klassifikationsalgorithmus berücksichtigt zunächst nur Punkte, deren Attribute ausgehende Ziele ($T > 0$) mit großer Amplitude qualifizieren. Wenn es nur einen solchen Punkt gibt, gilt er als Wassersäule. Bei Vorliegen mehrerer Punkte wird der Punkt mit der zweithöchsten Amplitude für die Wassersäule verwendet, aber nur wenn er vor dem Punkt mit der höchsten Amplitude liegt. Die Wasseroberfläche wird dann als vordere Flanke der so bestimmten Wassersäule bestimmt. Für den Boden wird dann der Punkt mit der größten Amplitude aus den restlichen Punkten gewählt. Alle anderen Punkte bleiben ohne Klassifikation.

4.3 Wellenform als Pseudo-Punktwolke

Eine Betrachtung der Nachbarschaftsbeziehungen einzelner Wellenformprofile legt eine dreidimensionale Darstellung nahe, auf deren horizontaler Achse die Laufzeit und auf deren vertikaler Achse die laufende Nummer des Wellenformprofils aufgetragen ist. Die dritte Dimension wird durch Zuweisung eines Grauwertes gebildet, welcher der Amplitude des Abtastwertes der Wellenform entspricht. In Abb. 3 ist eine beispielhafte Darstellung von 100 Wellenformprofilen als Wellenformstapel zu erkennen.

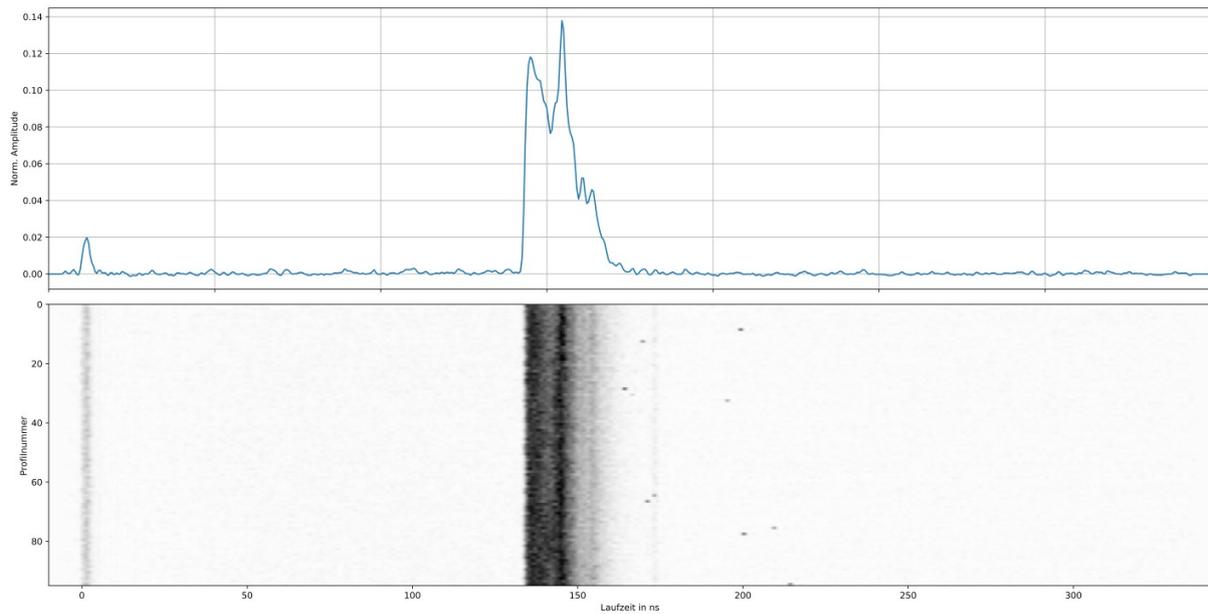


Abb. 3: Dreidimensionale Wellenformdarstellung als Wellenformstapel. Oben: Abtastwerte eines Wellenformprofils. Unten: Aufeinanderfolgende Wellenformprofile mit Amplituden als Grauwerte kodiert. Dunkle Stellen entsprechen großer Amplitude.

Fügt man dieser Darstellung eine weitere, vierte, Dimension hinzu indem man die mit Graustufen eingefärbten Wellenformprofile aus dem Sensor Koordinatensystem (Abb. 3) in das Projektkoordinatensystem bringt, erhält man eine Darstellung gemäß Abb. 4 die Ähnlichkeiten mit einem Vorhang aufweist.

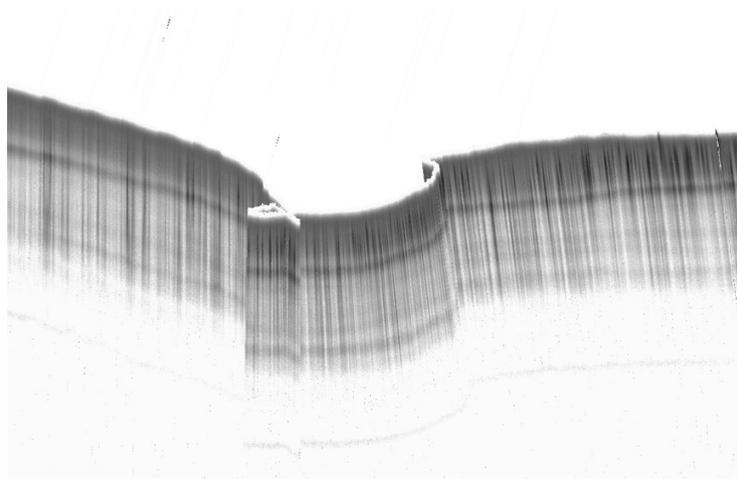


Abb. 4: Vierdimensionale (Vorhang-) Darstellung der Wellenformen als Pseudo Punktwolke. Dunkle Einfärbung bedeutet hohe Amplitude, helle Stellen niedrige Amplitude. Die Oberkante des Vorhangs entspricht der Wasseroberfläche.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Hafengebiete

Hauptanwendung des BDF-1 ist die Vermessung des unter Wasser liegenden Geländes. Die vorliegenden Daten wurden aber nicht zum Zweck einer umfassenden Vermessung des Hafengrundes erfasst, sondern nur um das Potential des Sensors für diesen Einsatzzweck abzuschätzen.

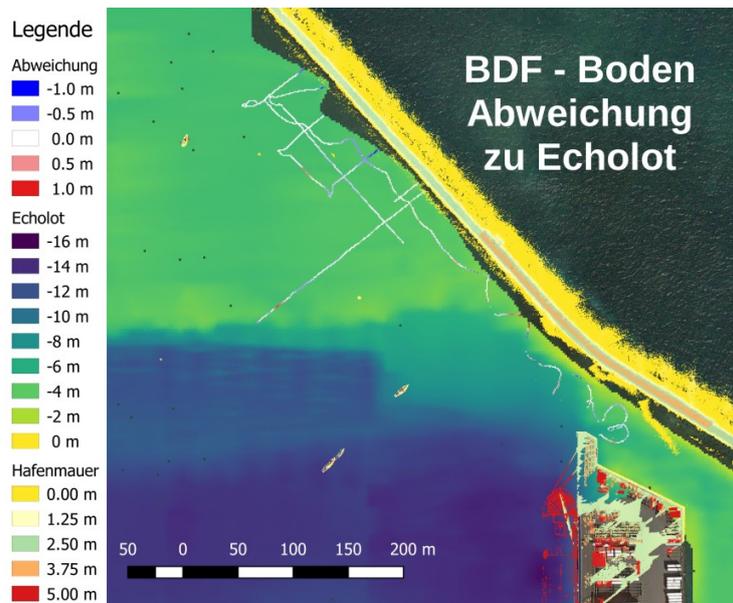


Abb. 5: BDF - Boden Abweichung. Der Abstand ist nur an wenigen Stellen größer als 0.5 m. Tiefen bis ca. 5 m bzw. 6 m wurden erfasst.

Die komplexen Wellenformen, siehe Abb. 6, mit einer hohen Anzahl von lokalen Maxima lassen die zuverlässige Detektion des Bodenechos zu einem nicht trivialen Problem werden. Mit einem auf dem im Abschnitt 4.2 beschriebenen Klassifikationsalgorithmus basierenden Algorithmus wurden die Oberflächen- und Bodenechos ermittelt.

Als Referenz für die Bodenprofile des BDF-1 stand eine Echolotvermessung aus dem Jahr 2016 zur Verfügung. Leider war es nicht möglich, diese Messungen für einen absoluten Vergleich zu verwenden, da trotz Referenzierung auf MLLW (Mean Lower-Low Water), in beiden Fällen, ein ungeklärter vertikaler Versatz von mehr als 3m bestehen blieb, wie uns vom Operator mitgeteilt wurde. Wir haben deshalb den mittleren Abstand zwischen Echolotung und (refraktions-korrigierten) BDF-1 Bodenpunkten bestimmt und vor dem Vergleich in Abzug gebracht. Die Echolotungen wurden durch Resampling einer Triangulation mit der Dichte von 1Pkt./m² interpoliert, neuerlich trianguliert und mit einem Laplace Kernel geglättet. Die Dreiecke wurden mit einer der Tiefe unter dem Projektwasserspiegel entsprechenden Skala eingefärbt. Der Projektwasserspiegel wurde so festgelegt, dass er mit der Wasseroberfläche der BDF-1 Messung zusammenfällt. In Abb. 5 ist die Differenz der BDF-1 Bodenpunkte und der interpolierten Echolot Fläche als hauptsächlich weiße Linie zu sehen. Obwohl die Struktur des Bodens nicht sehr ausgeprägt ist, kann man insbesondere in der Nähe der Anlegestelle erkennen, dass die Verläufe innerhalb einer Abweichung von 0,5 m einander folgen. Im Vergleich mit Abb.2 ist zu sehen, dass Tiefen größer als 5 m bis 6 m nicht mehr erfasst wurden.

5.2 Dämpfungskoeffizient

Bei Zerlegung der Wellenformen wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, werden Dämpfungskoeffizienten K gewonnen. Abb. 6 zeigt ein Beispiel einer Zerlegung. Die Faltung der in Rot dargestellten Kurve mit der Systemwellenform (nicht dargestellt) ergibt die schwarze, durchgezogene Linie, in der Abbildung als Modell bezeichnet. Die Abtastwerte der Messung sind durch Kreise markiert, das Modell fällt in der Darstellung praktisch zusammen mit den Abtastwerten. Es ist zu erkennen, dass einem im Wesentlichen exponentiellen Abfall kleinere Abweichungen überlagert sind. Die vordere Flanke des exponentiellen Korpus definiert zugleich auch die Wasseroberfläche.

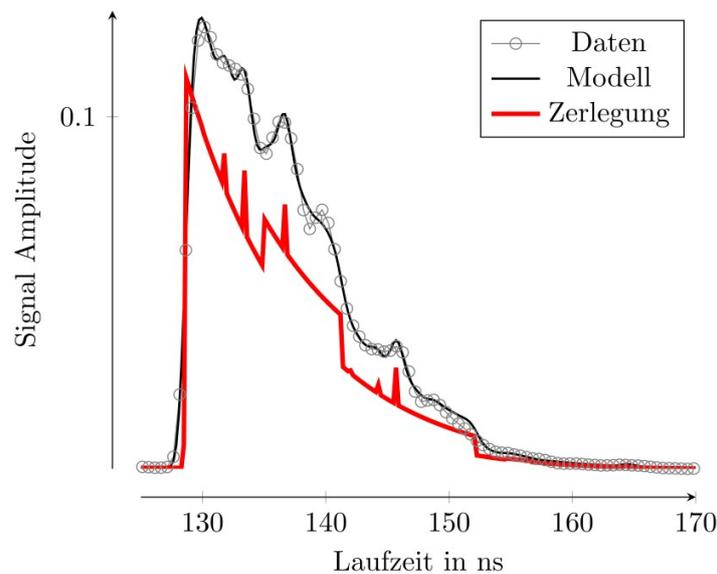


Abb. 6: Wellenformzerlegung. Das Modell entsteht aus der Faltung der Systemwellenform mit der Zerlegung.

Die Dämpfungskoeffizienten K haben die Dimension m^{-1} und ihre Kehrwerte $Z=1/K$ können als optische Tiefe interpretiert werden. Dieser Zusammenhang macht K bzw. Z interessant für die Messung der Schwebstoffe (siehe z.B. ZHAO et. al (2018)). Ermittelt man ein Histogramm aller im Datensatz enthaltenen optischen Tiefen, so erhält man zunächst eine Verteilung die zwei Maxima aufweist. Eine Unterteilung der optischen Tiefen in zwei Klassen, eine Klasse, die alle Z enthält, die von den Exponentialtermen stammen welche die Wasseroberfläche definieren, und eine Klasse, die alle anderen enthält, führt auf Abb. 7 (a) und (b).

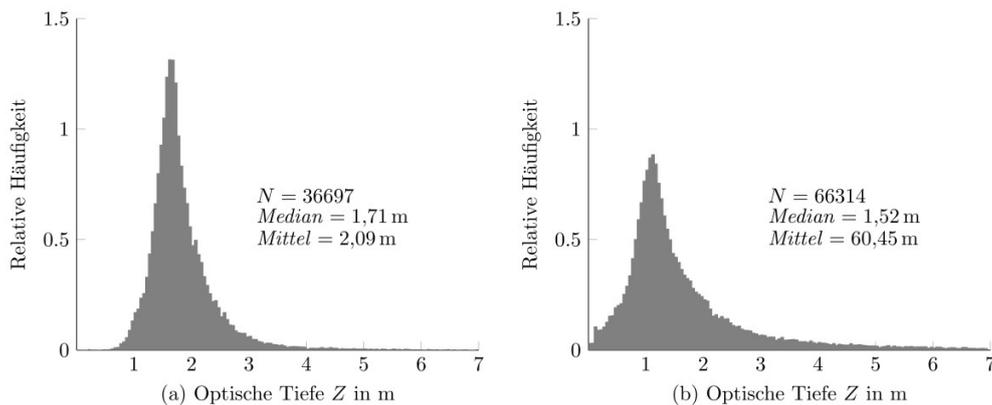


Abb. 7: Histogramme Optischer Tiefen, (a) Wasseroberfläche, (b) Unterwasser

Für den vorliegenden Datensatz existieren keine Referenzmessungen der Wassergüte oder eine Bestimmung der Secchi-Tiefe. Beachtet man den Zusammenhang (GUENTHER 1985)

$$Z_s K = \eta \quad (10)$$

worin Z_s die Secchi Tiefe ist und η ein Wert zwischen 1,1 und 1,7, der in komplexer Weise von den inherenten optischen Eigenschaften Dämpfung und Streuung des Wasserkörpers abhängt, so erhält man

$$Z_s = \eta Z. \quad (11)$$

Für Z_s erhält man so unter Berücksichtigung von Abb. 7 (a) Werte von 2,5 m bis 3 m. Aus den Beobachtungen aus Abschnitt 5.1 folgt, dass die erreichbare Tiefe ca. 5 m bis 6 m ist, entsprechend der doppelten Secchi-Tiefe, ein Wert, der mit den Erwartungen über die mögliche Performance des Sensors zusammenstimmt.

Die Verteilung der optischen Tiefen in Abb. 7 (b) weist im Unterschied zu (a) eine wesentlich höhere Asymmetrie zu größeren Werten auf, aber auch (a) zeigt eine nicht Gaußförmige Form. Während im Fall (a) die erreichte Tiefenperformance eine plausible Erklärung für den Median bzw. den Mittelwert liefert, haben wir für den Fall (b) keine Erklärung. Wir halten deshalb eine genauere systematische Untersuchung im Besonderen im Zusammenhang mit der im nächsten Abschnitt 5.3 behandelten Schichtstruktur für lohnenswert.

5.3 Schichtstruktur

Der untersuchte Datensatz zeigt Abweichungen, die der prototypischen Wellenform (Abb. 1) überlagert sind. Diese Abweichungen sind zunächst an der isoliert betrachteten Wellenform nicht von zufälligen Variationen zu unterscheiden. Ein Indiz dafür, dass es sich nicht um rein statistische, beispielsweise durch die Sensorelektronik verursachte, Störungen handelt, ist die Tatsache, dass die Abweichungen auch nach einer Summation von 100 aufeinanderfolgenden Wellenformen deutlich zu sehen sind.

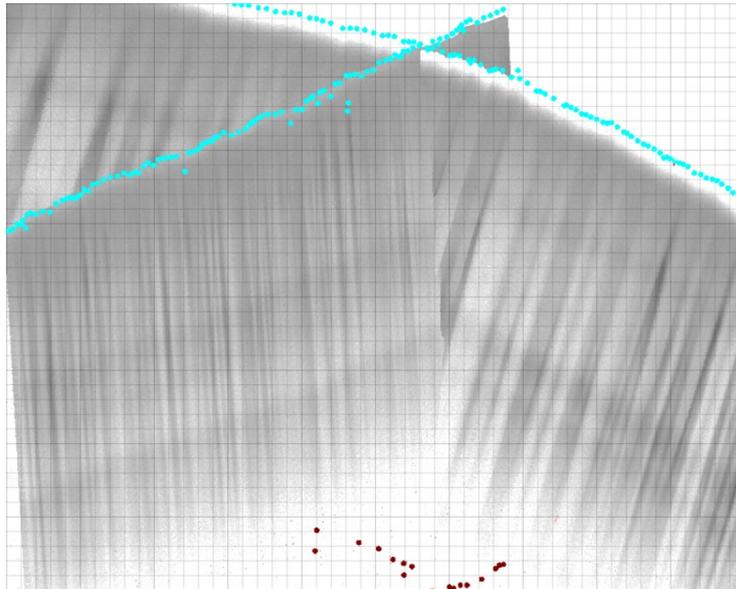


Abb. 8: Vorhangdarstellung der ungemittelten Wellenformen. Der Zeitabstand zwischen den beiden Profilen ist 74 Minuten. Der Vorhangdarstellung überlagert sind die ermittelte Oberfläche (blau) und der Boden (braun)

Die Grunddaten in Abb. 6 zeigen beispielsweise so eine über 100 Datensätze gemittelte Wellenform, entsprechend einer Zeitspanne von 25 ms bzw 5 cm. Fluktuationen des Mediums die schneller ablaufen oder kürzere Ausdehnung aufweisen, werden durch den Mittelungsprozess erheblich gedämpft. Das Vorhandensein der Abweichungen lässt deshalb vermuten, dass diese Abweichungen Strukturen des Mediums, also der Wassersäule, offenbaren. Abb. 8 zeigt zwei, wie im Abschnitt 4.3 beschrieben, erzeugte Wellenformvorhänge der ungemittelten Wellenformen, denen die ermittelte Oberfläche (blau) und der Boden (braun) überlagert wurden. Es ist eine deutlich ausgeprägte horizontale Schichtstruktur zu erkennen die sogar bereits vor der Mittelung zutage tritt und nicht durch den Messprozess verursacht scheint. Darüber hinaus sind auch sehr langsame Veränderungen zu beobachten. Die beiden Profile in Abb. 8 weisen einen Unterschied in der Aufnahmezeit von 74 Minuten auf und wurden deshalb ausgewählt, da am Kreuzungspunkt zu erkennen ist, dass sich die Schichtung während dieser Zeit verändert hat. An anderen Kreuzungspunkten ist diese Schichtung unverändert geblieben.

Im Unterschied zu den horizontalen Strukturen sind die vertikalen Strukturen offensichtlich mit dem Messprozess korreliert, sie treten entlang der Laserstrahlrichtung auf. Benachbarte Wellenformen sind dabei aber einander nicht einfach nur über eine Skalierung ähnlich, was auf eine Schwankung der Empfindlichkeit des Sensors hindeuten würde, sondern zeigen auch strukturelle Unterschiede.

Bei der Zerlegung der Wellenform, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, fallen neben der Klassifikation der Oberflächen und Bodenpunkte auch weitere diskrete Punkte und ihnen zugeordnete Amplituden an. Stellt man diese Punkte als mit der Amplitude eingefärbte Punktwolke dar, so erhält man Abb. 9, die denselben Bildausschnitt wie Abb. 8 zeigt. Zweifellos erhöht diese Darstellungsart als reine Punktwolke nicht unbedingt die Übersichtlichkeit, dennoch hat sie aber den Vorteil, dass der Einfluss der System-Wellenform kompensiert wurde und die sich abzeichnende

Linienstruktur mit konkreten geometrischen Orten unter der Wasseroberfläche identifiziert werden kann.

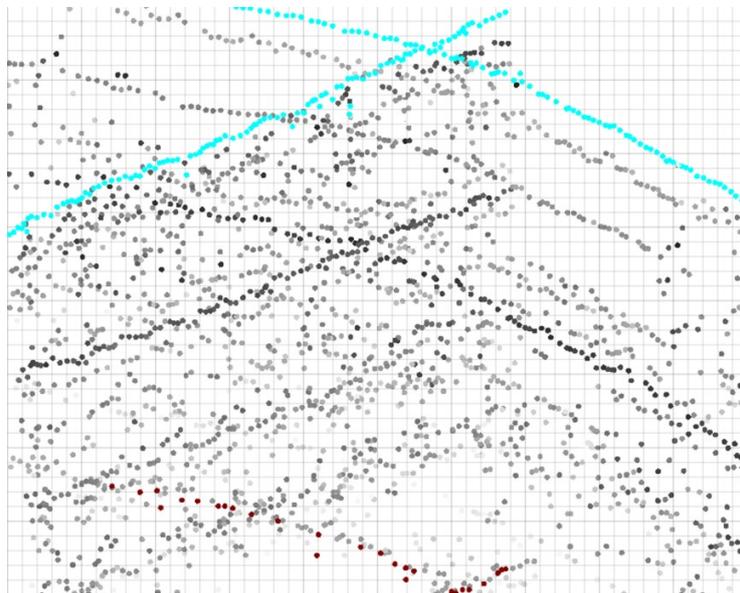


Abb. 9: Punktwolkendarstellung der Wellenformzerlegung.

Eine interessante Erweiterung der Darstellung über die Punktwolke hinaus wäre die Darstellung der in der Zerlegung gefundenen Exponential- und Puls-Segmente als Lineare, ausgedehnte, Elemente. Wir erwarten dadurch eine deutlicher hervortretende Schichtstruktur, vergleichbar der in Abb. 8.

Die zutage tretenden Strukturen legen es nahe, quantitative Zusammenhänge mit der Schwebstoffkonzentration zu untersuchen. Es ist auch die Frage zu stellen ob es einen Zusammenhang mit dem Temperaturprofil gibt und ob die Messdaten für eine Bestimmung der Wassergüte verwendet werden können.

5.4 Offene See

Die Gültigkeit der Wellenformzerlegung nach Abschnitt 4.2 beruht unter anderem darauf, dass vorausgesetzt werden kann, dass das Superpositionsgesetz für die einzelnen Komponenten gilt. Bei sehr starker Aussteuerung des Empfängers, die bei großer optischer Tiefe oder Messung auf Land auftreten kann, ist die Voraussetzung für das Superpositionsgesetz aber nicht mehr erfüllt. Das obere Teilbild in Abb. 10 zeigt, dass das Bodenecho auf offener See so stark ist, dass der empfindliche Kanal, der für die Wellenformzerlegung herangezogen wird, so übersteuert wird, dass für die Messung ein zweiter im Gerät vorhandener, unempfindlicher Kanal, im Bild rot dargestellt, herangezogen wird. Trotz Übersteuerung werden die Wellenformen auch im empfindlichen Kanal weiter aufgezeichnet. Das Auftreten einer Übersteuerung kann nur Signalwerte verfälschen, die zeitlich gesehen nach dem Übersteuerungszeitpunkt liegen. Da das Signal von der Wasseroberfläche vor dem Übersteuerungszeitpunkt zufolge des Bodenechos empfangen wird, kann die Wasseroberfläche mit Hilfe der Wellenformzerlegung im empfindlichen Kanal bestimmt werden. Das untere Teilbild von Abb. 10 zeigt die solcherart

bestimmte Wasseroberfläche, ohne die eine Brechungskorrektur der Bodenechos nicht möglich ist.

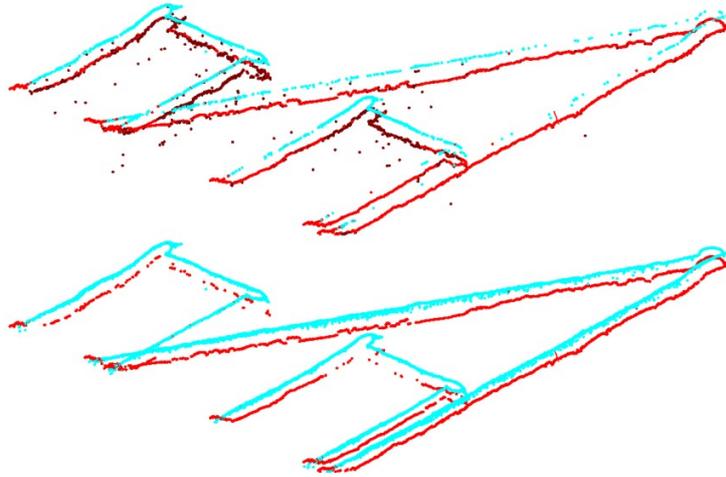


Abb. 10: Messprofile über offener See. In Rot das sehr starke Bodenecho. Oberes Teilbild: Wasseroberfläche wegen Übersteuerung nicht bestimmt. Unteres Teilbild: Durch teilweise Auswertung des übersteuerten Kanals wird eine Bestimmung der Wasseroberfläche möglich.

6 Fazit & Ausblick

Mit dem von der Firma RIEGL vor zwei Jahren vorgestellten BDF-1, (Bathymetric Depth Finder) ist es möglich georeferenzierte Profile im Wasserkörper aufzunehmen. Die Komplexität der Wellenformen erschwert einerseits zwar die Bestimmung der Bodenechos, zeigt andererseits aber einen Detailreichtum der räumliche Strukturen. Wir haben gezeigt, dass eine Schichtstruktur in der Wassersäule zu Tage tritt von der angenommen werden muss, dass sie in einem Zusammenhang mit tatsächlichen stationären Inhomogenitäten des Mediums steht und nicht durch Fluktuationen und Signalrauschen verursacht wird. Wir erwarten, dass quantitative Zusammenhänge mit der Konzentration von gelösten Sedimenten oder Schwebstoffe unter der Oberfläche hergestellt werden können und regen Experimente an, mit denen diese Gesetzmäßigkeiten aufgedeckt werden können.

7 Dank

Die vorgestellte Arbeit beruht auf Datenmaterial, das uns von „US Army Corps of Engineers Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Remote Sensing/GIS Center of Expertise“ (Adam L. LeWinter, Peter J. Gadomski und David C. Finnegan) zur Verfügung gestellt wurde. Wir danken unserer Kollegin Andrea Spitzer und den Kollegen Alexander Haring und Christian Sevcik für ihre Unterstützung.

8 Literaturverzeichnis

- GORDON, H. R., 1982: Biodiversity: Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering. *Applied Optics*, 21, 2996.
- GUENTHER, G. C., 1985: Airborne laser hydrography system design and performance factors.
- LEWINTER, A., PFENNIGBAUER, M., GADOMSK, P. J., FINNEGAN, D. C., SCHWARZ, R., TRUONG, M.-L., PODOSKI, J. H., 2018: Unmanned aircraft system-based lidar survey of structures above and below the water surface. Hilo Deep Draft Harbor Breakwater, Hawaii.
- MALLET, C., BRETAR, F., 2008: Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 1-16.
- PORTLAND, D. C. O. E., 2016: Condition Survey, Hawaii Hilo Harbour.
- 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.
- 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.
- ZHAO, X., ZHAO, J., ZHANG, H., ZHOU, F., 2018: Remote Sensing of Suspended Sediment Concentrations Based on the Waveform Decomposition of Airborne LiDAR Bathymetry. *Remote Sensing*, 10, 247.