

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

Journal of Applied Hydrography

06/2020

HN 116

*Fokusthema:
Fernerkundung
und Laser-
bathymetrie*



Consulting



Ocean engineering from space into depth

Realise your projects in cooperation with our hydrographic services

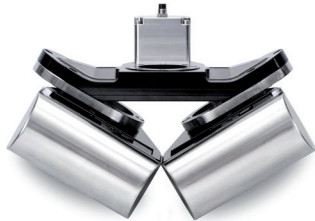
CTDs & SVPs



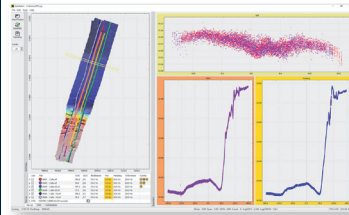
Our hydrography engineers are happy to develop systems tailored exactly to your needs and to provide professional advice and support for setting up your systems and training your staff.

MacArtney Germany benefits from being part of the MacArtney Group and enjoys unlimited access to cutting-edge engineering competences and advanced facilities.

Acoustic sensors



Software



Position and motion sensors



Integration



Liebe Leserinnen und Leser,

als wir im Kreis der Redaktion das Fokusthema für diese Ausgabe festgelegt haben – nämlich »Fernerkundung und Laserbathymetrie« –, da dachten wir (die sieben Redakteure), was den Terminus Fernerkundung anbelangt, an unterschiedlichste Dinge. Das sollte sich aber erst im Nachhinein herausstellen.

Für mich war Fernerkundung mehr oder weniger alles, was von oben aus der Luft aus stattfindet. Ich dachte an Satelliten, an Flugzeuge, an Drohnen. Daher fand ich es nur folgerichtig, die Laserbathymetrie explizit zu nennen, um eine besondere Fernerkundungsmethode hervorzuheben.

Kollegen dachten beim Stichwort Fernerkundung zusätzlich – wenn nicht sogar zuvorderst – auch an Schiffe und an ROVs, sie dachten an Echo-otung und an Unter-Wasser-Photogrammetrie.

Und in der Tat, die Vermessung mit einem Fächerecholot findet natürlich auch aus der Ferne statt; weder wird der Untersuchungsgegenstand betreten noch wird er berührt.

Das vorliegende Heft gibt Einblick in die Bandbreite der in der Hydrographie verwendeten Fernerkundungsmethoden. Drei Beiträge beschäftigen sich mit Laserbathymetrie (S. 6, S. 32, S. 78), und auch im Wissenschaftsgespräch dreht sich alles um grüne Laser und um den Übergang vom Wasser zum Land (S. 52). In drei Beiträgen geht es um Photogrammetrie, im ersten um die Erfassung des Uferstreifens (S. 16), im zweiten um die Untersuchung von Wracks (S. 23), im dritten um die Beurteilung von Hafeninfrastrukturen (S. 36). Zwei weitere Beiträge thematisieren, wie man aus Satellitendaten die Gewässertiefen ableitet (S. 40, S. 48). Und ein Kurzbeitrag zeigt die Möglichkeiten der Satellitenaltimetrie auf (S. 77).

Bei den Beiträgen, die sich damit beschäftigen, die Gewässer aus der Luft zu erfassen, fällt auf, dass sie Lösungen aufzeigen, wie die bisherige Datenlücke im Übergangsbereich zwischen Wasser und Land geschlossen werden kann. Damit hört die Hydrographie nicht mehr auf, wo das Vermessungsboot nicht mehr weiterkommt, sondern die Gewässergrenzen werden nun auch mit erfasst.

Außerdem im Heft: Die Fortsetzung eines Beitrags aus der letzten Ausgabe zur Meeresspiegelforschung (S. 60), ein Beitrag über das Wanderverhalten von Munition im Meer (S. 72) sowie eine Vorstellung eines kostengünstigen Multi-Sensor-Systems (S. 68).

Mit letztgenanntem Artikel wurde übrigens Louis Makiello zum DHyG Student Excellence Award nominiert. Der Beitrag eines weiteren Kandidaten für den Preis, mit dem die DHyG herausragende Studienleistungen auszeichnet, erschien bereits in Ausgabe HN 114 (S. 18), darin vergleicht Christian John Vietheer verschiedene Inertialmesssysteme. Mit dem Preis ausgezeichnet wird in diesem Jahr Hannes Nübel, der sich damit beschäftigt hat, wie sich Gewässertiefen aus multispektralen Luftbildern ableiten lassen (S. 32) – ein Thema, das allzu gut in dieses Heft passt.

Insgesamt finden Sie in dieser Ausgabe 14 Beiträge, davon acht in englischer Sprache. Die beiden ersten Fachbeiträge haben sogar Peer-Review-Verfahren durchlaufen, die Patrick Westfeld als verantwortlicher Redakteur begleitet hat.

»Die Communitys zueinander bringen«, dies ist der Titel des Wissenschaftsgesprächs mit Gottfried Mandlbürger. Und es ist auch das Bestreben der Redaktion mit diesem Heft. Dass das in der Praxis schon oft geschieht, zeigen manche Beiträge.



Lars Schiller

Hydrographische Nachrichten HN 116 – Juni 2020

Journal of Applied Hydrography

Offizielles Organ der Deutschen Hydrographischen
Gesellschaft – DHyG

Herausgeber:

Deutsche Hydrographische Gesellschaft e. V.
c/o Innomar Technologie GmbH
Schutower Ringstraße 4
18069 Rostock

ISSN: 1866-9204

© 2020

Chefredakteur:

Lars Schiller
E-Mail: lars.schiller@dhyg.de

Redaktion:

Peter Dugge, Dipl.-Ing.
Horst Hecht, Dipl.-Met.
Holger Klindt, Dipl.-Phys.
Dr. Jens Schneider von Deimling
Stefan Steinmetz, Dipl.-Ing.
Dr. Patrick Westfeld

Hinweise für Autoren und Inserenten:

www.dhyg.de > Hydrographische Nachrichten >
Mediadaten und Hinweise



R2SONIC

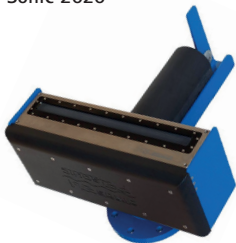
Fächerlotsysteme



Sonic 2020



Sonic 2022



Sonic 2024



Sonic 2026

Beispiellose Leistungsfähigkeit mit 256 Beams und 1024

- Soundings bei 160° Öffnungswinkel (einstellbar) und einer Pingrate von 60 Hz
- **Breitbandtechnologie** mit Frequenzwahl in Echtzeit zwischen 200 bis 400 kHz sowie 700 kHz optional
- **Dynamisch fokussierende Beams** mit einem max. Öffnungswinkel von 0,5° x 1° bei 400 kHz bzw. 0,3° x 0,6° bei 700 kHz
- **Höchste Auflösung** bei einer Bandbreite von 60 kHz, bzw. 1,25 cm Entfernungsauflösung
- **Kombinierbar** mit externen Sensoren aller gängigen Hersteller
- **Flexibler Einsatz** als vorausschauendes Sonar und der Fächer ist vertikal um bis zu 30° schwenkbar
- **Zusätzliche Funktionen** wie True Backscatter und Daten der Wassersäule
- **MultiSpectral Modus™**, der es den R2Sonic-Systemen ermöglicht, Backscatter Daten mehrerer Frequenzen in einem einzigen Durchlauf zu sammeln

Nautilus Marine Service GmbH ist der kompetente Partner in Deutschland für den Vertrieb von R2Sonic Fächerecholotsystemen. Darüber hinaus werden alle relevanten Dienstleistungen wie Installation und Wartung kompletter hydrographischer Vermessungssysteme sowie Schulung und Support für R2Sonic Kunden angeboten.

R2Sonic ist ein amerikanischer Hersteller von modernen Fächerecholoten in Breitbandtechnologie. Seit Gründung des Unternehmens im Jahr 2009 wurden weltweit bereits mehr als 1.500 Fächerlote ausgeliefert und demonstrieren so eindrucksvoll die außergewöhnliche Qualität und enorme Zuverlässigkeit dieser Vermessungssysteme.

Fernerkundung und Laserbathymetrie

Laser bathymetry

- 6 **A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters**
A peer-reviewed paper by GOTTFRIED MANDLBURGER

UAS photogrammetry I

- 16 **Coastal cliff monitoring using UAS photogrammetry and TLS**
A peer-reviewed paper by THOMAS P. KERSTEN, MAREN LINDSTAEDT and KLAUS MECHELKE

Underwater photogrammetry

- 23 **Fusing ROV-based photogrammetric underwater imagery with multibeam soundings for reconstructing wrecks in turbid waters**
An article by ROBIN ROFALLSKI, PATRICK WESTFELD, JEAN-GUY NISTAD, ANNETT BÜTTNER and THOMAS LUHMANN

DHyG Student Excellence Award I

- 32 **Bathymetry from multispectral aerial images via convolutional neural networks**
An article by HANNES NÜBEL

UAV-Photogrammetrie II

- 36 **Drohngestützte Erfassung von maritimen Infrastrukturen**
Ein Beitrag von DAVID HEUSKIN und FRANK LEHMANN

Satellite-derived bathymetry

- 40 **Satellite-derived bathymetry in practice**
An article by MARINA NIEDERJASPER

Remote sensing

- 48 **Hydrographic remote sensing made in Germany**
An article by KNUT HARTMANN and THOMAS HEEGE

Wissenschaftsgespräch

- 52 **»Die Communitys zueinander bringen«**
GOTTFRIED MANDLBURGER im Interview

Wasserstandsmessungen

- 60 **Retrospektive der Meeresspiegelforschung in Deutschland**
 Teil 2: Deutsche Ostseeküste
Ein Beitrag von JESSICA KELLN und JÜRGEN JENSEN

DHyG Student Excellence Award II

- 68 **Using a ROS-based low-cost system for bathymetric surveys**
An article by LOUIS MAKIELLO

UXO movements

- 72 **Potential UXO seabed migration in the German Bight**
An article by CHRIS JENKINS and SONIA PAPILI

Satellitenaltimetrie

- 77 **Lokal optimierte Nutzung der Satellitenaltimetrie zur Erfassung des Meeresspiegels**
Ein Beitrag von THOMAS ARTZ, ROBERT WEISS, SASKIA ESSELBORN, JULIA ILLIGNER und TILO SCHÖNE

Produkttests

- 78 **Erprobung des neuartigen Single-Photon-LiDAR-Messsystems Leica SPL100**
Ein Beitrag von ROBERT WEISS, GOTTFRIED MANDLBURGER und THOMAS ARTZ

Produktvorstellung

- 80 **Objekterkennung im Untergrund**
Ein Beitrag von GUILLAUME JOUVE und LIONEL FAURE

A review of airborne laser bathymetry for mapping of inland and coastal waters

A peer-reviewed paper by GOTTFRIED MANDLBURGER

Airborne laser bathymetry (ALB), an active remote sensing technique for capturing the depth and topography of shallow inland and coastal waters, is continuously evolving due to technological progress concerning sensors, platforms and data processing methods. So-called deep bathy systems with low spatial resolution but high depth penetration of up to 60 m coexist with topo-bathymetric sensors featuring small laser footprints of around 50 cm, high measurement point density of more than 20 points/m² but limited depth penetration of about 1.5 Secchi depths. While conventional ALB sensors are typically mounted on manned aircraft and operated from flying altitudes of around 500 m, sensor miniaturisation enabled the integration of compact bathymetric laser scanners on agile unmanned aerial vehicles (UAV) operated from 50 to 150 m altitude for flexible acquisition of smaller water bodies like clear gravel-bed rivers. This in turn, initiated new applications like roughness estimation, mapping of benthic habitats, and monitoring of coastal and fluvial morpho-dynamics in high spatial and temporal resolution. Furthermore, new data processing approaches proved to enhance both accuracy and depth penetration via strict geometric modelling and sophisticated waveform processing. The paper reviews the current trends in airborne laser bathymetry and highlights the potential and restriction of this optical technique.

bathymetric LiDAR | green laser | laser scanning | ALB sensors | ALB platforms
bathymetrisches LiDAR | grüner Laser | Laserscanning | ALB-Sensoren | ALB-Plattformen

Die luftgestützte Laserbathymetrie (ALB) ist eine aktive Fernerkundungstechnik, mit der sich die Tiefe und Topographie von flachen Binnen- und Küstengewässern erfassen lässt und die sich aufgrund des technologischen Fortschritts bei Sensoren, Plattformen und Datenverarbeitungsmethoden ständig weiterentwickelt. Neben sogenannten Tiefwassersystemen mit geringer räumlicher Auflösung, aber hoher Eindringtiefe von bis zu 60 m gibt es topo-bathymetrische Sensoren, die kleine Footprints von etwa 50 cm und eine hohe Messpunktdichte von mehr als 20 Punkten/m² aufweisen, aber nur eine begrenzte Eindringtiefe von etwa 1,5 Secchi-Tiefen. Während herkömmliche ALB-Sensoren typischerweise auf bemannten Flugzeugen montiert sind und aus Flughöhen von etwa 500 m betrieben werden, ermöglichte Sensorminiaturisierung die Integration kompakter bathymetrischer Laserscanner auf agilen unbemannten Luftfahrzeugen (UAV), wodurch kleinere Wasserkörper wie klare Flüsse mit Kieselbett aus einer Flughöhe von 50 bis 150 m flexibel erfasst werden können. Dies wiederum ermöglichte neue Anwendungen wie die Schätzung der Rauigkeit, die Kartierung benthischer Lebensräume und die Überwachung der Morphodynamik von Küstengewässern und Flusssystemen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung. Darüber hinaus verbesserten neue Datenverarbeitungsansätze durch strenge geometrische Modellierung und hochentwickelte Wellenformverarbeitung sowohl die Genauigkeit als auch die Eindringtiefe. Der Beitrag gibt einen Überblick über die aktuellen Trends in der luftgestützten Laserbathymetrie und zeigt das Potenzial und die Einschränkungen dieser optischen Technik auf.

Author

Dr. Gottfried Mandlbürger is a Senior Researcher at TU Wien, Department of Geodesy and Geoinformation.

gottfried.mandlbuerger@geo.tuwien.ac.at

1 Introduction

Airborne laser bathymetry (ALB), also referred to as airborne laser hydrography (ALH), is a technique for measuring the depths of relatively shallow coastal and inland water bodies with a pulsed scanning laser from the air (Guenther et al. 2000). The employed lasers are operating in the visible green domain of the electromagnetic spectrum ($\lambda = 532$ nm) and the depths are determined by measuring the round trip time of short laser pulses reflected from the bottom of the water body after traveling through the atmosphere and the water

column. Additional reflections from the air-water-interface are used to reconstruct the 3D-shape of the water surface. Exact knowledge of the height and tilt of the water surface is a precondition to correct the raw measurement due to refraction effects at the air-water-interface (Westfeld et al. 2017; Birkebak et al. 2018; Richter et al., 2018).

The measurable depth of this active remote sensing technique mainly depends on the optical properties of the water body (i.e. turbidity). State-of-the-art bathymetric sensors can measure depths in the range of 1 to 3 times the Secchi

depth (SD), corresponding to 20 to 60 m for clear coastal waters with a diffuse attenuation coefficient of $k < 0.1$ (Guenther 1985; Mobley 1994). In addition to depth and bottom topography, ALB allows the estimation of turbidity by analysing the full waveform (FWF) of the backscattered laser pulses (Abdallah et al. 2012; Richter et al. 2017; Zhao et al. 2018). It is noted that in this context the term full waveform denotes the temporal record of the received laser signal amplitude (Wagner 2010) rather than the shape of water waves.

Whereas traditional hydrographic mapping via sonar (sound navigation and ranging) yields a higher penetration depth (>100 m), ALB is well suited for capturing the shallow near shore area (Guenther et al. 2000) as well as unnavigable and ecologically sensitive areas with restricted access (Pfennigbauer et al. 2011). This article provides a compact airborne laser bathymetry review and is structured as follows: Section 2 introduces the basic principles of ALB. Section 3 discusses available sensor and platform concepts and section 4 lists potential applications. The article concludes with a summary and remarks on current trends in section 5.

2 Basics of airborne laser bathymetry

The principles of ALB are summarised in Pfeifer, Mandlburger and Glira (2015) and in Philpot (2019). Fig. 1 shows a conceptual drawing of the measurement process. A short laser pulse in the green domain of the spectrum ($\lambda = 532$ nm) is emitted from the scanner mounted on an aerial platform (aircraft, helicopter, UAV, etc.), travels through the atmosphere and hits the water surface, where a part of the signal is scattered back. The remaining part propagates through the water column with reduced propagation speed, is reflected from the water bottom, and a small portion of the emitted laser power reaches the sensor's receiver after the return trip. Based on the time-of-flight principle ranges are derived from the round trip time, i.e., the time span between pulse emission and arrival of the backscattered echo pulse. In ALB, the complete waveform of the backscattered signal is digitised with high temporal resolution (typically 0.5 ns). Pulse detection is achieved by analysing the full echo waveform either online in the instrument (Pfennigbauer et al. 2014) or in post processing (Allouis et al. 2010; Abady et al. 2014; Schwarz et al. 2019). Surface and bottom detection is exemplified in the sketch of the received echo waveform in Fig. 1 as two gray Gaussian curves.

ALB is a multimedia measurement technique with the laser pulses travelling in air and water. The two media are characterised by their refractive indices n_{air} and n_{water} describing the relative signal propagation speed in vacuum (c_0) and the respective media (c_{air} , c_{water}). At the air-water-interface the laser beam gets deflected and the

propagation speed reduces. Both beam deflection and change of signal propagation velocity are described by Snell's law:

$$\frac{\sin \alpha_{\text{air}}}{\sin \alpha_{\text{water}}} = \frac{c_{\text{air}}}{c_{\text{water}}} = \frac{n_{\text{water}}}{n_{\text{air}}}$$

$$\text{With: } n_{\text{air}} = c_0/c_{\text{air}} \approx 1.0 \\ n_{\text{water}} = c_0/c_{\text{water}} \approx 1.33$$

To ensure eye safe operation, green laser beams are generally broader compared to infrared (IR) lasers used for topographic application. Typical laser beam divergences range from 1 to 7 mrad resulting in a diameter of the illuminated footprint area at the water surface of 50 to 350 cm for a nominal flying altitude of 500 m. Further non-linear beam spreading takes place in the water column caused by volume scattering at floating and suspended particles (cf. hyperbolic underwater light cone, Fig. 1). Signal attenuation in water is exponential as a result of scattering and absorption and leads to asymmetric shapes of the received echo waveform (Tulldahl and Steinvall 2004; Abdallah et al. 2012). Typical water waveforms show a first peak from the water surface, followed by an asymmetric descent in the water column and a weak response from the water bottom. Next to the receiver sensitivity, the maximum penetration capability of any ALB system is limited by the water optical properties, i.e., turbidity, which is described either by the diffuse attenuation coefficient k or the Secchi depth SD (Guenther 1985; Guenther et al. 2000).

The attenuation coefficient k appears as the exponent in the water column term of the laser-radar-equation (Tulldahl and Steinvall 1999; Abdallah et al. 2012; Pfeifer, Mandlburger and Glira 2015) and, thus, influences the asymmetric signal decay in the received echo waveform. Turbid water conditions ($k = 1$) lead to a steeper signal decay compared to clear water ($k = 0.1$). SD is an empirical turbidity measure. It denotes the distance, where the black and white quadrants of a 20 cm or 30 cm checkerboard disk lowered into the water can no longer be distinguished. k and SD are approximately related by $SD \approx 1.6/k$ (ISO 2019). The most powerful bathymetric laser scanners feature a depth performance of approximately 3 SD . Thus, ALB is restricted to depths less than 60 m in very clear water conditions with $SD = 20$ m ($k = 0.08$). Such ideal conditions apply to certain coastal waters (e.g., Caribbean Sea) and calm sea state. In contrast, unfavourable environmental conditions (wind, thunderstorms, snow melt, etc.) entail higher suspended sediment concentration (SSC), which reduces the measurable depth to less than 10 m.

Precise knowledge of the 3D shape of the water surface is a prerequisite for applying refraction and run-time correction of the raw laser measurements which, in turn, is a precondition for obtain-

ing precise water depths and underwater topography (Thomas and Guenther 1990; Guenther et al. 2000). When using green laser radiation only, water surface returns always constitute a mixture of reflections from the surface and sub-surface volume backscattering (Guenther 1986; Guenther et al. 2000). This typically leads to water level underestimation (Mandlbauer 2017). Thus, traditional ALB systems use an additional non-water penetrating IR laser, synchronously and collinearly emitted with the green laser to capture the shape of the water surface. Today, most instruments abdicate the use of a co-aligned IR laser and either use a separate IR scanner as depicted in Fig. 1 or entirely drop the IR channel and estimate the water surface from the

green laser returns only. In the latter case, sophisticated waveform modelling (Schwarz et al. 2019) or spatial aggregation (Mandlbauer, Pfennigbauer and Pfeifer 2013) are necessary to minimise systematic water surface underestimation. Surface model simplification, however, limits the achievable depth accuracy and leads to systematic errors (Westfeld et al. 2017; Richter et al. 2018).

Apart from these bathymetry specific and pulse related tasks (surface and bottom echo detection, refraction and run time correction, etc.), 3D point cloud generation is identical to the topographic case. In a process referred to as direct georeferencing, scanner measurements (range, scan angle) are combined with position and attitude information

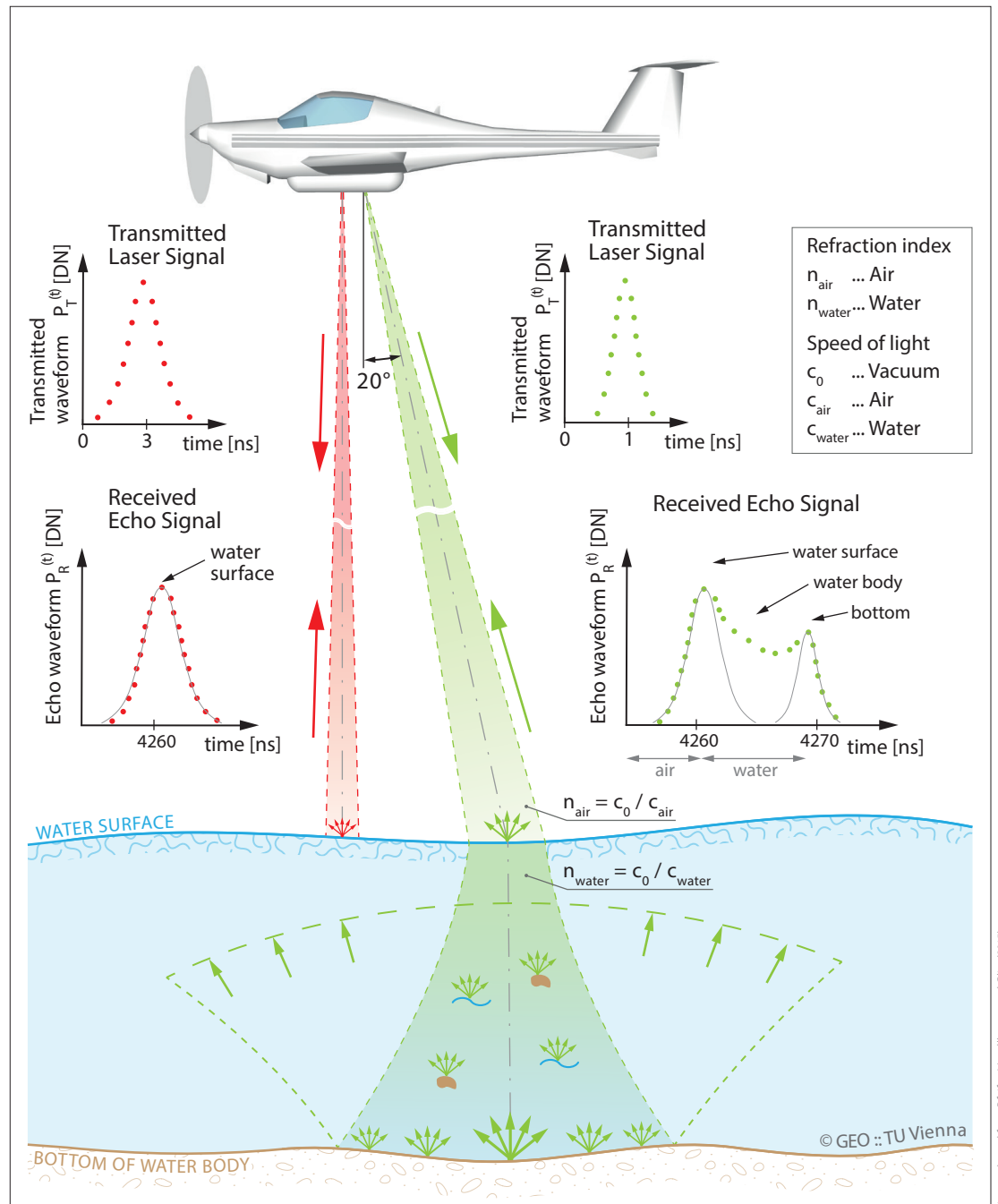


Fig. 1: Conceptual drawing of the principle of airborne laser bathymetry

Figure adapted from Pfeifer, Mandlbauer and Gira (2015)

from a navigation device consisting of a global navigation satellite system (GNSS) receiver and an inertial measurement unit (Vosselman and Maas 2010; Shan and Toth 2018).

3 Sensors and platforms

ALB systems can be categorised into deep bathymetric, topo-bathymetric, and multi-purpose sensors. The aim of deep bathymetric scanners is maximising depth penetration for mapping coastal waters. These systems utilise relatively long and broad laser pulses (pulse duration: 7 ns, beam divergence: 7 mrad), high pulse energy (7 mJ), and a low measurement rate (3 to 10 kHz) entailing large laser footprints and low point density. Capturing smaller inland waters, in turn, requires higher spatial resolution. Therefore, state-of-the-art topo-bathymetric sensors use short and narrow laser beams (pulse duration: 1 to 2 ns, beam divergence: 0.7 to 2 mrad) and higher pulse repetition rates of up to 500 kHz resulting in laser footprint diameters of 0.5 to 1 m and a point density of around 20 points/m². Topo-bathymetric scanners, however, only feature a maximum penetration of around 1.5 SD. In the recent years, multi-spectral and single photon LiDAR scanners were introduced in the market. The prior enable the derivation of vegetation indices featuring both infrared and green laser wavelengths (Fernandez-Diaz et al. 2016) and the latter is primarily used for large scale topographic mapping (Degnan 2016), but both also feature bathymetric capabilities. Single photon technology is also used by the LiDAR instrument aboard the ICESat-2 satellite (Parish et al. 2019).

Apart from depth penetration, ALB systems differ with reference to the utilised laser wavelengths. As stated before, traditional ALB systems utilise coaxial infrared and green laser beams for water surface and water bottom detection on a

per pulse basis (Wozencraft and Lillycrop 2003; Fuchs and Tuell 2010). Other sensors use disjoint infrared and green lasers (cf. Fig. 1), resulting in precise reconstructions of static water surfaces from the non-water penetrating infrared channel. Many of today's instruments, however, use green lasers only to detect both water surface and bottom (Pfennigbauer et al. 2011; Wright et al. 2016). This poses challenges for water surface modelling, as laser echoes from the water surface constitute a mixture of specular reflections from the air-water interface and sub-surface volume backscattering, which demands sophisticated data processing for obtaining precise water surface models (Thomas and Guenther 1990; Birkebak et al. 2018; Mandlbürger et al. 2013; Schwarz et al. 2019).

Another possibility for categorising ALB sensors is the carrier platform. While deep bathymetric systems are typically bulky with a weight of 50 to 100 kg and require larger aircraft, topo-bathymetric systems are more compact in size and weight and can be integrated in light aircraft and helicopters. Ongoing sensor miniaturisation currently leads to the development of lightweight bathymetric laser scanners (5 to 15 kg) suitable for integration in gyrocopters, helicopters and even unmanned aerial vehicles (UAV).

Table 1 summarises the key parameters of different deep bathymetric and topo-bathymetric sensors. The reported pulse energy, pulse duration, beam divergence and depth penetration values always refer to the bathymetric channels. If more than one green laser channel is available (HawkEye 4X, CZMIL Nova, EAARL-B), the values refer to the deep water channel. Although deep and shallow water channels both use the same laser wavelength ($\lambda = 532$ nm), the higher penetration depth of the deep water channels is generally achieved by using higher pulse energy, longer pulse dura-

	LADS HD	HawkEye 4X	CZMIL Nova	VQ-880-GII	Chiroptera 4X	EAARL-B
	deep bathymetric			topo-bathymetric		
Weight [kg]	n/s	~170	290	65	n/s	n/s
Dimensions [cm]	n/s	n/s	89 × 60 × 90	52 × 52 × 69	~67 × 53 × 75	n/s
Laser channels [nm]	532	532/532/1064	532/532/1064	532/1064	532/1064	532/532
Camera	RGB + hypersp	RGBI	RGB + hypersp	RGB	RGBI	---
Measurement rate [kHz]	3.0	40/140/500	10/70/80	700/279	140/500	15–30
Pulse energy [mJ]	7	3	4	n/s	0.1	0.4/0.13
Pulse duration [ns]	~7	2	3	1.5	4	1.3
Field of view [°]	n/s	40	40	40	40	44
Beam divergence [mrad]	7	7	7	0.7–2	~3	1
Nominal flying altitude [m]	365–900	400–600	400–1000	600–700	400–600	300
Laser footprint [cm]	270–630	280–420	280–700	40–280	120–180	30
Scan pattern	rectilinear	elliptical	circular	circular	elliptical	elliptical arc
Depth performance [SD]	3.0	3.0	3.0	1.5	1.7	2.5

Table 1: Key parameters of deep bathymetric and topo-bathymetric laser scanners

	BDF-1	ASTRALite	RAMSS	VQ-840-G
Weight [kg]	5.3	5.0	14	12
Dimensions [cm]	45 × 18 × 14	27 × 23 × 19	~42 × 37 × 760	36 × 29 × 20
Camera	RGB	---	RGB	RGB
Measurement rate [kHz]	4	20	25	50–200
Pulse duration [ns]	1.2	n/s	5.1	1.5
Field of view [°]	n/s	30	45	40
Beam divergence [mrad]	n/s	12	n/s	1–6
Flying altitude [m]	20	20	325	50–150
Laser footprint [cm]	3.5	24	n/s	5–90
Scan mechanism	no scanning	rectilinear	pushbroom	elliptical
Depth performance [SD]	1.5	1.5	3.0	2.0

Table 2: Key parameters of bathymetric UAV-laser sensors

tion and a larger beam divergence. Table 1 clearly shows that the deep water systems provide a maximum penetration depth of around 3 SD but feature a large laser footprint diameter in the range of 3 to 7 m and a moderate measurement rate of 3 to 40 kHz resulting in point densities of ≤ 2 points/m². The topo-bathymetric scanners and the shallow water channels of deep bathymetric scanners, in turn, are optimised for high resolution mapping. They feature smaller footprint diameters in the m-range, higher measurement rates of up to 700 kHz resulting in a water bottom point density of around 20 points/m² at the price of limited depth penetration capability (1.5 SD). Most of the sensors are equipped with RGB cameras for the prime purpose of photo documentation. Some instruments, however, also integrate high-resolution metric cameras (e.g. PhaseOne IXU, RDC30) allowing bathymetric mapping also from concurrently captured images via multimedia stereo photogrammetry (Westaway, Lane and Hicks 2001; Maas 2015; Mandlbürger 2019) or spectrally based depth estimation (Lyzenga, Malinas and Tanis 2006; Legleiter, Dar and Rick 2009).

Deep water channels generally use high energy laser pulses which require powerful laser sources on the one hand and longer pulse durations on the other hand. The latter has an implication concerning the minimum detectable depth, as surface and bottom echoes conflate to a single peak in the received waveform. For this reason, topo-bathymetric scanners dedicated to shallow water mapping generally use very short laser pulses of around 1 ns. This is especially important for green-only instruments. Concerning vertical accuracy, all LiDAR instruments listed in Table 1 meet the required accuracy standards formulated by the International Hydrographic Organization (IHO 2008). The standard defines different levels of accuracy demand (orders), among which the special order is the most rigorous requiring a total vertical uncertainty (TVU) of better than 30 cm. This measure

includes all possible error factors like positioning, orientation, boresight alignment, ranging, as well as uncertainties related to water surface and water column (Eren et al. 2019).

Table 2 summarises the key parameters of the latest generation of compact bathymetric laser scanners which also allow integration on UAVs. These small and lightweight sensors are operated from 20 to 150 m resulting in smaller laser footprints in the dm-range. The generally high measurement rate of 20 to 200 kHz entails a point density of more than 50 points/m² which opens new possibilities for small object detection and roughness estimation (Mandlbürger et al. 2020). The depth measurement performance is on par or even better compared to topo-bathymetric sensors operated from manned platforms. In addition, the mobilisation costs are lower and the use of agile airborne platforms make these instruments especially well-suited for capturing medium sized rivers when integrated on UAV platforms but also for capturing coastal areas when integrated on light aircraft.

Fig. 2 shows selected ALB scanners featuring instruments with deep water channels (a, b), topo-bathymetric sensors designed for manned aircraft (a, b, c, d) and compact topo-bathymetric sensors designed for UAV-integration (e, f). Except f, all instruments feature digital cameras in addition to the LiDAR sensors and therefore fall into the category of hybrid mapping sensors.

4 Applications

The applications of ALB are manifold and constantly increasing as the available sensors are getting more versatile on the one side and more compact on the other side. In the following, some exemplary applications and related publications are listed.

- Underwater object detection: The first application of bathymetric LiDAR was underwater object detection for military purposes (Sorenson, Honey and Payne 1966). More recent civil application in the maritime domain include object detection for maintaining harbour security, safe navigation of autonomous underwater vehicles, and safety of the littoral zone (Matteoli et al. 2015). In any case, the detection of small objects requires sophisticated full waveform analysis (Tulldahl and Steinvall 1999). While ALB sensors operated from manned platforms feature footprint diameters in the m-range, detection and reconstruction of boulder-size objects became feasible with the introduction of UAV-borne laser bathymetry (Mandlbürger et al. 2020).
- 3D-mapping of submerged topography: This is the main application of ALB. Hickman and Hogg (1969) were the first to confirm the general feasibility to perform laser-based near-shore hydrography. Since then, ALB was increasingly used for nautical charting in shal-



Fig. 2: Examples of airborne laser bathymetry sensors. (a) Chiroptera 4X and HawkEye 4X, (b) CZMIL (Coastal Zone Mapping and Imaging Lidar), (c) VQ-880-GII, (d) Titan Multispectral Lidar, (e) VQ-840-G, (f) ASTRALite edgeLidar

low water coastal and harbour environments with a focus on maximising depth penetration (Guenther and Goodman 1978; Guenther et al. 2000; Wozencraft and Lillycrop 2003; Song et al. 2015). Most recently, even space-borne instruments like ICESat-2 proved its suitability for near-shore bathymetric mapping (Parrish et al. 2019). For mapping smaller inland water bodies, the higher spatial resolution offered by topo-bathymetric LiDAR sensors operated from manned and unmanned platforms is required (Mitchell, Thayer and Hayman 2010; Pfennigbauer et al. 2011; Doneus et al. 2013; Kinzel, Legleiter and Nelson 2013; Fernandez-Diaz et al. 2014; Legleiter et al. 2016; Steinbacher et al. 2016; Kasvi et al. 2019; Mader et al. 2019; Mitchell 2019). Today, the progress in charting of submerged topography via ALB profits from systematic integration into regional and national mapping programs (Wessels et al. 2015; Christiansen 2016; Danielson et al. 2016; Ellmer 2016; Witmer et al. 2016).

- **Ecology:** Environmental applications of ALB are strongly promoted by trans-national initiatives and frameworks all over the world, but especially in Europe (European Commission 1992, 2000, 2007). This applies to the coastal zone as well as to inland lakes and running waters. Applications concentrate on estimation of seafloor

reflectance and detection, classification, and modelling of benthic habitats (Wedding et al. 2008; Aitken et al. 2010; Mandlbürger et al. 2015; Parrish et al. 2016; Wilson et al. 2019). Another important aspect in this context is river restoration (Kinzel, Legleiter and Nelson 2013; Miller and Addy 2019).

- **Coastal and fluvial geomorphology:** ALB is increasingly used in geomorphology studies both for understanding the impact of long-term processes as well as short-term fluctuations caused by hydropeaking (Fink et al. 2005; Fink and Andrews 2009; Hauer and Pulg 2018; Juárez et al. 2019). It is also gaining importance as the prime basis for all kinds of hydrodynamic-numerical models and flow related applications (McKean et al. 2014; Mandlbürger et al. 2015; Kinzel and Legleiter 2019; Tonina et al. 2019).
- **Turbidity estimation:** The main factor limiting depth penetration in ALB is turbidity. Beyond that, water turbidity itself is an important factor as a proxy for water quality. Regular monitoring is, e.g., requested by the European Water Frame Directive (European Commission 2000). An increasing body of literature documents the feasibility of ALB-derived turbidity estimation based on sophisticated full waveform analysis (Steinbacher et al. 2016; Richter et al. 2017; Zhao et al. 2018; Launeau et al. 2019).

- Risk assessment and disaster management: Driven by climate change, the increased occurrence of extreme weather phenomena (thunderstorms, hurricanes, floods, etc.) require up-to-date data of pre and post states of coastal and alluvial areas, both above and below the water table. While it is clear that this requirement can only be fulfilled by combining all sorts of acquisition techniques, ALB plays an important role in this context (Zhang et al. 2005; Robertson 2007; Parrish et al. 2016; Eisemann et al. 2019).

5 Summary and outlook

In this article, the basics and potential applications of airborne laser bathymetry were reviewed. This active, optical, multimedia remote sensing technique uses short laser pulses in the green domain of the spectrum to estimate the depth of relatively clear and shallow coastal and inland water bodies via round trip time measurement. One of the core steps for processing bathymetric LiDAR data is refraction and run-time correction of the raw laser signals, as the laser beam is subject to beam deflection at the air-water-interface and the laser pulses travel with reduced propagation speed in water. Precise modelling of the water surface and bottom as well as characterisation of the water column properties require understanding of the complex interaction of laser radiation with the medium water and are enabled by elaborate full waveform analysis.

Today, ALB sensors are operated from manned and unmanned platforms. State-of-the-art scanners provide a deep as well as a shallow water channel. Whereas the prior is optimised for maximum depth penetration of up to 3 SD with limited spatial resolution, the latter features high spatial resolution with typical laser footprint diameters of around 50 cm and a laser pulse density of up to 20 points/m² with limited depth penetration

of 1.5 SD. Turbidity is the main parameter limiting depth penetration. In very clear waters, deep water systems can reach a maximum depth of around 60 m. Thus, ALB is restricted to shallow water areas but constitutes an alternative to sonar hydrography in the very shallow zone, where shipborne acquisition is both dangerous and less efficient. ALB and sonar should, therefore, rather be considered complementary than competing bathymetric mapping techniques.

Ongoing sensor and platform miniaturisation has just recently enabled integration of bathymetric LiDAR on UAV platforms. The agility of UAVs together with the higher spatial resolution in the dm-range enable new applications of ALB like roughness characterisation as well as detection and 3D reconstruction of small submerged features and objects. This expands the potential field of use of ALB which today include bathymetric mapping of coastal and inland waters, detection of submerged objects, coastal and fluvial geomorphology, ecology including aquatic habitat modelling and river restoration, flood risk assessment, disaster management, and the like.

The recent generation of hybrid sensors comprising bathymetric laser scanners and multispectral cameras furthermore enables joint processing of data from active and passive sources. Thus, the originally distinct fields of laser bathymetry, multimedia photogrammetry, and spectrally based depth estimation are currently coalescing. While image-based techniques for deriving bathymetry are limited to the visual depth (i.e., 1 SD), lasers provide a higher depth penetration, but inherent physical limits also apply to ALB due to light attenuation in water. Thus, today's challenges for maintaining and improving the complex and sensitive shallow and deep water ecosystem require intensified collaboration of experts in the field of sonar hydrography and LiDAR bathymetry. //

References

- Abady, Lydia; Jean Stéphane Bailly et al. (2014): Assessment of quadrilateral fitting of the water column contribution in lidar waveforms on bathymetry estimates. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, DOI: 10.1109/LGRS.2013.2279271
- Abdallah, Hani; Nicolas Baghdadi et al. (2012): Wa-LiD: A new LiDAR simulator for waters. *IEEE Geoscience Remote Sensing Letters*, DOI: 10.1109/LGRS.2011.2180506
- Aitken, Jennifer; Vinod Ramnath et al. (2010): Prelude to CZMIL: Seafloor imaging and classification results achieved with CHARTS and the Rapid Environmental Assessment (REA) processor. *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery*, DOI: 10.1117/12.851915
- Allouis, Tristan; Jean-Stéphane Bailly et al. (2010): Comparison of LiDAR waveform processing methods for very shallow water bathymetry using raman, near-infrared and green signals. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.1959
- Birkebak, Matthew; Firat Eren et al. (2018): The effect of surface waves on Airborne Lidar Bathymetry (ALB) measurement uncertainties. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs10030453
- Christiansen, Lutz (2016): New techniques in capturing and modelling of morphological data. *Hydrographische Nachrichten*, DOI: 10.23784/HN105-04
- Danielson, Jeffrey J.; Sandra K. Poppenga et al. (2016): Topo-bathymetric elevation model development using a new methodology: Coastal National Elevation Database. *Journal of Coastal Research*, DOI: 10.2112/5176-008
- Degnan, John J. (2016): Scanning, multibeam, Single Photon Lidars for rapid, large scale, high resolution, topographic

- and bathymetric mapping. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs8110958
- Doneus, Michael; Nives Doneus et al. (2013): Airborne Laser Bathymetry – Detecting and recording submerged archaeological sites from the air. *Journal of Archaeological Science*, DOI: 10.1016/j.jas.2012.12.021
- Eisemann, Eve; Lauren Dunkin et al. (2019): JALBTCX/NCMP Emergency-Response Airborne Lidar Coastal Mapping & Quick Response Data Products for 2016/2017/2018 Hurricane Impact Assessments. *Shore & Beach*, DOI: 10.34237/1008744
- Ellmer, Wilfried (2016): Use of laser bathymetry at the German Baltic Sea coast. *Hydrographische Nachrichten*, DOI: 10.23784/HN105-05
- Eren, Firat; Jaehoon Jung et al. (2019): Total Vertical Uncertainty (TVU) modeling for topo-bathymetric LIDAR systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, DOI: 10.14358/PERS.85.8.585
- European Commission (1992): Council Directive 92/43/EEC on the Conservation of Natural Habitats and of Wild Fauna and Flora. *Official Journal of the European Communities (OJL) L 206 (35)*
- European Commission (2000): Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 Establishing a Framework for Community Action the Field of Water Policy. *Official Journal of the European Communities (OJL) L 327 (173): 1–72*
- European Commission (2007): Directive 2007/60/EC of the European Parliament and European Council of October 2007 on the Assessment and Management of Flood Risks. *Official Journal of the European Communities (OJL) 288 (27)*
- Fernandez-Diaz, Juan Carlos; Craig L. Glennie et al. (2014): Early results of simultaneous terrain and shallow water bathymetry mapping using a single-wavelength airborne LIDAR sensor. *IEEE Journal Of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2265255
- Fernandez-Diaz, Juan Carlos; William E. Carter et al. (2016): Capability assessment and performance metrics for the Titan Multispectral Mapping Lidar. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs8110936
- Fink, Charles W.; Lindino Benedet; Jeffrey L. Andrews (2005): Interpretation of seabed geomorphology based on spatial analysis of high-density airborne laser bathymetry. *Journal of Coastal Research*, DOI: 10.2112/05-756A.1
- Fuchs, Eran; Grady Tuell (2010): Conceptual design of the CZMIL Data Acquisition System (DAS): Integrating a new bathymetric Lidar with a commercial spectrometer and metric camera for coastal mapping applications. *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery*, DOI: 10.1117/12.851919
- Guenther, Gary (1985): Airborne Laser Hydrography: System design and performance Factors. *NOAA Professional Paper Series*
- Guenther, Gary (1986): Wind and nadir angle effects on airborne Lidar water surface returns. *Proceedings SPIE*, DOI: 10.1117/12.964243
- Guenther, Gary; Lowell R. Goodman (1978): Laser applications for near-shore nautical charting. *Ocean Optics V*, DOI: 10.1117/12.956863
- Guenther, Gary; Grant Cunningham et al. (2000): Meeting the accuracy challenge in airborne Lidar bathymetry. *Proceedings of the 20th EARSel Symposium: Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea*. Dresden, Germany
- Hauer, Christoph; Ulrich Pulg (2018): The non-fluvial nature of western Norwegian rivers and the implications for channel patterns and sediment composition. *Catena* 171, DOI: 10.1016/j.catena.2018.06.025
- Hickman, G. Daniel; John E. Hogg (1969): Application of an airborne pulsed laser for near shore bathymetric measurements. *Remote Sensing of Environment*, DOI: 10.1016/S0034-4257(69)90088-1
- IHO (2008): S-44, Standards for hydrographic surveys. www.iho.int/iho_pubs/standard/S-44_5E.pdf
- ISO (2019): Water Quality – Determination of turbidity – Part 2: Semi-quantitative methods for the assessment of transparency of waters. www.iso.org/standard/69545.html
- Juárez, Ana; Ana Adeva-Bustos et al. (2019): Performance of a two-dimensional hydraulic model for the evaluation of stranding areas and characterisation of rapid fluctuations in hydropeaking rivers. *Water (Switzerland)*, DOI: 10.3390/w11020201
- Kasvi, Elina; Jouni Salmela et al. (2019): Comparison of remote sensing based approaches for mapping bathymetry of shallow, clear water rivers. *Geomorphology*, DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.02.017
- Kinzel, Paul J.; Carl J. Legleiter (2019): SUAS-based remote sensing of river discharge using thermal particle image velocimetry and bathymetric Lidar. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs11192317
- Kinzel, Paul J.; Carl J. Legleiter; Jonathan M. Nelson (2013): Mapping river bathymetry with a small footprint green LiDAR: Applications and challenges. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, DOI: 10.1111/jawr.12008
- Launeau, Patrick; Manuel Giraud et al. (2019): Full-waveform LiDAR fast analysis of a moderately turbid bay in Western France. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs11020117
- Legleiter, Carl J.; Brandon T. Overstreet et al. (2016): Evaluating the capabilities of the CASI Hyperspectral Imaging System and Aquarius Bathymetric LiDAR for measuring channel morphology in two distinct river environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.3794
- Legleiter, Carl J.; A. Roberts Dar; L. Lawrence Rick (2009): Spectrally based remote sensing of river bathymetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.1787
- Lyzenga, David R.; Norman P. Malinas; Fred J. Tanis (2006): Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/TGRS.2006.872909
- Maas, Hans-Gerd (2015): On the accuracy potential in underwater/multimedia photogrammetry. *Sensors*, DOI: 10.3390/s150818140
- Mader, David; Katja Richter et al. (2019): Detection and extraction of water bottom topography from laser bathymetry data by using full-waveform stacking techniques. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1053-2019
- Mandlburger, Gottfried (2017): Interaction of laser pulses with the water surface – Theoretical aspects and experimental

- results. AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 124, pp. 11–12
- Mandlbürger, Gottfried (2019): Through-water dense image matching for shallow water bathymetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, DOI: 10.14358/PERS.85.6.445
- Mandlbürger, Gottfried; Christoph Hauer et al. (2015): Topo-bathymetric LiDAR for monitoring river morphodynamics and instream habitats – A case study at the Pielach river. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs70506160
- Mandlbürger, Gottfried; Martin Pfennigbauer; Norbert Pfeifer (2013): Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry – A case study at the river Pielach. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W2-175-2013
- Mandlbürger, Gottfried; Martin Pfennigbauer et al. (2020): Concept and performance evaluation of a novel UAV-borne topo-bathymetric LiDAR sensor. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs12060986
- Matteoli, Stefania; Giovanni Corsini et al. (2015): Automated underwater object recognition by means of fluorescence LiDAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI: 10.1109/TGRS.2014.2322676
- McKean, James; Daniele Tonina et al. (2014): Effects of bathymetric Lidar errors on flow properties predicted with a multi-dimensional hydraulic model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, DOI: 10.1002/2013JF002897
- Miller, Pauline; Stephen Addy (2019): Topo-bathymetric Lidar in support of hydromorphological assessment, river restoration and flood risk management. www.crew.ac.uk/publication/topo-bathymetric-lidar-support-hydromorphological-assessment-river-restoration-and-flood
- Mitchell, Steven; Jeffrey P. Thayer; Matthew Hayman (2010): Polarization Lidar for shallow water depth measurement. *Applied Optics*, DOI: 10.1364/AO.49.006995
- Mitchell, Todd (2019): From PILLS to RAMMS. 20th Annual JALBTCX Airborne Coastal Mapping and Charting Technical Workshop
- Mobley, Curtis (1994): *Light and water: radiative transfer in natural waters*. Academic Press
- Parrish, Christopher E.; Lori A. Magruder et al. (2019): Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs11141634
- Parrish, Christopher E.; Jennifer A. Dijkstra et al. (2016): Post-sandy benthic habitat mapping using new topobathymetric Lidar technology and object-based image classification. *Journal of Coastal Research*, DOI: 10.2112/SI76-017
- Pfeifer, Norbert; Gottfried Mandlbürger; Philipp Glira (2015): *Laserscanning*. *Photogrammetrie und Fernerkundung*, DOI: 10.1007/978-3-662-46900-2
- Pfennigbauer, Martin; Andreas Ullrich et al. (2011): High-resolution hydrographic airborne laser scanner for surveying inland waters and shallow coastal zones. *Proceedings SPIE*, DOI: 10.1117/12.883910
- Pfennigbauer, Martin; Clifford Wolf et al. (2014): Online waveform processing for demanding target situations. *Proceedings SPIE*, DOI: 10.1117/12.2052994
- Philpot, William (2019): *Airborne Laser Hydrography II*. Coernell, DOI: 10.7298/jxm9-g971
- Richter, Katja; Hans-Gerd Maas et al. (2017): An approach to determining turbidity and correcting for signal attenuation in airborne Lidar bathymetry. *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, DOI: 10.1007/s41064-016-0001-0
- Richter, Katja; David Mader et al. (2018): Numerical simulation and experimental validation of wave pattern induced coordinate errors in airborne Lidar bathymetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-961-2018
- Robertson, William (2007): *Airborne laser quantification of Florida shoreline and beach volume change caused by hurricanes*. ProQuest Dissertations and Theses, <https://search.proquest.com/docview/304711270?accountid=28155>
- Schwarz, Roland; Gottfried Mandlbürger et al. (2019): Design and evaluation of a full-wave surface and bottom-detection algorithm for LiDAR bathymetry of very shallow waters. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.02.002
- Shan, Jie; Charles K. Toth (2018): *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. Taylor & Francis
- Song, Yujin; Joachim Niemeyer et al. (2015): Comparison of three airborne laser bathymetry data sets for monitoring the German Baltic Sea coast. *Proceedings SPIE*, DOI: 10.1117/12.2194960
- Sorenson, G. P.; R. C. Honey; J. R. Payne (1966): *Analysis of the use of airborne laser radar for submarine detection and ranging*. SRI Report 5583
- Steinbacher, Frank; Ramona Baran et al. (2016): High-resolution, topobathymetric LiDAR coastal zone characterisation. *Hydrographische Nachrichten* 105. DOI: 10.23784/HN105-03
- Thomas, Robert; Gary Guenther (1990): Water surface detection strategy for an airborne laser bathymeter. *Proceedings SPIE*, DOI: 10.1117/12.21474
- Tonina, Daniele; James McKean et al. (2019): Mapping river bathymetries: Evaluating topobathymetric LiDAR survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.4513
- Tulldahl, H. Michael; K. Ove Steinvall (1999): Analytical waveform generation from small Objects in Lidar bathymetry. *Applied Optics*, DOI: 10.1364/ao.38.001021
- Tulldahl, H. Michael; K. Ove Steinvall (2004): Simulation of sea surface wave influence on small target detection with airborne laser depth sounding. *Applied Optics*, DOI: 10.1364/AO.43.002462
- Vosselman, George; Hans-Gerd Maas (2010): *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Whittles Publishing
- Wagner, Wolfgang (2010): Radiometric calibration of small-footprint full-waveform airborne laser scanner measurements: Basic physical concepts. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2010.06.007
- Wedding, Lisa M.; Alan M. Friedlander et al. (2008): Using bathymetric Lidar to define nearshore benthic habitat complexity: Implications for management of reef fish assemblages in Hawaii. *Remote Sensing of Environment*, DOI: 10.1016/j.rse.2008.01.025
- Wessels, Martin; Flavio Anselmetti et al. (2015): Bathymetry of Lake Constance – A high-resolution survey in a large, deep

- lake. ZfV – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, DOI: 10.12902/zfv-0079-2015
- Westaway, Richard M.; Stuart N. Lane; D. Murray Hicks (2001): Remote sensing of clear-water, shallow, gravel-bed rivers using digital photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67 (11), pp. 1271–1281
- Westfeld, Patrick; Hans-Gerd Maas et al. (2017): Analysis and correction of ocean wave pattern induced systematic coordinate errors in airborne LiDAR bathymetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2017.04.008
- Wilson, Nicholas; Christopher E. Parrish et al. (2019): Mapping seafloor relative reflectance and assessing coral reef morphology with EAARL-B topobathymetric Lidar waveforms. *Estuaries and Coasts*, DOI: 10.1007/s12237-019-00652-9
- Witmer, Joshua D., Gretchen Imahori et al. (2016): Integration of U.S. Army Corps of Engineers airborne Lidar bathymetry (ALB) survey data into NOAA's processing workflow. NOAA, DOI: 0.7289/V5/TM-NOS-CS-36
- Wozencraft, Jennifer M.; W. Jeff Lillycrop (2003): SHOALS airborne coastal mapping: Past, present, and future. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 38, pp. 207–215
- Wright, C. Wayne; Christine Kranenburg et al. (2016): Depth calibration and validation of the experimental advanced airborne research Lidar, EAARL-B. *Journal of Coastal Research*, DOI: 10.2112/si76-002
- Zhang, Keqi; Dean Whitman et al. (2005): Quantification of beach changes caused by hurricane Floyd along Florida's Atlantic coast using airborne laser surveys. *Journal of Coastal Research*, DOI: 10.2112/02057.1
- Zhao, Xinglei; Jianhu Zhao et al. (2018): Remote sensing of suspended sediment concentrations based on the waveform decomposition of airborne LiDAR bathymetry. *Remote Sensing*, DOI: 10.3390/rs10020247

Klein und stark.

UNSERE USBL-FAMILIE WÄCHST



Gaps M5

Exportfreies omnidirektionales - Unterwasser-navigationssystem – von der Oberfläche bis in mittlere Gewässertiefen (995 m) einsetzbar.

iXblue

oceanology
international
Booth #E100

Coastal cliff monitoring using UAS photogrammetry and TLS

A peer-reviewed paper by THOMAS P. KERSTEN, MAREN LINDSTAEDT and KLAUS MEHELKE

Climate change and the imminent sea-level rise mean that coastal protection is becoming increasingly important, and measures must be taken to ensure that life and important infrastructure in coastal areas are protected. An essential prerequisite for the implementation of appropriate coastal protection measures is the monitoring of endangered areas through appropriate sensor technology for the documentation and quantification of damages caused. In this contribution, a practical application is introduced using low-cost UAS (unmanned aerial system) to perform aerial flights for the monitoring of a coastal cliff at the Baltic Sea in Germany, since cliffs are exposed to and unprotected from autumn and winter storms. In comparison to UAS-based photogrammetric monitoring with terrestrial laser scanning (TLS), the photogrammetric method showed the same accuracy, but better coverage of the investigated area and a more efficient workflow.

3D | comparison | erosion | dense image matching | DSM | landslide
3D | Vergleich | Erosion | Dense-Image-Matching | DSM | Erdbeben

Wegen des Klimawandels und des bevorstehenden Meeresspiegelanstiegs wird der Küstenschutz immer wichtiger. Mit zahlreichen Maßnahmen werden Leben und wichtige Infrastrukturen in den Küstengebieten geschützt. Eine wesentliche Voraussetzung für die Umsetzung entsprechender Küstenschutzmaßnahmen ist die Überwachung der gefährdeten Gebiete durch geeignete Sensorik zur Dokumentation und Quantifizierung der verursachten Schäden. In diesem Beitrag wird eine praktische Anwendung vorgestellt, bei der ein Küstenkliff an der Ostsee, das ungeschützt und exponiert gegenüber Herbst- und Winterstürmen ist, mit Hilfe von kostengünstigen UAS (unbemannten Flugsystemen) überwacht wurde. Ein Vergleich des luftgestützten photogrammetrischen Monitorings mit terrestrischem Laserscanning (TLS) zeigte, dass die photogrammetrische Methode die gleiche Genauigkeit aufweist, aber eine bessere Abdeckung des Untersuchungsgebiets und einen effizienteren Arbeitsablauf ermöglicht.

Authors

Prof. Dr. Thomas P. Kersten teaches photogrammetry and laser scanning at HafenCity University (HCU) in Hamburg. Maren Lindstaedt and Klaus Mechelke are research associates at HCU.

thomas.kersten@hcu-hamburg.de

1 Introduction

Due to climate change and the consequent rise of sea level, coastal areas are increasingly at risk from extreme weather events such as storm-induced flooding, which can lead to increased coastal erosion. According to Alexander (1993), the natural potential for coastal erosion is influenced by the following five factors: (1) the lack of protection of rocks and sediments against waves and currents, (2) the topography of the coast, (3) the tidal range and the intensity of currents, (4) the coastal climate and (5) the (lack of) sediment supply. In addition, coastal erosion may be enhanced by anthropogenic modifications such as the removal of vegetation and other materials (e.g. sand).

In order to document, analyse and evaluate the damage to coastal objects and structures, geodetic surveying techniques such as terrestrial and airborne laser scanning or aerial photography and UAS (unmanned aerial system) photogrammetry are increasingly used today, depending on the size of the area. However, the idea is not new. In earlier works, for example, Mills et al. (2005) pre-

sent a solution, based on two component technologies – the Global Positioning System (GPS) in kinematic mode and digital small format aerial photogrammetry for change detection between temporal data epochs for a rapidly eroding coastline (Filey Bay, North Yorkshire, England). Many years later terrestrial laser scanning (TLS) became a popular technology for these tasks. For example, the use of TLS for monitoring coastal rocks on the island of Rügen, Germany, and the analysis of mass movements is presented in Kuhn and Prüfer (2014). Tschirschwitz et al. (2016) present a TLS-based monitoring system for the deformation analysis of groynes (also known as wing dykes used as hard coastal protection structures) at the River Elbe. Lim et al. (2005) use terrestrial photogrammetry in combination with TLS for cliff monitoring. Michoud et al. (2015) present a study for testing boat-based mobile LiDAR capabilities by scanning 3D point clouds of unstable coastal cliffs along Dieppe coastal cliffs in High Normandy, France. In one research project, Tiepolt (2016) investigated mobile laser scanning and the use

of UAS for recording coastal areas and protective structures on the North and Baltic Seas.

Today, UAS are increasingly being used for the acquisition of coastal data and objects due to their cost efficiency and high flexibility. Traut (2017) describes their investigations with the high-end fixed-wing UAS Q-200 with post-processing kinematic (PPK) from the company QuestUAV. In the aforementioned study, UAS photogrammetry is successfully used without control points to measure long-term erosion along the Northumberland coast in northeastern England. Another example of the use of UAS photogrammetry with a DJI S1000 octocopter is described by Barlow et al. (2017). They generate point clouds and spectral data for the kinematic analysis of the chalk cliffs in Telscombe – a rock face of about 750 m length and 20 to 49 m height east of Brighton in England. Dewez et al. (2016) also use UAS imagery to generate very high-resolution point clouds in order to document small-scale changes in a chalk cliff at the English Channel coast. Further research on the use of UAS for the monitoring of coastal landslides and environments can be found in Esposito et al. (2017) and Irvine et al. (2018). Since 2016, the Lower Saxon State Office for Water Management, Coastal and Nature Conservation (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, NLWKN) has been using a fixed-wing UAS for surveying and documenting the coastlines of the German North Sea coast (Dirks 2018).

This paper describes the use of two low-cost UAS systems from DJI for aerial flights over a natural coastal object, the Brodten cliff at the Baltic Sea, by the Laboratory for Photogrammetry & Laser Scanning of the HafenCity University Hamburg. The monitoring of the Brodten cliff started in 2004 with terrestrial laser scanning as a study project for students and continued until 2016 using a variety of different laser scanning systems. Since 2016 UAS-based aerial image data have been used three times for photogrammetric monitoring of the Brodten cliff. The temporal changes of the cliff have been documented and quantified from 2004 until 2020 through comparisons of the 3D surface models from different periods. Results of the UAS-based monitoring were visualised and the 2016 data set was compared to corresponding TLS data with respect to the criteria coverage, accuracy and efficiency.

2 The Brodten cliff

The Brodten cliff is a steep coast, upwards of 4 km long, located on the Bay of Lübeck (Baltic Sea) between Travemünde and Niendorf in Schleswig-Holstein. Due to the onset of glacial melting during the last ice age, a huge glacier tongue formed the present-day bay, where sandy sediments, marl and human-sized erratic blocks transported by the glacier were deposited in a moraine, forming the



Fig. 1: The coastal cliff at Brodten with the Hermannshöhe restaurant in the background, photographed from the DJI UAS on 20 January 2020

outline of the current Baltic Sea coast (Schmidtke 1992). The coastline, in places up to 20 m high, is in large sections still an active cliff. It recedes on average up to one metre per year due to the erosive action of waves generated by east-northeast winter storms, heavy rainfall with the accompanying softening and washing out of sediment layers, as well as freezing seepage water spreading in volume. In the immediate vicinity of the steep bank is the restaurant Hermannshöhe, built before the First World War and replaced by a new building in May 2012, which is a popular destination for tourists. The HCU Hamburg carried out coastal cliff monitoring with terrestrial laser scanners in Hermannshöhe section (Fig. 1) between 2004 and 2016 in order to document the changes and landslides. In 2016 the steep coast was surveyed with a UAS for the first time (Kersten and Lindstaedt 2017) followed by a second survey with the same UAS in 2018 (Kersten et al. 2019). Fig. 1 shows the investigation area at the Brodten cliff with the restaurant building in the background, located some 52 m from the edge of the cliff (status January 2020).

3 Systems used

Different terrestrial laser scanning systems were used for the documentation and monitoring of the Brodten cliff section over twelve years (Fig. 2 and Table 1).

Following comparison of terrestrial laser scanning and UAS photogrammetry for the monitoring of the cliffs, it was decided to continue the



Fig. 2: Terrestrial laser scanning at the coastal cliff of Brodten – Z+F IMAGER 5003 (2004), Mensi GS100 (2005), Riegl VZ-400 (2010) and Faro Focus3D X330 and Z+F IMAGER 5010 (2016)

Period	Date	Scanner	Scan station
0	15.03.2004	Mensi GS100 and Z+F IMAGER 5003	3 and 11
1	03.06.2005	Mensi GS100	6
2	22.06.2006	Mensi GS100	7
3	13.11.2007	Mensi GS100	3 (21 scans)
4	17.08.2009	Mensi GS100 and Z+F IMAGER 5006i	2 and 6
5	02.06.2010	Riegl VZ-400	8
6	21.06.2016	Z+F IMAGER 5010 (top) and Faro Focus ^{3D} X330 (bottom)	5 and 8

Table 1: Terrestrial laser scanning at the Brodten cliff – periods, dates and scanner

	DJI Phantom 3 Advanced	DJI Phantom 4 Pro KlauPPK
Camera	Sony Exmor	Zenmuse X4S
Lens	Integrated 4.0/2.8	Integrated 8.8/2.8
Sensor	CMOS	CMOS
Shutter	Rolling	Global
Resolution [MP]	12.4	20
Sensor size [mm]	6.16 × 4.62	13.2 × 8.8
Image resolution	4000 × 3000	5472 × 3648
Pixel size [µm]	1.54	2.4
Focal length [mm]	4.0	8.8

Table 2: Technical specification of both cameras: DJI Phantom 3 Advanced and DJI Phantom 4 Pro

documentation of the cliff only by UAS systems due to higher efficiency. For this task low-cost UAS systems from DJI were used: Phantom 3 Advanced with a fixed 12 MP camera (www.dji.com/de/phantom-3-adv) and the Phantom 4 Pro KlauPPK with the 20 MP camera X4S (klauppk.com/hardware/) allowing the precise determination of each image position from GNSS in a post-processed kinematic (PPK) mode using the KlauPPK software from Klau Geomatics (Australia). The key technical data of the DJI Phantom 3 Advanced and the associated camera are summarised in Kersten et al. (2019), but the technical specifications of the cameras of both DJI Phantom are listed in Table 2. The Phantom 4 Pro,



Fig. 3: DJI Phantom 4 Pro KlauPPK (left), remote control with Apple iPad (centre) and signalised ground control point (right)

including remote control and signalised ground control points, is illustrated in Fig. 3. The central component of the KlauPPK hardware is the multi-channel multi-frequency GNSS receiver of NovAtel. The KlauPPK software provides sophisticated PPK data processing to determine the precise coordinates of the projection centre of each image taken in the requested coordinate system.

4 Data acquisition and aerial triangulation

While the Brodten cliff has been surveyed seven times by different terrestrial laser scanning systems on various scan stations between 2004 and 2016, the UAS system DJI Phantom flew over the cliff three times: on 21 June 2016, 10 December 2018 (both DJI Phantom 3 Advanced) and 20 January 2020 (DJI Phantom 4 Pro). The DJI Phantom 3 was manually controlled during the aerial flights over the section of the steep bank, whereby vertical and oblique images were taken. For the DJI Phantom 4 two automatic nadir aerial flights were conducted, in addition to a manual controlled flight for oblique images. The technical data of the three aerial flights including the flight date, flight duration, number of photos, average flight altitude and flight speed, pixel size on the ground and number of control points are summarised in Table 3. The average flight speed was estimated from the distance flown, which was calculated from the spatial positions of each photo, and the flight duration.

Signalised ground control points (GCP) with a target diameter of 10 cm were well distributed in object space and then determined with geodetic surveying methods using three fixed reference points close to the restaurant. While all control points in each period from 2004 until 2016 were determined by a Leica total station in a geodetic network with a standard deviation of 1 to 2 cm, the coordinates of the control points at the top and bottom of the cliff were determined in the UTM coordinate system by RTK-GNSS Trimble R8s and the correction data service Trimble VRS Now with a standard deviation of 1 to 2 cm. However, Trimble specifies the accuracy of single points with 1 to 2 cm in XY and 2 to 4 cm in Z for VRS Now (SITECH 2020).

The determination of the adjusted image orientation and camera calibration were carried out in a bundle block adjustment using the software Agisoft PhotoScan (version 1.4.4) and Metashape (version 1.5.5). Therefore, the coordinates of image orientation, only for the aerial flight in 2020, which were computed from the PPK observations, were introduced into the bundle block adjustment as weighted observations with an accuracy of ±3 cm. All pixel coordinates of correlating image points were automatically measured in all photos used. The reference to the geodetic coordinate system was established by manual measurements of the

System	Flight date	Flying time [min]	Number of photos	Average flying height [m]	Average flight speed [m/s]	Ground sampling distance [mm]	Number of ground control points
DJI Phantom 3 Advanced	21.06.2016	15	170	20.1	0.8	10.7	15
DJI Phantom 3 Advanced	10.12.2018	26	186	29.1	1.3	6.8	12
DJI Phantom 4 Pro KlauPPK	10.02.2020	27	174	20.3	1.3	7.9	9

Table 3: Technical specification of the UAS-based flight data

signalised control points in the respective images of each aerial flight. The configuration of nine GCP for the aerial flight in 2020 is illustrated in Fig. 4 (bottom). During each aerial UAS flight, a very high overlap of more than nine images per area could be achieved for all photogrammetric blocks.

Table 4 shows the results of aerial triangulation, giving average deviations at the ground control points of less than 1 cm for all UAS flights, a sufficient result for this particular monitoring task. The slightly higher deviations for the image block recorded in January 2020 are probably due to a bad signalling of the control points and their geodetic measurements. The projection error (last two columns of Table 4) is a criterion for the quality of the automatic pixel measurements. For these aerial triangulations the projection error is 1/4 to 1/6 pixel with maximum values below one pixel, indicating a good result. In an adjustment without control points, the following deviations are achieved at the nine check points for the UAS aerial flight 2020: X = 2.8 cm, Y = 1.8 cm and Z = 5.5 cm. However, if only one control point is used to support the height in the adjustment, the result at the eight check points is slightly better: X = 2.0 cm, Y = 1.4 cm and Z = 3.8 cm. These two results demonstrate that it would be possible to carry out the project without control points when performing an UAS-based aerial flight with RTK or PPK. However, it is recommended to always use at least one control point for the adjustment of image observations of RTK/PPK aerial flights.

5 Generation of digital surface models

After the determination of image orientation and camera calibration, a dense point cloud was generated with PhotoScan (2016 and 2018) and Metashape (2020) with the following parameters: quality medium (corresponds to an image reduction by factor 4) and filtering aggressive to eliminate gross errors. The generated point clouds were then manually cleaned and the area of interest



Fig. 4: 3D meshed models of the Brodten Cliff derived from UAS-based aerial imagery – June 2016 (top), December 2018 (centre) and January 2020 (bottom) including the configuration of nine ground control points (yellow dots with blue flags)

System	Flight date	Number of photos	Number of ground control points	$ s_x $ [mm]	$ s_y $ [mm]	$ s_z $ [mm]	$s_{x'y'}$ [pixels]	RMS PE [pixels]	Max PE [pixels]
DJI Phantom 3 Advanced	21.06.2016	170	15	6.4	6.9	7.8	1.06	0.25	0.85
DJI Phantom 3 Advanced	10.12.2018	186	12	5.4	8.4	7.4	1.12	0.20	0.71
DJI Phantom 4 Pro KlauPPK	10.02.2020	174	9	8.0	6.7	18.1	0.54	0.15	0.47

Table 4: Results of aerial triangulation for three UAS-based photogrammetric image blocks

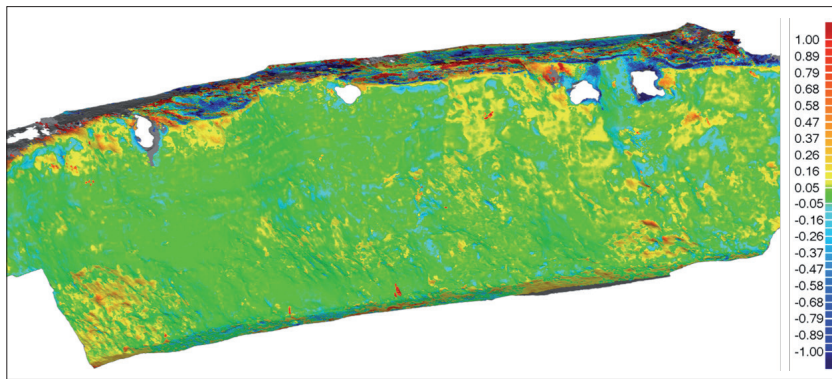


Fig. 5: 3D comparison of 3D meshed models derived from TLS and UAS-based aerial imagery in the year 2016 – differences higher than ± 5 cm (green) are indicated in different colour (reddish or bluish)

segmented. For the reduced point cloud, PhotoScan/Metashape calculated a triangular mesh in high resolution, which represents a digital surface model (DSM). Fig. 4 shows the three generated 3D surface models of the cliff after texture mapping using the colour images.

6 Cliff monitoring

The 3D point clouds from different periods generated from TLS and UAS photogrammetry data were then used to document the changes in Geomagic Control. To evaluate the quality of the UAS data, a 3D comparison between the 3D models from terrestrial laser scanning and from the UAS image flight, both from the same day in 2016, was also calculated. The deviations between the two 3D models are visualised as colour-coded in Fig. 5. Most of the deviations between TLS and UAS are in the range of ± 5 cm (green), so that the results from UAS image data are comparable with the TLS data. The achieved accuracy for the digital surface model of a few centimetres is therefore more than sufficient for the evaluation of the cliff monitoring, i.e. both methods meet the requirements for cliff monitoring, since the deviations are on average up to one metre per year. Especially in the areas of vegetation, higher deviations are visible between both data sets, since TLS is mostly able to penetrate the vegetation, while all automatic image

point measurements in the photos are on top of the vegetation.

The time required to survey the coastal section in 2016 using terrestrial laser scanning (including ground control point signalisation and surveying by tachymetry) by up to ten students and two scanners was approximately five hours, while the UAS image flights took only up to 25 minutes. Together with the control point measurement by the RTK-GNSS Trimble R8s, a two-man team needed only 2.5 hours on site (2018 and 2020). If the evaluation of the laser scan data (registration and georeferencing of the scans, filtering, meshing and 3D comparison) takes one working day (estimated), the results of the UAS image flight are available after only half a working day if a powerful computer is available. This is a reduction of the workload by a factor of 2.

As monitoring for the cliff in Brodten by terrestrial laser scanning (TLS) and recently by UAS photogrammetry has been carried out since 2004, results from previous investigations are already available (Qualmann 2010; Kersten and Lindstaedt 2017; Kersten et al. 2019). The visualisation of the two 3D comparisons in Fig. 6 shows massive erosion (blue colour) for the cliff section in the period between 2016 and 2020 (left), while erosion between 2018 and 2020 is significantly less (right), as expected due to the shorter period of 13 months.

In Fig. 7 the changes at the cliff are visualised by coloured virtual edge profiles at 18 m and 1.5 m height from 2004 to 2020. The rearrangement of the footpath due to variation in the position of the cliff edge can also be seen quite well in this figure. According to Fig. 7, the retreat of the cliff edge from 2004 until 2020 (190 months or 15.8 years) ranges between 90 cm and 50 cm per year (at the 18-m profile close to the edge of the cliff).

7 Conclusions and outlook

In this article it was demonstrated that aerial flights with low-cost UAS systems are very suitable for the monitoring of coastal areas and objects, since they guarantee a high resolution of the data including

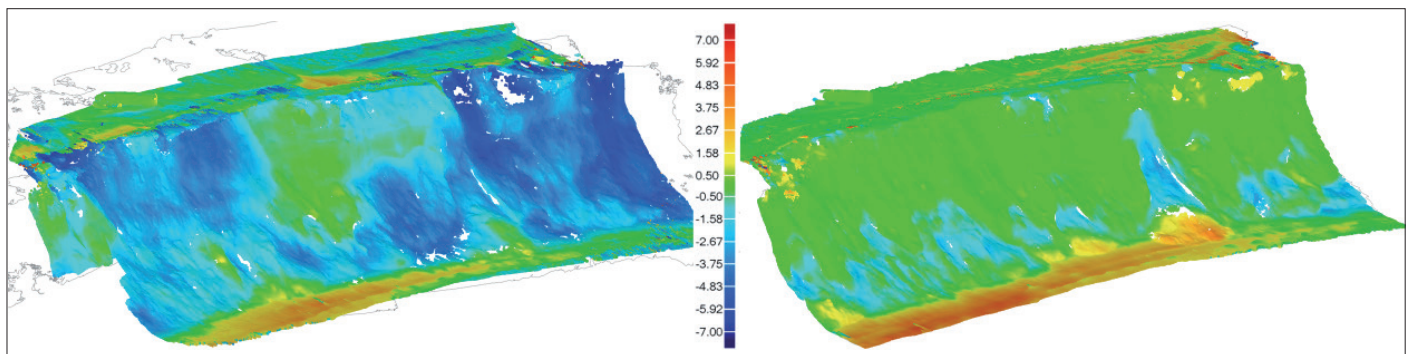


Fig. 6: 3D comparison of 3D meshed models derived from UAS-based aerial imagery: 2016-2020 (left) and 2018-2020 (right)

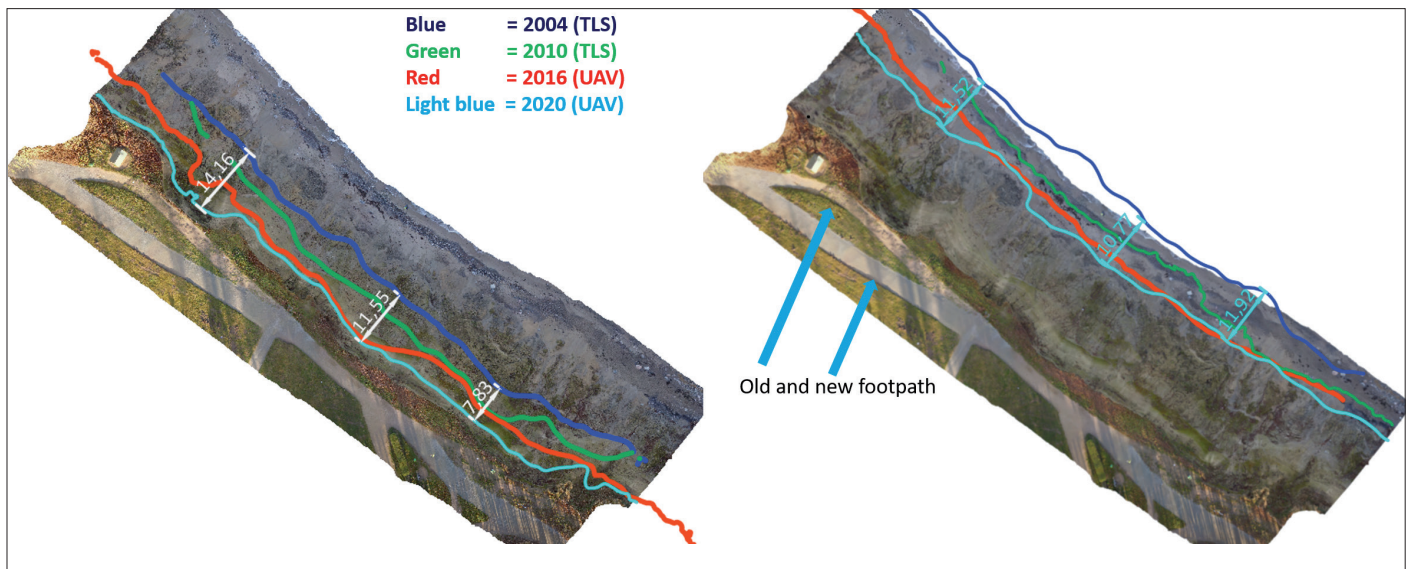


Fig. 7: Temporal changes at the Brodten cliff from 2004 until 2020 documented by coloured profiles at the height 18 m (left) and at the height 1.5 m (right) including distances of the profiles between 2004 and 2020 at selected positions for the documentation of the damages

sufficient accuracy. The comparison of the data acquisition and processing using TLS and UAS photogrammetry showed an estimated doubling in speed of project processing due to the short aerial flights and the automated image-based generation of point clouds and surface models. The achievable accuracies for the products (surface models) from the UAS image flights correspond to those of terrestrial laser scanning. However, the optimal recording geometry of images with the UAS flights provides better coverage of the area under investigation.

A comparison of the system costs turns out in favour of the low-cost UAS system, as the computer, software and UAS (here the new DJI Phantom 4 RTK) are significantly cheaper, at approximately EUR 12 000, when compared to a terrestrial laser scanning system at approximately EUR 50 000. Thus, UAS systems are more flexible, faster and cheaper than terrestrial laser scanners for applica-

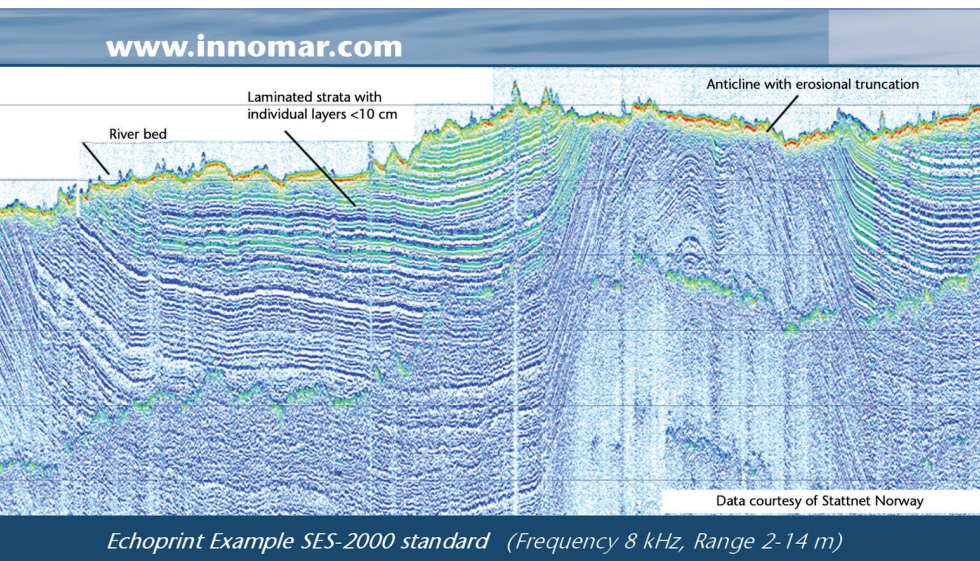
tions in small-scale coastal monitoring. Today, a significant reduction of control points is possible using UAS systems with RTK-GNSS on-board or using the RTK data in a post-processed kinematic mode (PPK), which reduces the time for data acquisition in the field due to reduced ground control signalisation and measurements. The UAS flights should be performed in the winter period to determine a better surface model due to the non-existent green vegetation.

The monitoring of the investigated Brodten cliff has shown that the steep coast is severely damaged by erosion of autumn and winter storms and loses significant mass every year. Further UAS-based aerial flights will be carried out in the future to continue documenting the damages as part of the study project of HCU Hamburg. However, the continuous erosion of the cliff will have drastic consequences for the restaurant only in about estimated 50 years. //

References

- Alexander, David (1993): *Natural Disasters*. UCL Press, London
- Barlow, John; Jamie Gilham; Ignacio Ibarra Cofr  (2017): Kinematic analysis of sea cliff stability using UAV photogrammetry. *International Journal of Remote Sensing*, DOI: 10.1080/01431161.2016.1275061
- Dewez, Thomas. J. B.; Jérôme Leroux; Stéphane Morelli (2016): Cliff collapse hazard from repeated multicopter UAV acquisitions: Return on experience. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-805-2016
- Dirks, Holger (2018): UAV f r eine effiziente Vermessung im Insel- und Küstenschutz. In: *UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*, Schriftenreihe des DVW, Band 89, Wi ner-Verlag, Augsburg, pp. 117–122
- Esposito, Giuseppe; Riccardo Salvini et al. (2017): Multitemporal monitoring of a coastal landslide through SfM-derived point cloud comparison. *The Photogrammetric Record*, DOI: 10.1111/phor.12218
- Irvine, Mike; Gregg Roberts; L. P. Oldham (2018): Assessing the applicability of unmanned aerial vehicle (UAV) data in environmental monitoring of coastal environments: St. David's, Newfoundland. *Current Research (2018) Newfoundland and Labrador Department of Natural Resources Geological Survey, Report 18-1*, pp. 15–30
- Kersten, Thomas; Maren Lindstaedt (2017): Photogrammetrie auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gest tzter Bildflugdaten. *ZfV – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, DOI: 10.12902/zfv-0145-2016

- Kersten, Thomas; Maren Lindstaedt et al. (2019): UAV-gestützte Bildflüge für das photogrammetrische Monitoring einer Bühne und einer Steilküste. In: Thomas Luhmann; Christina Schumacher (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019, Wichmann, VDE Verlag, Berlin und Offenbach, pp. 222–235
- Kuhn, Dirk; Steffen Prüfer (2014): Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany. *Geomorphology*, DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.01.005
- Lim, Michael; David N. Petley et al. (2005): Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution. *The Photogrammetric Record*, DOI: 10.1111/j.1477-9730.2005.00315.x
- Michoud, Clément; Dario Carrea et al. (2015): Landslide detection and monitoring capability of boat-based mobile laser scanning along Dieppe coastal cliffs, Normandy. *Landslides*, DOI: 10.1007/s10346-014-0542-5
- Mills, Jon P.; Simon John Buckley et al. (2005): A geomatics data integration technique for coastal change monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms*, DOI: 10.1002/esp.1165
- Qualmann, Dorina (2010): Untersuchungen der Hangrutschungen am Brodtener Steilufer mittels verschiedener Laserscanverfahren. Unveröffentlichte Masterarbeit im Studiengang Geomatik an der HafenCity Universität Hamburg
- Schmidtke, Kurt-Dietmar (1992): Entstehung der Küstenmorphologie der Lübecker Bucht. In: Manfred Diehl (Hrsg.): Lübecker Bucht und Untertrave, Berichte des Vereins Natur und Heimat und des Naturhistorischen Museums zu Lübeck, Heft 23/24
- SITECH (2020): Trimble VRS Now. www.sitech.de/fileadmin/user_upload/SITECH_Trimble_VRS_Now_web.pdf, last access 24 April 2020
- Tiepolt, Lars (2016): Mobiles Laserscanning und Einsatz von Drohnen zur Aufnahme von Küstengebieten und Küstenschutzbauwerken. *Die Küste*, 84, pp. 147–192
- Traut, Kerstin (2017): UAV monitoring of coastal erosion. *Geomatics World*, 25, pp. 19–20
- Tschirschwitz, Felix; Klaus Mechelke et al. (2016): Monitoring and deformation analysis of groynes using TLS at the river Elbe. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B5-917-2016



SES-2000 Parametric Sub-Bottom Profilers

Discover sub-seafloor structures and embedded objects with excellent resolution and determine exact water depth

- ▶ Different systems for shallow and deep water operation available
- ▶ Menu selectable frequency and pulse width
- ▶ Two-channel receiver for primary and secondary frequencies
- ▶ Narrow sound beam for all frequencies
- ▶ Sediment penetration up to 200 m (SES-2000 deep)
- ▶ User-friendly data acquisition and post-processing software
- ▶ Portable system components allow fast and easy mob/demob
- ▶ Optional sidescan extension for shallow-water systems



Innomar



Fusing ROV-based photogrammetric underwater imagery with multibeam soundings for reconstructing wrecks in turbid waters

An article by *ROBIN ROFALLSKI, PATRICK WESTFELD, JEAN-GUY NISTAD, ANNETT BÜTTNER and THOMAS LUHMANN*

Observation and monitoring of wrecks are an integral part of the duties of hydrographic offices such as BSH. A common practice consists of first surveying wrecks using vessel-based multibeam echo sounding systems and subsequently having divers visually inspect them. In order to provide an objective procedure and set a baseline for monitoring wrecks, unmanned underwater vehicles equipped with imaging systems can be used to inspect wrecks and other obstructions in more details. This paper presents a workflow for combining multibeam soundings and photogrammetric point clouds generated by a ROV-based camera system. Structure from motion and image enhancement are used to obtain a colour-coded point cloud, which is then fused and scaled with the multibeam soundings, resulting in data densification on wrecks. Finally, the feasibility of integrating this fused data to common hydrographic practice is demonstrated.

ROV | underwater photogrammetry | multibeam echo sounder | point cloud fusion
ROV | Unter-Wasser-Photogrammetrie | Fächerecholot | Punktwolkenfusion

Wracks zu suchen und zu überwachen gehört zu den Aufgaben von Hydrographischen Diensten wie dem BSH. In der Praxis ist es gängig, Wracks zunächst mit schiffsgestützten Fächerecholotsystemen zu vermessen und anschließend von Tauchern visuell inspizieren zu lassen. Um ein objektives Verfahren bereitzustellen und eine Ausgangsbasis für die Überwachung von Wracks zu schaffen, können unbemannte, mit bildgebenden Systemen ausgerüstete Unter-Wasser-Fahrzeuge eingesetzt werden, mit denen Wracks und andere Hindernisse genauer inspiziert werden. Dieser Beitrag stellt einen Arbeitsablauf zur Kombination von Fächerecholotpeilungen und photogrammetrischen Punktwolken vor, die von einem ROV-basierten Kamerasystem erzeugt werden. Strukturen aus Bewegung und Bildverbesserung werden verwendet, um eine farbcodierte Punktwolke zu erhalten, die dann mit den Fächerecholotpeilungen verschmolzen und skaliert wird, was zu einer Datenverdichtung bei Wracks führt. Schließlich wird gezeigt, dass die Integration dieser verschmolzenen Daten in der hydrographischen Praxis machbar ist.

1 Motivation and state of the art

Mapping underwater obstructions (e.g. wrecks, rock fields) is a crucial mandate for the German Federal Maritime and Hydrographic Agency (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, BSH) and other institutions involved in safety of navigation around the world. BSH alone is responsible for monitoring more than 2,500 underwater obstructions in German territorial waters, regarded as potential hazards to shipping and fisheries (BSH 2020).

BSH presently carries out surveys of wrecks in a two-stage process. Hydrographic vessels first survey the wrecks using multibeam echo sounding systems (MBES) to obtain a georeferenced 3D point cloud, i.e. sounding set. This data set provides essential preliminary information (e.g. position, shape, height above seafloor) to professional

divers, who subsequently inspect the wrecks with the aim of providing an accurate portrayal of their state. This process involves a detailed visual and tactile inspection as well as an independent measurement of the wrecks' shoalest point using a pneumatic depth sensing hose pipe. Remotely operated vehicles (ROV) equipped with camera systems sometimes supplement or partially replace the work of divers. Any potential change (e.g. collapse, sedimentation, drift) from the previous known state of a wreck is subsequently reported.

Vessel-mounted MBES are widely established for collecting bathymetry and detecting objects underwater (Brisette et al. 1997). Wide swaths and numerous narrow beams allow for efficient object detection and identification, even in turbid envi-

Authors

Robin Rofallski is a research assistant at Jade University in Oldenburg.

Dr. Patrick Westfeld, Jean-Guy Nistad and Annett Büttner are employed at BSH in Rostock.

Prof. Dr. Thomas Luhmann teaches at Jade University in Oldenburg.

robin.rofallski@jade-hs.de

ronments. Moreover, sounding measurement uncertainties not exceeding the IHO specification for Special Order Surveys (IHO 2008) provide a geometrically realistic representation of these objects. Unfortunately, the range and depression angle between the MBES and the object inevitably affect the sounding measurement accuracy and, more importantly in this use case, the ability to ensonify all parts of the object, especially on complex objects such as wrecks. A reliable assessment of the state of wrecks solely based on sounding measurements is therefore questionable. Professional divers and camera-equipped ROV provide the necessary close range in-situ inspection. However, due to poor visibility conditions, this inspection is much localised. A thorough assessment of the state of large objects (e.g. wrecks) is necessarily the synthesis of many such localised inspections, which is inherently subjective and error-prone.

Series of close-range underwater images collected by a camera-equipped ROV over wrecks, whilst still localised, are much easier to amalgamate to portray the whole structure of a wreck. Cameras are portable and small, thus being easily mountable on ROVs or attached to divers. Data in occluded areas is collected by simply circling the object. Photogrammetric analysis carried out on these images results in geometrically-correct three-dimensional point clouds characterised by high spatial and temporal resolution as well as colour information (Luhmann et al. 2020). When the imagery-based 3D point cloud is co-registered to the MBES soundings, the result is a fused data set characterised by higher data density and additional attribution (i.e. colour information). Moreover, targeting the ROV-images to the areas with low sounding densities (i.e. occluded areas) allows for an improved assessment of the state of a wreck. Finally, being fixed to a common terrestrial reference system, the fused data set is easily transferable to the spatial data infrastructure of maritime administrations.

Fusing MBES data with information generated from cameras is thus highly desirable. However, underwater imagery suffers from many degrading and altering effects. This includes multimedia effects, as light travels through air, glass and water and thus, according to Snell's law, the ray is refracted twice at the interfaces. This, by definition renders the pinhole model invalid if no constructional corrections are employed. Strict modelling of the ray path has been developed, e.g. by Kotowski (1988), Maas (1995) and Jordt-Sedlazeck and Koch (2012). Several authors on the other hand found that when the camera is positioned close to a flat glass interface and oriented perpendicularly to it, refraction effects can be compensated by standard lens correction functions, as in Brown (1971), and strict modelling is only decisive in applications where highest accuracy is demanded (Kotowski

1988; Przybilla et al. 1990; Shortis 2015; Kahmen et al. 2019). Furthermore, the entrance pupil of a camera lens can be adjusted with the centre of a hemispherical dome port. This accounts for image degradation, and possible residual errors are compensated by standard lens correction functions (Menna et al. 2016). Furthermore, optical degradation from wavelength dependent light absorption, chromatic aberration or dispersion reduces image quality. This results in images with low contrast, colour cast, blur and haze (Wang et al. 2019). To account for these, several image enhancement and restoration algorithms have been developed over the years. These take the actual image formation model into account (e.g. Akkaynak and Treibitz 2019) or employ appropriate image processing tools, such as histogram stretching, white balance shift or gamma stretch to increase contrast, decrease colour cast, etc. In Bianco et al. (2015), the LAB method is introduced. Here, using a grey-world assumption, the chromatic component of the LAB colour space is shifted towards the white point and the luminance component is enhanced by histogram stretching and cut off. Thus, the method belongs to the latter kind of algorithms. Mangeruga et al. (2018) compared five state-of-the-art image enhancement algorithms for underwater photogrammetry and provided a metric for benchmarking these. It was concluded that for 3D reconstruction purposes, images enhanced with the LAB algorithm or the original images perform best on their data sets.

As photogrammetry cannot provide absolute positioning, further sensor data has to be combined with the imagery, providing a georeferenced position and point cloud. Furthermore, imagery can be used for online algorithms, solving positioning and mapping of the environment in real time (simultaneous localisation and mapping, SLAM). These algorithms suffer from drift, as they can only take a certain amount of data points and positions into account, in order to not overflow the memory and reduce computational complexity. Hence, the system drifts with time and distance travelled, thus requiring additional information for applications demanding high accuracy (Durrant-Whyte and Bailey 2006). Originating from the robotics community, SLAM is a broad research field and several methods have been proposed in recent years, using various kinds of sensors. State-of-the-art algorithms are proposed by Mur-Artal and Tardós (2017) or Engel et al. (2015), creating sparse or semi-dense point clouds respectively. These algorithms are capable, provided pre-calibrated cameras, of computing point clouds and provide localisation within the point clouds in real-time, depending on the image resolution. Furthermore, they automatically identify revisited areas and compute so-called loop-closures, i.e. creating consistency between non-sequential parts of the data

by bundle adjustment over all included observations.

Mapping underwater structures using photogrammetric techniques as the only acquisition method, or as part of a multi-sensor system, has been widely performed in tasks such as reef monitoring (Fabri et al. 2019), inspection of ship hulls (Kim and Eustice 2013) or cave surveying (Nocerino et al. 2018). Ship wrecks were observed and modelled by Prado et al. (2019) by fusion with MBES data. Further examples of photogrammetric wreck surveys, mostly in relatively clear water conditions, can be found in Drap et al. (2015) or Nornes et al. (2015).

2 Methodology

This paper presents data from a campaign carried out by BSH and Jade University of Applied Sciences, surveying a sunken former German air force vessel from WWII, 25 m in length and about 4 m in width. The wreck is located at a depth of about 14 m (relative to NHN) in the Bay of Neustadt (Baltic Sea). The MBES data was collected from the hydrographic survey vessel VWFS *Deneb*, operated by BSH. A ROV equipped with a camera to acquire imagery for photogrammetric analyses was subsequently deployed from the vessel. The resulting point cloud was fused with the MBES data in order to georeference the photogrammetric imagery.

2.1 Multibeam echo sounder data set

The MBES data set was collected from *Deneb* using a Teledyne-Reson Seabat 7125-SV2 (400 kHz) with 512 beams per swath. The software Teledyne PDS was used for real-time data acquisition and quality control. Five survey lines were collected over the wreck, three in the west-east direction and two in the north-south direction. The data was further post-processed using Teledyne-CARIS HIPS & SIPS. Fig. 1 shows the 0.10 m depth raster generated from the sounding data over and in the vicinity of the wreck. The wreck consists of about 71,866 points over an area of 203.5 m².

The total sounding uncertainty was calculated based on all estimated and measured uncertainty sources and propagated to the 3D position of the soundings. The soundings comprising the wreck have an uncertainty of 15 cm at the 95 % confidence level.

2.2 ROV and imagery data set

The ROV observations were carried out with a SAAB SeaEye Falcon ROV (Fig. 2, left). The ROV has a depth rating of 300 m and is capable of carrying up to 8.5 kg of additional payload. As the on-board ROV-camera did not provide sufficient resolution and stability for these photogrammetric analyses, an additional industrial-grade Basler Ace camera was mounted in a pressure housing on top of the

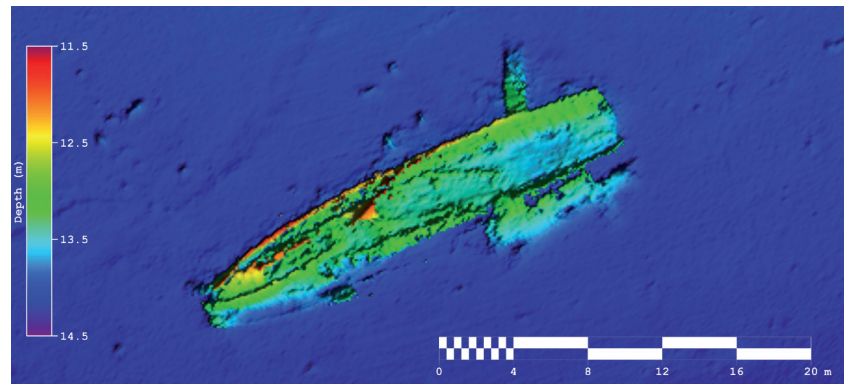


Fig. 1: Plan view of a 10 cm raster of the MBES sounding data set of the wreck. Colour coding depicts depth

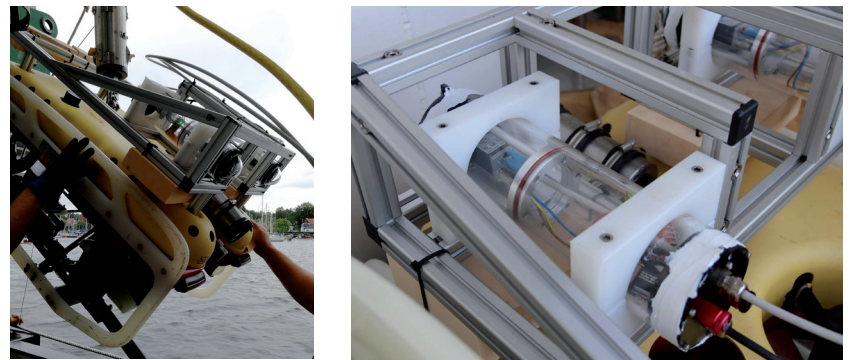


Fig. 2: ROV equipped with camera system on top (left) and camera in pressure housing (right)

ROV (Fig. 2, right). Relevant technical specifications are summarised in Table 1 and Table 2.

The camera housing was equipped with a hemispherical port to reduce image degradation introduced by the optical properties of water. These include mainly refraction and dispersion as a perfectly centred port would eliminate these effects completely and work as an additional lens element in the ray path. Deviations due to imperfect fitting of the dome can mostly be compen-

Saab SeaEye Falcon	
Maximum depth	300 m
Forward speed	> 3 kn
Weight	55 kg
Dimensions	1000 mm × 600 mm × 500 mm
Maximum added payload	8.5 kg

Table 1: ROV specifications

Basler Ace acA1920-48gc	
Sensor size	9.2 mm × 5.8 mm
Resolution	1920 px × 1200 px
Maximum frame rate	50 Hz
Pixel pitch	4.8 μm × 4.8 μm
Focal length	4.8 mm

Table 2: Camera specifications

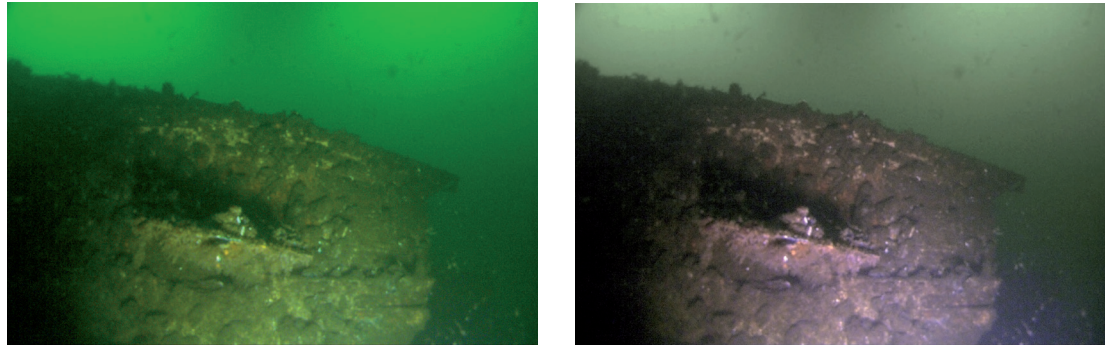


Fig. 3: Original image (left) and enhanced image using LAB algorithm (right)

sated by image distortion parameters (Menna et al. 2016; Nocerino et al. 2016). Otherwise, the ray path could be modelled explicitly by applying ray tracing approaches. This however, would require a specific bundle adjustment solution, eliminating the option of using standard structure-from-motion (SfM) software, as it is commercially available to users from administration and industry.

Images were acquired at a frame rate of 20 Hz. However, in order to reduce computational and memory effort, images were analysed at 2 Hz. At approximately 0.5 m/s lateral movement speed, an acquisition distance of 1 m and a ground sampling distance (GSD) of 1 mm has been achieved, this leads to an average overlap of 87 % in horizontal and 79 % in vertical direction. This is considered enough overlap to be able to robustly identify identical features over several images in a sequence. The total survey time, including dive time and time to locate the wreck, was about 15 min. of which 7.5 min. consisted in the imagery acquisition time.

The Baltic Sea has a high turbidity and therefore does not provide very good visibility conditions. In order to improve matching results and colour correctness, several image enhancement methods, as proposed in Mangeruga et al. (2018) were compared. By far the best results were achieved, using the LAB enhancement algorithm, proposed by Bianco et al. (2015). Fig. 3 displays a wreck feature viewed in the original image and the same feature viewed in an image enhanced by the LAB algorithm. The original image is obviously biased towards green, which distorts the wreck feature

and reduces contrast. The enhanced image on the other hand still has a green background but the wreck feature is more distinguishable from the background. This leads to improved matching results.

Using the enhanced imagery, photogrammetric analyses were performed using structure-from-motion (SfM) processing methods. SfM techniques (e.g. Snavely et al. 2006; Furukawa and Ponce 2010) generate 3D representations from 2D image sequences without initial information. Feature points are extracted from the images and matched, employing robust estimation techniques such as RANSAC (random sample consensus; Fischler and Bolles 1981). Using these corresponding image points in multiple images, bundle adjustment was performed using a self-calibration approach. From this method, the interior orientation was calculated using distortion parameters according to Brown (1971), i.e. principal distance, principal point, radial-symmetric and decentering distortion, and affinity and shear. Simultaneously, values for exterior orientation (6DOF position of camera in object space) and 3D coordinates of the object points were estimated. The aforementioned steps were performed, using Agisoft Metashape, a widely used SfM software that has been proven to be robust in underwater photogrammetry (Mangeruga et al. 2018). Unfortunately, due to the commercial aspect of the software, no detailed insights are provided about the algorithms used for orientation and subsequent dense image matching (Remondino et al. 2013). For this image bundle, 606 images from the starboard side were aligned with

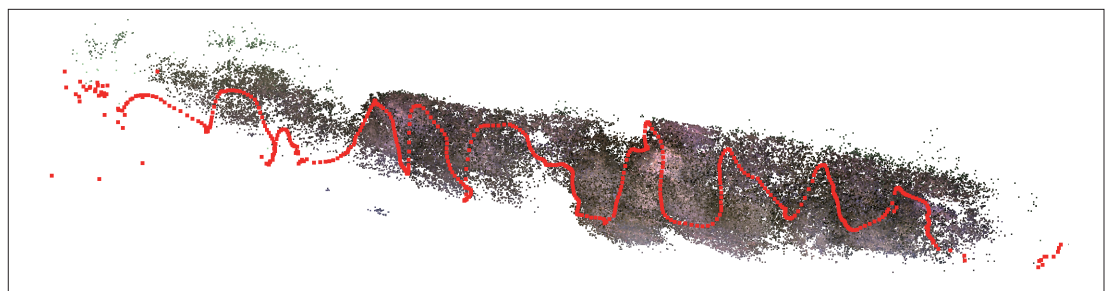


Fig. 4: RGB-coloured sparse point cloud and camera trajectory (red)

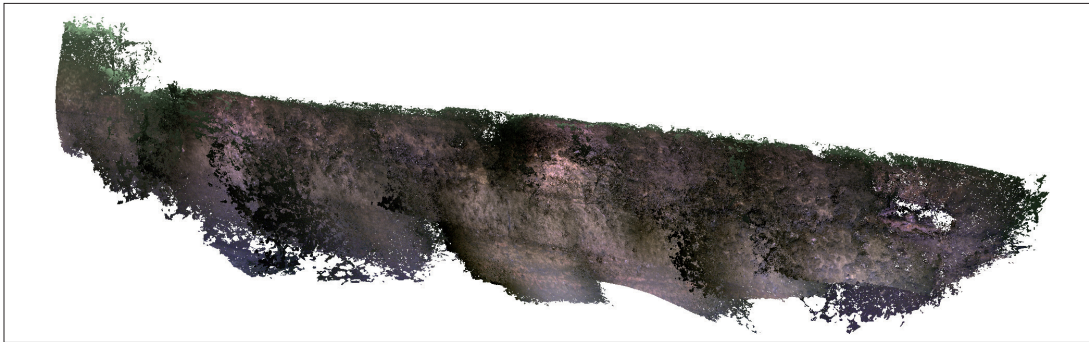


Fig. 5: Coloured dense point cloud of starboard side

132,516 tie points and used for all further processing steps (Fig. 4). Using unprocessed imagery, only 440 images were aligned with a significantly smaller covered area on the ship hull. Thus, for further processing, the enhanced imagery was used.

It is observable that the exterior orientations form a long stretched trajectory along the ship hull, starting on the right hand side. On the far left side, the distance to the object increases significantly, resulting in several images that could not be aligned due to turbid visibility and thus insufficient valid observed tie points in the images.

The RMS (root mean square) of the reprojection error was 1.50 px, equivalent to 1.5 mm in object space, assuming an average acquisition distance of 1 m. This rather low accuracy for photogrammetric applications probably originated from high turbidity and low contrast in the underwater imagery and a long stretched object that posed a dead-reckoning problem. However, this postulated accuracy only refers to the internal accuracy of the image bundle after adjustment. An exterior accuracy by comparing length measurement errors or cloud-to-cloud distances to a reference is not possible, as only a monocular system is used. Thus, neither an independent absolute scale can be provided nor was it possible to position a static reference object near the wreck with which to control results. However, if no significant deviations exist in a cloud-to-cloud comparison, it can be concluded that the photogrammetric point cloud achieves at least the same accuracy as the MBES data does, which is to be expected.

Using the aligned sparse point cloud, dense im-

age matching was performed. According to the work of Remondino et al. (2013), a method similar to semi-global matching (Hirschmüller 2008) is used, though this has not been confirmed by Agisoft. Using the integrated algorithm, a dense point cloud consisting of 12.3 million points is created using »High« quality settings in the software. Processing, including the calculation of depth maps, took approximately four hours on an Intel Core i7 with 16 GB RAM. The resulting point cloud is shown in Fig. 5.

3 Data fusion

Fig. 6 shows the flow chart of the data fusion including all preprocessing steps before registration. Both photogrammetric and MBES data sets were adjusted individually in their respective coordinate systems and then combined by point cloud analysis methods. Absolute scaling was provided by the MBES data, thus providing absolute scale for photogrammetric data as well. In a practical solution and in order to control results, an independent scaling would be desirable by e.g. using a second camera for stereo analysis. Two independent point clouds can then be fused, deviations in scale evaluated, and possible errors identified.

Firstly, the two point clouds were coarsely aligned by selecting salient points. For that, the front tip of the wreck's bow and other salient points on the top of the wreck's starboard side were manually measured in the imagery and 3D coordinates determined. This process could be automated by automatically identifying salient features in a resulting point cloud or applying a reference

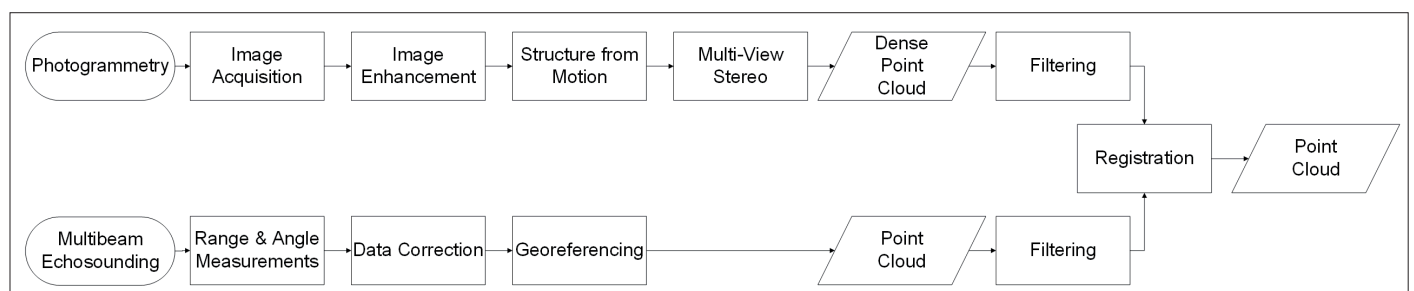


Fig. 6: Data processing and fusion to combine data from both photogrammetric analysis and MBES

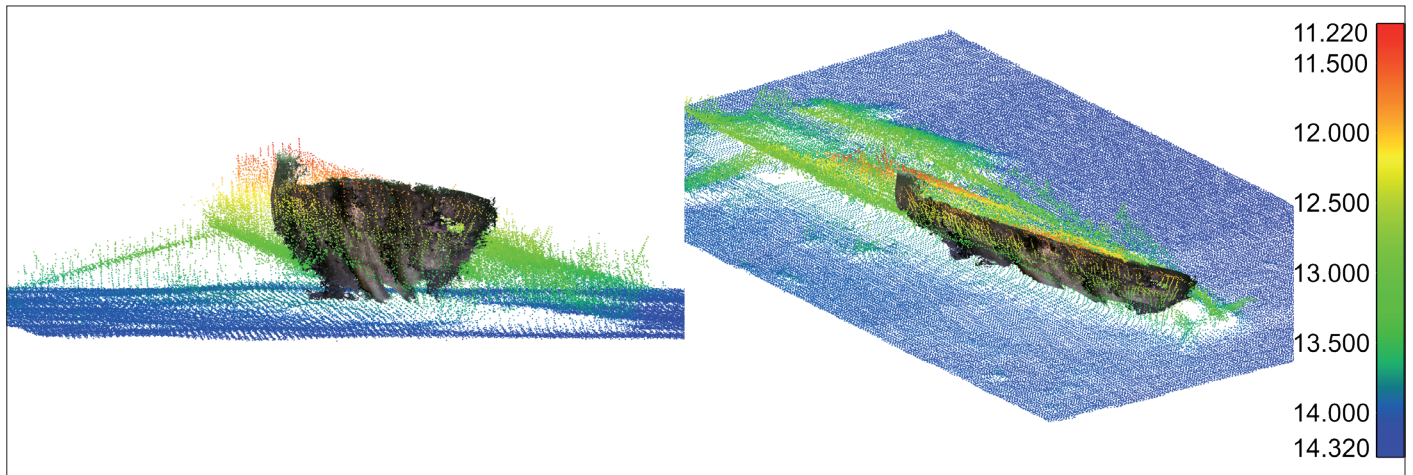


Fig. 7: Fused point clouds by photogrammetric analysis (RGB) and MBES soundings (coloured points) in side view (left) and isometric view (right). The dense point cloud filled areas lacking MBES soundings due to occlusion, such as on the bottom of the wreck. Colour scale depicts depth in metres

code to the ground control points. After coarse alignment, fine registration was performed using the Iterative Closest Point (ICP) algorithm (Besl and McKay 1992). The result is a georeferenced point cloud in ETRS89/UTM coordinates, which can be directly integrated in the following data processing chain of BSH hydrographic surveying. The hybrid origin of the data includes furthermore RGB colour values and MBES backscatter values that can be attributed to the points. Additionally, the photogrammetric imagery can be transformed to the relevant terrestrial reference system and stored, as well, providing a georeferenced image database for further information on the wreck.

3 Results

Fig. 7 shows an overlaid photogrammetric coloured point cloud with the MBES data. The data depicts the starboard side of the wreck's bow. The area covered by the photogrammetric point cloud is about 13 m × 2 m, which is approximately half of the wreck's length and almost the entire height above the seafloor on the starboard side.

It is clearly visible that the photogrammetric

point cloud has a significantly higher point density and provides colour information. Furthermore, occluded areas near the bottom of the wreck can be observed with the photogrammetric data and thus provides completion of the data in these areas. This is observable in Fig. 7 (left), where areas of the wreck's bottom are filled with points in areas that were occluded to the MBES and thus not covered entirely. For accuracy evaluation, cloud-to-cloud distances were calculated, using least squares planes on the MBES data (Low 2004). Distances from the photogrammetric point cloud to local planes of the MBES data are calculated and shown in Fig. 8. The mean cloud-to-cloud distance is 0.053 m. Though not fully representative of the absolute accuracy achieved by this method, these numbers represent a measure of internal accuracy for the combination of both data sets. Apart from that, higher deviations occur in the lower part of the point cloud in areas that are not as densely covered as the rest of the point cloud.

Comparing point densities, the MBES point cloud was reduced for the subset with the closest points to the photogrammetric point cloud. The

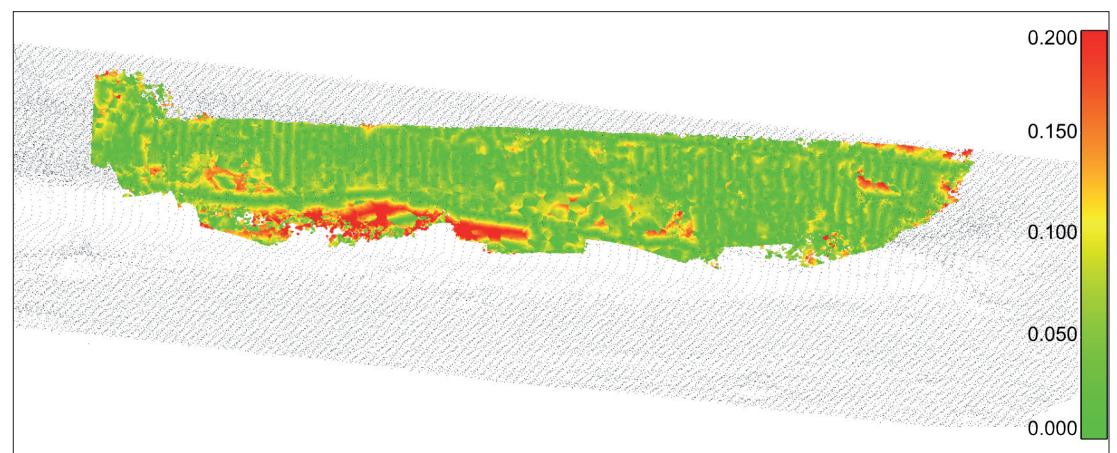


Fig. 8: Cloud-to-cloud distances referenced to least squares planes on MBES point cloud (scale unit in metres)

resulting reduced point cloud of MBES and the photogrammetric point cloud were then analysed for the surface density. This measure calculates the amount of points in a given neighbourhood to estimated planes of a radius R and extrapolates this number to 1 m^2 . R was chosen to 20 cm, i.e. approximately $2 \times \text{GSD}$ of the MBES data. As the investigated structure was mostly flat, this metric was chosen over the volumetric density. Table 3 shows the number of points and densities next to the total area covered by the given data set. It is worth mentioning that the covered area is estimated by projecting the point clouds to a plane and then calculating the area of the enclosing polygon. Thus, the amount of points cannot be simply divided by the covered area to obtain the mean surface density.

The table prominently shows the complementary characteristics of the two sensors. Where, on the one hand, the photogrammetric data had a high density with several hundred thousand points per square metre, the MBES provided a very much higher coverage of the area in a comparable amount of time needed for each of the methods.

4 Summary and outlook

The purpose of this feasibility study was to fuse MBES data with 3D point clouds derived from photogrammetric image triangulation in order to improve data density. The paper presents a processing chain for combining hybrid point clouds generated from photogrammetric imagery and hydroacoustic systems. MBES data hereby posed an initial starting point thanks to its good absolute positioning accuracy and thus was used to georeference and scale all further data. The point cloud from imagery was then to be transformed to best match the MBES data via ICP.

The resulting data set provides an objective representation of a wreck, suitable for improved decision-making concerning underwater obstructions. It shows good congruence of MBES data with the photogrammetric point cloud. Even though, apart from the MBES data, no independent scale could be included for this data set, it is observable that the deviations between the two data sets achieves an expected level of precision of 5.3 cm. Major deviations result mostly in areas that are hard to ensonify by the MBES (i.e. occluded areas near the seafloor) and on the edge of the photogrammetric point cloud with probably fewer measurement samples and a worse acquisition geometry. The surface density is highly improved by several orders of magnitude due to the imagery-derived point cloud.

For point cloud registration, initial values were obtained by manually selecting salient points such as the bow in the imagery. Determining correspondence between the salient points in

Data set	Number of points	Area covered [m^2]	Surface density [pts/m^2]
MBES full	160,661	498	255
MBES closest points	3,791	22	158
Photogrammetry	12,324,258	22	535,069

Table 3: Point density metrics of the photogrammetric point cloud and MBES data

both point clouds was quite challenging due to missing local geometric gradients on the wreck's starboard side. Automatic detection by suitable feature detectors or marked positions should significantly improve this processing step and avoid manual interaction in future works. Furthermore, colour information was included by this fusion using image enhancement as a preprocessing step. With this method, a green colour cast was removed and a more natural representation of the wreck was thus achieved. Though processing times of photogrammetric data may go up to several hours or even days with large data sets, many processing steps can be automated to a certain degree.

During the underwater image acquisition, several practical problems occurred which had to be taken into account when performing observations from a ROV and integrating a camera system. The tether connected to the ROV was often tangling around edges of the wreck, thus limiting manoeuvrability. Furthermore, the cable of the camera was a regular Ethernet cable that had not been especially ruggedised for high sea applications and was rather short (70 m). This resulted in only parts of the starboard side of the wreck being observed. Future developments will lead to improvements on these issues. Since turbid water conditions required short acquisition distances of approximately 1 m, the remote control was a challenging task as well. Currents, tides and tether entanglement often interfered with the operating commands and thus affected the movement of the ROV. Therefore, practice and careful manoeuvring during such challenging acquisitions are imperative.

The presented workflow is not restricted to a ROV-borne data acquisition. Continuous developments in sensor technology leads to miniaturised sensors that allow diver-based applications, too. In this context, the integration of additional sensors on the measurement platform providing complementary information (such as sonar and inertial measurement unit) is also part of our future work.

It can be concluded that the photogrammetric method provides a higher grade of detail and accuracy, even when observing geometrically challenging structures, such as a sidewall providing only very low geometric information in line of sight, posing a dead reckoning problem. Using image enhancement, significant contrast increase could be achieved, resulting in more images being aligned and higher coverage of the wreck. This ap-

proach is further warranted in turbid water, such as the Baltic Sea, where visibility rarely exceeds one to two metres. The resulting georeferenced high density point cloud can be further attributed with RGB information from the cameras, as well as the intensities of the backscattered MBES signals. The oriented camera stations are furthermore available in the coordinate system of the MBES data and can be used for further investigations on the wreck's

condition. Spatial data infrastructures of maritime administrations benefit from these added values for improved decision-making. //

Acknowledgements

The authors thank the *Deneb* crew for their great support during the experiments. This work is partially funded by Volkswagen Foundation (ZN3253).

References

- Akkaynak, Derya; Tali Treibitz (2019): Sea-Thru. A Method for Removing Water From Underwater Images. 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), DOI: 10.1109/CVPR.2019.00178
- Besl, Paul J.; Neil D. McKay (1992): A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, DOI: 10.1109/34.121791
- Bianco, Gianfranco; Maurizio Muzzupappa et al. (2015): A new color correction method for underwater imaging. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W5, DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-25-2015
- Brissette, Michel B.; John E. Hughes-Clarke et al. (1997): Detecting small seabed targets using a high frequency multibeam sonar: geometric models and test results. Oceans '97. MTS/IEEE Conference Proceedings, DOI: 10.1109/OCEANS.1997.624099
- Brown, Duane C. (1971): Close-Range Camera Calibration. Photogrammetric Engineering, No. 8, pp. 855–866
- BSH (2020): Wreck search – Basics. www.bsh.de/EN/TOPICS/Surveying_and_cartography/Wreck_search/Basics/basics_node.html
- Drap, Pierre; Djamel Djamel Merad et al. (2015): Underwater Photogrammetry and Object Modeling. A Case Study of Xlendi Wreck in Malta. Sensors, DOI: 10.3390/s151229802
- Durrant-Whyte, Hugh; Tim Bailey (2006): Simultaneous localization and mapping. Part I. IEEE Robotics & Automation Magazine, DOI: 10.1109/MRA.2006.1638022
- Engel, Jakob; Jörg Stückler; Daniel Cremers (2015): Large-scale direct SLAM with stereo cameras. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), DOI: 10.1109/IROS.2015.7353631
- Fabri, Marie-Claire; Beatriz Vinha et al. (2019): Evaluating the ecological status of cold-water coral habitats using non-invasive methods. An example from Cassidaigne canyon, northwestern Mediterranean Sea. Progress in Oceanography, DOI: 10.1016/j.pocean.2019.102172
- Fischler, Martin A.; Robert C. Bolles (1981): Random sample consensus. A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. Communications of the ACM, DOI: 10.1145/358669.358692
- Furukawa, Yasutaka; Jean Ponce (2010): Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, DOI: 10.1109/TPAMI.2009.161
- Hirschmüller, Heiko (2008): Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1166
- IHO (2008): IHO Standards for Hydrographic Surveys. Special Publication S-44 – Edition 5. International Hydrographic Bureau, Monaco
- Jordt-Sedlazeck, Anne; Reinhard Koch (2012): Refractive Calibration of Underwater Cameras. In: Andrew Fitzgibbon; Svetlana Lazebnik et al. (Eds.): Computer Vision – ECCV 2012. Springer, DOI: 10.1007/978-3-642-33715-4_61
- Kahmen, Oliver; Robin Rofallski et al. (2019): On scale definition within calibration of multi-camera systems in multimedia photogrammetry. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W10, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-93-2019
- Kim, Ayoung; Ryan M. Eustice (2013): Real-Time Visual SLAM for Autonomous Underwater Hull Inspection Using Visual Saliency. IEEE Transactions on Robotics, DOI: 10.1109/TRO.2012.2235699
- Kotowski, Rüdiger (1988): Phototriangulation in Multimedia Photogrammetry. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (Vol. XXVII), pp. 324–334
- Low, Kok-Lim (2004): Linear Least-Squares Optimization for Point-to-Plane ICP Surface Registration. Technical Report TR04-004, University of North Carolina at Chapel Hill
- Luhmann, Thomas; Stuart Robson et al. (2020): Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging, 3rd revised and expanded edition. De Gruyter, Berlin, Boston, DOI: 10.1515/9783110607253
- Maas, Hans-Gerd (1995): New developments in Multimedia Photogrammetry. In: Armin Grün; Heribert Kahmen (Eds.): Optical 3D Measurement Techniques III. Wichmann, Karlsruhe, pp. 362–372
- Mangeruga, Marino; Fabio Bruno et al. (2018): Guidelines for Underwater Image Enhancement Based on Benchmarking of Different Methods. Remote Sensing, DOI: 10.3390/rs10101652
- Menna, Fabio; Erica Nocerino et al. (2016): Geometric and Optic Characterization of a Hemispherical Dome Port for Underwater Photogrammetry. Sensors (Basel), DOI: 10.3390/s16010048
- Mur-Artal, Raul; Juan D. Tardós (2017): ORB-SLAM2. An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo and RGB-D Cameras. IEEE Transactions on Robotics, DOI: 10.1109/TRO.2017.2705103
- Nocerino, Erica; Fabio Menna et al. (2016): Underwater calibration of dome port pressure housings. ISPRS – International

- Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W4, DOI: 10.5194/isprs-archives-XL-3-W4-127-2016
- Nocerino, Erica; Mohamad Nawaf et al. (2018): Multi-camera system calibration of a low-cost remotely operated vehicle for underwater cave exploration. ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-1, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-1-329-2018
- Nornes, Stein M.; Martin Ludvigsen et al. (2015): Underwater Photogrammetric Mapping of an Intact Standing Steel Wreck with ROV. IFAC-PapersOnLine, DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.034
- Prado, Elena; Maria Gómez-Ballesteros et al. (2019): 3D Modeling of Rio Miera Wreck Ship Merging Optical and Multibeam High Resolution Points Cloud. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W10, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W10-159-2019
- Przybilla, Heinz-Jürgen; Rüdiger Kotowski et al. (1990): Geometrical Quality Control in Nuclear Power Stations. An Application of High Precision Underwater Photogrammetry. The Photogrammetric Record, DOI: 10.1111/j.1477-9730.1990.tb00718.x
- Remondino, Fabio; Maria Grazia Spera et al. (2013): Dense image matching. Comparisons and analyses. 2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), DOI: 10.1109/DigitalHeritage.2013.6743712
- Shortis, Mark (2015): Calibration Techniques for Accurate Measurements by Underwater Camera Systems. Sensors (Basel), DOI: 10.3390/s151229831
- Snaveley, Noah; Steven M. Seitz; Richard Szeliski (2006): Photo tourism. Exploring photo collections in 3D. ACM Transactions on Graphics, DOI: 10.1145/1141911.1141964
- Wang, Yan; Wei Song et al. (2019): An Experimental-Based Review of Image Enhancement and Image Restoration Methods for Underwater Imaging. IEEE Access, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932130

NEU

DHyG-Sonderpublikationen

Nr. 001

Patrick Goffinet:
Neue Bewertung der harmonischen Analyse
im Vergleich zur Darstellung der Ungleichheiten
am Beispiel der Deutschen Bucht

DHyG-Sonderpublikation Nr. 001
DOI: 10.23784/DHyG-SP_001

Nr. 002

Hannes Nübel:
Bathymetry from multispectral aerial images
via Convolutional Neural Networks

DHyG-Sonderpublikation Nr. 002
DOI: 10.23784/DHyG-SP_002

www.dhyg.de/index.php/hydrographische-nachrichten/sonderpublikationen



Bathymetry from multispectral aerial images via convolutional neural networks

An article by HANNES NÜBEL

Recently, optical approaches were applied more often to derive the depth of waterbodies. In shallow areas, the depth can be deduced mainly by modelling the signal attenuation in different bands. In this approach, it is examined how well a convolutional neural network (CNN) is able to estimate water depths from multispectral aerial images. To train on the actually observed slanted water distances, the net is trained with the original images rather than the orthophoto. The trained CNN is showing a standard deviation of 3 to 4 decimetres. It is able to recognise trends for varying depths and ground covers. Problems mainly occurred when facing sunglint or shaded areas.

CNN – convolutional neural network | multispectral aerial images | orthophoto | LiDAR
 CNN – Convolutional Neural Network | multispektrale Luftbilder | Orthofoto | LiDAR

In letzter Zeit wurde die Wassertiefe von Gewässern häufiger mit optischen Ansätze abgeleitet. In flachen Bereichen kann die Tiefe hauptsächlich durch Modellierung der Signaldämpfung in verschiedenen Bändern abgeleitet werden. Bei diesem Ansatz wird untersucht, wie gut ein Convolutional Neural Network (CNN) in der Lage ist, die Wassertiefe aus multispektralen Luftbildern abzuschätzen. Um auf den tatsächlich beobachteten schrägen Wasserabständen zu trainieren, wird das Netz mit den Originalbildern und nicht mit dem Orthophoto trainiert. Das trainierte CNN zeigt eine Standardabweichung von 3 bis 4 Dezimetern. Es ist in der Lage, Trends für unterschiedliche Tiefen und Bodenbedeckungen zu erkennen. Probleme traten vor allem bei Glanzlichtern oder in schattigen Bereichen auf.

Author

Hannes Nübel holds a B.Sc. degree from the University of Stuttgart.

hannue@gmx.de

1 Introduction

Reconstructing the surface of the earth by means of photogrammetry is an established method. Coordinates of object points can be computed via forward intersection when the respective point is observed in two or more images. However, applying this procedure to water surfaces is more complex. Nevertheless, charting water depths is necessary, especially in shallow water areas for example when considering safe routing of ships, or when determining the volume of a lake which is needed for extinguishing fires. The complexity involves measuring of identical points due to the specular and dynamic nature of the water surface. Furthermore, there is refraction on the water surface because of transition of the image ray between two media. For generating an orthophoto this particularly means that every pixel in each image has its unique refracted ray corresponding to the water surface which also may show local dynamics. Thus, to find the corresponding ground points of each pixel, this ray has to be traced from the respective image position, with its direction given by the orientation of the image, also considering the refraction on the water surface. Another point is that even if the direction of each ray is known, enough

identical points have to be detected to calculate their coordinates with help of the intersecting rays from the images. That is also demanding, because the submerged ground is often homogeneous and in addition there is attenuation in the water. Also, because of reflection and other factors the same points can appear differently when taken from different perspectives.

Because of different magnitudes of absorption of light for various spectral bands in the water column, it is also possible to fit a linear or higher dimensional regression model to band ratios, approximating the relation from radiometry to depth. But as soon as the scene contains different types of vegetation on the ground of the water basin, a more complex regression model is needed. Furthermore, spectrally based bathymetry estimation is commonly carried out based on orthophotos. Not only are orthophotos of waters prone to geometric errors due to neglectation of ray refraction at the water surface, but most also ignore the fact that only pixel values from the image centre (nadir direction) directly relate to water depth whereas pixels from the edge of an image rather show the slanted water distance. Each pixel of an aerial image, in turn, stores radiometric infor-

mation which is mainly related to the potentially slanted under water distance of the respective image ray. Especially for aerial images taken with wide-angle lenses, it is therefore beneficial to perform the bathymetry estimation based on the (oriented) images rather than the orthophoto.

To extend the linear regression approach, a convolutional neural network (CNN) can be used to cope with variations in bottom reflectance. Pixel-wise depth estimation based on the oriented aerial images require the slanted water distance for the image pixels for training. This information can e.g. be derived from bathymetric LiDAR (light detection and ranging), especially when carried out concurrently with the image capture. The CNN based approach has the advantage that spatial context information is taken into account. The reliability of the net is therefore increased, since proximity often implies similar depths.

In this thesis, the approach of training a convolutional network to predict the slanted distances from image rays inside a waterbody, will be examined. Next to quality assessment and critical discussion, it will also be discussed to which extent the Coastal Blue channel has an influence on the network.

2 Data set

Multi view stereo

In the following, the acquisition of the investigated data is addressed. The images used for the processing were taken at the Autobahnsee in Augsburg (Fig.1), which is approximately up to 5 metres deep and has a small isle as well as multiple vegetation patches and a complex elevation profile. For data acquisition two IGI DigiCAM 100 cameras are used, which are based on PhaseOne iXU-RS 1000 cameras with 11,608 by 8,708 pixels each, one equipped with an RGB sensor and the other with a pan-chromatic sensor and a filter for the Coastal Blue wavelength (Mandlbürger et al. 2018). Using the information from both images, the same position and orientation is required. But for practical reasons the cameras had to be mounted side by side. Therefore, the Coastal Blue image is transformed into the RGB datum using a homography with the Software MATLAB (2018).

LiDAR

Moreover, the employed hybrid sensor system also integrates a RIEGL VQ-880- G topo-bathymetric laser scanner (Riegler 2019) to obtain a point cloud, from which the water surface model and ground model can be extracted. In Fig. 2 the ground model for the observed area is depicted. It is noted that there are complex structures at the ground of the lake caused by the distribution of soil and vegetation. These will be used to extract the reference data, being the slanted distances of the image rays in the water. The scanner is designed for shallow water mapping. Therefore, a green laser with

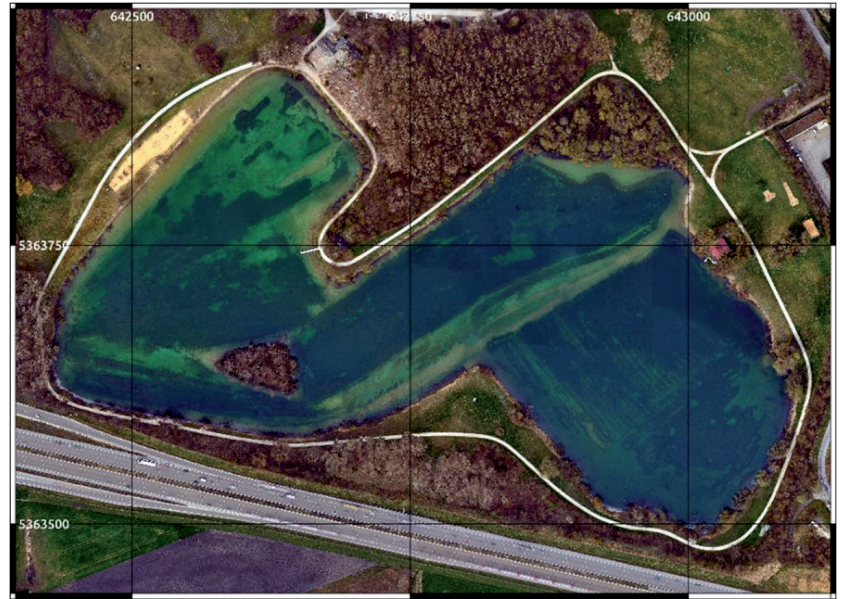


Fig. 1: Orthophoto Autobahnsee with different ground covers

wavelength 532 nm is used, because of its capability to penetrate water for measuring the ground of a waterbody and available high energy laser sources (Doneus et al. 2015). The mean point density of the obtained point cloud is about 40 points per square metre to get a dense model.

3 Methods

Preprocessing reference data

The following section is discussing the applied methodology to derive the reference data the applied CNN is to be trained with. It is given by the respective slanted distances of the rays of every pixel in the water. To obtain them, the orientations of the camera and a water surface model (WSM), as well as a ground model are used to trace the path of rays from the camera to the correspond-

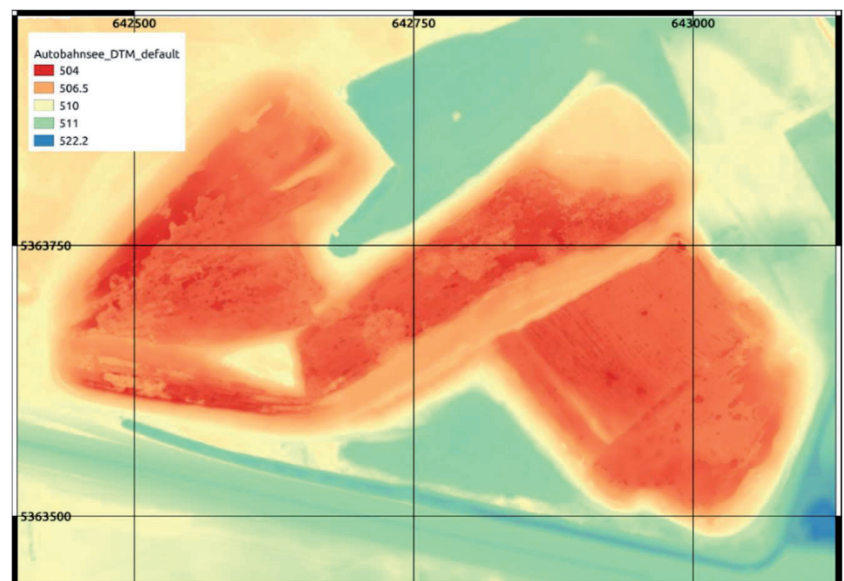


Fig. 2: Topo-bathymetric LiDAR-derived digital terrain model Autobahnsee

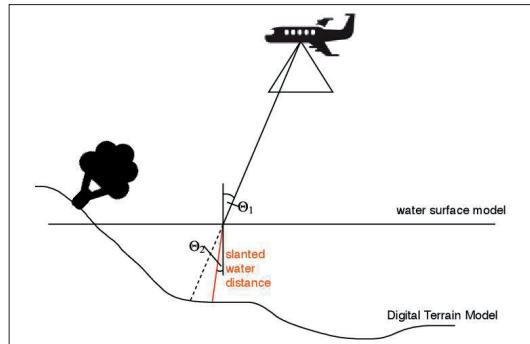


Fig. 3: Refraction of image ray on the water surface

ing ground point with consideration of refraction at the water surface. The WSM is estimated from the first echoes of the laser scanner, while the last echoes constitute the basis for filtering the ground points and, finally, calculating the digital terrain model (DTM) as the ground model.

In order to get the slanted distances, the rays corresponding to the individual pixels can be calculated in the local camera coordinate system using the interior orientation of the camera. They can then be transformed into a global coordinate system with help of the pixel coordinates, as well as positions and orientations of the camera at the time of exposure (Kraus 1996). Those steps are implemented in python, using the orientation file containing the interior and exterior orientations.

The next step then is to intersect the rays with the WSM, which is done using the Software OPALS (Pfeifer et al. 2014). After the intersection points of the rays with the water surface are known, for their further propagation they have to be corrected due to refraction following Snell's law (Kotowski 1988). That results in a change of direction for the ray depending on the incidence angle (Fig. 3).

The refracted ray starting from the particular intersection point with the water surface, is afterwards intersected with the ground model, which gives the observed ground point in the respective pixel. By knowing the two intersection points, the euclidean distance can be calculated, constituting the slanted distance through the waterbody. With that information a reference raster for every image can be created. An example of that can be seen in Fig. 5a. The last step of preprocessing the data, is to mask the multispectral images, so that only pixels with valid reference depths are included.

Deep Learning

The U-Net (Ronneberger et al. 2015) serves as basis for the applied CNN. Other than in most approaches, the net is not being used for segmentation, but for fitting a regression model. So instead of having multiple classes with a normalised output for every pixel, only one quantity is trained, containing floating point numbers for the water distance of each pixel.

To train a net, the images have to be separated into training images, which also contain a percentage of validation data, and test images which are not used at the training. For that, the lake area is split into two parts, which are marked in Fig. 4. To make sure that the test data is completely new to the net, the images containing both areas were neither used in training, nor for testing. The structures in the chosen areas differ rather strongly, so that it is possible to evaluate if the network is overfitting to the training area, or if it is learning characteristics that may be transferable also to other waterbodies.

4 Results and discussion

Applying the trained net to previously unseen data provides an independent performance test of the net. This data consists of a subset of all images, marked as test images. Thus, it can be verified how well the net really learned certain characteristics instead of just memorising the training data. An example for the prediction of a test image compared to the reference data can be seen in Fig. 5a and Fig. 5b. Despite the area on the upper right, in which the slanted underwater distances are predicted as too large, the predicted values seem to match the reference. Besides, there is no major discrepancy considering the trend of the water distances. What can be observed however, is a certain noise that may be caused by the camera sensor or by dynamics of the water surface.

After all test images are predicted, per-pixel distance deviations can be calculated by subtracting the predicted distance from the reference distance. By merging the deviations for all pixels of all test images, a histogram over all depth deviations (Fig. 6) can be obtained. It is noted that only water pixels are taken into account whereas all pixels in vegetation and on dry land are masked.



Fig. 4: Distribution of training and testing area observed in the images

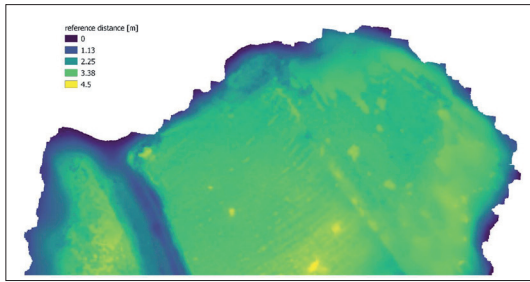


Fig. 5a: Reference (slanted water) distances of test image

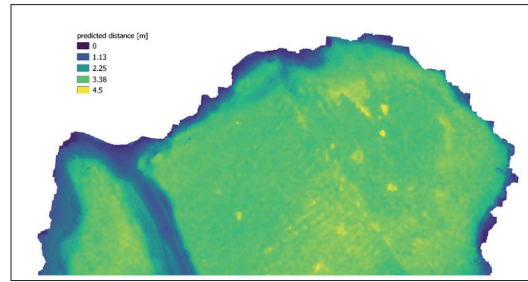


Fig. 5b: Predicted (slanted water) distances of test image

The histogram is showing an offset of one to two decimetres in negative direction, meaning that the predicted distances are larger than the reference (i.e. over estimation of water depth). It is nearly normally distributed with a median absolute deviation of 31.9 cm. The standard deviation is higher but the value is not as robust, considering outliers.

While convolution kernels are taking information from surrounding pixels into account, they tend to blur strong edges. Thus, large deviations can be found at transitions from vegetation (dark) to bare soil (bright).

5 Conclusion and outlook

Considering that the area in the test images is unknown to the model, the predictions are consistent. If the desired accuracy has to be more precise than decimetre range, the method of choice would still be sonar or LiDAR. If not, advantages of CNN based bathymetry estimation over the stereo photogrammetric and linear regression approach are shown in this thesis. Because of the different ground covers of the lake, a more complex model than linear regression is required.

A common issue when trying to predict features is the lack of data. The major advantage from remaining in the image system instead of projecting into a global system is shown here. It results in the possibility of using the whole dataset with all overlapping areas without reducing it. This also is the reason, why it was possible to reject the images that covered both, the training and testing area, so that there was no connection.

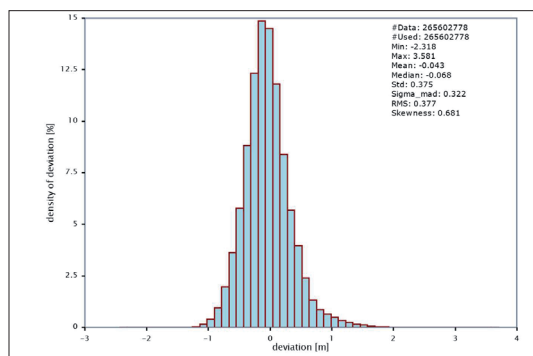


Fig. 6: Histogram of deviations of predicted under-water distances compared to reference distances for 24 test images

To see how well the net is performing for alike data sets it is reasonable to apply or transfer it to another lake or shallow waterbody. Ideally, the net can be used without any changes. Otherwise, the pre-trained weights could be adapted by training with new reference under-water distances. In that case less training data should be necessary. When thinking about the advantages in terms of effort it would furthermore be interesting to see how well it performs for satellite imagery, probably after applying atmospheric corrections.

Proceeding with this method, the next logical step would be to derive a 3D point cloud from the predicted under-water distances in the images. For this purpose, an estimated water surface model and the orientations of the camera for each slanted distance image would be required. By doing so, it is possible to analyse the overlapping areas of consecutive images, to see how well they fit. Furthermore, outliers that only occur in single images, for example because of sunglint, could be rejected by calculating the median in a certain area when creating a DTM. This could avoid the necessity of introducing further postprocessing steps. //

References

Doneus, M.; Igor Miholjek et al. (2015): Airborne laser bathymetry for documentation of submerged archaeological sites in shallow water. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W5-99-2015

Kotowski, Rüdiger (1988): Phototriangulation in multi-media photogrammetry. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 27:B5, pp. 324–334

Kraus, Karl (1996): Photogrammetrie, Band 2: Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Dümmler, Bonn

Maas, Hans Gerd (2015): On the accuracy potential in underwater/multimedia photogrammetry. Sensors, DOI: 10.3390/s150818140

Mandlbürger, Gottfried; Jens Kremer et al. (2018): Investigating the use of Coastal Blue imagery for bathymetric mapping of inland water bodies. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-1-275-2018

MATLAB (2018): version 9.5.0 (R2018b). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

Pfeifer, Norbert; Gottfried Mandlbürger et al. (2014): OPALS – A framework for Airborne Laser Scanning data analysis. Computers, Environment and Urban Systems, DOI: 10.1016/j.compenvurbusys.2013.11.002

RIEGL (2019): Info Sheet VQ-880-G. www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Infosheet_VQ-880-G_2016-05-23.pdf

Ronneberger, Olaf; Philipp Fischer; Thomas Brox (2015): U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. arXiv: 1505.04597

Drohnengestützte Erfassung von maritimen Infrastrukturen

Ein Beitrag von DAVID HEUSKIN und FRANK LEHMANN

Das Institut für den Schutz maritimer Infrastrukturen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. in Bremerhaven befasst sich mit der Entwicklung von automatisierten Technologien und echtzeitnahen Verarbeitungsmethoden zur Erstellung neuartiger Lagebilder für den maritimen Bereich. Über- und Unter-Wasser-Drohnen (UAV, AUV, ROV) werden mit neuartigen optischen Kamera- und Sonarsystemen eingesetzt, um dreidimensionale Lagebilddaten aufzunehmen. Spektrale Informationen und dreidimensionale Punktwolken werden zu Lagedarstellungen kombiniert, die die Lösung von Sicherheitsfragestellungen vereinfachen und beschleunigen (Suche von Lecks, Schäden an Anlagen, Erfassung von Fahrzeugen und Personen auf dem Hafengelände). Die Technologie leistet einen wichtigen Beitrag zum Überblick über die maritimen Infrastrukturen. Durch die gute Verfügbarkeit und die Leistungsfähigkeit der Systeme sowie Möglichkeiten zum automatisierten Betrieb lässt sich der zeitliche Aufwand der Modellierung auf ein Minimum reduzieren.

Drohnen | 3D-Modellierung | Photogrammetrie | Visualisierung | Punktwolke | AUV | Multikopter
UAVs | 3D modelling | photogrammetry | visualisation | point cloud | AUV | multicopter

The Institute for the Protection of Maritime Infrastructures of the German Aerospace Center (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) in Bremerhaven is concerned with the development of automated technologies and near-real-time processing methods for the creation of novel situation pictures for the maritime sector. Surface and underwater drones (UAV, AUV, ROV) are used with novel optical camera and sonar systems to acquire three-dimensional situation picture data. Spectral information and three-dimensional point clouds are combined to form situation displays that simplify and accelerate the solution of safety issues (search for leaks, damage to installations, detection of vehicles and persons on the port area). The technology makes an important contribution to the overview of maritime infrastructures. Due to the good availability and performance of the systems as well as possibilities for automated operation, the time required for modelling can be reduced to a minimum.

Autoren

Dr. David Heuskin ist Gruppenleiter Technologieerprobungssysteme am Institut für den Schutz maritimer Infrastrukturen des DLR in Bremerhaven. Frank Lehmann ist Leiter der Abteilung Maritime Sicherheitstechnologien am Institut für den Schutz maritimer Infrastrukturen des DLR in Bremerhaven.

david.heuskin@dlr.de

Das 2018 eingeweihte Institut für den Schutz maritimer Infrastrukturen des DLR in Bremerhaven fokussiert sich auf die Bereitstellung neuartiger, bewerteter Lagebilder. Zu diesem Zwecke werden kostengünstige Technologien im Bereich Sensorik und Methoden zur schnelleren Datenverarbeitung entwickelt. Als Ausgangspunkt der Forschung dienen Sicherheitsanalysen, die existierende Systeme und Technologien hinsichtlich bestehender und neuer Bedrohungs- und Gefährdungslagen untersuchen und bewerten.

Ziel ist es, Lagebilder mit Hilfe geeigneter Key Performance Indikatoren (KPI) echtzeitnah auszuwerten und die Sicherheitslage von maritimen Infrastrukturen zuverlässig und vollumfänglich zu erfassen. Dies betrifft Hafenanlagen, die maritime Infrastruktur (z. B. Windparks, Seekabel, Positionsanlagen, Transportwege zum Hafen im Umfeld, auf der Straße und der Schiene), die Einbindung der dazugehörigen Kommunikationstechnologie, die Überwachungsanlagen in den Häfen, den Schiffsverkehr und die internationalen Seewege

als Grundlage des deutschen Exports und Imports von Wirtschaftsgütern.

Die Gewährleistung der Sicherheit im maritimen Bereich soll durch die Verwendung neuartiger Sensor- und Softwaresysteme in Verbindung mit kommerziell verfügbaren Technologien erfolgen.

Die Kernaufgabe der Forschungsgruppe Technologieerprobungssysteme ist der Betrieb land-, unterwasser- und luftgestützter Erprobungsträger, um neuartige Sensorik im Anwendungskontext erproben und validieren zu können.

Insbesondere die Überwachung von Hafenanlagen im Nahbereich erfordert neue Wege zu einer echtzeitnahen Nutzung und Auswertung von hochauflösenden Schrägsichtsystemen. Eine vollumfängliche Überwachung ist zunehmend mit der Forderung und Notwendigkeit automatisierter Auswerteverfahren bis hin zur automatisierten Objektidentifikation verknüpft.

Die Nutzung von mobilen Schrägsichtsystemen offenbart ihrem Anwender zahlreiche neuartige Funktionen, welche weit über die Nutzbar-

keit von ortsfesten Videokameras hinausgehen. Durch die Verknüpfung unterschiedlicher Systeme lassen sich Arbeiten im Bereich der Betriebssicherheit, Überwachung und der Vermessung teilweise sogar stark automatisiert erfüllen. Schrägsichtsysteme beschränken sich nicht nur auf Kamertechnologien, sondern umfassen zusätzlich die bildgebende Darstellung durch die Nutzung von Laserscanverfahren und Sonartechnologie im Unter-Wasser-Bereich. Die Verknüpfung von Daten unterhalb der Wasseroberfläche mit photogrammetrischen Aufnahmen aus der Luft wird hier am Beispiel eines Hafensbeckens gezeigt.

Multikopter

Als Sensorplattform dient der Multikopter DJI Matrice M210 V2 RTK. Das Fluggerät erlaubt eine Nutzlast von 1,3 kg bei einem maximalen Startgewicht von 6,1 kg. Die Flugzeit liegt dank zwei großen Lithium-Polymer Akkus bei rund 30 Minuten, was die Vermessung von großen maritimen Arealen mit nur wenigen Zwischenstopps erlaubt. Die Bestimmung von präzisen Positionskoordinaten wird durch eine Referenzstation in Form eines Real-Time-Kinematik-Systems (RTK) unterstützt, was eine Genauigkeit von 1 bis 2 cm bietet und die Resistenz des Multikopters gegen magnetische Interferenzen erhöht.

Das frei verfügbare Software Development Kit (SDK) von DJI bietet eine Schnittstelle zur Erweiterung der vom Hersteller bereits angebotenen Funktionen zum teilautonomen Betrieb der Multikopter. Diese Möglichkeit wird durch kommerzielle Anbieter wie Litchi zur universellen wegpunktbasierten Missionsplanung oder Pix4D bei der Realisierung unterschiedlicher Photogrammetrie-Anwendungen genutzt. Auch komplett anwendungsspezifische, hochautomatisierte Arbeitsabläufe lassen sich so realisieren, ohne dafür auf die Vorteile hinsichtlich Verfügbarkeit, Preis und Verlässlichkeit eines kommerziellen Produkts verzichten zu müssen. Der autonome Betrieb der Multikopter ohne Pilot, der jederzeit die Steuerung übernehmen könnte, ist nach aktueller Rechtslage kritisch zu betrachten, technisch aber durchaus möglich.

Die Rohdaten für 3D-Rekonstruktionen liefert ein optischer Micro-4/3-CMOS-Sensor (Zenmuse X55). Die Anbindung an den Multikopter ist mit einem Drei-Achsen-Gimbal mit Präzisionsmotoren realisiert, die eine Genauigkeit von $\pm 0,01^\circ$ erreichen. Die Auflösung des Sensors beträgt 20,8 Megapixel bei einem Field of View von 70° . Mit den Navigations- und Kompassdaten sowie der Ausrichtung der Kamera, welche in den Metadaten der Bilddateien gespeichert werden, lassen sich die Bildpunkte der Daten verknüpfen.

Autonomes Unter-Wasser-Fahrzeug

Für die Datenerzeugung unter Wasser wird das autonome Unter-Wasser-Fahrzeug (AUV) Sea-

Cat der Marke Atlas Elektronik verwendet (Kalwa 2019). Dieses ist unter anderem mit einem Norbit WBMS-Fächerlot ausgestattet, welches zur Generierung der Bathymetriedaten eingesetzt wird. Diese werden im Anschluss mit den Navigationsdaten des AUVs prozessiert, um eine ausreichende Genauigkeit zu erhalten. Für das Prozessieren der Sonardaten wird SonarWiz verwendet. Um die Bathymetriedaten mit den Photogrammetriedaten zu fusionieren, ist es notwendig, diese auf miteinander kompatible Formate zu transferieren. SonarWiz erlaubt unter anderem den Export der Bathymetriedaten in das XYZ-Format, in dem sie mit einer Punktwolke aus Photogrammetriedaten vereint werden können.

3D-Visualisierung von Kaianlagen

Zur Demonstration der Möglichkeiten beim Einsatz von Multikoptern in der Vermessung und Inspektion wurden mit dem beschriebenen System aus Multikopter und Kamera Kaianlagen in Bremerhaven und Nordenham befliegen. Dazu wurden zunächst Trajektorien erzeugt, entlang derer sich der Multikopter bewegt und auf welchen die Kamera in festgelegten Abständen Bilder aufzeichnet. [Abb. 1](#) zeigt eine Trajektorien- und Flugroutenplanung, welche mit dem kommerziellen Programm Pix4Dcapture erstellt wurde. Sie stellt sicher, dass alle Objekte innerhalb des markierten Gebietes aus einem bestimmten Blickwinkel erfasst sind. Für die 3D-Rekonstruktion komplexer Strukturen müssen die Objekte von allen vier Seiten und von oben, also insgesamt aus fünf verschiedenen Blickwinkeln, aufgenommen werden. Daraus resultieren für das Areal von 243 m x 165 m aus [Abb. 1](#) fünf Trajektorien, für die das System insgesamt etwa 45 Minuten benötigt. Einfache Objekte wie die Spundwand in [Abb. 2](#) lassen sich auch mit weniger Aufwand sehr detailliert darstellen. Das hier gezeigte 3D-Modell ist aus einem einzigen geradlinigen Flug entstanden. So kann nach etwa 10 Minuten Flugzeit ein Kilometer Spundwand in dem aufgezeigten Detaillierungsgrad modelliert

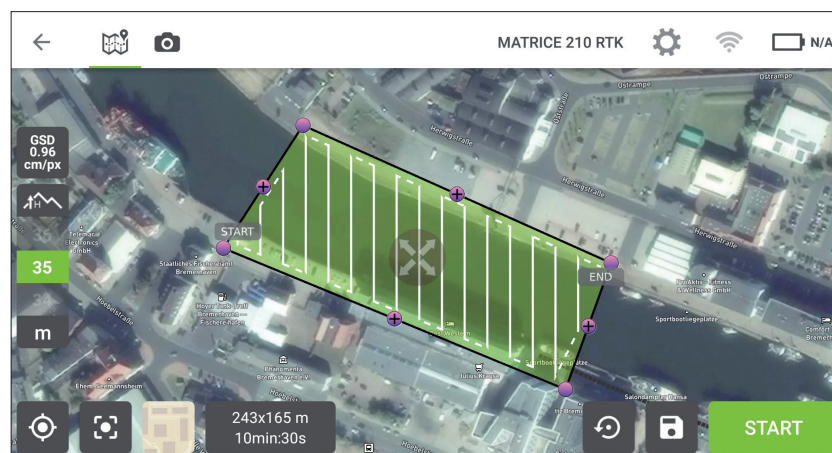


Abb. 1: Planung der Trajektorien des Multikopters mit der Software Pix4Dcapture

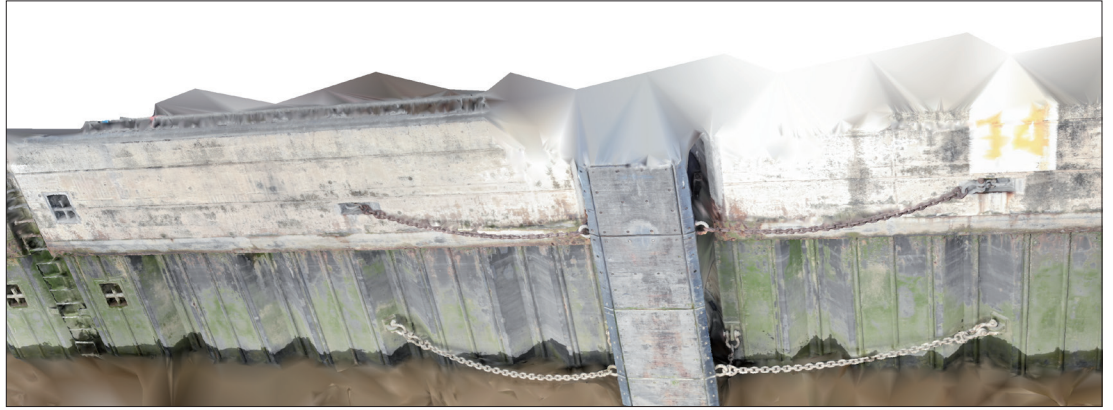


Abb. 2: Ergebnis einer Spundwandinspektion nach nur einem Überflug, dargestellt mit RealityCapture

werden. [Abb. 3](#) zeigt den Ausschnitt eines 3D-Modells einer Kaianlage mit davor liegendem Steg. Aufgrund der erhöhten Komplexität der Szenerie wurde die Kaimauer in drei verschiedenen Höhen befliegen, was die Anzahl der verknüpfbaren Bildpunkte und damit die Qualität der Rekonstruktion erhöht.

Mit Hilfe von Photogrammetriesoftware, wie Pix4Dmapper oder RealityCapture, werden aus den Bildern sowie der Position und der Orientierung der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme Punktwolken berechnet. Durch die Kombination von zwei oder mehr korrespondierenden Bildpunkten von Bildern aus unterschiedlichen Positionen und Blickwinkeln lassen sich die Ausgangspunkte dreidimensional berechnen. Um Bauwerke zu inspizieren, ist eine hohe Auflösung der Bilder erforderlich, damit eine hohe Punktdichte errechnet werden kann. Ein entscheidender Vorteil bei der Verwendung von Kameras als Datenquelle im Vergleich zu Laserscannern oder Sonarsystemen ist, dass aus der Punktwolke und den Originaldaten anschließend ein texturiertes Modell generiert werden kann. Anhand dieser Art von Modell lassen sich sehr genaue Aussagen zum Zustand des inspizierten Bereichs tätigen.

Verknüpfung von Punktwolken über und unter Wasser

Über das Format der Punktwolke (z. B. das XYZ-Format) können Daten unterschiedlicher Sensoren fusioniert werden. In der maritimen Welt entsteht so eine Schnittstelle zwischen optischen Sensoren über und akustischen Sensoren unter Wasser. In [Abb. 4](#) wurde diese Möglichkeit dazu genutzt, um eine Szene im Museumshafen von Bremerhaven zu visualisieren. Die mit AUV und Fächerlot aufgenommenen Bathymetriedaten und die aus den Aufnahmen von Multikopter und Kamera über Photogrammetrie errechneten Punktwolken des Museumsschiffs *Seute Deern* wurden in einer Darstellung zusammengeführt. Dadurch entsteht ein dreidimensionaler Gesamtüberblick über die Situation vor Ort. Die Szene wurde mit der Software NaviModel Viewer zusätzlich in vorhandenes Kartenmaterial eingebettet.

Ausblick

Die anwendungsspezifische Gestaltung autonomer und automatisierter Funktionen bietet ein großes Potenzial in der Steigerung der Effizienz von Prozessen in den Bereichen Überwachung und Vermessung maritimer Infrastrukturen sowie die Kartierung von Veränderungen durch Change



Abb. 3: Ergebnis einer Kaimauerinspektion mit Überflügen in drei unterschiedlichen Höhen, dargestellt mit RealityCapture

Satellite-derived bathymetry in practice

Current examples for cable route surveys and coastal monitoring

An article by MARINA NIEDERJASPER*

Multibeam bathymetry surveying is a well-established method but limited to water depths accessible by vessels or small boats. Airborne LiDAR bathymetry (ALB) systems can cover this gap by surveying both the coastal topography and the shallower water regions. ALB surveys are mostly suitable for larger projects where accurate measurements are requested, as they require on-site mobilisation and a noticeable amount of costs. Satellite-derived bathymetry (SDB) can be seen as an option for an easy to implement, cost-effective and globally available solution to provide full coverage with moderate density and accuracy which may be suitable for certain projects in coastal regions or as a precursor survey before commissioning a targeted survey. This paper describes methods providing information to fill data gaps for cable landing sites and for coastal zone monitoring. They are based on the new SDB online software eoLytics SDB by EOMAP. Results obtained compare well against acoustic survey data. The procedure was found to be highly useful for the described purposes.

SDB – satellite-derived bathymetry | LiDAR | cable route survey | coastal zone monitoring | eoLytics SDB
SDB | LiDAR | Kabelvermessung | Küstenzonenüberwachung | eoLytics SDB

Die Vermessung mit Fächerecholoten ist etabliert, aber auf Wassertiefen beschränkt, die mit Schiffen oder kleinen Booten zugänglich sind. Luftgestützte LiDAR-Systeme (ALB) können diese Lücke schließen, indem sie sowohl die Küstentopographie als auch die flacheren Wasserregionen vermessen. ALB-Vermessungen eignen sich meist für größere Projekte, bei denen genaue Messungen erforderlich sind, da sie eine Mobilisierung vor Ort und einen spürbaren Kostenaufwand erfordern. Aus Satellitendaten abgeleitete Bathymetrie (SDB) ist eine einfach zu implementierende, kostengünstige und weltweit verfügbare Lösung, mit der eine vollständige Abdeckung mit angemessener Dichte und Genauigkeit erreicht werden kann und die für bestimmte Projekte in Küstenregionen geeignet sein kann oder als Vorabuntersuchung vor Beauftragung einer gezielten Vermessung. Dieser Artikel beschreibt Methoden, mit denen Datenlücken für Kabelanlandungsstellen und für die Überwachung von Küstengebieten geschlossen werden können. Sie basieren auf der neuen SDB-Online-Software eoLytics SDB von EOMAP. Die erzielten Ergebnisse sind mit akustischen Vermessungsdaten gut vergleichbar. Das Verfahren erwies sich für die beschriebenen Zwecke als sehr nützlich.

Author

Marina Niederjasper is Deputy Client Deliverables Manager Hydrography and Charting at Fugro in Bremen.

m.niederjasper@fugro.com

* With support from EOMAP (Dr. Knut Hartmann, Moritz Steinsiek, Christian Bödinger), the City of Gold Coast Council (Australia), Stephen Rump, Dhira Adhiwijana, Christian Lampe, Manfred Stender, Dr. Marco Filippone (Fugro)

Introduction: background and approach

Bathymetric mapping of coastal regions is always challenging for hydrographic surveys and cable route surveys. Hydrographic surveys with high accuracy requirements can be fulfilled by multibeam surveys at evenly falling coasts with a high tidal range only. Steep coastlines or areas inaccessible for vessels can only be covered by airborne LiDAR. Unlike multibeam and LiDAR surveys which comply with *International Hydrographic Organization (IHO) Standards for Hydrographic Surveys (S-44)*, satellite-derived bathymetry (SDB) may provide an alternative for certain applications with moderate accuracy and resolution.

For cable route surveys, the landing of a cable to the shore comprises the inshore survey by a vessel or small boat as well as the topographic survey on

the beach. The intermediate section was previously covered by a diver swim survey, which means a high logistical effort and potentially high risk. Diver swims usually covers only one line of depths along the planned cable route and thus provides a result of reduced robustness and accuracy. For this requirement SDB offers an easy to implement and cost-effective approach to retrieve a solution with higher accuracy at full coverage.

In case of sparsely available data coverage, such as single-beam data, or even if no data are available, satellite-derived bathymetry can be applied to extend the available information to the full coverage of an area of interest. Furthermore, if some of the available data covers an area with potentially no or little seabed change the existing data can be regarded as valid over a long period of time and

can be applied as control points for several satellite image processing tasks covering the time period of interest. Thus, satellite-derived bathymetry offers the possibility of time lapse monitoring of seabed morphology, for example for coastal zone management requirements.

For planning purposes, such as desktop studies for a cable route survey, where no survey data are available, it is even possible to use spot depths from a sea chart or ENC as a base for satellite-derived bathymetry.

The processing of satellite images is carried out by Fugro in a specific software called eoLytics SDB, provided by EOMAP, Seefeld, in Germany. This article describes the methodology and two current application examples: filling of a gap at a landing site for a cable route survey and coastal monitoring.

Methodology

Basic theory

Satellite-derived bathymetry (SDB) uses satellite data taken from passive multispectral sensors for calculating depths down to the light penetration depth. There are several SDB approaches, ranging from fully physics-based to simple empirical approaches. The physics-based approach models the depths by considering the various influences of the light penetrating the atmosphere, water surface and water column and the adjacent bright land reflectance. This involves all physical factors during sunlight propagation and other physical processes before the reflected radiance is captured by the multispectral sensors. This complex concept comes with the significant benefit of being independent of on-site surveys or training data. It can therefore be applied worldwide without a priori in situ data or the need to deploy survey teams, even for greenfield locations.

The empirical method on the other hand predicts depths based on an empirical relationship between the recorded radiances in the different spectral bands and sample depth points in the area of study. Thus, in contrast to physics-based methods, empirical-based methods require known depths as control points to predict the depths for an extended area adjacent to the control points. The advantage of empirical methods is that they are rapid, easier to implement and considerably more user friendly than physics-based methods. The eoLytics SDB software used in this work (see next section) is based on an empirical approach, but with an important distinction. Pure empirical methods are prone to hidden error sources: environmental conditions which impact SDB can change within very short distances without being noticed or accounted for in empirical concepts. The eoLytics SDB software therefore also includes physical corrections in order to improve the reflected radiance quality as well as to reduce bias caused by environmental effects.

Software and workflow

eoLytics SDB is a novel, cloud-based processing SDB solution developed by EOMAP, following a joint requirement analysis with the Fugro team. The software includes automatic online access to the most up-to-date satellite data archives. It is easy and rapid to use and offers full control through the integration of local survey data (control points). The usual satellite image input is from Sentinel-2 sensors; other commercial images of higher resolution and accuracy may be imported in near future with accounted additional processing effort.

Within the software, the satellite image is processed pixelwise for atmospheric and water surface corrections, furthermore a land/cloud-versus-water classification. The control points are firstly checked and resampled to the satellite image resolution and then separated into a set of training data and a set of validation data. The training data set is used as a base to process the satellite image and derive the bathymetry for the complete image – this is the main process. The validation data set is then used to qualify the result, which means the SDB-derived depths are compared against the depths of the validation data set. The complete calculation procedure from online satellite image selection to final product access takes less than one hour for one satellite image.

The output can be exported to an ASCII-file containing positions and depths for the area of interest in full coverage, a georeferenced TIFF-file containing depths (underwater digital elevation model), the processed satellite image as a real-colour TIFF-file, the statistics of the quality control and metadata. Fig. 1 shows a flow chart of the workflow.

Accuracy

The horizontal accuracy of SDB is mainly based on the geolocation accuracy of the satellite imagery used. Multispectral satellite imagery differs in spatial resolution and accuracy. Commercial satellite imagery offers higher resolution and accuracy, whereas publicly-available satellite imagery such as Sentinel-2 has moderate resolution and accu-

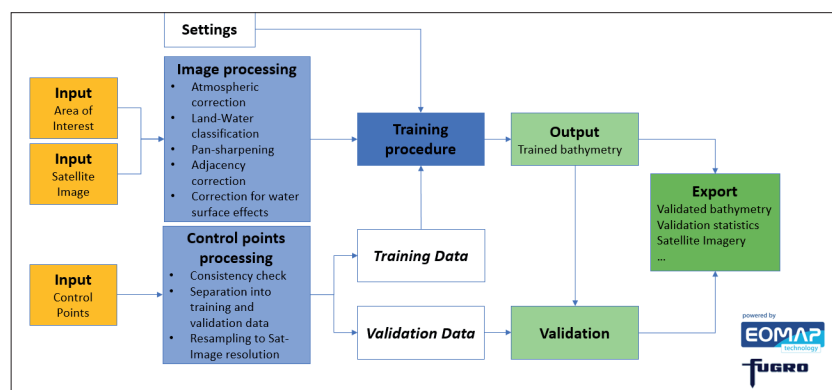


Fig. 1: Satellite-derived bathymetry, workflow of methodology applied in eoLytics SDB

racy. Sentinel-2 images have a spatial resolution of 10 m and a horizontal accuracy of 12.5 m (2σ).

The vertical accuracy of SDB is normally assessed by comparing the result or estimated depth with ground truth data in the same area of interest. The differences reflect the vertical accuracy of SDB and are qualified in the validation process mentioned above. The common vertical accuracy of SDB achieved by eoLytics SDB using reliable training data is typically ± 1.0 m RMSE and increases with water depth due to the reduced signal to noise ratio.

Filling gaps for cable route surveys

Requirement

Despite the use of satellites for communication purposes, fibre optic cables are vital as more than 90 % of our international voice communication, internet and data run through world-wide spanned submarine cable systems. A continuously increasing number of world-wide spread locations are being planned, laid and connected to new cable network components. One of the main hydrographic survey markets within Fugro is the survey of planned telecommunication cable routes. This comprises the bathymetric survey as well as geological and geophysical investigations of the seafloor and the shallow geology beyond. The routes typically consist of main trunk lines covering large distances crossing oceans or surrounding specific countries or even parts of continents in a relatively great distance and great water depths. Diverting from these trunk lines, there are branches to connect single countries or landing sites of interest. The survey of the branches covers a large depth range from deep water at the junction point up to the landing site on the beach. For this pur-

pose, ocean going vessels are deployed for the major part of the route and shallow water inshore vessels with very small draught for the shallowest part. For the landing of the cable onto the shore, a topographic survey is required to cover the complete range of the potential cable route from deep ocean to connection to the land infrastructure.

Unfortunately, the transition between water and land is always a challenge to be covered. A typical example is shown in Fig. 2. The bathymetry collected by the inshore vessel is shown colour coded by depth. The shallowest depth surveyed is about 3.5 m LAT. In the front on the left side of the figure, a rocky feature reaches into the survey corridor, which prevented the survey vessel from achieving more coverage and created breaking waves. The red spots on the beach represent the spot heights measured during a topographic survey.

Obvious is the gap between inshore survey and topographic survey, which needs to be closed. Previously such a case required a diver swim survey. Divers were equipped with lead line positioning and a pressure sensor to determine water depths and followed a single line along the route from the beach to the shallowest depth the inshore vessel reached. This did not provide complete coverage of the survey corridor, nor was the accuracy expected to be very high. Additionally, as can be derived from the image, it bore a certain risk for the divers due to breaking waves in a rocky area. Due to the general risk in performing diving operation, this procedure is no longer supported at Fugro.

Solution

Satellite-derived bathymetry was proposed and tested in this case as an alternative to provide the

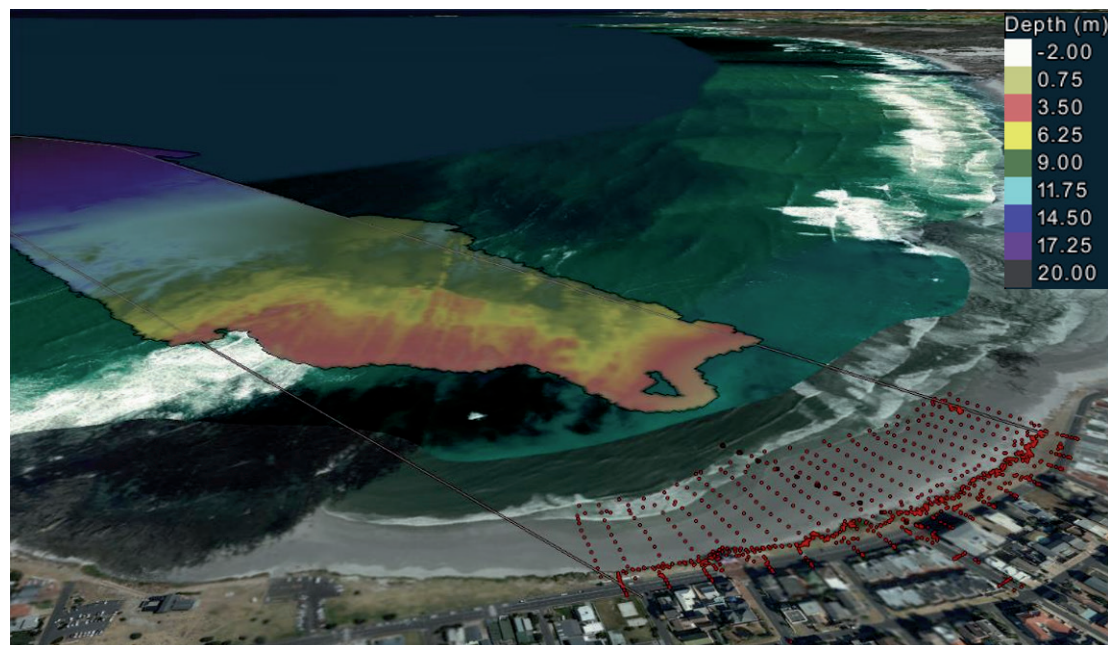


Fig. 2: Landing site showing coverage gap between vessel-based bathymetry (colour coded by depth) and topographic survey (red dots) (Note: 3D imagery taken from web map server)

missing depth coverage. The settings for the test are listed as follows:

- The area of interest was easily defined by the outline of the survey corridor, the seaward boundary of the inshore vessel coverage and the beach line.
- The control points were taken from both the topographic survey (spot heights on the beach) and the inshore survey (an extract of the shallowest part, covering the complete corridor width). This provided at least the coverage of the complete depth range anticipated, although missing the central part. Control points of both sources needed to be referred to the same vertical datum.
- The best suitable satellite image needed to be chosen. This proved to be difficult, as the major part of the available images showed breaking waves, which hamper the depth derivation process. Apart from this, it is preferred to choose an image at highest tide thus having as much water coverage as possible on the beach. The best image nearest in time was chosen.

The result is an extension of the depth coverage as shown in Fig. 3.

The additional coverage extends the coverage significantly and closes the gap up to the beach, providing sufficient overlap between topographical survey and satellite-derived bathymetry. This also offered the possibility to additionally check the quality of the SDB result, which was found to be mostly in a range of about ± 0.1 m to the topography data, well within the requirements. Unreliable areas needed to be removed for example in the rocky feature as well as some areas in the

transition zone at the land/water interface on the beach, where the image showed breaking waves and no results obtained.

Nevertheless, from this additionally depth data the missing contours and a depth profile could be derived continuously up to the beach using a remote method in a relatively short time and at low costs, without any potential risk for a diver resulting in improved coverage and accuracy compared to diver swim.

Moreover, the resulting data set could be used as a base for further SDB calculations in regular intervals so that a monitoring case could be established for observing the dynamics and possible changes in the seabed morphology.

Specific approach: Satellite-photogrammetry-based topographic survey

In some remote regions for cable route survey landings, it might be difficult to reach the beach to complete a topographical survey. This might be the case due to logistic, safety, environmental and political constraints. In such cases, satellite-derived bathymetry would not help, as this methodology can only supply results for areas covered with water, but a different type of remote sensing method can be used.

For that purpose, Fugro evaluated EOMAP's digital elevation model solution which applies a photogrammetric approach using stereo satellite imagery. It uses two or more very-high-resolution satellite images of 30 to 50 cm spatial resolution, which were recorded with different viewing geometries ideally almost the same time. These images are aligned to each other and correlated to find matches for each pixel in both images. The

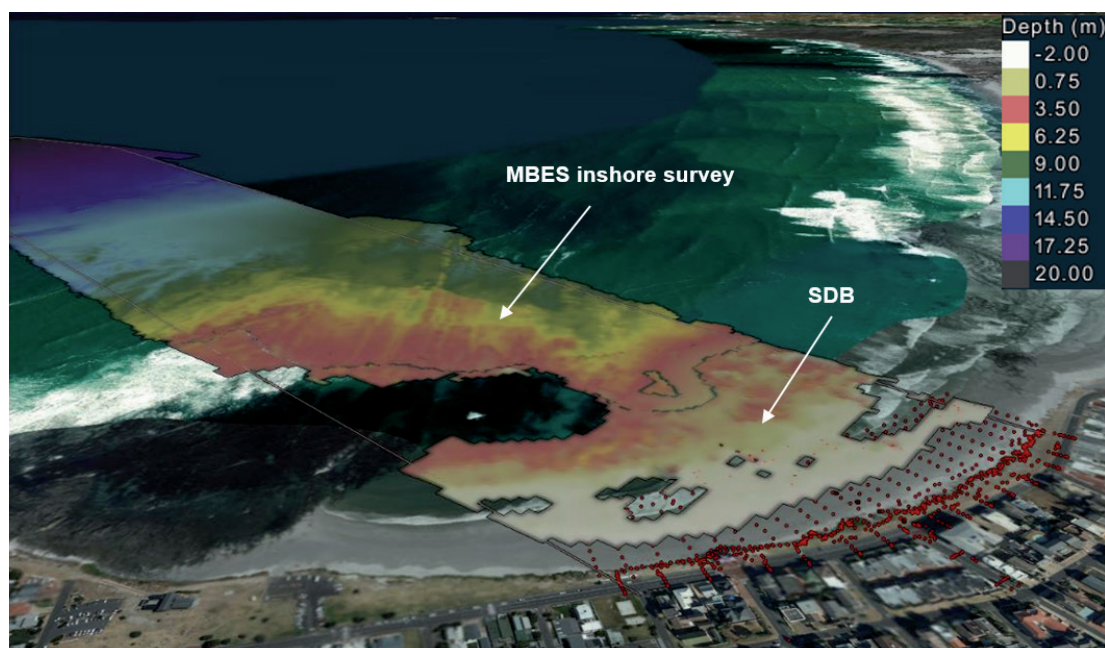


Fig. 3: Landing site showing satellite-derived bathymetry filling the coverage gap between vessel-based bathymetry (colour coded by depth, referenced to Fig. 2) and topographic survey (red dots) (Note: 3D imagery taken from web map server)

generated disparity image is then refined on sub-pixel level. The result is vertically transferred to the required height level by using only three to five control points from site; the result is a digital elevation model which can be exported. Current stereo imagery is taken at 0.3 to 0.5 m spatial resolution, which allows to map digital elevation models of 1 to 2 m spatial resolution.

Coastal monitoring application for the City of Gold Coast

Requirement

The City of Gold Coast is a community in Queensland, Australia, located at the eastern coast, about 70 km south of Brisbane close to the border to New South Wales.

The Council of the City of Gold Coast spends a noticeable amount of effort to maintain and protect especially their beaches, which are prone to coastal erosion due to severe storms as they are exposed to the open ocean without any natural protection. The measures taken contain, amongst others, the nourishment of the beaches, which means delivering additional sand to the beaches to compensate for loss due to erosion and making the beaches more resilient to heavy weather.

As coastal management is an important aspect of the Council of the City of Gold Coast's work, they are especially interested in a monitoring solution providing depth information along their coast in regular and preferably short intervals. This is essential to observe the sand movements along the coast and to possibly predict further threats and

thus be capable to take proactive measures in time. As the satellite-derived bathymetry can offer regular intervals of observation through satellites and a cost-efficient process of deriving depths from the images, it was agreed with Fugro to implement the monitoring using satellite-derived bathymetry for a period of one year with the aim to receive processed depths each month. The project started in July 2019 and has been running for half a year at the time of writing this article; the monitoring is still ongoing.

The area of interest defined comprises a 30 km long section of coast with a width of about 1.7 km to 2.5 km (see Fig. 4).

Project method

Fugro has undertaken an airborne LiDAR bathymetry (ALB) survey covering the complete area with a final resolution of 4 m in July 2019 to act as a base and initial reference for the SDB calculations.

In order to get an initial impression of the reliability that the SDB procedure can offer, a first SDB result was derived from a satellite image taken close to the time the LiDAR data were gathered and using part of the LiDAR data as control points. Due to the shape and position of the area, in fact two images were processed for full coverage. The statistical results of the validation presented a depth determination coefficient of 96 % and 97 % respectively, which shows that the method to derive depths from the satellite images is valid.

Additionally, difference grids comparing the initial SDB data to the LiDAR data were computed, which show a good coincidence with a mean difference of about 0.2 m in depth.

A second initial check was made by comparing vertical profiles of the LiDAR data and the SDB result. These profiles are based on the position of five single-beam data survey profiles the Council of the City of Gold Coast regularly undertakes. Throughout the project these surveys were planned to be repeated in regular intervals and used as the reference control points for the subsequent SDB calculations. Up to now further three times single-beam data surveys were provided by the council.

Fig. 5 shows the position of the profiles, an extract of the first SDB result, colour coded by depth, and the profile section through the central profile comparing LiDAR data (blue) with SDB data (orange). The profile comparison shows a good repeatability. This comparison also shows that the used method of deriving depths based on eOlytics from the satellite images is suitable for SDB.

Once a month the best suitable satellite image is selected and an SDB result is derived based on the latest control point data set available using the software eOlytics SDB. Some further processing needs to be done with respect to evaluating and finalising the result. Areas of the satellite images, where the light is not reflected by the seafloor and thus the

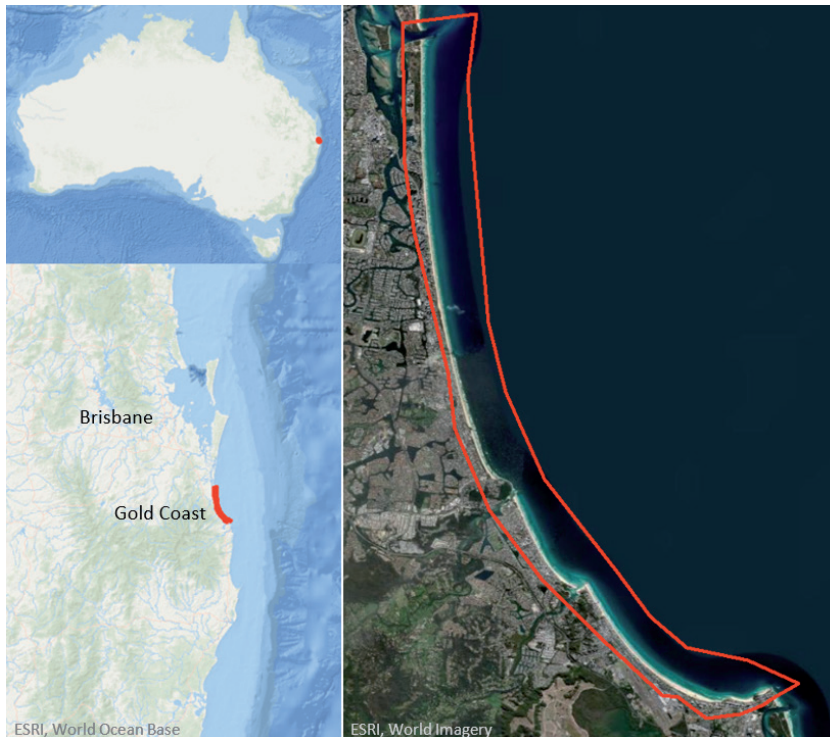


Fig. 4: Area of interest (approximately 30 km length) for coastal monitoring application, City of Gold Coast, Australia

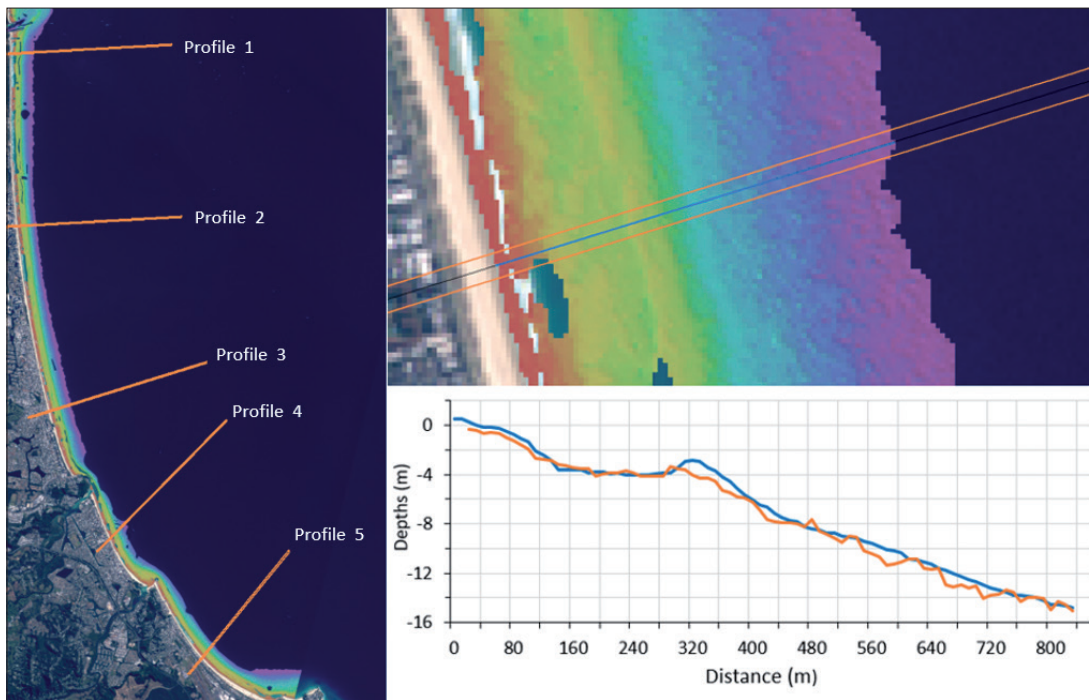


Fig. 5: Position of profiles sections, an extract of the first SDB result colour coded by depth and the profile section through the central profile (profile 3) comparing LiDAR data (blue) with SDB data (orange)

SDB result cannot provide reliable bottom depth values are excluded; additional areas where impact may be given by features that produce a misleading colour on the image are also removed. These are for example created by vessels, waves, which are reflected in bright colours, especially breaking waves reaching up to the beach, and rocky areas, which are reflected in dark colours. These areas are removed from the generated bathymetric grid.

An additional issue is turbidity, caused either from a natural or man-made source. It prevents SDB from giving reliable results, because the sunlight is reflected by the contents within the water column and not by the seafloor. Nevertheless, turbidity influenced regions are, in most cases clearly identified, and thus can also give valuable information about sand movements or currents. Thus, these areas are left within the data set delivered, if deemed suitable, but marked separately.

Deliverables are typically an ASCII-file with positions and depths with 10 m spatial resolution (the resolution of the satellite image), a georeferenced TIFF-file colour coded (RGB) and depth encoded (digital elevation model), the applied satellite images as TIFF-files, the boundaries of the cut-off and turbidity areas in shape-format and a report outlining the current findings.

First results and discussion

The general light penetration throughout the so far investigated satellite images was good. Commencing in July with a maximum achieved depth of up to 15 m which has varied between August and November between 8 m to 10 m and 10 m to 12 m. In

December, due to limited suitable satellite images, only 4 m to 6 m could be reached and unfortunately for January no image at all was deemed to be suitable, while in February the achieved depth range was found to be 8 m to 12 m again.

It became obvious over the months, that the seabed is highly varying, especially movements parallel to the shore line became visible in the difference grids as well as in profiles. These ranged in the first months up to ± 1.5 m in depth and became more significant towards the summer period (December) with depth variations of up to ± 3 m in comparison to the LiDAR survey of July.

The mean depth difference between SDB result and LiDAR surface was found to be 0.2 m in July, representing the initial comparison. In August and September, the difference was with 0.3 m still close to the initial value, and here the first slight coast parallel movements were observed. Within the southern part of the satellite images processed for October turbidity effects caused by incoming waters or activities could be observed and some specific dark features appeared in the water column that are due to their colour detected as deeper than they most probably are. They seemed unreliable but were nevertheless valuable information. The mean difference value for October of 0.5 m includes these features. Within November and December these types of features increased in variable shape and covered larger areas, which could be marked easily by polygons and treated separately, so that a mean difference of SDB result and LiDAR surface without these features of 0.4 m could be determined for November and 0.7 m for December. The latter partly results

from a lower light penetration, but also shows increasing depth differences. There was unfortunately no suitable satellite image found for SDB processing in January, the February result shows some flare like dark features but does not show these coherent areas of dark features anymore.

Fig. 6 and Fig. 7 show one example area covered by these features as a series of satellite images and a series of SDB results from September to December 2019.

Without specific knowledge of the circumstances within the area, it is not possible to interpret the

dark features. At first glance they look like specific turbidity areas but could also be some growing plants or dead organic material waving in the water column. As they might be of interest, data sets with and without these features were delivered.

For one of the five given profiles (profile 4 in Fig. 5) some vertical sections are shown exemplarily for the base survey of July 2019 (ALB) and the SDB results for September and October 2019 and February 2020 in Fig. 8. As can be seen, at a distance from 80 m to 200 m from shore a certain portion of sea floor was lost between July and



Fig. 6: Satellite image example showing dark flared features occurring in the water column between September and December 2019

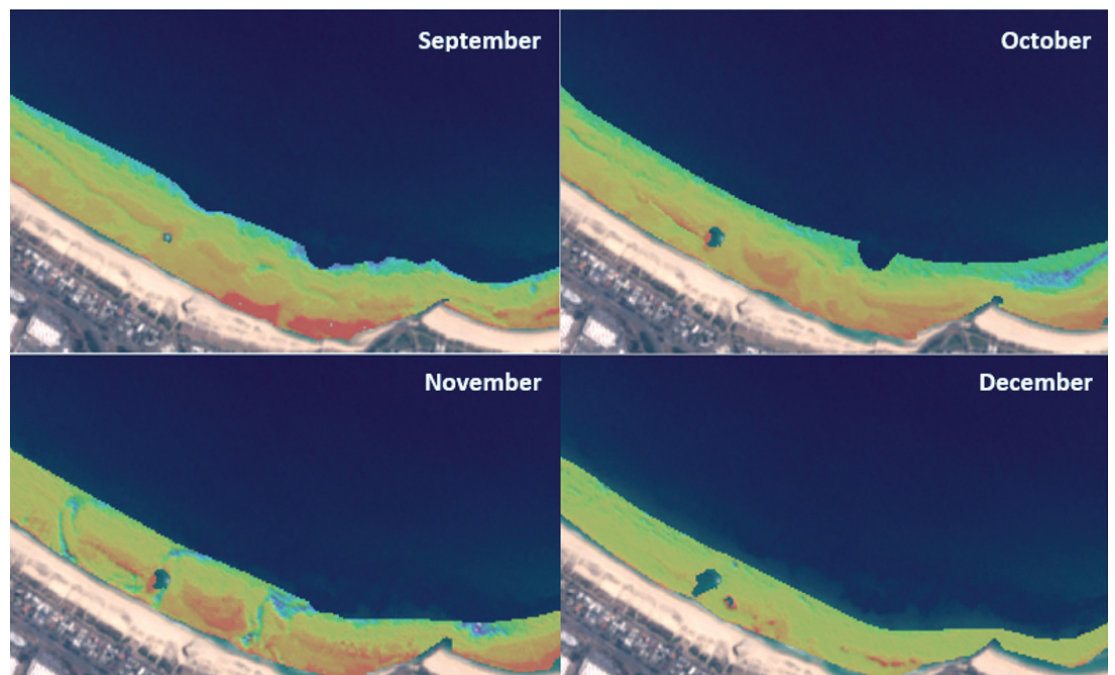


Fig. 7: Satellite-derived bathymetry results (colour coded by depth) of the same example area between September and December 2019

September 2019 and the new profile shape stayed almost stable until the currently latest observation in February 2020; at a distance from 280 m to 440 m from shore there is also a loss to be observed, but here it occurs more gradually, while between 200 m to 280 m from shore the section of February 2020 shows a slight refill compared to July 2019. The losses and fills for this example are summarised in Fig. 9.

Summary, challenges and benefits

The shown example applications demonstrate two already established implementations of the eoLytics SDB software's satellite-derived bathymetry product in coastal areas. It provides depths as a gap filling possibility between vessel-based bathymetric surveys and topographical survey on land at the landfall for a cable route survey and provides monitoring capabilities for coastal zone management. Applications for these two subjects can comprise the following.

For cable route surveys:

- derive full depth coverage from ENC spot data for desktop studies and planning purposes;
- create time series of satellite images or SDB results for planning purposes;
- fill gaps between vessel-based survey and topographic survey;
- extend available single-beam bathymetric survey data to full corridor coverage.

For a coastal zone management requirement:

- derive bathymetric results in a regular interval independent of vessel ability for monitoring;
- derive full depth coverage from available single-beam bathymetric survey data;
- present possibilities to calculate fills and losses for specific time ranges;
- visualise appearances in the water column.

There are general challenges to be dealt with, such as the unpredictable weather in the regions where an investigation is planned. This influences the quality of a potential satellite image to be used with respect to cloud coverage, waves, turbidity and white water reaching up to the beach. Limited water clarity and reflectivity of the seabed might result in gaps or limited coverage. When the applied image does not meet optimal conditions, the maximum depth gained might be small, and the accuracy decreases with depth.

A certain portion of uncertainty might be induced within the method, when there is a great time difference between the control points taken as training data and the date of the satellite image, as the seabed might have changed at the position of the control points.

The general horizontal grid resolution of 10 m may be a disadvantage in case a higher resolution

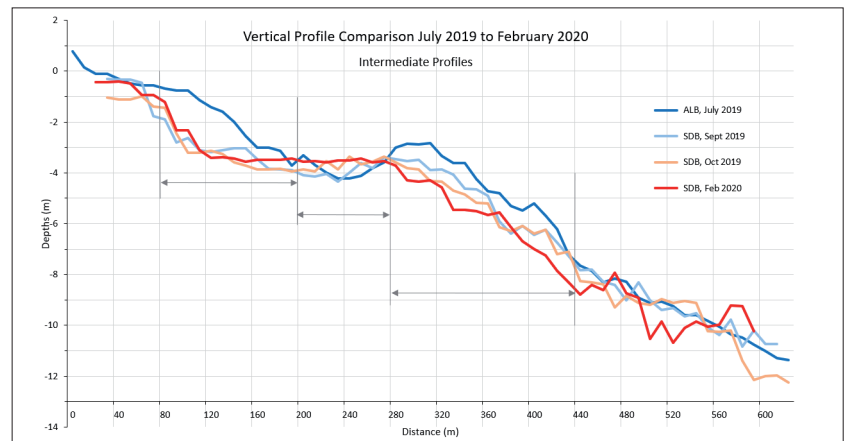


Fig. 8: Vertical profile comparison of ALB survey July 2019 (blue) and SDB result February 2020 (red) with two intermediate profiles indicating the development

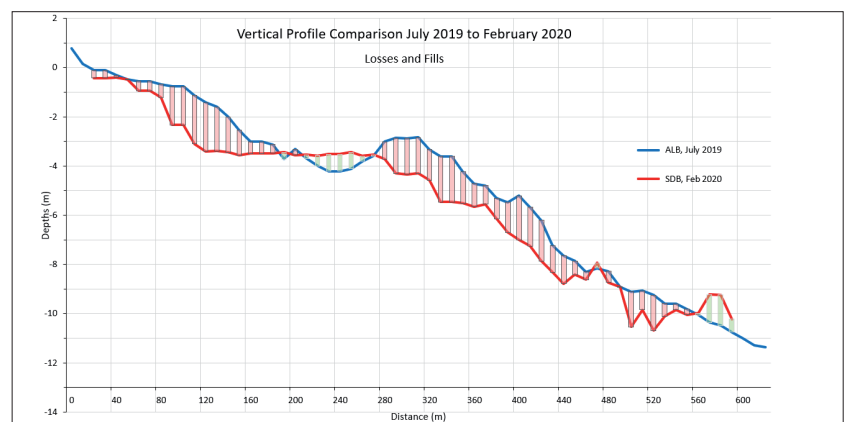


Fig. 9: Vertical profile comparison of ALB survey July 2019 (blue) and SDB result February 2020 (red) losses and fills outlined

result is required. Nevertheless, for more accurate requirements, results from 2 m resolution images could be derived at respective adapted costs.

But when taking the above into account while selecting and processing the satellite images, a reliable result for the respective requirement is possible in most cases. The benefits are numerous:

- There is no logistical effort to be spent and the satellite images in the above described approach are available for free, the solution is generated at low costs.
- The processing procedure is easy to apply.
- As satellite images are available with global coverage, all required regions can be served.
- Global coverage provides access to remote regions, which might be logistically difficult to reach.
- Global coverage provides access to regions which might be reached only at risk, so risk is reduced.

As the described approach is rather new other solutions are under investigation and further developments of the eoLytics SDB software are expected. The above demonstrates that there is major potential in the use of SDB which Fugro Germany Marine and EOMAP are willing to explore. //

Hydrographic remote sensing made in Germany

An article by *KNUT HARTMANN* and *THOMAS HEEGE*

What links hydrography and remote sensing? What has been developed and integrated in practice? This article addresses these issues with a core focus on the German contribution to hydrographic remote sensing (HRS).

HRS – hydrographic remote sensing | earth observation | SDB – satellite-derived bathymetry
Hydrographische Fernerkundung | Erdbeobachtung | SDB

Was verbindet Hydrographie und Fernerkundung? Welche Möglichkeiten ergeben sich und wie wurden diese bisher umgesetzt? Dies sind die Themen dieses Artikels – mit einem Fokus auf den deutschen Beitrag zur Hydrographischen Fernerkundung.

Authors

Dr. Knut Hartmann is COO at EOMAP in Seefeld, Germany.
Dr. Thomas Heege is CEO at EOMAP.

hartmann@eomap.de

Some definitions first

One may argue that remote mapping the seabed and other ocean parameters is a standard procedure to surveyors and hydrographers. The mapping of seabed by acoustic methods or airborne LiDAR can be seen as such remote mapping, as they survey depths and seafloor properties from a distance. However, these methods still require physical presence of equipment and staff at the survey area. A new level of »remoteness« is achieved if the altitude of the sensor platform is increased significantly, by satellite-mounted sensors orbiting the Earth at approximately 750 km altitude. Since the launch of the US Landsat program in the early 70s satellite remote sensing often stands synonymous for remote sensing – or Earth Observation – and will be used in this article in this way. Nowadays there are numerous satellites of various specifications and designed for multiple needs, from communication to positioning. Remote sensing uses those sensors, which have the ability to actively or passively record the composition of the media between sensor and surface. In other words, to record the properties of the earth surface or atmosphere. Most of the HRS applications use data from sensors which either record the returned reflectance of the sunlight (passive sensors), or actively emit a signal and measure its return (active sensors). Generally, the concept of satellite remote sensing has the big benefit to map extended areas without the need to mobilise equipment and staff, and the disadvantage of high requirements on data analytics to correct for quite a lot of environmental error sources.

The hydrographic remote sensing history in a nutshell

The origins of hydrographic remote sensing may date back to the early 70s when researchers first

visually identified patterns and shoals from the first satellite imagery. However, it took almost two decades before satellite-derived information found its way into hydrographic applications. In the mid 80s the French Hydrographic Office SHOM digitised shoals from satellite data and integrated those into nautical charts, known as »spatiocartes«, which represents the beginning of hydrographic remote sensing. At that time satellite sensors, computational power and also analytical algorithms were not made to upscale the process and must be considered as crude compared to modern standards (Fig. 1). It required the continuous, iterative improvement and R&D breakthroughs on all these aspects to achieve impactful progress on hydrographic remote sensing. The developments on physics-based shallow water mapping in Germany started in 1998, at the German Aerospace Center (DLR) with Thomas Heege as research scientist, and few years later in Australia with Magnus Wettle at CSIRO.

It took then until 2014 before the UK Hydrographic Office (UKHO) integrated satellite-derived bathymetric information in British Admiralty charts of southern Antigua, almost three decades after the first spatiocartes were published. In many respects this was a milestone in HRS. It was the first time that quantitative bathymetric information from satellites, known as satellite-derived bathymetry (SDB; cf. Hartmann et al. 2017), was integrated into charts and the satellite-derived survey was embedded into a combined survey strategy with acoustic surveys. The hydrographers showcased that this integrated survey concept increases survey efficiency and supports the safety of navigation. More recently this concept was taken up to map the Pacific states of Tuvalu and by the New Zealand Hydrographic Office (LINZ) to update charts on Tonga. In parallel satellite-derived bathymetric information

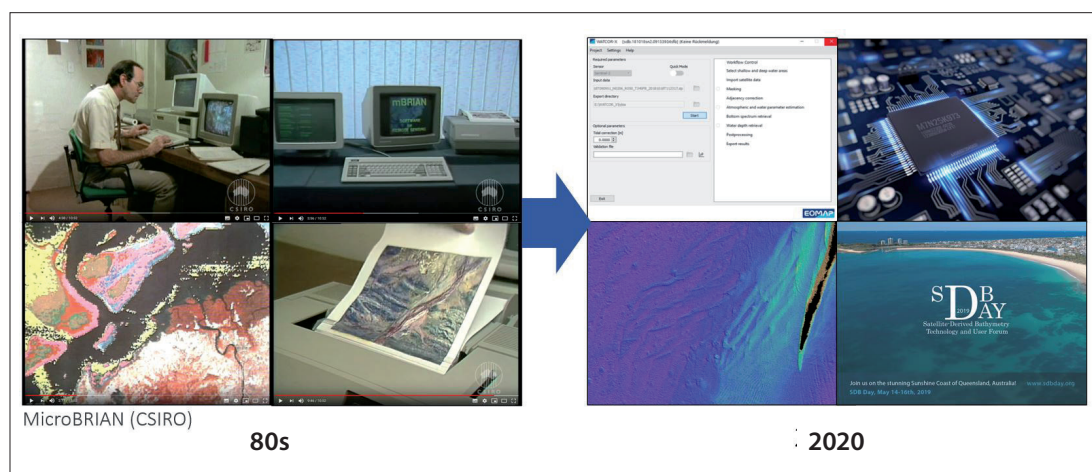


Fig. 1: Time-lapse of the development of hydrographic remote sensing. In the early 80s satellite data were analysed with intense man power efforts and required the best processing capacities which were available at that time. Nowadays analyses are done in operational software workflows with processes being directed to graphic cards and cloud environments. Dedicated conferences deal with this former niche topic of hydrographic remote sensing and data are integrated in different hydrographic and related applications

found its way to different applications, which are outside the standard domain of hydrographic applications. The data are being used by survey and offshore industry in almost daily use, and found in the harmonised European bathymetric grid of EMODnet bathymetry and the global grid of GEBCO. In all these mentioned projects – except the SHOM spatiocartes – the evolving German expertise, with intense involvement of EOMAP, played a major role. Without systematic long-term developments, the current status of hydrographic remote sensing would be different.

Quo vadis hydrographic remote sensing?

As shown, the development of hydrographic remote sensing was initially slow but had an almost exponential increase of R&D progress and data uptake. Other concepts and products have been developed in the last years which contribute to the hydrographic knowledge as well. To name only a few:

- The German Aerospace Centre in Bremen developed solutions to measure wave height from radar satellite data for nearshore sites.

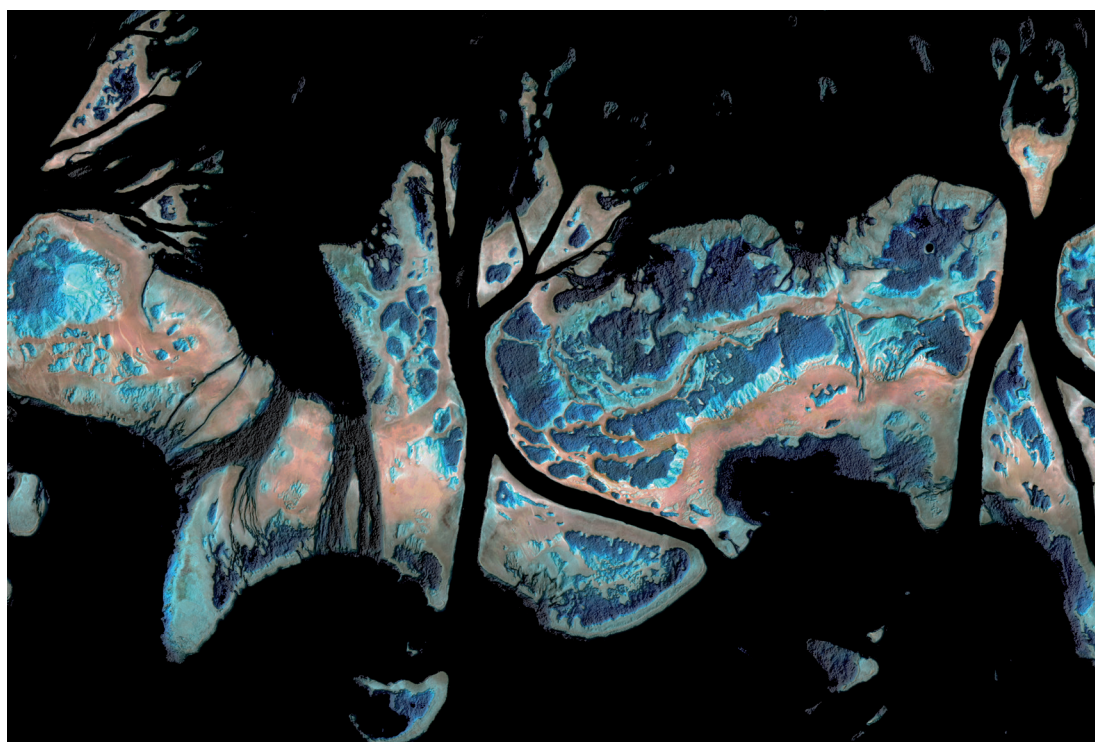


Fig. 2: A small subset of the Great Barrier Reef mapped by satellite data. The brownish areas represent reef crests and plateaus with the blueish colours deeper areas of the atolls which are mainly dominated by coral rubble and sandy bottom. The satellite-derived bathymetric data are shown as hillshaded effects



Image courtesy: EOMAP GmbH & Co. KG, 2020

Fig. 3: Combining drone- and satellite-analysis for mapping shallow water environments. The example shows an area of approximately 250 × 250 m in Belize and represents depth at 9 cm spatial resolution overlaid with a real-colour image which shows the different seafloor types from bright sand to coral and hardbottom areas (top left) to sparse to dense seagrass areas (lower right and centre)

- Deltares in the Netherlands published a global analysis on shoreline dynamic using optical satellite data.
- In Australia the habitat and morphology of the world's largest reef system, the Great Barrier Reef which comprises approximately 10 % of the global corals, was mapped in high detail for the first time (Wettle 2019) (see Fig. 2).
- The German Baltic of Schleswig-Holstein made use of the same concept to map the benthic environment (Hartmann et al. 2019).
- The mapping of satellite-derived global water quality parameters was released in 2019 (UN-ESCO 2018; SDG6 2020).
- Drift and Noise, based in Bremen, provides satellite-derived ice information to increase efficiency and safety of navigation in higher latitudes.

So, what is next? We believe that the cycle of improvement on sensor technology, processing capacities and algorithm developments will continue, and lead to further significant improvements and also increased integration of all those into workflows of the hydrographic community. To name just a few examples, current activities of EOMAP focus on developing integrated survey concepts of autonomous underwater vehicles and satellite-derived bathymetric data (Syrius project, co-funded by the European Space Agency), and to transfer and combine the strengths of satellite-data analysis with airborne drones (see Fig. 3).

Again, we see Germany well positioned with those developments. Thanks to the innovation co-funding of Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructures, current activities are focusing on multi-temporal data processing on FGPA (field programmable gate arrays) and graphic cards (SDB2030 project) to reduce uncertainties

and upscale the complex data analysis of satellite-derived aquatic information, or the integration of satellite-derived information in hydrographic practice, which was addressed in the MARSAT project.

With respect to new satellite capabilities we see potential in the current and future micro satellite fleets which are equipped with radar and optical sensors. Those constellations allow multiple recordings per day and if combined with programmatic interfaces will have their strength in improving the knowledge, especially for maritime surveillance. Furthermore, the recent US satellite IceSat 2 supports the satellite bathymetric mapping. It holds a green photon-counting LiDAR with a 10 kHz pulse repetition rate, which records the earth in regular but sparse tracks. Although the instrument was not intended for bathymetric analysis, the data can be used in this way and – in combination with satellite-derived bathymetric data from multispectral information – allow a further improvement of the mapping and surveying from space (Fig. 4).

And last but not least, next to various commercial satellite providers which will launch satellites in the next years, also the European Space Agency will double the number of its very impactful multispectral Sentinel-2 satellites from two to four in the next years. All that leads to the fact that the amount of satellite remote sensing data continuously increases. But satellite data are worthless without the capability to analyse them and bring them into value. Thus, with respect to new algorithm packages and data integration we see recent and future advances in increasingly automatic analysis of satellite data for the offshore industry and hydrographic entities. We believe that this trend will continue and, thanks to decades of sound algorithm developments, the hydrographic

»Die Communitys zueinander bringen«

Ein Wissenschaftsgespräch mit GOTTFRIED MANDLBURGER

Dr. Gottfried Mandlbürger ist Senior Researcher an der TU Wien und weltweit anerkannter Experte für Laserbathymetrie. Er leitet den Arbeitskreis Hydrographie/Bathymetrie der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF). Im Interview verwendet Mandlbürger ein ungewöhnliches Wort, er spricht von »Sonarhydrographie«, um den Unterschied zur Laserbathymetrie deutlich zu machen.

Fernerkundung | Laserbathymetrie | topo-bathymetrisches System | UAV | Footprint | Waveform-Stacking
remote sensing | laser bathymetry | topo-bathymetric system | UAV | footprint | waveform stacking

Dr. Gottfried Mandlbürger is a Senior Researcher at TU Wien and an internationally recognised expert in laser bathymetry. He heads the Hydrography/Bathymetry working group of the German Society for Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation (DGPF). In the interview, Mandlbürger uses an unusual word, he speaks of »sonar hydrography« to emphasise the difference to laser bathymetry.

Interviewer

Das Interview mit Gottfried Mandlbürger führten Lars Schiller und Patrick Westfeld am 9. April per Videotelefonie.

Textbearbeitung: Lars Schiller

Laserbathymetrie ordnen wir alle klar der Fernerkundung zu. Manche Kollegen zählen freilich auch die Echolotung zu den Fernerkundungsmethoden, weil die Messung berührungslos erfolgt. Wann sprechen Sie von Fernerkundung?

Meinem Verständnis nach sind tatsächlich sowohl die »Sonarhydrographie« als auch die Laserbathymetrie Fernerkundungsmethoden, eben weil wir das Objekt, das wir vermessen, nicht betreten. Ob mit Schall oder Licht, wir vermessen den Gewässergrund aus der Ferne. Dahingegen rechne ich die terrestrische Vermessung mit einer Totalstation oder mit einem GPS-Receiver nicht zu den Fernerkundungsmethoden, weil wir mit der Antenne oder dem Reflektorstab zum Objekt gehen müssen. Man könnte es natürlich auch anders sehen: Die Vermessung mit Sonarmethoden findet im selben Medium statt, nämlich im Wasser, und daher ist es keine Fernerkundung.

Das würde zu der Sicht passen, dass die Vermessung an Land, die ausschließlich im Medium Luft stattfindet, auch nicht der Fernerkundung zuzurechnen ist. Fernerkundung wäre dann alles, was aus größeren Höhen, von Satelliten aus erfolgt.

Mir gefällt diese Grenzziehung nicht. Das Kriterium, ob ein Medium oder zwei Medien, taugt nicht für die Kategorisierung, ob Fernerkundung oder nicht. Dann kommen wir zu den generellen Unterschieden zwischen den Messmethoden – akustisch versus optisch.

Im Grunde haben wir es bei der Laserbathymetrie und bei der Sonarvermessung mit sehr ähnlichen Messprozessen zu tun. Da gibt es einen Emitter, der ein Signal aussendet, das durch ein Medium propagiert, dann reflektiert, zurückgestreut wird. Und da gibt es einen Sensor, einen Detektor, der das Signal wieder auffängt. Gemessen wird die Laufzeit zwischen dem Aussenden und dem Empfangen. Der Unterschied besteht darin, dass wir es

bei Sonarverfahren mit Schallimpulsen zu tun haben, wohingegen es bei Laserbathymetrie Lichtimpulse sind. Das prinzipielle Konzept hingegen ist doch sehr ähnlich. Es kommt darauf an, die Plattform zu kennen, deren Position und Raumstellung sowie die Abstrahlrichtung des Signals.

Bei so vielen Gemeinsamkeiten ist es doch eigentlich verwunderlich, dass die Communitys so unterschiedlich sind; auf der einen Seite die Hydrographen, die vom Schiff aus mit dem Echolot vermessen, auf der anderen Seite die Leute mit ihren Laserscannern, die sich plötzlich auch für die Gewässer interessieren.

Stimmt, die beiden Communitys sind doch relativ distinkt. Es ist genau mein Ziel, diese beiden Communitys ein bisschen näher zueinander bringen. Als Arbeitskreisleiter der DGPF möchte ich die Gemeinsamkeiten sichtbar machen und die Protagonisten an einen Tisch bringen.

Sowohl beim Laserscanning als auch bei den Sonarverfahren, sagten Sie, muss die Abstrahlrichtung bekannt sein. Ist es beim Sonar-Imaging nicht ein gerichtetes Hören, eher vergleichbar mit der Ableitung von Geometrien aus Bildern? Bestimmt wird doch die Einfallsrichtung, nicht die Abstrahlrichtung.

Das ist ein berechtigter Einwand. Beim Sonar gibt es ausschließlich richtungsabhängige Detektoren, beim Laserscanning im konventionellen Sinn eben nicht. Da gibt es vielmehr eine Ein-Emitter-und-ein-Detektor-Konfiguration. Ich habe aber ein Gegenbeispiel, und zwar die Neuentwicklung des Single-Photon-LiDAR. Wir sprechen hier von äußerst empfindlichen Detektoren. Dieses System ist von Sigma Space entwickelt worden, wurde dann von Leica gekauft, jetzt wird es als SPL100 vermarktet. Eigentlich handelt es sich um einen topographischen Sensor, allerdings hat er bathymetrische Eigenschaften. Denn er verwendet die

grüne Wellenlänge von 532 Nanometern, die bekanntlich wasserdurchdringend ist. Und das Gerät sendet in einem konstanten Abstrahlwinkel von 15 Grad aus. Ich glaube, dieses System lässt sich gut mit Sonarverfahren vergleichen. Der ausgesendete Einzelimpuls wird nämlich in zehn mal zehn Teilimpulse aufgeteilt. Das hat schon Ähnlichkeit mit dem Sonarprinzip. Beim Fächerecholot wird weiter gestreut, beim Single-Photon-LiDAR ist der Kegel immer noch sehr eng. Aber es sind zehn mal zehn Einzelstrahlen, und diesen zehn mal zehn Einzelstrahlen entsprechen tatsächlich auch hundert verschiedene Detektoren. Diese hundert individuellen Detektoren sind sehr stark richtungsabhängig, sonst würde ja der Kanal 25 die Antwort empfangen, die für den Kanal 35 bestimmt ist, was eben nicht sein soll.

Was ist schneller, Laserbathymetrie oder Fächerecholot?

Die Frage lässt sich unterschiedlich beantworten. Man kann die Anzahl der Punkte pro Sekunde betrachten. In der Laserbathymetrie liegt die Scanrate im Flachwasserbereich bei etwa 550 Kilohertz, also bei 550 000 Messungen pro Sekunde. Oder aber wir zielen auf die Fläche ab, die sich pro Sekunde vermessen lässt. Das ist wahrscheinlich sogar die bessere Herangehensweise. Laserbathymetrie ist unabhängig von der Wassertiefe, weil der Abstand des Flugzeugs über Grund die Streifenbreite bedingt. Beim Fächerecholot hingegen ist die Schwadbreite direkt von der Wassertiefe abhängig. Und damit ist auch die Effizienz der Messmethode im Hinblick auf die Flächenleistung abhängig von der Wassertiefe. Das ist schon ein wesentlicher Unterschied zwischen Laserbathymetrie und »Sonarhydrographie«. Einschränkend muss natürlich gesagt werden, dass die Laserbathymetrie nur so lange im Vorteil ist, wie mit ihr der Untergrund überhaupt vermessen werden kann. Bei Laserbathymetrie können wir mit Tiefwassersystemen bis zur dreifachen Secchi-Tiefe Echos vom Boden erwarten. Weil wir im optischen Regime sind, ist die Strahldämpfung sehr viel stärker als bei Sonar.

Das Wasser muss also möglichst klar sein, ungetrübt, dann kann man bei drei Secchi-Tiefen vielleicht 60, vielleicht 75 Meter tief messen. Das ist noch nicht wirklich tief – Hydrographen denken bei Tiefwasser eher an 4000 Meter und mehr.

Mit den Termini muss man ein wenig aufpassen. In der Laserbathymetrie bezeichnet man die eingesetzten Kanäle entweder als Deep-Water-Channel oder als Shallow-Water-Channel. Die Flachwasserkanäle liefern einfache bis anderthalbfache Secchi-Tiefe, die Tiefwasserkanäle etwa die dreifache Secchi-Tiefe. Tief ist also mehr als anderthalb Secchi-Tiefen. Welcher Tiefe das in Metern entspricht, hängt von der Trübung ab. Aber, ja, selbst ein Deep-Water-Channel ist nur tief in Bezug auf die Möglichkeiten der Laserbathymetrie, die klar auf Flachwasser beschränkt ist.



Dr. Gottfried Mandlbürger, 50,
im Hintergrund die Pielach

Foto: privat

Um diese dreifache Secchi-Tiefe überhaupt zu erreichen, braucht man entsprechend viel Laserenergie.

Ja, nur leider kann man die Laserenergie in der Praxis nicht beliebig erhöhen.

Sie meinen, weil es sonst für die Augen gefährlich wird?

Ganz genau, es geht um Augensicherheit. Wir haben es mit grüner Wellenlänge zu tun, also mit sichtbarem Licht. Diese Wellenlänge dringt gut durch Wasser. Allerdings besteht auch unser Auge zu einem hohen Prozentsatz aus Wasser. Was das Wasser gut durchdringt, durchdringt demnach auch das Auge gut. Wir müssen daher vonseiten der Sensorik sicherstellen, dass wir im augensicheren Bereich operieren.

Der Laserstrahl darf also nicht allzu stark gebündelt sein.

Wenn ein Mensch unter einem Sensor steht und genau in die Strahlrichtung schaut, darf nicht die gesamte Laserenergie, die emittiert wird, in sein Auge treffen. Vielmehr muss der Strahlkegel vor allem bei Deep-Bathy-Systemen aufgeweitet sein, sodass der Laserfootprint entsprechend groß ist. Allerdings beeinflusst die Strahldivergenz direkt die räumliche Auflösung. Bei den Tiefwasserkanälen liegt sie zwischen 5 und 7 mrad. Bei einer ty-

pischen Flughöhe von 500 Metern entspricht das einer räumlichen Auflösung von – im besten Fall – dreieinhalb Metern.

An der Wasseroberfläche. Was passiert mit dem Laserstrahl, sobald er auf das Wasser trifft?

Zunächst gibt es Reflexion an der Wasseroberfläche. In der Wassersäule haben wir es mit Scattering, also mit Streuungseffekten zu tun. Der Laserstrahl weitet sich konisch auf. Je tiefer das Gewässer ist, desto breiter wird der Laserstrahl. Bei den Tiefwassersystemen beleuchten wir bei einer Tiefe von mehr als 20 Metern gut und gerne einen Footprint von zehn bis 15 Metern.

Wie viel genauer sind die Flachwassersysteme?

Alle gängigen Laserbathymetriesensoren erfüllen die Anforderungen der IHO. Da sprechen wir von Höhengenaugigkeit von besser als 30 Zentimeter. Aber wenn wir Genauigkeit sagen, dann spielt auch räumliches Auflösungsvermögen eine Rolle. Die topo-bathymetrischen Systeme sind ja nicht nur geeignet, das Wasser zu durchdringen und den überströmten Gewässergrund zu erfassen, sondern wir erfassen mit ihnen natürlich auch Ziele an Land, die küstennahen oder ufernahen Bereiche. Sinnvoll ist das erst bei einer viel höheren räumlichen Auflösung. Dazu müssen die Flachwassersysteme eine viel geringere Strahldivergenz

RIEGL VQ-840-G

TOPO-BATHYMETRISCHER LASERSCANNER



- ideal für die Datenaufnahme von UAVs oder Helikoptern aus
- grüner Laserstrahl mit mehr als 2 Secchi Tiefen Wasserdurchdringung
- Messrate bis zu 200 kHz, Scangeschwindigkeit bis zu 100 Scans/Sek.
- Integration einer hochauflösenden Digitalkamera sowie andere Optionen möglich

UAV-BASIERTE VERMESSUNG VON
KÜSTENGEBIETEN UND FLACHWASSERZONEN



QR-Code
scannen und
RIEGL VQ-840-G
Video ansehen!

www.riegl.com

Weitere topo-bathymetrische Laserscanner
und Systeme finden Sie auf www.riegl.com

[f](#) [t](#) [in](#) [w](#) [y](#) [t](#) [v](#) [n](#) [e](#) [w](#) [s](#) [t](#) [r](#) [o](#) [o](#) [m](#) [.riegl.international](#)



haben, wir sprechen von etwa 1 mrad. Bei 500 Metern Flughöhe ist der Footprint gerade mal 50 Zentimeter groß. Außerdem zeichnen sich die Systeme durch eine wesentlich höhere Taktfrequenz aus, die Pulsrepetitionsrate, die im Wesentlichen auch die effektive Scanrate und den Punktabstand mit bedingt. Die Taktraten liegen zwischen etwa 100 und 700 Kilohertz. Bei einer typischen Fluggeschwindigkeit, die bei 100 Knoten liegt, also bei 50 Metern pro Sekunde, ergibt das gut und gerne 20 Punkte pro Quadratmeter.

Das entspricht einem Punktabstand von etwa 25 Zentimetern.

Theoretisch können wir diesen Punktabstand erwarten. Dennoch dürfen wir die räumliche Auflösung nicht mit 25 Zentimetern ansetzen. Denn der Footprint liegt bei 50 Zentimetern. Was immer das größere ist – Punktabstand oder Footprint –, bedingt die räumliche Auflösung. Dennoch kann man sagen, dass die Flachwassersensoren die Oberfläche etwa um eine Größenordnung feiner abtasten als die Deep-Bathy-Sensoren.

Um genauer zu werden, kann man doch einfach niedriger fliegen, dann wird der Footprint kleiner, oder?

Genau das machen wir mittlerweile mit Laserbathymetrie vom UAV aus. Dank der Miniaturisierung der Sensoren ist das möglich geworden. Die typische Flughöhe von UAVs liegt bei 50 Metern. Damit kommen wir dem Objekt viel näher. Der Footprint liegt bei nur noch 5 bis 10 Zentimetern. Die Punktdichte steigt auf durchaus 100 Punkte pro Quadratmeter.

Mit UAVs wird Laserbathymetrie nicht nur genauer, sondern doch wahrscheinlich auch noch günstiger?

Die Kosten von Laserscanning sind per se nicht sehr hoch – auch bei einem bemannten Flug –, aber nur dann, wenn man große Flächen erfasst. Bei kleinen Messgebieten, zum Beispiel weniger als ein Quadratkilometer, sind die Kosten exorbitant. Da haben die agilen UAV-Plattformen einen großen Vorteil. Es kostet wesentlich weniger, das Ding in die Luft zu bekommen. Für die Erfassung kleinerer Fließgewässer ist das UAV genau die richtige Plattform. Flüsse, die zehn Meter, maximal 50 Meter breit sind, können wir gut aus einer Flughöhe von 50 bis 100 Meter erfassen. Gleichzeitig haben wir den massiven Vorteil der sehr viel größeren räumlichen Auflösung und eben der geringen Mobilisierungskosten.

Die topo-bathymetrischen Systeme messen sowohl unter Wasser als auch an Land. Das ist ja besonders interessant, wenn es darum geht, die Grenzen der Gewässer zu bestimmen. Mit Laserbathymetrie kann der schmale Streifen an Land, der den Übergang vom Wasser zum Land markiert, ganz leicht vermessen werden. Ist das die Methode der Wahl, sollten Hydrographen mehr von der Luft aus vermessen?

Ich persönlich betrachte Laserbathymetrie und »Sonarhydrographie« als synergetische Messmethoden, die sich durch ihre jeweiligen Vorteile gut ergänzen. Mit topo-bathymetrischen Systemen kann der Übergang zwischen dem trockenen und dem nassen Bereich wirklich nahtlos vermessen werden. Im besten Fall lässt sich mit nur einer Mission das gesamte Interessensgebiet erfassen. Wenn das Gewässer tiefer ist, benötigt man zusätzlich ein Boot, um auch den mit optischen Methoden nicht erfassbaren Bereich zu vermessen. Immerhin ermöglicht es die Laserbathymetrie, den relativ flachen Bereich zu erfassen, der sich mit Sonarmethoden nur schwer oder gar nicht erreichen lässt, weil das Boot nicht nah genug

»Laserbathymetrie und »Sonarhydrographie« sind synergetische Messmethoden, die sich durch ihre jeweiligen Vorteile gut ergänzen«

Dr. Gottfried Mandlbürger

ans Ufer herankommt. Ich sehe dieses Tandem durchaus schon in der Praxis verankert, bei der Vermessung von Bühnenfeldern zum Beispiel – allerdings noch zu wenig institutionalisiert.

Können denn auch die Fahrrinnen der großen Flüsse mit Laserbathymetrie vermessen werden?

Die schiffbaren Flüsse haben meist eine hohe Sedimentfracht, das trübe Wasser verhindert die vollständige Erfassung des Gewässerbetts mit Hilfe von Laserbathymetrie. Es gibt aber einen Präzedenzfall. 2018 gab es im Auftrag des WSA Dresden eine Gesamtbefliegung der Elbe, damals wurde das extreme Niedrigwasser ausgenutzt. Das Wasser stand so niedrig, dass in vielen Bereichen keine geregelte Schifffahrt mehr möglich war. Dadurch konnte ein sehr großer Teil des gesamten benetzten Bereichs erfasst werden. Doch das war eine Ausnahme. Ich gehe davon aus, dass die großen Wasserstraßen wie Donau und Rhein nie und nimmer an den tiefsten Stellen mit Laserbathymetrie erfasst werden können. Hier brauchen wir für die Vermessung der Fahrrinne ergänzend die Echolote.

Wird es eines Tages doch möglich sein, tiefer zu kommen, trotz Trübung und im Einklang mit der Augensicherheit?

Nur bei absolut idealen Messbedingungen, aber das ist selten der Fall und lässt sich schwer kalkulieren. Vielversprechender ist es, die Auswertestrategie zu verbessern. Momentan wird ein Ansatz wissenschaftlich verfolgt, das sogenannte Waveform-Stacking. Beim Waveform-Stacking werden räumlich benachbarte Wellenformen zusammengefasst, quasi aufsummiert zu einem Summensignal. Damit verringert sich zwar die räumliche Auflösung, aber wir verbessern das Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Und das ermöglicht es, tendenziell noch tiefer zu messen. Das Potenzial liegt im Bereich von 25 bis 30 Prozent der katalogisierten Messtiefe. Bisher haben die topo-bathymetrischen Systeme alle eine

Tiefenmessperformance von 1,5 Secchi-Tiefen. Durch das Waveform-Stacking kann man eventuell auf ungefähr 1,8 Secchi-Tiefen kommen.

In Venedig ist momentan aufgrund des Corona-Lockdowns das Wasser in den Kanälen schön klar. Man sieht plötzlich bis zum Grund. Sollte man jetzt ganz schnell überall dort messen, wo kein Sediment aufgewühlt wird? Dann könnte man ja auch tiefere Gewässer vermessen.

Wenn nicht der Lockdown wäre, würde ich alle verfügbaren Sensoren in die Luft schicken und

»Bessere Aufnahmen als in den letzten zwei Wochen hatte ich noch nie. Wenn nicht der Lockdown wäre, würde ich alle verfügbaren Sensoren in die Luft schicken.«

Dr. Gottfried Mandlbürger

messen lassen. Das gäbe bestimmt super Aufnahmen. Seit einem Jahr verfolge ich ein Monitoring-Projekt an der Pielach. Dieser voralpine Fluss ist in den letzten Wochen, da es keinen Regen gab und keinen Pollution-Eintrag, so klar, wie ich ihn nie zuvor gesehen habe. In den letzten drei Wochen habe ich den Fluss mehr-

mals mit Zwei-Medien-Photogrammetrie vermessen. Bessere Aufnahmen als in den letzten zwei Wochen hatte ich noch nie.

Es würde sich also wirklich lohnen, alle rauszuschicken. Wie viel Kapazität gäbe es überhaupt?

Es gibt weltweit schätzungsweise ungefähr hundert bis hundertfünfzig topo-bathymetrische Systeme. Dazu kommen vielleicht noch zwanzig Tiefwassersysteme. Diese Systeme sind aber nicht gleich verteilt. In Übersee ist Laserbathymetrie viel stärker etabliert als in Europa.

Warum das?

Ein Grund sind die Hurrikans, die den Küstenstreifen sehr stark in Mitleidenschaft ziehen. Die NOAA ist in den USA dafür zuständig, diese ganzen Bereiche zu erfassen. Zumindest nach den Stürmen gibt es immer wieder Befliegungen. In Amerika, aber auch in Australien ist Laserbathymetrie viel stärker institutionalisiert. Dadurch ist auch die Akzeptanz wesentlich höher. In Europa gibt es – anders als beim topographischen Laserscanning, das absolut etabliert ist – gegenüber dem topo-bathymetrischen Laserscanning einige Vorbehalte. Das sei ja noch nicht ausgereift.

Wie ließe sich topo-bathymetrisches Laserscanning denn beliebter machen?

Es gibt bereits einige Player, die das stark forcieren, zum Beispiel das LKN.SH; in Frankreich ist SHOM sehr progressiv. Um Laserbathymetrie beliebter zu machen, müsste sie nur in den Verfahrensabläufen der behördlichen Institutionen verankert werden – am besten auch bei den Landesvermessungsbehörden. Dann würde auch die Akzeptanz steigen. Es gäbe mehr Datensätze, mehr Know-how, mehr Leute, die sich mit der Technologie beschäftigen.

Das BSH arbeitet derzeit daran, die Laserbathymetrie in den operationellen Wirkbetrieb einzuführen.

Das BSH hat bereits vor einigen Jahren als eine der ersten Institutionen einen großflächigen Test durchgeführt. Damals wurden die verfügbaren Laserbathymetriesysteme in der Kieler Bucht durchgetestet. Genau diese Initiativen brauchen wir.

Lutz Christiansen, der ja bereits seit einiger Zeit Laserbathymetrie wirklich anwendet, beklagt regelmäßig, dass der Markt überschaubar ist. Wenige Firmen bieten Befliegungen als Dienstleistung an.

Das ist ein Henne-Ei-Problem. Sobald Laserbathymetrie institutionalisiert wäre, wie in Amerika, gäbe es auch Dienstleister. Wo ein Markt ist, sind Dienstleister nicht weit.

Neben der Laserbathymetrie gibt es noch andere Fernerkundungsmethoden, mit denen man den Gewässerboden erfassen kann, zum Beispiel die Mehr-Medien-Photogrammetrie.

Optische Bathymetrie hat drei Felder, zum einen das aktive Feld, die Laserbathymetrie, und zum anderen die beiden passiven Felder, die Stereophotogrammetrie und die spektrale Tiefenbestimmung. Mit den optischen passiven Methoden sind wir mit der einfachen Secchi-Tiefe begrenzt.

Wir können nur so tief messen, wie wir sehen. Außerdem braucht es für Photogrammetrie immer Textur. Und wir brauchen in der Stereophotogrammetrie mindestens zwei Messstrahlen, zwei Sichten auf ein und denselben Messpunkt. Weil die Wasseroberfläche aber dynamischer Natur ist, hat sie sich zwischen den beiden Messungen verändert. Das macht die Auswertung der Bilder nicht einfacher. Hinzu kommen die Glanzlichter auf der Wasseroberfläche, immer dann, wenn die Sonnenstrahlen direkt reflektiert werden, gibt es extrem helle Stellen im Bild und man kann diese Pixel nicht zur Auswertung nutzen. Gerade kommt die Technik des Dense Image Matching auf, dabei werden extrem starke Überlappungen verwendet. Bei Überlappungen von 90 Prozent sieht man jeden Punkt zehn Mal. So kleine Basislinien sind natürlich schlecht für die Höhengenaugigkeit, aber man bekommt dadurch eine große Überbestimmung.

Ist Laserbathymetrie ökologisch korrekter als die Vermessung vom Schiff aus?

Die Messung ist kontaktlos, wir müssen das Objekt nicht betreten. Daher kann man sicherlich behaupten, dass Laserbathymetrie eine sehr gute Möglichkeit für die Erfassung von ökologisch sensiblen Bereichen darstellt.

Ist der Einsatz eines Laserscanners unter Wasser sinnvoll, zum Beispiel wenn er auf ein AUV montiert ist?

Die Gruppe um Alex Reiterer am Fraunhofer-Institut in Freiburg arbeitet gerade massiv an einem Unter-Wasser-Laserscanner. Diese Geräte werden wohl weniger für die Vermessung des Untergrundes, sondern viel eher für die Überwachung von Infrastruktur eingesetzt, zum Beispiel beim Monitoring der Fundamente von Offshore-Windrädern oder von Ölplattformen. Wir haben es dann nur

noch mit einem Ein-Medien-Fall zu tun. Im Gegensatz zur luftgestützten Laserbathymetrie, bei der nach dem Aussenden des Pulses einige hundert Nanosekunden vergehen, bis einmal irgendetwas zurückkommt, ist es bei der Laserbathymetrie unter Wasser so, dass sofort die Volumenstreuung zurückkommt. Die Anforderungen an den Receiver sind daher sehr hoch, eigentlich muss man ihn für ein paar Nanosekunden blind schalten, damit er die Rückstreuung aus dem Volumen ignoriert. Das heißt, wir müssen einen Mindestabstand zum Zielobjekt einhalten, wenn wir den Sensor auf unter Wasser autonom fahrende Fahrzeuge montieren.

[Apropos Mindestabstand, gibt es eigentlich eine Mindesttiefe des Wassers für die Laserbathymetrie aus der Luft?](#)

Die topo-bathymetrischen Systeme zeichnen sich durch einen kleinen Footprint aus, aber auch durch einen sehr kurzen Puls von ungefähr 1,5 Nanosekunden. Eine Nanosekunde mal Lichtgeschwindigkeit entspricht in Luft 30 Zentimeter, im Wasser ein bisschen mehr als 20 Zentimeter (75 Prozent). Gehen wir von einer Pluslänge von 30 Zentimetern aus, dann sind wir in der Lage, prinzipiell zwei Ziele voneinander zu unterscheiden, wenn sie den halben Abstand der Pulsdauer haben. Das wären 15 Zentimeter. Rein technologisch sind also

mindestens 15 Zentimeter Wassertiefe gefordert, zumindest wenn wir getrennte Echos von der Wasseroberfläche und vom Gewässergrund bekommen wollen. Bei Systemen, die synchron und kollinear Laserpulse in infraroter und grüner Wellenlänge aussenden, gilt das übrigens nicht. Die detektieren das Wasseroberflächenecho nämlich mit dem Infrarotkanal, den Gewässergrund mit dem grünen Kanal.

[Sie haben in Wien Geodäsie studiert. Wie kamen Sie zum Wasser?](#)

Der Schlüsselfaktor war ein Projekt bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde, das wir 1999 für Herbert Brockmann gemacht haben. Die Wasserbehörden waren damals die treibende Kraft, wenn es um topographisches Laserscanning ging. Die BfG wollte den Umlandbereich von Flüssen erfassen und die Aufnahmen dann mit den Sonaraufnahmen des Gewässerbettes kombinieren. Zunächst ging es um Aufbereitungsalgorithmen von Querprofilen, später auch um die Wasser-Land-Grenzlinienbestimmung und um die Erfassung der Böschungsoberkante. In diese Projekte war ich stark involviert, was dazu geführt hat, dass ich meine Dissertation zu genau diesem Thema geschrieben habe. Das hat mein Interesse am Wasser geweckt. So richtig interessant wurde es für mich,



OBTAIN COMPREHENSIVE HYDROGRAPHIC DATA IN DEEP WATER AND COASTAL REGIONS

We draw on our vast experience and extensive resources, including a fleet of dedicated survey vessels and airborne systems, to deliver a high-quality service that meets your data objectives.

To find out more visit
[fugro.com](https://www.fugro.com)

Bisher erschienen:

Horst Hecht (HN 82),
 Holger Klindt (HN 83),
 Joachim Behrens (HN 84),
 Bernd Jeuken (HN 85),
 Hans Werner Schenke (HN 86),
 Wilhelm Weinrebe (HN 87),
 William Heaps (HN 88),
 Christian Maushake (HN 89),
 Monika Breuch-Moritz (HN 90),
 Dietmar Grünreich (HN 91),
 Peter Gimpel (HN 92),
 Jörg Schimmler (HN 93),
 Delf Egge (HN 94),
 Gunther Braun (HN 95),
 Siegfried Fahrentholz (HN 96),
 Gunther Braun, Delf Egge, Ingo Harre, Horst Hecht, Wolfram Kirchner und Hans-Friedrich Neumann (HN 97),
 Werner und Andres Nicola (HN 98),
 Sören Themann (HN 99),
 Peter Ehlers (HN 100),
 Rob van Ree (HN 101),
 DHyG-Beirat (HN 102),
 Walter Offenborn (HN 103),
 Jens Schneider von Deimling (HN 104),
 Mathias Jonas (HN 105),
 Jürgen Peregovits (HN 106),
 Thomas Dehling (HN 107),
 Egbert Schwarz (HN 108),
 Ingo Hennings (HN 109),
 Harald Sternberg (HN 110),
 Uwe Jenisch (HN 111),
 Petra Mahnke (HN 112),
 Holger Rahlf (HN 113),
 Boris Schulze (HN 114),
 Jacobus Hofstede (HN 115)

als das bathymetrische Laserscanning aufkam und wir das auch in Österreich für die Inlandsgewässer anwenden konnten.

Was sind Ihre Aufgaben an der TU Wien?

Als Senior Researcher liegen meine Aufgaben mehrheitlich in der Forschung und in der Entwicklung. Zudem koordiniere ich ein kleines Team der Softwareentwicklung; zusammen arbeiten wir an einer Laserscanning-Software mit dem Namen OPALS – Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning Data. Dann gibt es noch den Teil der Lehre. Dieser Teil wird nächstes Jahr größer, wenn ich den Part eines Kollegen übernehmen werde, der in Pension geht. Das wird eine Einführungsvorlesung zum Programmieren sein.

Was haben Sie in Stuttgart am Institut für Photogrammetrie gemacht?

Nach Stuttgart bin ich wegen eines DFG-Forschungsprojekts gekommen, das Uwe Sörgel eingeworben hat. Da ging es darum, wie man aus aktiven und passiven Daten, die zeitgleich von Hybridmesssystemen aufgenommen werden, Bathymetrie ableiten kann. 2016 hat er mich gefragt, ob ich jemanden für das Projekt wüsste. Als ich den Projektantrag gelesen habe, bin ich darauf gekommen, dass er wohl mich sucht. Die Integration von aktiven und passiven Sensoren ist genau mein wissenschaftliches Interessensgebiet. Ich bin dann quasi als Post-Doc für insgesamt drei Jahre nach Stuttgart gegangen. In dieser Zeit sind einige Publikationen entstanden. Gerade arbeiten wir an einem abschließenden Artikel, der zeigt, dass es bei der Datenprozessierung Tendenzen hin zu Deep Learning gibt, was sich sehr gut mit spektraler Tiefenbestimmung kombinieren lässt.

Werden den Studierenden in Wien eigentlich Inhalte der Hydrographie vermittelt?

Geodäsie wird in Wien an zwei Standorten unterrichtet. Zum einen gibt es das vollwertige Studium an der Technischen Universität – bislang allerdings ohne Hydrographie. Dann gibt es aber auch die Universität für Bodenkultur, an der der Kollege Erwin Heine unterrichtet. Er ist in Österreich der wissenschaftliche Experte für »Sonarhydrographie«.

Sie selbst erzählen in den Vorlesungen nichts über die Vermessung von Gewässern?

Ich stehe unmittelbar vor der Einreichung meiner Habilitation. Habilitationen haben ja den Vorteil, dass man eigenständig Lehre anbieten kann und Dissertationen begutachten kann. Ich kann mir gut vorstellen, im Rahmen eines künftigen Masterlehrgangs des neuen Fachs Umweltingenieurwesen eine umfassende Vorlesung über Hydrographie zu halten, in der sowohl Sonarverfahren als auch optische Methoden behandelt werden sollen.

Wie oft sind Sie außerhalb des Ungebäudes im Dienst? Nehmen Sie selbst an Messflügen teil?

Ich bin tatsächlich öfters im Außendienst, sitze dann allerdings eher nicht im Flugzeug, sondern organisiere Messkampagnen. Zu einem großen

Teil beschäftige ich mich mit Projekten mit unbemannter Luftfahrt, also mit UAV. Beim UAV-Laserscanning nutzen wir etwas größere Drohnen, da braucht es ein wenig Administration vor Ort. Seit einem Jahr gibt es endlich Systeme für bathymetrisches Laserscanning am UAV. Im August letzten Jahres konnte ich eine Messkampagne mit den RIEGL-Systemen organisieren. Wenn ich draußen bin, geht es auch viel um Ground Truth, also um Kontrollvermessungen, da waten wir noch durch den Fluss oder sitzen in einem Boot, das wir an Seilen halten, um Referenzmessungen mit dem Lotstock vorzunehmen, mit denen wir all unsere laserbathymetrischen oder stereophotogrammetrischen Messungen überprüfen können.

Wir hätten dieses Interview auch über ein ganz anderes Thema führen können – nämlich über Musik. Sie waren Sängerknabe und sind ausgebildeter Chorleiter. Mögen Sie uns einen Einblick geben?

Zwei Seelen wohnen, ach, in meiner Brust. Ich habe lange gehadert, wollte mich nicht entscheiden zwischen Geodäsie und Musik. Als 1995 unser ältester Sohn auf die Welt kam, musste eine Entscheidung her. Seither ist die Geodäsie der Beruf für den Broterwerb. Musik wäre aber eine ernsthaftere Option gewesen. Und ich beschäftige mich bis heute mit ihr. Meine musikalische Ausbildung hat bei den Melker Sängerknaben begonnen, deren Hauptaufgabe die Kirchenmusik ist. Während des Studiums habe ich dann in Chören in Wien gesungen mit Auftritten in den großen Konzerthäusern und dann auch auf der Musikuni eine Chorleiterausbildung absolviert. Das habe ich einige Jahre als Chorleiterassistent der Wiener Singakademie auch semiprofessionell ausgeübt. Mit einem Kollegen habe ich dann im Jahr 2000 ein Vokalensemble gegründet, das ensemble 15.21, das aus acht Sängerinnen und Sängern besteht. Seit 20 Jahren arbeiten wir kontinuierlich zusammen. Spezialisiert haben wir uns auf alte Musik ab dem 15. Jahrhundert, da sprechen wir von Renaissance- und Barock-Musik, und auf zeitgenössische Musik, dafür steht die 21 in unserem Namen

Was würden Sie gerne besser können?

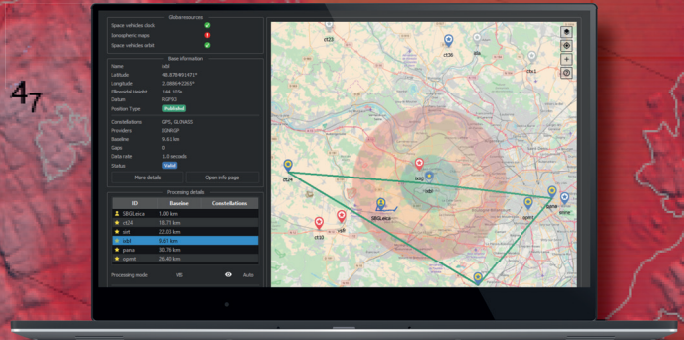
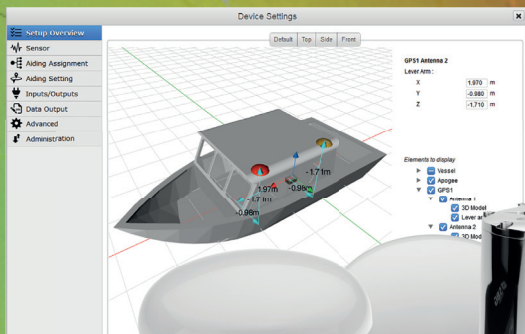
Meine Talente sind ganz eindeutig in der Breite. Frei nach Nietzsche: Man sehnt sich immer nach dem, was man nicht hat. Jemand, der breit aufgestellt ist, sehnt sich nach Tiefe. Ich würde gerne in allen theoretischen Aspekten noch viel tiefer drinstecken. Doch dafür fehlt mir die Zeit.

Was wissen Sie, ohne es beweisen zu können?

Superspannend finde ich die Frage der Fragen über den Ursprung des Lebens. Wann hat alles begonnen? »Warum ist überhaupt Seiendes und nicht vielmehr Nichts?«, wie Heidegger es formuliert hat. Gibt es Gott? Mit diesen Fragen beschäftige ich mich vor allem auch aus naturwissenschaftlicher Perspektive. Jedoch habe ich auf diese Fragen keine Antwort. Was ich aber weiß, ist, dass unserer Welt etwas mehr Empathie gut täte. //

Making Hydrographers' Tasks Easier

Courtesy of CADDEN



Navsight Marine Solution

State-of-the-art Motion & Navigation Solution

Qinertia

The Next Generation INS/GNSS Post-processing Software

OFFICIAL DISTRIBUTOR

MacArtney
UNDERWATER TECHNOLOGY

MacArtney Germany GmbH

Wischhofstrasse 1-3
Geb. 11
D-24148 Kiel
Germany

Phone: +49 431 535500 70
Email: hydro@macartney.com
Web: www.macartney.de



Retrospektive der Meeresspiegel- forschung in Deutschland

Teil 2: Deutsche Ostseeküste

Ein Beitrag von JESSICA KELLN und JÜRGEN JENSEN

In diesem Beitrag werden die beobachteten Meeresspiegeländerungen auf Grundlage von pegelbasierten Wasserstandsmessungen an der deutschen Ostseeküste seit dem 18. Jahrhundert dargestellt. Es werden sowohl die Anfänge der Meeresspiegeluntersuchungen aufgrund von vertikalen Landbewegungen als auch aktuellste Forschungsergebnisse zur Auswertung langzeitlicher Pegelzeitreihen über das 20. Jahrhundert und die Verknüpfung mit Landbewegungsschätzern vorgestellt. Dabei zeigen die Untersuchungen für die Ostsee lineare Trends im Bereich der entsprechenden Ergebnisse für den globalen Meeresspiegelanstieg. Da die Ostsee nur durch die dänische Meerenge mit der Nordsee und dem globalen Ozean verbunden ist, überlagern allerdings zusätzlich lokale Effekte die Meeresspiegelentwicklung.

Meeresspiegel | MSL | Ostsee | Pegeldata | vertikale Landbewegungen
sea level | MSL | Baltic Sea | gauge data | vertical land movements

This paper presents the observed sea level changes based on level-based water level measurements on the German Baltic Sea coast since the 18th century. The beginnings of sea level investigations based on vertical land movements are presented, as well as the latest research results on the evaluation of long-term level time series over the 20th century and the link to land movement estimators. The investigations for the Baltic Sea show linear trends in the range of the corresponding results for global sea level rise. However, since the Baltic Sea is connected to the North Sea and the global ocean only through the Danish Strait, additional local effects overlay the sea level development.

Autoren

Dr.-Ing. Jessica Kelln ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen hat dort den Lehrstuhl für Hydromechanik, Binnen- und Küstenwasserbau inne.

jessica.kelln@uni-siegen.de

Der erste Teil des Beitrags beschäftigte sich mit dem Meeresspiegel an der deutschen Nordseeküste; er ist in Ausgabe 115 erschienen (DOI: 10.23784/HN115-03).

1 Einleitung

Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels (englisch: mean sea level, MSL) verläuft sowohl räumlich als auch zeitlich unterschiedlich. So kann der regionale MSL erheblich von der globalen Entwicklung abweichen, weshalb es notwendig ist, regionale Meeresspiegelstudien durchzuführen und die einzelnen Prozesse, die am Meeresspiegelanstieg beteiligt sind, zu identifizieren. Nachdem sich in der 115. Ausgabe der *Hydrographischen Nachrichten* in Teil 1 der »Retrospektive der Meeresspiegel-forschung in Deutschland« mit der Nordsee befasst wurde (Jensen 2020), liegt der Fokus dieses Beitrages nun auf der Ostsee. Durch den limitierten Wasseraustausch mit der Nordsee bzw. dem Nordatlantik und die große Beeinflussung durch Frischwassereinträge wird die Ostsee als ein eher isoliertes Gebiet betrachtet und gilt somit als nicht repräsentativ für globale Meeresspiegelentwicklungen (Jevrejeva et al. 2014). Diese Einschätzung ist allerdings auf die relative Meeresspiegelentwicklung bezogen, die in der Ostsee hochgradig durch vertikale Landbewegungen beeinflusst wird (Kelln 2019). Führböter und Jensen (1985) betrachten im Gegensatz dazu die Ostsee als gedämpften

Pegel der Nordsee bzw. des Atlantiks/Weltozeans. Dies zeigt sich im Wesentlichen in den sehr viel kleineren Gezeitenamplituden als in der Nordsee, da diese durch die dänische Meerenge gedämpft werden. Dennoch zeigt der mittlere Meeresspiegel in der Ostsee eine sehr hohe Variabilität, die auf die Beeinflussung lokaler Effekte (insbesondere meteorologische Effekte durch Wind und Luftdruckänderungen) zurückzuführen ist.

Untersuchungen der Meeresspiegelentwicklung in der Ostsee reichen bis weit in die Wikingerzeit zurück (etwa 793 bis 1066 n. Chr.; Worsaae 1873). Dies ist vor allem darin begründet, dass die Ostsee eine geologische Besonderheit aufweist, die schon in der Vergangenheit und auch heute noch zu beobachtbaren relativen Änderungen des Meeresspiegels führt. Da vor etwa 10 000 Jahren am Ende der Würm- und Weichselkaltzeit das Fennoskandische Eisschild abgeschmolzen ist (Janssen 2002), hebt sich seit dieser Zeit das Land. Denn durch die Gewichtsreduzierung des Eisschildes tritt eine Entlastung bzw. -spannung der teilelastischen Erdkruste auf. Diese vertikalen Landbewegungen werden auch als postglaziale Landbewegungen bezeichnet (englisch: glacial

isostatic adjustment, GIA). Aufgrund dieser Landhebungen durch GIA konnte schon seit der Wikingerzeit ein Absinken des Meeresspiegels im Bottnischen Meerbusen beobachtet werden, da es durch die Wasserstandsänderungen zu Problemen mit Hafenzufahrten kam (Seibold und Seibold 2012). Die ersten Beobachtungen und Aufzeichnungen zum Absinken des Meeresspiegels erfolgten 1491 in schwedischen Quellen und 1621 in einem finnischen Gebetsbuch (Seibold und Seibold 2012). Auch Anders Celsius befasste sich 1743 mit dem Absinken des Meeresspiegels in fennoskandischen Häfen und ermittelte einen Betrag von 13,7 mm/Jahr (Celsius 1743, zitiert in Ekman 1991; Seibold und Seibold 2012). An der deutschen Ostseeküste wurden zusätzlich zu den Untersuchungen der Meeresspiegeländerungen auch die Höhenlagen der Pegel untersucht und unterschiedliche, teils widersprüchliche Aussagen über eine Hebung bzw. Senkung der deutschen Ostseeküste abgeleitet (siehe z. B. Hagen 1878; Geinitz 1883). Auch aktuelle Untersuchungen zeigen große Unsicherheiten in der südwestlichen Ostsee, da sich dieses Gebiet genau im Übergangsbereich zwischen Landhebungen und Landsenkungen befindet (Kelln et al. 2020). Ausführliche historische Darstellungen zu den Untersuchungen von Meeresspiegeländerungen in der Ostsee im Zusammenhang mit vertikalen Landbewegungen finden sich auch in Wegmann (1969) und Ekman (1991). Aufgrund der beobachteten Meeresspiegeländerungen durch vertikale Landbewegungen wurden schon frühzeitig Pegelmessungen in der Ostsee durchgeführt, weshalb die Verfügbarkeit von Beobachtungsdaten in der Ostsee heute mit einigen der längsten Pegelzeitreihen weltweit als hervorragend zu bewerten ist. In Abschnitt 2 erfolgt daher zunächst ein Überblick der Geschichte der Pegelmessungen in der Ostsee seit dem 18. Jahrhundert. Daran anschließend werden in Abschnitt 3 die wichtigsten Ergebnisse bisheriger Untersuchungen zu relativen Meeresspiegeländerungen anhand von Pegelmessungen zusammengefasst. In Abschnitt 4 werden neue Untersuchungen zu den Meeresspiegeländerungen in der Ostsee unter Berücksichtigung vertikaler Landbewegungen erläutert und die lokale Meeresspiegelentwicklung in den globalen Kontext gesetzt.

2 Erfassung des Meeresspiegels über Pegelmessungen seit dem 18. Jahrhundert

Die ersten Pegelmessungen in der Ostsee erfolgten entlang der russischen Küste im Jahr 1703 in St. Petersburg und 1707 auf der Insel Kotlin (hier wurde später der Pegel Kronstadt errichtet). Für diese historischen Zeitperioden stehen allerdings heute keine nutzbaren Daten mehr zur Verfügung, da gerade in den frühen Jahren keine kontinuierliche Erfassung der Messwerte durchgeführt wurde

(Leppäranta und Myrberg 2009). Die ersten regelmäßigen und lückenlosen Pegelaufzeichnungen hingegen, die auch heute noch zur Auswertung verfügbar sind, begannen in der Ostsee im Jahr 1774 am Pegel Stockholm in Schweden (Ekman 1988) und 1777 am Pegel Kronstadt nahe St. Petersburg (Bogdanov et al. 2000). Dabei dienten die Pegelinstallationen insbesondere in Schweden vorrangig der Abschätzung von vertikalen Landbewegungen (Samuelsson und Stigebrandt 1996). Entlang der südwestlichen Ostseeküste gehören die an der ehemals deutschen Küste (heute Polen) gelegenen Pegel Stettin (1771), Pillau (1802) und Swinemünde (1810) zu den ältesten Pegeln (Seibt 1881; Matthäus 1972). Die ältesten Lattenpegelablesungen des Pegels Travemünde liegen seit 1826 vor (Jensen und Töppe 1986). Dabei wurden die ersten Wasserstandsaufzeichnungen vorrangig im Zuge von Baumaßnahmen an den Ostseehäfen durchgeführt und dienten somit in erster Linie der Schifffahrt und dem Hafenbetrieb (Jensen und Töppe 1986; 1990).

Um eine einheitliche Durchführung von Wasserstandsbeobachtungen an den Pegeln der deutschen Ostseeküste zu gewährleisten, wurde diese in einem unter anderem von Johann Albert Eytelwein unterschriebenen Erlass der Technischen Oberbaudeputation vom 13. Februar 1810 geregelt: »Pegelinstruction – Wie der Pegel auf den Strömen und Gewässern gesetzt, der Wasserstand beobachtet und die Nachrichten eingezogen und überreicht werden sollen« (Jacoby 1925; Hahn und Rietschel 1938). Somit wurde ab 1810 an den installierten Pegeln an der deutschen Ostseeküste zunächst der tägliche Höchstwert durch die jeweilige zuständige Gemeinde abgelesen (Hagen 1878). 1845 wurde ein Dekret erlassen, nach dem Wasserstände immer einheitlich um 12 Uhr mittags erfasst werden sollten (Hagen 1878). Paschen (1856) berichtete über die Wahrnehmbarkeit von Ebbe und Flut in der Ostsee. Insbesondere in einem Nachtrag zu dieser Veröffentlichung wies der Autor darauf hin, dass die Ablesung der Ostseepegel nur einmal täglich um 12 Uhr mittags nicht ausreicht, um den mittleren Meeresspiegel der Ostsee zu beschreiben, sondern dass diese einmalige Ablesung aufgrund der täglichen Gezeiten zu einer Unter- bzw. Überschätzung des mittleren Wasserstandes führt (Paschen 1856). Paschen (1856) schlug daher eine Ablesung der Wasserstände zweimal täglich mit einem zeitlichen Abstand von sechs Stunden vor.

Der erste analoge Schreibpegel, der den Wasserstand über den gesamten Tag mit Hilfe eines Stifts als Linie auf einen Pegelbogen aufzeichnet, wurde 1870 in Swinemünde installiert (Seibt 1881). Danach übernahm das Geodätische Institut Potsdam (GIP) die Verantwortung für die Messung und Analyse der Wasserstandsaufzeichnungen und installierte weitere Mareographen (automatisierte

Schreibpegel) entlang der deutschen Ostseeküste, wie 1890 in Travemünde sowie 1894 in Wismar und Warnemünde (Hahn und Rietschel 1938; Liebsch 1997). Die Pegelbogenaufzeichnungen wurden manuell digitalisiert, um den Wasserstand für bestimmte Zeiten zur Verfügung zu stellen. In der Vergangenheit wurden meist nur ein bis vier äquidistante Aufzeichnungen pro Tag manuell digitalisiert, da angenommen wurde, dass dies ausreiche, um die mittleren täglichen Bedingungen wiederzugeben. Einige der historischen Pegelbögen für Pegelstandorte entlang der deutschen und polnischen Küsten werden heute noch in Archiven aufbewahrt. Aufgrund des hohen Zeit- und Kostenaufwandes wurden diese historischen Pegelbögen jedoch noch nicht nachdigitalisiert, weshalb für diese Zeitperioden meist nur (höchstens) ein bis vier digitalisierte Aufzeichnungen pro Tag zur Verfügung stehen. Die analogen Schreibpegel wurden ab etwa 1975 durch moderne elektronische Datensammler ersetzt, welche die digital aufgezeichneten Wasserstände direkt an die zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ) senden (Hupfer et al. 2003). Die WSÄ sind heute verantwortlich für den Betrieb der Pegelstationen, die Qualitätssicherung der Daten und die Bereitstellung der Messdaten in einem einheitlichen Höhenbezugssystem.

Schon im späten 19. sowie frühen 20. Jahrhundert beschäftigten sich einige Autoren, wie Seibt (1890) und Westphal (1900), mit der Ermittlung von MSL-Zeitreihen an der deutschen Ostseeküste aus den verfügbaren Wasserstandaufzeichnungen und wiesen auf die Problematik der MSL-Ermittlung aus Einzelterminwerten (Terminwertablesungen um 12 Uhr) bzw. die damit verbundene notwendige Gezeitenkorrektur hin. Westphal (1900) ermittelte den Einfluss der Gezeiten aus dem Vergleich von Monatsmittelwertzeitreihen aus Terminwertablesungen und Monatsmittelwerten aus höher aufgelösten Aufzeichnungen für dieselben Zeitperioden. Wobei Westphal (1900) nur für drei Jahre höher aufgelöste Aufzeichnungen zur Verfügung standen, weshalb er darauf hinwies, dass seine ermittelte Gezeitenkorrektur in der Zukunft angepasst werden müsse, wenn genügend hochaufgelöste Wasserstandsdaten zur Bestimmung des Einflusses der täglichen Gezeiten vorliegen. Liebsch (1997) erklärte den Einfluss der täglichen Gezeiten in der Ostsee auf den Monatsmittelwert aus der Perspektive der Signalverarbeitungstheorie, in der dieses Phänomen in der Spektralanalyse als Aliasing-Effekt bekannt ist. Liebsch et al. (2000) führen daher an, dass Gezeitenkorrekturen für die Monatsmittelwerte, welche nicht aus mindestens vier äquidistanten Beobachtungen pro Tag ermittelt wurden, berechnet werden müssen. Die Untersuchungen zu Gezeitenkorrekturen in der Ostsee wurden in Kelln (2019) ausführlich zusammengetragen, weshalb für weitere Details auf diese Arbeit

verwiesen wird. Da in Kelln (2019) langzeitliche hochaufgelöste Pegelzeitreihen für eine hohe Anzahl von Pegelstandorten zur Verfügung standen, wurden die in der Vergangenheit durchgeführten Gezeitenkorrekturen ausführlich miteinander verglichen, eine geeignete Methodik ermittelt sowie eine aktualisierte Gezeitenkorrektur generiert. Durch die umfassende Sammlung und Aufbereitung von hochaufgelösten Pegelzeitreihen im Rahmen des Forschungsprojektes AMSeL_Ostsee (Patzke und Fröhle 2019; Kelln et al. 2019a) sowie die Verbesserung der Gezeitenkorrektur (Kelln 2019), wurden langzeitliche qualitativ hochwertige MSL-Monatszeitreihen für die südwestliche Ostseeküste erzeugt und über die Datenplattform PANGAEA öffentlich zugänglich gemacht (Kelln et al. 2019b). Dies ist nach derzeitigem Kenntnisstand der umfassendste MSL-Datensatz für die deutsche Ostsee, der bislang erstellt wurde.

3 Untersuchungen zu relativen Meeresspiegeländerungen anhand von Pegelmessungen

Einige der ersten Untersuchungen anhand von Pegelbeobachtungen zu Meeresspiegeländerungen entlang der südwestlichen Ostseeküste wurden von Paschen (1869), Hagen (1878), Seibt (1881), Paschen (1882) und Westphal (1900) durchgeführt, wobei sich diese Arbeiten auf die Darstellung des Mittelwassers beschränkten und darin keine Trends ermittelt wurden. Hagen (1878) ermittelte die mittleren Wasserstände für elf Pegelstandorte über den Zeitraum 1846 bis 1875 und stellte einen abfallenden mittleren Wasserstand am Pegel Swinemünde sowie einen ansteigenden mittleren Wasserstand am Pegel Wittower Posthaus fest. Die gegenläufigen Entwicklungen führte Hagen (1878) auf die Vertiefung und Verbreiterung der Swine sowie die Verengung des Rassower Stromes zurück. Weiterhin bemerkte Hagen (1878), dass der mittlere Meeresspiegel der Ostsee durch Luftdruckschwankungen und Windeffekte beeinflusst wird und sich eine regelmäßige periodische Änderung des Wasserstandes im Laufe eines Jahres einstellt, die an allen Pegelstandorten beobachtet werden kann. Diese periodische Änderung wird heute als saisonaler Zyklus bezeichnet und wirkt sich vor allem auf die interannuelle Variabilität des mittleren Meeresspiegels der Ostsee aus. Da sich dieser Beitrag vor allem auf mögliche Langzeittrends fokussiert, sei für weitere Erkenntnisse zum saisonalen Zyklus in der Ostsee auf z. B. folgende Arbeiten verwiesen: Plag und Tsimplis 1999; Hünicke und Zorita 2008; Kelln 2019.

Seibt (1881) untersuchte den mittleren Meeresspiegel anhand von Wasserstandsbeobachtungen am Pegel Swinemünde von 1826 bis 1879 (Beobachtungen 1826 bis 1869; Schreibpegelaufzeichnungen 1870 bis 1879); später erweiterte Seibt (1890) seine Untersuchungen um weitere 24

Beobachtungsjahre (Untersuchungszeitraum 1811 bis 1888). Seibt (1885) führte darüber hinaus Untersuchungen des Mittelwassers am Pegel Travemünde durch. Für die Jahre 1882 bis 1897 wurde das Mittelwasser der Pegelstandorte Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona und Swinemünde von Westphal (1900) untersucht. Kühnen (1916) bezog sich direkt auf die Arbeiten von Seibt (1881), Seibt (1885), Seibt (1890) und Westphal (1900) und setzte deren Untersuchungen fort. Dabei berechnete Kühnen (1916) Monats- und Jahresmittelwerte anhand der Wasserstandsmessungen um 12 Uhr mittags von 1898 bis 1910 für die Pegelstandorte Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona, Swinemünde, Pillau und Memel. Weiterhin vermutete Kühnen (1916) als Gründe für die Schwankungen des mittleren Meeresspiegels die Gezeiten, meteorologische Einflüsse wie Luftdruck und Wind sowie den Wassermassenausgleich zwischen Nord- und Ostsee.

Rietschel (1933) ermittelte einen relativen Anstieg der Mittelwasserzeitreihen (Mittelwasser, MW, als Approximation des relativen mittleren Meeresspiegels, englisch: relative mean sea level, RMSL) auf Grundlage von fünfjährigen Mittelwerten der Pegelstandorte Kolberg (heute Kolobrzeg in Polen) und Swinemünde zu:

- Kolberg von 1817 bis 1929: 0,8 mm/Jahr,
- Kolberg von 1871 bis 1929: 1,5 mm/Jahr,
- Swinemünde von 1811 bis 1929: 0,6 mm/Jahr,
- Swinemünde von 1871 bis 1929: 1,2 mm/Jahr.

Hahn und Rietschel (1938) stellten langzeitliche MSL-Jahreszeitreihen über das 19. Jahrhundert bis zum Jahr 1935 für die Pegelstandorte Pillau, Stolpmünde, Kolberg, Swinemünde, Barhöft, Warnemünde, Travemünde und Schleimünde anhand von 12-Uhr-Lattenablesungen zur Verfügung (außer für Swinemünde, hier erfolgten die Ablesungen von 1811 bis 1826 um 8 Uhr). Dabei konnte ein Anstieg der mittleren jährlichen Ostseewasserstände verzeichnet werden. Gaye (1951) kommt in »Wasserstandsänderungen in der Ostsee in den letzten 100 Jahren« mit 19-jährigen Teilzeitreihen zu folgenden Anstiegswerten für die mittleren Jahreswasserstände (MW als Approximation RSML):

- Schleimünde von 1880/1898 bis 1929/47 um 2,5 mm/Jahr,
- Travemünde von 1860/1878 bis 1921/1938 um 2,6 mm/Jahr,
- Marienleuchte von 1883/1901 bis 1922/1940 um 1,4 mm/Jahr,
- Swinemünde von 1860/1878 bis 1914/1932 um 1,1 mm/Jahr.

Jensen und Töppe (1986) geben für den Pegel Travemünde für eine RMSL-Zeitreihe von 1826 bis 1985 einen Anstieg von 1,2 mm/Jahr an. Umfangreiche neuere Analysen der gemessenen Pegelwasserstände in der südwestlichen Ostsee und

an der deutschen Ostseeküste wurden bisher von Liebsch (1997), Liebsch et al. (2000), Jensen und Mudersbach (2004), Lampe et al. (2010), Richter et al. (2006), Richter et al. (2012) und Donner et al. (2012) durchgeführt. Die Untersuchungen beschränkten sich auf relativ wenige Pegel (z. B. Marienleuchte, Travemünde, Wismar, Warnemünde, Barth, Sassnitz, Koserow, Greifswald, Swinoujscie, Kolobrzeg). Richter et al. (2012) detektierten lineare Trends in den RMSL-Jahreszeitreihen über die Zeitperiode 1908 bis 2007 von 0,6 mm/Jahr (Sassnitz) bis 1,5 mm/Jahr (Travemünde). Im Forschungsprojekt AMSeL_Ostsee haben Kelln et al. (2019a) sowie Patzke und Fröhle (2019) zum ersten Mal nachdigitalisierte hochaufgelöste Wasserstandszeitreihen ab etwa 1950 sowie vorhandene weitere Pegelaufzeichnungen genutzt, um insgesamt 43 qualitativ hochwertige MSL-Monatszeitreihen entlang der deutschen Ostseeküste zu erzeugen und zu untersuchen. Über das 20. Jahrhundert von 1900 bis 2015 ergeben sich nach Kelln (2019) für sechs Pegelstandorte entlang der südwestlichen Ostseeküste lineare Trends von:

- Marienleuchte: $0,9 \pm 0,1$ mm/Jahr,
- Travemünde: $1,7 \pm 0,1$ mm/Jahr,
- Wismar Baumhaus: $1,5 \pm 0,1$ mm/Jahr,
- Warnemünde: $1,6 \pm 0,1$ mm/Jahr,
- Swinoujscie: $1,2 \pm 0,1$ mm/Jahr,
- Kolobrzeg: $1,0 \pm 0,1$ mm/Jahr (Kelln 2019).

4 Meeresspiegelentwicklung über das 20. Jahrhundert mit Berücksichtigung von vertikalen Landbewegungen

Die bisher vorgestellten Untersuchungen zu Meeresspiegeländerungen in der Ostsee bezogen sich alle auf den relativen Meeresspiegel. Um die regionale Entwicklung jedoch mit dem globalen Meeresspiegelanstieg vergleichen bzw. einordnen zu können, ist es notwendig die absolute Meeresspiegelentwicklung zu betrachten. Da Pegel auf der Erdoberfläche installiert sind und daher »nur« relativ zum umgebenden Land die lokalen Variationen des relativen Meeresspiegels messen (Ekman 1988), sind zusätzlich Informationen zu vertikalen Landbewegungen notwendig. Pegelmessungen geben somit zum einen klimainduzierte Änderungen im Meeresspiegel wieder, die in Verbindung mit der Ozeanerwärmung, der Landeissschmelze oder der Wasserumverteilung stehen (Hünicke et al. 2017). Zum anderen werden durch die Relativmessung jedoch auch Bewegungen der Erdkruste mit gemessen. Vertikale Landbewegungen beruhen auf geodynamischen Prozessen (z. B. GIA, gegenwärtige Eisschmelze, Erdbeben, Vulkane, Erdbeben) oder auf lokalen/regionalen Effekten (z. B. Grundwasser- oder Gasentnahmen) (Woodworth 2006). In der Ostsee dominieren vertikale Landbewegungen aufgrund von GIA, die mit Hilfe von GIA-Modellen modelliert und für die betrachteten Zeitskalen der Pegelmessungen als

lineare Prozesse angenommen werden können. Mit Hilfe der aus GIA-Modellen erzeugten mittleren Landbewegungsraten für die Gegenwart (inklusive Geoidänderungen) können Pegelzeitreihen zumindest um die RMSL-Änderung aus GIA korrigiert werden. Eine Korrektur um lokale vertikale Landbewegungen über den Beobachtungszeitraum der Pegel ist derzeit noch nicht möglich. Grundsätzlich können vertikale Landbewegungen (lokal und aufgrund von GIA) präzise über GPS-Messungen aufgezeichnet werden, die zeigen, dass es sich um zeitlich nichtlineare Prozesse handelt. Da GPS-Messungen bisher noch nicht an allen Pegelstandorten und nur über einen kurzen Beobachtungszeitraum zur Verfügung stehen, können diese nicht über das gesamte 20. Jahrhundert extrapoliert und somit nicht für die Korrektur von langzeitlichen Pegelmessungen um vertikale Landbewegungen genutzt werden (Kelln et al. 2020).

Aussagen über den absoluten Anstieg des MSL sind also nur möglich, wenn die Wasserstandsbeobachtungen mit belastbaren Zeitreihen bzw. Aussagen über Vertikalbewegungen des Hinterlandes kombiniert werden. Die verlässliche Abschätzung von Vertikalbewegungen über einen längeren Zeitraum und den Anschluss an geologische Stabilbereiche ist eine zwingend erforderliche Voraussetzung für die Einordnung des absoluten MSL-Anstiegs (Dangendorf et al. 2020). Die Unsicherheiten der bisherigen Schätzwerte für den Anteil der vertikalen Landbewegungen an den Langzeittrends übersteigen entlang der deutschen Ostseeküste, die im Übergangsbereich zwischen Landhebungen und Landsenkungen liegt, die eigentlichen Trendschätzer. Beispielsweise liegen laut GIA-Modell NKG2016LU nach Vestøl et al. (2019), welches insbesondere für Fennoskandia entwickelt wurde, die RMSL-Änderungsraten aus GIA entlang der deutschen Ostseeküste im Bereich von $\pm 0,2$ mm/Jahr (siehe Abb. 1). Die Unsicherheiten in der GIA Modellierung werden zu 0,2 bis 0,4 mm/Jahr beziffert (Kelln et al. 2020).

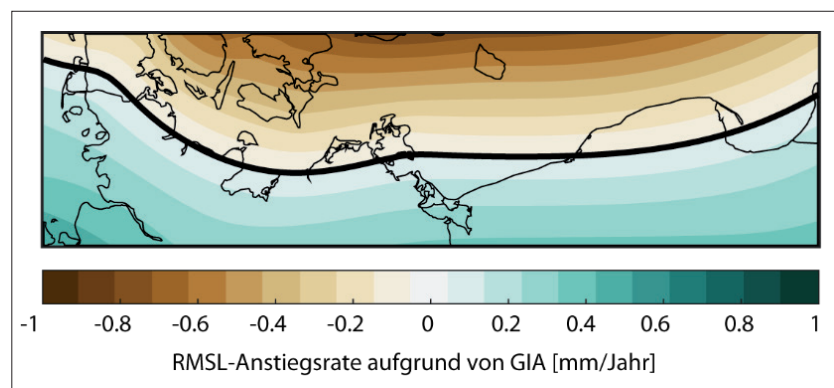


Abb. 1: Änderungen des RMSL entlang der südwestlichen Ostseeküste aufgrund von GIA relativ zum Geoid aus dem NKG2016LU-Modell nach Vestøl et al. (2019). Die Nulllinie ist durch eine breite schwarze Linie gekennzeichnet. Negative Werte kennzeichnen eine Landhebung, positive eine Landsenkung (Kelln et al., in Begutachtung)

Kelln et al. (2019a) detektierten positive Trends sowohl in den RMSL als auch in den um GIA nach NKG2016LU korrigierten RMSL-Zeitreihen entlang der südwestlichen Ostseeküste. Über das 20. Jahrhundert (1900 bis 2015) ergibt sich nach GIA-Korrektur für die südwestliche Ostseeküste ein linearer Trend von $1,2 \pm 0,1$ mm/Jahr (Kelln 2019). Für Küstenschutzbelange ist zu beachten, dass sich die lineare Trendentwicklung der RMSL-Zeitreihen für die Zeitperiode ab etwa Mitte des 20. Jahrhunderts (1960 bis 2015) entlang der schleswig-holsteinischen Küste leicht von den linearen Trends entlang der mecklenburg-vorpommerschen Küste unterscheidet. So weisen die meisten Pegel entlang der schleswig-holsteinischen Küste ab etwa Mitte des 20. Jahrhunderts etwas geringere Trends auf ($1,7 \pm 0,2$ mm/Jahr), als entlang der mecklenburg-vorpommerschen Küste ($2,0 \pm 0,3$ mm/Jahr) (Kelln 2019).

In dem vom BMBF geförderten KFKI-Forschungsprojekt MSLabsolut wurde der Fokus auf die räumlichen Differenzen der MSL-Entwicklung entlang der deutschen Küsten (Nord- und Ostsee) gelegt, besonders im Hinblick auf die Rolle der vertikalen Landbewegungen (Dangendorf et al. 2020). Durch die Entwicklung einer neuartigen hybriden Rekonstruktionsmethodik konnten relative MSL-Felder über das gesamte 20. Jahrhundert von 1900 bis 2015 in einer hohen räumlichen Auflösung an die deutschen Küsten transferiert werden. Hierdurch wurde die Bewertung potenzieller anthropogener und postglazialer vertikaler Landbewegungen ermöglicht. An der deutschen Küste ergeben sich aus dieser Betrachtung vertikale Landbewegungsschätzungen für die deutschen Küsten, die in den meisten Fällen $\pm 0,5$ mm/Jahr nicht überschreiten. Einzelne Ausnahmen können auf lokale Gasentnahmen oder bisher nicht detektierte Nullpunktverschiebungen zurückgeführt werden. Der Median der um residuale vertikale Landbewegungen korrigierten RMSL-Zeitreihen entlang der deutschen Ostseeküste liegt bei $1,6 \pm 0,1$ mm/Jahr (Dangendorf et al. 2020).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die deutsche Ostseeküste über das 20. Jahrhundert eine MSL-Entwicklung aufweist, die sich hinsichtlich des Langzeittrends nicht wesentlich von der des globalen Mittels (von 1,3 bis 2 mm/Jahr) unterscheidet (vgl. Church und White 2011; Jevrejeva et al. 2014; Hay et al. 2015; Dangendorf et al. 2017; Dangendorf et al. 2019). Detaillierte Analysen zeigen jedoch signifikante räumliche Differenzen in der langzeitlichen MSL-Entwicklung entlang der deutschen Ostseeküste (Kelln et al. 2020). Vorläufige Untersuchungen zu den Ursachen dieser Differenzen lassen einerseits lokal variable vertikale Landbewegungen und andererseits Änderungen in den dominanten Westwindlagen (Dangendorf et al. 2014; Gräwe et al. 2019) als potenzielle Erklärungen vermuten. Für weitere Erläuterungen be-

züglich der Einflussfaktoren auf die linearen Trends sowie die Meeresspiegelvariabilität in der Ostsee wird auf Kelln (2019) verwiesen.

5 Zusammenfassung

Der Anstieg des mittleren Meeresspiegels führt weltweit zu einer Gefährdung von Küstenregionen. Auch in der Ostsee ist durch die weiter zunehmende Besiedelung der Küstenbereiche sowie die intensive Nutzung für Wirtschaft, Tourismus und Naturschutz eine erhöhte Vorsorge vor einem steigenden Meeresspiegel unabdingbar. Um einen vorausschauenden und effektiven Küstenschutz zu betreiben, sind Kenntnisse über die lokale und regionale Entwicklung des mittleren Meeresspiegels sowie die Einordnung dieser Größen in die globale Entwicklung von entscheidender Bedeutung. Hierzu werden qualitativ hochwertige und möglichst langzeitliche Messungen des MSL benötigt. Die Ostsee gehört mit einigen der längsten Pegelaufzeichnungen zu den am besten bepegelten Gebieten weltweit. Dadurch konnten schon frühzeitig Untersuchungen zur Meeresspiegelentwicklung vorgenommen und für unterschiedliche betrachtete Zeitperioden sowie anhand von verschiedenen Pegelstandorten in der südwestlichen Ostsee lineare Trends im Bereich von 0,6 bis 2,6 mm/Jahr ermittelt werden.

Während die linearen Trends der RMSL-Zeitreihen für den Küstenschutz von besonderer Bedeutung sind, ist die Ermittlung der Meeresspiegel-trends anhand der um GIA bereinigten Zeitreihen

wichtig für die Einordnung der absoluten Meeresspiegeländerungen. Lineare Trends des RMSL können durch vertikale Landbewegungen beeinflusst sein und somit die absoluten Trends der Meeresspiegeländerungen, die vorwiegend klimatisch induziert sind, überdecken. Eine Bereinigung der RMSL-Zeitreihen um GIA ermöglicht eine zumindest etwas genauere Einordnung der klimatisch induzierten Trends, wenn die Zeitreihen nicht noch zusätzlich durch große lokale Landbewegungen beeinflusst sind. Je nach Korrekturmethode konnten lineare Trends über das 20. Jahrhundert von 1900 bis 2015 von $1,2 \pm 0,1$ mm/Jahr (Kelln et al. 2020) bis $1,6 \pm 0,1$ mm/Jahr (Dangendorf et al. 2020) für die gesamte südwestliche Ostsee ermittelt werden, die im Bereich der Trendschätzer für den GMSL liegen. Aufgrund der Verbindung der Ostsee durch die dänische Meerenge mit der Nordsee bzw. dem Nordatlantik spiegelt sich somit die Entwicklung des GMSL auch in der Ostsee wider. Zusätzlich überlagern jedoch lokale Effekte die Meeresspiegelentwicklung und führen zu geringfügigen regionalen und lokalen Unterschieden. Kenntnisse über die vergangene und gegenwärtige Entwicklung des Meeresspiegels entlang der deutschen Ostseeküste sind für die regionale und lokale Küstenschutzplanung von entscheidender Bedeutung und müssen insbesondere im Hinblick auf eine mögliche Beschleunigung weiterhin sorgfältig beobachtet werden, um notwendige Küstenschutzmaßnahmen rechtzeitig umzusetzen. //

Danksagung

Unser Dank gebührt dem Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), das die Projekte AMSeL_Ostsee und MSLabsolut aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter der Leitung des Projektträgers Jülich (PTJ) finanziell gefördert hat. Weiterhin bedanken wir uns bei allen Projektpartnern für die konstruktive Zusammenarbeit.

Literatur

- Bogdanov, V. I.; M. Yu. Medvedev et al. (2000): Mean monthly series of sea level observations (1777–1993) at the Kronstadt gauge. Reports of the Finnish Geodetic Institute
- Celsius, Anders (1743): Anmärkning om vatnets förminskande så i Östersjön som Vesterhafvet. Kongl. Swenska Wetenskaps Akademiens Handlingar, 4, S. 33–50
- Church, John A.; Neil J. White (2011): Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. Surveys in Geophysics, DOI: 10.1007/s10712-011-9119-1
- Dangendorf, Sönke; Jessica Kelln et al. (2020): Untersuchungen zur Rekonstruktion des Meeresspiegels und vertikaler Landbewegungen an den deutschen Küsten. Die Küste, in Begutachtung
- Dangendorf, Sönke; Francisco M. Calafat et al. (2014): Mean sea level variability in the North Sea: Processes and implications. Journal of Geophysical Research: Oceans, DOI: 10.1002/2014JC009901
- Dangendorf, Sönke; Carling Hay et al. (2019): Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. Nature Climate Change, DOI: 10.1038/s41558-019-0531-8
- Dangendorf, Sönke; Marta Marcos et al. (2017): Reassessment of 20th century global mean sea level rise. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, DOI: 10.1073/pnas.1616007114
- Donner, Reik V.; R. Ehrcke et al. (2012): Spatial patterns of linear and nonparametric long-term trends in Baltic sea-level variability. Nonlinear Processes in Geophysics, DOI: 10.5194/npg-19-95-2012
- Ekman, Martin (1988): The world's longest continued series of sea level observations. PAGEOPH, DOI: 10.1007/BF00878691
- Ekman, Martin (1991): A concise history of postglacial land uplift research (from its beginning to 1950). Terra Nova, DOI: 10.1111/j.1365-3121.1991.tb00163.x
- Führböter, Alfred; Jürgen Jensen (1985): Säkularänderungen der mittleren Tidewasserstände in der Deutschen Bucht. Die Küste, 42, S. 78–100
- Gaye, Julius (1951): Die Wasserstandsänderungen in der Ostsee und in der Nordsee in den letzten 100 Jahren. Die Wasserwirtschaft, Sonderheft: Vorträge der Gewässerkundlichen Tagung 1951 in Hamburg
- Geinitz, F. Eugen (1883): Ueber die gegenwärtige Senkung der mecklenburgischen Ostseeküste. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, www.schweizerbart.de/papers/zdgg_alt/detail/35/61966/Ueber_die_gegenwaertige_Senkung_der_mecklenburgischen_Ostseekueste
- Gräwe, Ulf; Knut Klingbeil et al. (2019): Decomposing mean sea level rise in a semi-enclosed basin, the Baltic Sea. Journal of Climate, DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0174.1

- Hagen, Gotthilf (1878): Vergleichung der Wasserstände der Ostsee an der Preussischen Küste, Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften in Berlin. Königliche Akademie der Wissenschaften; Mathematische Abhandlungen der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften
- Hahn, Artur; Ernst Rietschel (1938): Langjährige Wasserstandsbeobachtungen an der Ostsee. Berichte und Mitteilungen, Baltische Hydrologische Konferenz
- Hay, Carling C.; Eric D. Morrow et al. (2015): Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. *Nature*, DOI: 10.1038/nature14093
- Hünicke, Birgit; Eduardo Zorita (2008): Trends in the amplitude of Baltic Sea level annual cycle. *Tellus*, DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00277.x
- Hünicke, Birgit; Eduardo Zorita; Hans von Storch (2017): The Challenge of Baltic Sea Level Change. In: Jan Harff, Kazimierz Furmańczyk und Hans von Storch (Hg.): *Coastline Changes of the Baltic Sea from South to East. Past and Future Projection*, Bd. 19. Springer International Publishing, Cham, Schweiz (Coastal research library, 19), S. 37–54
- Hupfer, Peter; Jan Harff et al. (2003): Die Wasserstände an der Ostseeküste. *Entwicklung – Sturmfluten – Klimawandel. Die Küste, Sonderheft 66*
- Jacoby, G. (1925): Beitrag zur Geschichte der Pegel. Die Bautechnik, http://delibra.bg.polsl.pl/Content/21062/BCPS_22632_1925-H32_Die-Bautechnik--Jg--.pdf
- Janssen, Frank (2002): Statistische Analyse mehrjähriger Variabilität der Hydrographie in Nord- und Ostsee. Möglichkeiten zur Validation und Korrektur systematischer Fehler eines regionalen Ozeanmodells. Dissertation, Universität Hamburg
- Jensen, Jürgen (2020): Retrospektive der Meeresspiegelforschung in Deutschland. Teil 1: Deutsche Nordseeküste. *Hydrographische Nachrichten*, DOI: 10.23784/HN115-03
- Jensen, Jürgen; Christoph Mudersbach (2004): Analyses of Variations in Water Level Time-Series at the Southern Baltic Sea Coastline. *Coastline Reports*, 2, S. 175–184
- Jensen, Jürgen; Andrea Töppe (1986): Zusammenstellung und Auswertung von Originalaufzeichnungen des Pegels Travemünde/Ostsee ab 1826. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 4
- Jensen, Jürgen; Andrea Töppe (1990): Untersuchungen über Sturmfluten an der Ostsee unter spezieller Berücksichtigung des Pegels Travemünde. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, 1/2
- Jevrejeva, Svetlana; J. C. Moore et al. (2014): Trends and acceleration in global and regional sea levels since 1807. *Global and Planetary Change*, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.12.004
- Kelln, Jessica (2019): Untersuchungen zu Änderungen und Einflussgrößen des mittleren Meeresspiegels in der südwestlichen Ostsee. Dissertation, Siegen
- Kelln, Jessica; Sönke Dangendorf et al. (2020): Entwicklung des mittleren Meeresspiegels entlang der südwestlichen Ostseeküste. *Die Küste*, in Begutachtung
- Kelln, Jessica; Sönke Dangendorf; Jürgen Jensen (2019a): AMSeL_Ostsee A: Analyse vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger Wasserstände in der südwestlichen Ostsee. Abschlussbericht. Förderkennzeichen BMBF 03KIS114. Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu), Siegen
- Kelln, Jessica; Sönke Dangendorf et al. (2019b): Monthly sea level from tide gauge stations at the German Baltic coastline (AMSeL_Baltic Sea). PANGAEA. DOI: 10.1594/PANGAEA.904737
- Kühnen, Friedrich (1916): Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona, Swinemünde, Pillau, Memel und das Mittelwasser der Nordsee bei Bremerhaven in den Jahren 1898–1910. Veröffentlichungen des Königl. Preußischen Geodätischen Institutes, Neue Folge Nr. 70
- Lampe, Reinhard; Elisabeth Endtmann et al. (2010): Relative sea-level development and isostasy along the NE German Baltic Sea coast during the past 9 ka. *E&G Quaternary Science Journal*, DOI: 10.3285/eg.59.1-2.01
- Leppäranta, Matti; Kai Myrberg (2009): *Physical oceanography of the Baltic Sea*. Springer/Praxis Pub., Berlin, Chichester
- Liebsch, Gunter (1997): *Aufbereitung und Nutzung von Pegelmessungen für geodätische und geodynamische Zielstellungen*. Dissertation, München
- Liebsch, Gunter; Reinhard Dietrich et al. (2000): Die Reduktion langjähriger Wasserstandsmessungen an der Küste Mecklenburg-Vorpommerns auf einen einheitlichen Höhenbezug. *Die Küste*, 62, S. 7–32
- Matthäus, Wolfgang (1972): On the history of recording tide gauges. *Proceeding of the Royal Society of Edinburgh*, 3
- Paschen, F. (1856): Über die Wahrnehmbarkeit von Ebbe und Fluth in der Ostsee. In: Großherzoglich Mecklenburgisches Statistisches Büro zu Schwerin (Hg.): *Archiv für Landeskunde in den Großherzogthümern Mecklenburg-Schwerin*. Schwerin: Sandmeyer, 137–150 und 255.
- Paschen, Friedrich (1869): Beitrag zur Untersuchung der Frage über die Hebung der deutschen Ostsee. In: *Beiträge zur Statistik Mecklenburgs*
- Paschen, Friedrich (1882): Wasserstandsbeobachtungen an den Ostseepiegeln zu Wismar und Warnemünde. In: *Die geometrischen Nivellements*. Großherzoglich Mecklenburgische Landesvermessung, S. 96–106
- Patzke, Justus; Peter Fröhle (2019): Analyse von hochaufgelösten Wasserstandverläufen und Ermittlung des MSL sowie von Extremwasserständen an der südlichen und südwestlichen Ostseeküste (AMSeL_Ostsee). Teilvorhaben B – Zeitliche Entwicklung von Extremwasserständen unter Berücksichtigung von vertikalen Landbewegungen auf die relativen Wasserstandänderungen. Abschlussbericht. Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg, Institut für Wasserbau
- Plag, Hans-Peter; Michael N. Tsimplis (1999): Temporal variability of the seasonal sea-level cycle in the North Sea and Baltic Sea in relation to climate variability. *Global and Planetary Change*, DOI: 10.1016/S0921-8181(98)00069-1
- Richter, Andreas; Reinhard Dietrich; Jens Wendt (2006): Höhenänderungen im Küstenbereich der Ostsee. *Die Küste*, 71, S. 33–59
- Richter, Andreas; Andreas Groh; Reinhard Dietrich (2012): Geodetic observation of sea-level change and crustal deformation in the Baltic Sea region. *Physics and Chemistry of the Earth*, DOI: 10.1016/j.pce.2011.04.011
- Rietschel, Ernst (1933): Neuere Untersuchungen zur Frage der Küstensenkung. *Deutsche Wasserwirtschaft*, 5, S. 81–86

- Samuelsson, Madleine; Anders Stigebrandt (1996): Main characteristics of the long-term sea level variability in the Baltic sea. *Tellus*, DOI: 10.1034/j.1600-0870.1996.t01-4-00006.x
- Seibold, Eugen; Ilse Seibold (2012): Zum Auf und Ab des Meeresspiegels in Skandinavien: Langer Streit um Eustasie oder Isostasie. *International Journal of Earth Sciences*, DOI: 10.1007/s00531-011-0692-9
- Seibt, Wilhelm (1881): Das Mittelwasser der Ostsee bei Swinemünde. Publication des Königl. Preuss. Geodätischen Instituts
- Seibt, Wilhelm (1885): Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde. Publication des Königl. Preuss. Geodätischen Instituts
- Seibt, Wilhelm (1890): Das Mittelwasser der Ostsee bei Swinemünde. Zweite Mitteilung. Veröffentlichung des Königl. Preuss. Geodätischen Instituts
- Vestøl, Olav; Jonas Ågren et al. (2019): NKG2016LU: a new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic Region. *Journal of Geodesy*, DOI: 10.1007/s00190-019-01280-8
- Wegmann, E. (1969): Changing ideas about moving shorelines. In: G. J. Scheer (Hg.): *Towards a history of geology*, S. 386–414
- Westphal, Alfred (1900): Das Mittelwasser der Ostsee bei Travemünde, Marienleuchte, Wismar, Warnemünde, Arkona und Swinemünde in den Jahren 1882/1897. Veröffentlichung des Königl. Preussischen Geodätischen Instituts, Neue Folge Nr. 2
- Woodworth, Philip L. (2006): Some important issues to do with long-term sea level change. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, DOI: 10.1098/rsta.2006.1737
- Worsaae, Jens Jakob Asmussen (1873): *De Danskes Kultur i Vikingetiden* (Die dänische Kultur in der Wikingerzeit)

Die Fokusthemen der nächsten Ausgaben

Wir haben uns entschieden, die Fokusthemen der nächsten Hefte schon vorab zu verraten, weil wir uns dadurch interessante Fachbeiträge von Ihnen erhoffen. Beiträge, auf die wir selbst nicht gekommen wären, die wir folglich niemals angefragt hätten.

- | | |
|-----------------------|---|
| HN 117 (Oktober 2020) | Tiefsee
Redaktionsschluss: 15. September 2020 |
| HN 118 (Februar 2021) | Numerische Modelle in der Hydrographie
Redaktionsschluss: 15. Januar 2021 |
| HN 119 (Juni 2021) | Häfen und Verkehre der Zukunft
Redaktionsschluss: 30. April 2021 |

Falls Sie zu einer Ausgabe einen thematisch passenden Fachbeitrag beisteuern können, so melden Sie sich bitte bei der Redaktion oder schicken Sie Ihren Beitrag an: lars.schiller@dhyg.de. Fachbeiträge zu anderen Themen der Hydrographie sind natürlich weiterhin willkommen. Wir freuen uns auf das Wissen, das Sie mit uns teilen.

Using a ROS-based low-cost system for bathymetric surveys

An article by LOUIS MAKIELLO

Using low-cost sensors and a software framework based on Robot Operating System (ROS) software, a low-cost multi-sensor system (MSS) was developed and tested. The system was successful in producing geo-referenced depth estimations. Potential applications include crowdsourced bathymetry. In addition, this MSS may be useful for hydrographic organisations with modest budgets, such as educational organisations and the national agencies of developing countries.

Robot Operating System | low-cost sensors | multi-sensor system | crowdsourced bathymetry
 Robot Operating System | kostengünstige Sensoren | Multi-Sensor-System | Crowdsourcing-Bathymetrie

Unter Verwendung kostengünstiger Sensoren und eines Software-Frameworks, das auf der Software des Robot Operating System (ROS) basiert, wurde ein kostengünstiges Multi-Sensor-System (MSS) entwickelt und getestet. Mit dem System konnten georeferenzierte Tiefenwerte erfolgreich abgeschätzt werden. Zu den potenziellen Anwendungen gehört die Crowdsourcing-Bathymetrie. Darüber hinaus kann das MSS auch für hydrographische Organisationen mit geringen finanziellen Mitteln nützlich sein, wie z. B. Bildungseinrichtungen und Behörden in Entwicklungsländern.

Author

Louis Makiello holds a M.Sc. degree in Geodesy with specialisation in Hydrography from HafenCity University in Hamburg.

LouisMakiello@protonmail.com

Introduction

Bringing down the cost of hydrographic sensors and software has been the focus of research at the HCU's department of Geodesy and Geomatics in Hamburg in recent years.

The applications of such a low-cost system include crowdsourced bathymetry and use by hobbyists. In addition, universities and governmental agencies in developing countries would benefit from having access to hydrographic survey equipment at a fraction of the cost of current commercially available systems.

With low-cost surveying systems, the frequency and extent of hydrographic surveys could be increased. This is of obvious benefit in modelling and understanding water circulation in coastal areas, estuaries and inland waterways.

The low-cost hydrographic system presented in this paper makes use of open-source software and low-cost sensors. It has been designed to allow for additional sensors to be easily integrated. The ROS software framework used is popular in the field of robotics. It could be adapted for use with robotic vehicles. This fits the current trend of automation and artificial intelligence.

Educating future generations of hydrographers requires providing students with practical experience. This is best done using low-cost sensors whose loss or damage by inexperienced operators would not be a major financial blow to educational establishments. Open-source software that can be accessed and modified by students is also advantageous compared to proprietary software.

Only a small fraction of the earth's oceans and seas have been sampled for depth, greatly limiting our understanding and knowledge of the ocean. Mapping the ocean using hydrographic vessels is a costly and time-consuming endeavor. Specialised hydrographic vessels only represent a tiny fraction of the total number of seagoing vessels. A much larger number of vessels are equipped with single beam echo sounders (SBES) for navigational and safety purposes. If these SBES could be used to gather depth data, our knowledge of the seas and oceans could be much increased. Crowdsourced bathymetry has the potential to multiply world-wide depth sampling.

The Seabed 2030 Project of the Nippon Foundation and GEBCO aims to chart 100 % of the oceans by 2030 and has cited crowdsourced bathymetry as an option to help achieve this (Mayer et al. 2018). The IHO (International Hydrographic Organization) Inter-Regional Coordinating Committee has established a Crowdsourced Bathymetry Working Group (CSBWG). OpenSeaMap aims to make crowdsourced bathymetry available to the public (OpenSeaMap 2019).

Components

In selecting components, importance was placed on keeping down component purchasing costs. Also, components were to be assembled without the use of expensive workshop equipment. Finally, components were to function as much as possible with the use of open-source software.

[Fig. 1](#) shows the main components and [Table 1](#)

shows component costs. Total cost is 985 Euros. For testing, the system was initially mounted on a rented »Kanadier« type canoe and subsequently on an inflatable canoe which cost 80 Euros.

Sensors

The sensors used include a single beam echo sounder, a GNSS module and a MARG (magnetic angular rate and gravity) array.

The echo sounder was an Airmar Echorange SS510 which operates on a frequency of 200 kHz. With a cost of 616 Euros, it is the most expensive single component. It outputs standard NMEA messages and could thus be substituted by any other NMEA echo sounder. The echo sounder outputs time of return and water temperature at the transducer head.

The GNSS module used was a NEO-6M which uses SBAS (satellite based augmentation system). It was set-up to output position at a rate of 5 Hz with a navigation engine optimised for use on a vessel.

The MARG array used was the MPU-9250, which has tri-axial accelerometers, gyroscopes and magnetometers. Its performance is enhanced by the use of temperature compensation for bias and scale factor. Commercially available higher-end MARG arrays are calibrated with the use of a turntable and thermal chamber. Such equipment may not be available to users of a low-cost system. Therefore, a simplified calibration procedure was carried out with the use of bubble levels and a hair dryer to manipulate temperature. Accelerometers and magnetometers are calibrated for bias and scale factor whereas gyroscopes are only calibrated for bias so as to negate the need for a turntable. Magnetometer scale factor calibration is done by sampling the earth's magnetic field with all three magnetometer and taking the average of the three as the true amplitude of the earth's magnetic field.

Timestamping

Timestamps for the MARG array are based on a PPS (pulse per second) signal from the EZ-0048 GNSS module, which uses atomic clocks on satellites as a reference. In case of loss of GNSS signal, a DS3231 real time clock is used to timestamp MARG array data. This real time clock is synchronised with GNSS time. The timestamps for the NEO-6M position are also based on atomic clocks. Echo sounder data is timestamped using the DS3231 real time clock. A single DS3231 communicates with both the Teensy microcontroller and the Raspberry Pi 3 single board computer via its I2C connection.

Processing

For processing, a Teensy 3.6 microcontroller and a Raspberry Pi 3 single board computer are used. The microcontroller runs a Madgwick algorithm to compute attitude at a rate of around 900 iterations per second while also performing timestamping

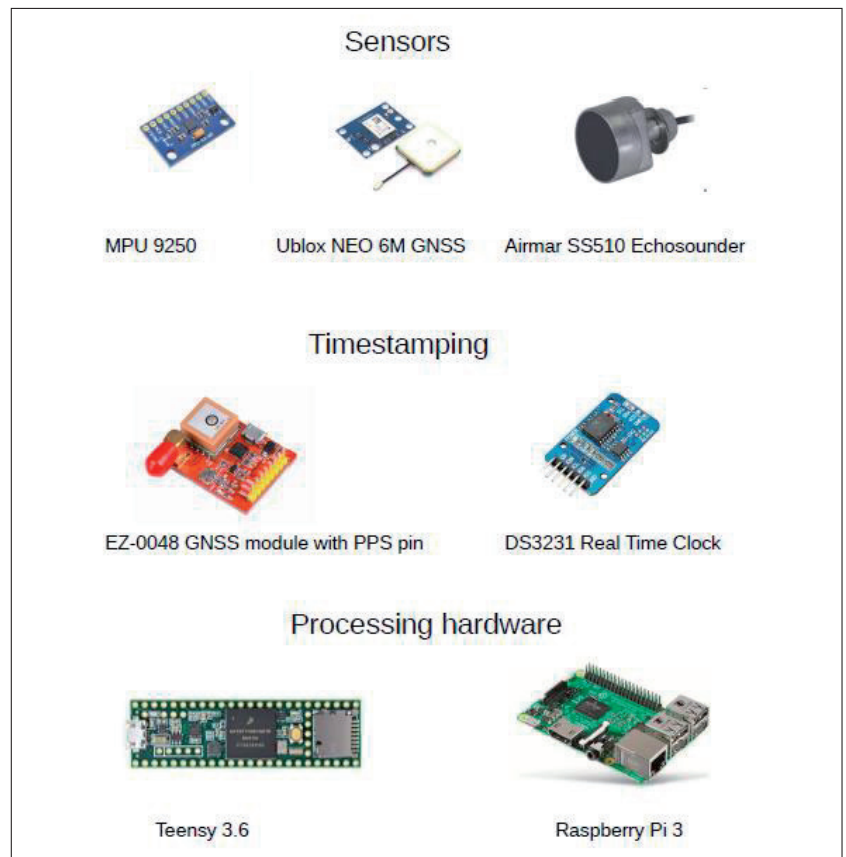


Fig. 1: Main components

Components	Costs [€]
Teensy 3.6	38.00
Raspberry Pi 3	34.45
Waveshare 5 inch resistive touch screen LCD(B)	39.99
GY-NEO6MV2 GNSS module	10.99
EZ 0048 GNSS module	30.99
MPU-9250 MARG array	5.99
DS3231 real time clock	4.87
RS-422 to USB converter	26.55
Serial Adapter DB9 female to terminal bloc	13.48
Airmar SS510 echo sounder	616.47
Fan and case for Rasperry Pi	8.99
Wireless keyboard and mouse	18.99
UPSPack power module	18.99
RAVPower 20,000 mAh power bank	26.99
LC-R127R2PG 12 V batteries	15.94
USB to TTL serial cable	3.54
Electronics supplies	20.00
Cadiz storage box	3.99
Cadiz storage box lid	1.99
Vacuum storage bag	5.99
Construction supplies	35.00
Total	985.19

Table 1: Component costs

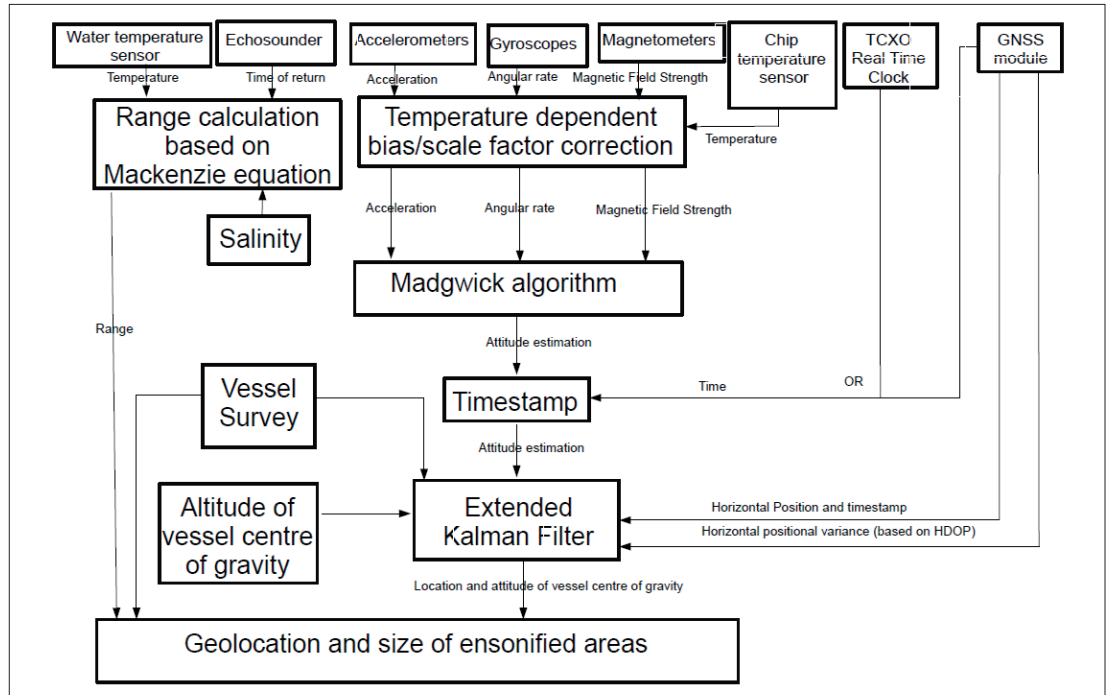


Fig. 2: System overview

and temperature compensation. The Raspberry Pi 3 runs ROS Kinetic on an Ubuntu Xenial operating system. Using a Raspberry Pi 3 eliminates the need for a Linux laptop or desktop computer as bathymetric pointclouds can be produced directly on the Raspberry although acquired data may be transferred to such a computer for post-processing.

System design and operation

To fuse data from multiple sensors, the Madgwick (Madgwick 2010) algorithm and the Extended Kalman Filter contained in the Robot Localisation ROS package (Moore and Stouch 2016) were used. Fig. 2 shows an overview of the system. GNSS data is converted to UTM and the surface of the water is modelled as a flat plane.

Filter tuning

The Madgwick algorithm's two filter gains of beta and zeta were adjusted. Zeta was set to zero as no gyroscope drift was detected for the MPU-9250. Beta was set to 0.6, a value larger than the 0.041 used in the original Madgwick study (Makiello 2019). This decreases the time needed for the filter to initially converge.

The Extended Kalman Filter adjustable parameters were tuned as follows: For the measurement noise covariance matrix R, sensor variances for attitude were set according to error estimations from static testing. The variance for horizontal position from the GNSS module was set dynamically according to the HDOP (horizontal dilution of precision) messages contained in the NMEA strings from the sensor. The process noise covariance matrix Q was tuned with the help of a test performed on land,

with the system carried around a course measured on the ground that served as »ground truth«.

Water depth calculation

Depth is determined based on water temperature, salinity and the time taken for an acoustic pulse to travel from the vessel transducer to the sea floor and back. The Mackenzie equation (1981) is used for computation. Water temperature is measured at the echo sounder head throughout the survey.

Testing and results

Two tests were carried out: A first test in the Jaffe-Davids canal, an urban canal in Hamburg, and a second test in Eichbaumsee lake. Fig. 3 and Fig. 4 show the canal test. Fig. 3 shows the view in Rviz (Gossow et al. 2011), a robotics visualisation pack-

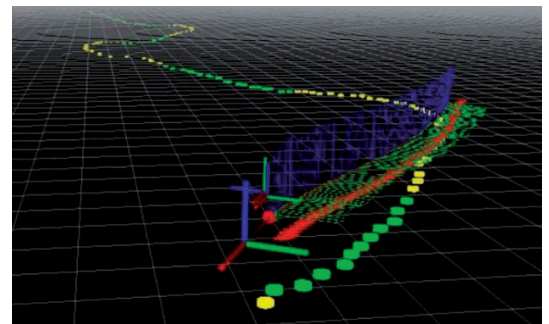


Fig. 3: Canal survey, Rviz view. Grid: 1 metre squares on the water surface. Yellow and green circles: ensonified areas. Red translucent arrows: GNSS horizontal position. Thick axes: positions of the echo sounder head, centre of gravity, MARG array and GNSS antenna (from bottom to top). Thin long axes: position and attitude estimates of vessel centre of gravity produced by EKF

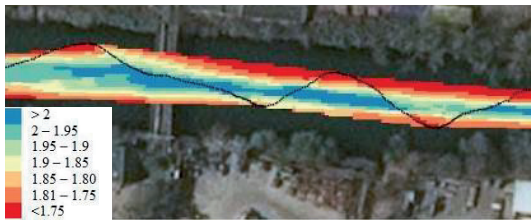


Fig. 4: Canal survey. Triangular Interpolated Network (TIN), 1-metre raster. Black dots: centres of ensonified areas

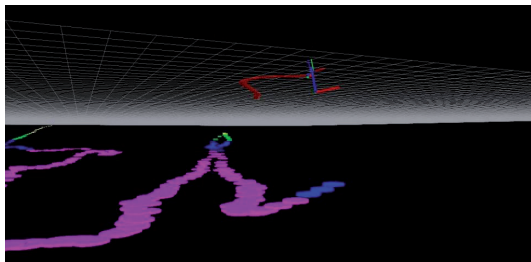


Fig. 5: Rviz view of Eichbaumsee survey. Grid: 1 metre squares on the water surface. The survey is viewed from underwater. The circular markers show the ensonified areas

age, which produces a 3D view of the survey. Positions of sensors and sensor data as well as the motion of the vessel can be observed both during a survey and in post-processing. Fig. 4 shows a triangular interpolated network (TIN) overlaid onto satellite imagery of the canal.

To evaluate accuracy, cross line tests were performed. Examining the cross line tests, we found ten pairs of points with horizontal distances within 30 cm. The difference in depth between the two points in a pair was always less than 10 cm and usually only a few centimetres.

Fig. 5 and Fig. 6 show the survey conducted on the Eichbaumsee lake near Hamburg. Fig. 5 shows the Rviz view. A custom ROS node allows bathymetry to be displayed using markers of different colours depending on depth. The diameter of the markers is three times the ensonified area, which varies depending on depth.

The Raspberry Pi 3 used to run Rviz is suscep-



Fig. 6: Eichbaumsee survey

tible to freezing if 3D visualisation is done during a survey due to insufficient processing power. Therefore, as an alternative, it is possible to record sensor data during a survey with processing and visualisation done after concluding the survey. Data acquisition can be monitored during a survey by viewing sensor data streams using the »rostopic« package. It was found that survey data could be collected non-stop for 34 days before an SD card (128 Gigabyte) swap was required.

Outlook

Integrating tide gauge data would allow for surveys to be carried out in tidal zones. The same feature could be used to convert depth relative to the water surface to absolute depths relative to a global datum.

Use of a sound velocity profile could, if available, increase accuracy of bathymetric data.

Visual odometry or visual-inertial odometry may be performed with low-cost sensors and would improve vessel positioning in GNSS-compromised areas. Initial tests using the ROVIO algorithm (Bloesch et al. 2015) have shown promise. //

References

Bloesch, Michael; Sammy Omari et al. (2015): Robust Visual Inertial Odometry Using a Direct EKF-Based Approach. IROS, DOI: 10.3929/ethz-a-010566547

Gossov, David; Adam Leeper et al. (2011): Interactive Markers: 3-D User Interfaces for ROS Applications. IEEE Robotics & Automation Magazine, DOI: 10.1109/MRA.2011.943230

Mackenzie, Kenneth V. (1981): Nine-term equation for sound speed in the oceans. The Journal of the Acoustical Society of America, DOI: 10.1121/1.386920

Madgwick (2010): An efficient orientation filter for inertial and inertial/-magnetic sensor arrays. http://x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf

Makiello, Louis (2019): Development of a ROS-based low-cost localization system for hydrographic surveys. Master thesis, HafenCity University Hamburg

Mayer, Larry et al. (2018): The Nippon Foundation-GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World's Oceans Completely Mapped by 2030. Geosciences, DOI: 10.3390/geosciences8020063

Moore, Thomas; Daniel Stouch (2016): A Generalized Extended Kalman Filter Implementation for the Robot Operating System. Intelligent Autonomous Systems, DOI: 10.1007/978-3-319-08338-4_25

OpenSeaMap (2019): <https://map.openseamap.org>

Potential UXO seabed migration in the German Bight

An article by *CHRIS JENKINS* and *SONIA PAPILI*

Severe storms marked by very high wave conditions occur several times per year in the German Bight (North Sea). In places and at certain times the wave-induced flows at the seabed are then powerful enough to significantly displace exposed, heavy UXO such as mines and bombs from the two world wars. To investigate we used kinematic modelling of the objects supported by good-resolution wave and current data. We tested the results against actual observations. Return times on likely object migration are the output. The result provides a more precise and quantitative understanding of UXO object behaviour under the severe storm conditions of the Bight. Subsea infrastructure projects in the region need no longer assume that movements occur everywhere, but have tools to determine where and when different objects in the spectrum of UXO have the potential to migrate and repopulate the operating areas.

UXO | UXO migration | storm events | seabed | return time
 UXO | UXO Migration | Sturmereignisse | Meeresboden | Rückkehrzeit

In der Deutschen Bucht (Nordsee) treten mehrmals im Jahr schwere Stürme auf, die durch sehr hohe Wellenbedingungen gekennzeichnet sind. Stellenweise und zu bestimmten Zeiten sind die welleninduzierten Strömungen am Meeresboden dann stark genug, um exponierte, schwere UXO wie Minen und Bomben aus den beiden Weltkriegen deutlich zu verdrängen. Zur Untersuchung verwendeten wir eine kinematische Modellierung der Objekte, unterstützt durch gut aufgelöste Wellen- und Strömungsdaten. Wir testeten die Ergebnisse mit realen Beobachtungen. Das Ergebnis sind die Rückkehrzeiten bei wahrscheinlicher Objektmigration. Das Ergebnis liefert ein präziseres und quantitatives Verständnis des Verhaltens der UXO-Objekte unter den schweren Sturmbedingungen der Bucht. Unter-Wasser-Infrastrukturprojekte in der Region müssen nicht mehr davon ausgehen, dass Bewegungen überall stattfinden, sondern können bestimmen, wo und wann verschiedene UXO-Objekte das Potenzial haben, zu wandern.

Authors

Dr. Chris Jenkins is a Senior Research Scientist of INSTAAR (Institute of Arctic and Alpine Research) of the University of Colorado Boulder, USA.

Sonia Papili is a PhD student at the Renard Centre of Marine Geology, Ghent University, Belgium.

jenkinsco@gmail.com

Acknowledgements to Dr. Peter Menzel and Universität Rostock for assistance with the project and the science.

Introduction

The presence of unexploded underwater munitions from the world wars is a problem for engineering projects in the north European region. Telecommunication, gas and electricity cable installations, wind-energy and petroleum platforms, bridge constructions and trawl-fishing ventures share the problem. For fixed-location projects geophysical surveys locate the most problematic objects close-in to the installations and a clearance can be carried out. But then there are lingering worries that objects outside the narrow survey corridor might migrate back in during strong weather events under severe wave/current conditions.

Some research in Germany has already taken place to address the concerns for offshore projects over potential UXO movement. It has involved advanced modelling of thresholds of movement for different types of UXO, flume tank testing of migration physics under flows (Menzel et al. 2018), and analysis of object responses under changing sea-state conditions (Jenkins 2018). Here we report on work that advances from the earlier studies,

especially with real observational validation of the results.

It is a long time since the original munitions were laid out, and now many are degraded by corrosion, or deeply buried in sediments. The issue of UXO migration therefore applies to a small cohort of the original large population – those which remain at the seabed sediment surface or unbury, either naturally during storms, or by human disturbance.

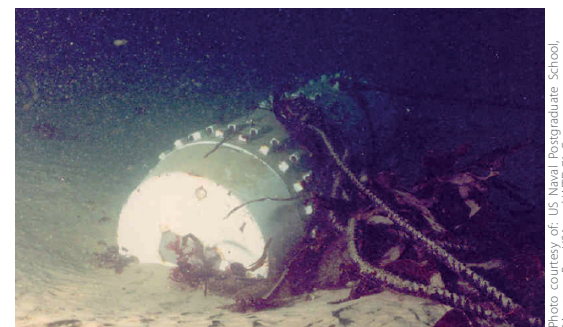


Fig. 1: An instrumented heavy BRM (Burial Registration Mine) module, a surrogate for some types of UXO, resting on the seafloor during a calm period. Note the scour pit

Photo courtesy of: US Naval Postgraduate School, Monterey Bay, USA, and WTD 71, Germany

The evidence for migration

There is little doubt that heavy objects, including UXO, can move around on the seafloor during extreme weather events in some submerged locations. For instance, the SERDP program of the U.S. has released much data showing explicitly that small UXO do migrate under waves and currents in sandy environments (Traykowski 2015). Those data include scanning sonar imagery, monitorings of tagged objects, and repeat multibeam imagery. Other programs in Belgium, France and the U.S. demonstrate with on-board accelerometers that heavy cylinders (500 kg mass, imitating naval ground mines; Fig. 1) shift under strong enough wave conditions (Papili et al. 2014; Guyonic et al. 2007; Bower et al. 2007). While most small movements seem to be related to settlement of the objects into the sediments, there are larger motions, rarer, which are wholesale relocations of the objects. They are documented from fractions of metres over minutes to many metres in the space of weeks.

There is also strong evidence from oil-gas pipelines (data in Tian et al. 2015; and nearshore German North Sea in Bruschi et al. 2014), artificial reef materials (Turpin and Bortone 2002), and coastal boulder deposits (e.g., Cox et al. 2018) supporting the fact of wave/current induced movement of heavy objects at the seafloor, but chiefly in inshore depth-zones.

Severe weather events

Do the necessary conditions for strong movement occur in the German Bight? Certainly, there is a history of very severe storms exceeding wind speeds of 120 km/hr (base of hurricane category), at a frequency of several per year. One dramatic, publicised event in the science realm was storm »Britta« (Pleskachevsky et al. 2012) during which a set of high (>18 m) and long (25 s period, 400 m wavelength) waves caused breakage of equipment high on the FINO1 platform. In the Bight most waves longer than 8 s period are classified as »shallow« or »intermediate« – with strong bottom interaction over most of the basin.

To assess UXO migration potential of the Bight in more detail, West-European Shelf Wavewatch III modelled data are used (source: Copernicus – marine.copernicus.eu). This is a well-validated data product (Tolman et al. 2002) which is widely used for research and engineering purposes. It allows wave climate to be resolved geographically and temporally at 8 km and 1 hour resolution. Waves of >5 m height and >8 s period, representing developed storm conditions, are reported through a subset of data – for 20 months' duration through 2017 to 2018 (Fig. 2). The wave heights and periods lessen to the coasts as wave energy is attenuated by bottom friction, especially at longer wave periods. The surface-wave statistics are converted to

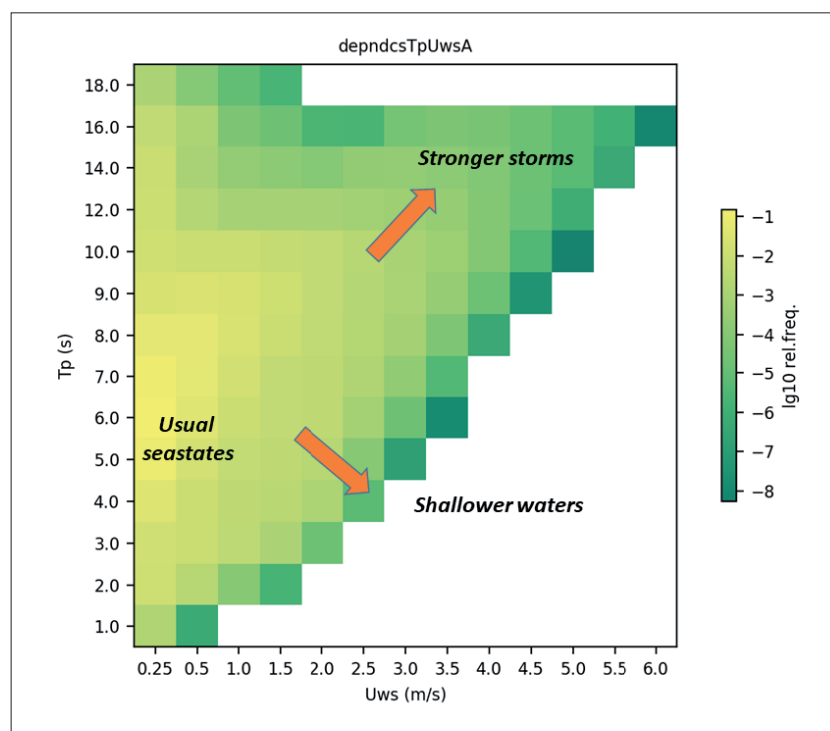


Fig. 2: The total population of wave-induced bottom-velocity amplitudes (U_{ws}) and periods (T_p) in the German North Sea, based on 20 months of Wavewatch III data. The population is over all spatial pixels * time slices. Yellow areas are »usual« conditions and the arrows show important trends in the data. Note the prevalence of events with storm severity, approximately $U_{ws} > 2.5$ m/s

near-seabed velocity amplitudes (U_{ws}) and Shields Parameter values (θ), amongst other parameters. The basis at this stage is Airy theory. The necessary substrate grainsize and stiffness information is obtained from the db-SEABED system (Jenkins 2017), augmented with data from the Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH).

Also for the project, calibrated model data on the currents of the sector are obtained from the BSH. The current data covers months to years in duration from 2006 (including »Britta«) and 2017. They represent most of the flow phenomena: wind-driven geostrophic flows, tidal flows, long-shore drift, storm surge effects. The data are spatial and temporal – at 7 km and 0.25 hour resolution.

In this part of the North Sea near-bottom and on the scales of the UXO, effects from wave-induced »oscillating« flows dominate over effects from the »steady« wind-driven and tidal flows. Tidal flows may be strong at the surface in some channels (up to 2 m/s), but they decrease strongly towards the near-bottom in a thick log-layer. Geostrophic current velocities may attain velocities of 1 m/s, but fade to ~0.2 m within 0.1 to 0.3 mab (metres above bottom). Such near-bottom speeds are insufficient to mobilise the heavy UXO which are of concern here. The wave boundary layer on the other hand is very thin, and substantial velocities – up to 5 m/s or more – appear to operate to within 0.01 to 0.02 mab, so they are the primary forcings

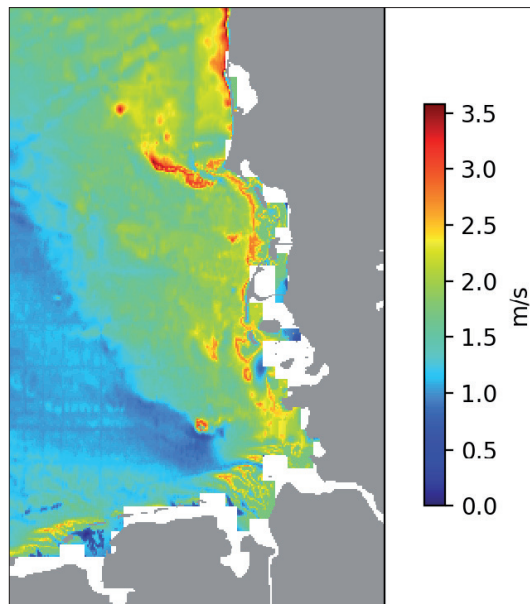


Fig. 3: Near-bottom wave-induced flow velocity amplitudes (m/s) during a severe event in 2018, calculated from Wavewatch III data. The high values (red) tend to coincide with shallow-water areas. (Blank areas are not covered by the wave statistics.) During the event sea-surface significant wave heights (H_s) attained 6 to 9 m over much of the area

to consider for UXO migration. Fig. 3 shows the geographic distribution of the maximum near-bottom wave-induced flow speeds during one severe storm event.

Understanding the scalings of the various flows in their bottom boundary layers is most important for assessing UXO migration potential. Furthermore, it is the peak conditions of the flows which are most important for dislodging and moving the objects. The maximum amplitude of the wave-driven bottom oscillations is the germane statistic, not the ›representative‹ RMS of velocities.

Return times on the strong near-bottom flows

Exceedance counts were calculated per geographic pixel for a set of thresholds of the wave-induced bottom-flow speeds per class of wave period (e.g., >4.0 m/s speeds at 6.0 to 7.0 s periods). Also, for the steady currents similar velocity exceedance counts were tallied. The counts were converted to exceedance return times relative to the data set durations and observation intervals. Return times are an inverse of frequencies. At extremes, one data record exceeding a threshold makes a rare event with a long return time equal to the data set duration, while if the entire data set is over a threshold the return time equates to the observation interval.

UXO kinematics

How should the physics of object mobility be joined with this oceanographic data? First the object mobility physics is analysed by flow speed

and period using a set of simulations. The results per class of velocity and period are compiled into a matrix paralleling that of Fig. 2. Using joint probability the probabilities on the flows are joined with the results of the simulations, to yield joint probabilities of significant movements, i.e., migration.

Simulation is the chosen method because existing parametric models (see Rennie et al. 2017) are valid only for small velocities (approximately <1 m/s), and/or for steady flows. They do not apply to the severe events necessary to move heavy UXO. But also, many ignore the possibilities of objects being ›hidden‹ from flows in scour pits or buried by mobilising sediments. Furthermore, they generally assume an undeformable bottom whereas the UXO of the German Bight are mostly on a soft, mobile sandy substrate.

With proper software coding, simulations can meet the project requirements. The Morison equations provide per-cycle analyses of the in-line motions under the currents and waves. The methods are not as sophisticated as the Navier-Stokes or Lattice-Boltzman styles of computational fluid dynamics, but are scalable with the problem of determining UXO migration potential reasonably accurately over millions of geographic pixels across the area through time periods of decades.

The Morison equations operate in a phase-explicit manner. Active fluid drag, lift and the impulse ›added mass‹ and Froude-Krylov forces are balanced against object inertia, bed frictions (sliding and rolling) and gradients up out of a scour pit. By time-integration the accelerations are converted to velocities and then to displacements – if any occur. The simulations monitor the stages of motion: no motion, rocking through small angles, shifting position slightly, and breaking out (which is deemed as moving the object >1 diameters or leaving the scour pit). Even a small displacement per wave cycle can readily add over time – in one or several storms – to constitute a migration, especially when it is considered that one hour holds 360 10-s cycles. For projects using a narrow survey corridor in some UXO-prone area, even 10 to 20 m of object migration could require a new UXO survey for safety of operations or insurance reasons.

At present the simulation only applies to objects which are not appreciably buried in sediment, that is, are free to move. Directionality and actual paths of migration were not a concern, only whether an object can physically be moved in successive wave cycles – for instance during a storm. And how much movement is possible per wave cycle? Fig. 4 shows some details of the simulation outputs, notably the integrated accelerations, velocities and displacements (red) and their contributing components.

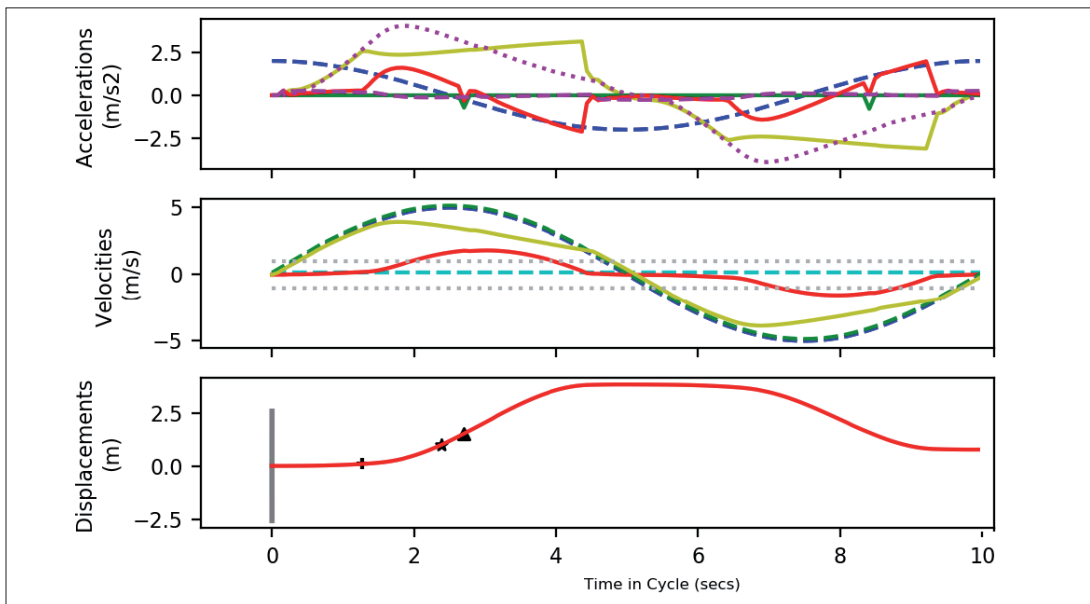


Fig. 4: Results of a kinematic simulation for a BRM object under wave-induced near-bottom flows of 5 m/s speed amplitude and 10 s period. Only a small amount of research has extended into the field of such high flows for seabed environments, but simulations can be applied. The red lines mark the integrated object accelerations, velocities and displacements through one wave cycle. Other-patterned lines represent phase-varying components of the fluid and object accelerations and velocities. The +, *, ▲ symbols indicate the predicted first rocking, shifting and break-out

The simulations also allow for changes to the dimensions of the scour pits themselves. They are linked to values such as the non-dimensional Shields Parameter, at: <0.05, 0.05 to 2.0, >2.0 respectively for bed-load, suspended-load and shear-flow of the surface sediments. In the third class – necessary to move heavy objects – scour pits shallow considerably (e.g., Voropaev et al. 2003) which itself enhances the potential for migration. Object buoyancy in seawater and the sediments affects the degree of burial, especially with jostling by the wave-induced motions.

The final joint probability oceanographic/physics data product yields quantitative values on how often defined objects can be expected to move in different areas of the German Bight. Depending on previous finds in a project area (e.g., OSPAR 2018) simulations should be run for a spectrum of historical objects: general purpose bombs, moored mines, ground mines, large bombs, naval artillery shells and torpedoes. These have varying shapes, dimensions and buoyancies in water and sediment.

Validation testing

As might be imagined, validation data for conditions at the seabed during severe storms affecting heavy UXO objects is extremely difficult to come by. But in recent decades NATO entities have deployed instrumented cylindrical modules on the seabed where they have been subjected to storm conditions. They include the BRM (Burial Registration Mines) of the WTD-71 (Papili et al. 2014) deployed in Germany, France, the United States and Belgium. But also in hurricane-prone waters of the U.S. some observations of object displacements

are available. The collated data for these and similar objects (points, Fig. 5) suggests that near-bottom flow amplitudes of 4 m/s at periods of 6 s are required for appreciable movement. Most records are from shallow waters (<20 m in water depth). The simulation results are broadly compatible with

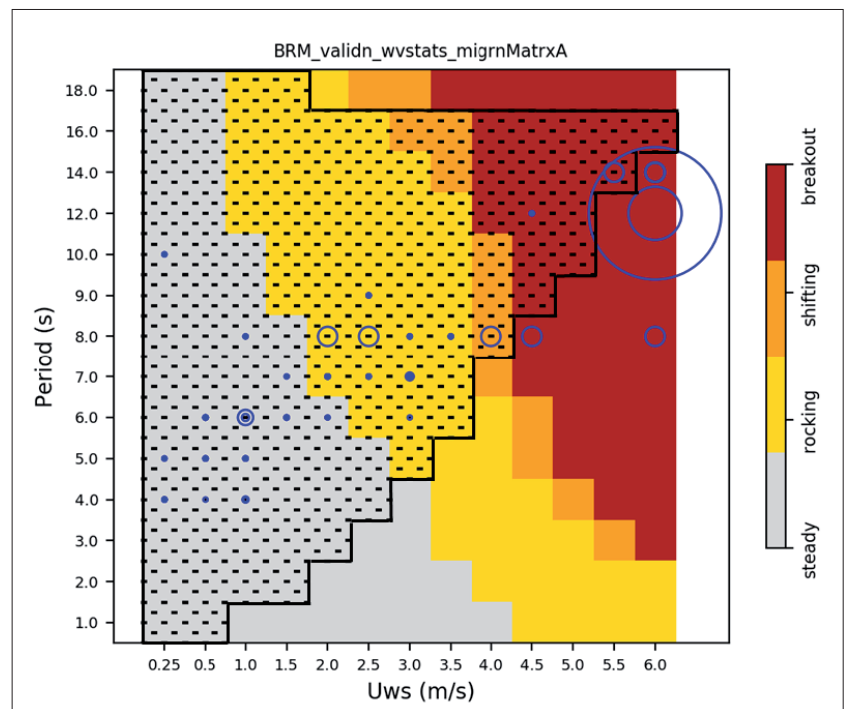


Fig. 5: (Colour grid) Matrix of simulation results by wave bottom orbital velocities and periods. It shows the largest motions possible for BRM objects under the varying conditions: larger object displacements from the yellow to red zones. (Stipple) Superimposed wave climate of the German Bight – same as Fig. 2. (Blue points) The validation data, with the symbol size representing actual displacements observed for BRMs and similar objects, in various worldwide studies

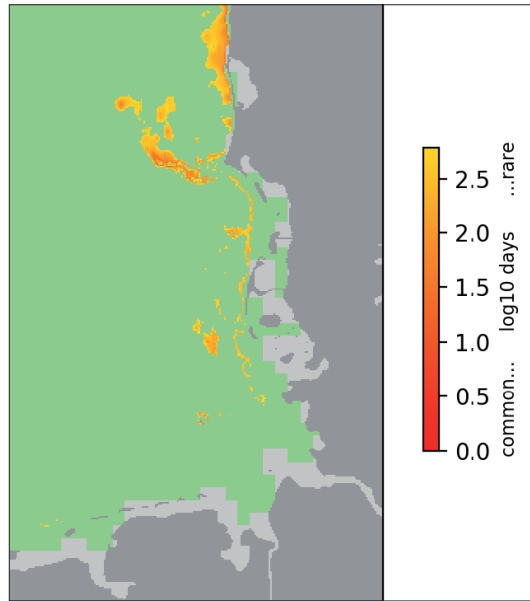


Fig. 6: Migration potential in terms of return times on significant movements for a BRM-type object, computed with 20 months of wave data. Movement is forecast in the orange areas for return times of months to years. (Pale green – no indications of movement. Grey marine areas – no wave data available)

the field data. Long trials of position-monitored objects at the seabed are needed – at locations based on the present results.

Implications

As a result of the study the migration potential of different types and conditions of UXO is better understood in quantitative terms. Previously the understanding was that UXO anywhere in the German Bight might migrate. This meant that expensive resurveys for UXO could be required for entire project areas. Now, narrow areas of concern can be defined precisely spatially (Fig. 6), for various types of UXO. It is also possible for migration risk to be monitored per severe weather event – even in near real-time.

In Fig. 6 is shown the pattern of areas (orange) where UXO migration of exposed objects like the BRM is physically possible at least each year, even monthly in some small areas.

Infrastructure development will certainly continue in the German North Sea. UXO will occasionally appear at the surface as it is disturbed by human activities or environmental changes (such as lower sediment supply from the land, ocean circulation changes). The good news from this project is that UXO migration appears to be highly limited to shallow inshore areas. And, once an episode of potential migration such as a storm is identified spatial patterns of risk can be analysed for that particular event to narrow or even delete the concerns for projects. In this way, the coupled oceanography–object kinematics model presented here provides a tool of use to industry and agencies. //

References

- Bower, Grant R.; Michael D. Richardson et al. (2007): Measured and Predicted Burial of Cylinders During the Indian Rocks Beach Experiment. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, DOI: 10.1109/JOE.2007.890950
- Bruschi, Roberto; Sabrina Bughi et al. (2014): In-place stability and integrity of offshore pipelines crossing or resting on active bedforms or loose or soft soils. *Journal of Pipeline Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 167–199
- Cox, Rónadh; Kalle L. Jahn et al. (2017): Extraordinary boulder transport by storm waves (west of Ireland, winter 2013–2014), and criteria for analysing coastal boulder deposits. *Earth-Sciences Reviews*, DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.12.014
- Guyonic, Stéphane; Mathieu Mory et al. (2007): Full-Scale Mine Burial Experiments in Wave and Current Environments and Comparison with Models. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, DOI: 10.1109/JOE.2007.890951
- Jenkins, Chris J. (2017): dbSEABED: Information Integration System for Marine Substrates. <http://instaar.colorado.edu/~jenkins/dbseabed/>
- Jenkins, Chris J. (2018): Field-Scale Studies of Migration Potential for UXO in the Seabed of the German North Sea. for University of Rostock, August 2018, 152 pp.
- Menzel, Peter; Clemens Schütt et al. (2018): Towards a general prediction-model for the current-induced mobilisation of objects on the sea floor. *Ocean Engineering*, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.06.047
- OSPAR (2018): Other Human Uses and Impacts: Dumped Munitions. Quality Status Report 2010, No. 9. OSPAR Commission, London WC1B 4DA, UK
- Papili, Sonia; Thomas Wever et al. (2014): Storm influence on the burial of objects in a shallow sandy shelf environment. *Marine Geology*, DOI: 10.1016/j.margeo.2014.01.004
- Pleskachevsky, Andrey L.; Susanne Lehner; Wolfgang Rosenthal (2012): Storm observations by remote sensing and influences of gustiness on ocean waves and on generation of rogue waves. *Ocean Dynamics*, DOI: 10.1007/s10236-012-0567-z
- Rennie, Sarah E.; Alan Brandt; Carl T. Friedrichs (2017): Initiation of motion and scour burial of objects underwater. *Ocean Engineering*, DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.12.029
- Tian, Yinghui; Bassem Youssef; Mark J. Cassidy (2015): Assessment of pipeline stability in the Gulf of Mexico during hurricanes using dynamic analysis. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, DOI: 10.1016/j.taml.2015.02.002
- Tolman, Hendrik L.; Bhavani Balasubramanian et al. (2002): Development and Implementation of Wind-Generated Ocean Surface Wave Models at NCEP. *Weather and Forecasting*, DOI: 10.1175/1520-0434(2002)017<0311:DAIOWG>2.0.CO;2
- Traykowski, Peter (2015): MR-2319 Continuous Monitoring of Mobility, Burial, and Re-exposure of Underwater Munitions in Energetic Near-Shore Environments. Appendix D. In: *Second Workshop on Burial and Mobility Modeling of Munitions in the Underwater Environment (2015)*, Final Report, SERDP
- Voropayev, Sergey I.; Firat Y. Testik et al. (2003): Burial and scour around short cylinder under progressive shoaling waves. *Ocean Engineering*, DOI: 10.1016/S0029-8018(02)00146-4

Lokal optimierte Nutzung der Satellitenaltimetrie zur Erfassung des Meeresspiegels

Ein Beitrag von THOMAS ARTZ, ROBERT WEISS, SASKIA ESSELBORN, JULIA ILLIGNER und TILO SCHÖNE

Pegeldaten liegen meist nur für Orte an den Küsten vor; für einige Fragestellungen auf offener See fehlen die Informationen über die Höhe des Meeresspiegels. BfG und GFZ untersuchen, welche Möglichkeiten die Satellitenaltimetrie bietet.

Satellitenaltimetrie | Meeresspiegel | Wasserstandsinformationen
satellite altimetry | sea level | water level information

Gauge data are usually only available for the coasts; for some questions on the open sea there is a lack of information on sea level height. BfG and GFZ are investigating the possibilities offered by satellite altimetry.

Die Satellitenaltimetrie ist eine etablierte Methode, um den Meeresspiegel und seine zeitlichen Veränderungen zu bestimmen. Die geodätische Nutzung begann mit der GEOSAT-Mission, die zwischen 1985 und 1989 aktiv war. Im Jahr 1991 startete die europäische ESA-Mission ERS-1 und damit die kontinuierliche und ununterbrochene Beobachtung des globalen Meeresspiegels. Seit dem Start der US-französischen Topex/Poseidon-Mission im Jahr 1992 befinden sich ständig mehrere Satelliten im Orbit. Seit 2016 ist die Satellitenaltimetrie ebenfalls in das europäische Copernicus-Programm integriert. In den letzten Jahren wird die Satellitenaltimetrie vermehrt auch für Studien in Küstengewässern herangezogen (vgl. Vignudelli et al. 2019) und im Rahmen der voraussichtlich 2021 startenden US-französischen SWOT-Mission werden darüber hinaus flächenhafte Erfassungen für Küsten- und Binnengewässer möglich.

Bei der satellitengestützten Radaraltimetrie handelt es sich um ein aktives Fernerkundungssystem. Der Satellit sendet aus einer Höhe zwischen 700 km und 1300 km Radarpulse zur Erde und misst die Zweiwege-Laufzeit des Signals/Echos. Zusammen mit der genauen Position des Satelliten und zusätzlichen Informationen über Verzögerungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Radarsignals durch die Atmosphäre lässt sich daraus die instantane (Meeres-)Höhe ableiten. Durch die Messungen einer Radaraltimetermission werden typischerweise räumliche Skalen von mehreren 100 km und zeitliche Skalen um einen Monat mit einer Genauigkeit von einigen Zentimetern aufgelöst. Um die Genauigkeit zu steigern, wird eine Vielzahl dieser Echos gemittelt, sodass normalerweise ein Höhenwert pro Sekunde vorliegt. In dieser Zeit bewegt sich der Satellit um ca. 6 bis 7 km

über Grund und tastet in Abhängigkeit von der Sendefrequenz und der Flughöhe dabei eine Fläche von 100 bis knapp 300 km² ab (Stammer und Cazenave 2017). Durch die Kombination mehrerer zeitgleich aktiver Missionen und/oder die Analyse der Messungen entlang von Satellitenbodenspuren ist es möglich, regional deutlich feinere räumliche Skalen aufzulösen.

Wasserstandsdaten werden im Küstenbereich bzw. Seebereich der Nord- und Ostsee für verschiedenste Anwendungen genutzt. Die Wasserspiegeldaten basieren primär auf Pegelbeobachtungen, die sich für marine bzw. ästuarine Fragestellungen überwiegend auf Standorte an der Küstenlinie beschränken. Für eine Vielzahl an Anwendungen bedeutet dies eine signifikante Einschränkung hinsichtlich der Verfügbarkeit und Qualität von Basisinformationen. Daher wird im Rahmen einer durch die BfG gesteuerten Vorstudie durch das Deutsche GeoForschungszentrum (GFZ) untersucht, welche Möglichkeiten sich aus der Satellitenaltimetrie ergeben, wenn die Satelliten als »Pegel am Himmel« aufgefasst werden und somit Quasi-Pegelbeobachtungen auf offener See liefern. Als wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Integration der Satellitenaltimetrie in die derzeitigen Verfahrensabläufe ist eine zu den Pegelmessungen konsistente Aufbereitung der Satellitenbeobachtungen und insbesondere eine Anpassung an die lokalen Gegebenheiten in der Nordsee zu sehen. Dies beinhaltet insbesondere eine Überführung in einen einheitlichen Raumbezug. Die Anpassung der Analyseprozesse zur Homogenisierung von Pegel- und Satellitenaltimetrieprodukten ist das Ziel des aktuellen Vorhabens von BfG und GFZ, um eine Grundlage für die erfolgreiche Weiternutzung zu realisieren. //

Autoren

Dr. Thomas Artz und Dr. Robert Weiß sind Wissenschaftler bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz.
Dr. Saskia Esselborn, Julia Illinger und Dr. Tilo Schöne sind Wissenschaftler am Deutschen GeoForschungszentrum (GFZ) in Potsdam

artz@bafg.de



Literatur

Stammer, Detlef; Anny Cazenave (2017): Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces. CRC Press
Vignudelli, Stefano; Florence Birol et al. (2019): Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone. Surveys in Geophysics, DOI: 10.1007/s10712-019-09569-1.

Erprobung des neuartigen Single-Photon-LiDAR-Messsystems Leica SPL100

Ein Beitrag von ROBERT WEISS, GOTTFRIED MANDLBURGER und THOMAS ARTZ

Um möglichst große Flachwasserbereiche einer Bundeswasserstraße erfassen zu können, muss die Vermessung mit Laserscanning im kleinen Zeitfenster des Tideniedrigwassers stattfinden. Ein neuartiger Sensor mit Single-Photon-LiDAR-Technik verspricht höhere Flächenleistung. Der Sensor wurde von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in drei Testgebieten erprobt. Erste Ergebnisse werden vorgestellt.

ALS | Single-Photon-LiDAR | Beamlets
ALS | single photon LiDAR | beamlets

In order to be able to record the largest possible shallow water areas of a federal waterway, the survey with laser scanning must take place in the small time window of the tidal low water. A novel sensor with single-photon-LiDAR technology promises higher area performance. The sensor was tested by the Federal Institute of Hydrology (BfG) in three test areas. First results are presented.

Autoren

Dr. Robert Weiß ist Wissenschaftler im Referat Geodäsie und Fernerkundung der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) in Koblenz.

Dr. Gottfried Mandlbürger ist Senior Researcher an der TU Wien.

Dr. Thomas Artz ist Wissenschaftler im Referat Geodäsie und Fernerkundung der BfG in Koblenz.

weiss@bafg.de

In Deutschland ist die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) für die Sicherstellung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt auf Bundeswasserstraßen im Binnen- und Küstenbereich zuständig. Im Rahmen der Unterhaltung und des Ausbaus von Bundeswasserstraßen werden unter anderem auch digitale Geländemodelle des Wasserlaufs (DGM-W) benötigt. Die Bundeswasserstraßen werden üblicherweise mit konventionell arbeitenden Airborne-Laserscanning-Systemen (ALS-Systemen) erfasst. Insbesondere im Küstenbereich spielt die Performance solcher Systeme in Bezug auf die Flächenleistung eine entscheidende Rolle. Zur Erfassung und damit auch Modellierung eines möglichst großen Gebiets sollen die Flüge bei Tideniedrigwasser durchgeführt werden. Mit auflaufendem Wasser werden mehr und mehr Geländebereiche mit Wasser bedeckt, was eine ALS-Aufnahme verhindert. Folglich soll eine Datenerfassung im Zeitfenster rund um das Tideniedrigwasser erfolgen, welches naturgemäß relativ kurz ist. Durch seine technischen Möglichkeiten ist der Leica SPL100 eine potenzielle Lösung (Degnan et al. 2016; Degnan et al. 2018; Leica 2020), die über eine höhere Flächenleistung verfügt.

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ist eine dem deutschen Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) nachgeordnete wissenschaftliche Oberbehörde, deren Aufgabe auch darin besteht, die WSV fachtechnisch zu beraten. Im Rahmen dieser Aufgaben werden von der BfG unter anderem auch neuartige technische Systeme erprobt sowie wissenschaftlich-

technische Fragestellungen bearbeitet. Daher erfolgt derzeit durch die BfG eine Evaluierung des Leica SPL100.

Die Single-Photon-LiDAR-Technik des SPL100 vereint zwei wesentliche Neuerungen. Einerseits ist das Empfangselement merklich sensitiver, was den Empfang von deutlich schwächeren Signalen ermöglicht. Andererseits wird bei dem SPL100 der Laserpuls in 100 sogenannte Beamlets aufgespalten, die wiederum jeweils mehrzielfähig sind (maximal zehn Echos). Folglich werden je Laserschuss bis zu 100 Bodenpunkte erfasst. Eine Pulsrate von 60 kHz ermöglicht somit 6 Millionen Messungen pro Sekunde. Der Scanner wurde auf große Flughöhen von 2000 m bis 4500 m optimiert. Jedes Beamlet weist eine Strahldivergenz von 0,08 mrad auf, was aus einer typischen Flughöhe von 3000 m einem Footprintdurchmesser von etwa 0,24 m entspricht.

Im Rahmen einer Beauftragung durch die BfG erfolgten Befliegungen von drei Testgebieten (A, B und C) an Rhein und Mosel in unterschiedlichen Flughöhen. Ziel dieser Befliegungen war es unter anderem, Aussagen zur erreichbaren Punktdichte, Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei bestimmten Flugparametern zu treffen. Die Befliegungen erfolgten am 30. und 31. Oktober 2019.

Einen ersten Eindruck vermittelt die in [Abb. 1](#) dargestellte Rohpunktswolke im Bereich des Deutschen Ecks, wo die Mosel in den Rhein mündet. Anhand dieser Abbildung zeigt sich, dass auch aus großen Höhen relativ schmale Strukturen, wie z. B. Geländer, erfasst werden. Die erreichte Punktdichte entspricht den in [Tabelle 1](#) dargestell-

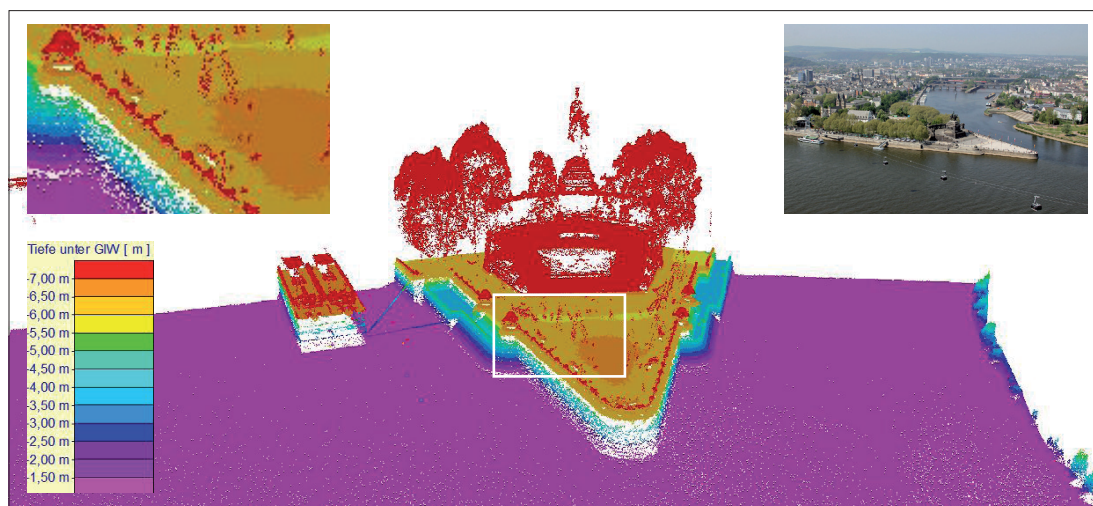


Abb 1: Am Deutschen Eck in Koblenz aufgenommene Rohpunktwolke im Mündungsbereich der Mosel (rechts) in den Rhein (links)

ten Werten bzw. übertrifft diese in Teilen. In Bezug auf die Genauigkeit liegen derzeit noch keine belastbaren Ergebnisse vor. Erste Analysen deuten darauf hin, dass in schwach geneigtem Gelände eine Genauigkeit erreicht werden kann, welche mit konventionellen ALS-Systemen vergleichbar ist. In Gebieten mit großen Neigungen zeigen sich insbesondere im Randbereich größere Abweichungen. Derzeit befinden sich die Daten im Analyse- und Auswerteprozess bei der BfG bzw. der TU Wien. Mit belastbaren Ergebnissen ist im Sommer 2020 zu rechnen.

Der Leica SPL100 wird als topographischer Scanner vermarktet und eingesetzt. Bedingt durch den Einsatz von grünem Laserlicht und durch das kreisförmige Scanmuster (Palmer-Scanner), sind zwar bestimmte bathymetrische Fähigkeiten zu erwarten, jedoch führt die simultane Messung von 100 Beamlets an dieser Stelle zu Problemen. Die Beamlets eines Laserschusses ergeben am Boden ein Raster mit den in Tabelle 1 dargestellten tangentialen und radialen Punktabständen. Diese sind kleiner als der zu erwartende Footprint. Beim Strahlendurchlauf durch das Wasser vergrößert sich der effektive Footprint mit zunehmender Wassertiefe weiter. Infolgedessen überschreitet der effektive Footprint die Abstände der einzelnen Beamlets und eine Signaltrennung ist nicht mehr möglich. So können beispielsweise abgeleitete Punkthöhen

auf die Koordinaten des benachbarten Beamlets bezogen sein. Auf ebenem Untergrund sind diese Effekte kaum nachweisbar.

Bedingt durch die große Flughöhe ergeben sich wesentlich größere Streifenbreiten. Wegen der hohen Messrate werden dennoch Punktdichten von mehr als 20 Punkten/m² aus einer Flughöhe von 3000 m erreicht. Innerhalb eines kurzen Zeitfensters ist es mit diesem Scanner möglich, große Gebiete zu erfassen. Insofern ist dieser Scanner insbesondere für die Datenerfassung einer DGM-W-Modellierung in Binnen- und Küstengebieten eine vielversprechende Alternative. //

Literatur

Degnan, John J. (2016): Scanning, Multibeam, Single Photon Lidars for Rapid, Large Scale, High Resolution, Topographic and Bathymetric Mapping. Remote Sensing, DOI: 10.3390/rs8110958

Degnan, John J. (2018): Airborne and Spaceborne Single Photon 3D Imaging Lidars. In: Proceedings of 21st International Workshop on Laser Ranging, Canberra, Australia

Leica (2020): Datenblatt des Leica SPL100 Single Photon LiDAR Sensors. <https://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/topographic-lidar-sensors/leica-spl100>

Testgebiet	Flughöhe [m]	Fluggeschwindigkeit [m/s]	Punktdichte je Streifen [Punkte/m ²]	Durchschnittlicher Punktabstand		Lücke zwischen Scans [m]	Scanrate [Hz]	Pulsrate [kHz]
				radial [m]	tangential [m]			
A/B	3000	77	~25	0,15	0,18	–	20	45
C	2500	77	~32	0,15	0,15	–	20	45
A/B/C	1600	77	~55	0,15	0,07	0,97	20	50
A/B/C	800	77	~110	0,15	0,04	2,00	20	50

Tabelle 1: Genutzte Flug- und Scanparameter

Objekterkennung im Untergrund

Echoes 10000 von iXblue

Ein Beitrag von GUILLAUME JOUVE und LIONEL FAURE

iXblue entwickelte eine komplette Produktreihe zur Untergrund-Profilierung, die den unterschiedlichen Marktanforderungen auf diesem Gebiet gerecht wird. Durch enge Zusammenarbeit mit der französischen Marine und verschiedenen internationalen Instituten für ozeanographische Forschung, wie der französischen Forschungseinrichtung Ifremer, gelang es iXblue in den vergangenen 30 Jahren, technologisch ausgereifte Qualitätsprodukte hervorzubringen, die auf umfassender Erprobung, wiederholtem Feedback sowie kontinuierlicher Innovation und Weiterentwicklung basieren. Eine vor Kurzem in Schottland durchgeführte Mission bestätigte die herausragende Objekterkennung von Echoes 10000 in seichten Gewässern.

Objekterkennung | Untergrund-Profiler | CHIRP-Technologie
object detection | sub-bottom profiler | CHIRP technology

To meet the various needs of the sub-bottom profiling market, iXblue conceived a complete range of sub-bottom profilers. Developed over the past 30 years in close collaboration with the French Navy and several international oceanographic research institute laboratories, including the French research institute Ifremer, iXblue's products quality and technology expertise come from extensive practicing and cumulative return on experience coupled with constant innovation and evolution. A recent mission in Scotland emphasises Echoes 10000 performance in shallow waters for object detection.

Autoren

Guillaume Jouve ist Geosciences Expert & Business Development Manager bei der Sonar Systems Division von iXblue in La Ciotat in Frankreich. Lionel Faure ist dort Technical & Business Manager.

guillaume.jouve@ixblue.com

Die Datenerfassung und -analyse von Meeres-, See-, Fluss- oder anderen Gewässergründen natürlicher und anthropogener Herkunft durch Untergrund-Profiler (sub-bottom profiler, SBPs) liefern entscheidende Informationen für weiterführende Unterwasserstudien. Die SBPs dienen zur Identifizierung und Bestimmung der Sedimentschichten unter dem Gewässerboden. Die auf diese Weise erfassten Daten geben Aufschluss über die Struktur der Sedimentschichten, wie beispielsweise ihre Dicke, Neigung oder Höhe. Zu den vielfältigen Einsatzbereichen des Systems zählen unter anderem Untersuchungen des Meeresuntergrunds, Überwachung der Biomasse, Ressourcenkontrolle, Verfolgung der Umweltverschmutzung, Geoarchäologie oder Sedimentologie. Die Geräte lassen sich zur Erfassung und Kartierung von vergrabenen Objekten (Kabel, Pipelines usw.), von Gasvorkommen und Schiffswracks verwenden. Mit der Software Delph Seismic, mit 3D-Beobachtung und mit Bestimmung von Sedimentschichten und vergrabenen Objekten können Offshore-Bauunternehmen Gebiete ermitteln, die gesichert werden müssen oder genutzt werden können.

Die Sonar Systems Division von iXblue führte zusammen mit der Universität von Saint-Andrews eine geophysikalische Untergrunduntersuchung vor der schottischen Küste durch. In dem seichten Wasser (<25 m tief) wurde Echoes 10000 (10 kHz) über einen Längenabschnitt von 11 km genutzt.

Hochauflösende seismische Profile zeigen durch Parabolreflexion einzelne Objekte: 10 cm große Steine in Sedimenteinschluss (Abb. 1). Diese Leistung basiert auf dem effizienten, selbst entwickelten Wandler, der die CHIRP-Technologie unter Einsatz von breiten Schallwellen (etwa 20°) nutzt, um ein praktisch unterbrechungsfreies Signal zu erzeugen, das eine Identifizierung der vergrabenen Objekte zulässt. Dieses Hightech-System eröffnet ganz neue Möglichkeiten für die 3D-Kartierung einzelner Untergrundfelsen in seichten Gewässern (<150 m).

Vollständige vertikale Integration

Heute nutzen Untergrund-Profiler (SBP) eine große Frequenzbandbreite und wechseln zwischen niedrigen und hohen Frequenzen, was verschiedene Eindringtiefen sowie eine hohe Auflösung und Bündelung in den obersten 200 m des Sediments ermöglicht. Die Frequenz- und Amplitudenmodulation (FM und AM) wird über ein jeweils festgelegtes Zeitintervall auf die akustischen Signale angewendet. Dieses Vorgehen wird allgemein als CHIRP (Compressed High Intensity Radar Pulse) bezeichnet. SBPs senden ein Signal ins Wasser und empfangen das vom Boden und den Sedimentschichten reflektierte Signal. Das empfangene Signal wird digitalisiert und aufgeschlüsselt. Mit diesem Verfahren lässt sich eine Eindringtiefe in den Untergrund erreichen, die dem eines Nieder-

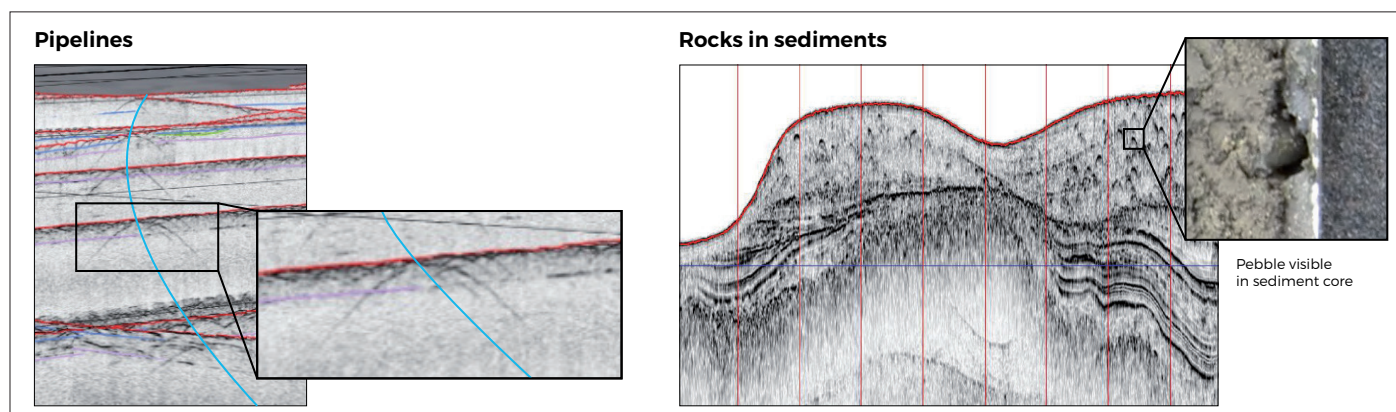


Abb. 1: »Bei einer Öffnung von 15° bis 20° und einem CW-Signal von 10 Hz klingen Rohre lauter und lassen sich selbst in einer felsigen Umgebung besser identifizieren. Auf dieselbe Weise kann ein eingeschlossener 5 cm großer Stein in sandigem Sediment erkannt werden« (Übersetzung aus Bates et al. 2019)

frequenzsystems entspricht – mit der Auflösung eines Hochfrequenzsystems. Zudem bewirkt die Zuordnung der empfangenen Daten zu den gesendeten CHIRP-Signalen eine starke Störfilterung, was den Rauschabstand weiter verbessert.

Das Know-how in der Untergrund-Profilierung basiert auf einem piezoelektrischen Wandler, der im Frequenzbereich von 150 Hz bis 400 kHz zum Einsatz kommt. Diese Hochleistungsgeräte mit breitem Frequenzband eigneten sich ausgezeichnet für die Entwicklung einer kompletten Produktreihe von SBP-Projektoren. Die Geräte wurden durch intern entwickelte hocheffiziente Leistungsverstärker mit niedriger Verzerrung vervollständigt – bei Herstellung aller Komponenten in Eigenfertigung. Die vollständige Kontrolle über die Produktionskette stellt sicher, dass das übertragene akustische Signal der theoretischen CHIRP-Wellenform sehr nahe kommt, was die höchstmögliche Auflösung und Qualität bei der Signalverarbeitung garantiert.

Leistungsmerkmale

Die breite Öffnung der Echoes-Wandler ist entscheidend für die Objekterkennung und für die maximale Eindringtiefe, die von der Meeresgrundtopographie unabhängig ist (Abb. 1).

Abb. 2 belegt die Bildqualität trotz chaotischer, felsiger Unterwasserumgebung.

Breites Anwendungsspektrum

Die Geräte der Produktreihe Echoes lassen sich an einer Stange oder im Schiffsrumpf anbringen oder in unbemannte Überwasserfahrzeuge (USV) einbauen. Die Geräte sind einfach zu handhaben und von Behelfsbooten aus aktivierbar, sie decken ein breites Einsatzspektrum in seichtem wie tiefem Wasser ab; hierzu gehören Tomographie, physikalische Ozeanographie, Meeresgrundkartierung, ozeanographische Untersuchung, Industrieerhebung, geotechnische Untersuchung, Meeresarchäologie, Breitbandprojektion und Verfahren in tiefen Meeresgewässern.

Ständige Weiterentwicklungen und Integrationen sind zu erwarten: iXblue konzentriert sich auf autonome Untersuchungssysteme und arbeitet in Kooperation mit führenden Industriebetrieben und Partnern aktiv an effizienteren, kompakteren und optimal angepassten Lösungen, um die Kosten zu senken und gleichzeitig die Auflösung und Reichweite weiter zu erhöhen.

Software

Die Sonar Systems Division von iXblue arbeitet an der Entwicklung einer offenen Software-Suite, mit der sich unterschiedlichste hydrographische und geophysikalische Daten erfassen, verarbeiten und kartieren lassen. Mit der Delph Software Suite werden die bestmöglichen Ergebnisse aus den SBP-Daten der Echoes-Geräte erzielt – durch Aufarbeitung der CHIRP-Signale und Ergänzung der 3D-Geobezugsdaten, sowohl in Echtzeit als auch offline.

Delph Interpretation ist ein Software-Komplettpaket mit Anwendungen und Tools, die alle Anforderungen an eine einwandfreie Verarbeitung und

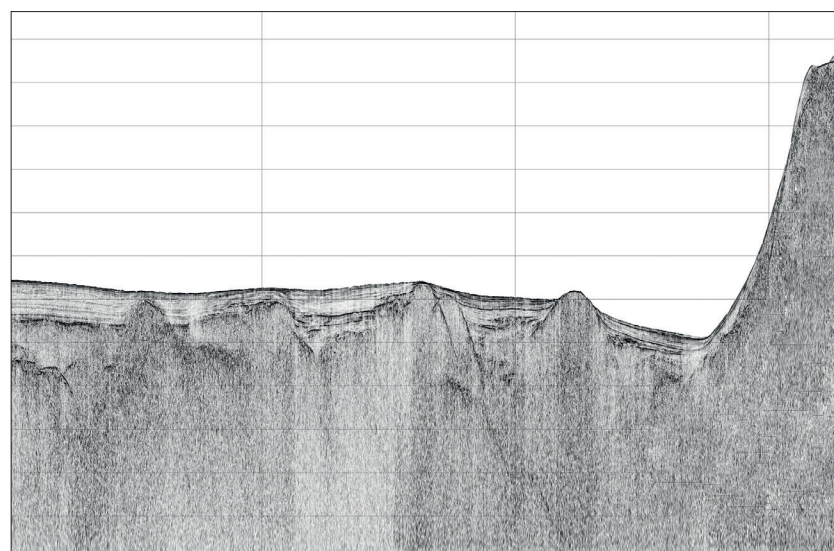


Abb. 2: Mündungsuntersuchung: Gefälle in seichtem bis tieferem Gewässer und effiziente Meeresgrundverfolgung (Kanada)

Interpretation geophysikalischer Datensätze erfüllen und zudem eine optimierte Qualitätskontrolle garantieren. Die Software beinhaltet verschiedene Sensormodule (Delph Sonar/Seismisch/Mag), die mit einer Kartographieschnittstelle (Delph Road-Map) verbunden sind und 3D-Ansichten sowie einen schnellen Zugriff auf Rohdaten und verarbeitete Daten ermöglichen.

Die Verarbeitungsabläufe der geophysikalischen Daten bieten Flexibilität und eine hohe Effizienz beim Management großer Datenmengen und Untersuchungen, bei denen mehrere Sensoren zum Einsatz kommen. Der Nutzer erhält eine klare Übersicht über die Schall-, Tiefenmessungs-, Seismik-, Magnetometer-, Geotechnik- und Kartographiedaten der verschiedenen Sensoren. Gleich-

zeitig wird eine hohe Detailpräzision zur Analyse der Datensätze geliefert. Batch-Verarbeitung und Produktionstools lassen dem Nutzer viel Zeit für Qualitätskontrolle und Interpretation, da langwierige und Routineaufgaben automatisch erledigt werden. So ist beispielsweise die Berechnung des Sedimentvolumens problemlos mit der Software möglich (Abb.3). //

Literatur

Bates, C. Richard; Martin Bates et al. (2019): Geophysical investigation of the Neolithic Calanais landscape. Remote Sensing, DOI: 10.3390/rs11242975

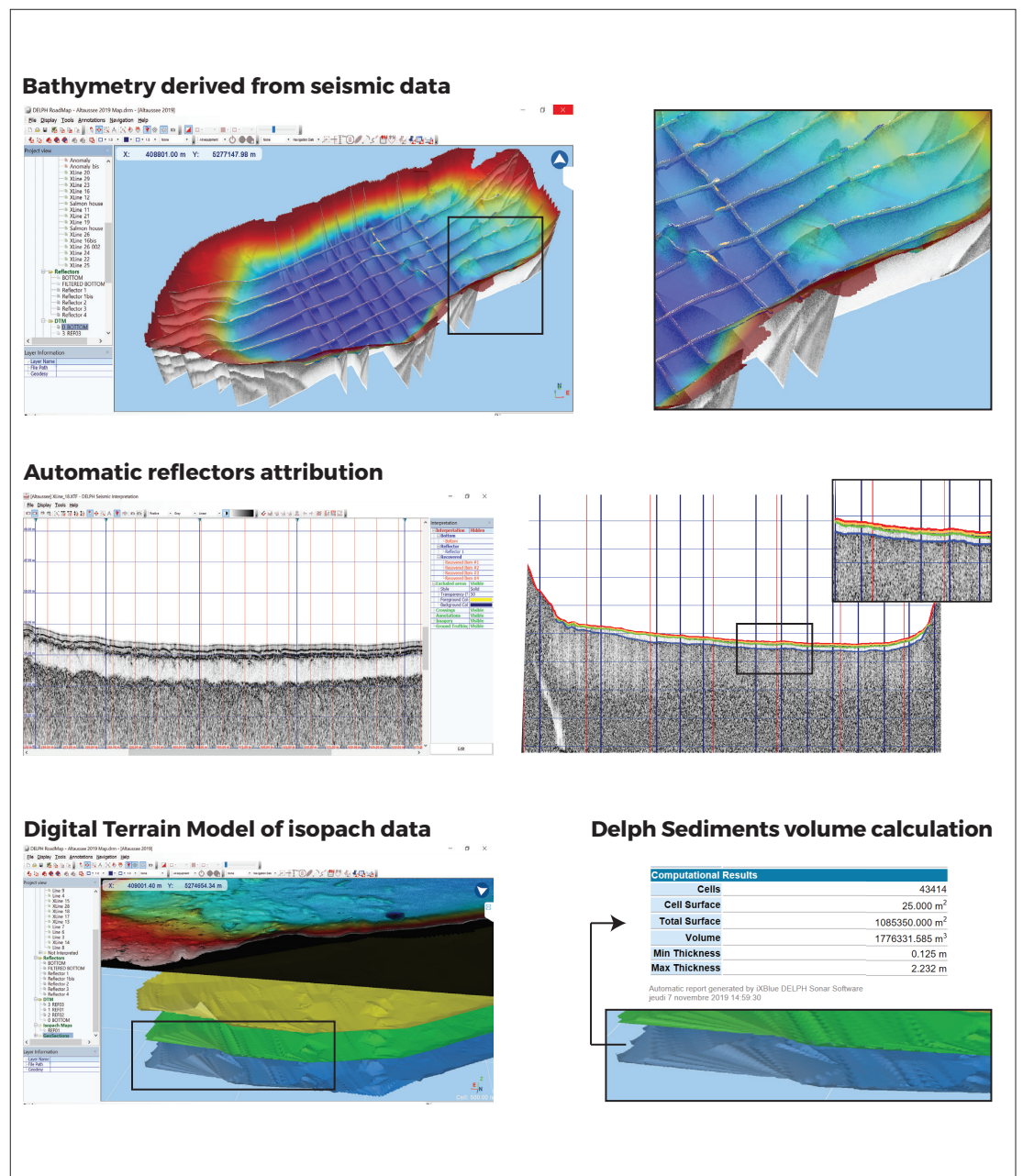
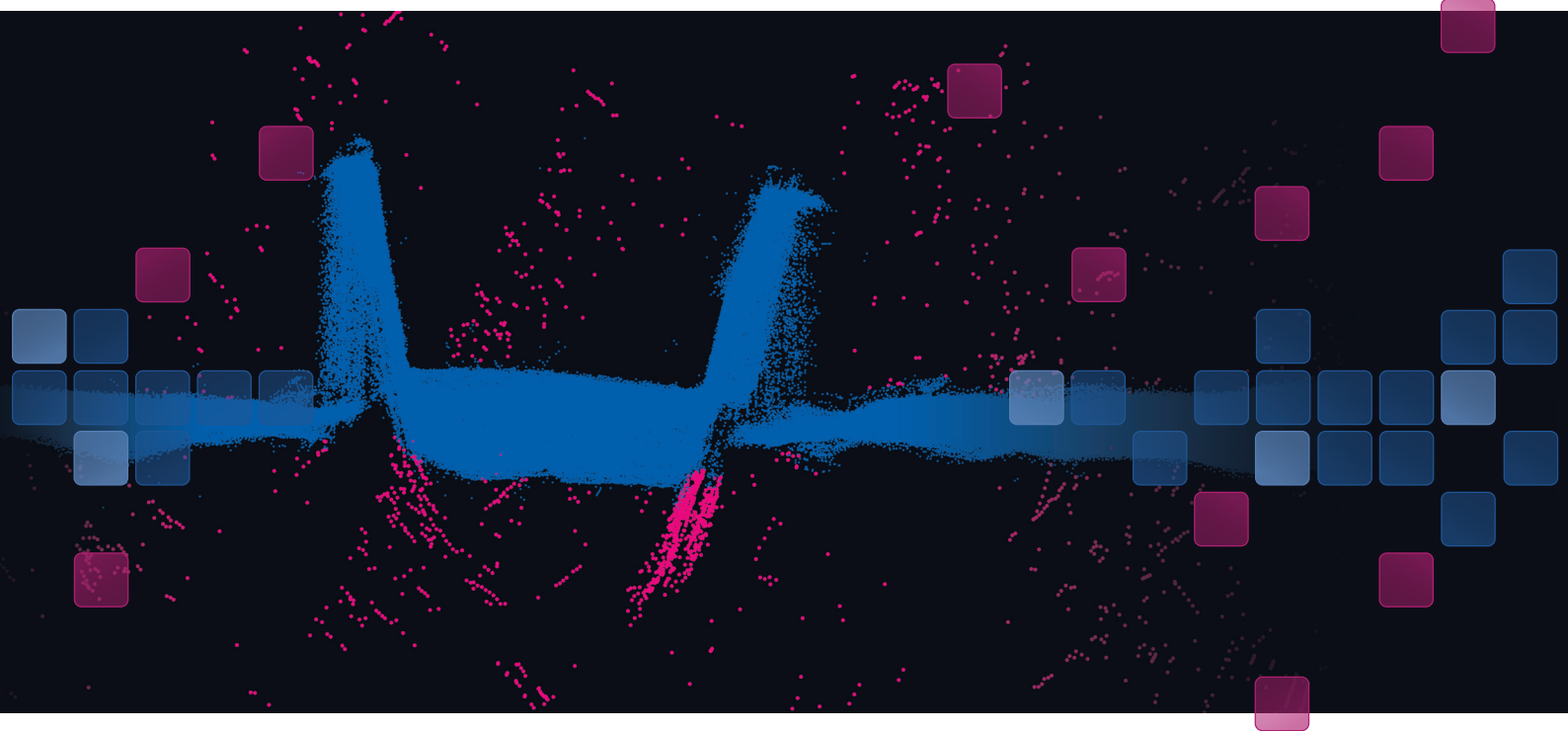


Abb. 3: Verarbeitungsschritte mit der Delph Software zur 3D-Berechnung von Sedimentvolumen am Beispiel eines Sees

Introducing CARIS Mira **AI**



Bring the Noise

The Sonar Noise Classifier is a Gamechanger

Powered by the CARIS Mira AI engine and available now in CARIS HIPS and SIPS 11.3.

The Sonar Noise Classifier automatically identifies noise providing significant reductions in manual cleaning and quickly propels data from acquisition to review.

Reduce manual cleaning by up to 10x at an accuracy of 95%.

Try it now with a **FREE 30-Day Trial!**



LEARN MORE about the Sonar Noise Classifier
www.teledynecaris.com/caris-mira/



TELEDYNE CARIS
Everywhereyoulook™

Part of the Teledyne Imaging Group



Präzise 3D-Positionierung mit GNSS und Polarmessverfahren

Die Leica GNSS-Instrumente empfangen und verarbeiten die Signale aller aktuellen und zukünftigen Navigationssysteme.

Höchste Präzision bei voller Automatisierung der Messabläufe garantieren die Leica Polarmesssysteme.



Leica Geosystems GmbH Vertrieb
www.leica-geosystems.de



- when it has to be **right**

Leica
Geosystems