

HYDROGRAPHISCHE NACHRICHTEN

Journal of Applied Hydrography

06/2019

HN 113

Fokusthema:

*Bauwerke und
Hydrographie*

Beiträge zum

DHyG Student Excellence Award



Consulting



Ocean engineering from space into depth

Realise your projects in cooperation with our hydrographic services

CTDs & SVPs



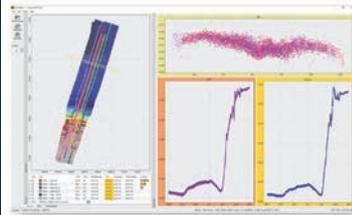
Our hydrography engineers are happy to develop systems tailored exactly to your needs and to provide professional advice and support for setting up your systems and training your staff.

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

Acoustic sensors



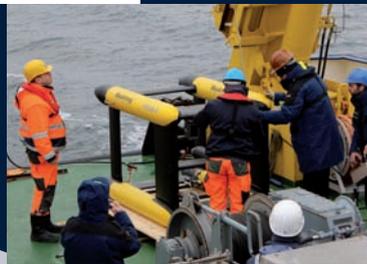
Software



Auxiliary sensors



Integration



**Denmark | Norway | Sweden | United Kingdom | France | Netherlands | Germany | USA | Canada
South America | Australia | Singapore | China**

Liebe Leserinnen und Leser,

diese Ausgabe beschäftigt sich mit Bauwerken und Hydrographie. Im Wesentlichen geht es um die unter Wasser liegenden Teile von Bauwerken (S. 30 und S. 34) oder um Systeme, mit denen unter Wasser liegende Strukturen untersucht werden können (S. 16). Aber nicht nur, denn Staumauern werden von der Landseite aus überwacht (S. 6), und manchmal werden Messungen über und unter Wasser auch kombiniert (S. 26).

Beim Redigieren der Fachbeiträge sahen wir uns in unserem Bemühen, die Wörter einheitlich zu schreiben, mit einer Schwierigkeit konfrontiert. Wir stellten uns die Frage, wie wir mit zusammengesetzten Ausdrücken umgehen sollten, die mit »Unterwasser-« beginnen. Das sind erstaunlich viele: Unterwasseraufnahme, -bauwerk, -bereich, -düne, -einsatz, -gehäuse, -gelände, -geräusch, -kammersystem, -kartierung, -messung, -scanner, -scanning, -scansystem, -struktur, -technik, -vermessung, -video, auch Unterwasser-3D-Aufnahme und Unterwasser-Scantechnik.

Die Frage kam auf, weil sich das Ganze zwar unter Wasser abspielt, nicht aber unbedingt im Unterwasser. Besonders offensichtlich wurde die Problematik in folgendem Satz: »Eine sehr große Bedeutung hat die Unterwasservermessung im Bereich des Unterwassers von Wehren« (siehe den Beitrag ab S. 34).

Beim Unterwasser handelt es sich um eine »Gewässerstrecke unmittelbar unterhalb einer Fallstufe«, also z. B. eines Stauwehrs. Entsprechend ist der Abschnitt oberhalb der Fallstufe das Oberwasser. (Dieses Fachwort führte übrigens zu der Redewendung »Oberwasser haben«, die besagt, dass jemand im Vorteil ist. Das aufgestaute Wasser oberhalb einer Wassermühle treibt das Mühlrad an, während das Unterwasser keine Kraft mehr hat.)

Wenn Unterwasser eine Gewässerstrecke ist, dann könnte Unterwasservermessung ja die Vermessung eben jener Gewässerstrecke meinen. Die Unterwasserkartierung wäre die kartographische Darstellung des Unterwassers und ein Unterwasserbauwerk könnte ein Bauwerk im Unterwasser eines Flusses sein.

Um solchen Verständnisschwierigkeiten entgegenzuwirken und um zu betonen, dass alles unter Wasser stattfindet, könnte man unter Zuhilfenahme von Bindestrichen auch schreiben: Unter-Wasser-Bauwerk und Unter-Wasser-Vermessung. Entsprechend gibt es eine Vor-Ort-Vermessung, die bekanntlich etwas anderes ist als eine Vorort-Vermessung, die freilich auch vor Ort im Vorort stattfindet.

Der beispielhaft zitierte Satz ließe sich also umschreiben: »Eine sehr große Bedeutung hat die Unter-Wasser-Vermessung im Bereich des Unterwassers von Wehren.« Dann wäre die Aussage klar.

Aber lässt sich die Regel mit der Setzung der Bindestriche durchhalten? Leider nein, weil manche Benennungen nach einem anderen Muster gebildet werden. Bei der Unter-Wasser-Kartierung etwa wird es schwierig, das ist ja keine Kartierung, die unter Wasser stattfindet, sondern es werden die unter Wasser liegenden Teile kartiert.

Wir haben uns daher entschieden, die ganz offenbar gebräuchlichen Schreibweisen zu übernehmen, zumal sich die Autoren in dieser Hinsicht allesamt einig sind. Und für den Fall, dass es wirklich mal um die Vermessung oder die Kartierung des Unterwassers geht oder um ein Bauwerk im Unterwasser, so empfehlen wir folgende Schreibung mit Bindestrich: Unterwasser-Vermessung, Unterwasser-Kartierung und Unterwasser-Bauwerk.

Ich wünsche Ihnen eine erhellende Lektüre dieser Ausgabe. Wort für Wort.



Lars Schiller

Hydrographische Nachrichten HN 113 – Juni 2019

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

© 2019

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.

HN 113 – Fokusthema: Bauwerke und Hydrographie



Deformationsanalyse

6 Rückblick auf 15 Jahre Überwachungsmessungen im Wägital

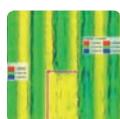
Ein Beitrag von MARITA SCHELLER, MICHAEL MÖSER
und GUNNAR LELLE-NEUMANN



Unterwasserscanner

16 Untersuchungen von optischen Scansystemen zur geometrischen Erfassung von Unterwasserstrukturen

Ein Beitrag von FRANK NIEMEYER, TIM DOLEREIT, MATTHIAS NEUMANN,
JAN ALBIEZ, MATTHIAS VAHL und MICHAEL GEIST

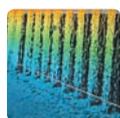


Bauwerksinspektion

26 3D HydroMapper

Automatisierte 3D-Bauwerksaufnahme und Schadenserkenkung unter Wasser für die Bauwerksinspektion und das Building Information Modelling

Ein Beitrag von CHRISTIAN HESSE, KARSTEN HOLSTE, INGO NEUMANN, FREDERIC HAKE,
HAMZA ALKHATIB, MICHAEL GEIST, LISA KNAACK und CHRISTIAN SCHARR

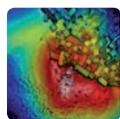


Bauwerksinspektion

30 Multibeam-Vermessung von Spundwänden

Möglichkeiten und Grenzen anhand von Untersuchungen in Bremerhaven

Ein Beitrag von THORSTEN DÖSCHER



Ausbau der Bundeswasserstraße Neckar

34 Hydrographische Vermessung für den Neckarausbau

Ein Beitrag von DIETMAR SELINKA



Wissenschaftsgespräch

38 »Ein Leben ohne Hydrographie wäre möglich, aber sinnlos«

HOLGER RAHLF im Interview



DHyG Student Excellence Award*

44 Reconstruction and visualisation of historic underwater objects at the example of S.S. Terra Nova

An article by FRIEDERIKE TÄUBER



DHyG Student Excellence Award*

49 High-resolution 3D sub-bottom profiling

Principles and case study

An article by FRITJOF BASAN

* Ebenfalls nominiert ist der Beitrag von MONA LÜTJENS über »Virtual reality in hydrography«, der bereits in HN 111 erschienen ist.



Satellitengestützte Seegrundkartierung

52 Aus der Ferne in die Tiefe

Kartierung der Schleswig-Holsteinischen Ostsee durch Satellitendatenanalysen

Ein Beitrag von KNUT HARTMANN, KIM KNAUER, ANDREAS MÜLLER und HANS-CHRISTIAN REIMERS



Neue Präsidentin am BSH

56 Digitalisierung auf allen Meeren

Umfassende Aufgaben für die neue BSH-Chefin

Ein Beitrag von KATRIN BENNER

Rückblick auf 15 Jahre Überwachungsmessungen im Wägital

Ein Beitrag von MARITA SCHELLER, MICHAEL MÖSER und GUNNAR LELLE-NEUMANN

Seit ca. 45 Jahren wird die Stauanlage Schräh im Wägital während eines zweiwöchigen Vermessungspraktikums von Studierenden verschiedener Hochschulen überwacht. Die Staumauer wurde im Jahr 1924 fertiggestellt und ist Bestandteil eines zweistufigen Pumpspeicherwasserkraftwerks. Der Betreiber der Anlage ist die AG Kraftwerk Wägital, welche für die routinemäßigen Überwachungen der gesamten Stauanlage zuständig ist. Im Rahmen der jährlich im September stattfindenden Praktika wird neben einer dreidimensionalen Netzmessung an der Staumauer Schräh und einem Präzisionsnivelement eine Vielzahl an Messverfahren, insbesondere zur Höhenübertragung an der Mauer und über den See, angewendet. Weiterhin werden die Rutschhänge im gesamten Wägital überwacht. Im vorliegenden Beitrag liegt der Schwerpunkt auf dem Vergleich verschiedener Messverfahren. Es werden die Ergebnisse der letzten 15 Jahre vorgestellt und diskutiert.

Autoren

Dr.-Ing. Marita Scheller,
Prof. Dr. Michael Möser und
Dipl.-Ing. Gunnar Lelle-
Neumann sind am
Geodätischen Institut der
TU Dresden beschäftigt.

marita.scheller@tu-dresden.de

Überwachungsmessung | Staumauer Schräh | Wägital | Rutschhang | Höhenübertragung | Nivellement

1 Einleitung

Die Überwachung von Stauanlagen ist ein wichtiger Aspekt, wenn deren Stand- und Funktions-sicherheit nachhaltig beurteilt werden soll. Im Rahmen von Vermessungspraktika an der Stauanlage Schräh und im gesamten Wägital wird es Studierenden verschiedener Hochschulen seit ca. 45 Jahren ermöglicht, eine Vielzahl an Messverfahren zur Überwachung von Absperrbauwerken anzuwenden. Die Kooperation mit dem Betreiber der Anlage, der AG Kraftwerk Wägital (AKW), begann in den 1970er Jahren durch die Fachhochschule (FH) Frankfurt am Main (Schuhr 2009). Seit den 1990er Jahren ist die Professur Ingenieurgeodäsie der Technischen Universität Dresden (TUD) an den Überwachungsmessungen beteiligt. Seit dem Ausscheiden der FH Frankfurt am Main wurden die Messungen im Wägital von der Professur Ingenieurgeodäsie fortgesetzt. Die Überwachungsmessungen an der Staumauer Schräh sind Teil des Wahlmoduls »Deformationsanalyse« der Professur Ingenieurgeodäsie der TUD. Seit 2015 ist die Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt (FHWS) an den Messungen im Wägital beteiligt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse aus 15 Jahren Überwachungsmessungen (2004 bis 2018) im Wägital vorgestellt, da für diesen Zeitraum konsistente Aufnahmen und Auswertungen aller Daten vorliegen. Ziel des Beitrags

ist weniger die Beurteilung der Stabilität der Stauanlage Schräh, dies erfolgt anhand jährlicher Überwachungsmessungen durch den Betreiber, der Schwerpunkt liegt vielmehr in der Gegenüberstellung der Messergebnisse auf Basis verschiedener Messverfahren und deren erreichbarer Genauigkeiten.

2 Staumauer Schräh

Die Staumauer Schräh im Wägital war zur Bauzeit in den 1920er Jahren die größte Betonstaumauer der Welt (Rota 2010). Sie befindet sich im Kanton Schwyz (Innerthal, Schweiz) und ist mit dem Wägitalersee Bestandteil des zweistufigen Pumpspeicherwasserkraftwerks, welches durch die AKW betrieben wird und vordergründig der Stromerzeugung im Winter dient. Die im Jahr 1924 fertiggestellte Gewichtsstaumauer (Abb. 1) besitzt eine Kronenlänge von 150 m und ist vom Fundament bis zur Krone 110,5 m hoch, wovon sich 66 m über der Talsohle befinden. Das natürliche Einzugsgebiet des Stausees hat eine Größe von 42,7 km² sowie zusätzlich 40 km² aus den unterhalb liegenden Gebieten des Ausgleichsbeckens Rempfen, dessen Wasser mittels Pumpen in den See eingespeist wird. Der Wägitalersee ist ca. 5 km lang, maximal 1,2 km breit und besitzt bei einer maximalen Staukote von 900 m ü. M. (in der Schweiz Bezeichnung von Höhen über dem Meeresspiegel) ein

Abb. 1: Staumauer Schräh, links die Luftseite, rechts die Seeseite mit Blick auf die Mauer



Fotos: Marita Scheller (links), Thomas Heinrich (rechts)

Wasservolumen von 147,4 Mio. km³. Der Betriebswasserspiegel könnte bis auf 850 m ü. M. abgesenkt werden (AKW 1930). Aufgrund geologischer und landschaftlicher Gründe kann die Absenkung aber nur bis auf 880 m ü. M. erfolgen (Schmidt und Möser 2006). Ausgeprägte Rutschungen von bis zu mehreren Metern pro Jahr gab es schon vor der Anstauung. Der jährliche Wechsel des Wasserstandes von bis zu 20 m hat zusätzlich einen großen Einfluss auf die Hangbewegungen. Regelmäßige Überwachungsmessungen im gesamten Wägital sind daher unerlässlich.

3 Messmethoden

Die Überwachung der Stabilität der Staumauer erfolgt primär durch eine dreidimensionale Netzmessung zwischen Beobachtungspfeilern und Punkten auf der Mauerkrone sowie durch ein Präzisionsnivellement. Die jährlichen Kontrollmessungen an den Rutschhängen werden mittels Real Time Kinematik (RTK) durchgeführt. [Abb. 2](#) gibt einen Überblick über das gesamte Messgebiet mit der Staumauer im Norden und dem Hauptrutschungsgebiet im Südwesten (Allmeind) sowie weiteren Gebieten in Rot, welche bezüglich der Rutschungen überwacht werden. Weiterhin sind alle wichtigen Anschlusspunkte zur Verbindung der Ergebnisse verschiedener Messverfahren in der Karte eingetragen.

Die Seeuferstraße verläuft auf 12 km Länge um den gesamten See, wobei rechts von der Mauer eine Straße durch einen Tunnel ins nördlich und talabwärts gelegene Vorderthal führt. Das Präzisionsnivellement ([Abb. 2](#), grün) erfolgt entlang der Uferstraßen links und rechts bis ca. 2 km Entfernung zur Mauer, westlich über den Höhenbolzen M84 bis zum Sägewerk (SW) und östlich über den Höhenbolzen K1 bis zum Sennegg (SE) sowie entlang der Fahrstraße durch den Tunnel bis zum Mauerfuß mit Anschluss an Punkt 51. Dabei ergeben sich drei offene Nivellementsenden (SW, SE und 51). Die Nivellementslinien werden streng nach den Vorgaben eines Präzisionsnivellements gemessen, sodass eine Standardabweichung für 1 km Doppelnivellement von 0,4 mm bis 0,8 mm erreicht wird. Ausführliche Erläuterungen zum Präzisionsnivellement geben Möser et al. (2012), Möser (2016) und Scheller et al. (2018a). Die freie Netzausgleichung der Höhenmessungen (Kap. 4) zeigt, dass die Genauigkeitsmaße von der Netzmitte zu den offenen Netzendenden abnehmen, sodass Punktsetzungen bzw. -hebungen erst bei größeren Beträgen durch eine Deformationsanalyse aufgedeckt werden können. Die Herausforderung besteht darin, die drei offenen Enden der Nivellementslinien zu schließen, um eine verlässliche Deformationsanalyse über mehrere Jahre (Epochen) durchführen zu können. An der Mauer erfolgt dies durch drei Verfahren: trigonometrische Höhenübertragung, vertikale Distanzmessung und hängendes Messband ([Abb. 2](#): 51 und K1, blaue Linie). Der Höhenanschluss aller in [Abb. 3](#)

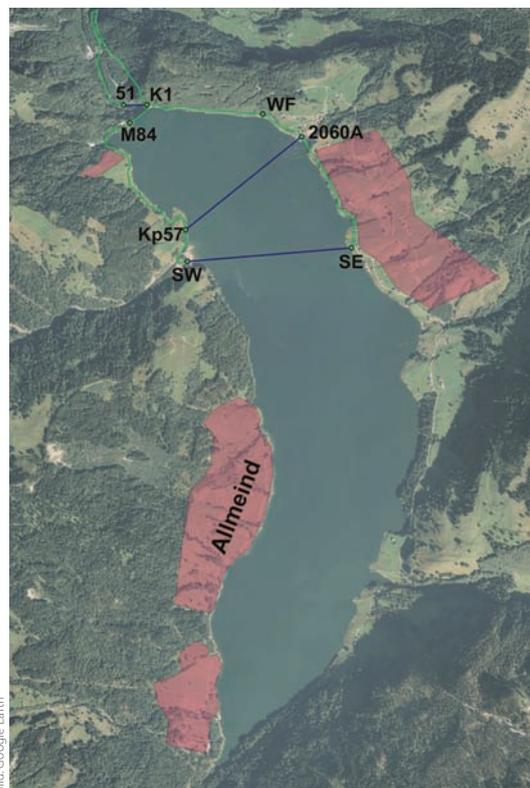
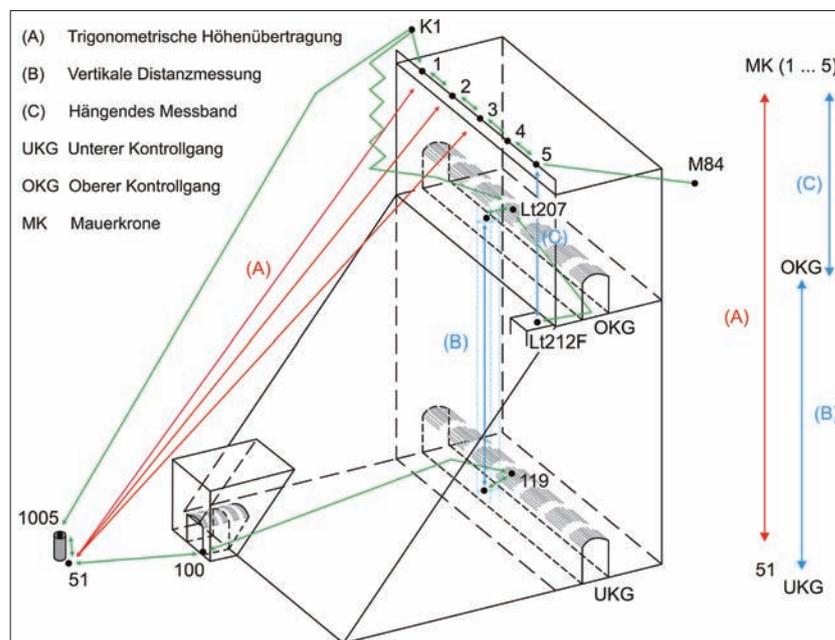


Abb. 2: Überblick Wägital mit der Staumauer Schräh im Norden, den Nivellementslinien in Grün, dem Hauptrutschungsgebiet Allmeind im Südwesten, weiteren Rutschungsgebieten in Rot und allen wichtigen Messpunkten

dargestellten und benannten Festpunkte erfolgt durch Präzisionsnivellement (grün).

An den beiden offenen Enden der Seeuferstraßen ([Abb. 2](#): SW und SE, blaue Linie) kommen vier Verfahren zum Einsatz: trigonometrische Höhenübertragung, Seespiegelfixierung, Talübergangsnivellement und Global Navigation Satellite System (GNSS). Obwohl vor allem die Verfahren Seespiegelfixierung und Talübergangsnivellement eine dem Präzisionsnivellement äquivalente Genauigkeit erreichen, werden hier ausschließlich die Ergebnisse der GNSS-Messungen vorgestellt. Für vertiefende Informationen bezüglich der Seespiegelfixierung und des Talübergangsnivellements sei auf Schmidt und Möser (2006) verwiesen. Ne-

Abb. 3: Messverfahren zur Höhenübertragung an der Staumauer Schräh; in Grün Anschluss aller markierten Punkte durch Präzisionsnivellement



ben den offenen Nivellementsendsen SE und SW werden die Nivellementspunkte Kp57 und 2060A (Abb. 2: Kp57 und 2060A, blaue Linie) durch zusätzliche Messungen über den See miteinander verbunden und tragen somit ebenfalls zur Stabilisierung der Netzkonfiguration bei. Im Folgenden sollen die angewendeten Messverfahren kurz vorgestellt werden. Für weitere Erläuterungen und ausführliche Fehlerbetrachtungen wird auf die Literatur von Bauer (2018), Möser et al. (2012) und Heunecke et al. (2013) verwiesen.

Trigonometrische Höhenübertragung

Die trigonometrische Höhenübertragung ist ein Verfahren zur Bestimmung von großen Höhenunterschieden, basierend auf der Strecken- und Winkelmessung mittels Tachymetrie. Dabei sind als Korrekturen die Einflüsse von Refraktion und Erdkrümmung zu berechnen. Durch gegenseitige und gleichzeitige Beobachtung (Abb. 4, rot) können der Einfluss der Erdkrümmung eliminiert und der Einfluss der Refraktion minimiert werden. Für einen Höhenunterschied im Wägital wurden mindestens zehn Satzmessungen durchgeführt, sodass je nach Entfernung eine Genauigkeit von 1 bis 4 mm erreicht werden kann. Der trigonometrisch bestimmte Höhenunterschied Δh wird mit Berücksichtigung der Instrumentenhöhe i und der Reflektorhöhe z sowie der Messelemente Zenitwinkel ζ und Schrägdistanz s nach folgender Formel berechnet:

$$\Delta h = \frac{1}{2} s \cdot [(\cos_A - \cos_B)] + (i_A - i_B) + (z_A - z_B)$$

Trotz gleichzeitiger Beobachtung bleibt neben der Genauigkeit der Zenitwinkelmessung die Refraktion der größte Fehlereinfluss, insbesondere zwischen Mauerfuß und Mauerkrone, da hier starke Luftturbulenzen stattfinden. An der Mauer wird,

ausgehend von den Mauerpunkten 1 bis 3, jeweils eine trigonometrische Höhenübertragung zum Pfeiler 1005 durchgeführt und damit eine Höhe von ca. 68 m überwunden.

Vertikale Distanzmessung

Ein Lotschacht der Staumauer Schräh besitzt auf jeder Ebene in den Kontrollgängen eine Konsole. Die Konsolen sind mit einer Vorrichtung für Dreifuß und Geräteträger ausgestattet. Nach Aufsetzen der Geräteträger werden diese streng nach den Vorgaben eines Präzisionsnivellements eingemessen mit Bezug zum nächstgelegenen Festpunkt. Im unteren Kontrollgang (UKG) ist dies der Punkt 119 und im oberen Kontrollgang (OKG) der Punkt Lt207 (Abb. 4, blau). Nach Aufsetzen des Tachymeters im UKG wird vertikal auf das darüber befindliche Prisma mehrfach eine Distanzmessung durchgeführt. Um Fehler aufgrund von Phaseninhomogenitäten zu eliminieren, erfolgt die Messung in vier horizontalen Lagen: 0 gon, 100 gon, 200 gon und 300 gon. Weiterhin wird die Messung mit zwei verschiedenen Tachymetern, unter Verwendung des gleichen Reflektors, durchgeführt: 2004 bis 2018 mit der Leica-Totalstation (LTS) TCA2003, bis 2014 mit der LTS TC2002 sowie seit 2015 mit der LTS TS50. Zwischen dem OKG und dem UKG wird bei einem Höhenunterschied von ca. 56 m eine Genauigkeit < 0,5 mm erreicht.

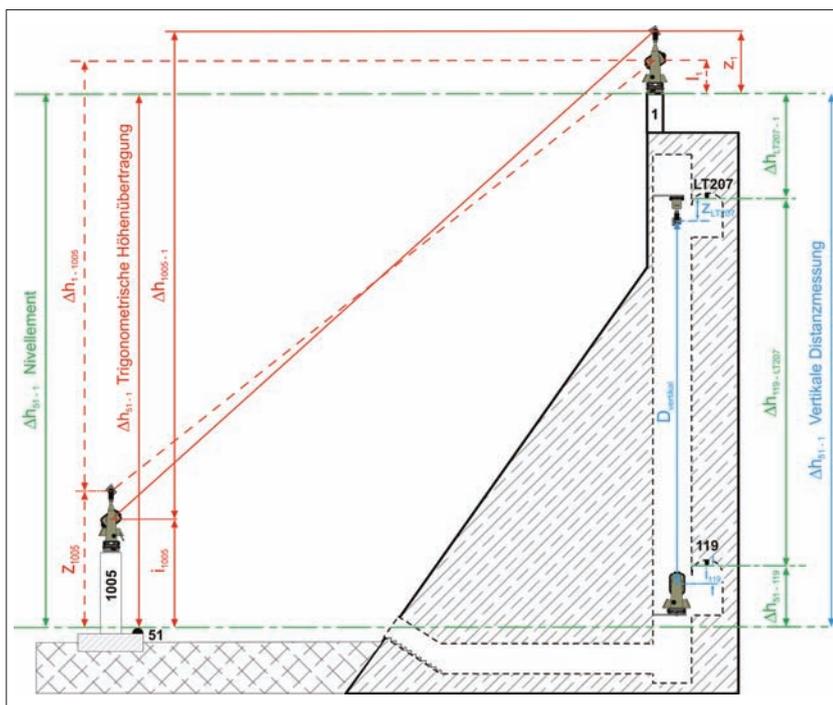
Hängendes Messband

Das hängende Messband ist eine weitere Methode der vertikalen Höhenübertragung sowohl im Innen- als auch im Außenraum. An der Staumauer Schräh wird das Verfahren zwischen dem Punkt 5 auf der Mauerkrone (MK) und dem Festpunkt Lt212F auf der Höhe des OKG angewendet und damit eine Höhe von ca. 13 m überwunden. Die Messung erfolgt mit zwei Stahlmessbändern, welche mit einem Gewicht versehen werden, sodass eine definierte Zugspannung realisiert wird. Während der gleichzeitigen Ablesung oben (MK) und unten (OKG) wird zusätzlich die Bandtemperatur erfasst, sodass der entsprechende Korrekturterm berechnet werden kann. Zur Höhenübertragung kommt das analoge Nivellier Ni002 zum Einsatz. Gemessen wird in zwei Kompensatorlagen im Hin- und Rückweg, sodass sich pro Messung vier Höhenunterschiede ergeben. Die Messungen werden pro Messband mit zwei verschiedenen Gewichten jeweils dreimal durchgeführt, korrigiert und gemittelt. Es ist eine Genauigkeit < 0,5 mm erreichbar.

GNSS – Global Navigation Satellite System

Weitere moderne Methoden zur Höhenübertragung, insbesondere über große Distanzen, sind differenzielle Verfahren unter Nutzung von GNSS, insbesondere wenn dabei geodätische GNSS-Empfänger zum Einsatz kommen. Im Wägital wurden gleichzeitig an vier Messpunkten jeweils Daten für einen Zeitraum von zwei Stun-

Abb. 4: Schematische Darstellung der verschiedenen Messverfahren zur Höhenübertragung an der Staumauer Schräh



den aufgezeichnet. Die GNSS-Beobachtungen dienen der Höhenübertragung über den See, um die zwei offenen Nivellementsenden an den Punkten SW und SE zu schließen und das Höhenetz zusätzlich über die beiden Punkte Kp57 und 2060A zu stabilisieren (blaue Linien in Abb. 2). Die Aufzeichnungsrate betrug 15 Sekunden, wobei trotz Abschattung durch die Berge Signale von 10 bis 16 Satelliten gleichzeitig empfangen werden konnten. Der Höhenanschluss an die jeweiligen Höhenbolzen wurde über Präzisionsnivellement realisiert (Scheller et al. 2018b). Die Auswertung der GNSS-Messungen erfolgte jeweils zwischen zwei gleichzeitig messenden GNSS-Empfängern und lieferte dreidimensionale Koordinatenunterschiede, das heißt unter anderem auch den Höhenunterschied zwischen den beiden Punkten. Diese sogenannte Basislinienauswertung erfolgte mit dem Programm Wa2 im Postprocessing, das heißt im Innendienst nach Abschluss der Messungen. Die erreichbare Genauigkeit liegt dabei je nach Beobachtungsdauer und Umgebungsbedingungen im Bereich bis zu wenigen Millimetern. Die Höhengenaugigkeit ist damit zwar nicht äquivalent der Genauigkeit eines Präzisionsnivellements, kann aber mit entsprechender Gewichtung dennoch zur Stabilisierung des Höhenetzes beitragen. Weiterhin liegt die Stärke des GNSS darin, mit reduziertem personellem Aufwand

große Höhenunterschiede ohne Sichtverbindung zu überbrücken und damit die Überwachungsmessungen konsistent auf das gesamte Wägital auszudehnen.

RTK – Real Time Kinematik

Das Verfahren RTK ist eine spezielle Anwendung des GNSS. Der große Unterschied zur klassischen, statischen Punktbestimmung mittels GNSS liegt darin, dass die Messpunkte nur für wenige Sekunden besetzt werden. Voraussetzung ist eine sogenannte Referenzstation (permanent messender GNSS-Empfänger), die über eine Kommunikationsverbindung (z. B. Funk- oder GSM-Verbindung) kontinuierlich Beobachtungs- und Korrekturdaten an den RTK-Rover liefert, sodass die Koordinaten der Messpunkte in Echtzeit auf wenige Zentimeter genau berechnet werden können. Eine nachträgliche Auswertung im Innendienst kann entfallen. Im Wägital wird südlich des Punktes SE eine Referenzstation so eingerichtet, dass eine Funkverbindung im gesamten Tal sichergestellt ist. Die Punkte werden zu Kontrollzwecken pro Messepoche zweimal in unabhängigen Sessions besetzt. Punktbewegungen, die teilweise bis zu mehrere Meter pro Jahr betragen können, ergeben sich aus den Koordinatendifferenzen zwischen den Messepochen. Die Verfahrensgenauigkeit liegt bei wenigen Zentimetern.

WORKSHOP & Live-Demonstration

EINLADUNG ZUM 21.08.19

zusammen mit



Wir zeigen zwei autonome Fahrzeuge der Firma L3 Technologies (C-Cat 3 und C-Worker 5), die mit einem Teledyne SeaBat T50-R, SBG Apogee INS, Teledyne Marine LIDAR und Teledyne Odom E20 ausgestattet sind.

Neben den Live Demonstrationen werden Präsentationen rund um den Einsatz von autonomen Fahrzeugen in der Hydrographie gehalten. Zudem wird L3 Technologies einen Einblick und Ausblick in ihre Entwicklungen geben.

Datum

21.08.2019 (9:00 bis 16:00)

Veranstaltungsort

HafenCity Universität
(Überseeallee 16, 20457 Hamburg)

MacArtney
UNDERWATER TECHNOLOGY

Anmeldung

Bitte melden Sie sich rechtzeitig an, da nur eine bestimmte Anzahl an Personen an der Veranstaltung teilnehmen kann!

☎ 0431-535500-70

@ mac_de@macartney.com

🌐 <https://www.macartney.de>



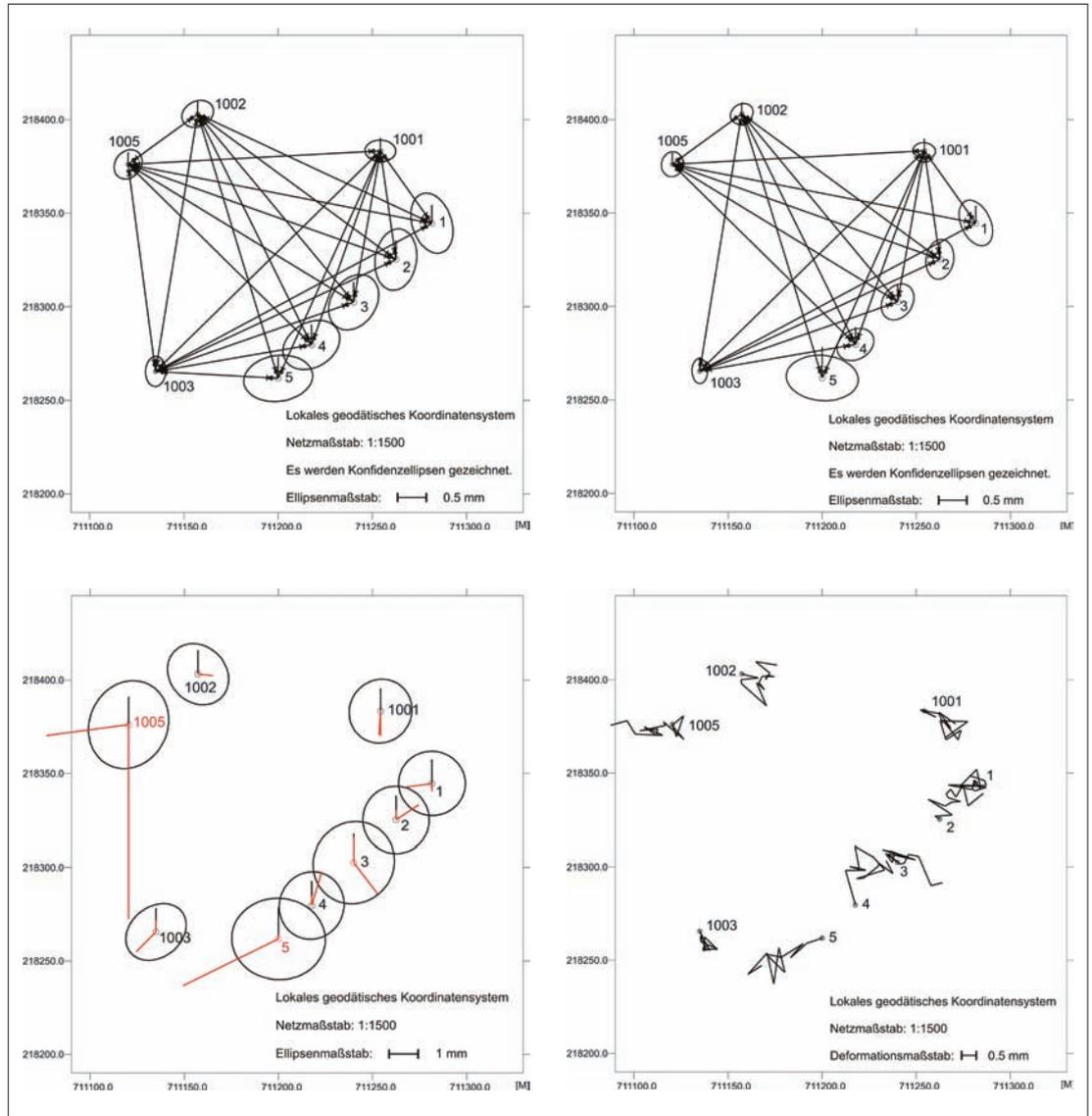


Abb. 5: Ergebnisse der freien Netzausgleichung für das Jahr 2004 (links oben) und für das Jahr 2018 (rechts oben); unten links Ergebnis der Deformationsanalyse zwischen den Jahren 2004 und 2018 aufgeteilt in Lage- und Höhenkomponente; unten rechts Ergebnis der sukzessiven Deformationsanalyse für die Lagekomponente von 2004 bis 2018

Die vorgestellten Verfahren zur Höhenübertragung finden nicht einheitlich in einem Bezugssystem statt (Scheller et al. 2018a). Zur Verknüpfung von Höhenunterschieden in verschiedenen Bezugssystemen sind Reduktionen und Korrekturen mit Kenntnis des Schwerfeldes erforderlich (Torge 2003). Da in diesem Beitrag aber nicht die Ergebnisse als Absolutwerte im Vordergrund stehen, sondern deren Änderungen über die Zeit, kann auf die Umrechnung in ein einheitliches Bezugssystem verzichtet werden. Für eine präzise Deformationsanalyse war es hingegen von entscheidender Bedeutung, dass in den aufeinanderfolgenden Messepochen möglichst gleiche Messbedingungen herrschten sowie die Messkonfigurationen und Berechnungen der relativen Höhen stets identisch realisiert wurden.

4 Ergebnisse

Dreidimensionale Netzmessung

Die dreidimensionale Netzmessung an der Stau-mauer Schräh wird seit 2004 mit dem TCA2003 realisiert (Schmidt und Möser 2009). Das Überwachungsnetz besteht aus vier Beobachtungspfeilern (1001, 1002, 1003 und 1005) sowie fünf Objekt-

punkten (1 bis 5) auf der Mauerkrone (Abb. 5). Die Messung erfolgte als kombiniertes Richtungs- und Streckennetz mit je drei Vollsätzen pro Standpunkt und Messung zu allen sichtbaren Netzpunkten. Die Auswertung wurde als freie Netzausgleichung mit Teilspurminimierung über die vier Pfeilerpunkte mit dem Programmsystem Panda der Firma GeoTech durchgeführt. Neben der Erfassung der atmosphärischen Parameter an Stand- und Zielpunkt, womit eine Korrektur für die Streckenmessungen berechnet werden kann, wird während der Ausgleichung ein Refraktionskoeffizient mitgeschätzt. Die Genauigkeiten der Richtungen und Zenitwinkel σ_r und σ_z sind für den genannten Zeitraum $< 0,5$ mgon und die der Strecken σ_s $0,5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ ppm}$. Abb. 5 stellt beispielhaft die Ergebnisse für die Jahre 2004 (links oben) und 2018 (rechts oben) grafisch dar. Aufgrund starker Refraktions-einflüsse wurden in der Auswertung die Beobachtungen zwischen den Punkten auf der Mauerkrone gestrichen. Sowohl die Genauigkeitsmaße der Punktkoordinaten als auch die Konfidenzellipsen aller Punkte liegen unter einem Millimeter. Lediglich der Punkt 5 weist eine größere Unsicherheit auf. Eine Ursache liegt in der Netzkonfiguration.

Der Punkt 5 kann nur von zwei Pfeilerpunkten aus beobachtet werden, 1001 und 1002. Die Schnittkonfiguration ist ungünstig, was sich in der großen Konfidenzellipse im Ergebnis der Ausgleichungen widerspiegelt. Eine weitere Beobachtung könnte zur Stabilisierung der Netzkonfiguration beitragen, es sind aber keine Sichten zu den Punkten 1003 oder 1005 gegeben.

In Abb. 5, unten links ist das Ergebnis der Deformationsanalyse (DA) von 2004 bis 2018 dargestellt. Hier ist in der Lagekomponente eine Tendenz des Punktes 5 entlang der Mauerkrone in Richtung Südwesten erkennbar, die Höhenkomponente ist stabil. Die sukzessive DA zwischen den Jahren 2004 und 2018 lässt erkennen, dass der Punkt 5 die Verschiebung in den ersten Jahren durchläuft und in den letzten Jahren keine signifikante Bewegung mehr aufzeigt (Abb. 5, unten rechts). Die Verschiebungsvektoren verlaufen eher zufällig in alle Richtungen und liegen im Genauigkeitsbereich der Netzauswertung. Eine Ursache kann darin gefunden werden, dass die Punkte auf der Mauerkrone nicht direkt mit der eigentlichen Mauer verbunden sind und später aufgesetzt wurden. Jeder Punkt befindet sich auf einem separaten Brüstungsglied. Es ist anzunehmen, dass das Brüstungsglied des Punktes 5, unabhängig von der Mauer, eine Bewegungstendenz besitzt, die nicht gefahrenanzeigend ist. Liegt der Fokus auf der Mauerbewegung zwischen See- und Luftseite, besitzen die Punkte auf der Mauerkrone in der Mitte der Mauer eine größere Variabilität als am Mauerrand, was auf das schwankende Wasservolumen des Sees zurückzuführen ist. Entscheidend ist, dass die Punkte keine gemeinsame Tendenz in Richtung Luft- oder Wasserseite aufzeigen und die Differenzen zwischen den Messepochen im Genauigkeitsniveau der Netzmessung liegen. Damit gibt es für die Jahre 2004 bis 2018 keine nachweisliche Deformation an der Staumauer Schräh. Dies gilt analog für die Höhenkomponente, welche keine signifikante Deformation für die letzten 15 Jahre aufzeigt.

Die Pfeilerpunkte 1001 bis 1003 können als stabil betrachtet werden. Der Punkt 1005 zeigt Verschiebungen sowohl in der Höhe als auch in der Lage (Abb. 5, unten). Der Pfeiler hat sich in den letzten 15 Jahren um bis zu 7 mm gesetzt und in Richtung Westen um 2 bis 3 mm verschoben. Dieser Effekt wird auch bei den verschiedenen Verfahren der Höhenübertragung an der Mauer im späteren Verlauf dieses Kapitels sichtbar. Der Pfeiler steht auf einer betonierten Grundplatte, die nur im Erdreich des Talbodens gegründet ist. Er ist also nicht, wie die anderen Sicherungspfeiler, im anstehenden Fels verankert. In der Netzauswertung wäre es sinnvoll, den Pfeilerpunkt 1005 nicht als Datumspunkt, sondern als Netzpunkt in die Ausgleichung einfließen zu lassen. Da für die Auswertung der dreidimensionalen Netzmessung aber nur vier Pfeilerpunkte zur Verfügung stehen, wird auch der Punkt 1005 weiterhin ein datumsgebender Punkt sein.

Präzisionsnivellement

Die Auswertung des gesamten Präzisionsnivellements, bestehend aus mehreren aneinander gereihten Nivellementsziügen, erfolgte als eindimensionales Netz im Programmsystem Panda. Der Datumspunkt der freien Netzausgleichung liegt nahe der Wasserfassung (WF, Abb. 2). Im Mittel über den gesamten Zeitraum wurde eine Standardabweichung für 1 km Doppelnivellement von 0,5 mm erreicht. Da die Genauigkeit der Netzauswertung von der Mitte des Netzes zu den offenen Netzenden abnimmt, liegen die Standardabweichungen der Höhen der Endpunkte (SW, SE und 51) bei 0,6 mm bis 0,8 mm.

Die anschließende Deformationsanalyse (2004 bis 2018), dargestellt in Abb. 6 (S. 12), zeigt das Ergebnis ohne Anschluss an den Mauerfuß, da erst ab 2009 ein nivellitischer Anschluss entlang der talabwärtsführenden Straße bis zum Punkt 51 erfolgte. Die roten Balken sind die Genauigkeitsmaße der Deformationsanalyse und die blauen Balken die Verschiebebeträge der einzelnen Punkte. Die Punkte westlich des Sees in Richtung SW weisen Bewegungsraten im Zentimeterbereich auf. Die Höhenänderungen sind auf Bewegungen der umliegenden Hänge zurückzuführen. Im Bereich westlich der Mauer werden zudem auch RTK-Messungen durchgeführt (Abb. 2), welche die Bewegungsbeträge bestätigen (nicht dargestellt). Auf dem ersten Kilometer nordöstlich der Mauer sind alle Punkte im Fels gegründet. Das gilt ebenso für die Anschlusspunkte K1 und M84 (Abb. 2 und Abb. 3). Hier liegt eine große Stabilität der Netzpunkte vor. Weiterhin weisen alle Punkte, welche an Absperrbauwerken entlang der Seeuferstraße installiert sind, eine hohe Stabilität auf. Dies ist in der kleinen Grafik in Abb. 6 erkennbar. Die Punkte 1 bis 5 auf der Mauerkrone zeigen Deformationen, das heißt die Verschiebebeträge (blau) sind größer als die Genauigkeitsmaße (rot), wohingegen die Punkte des OKG (Lt203 bis Lt211), welche direkt mit der Mauer verbunden sind, keine signifikanten Veränderungen über die letzten 15 Jahre aufweisen. Ausgehend vom Punkt 2056 bis zum SE (östlich des Sees) liegen die Bewegungsraten der Höhenbolzen im Bereich von wenigen Zentimetern. Diese Punkte sind nicht auf Fels gegründet, sondern auf einem Betonsockel geschützt in einem Schacht unterhalb der Erdoberfläche verankert. Auch diese Verschiebungen sind auf Bewegungen der Hänge in Seeufernähe zurückzuführen.

Höhenübertragung an der Mauer

Im Folgenden werden die Ergebnisse verschiedener Verfahren zur Höhenübertragung an der Mauer miteinander verglichen. Da im Zuge der Auswertung der dreidimensionalen Netzmessung der Punkt 1005 Deformationen von mehreren Millimetern in der Höhe aufwies, ist vor allem die Höhenänderung des Punktes 51, welcher auf der Grundplatte des Pfeilers 1005 verankert ist, von In-

Literatur

- AKW (1930): Das Kraftwerk Wägital. Bericht der Bauleitung; Verlag A.-G. Kraftwerk Wägital, Siebnen (Schweiz)
- Bauer, Manfred (2018): Vermessung und Ortung mit Satelliten: Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme, 7. Auflage; Wichmann, Heidelberg
- Heunecke, Otto; Heiner Kuhlmann; Walter Welsch; Andreas Eichhorn; Hans Neuner (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen, 2. Auflage; Wichmann, Berlin/Offenbach
- Kunstmann, Jerome (2019): Bestimmung lokaler Geoidprofile im Wägital (Innerthal, Schweiz); Masterarbeit, TU Dresden, unveröffentlicht
- Möser, Michael; Helmut Hoffmeister, Gerhard Müller; Harald Schlemmer, Rudolf Staiger, Lambert Wanninger (2012): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Grundlagen, 4. Auflage, Wichmann, Berlin/Offenbach
- Möser, Michael (2016): Handbuch Ingenieurgeodäsie: Ingenieurbau, 2. Auflage, Wichmann, Berlin/Offenbach
- Rota, Aldo (2010): Das Kraftwerk Wägital in Kunstbauten im Wägital; TEC21, 37/2010, Band 136, S. 22-28
- Scheller, Marita; Michael Möser; Gunnar Lelle-Neumann (2018a): Bestimmung von Lotabweichungen zur Kombination von GNSS, Trigonometrischer Höhenübertragung und Präzisionsnivellement im Bereich Wägitalsee (Talsperre Schräh, Schweiz); Wissenschaftliche Berichte der Hochschule Mittweida, Workshop: »Messtechnische Überwachung von Stauanlagen«, Nr. 1, 2018, S. 25-32
- Scheller, Marita; Michal Möser; Gunnar Lelle-Neumann (2018b): Überwachung der vertikalen Stabilität der Stauanlage Schräh im Wägital; Wasserwirtschaft, 10/2018, S. 19-24
- Schmidt, Jan ; Michael Möser (2006): Rutschungsbeobachtungen und Höhenübertragung an der Talsperre Schräh (Schweiz); Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule Mittweida (FH), Workshop: »Messtechnische Überwachung von Stauanlagen«, Nr. 1, 2006, S. 89-98
- Schmidt, Jan; Michael Möser (2009): Deformationsanalyse für eine Staumauer in einem zweistufigen Überwachungsnetz; Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Freiberg, Heft 2009 – 1: »10. Geokinematischer Tag«, S. 70-78
- Schurr, Peter (2009): Rückblick auf das Studium des Vermessungswesens anlässlich des 100-jährigen Jubiläums des Fachbereichs 1 der Fachhochschule Frankfurt am Main; Mitteilungen der DVW-Landesvereine Hessen e.V. und Thüringen e.V., Heft 1, 2009, S. 9-13
- Torge, Wolfgang (2003): Geodäsie; de Gruyter, Berlin/New York

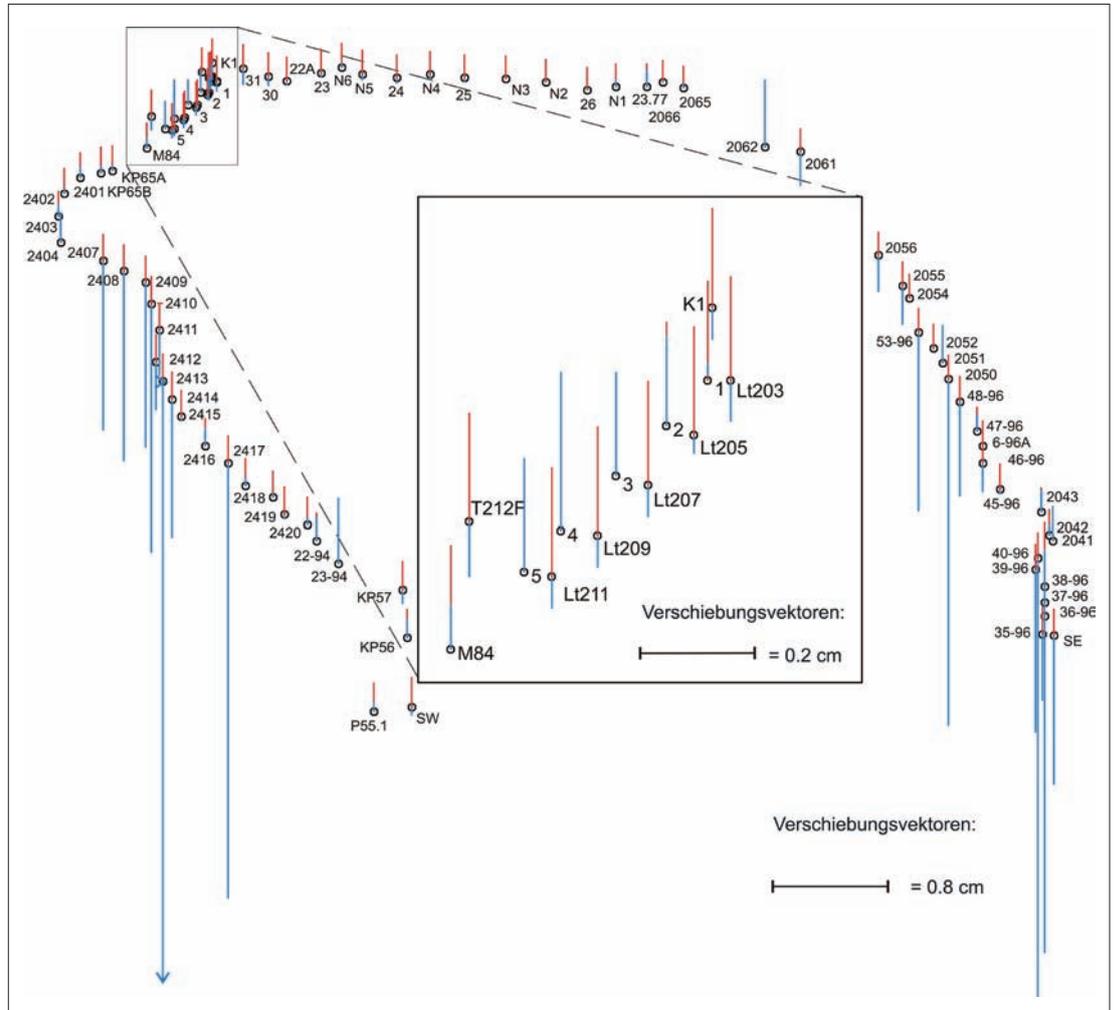


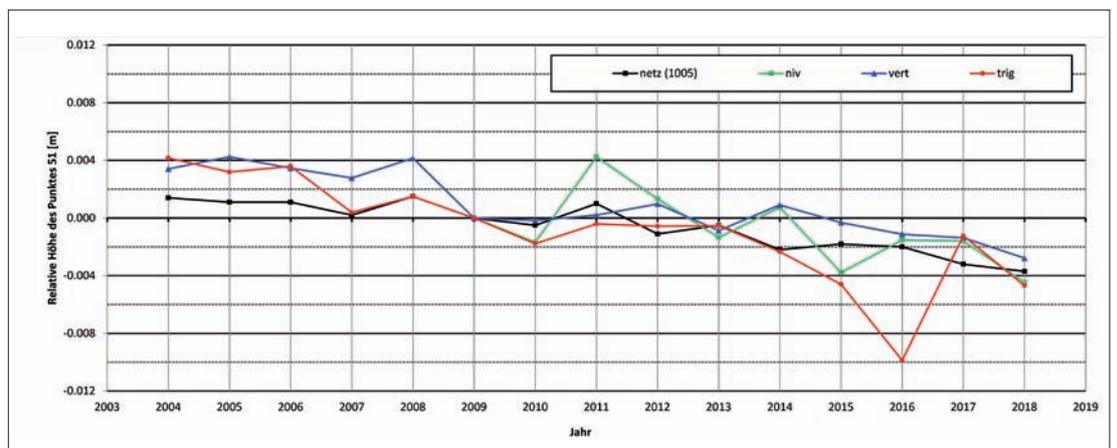
Abb. 6: Ergebnis der Deformationsanalyse des Präzisionsnivelements zwischen 2004 und 2018 mit den Genauigkeitsmaßen in Rot und den Verschiebebeträgen in Blau

teresse. [Abb. 7](#) stellt die Ergebnisse des Präzisionsnivelements (grün) denen der trigonometrischen Höhenübertragung (rot) und der vertikalen Distanzmessung (blau) gegenüber.

Der Anschluss zwischen Mauerkrone (1 bis 5) zum Punkt 51 am Mauerfuß wurde erst ab dem Jahr 2009 nivellistisch durchgeführt, sodass die Höhenänderungen aller drei Verfahren auf das Jahr 2009 reduziert wurden. Die trigonometrische Höhenübertragung erfolgte von mindestens zwei, teilweise von drei Mauerpunkten jeweils zu Punkt 1005. Da die Höhenänderung des Punktes 51 betrachtet wird, müssen die Instrumentenhöhe i und die Reflektorhöhe z im Höhenunterschied

berücksichtigt werden ([Abb. 4](#) und Gleichung auf S. 8). Weiterhin werden die trigonometrischen Höhenunterschiede zwischen den jeweiligen Mauerpunkten zu Punkt 51 gemittelt. Die Standardabweichung liegt in der Größenordnung von 1 bis 3 mm. Das Ergebnis der vertikalen Distanzmessung wird mit zwei Höhenunterschieden aus dem Präzisionsnivelement kombiniert, um den Anschluss an die Punkte 51 (über Lt207 im UKG) und 1 (über 119 im OKG) zu gewährleisten. Mit Berücksichtigung der Verfahrensgenauigkeiten von 0,5 mm bis 4 mm zeigen alle drei Kurven einen ähnlichen Verlauf. Der maximale Höhenunterschied zwischen 2009 und 2018 ergibt sich aus

Abb. 7: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Höhenübertragung an der Mauer, wobei die relativen Höhen auf das Jahr 2009 reduziert wurden, und in Schwarz die relative Höhe des Punktes 1005 als Ergebnis der 3D-Netzmessung



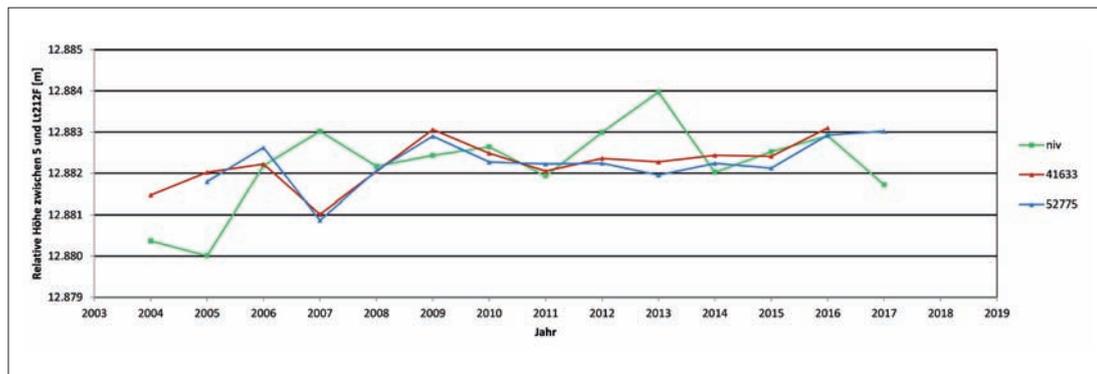


Abb. 8: Gegenüberstellung der relativen Höhe aus dem Präzisionsnivellement (in Grün) und der Messung mit hängendem Messband (in Rot und in Blau) zwischen den Punkten 5 auf der Mauerkrone und Lt212F auf Höhe des OKG

dem Nivellement mit -3 mm, aus der vertikalen Distanzmessung mit -4 mm und aus der trigonometrischen Höhenübertragung mit -5 mm und stimmt damit sehr gut überein. Sowohl die grüne als auch die rote Kurve lassen jeweils einen Ausreißer erkennen. Der Ausreißer der grünen Kurve im Jahr 2011 ist auf mindestens eine Fehlmessung im Bereich des talabwärtsführenden Nivellementsuges zurückzuführen. Der Ausreißer der roten Kurve im Jahr 2016 geht auf eine fehlerhafte Bedienung eines Instrumentes zurück.

Interessant ist der Ergebnisvergleich aller drei Verfahren der Höhenübertragung mit dem ausgeglichenen Ergebnis der dreidimensionalen Netzmessung. In [Abb. 7](#) stellt die schwarze Kurve die Höhenänderung des Punktes 1005 dar. Eine Reduktion auf den Punkt 51 war hier nicht möglich, da der Höhenunterschied zwischen 1005 und 51 zum Zeitpunkt der Netzmessung unbekannt war. Mit der Annahme, dass die Verschiebung in der Höhe des Pfeilerpunktes 1005 nicht unabhängig von der vertikalen Bewegung der Grundplatte mit Punkt 51 ist, kann ein Vergleich aller vier Kurven erfolgen. Auch die schwarze Kurve zeigt einen den Verfahren der Höhenübertragung äquivalenten Verlauf. Die maximale Höhenänderung zwischen 2009 und 2018 liegt bei -4 mm und passt damit sehr gut zu den Ergebnissen der drei Verfahren zur Höhenübertragung. Damit wird gezeigt, dass mit Anwendung aller vier Verfahren die Deformation des Punktes 51 (1005) detektiert werden kann. Die Standardabweichung der vier Höhenänderungen über den Zeitraum 2009 bis 2018 liegt bei 1 mm.

In [Abb. 8](#) ist das Ergebnis der Höhenübertragung mittels hängendem Messband (rot und blau) sowie die relative Höhe aus dem Präzisionsnivellement (grün) zwischen dem Mauerpunkt 5 und dem Punkt Lt212F grafisch dargestellt. Die rote und die blaue Kurve der zwei verwendeten Mess-

bänder haben einen nahezu identischen Verlauf. Weiterhin weist der Höhenunterschied zwischen den beiden Festpunkten keine signifikante Veränderung mit der Zeit auf. Das Jahr 2007 ist demnach als Ausreißer zu deklarieren. Die grüne Kurve weicht sowohl 2005 als auch 2013 deutlich von den anderen beiden Kurven ab. Sowohl im Jahr 2005 als auch im Jahr 2013 ist von einer Fehlmessung im Nivellement auszugehen. Die Werte der übrigen Jahre zeigen hingegen eine große Übereinstimmung zwischen der Messung mit hängendem Messband und dem Präzisionsnivellement. Die maximalen Differenzen liegen im Bereich von einem Millimeter. Beide Verfahren besitzen eine Genauigkeit von 0,5 mm, womit die Differenz im Bereich der Verfahrensgenauigkeiten liegt. Das hängende Messband kann demnach eine Alternative zur klassischen Anwendung des Präzisionsnivellements sein.

GNSS – Höhenübertragung über den See

Die statischen GNSS-Messungen werden seit 2016 auf den vier Punkten SE, SW, Kp57 und 2060A ([Abb. 2](#)) mit einer Antennen-Empfänger-Kombination von Leica (GS15, GS14 und 2-mal GS12) durchgeführt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf dem Höhenunterschied Δh zwischen den Punkten SE und SW sowie den Punkten Kp57 und 2060A. Die relativen Höhen wurden als Ergebnis der im Kapitel 3 erläuterten Basislinienauswertung erhalten. Da die Auswertung für jede Basislinie separat und die Beobachtungen teilweise zeitlich versetzt erfolgten, können die Dreiecksschlüsse (Schleifenschlussfehler) zwischen den Messpunkten zusätzlich Auskunft über die Genauigkeit der berechneten relativen Höhen geben. In [Abb. 9](#) sind für alle drei Messepochen (2016 bis 2018) neben den relativen Höhen (schwarz) die Dreiecksschlüsse in Rot dargestellt. Die Dreiecksschlüsse aller drei

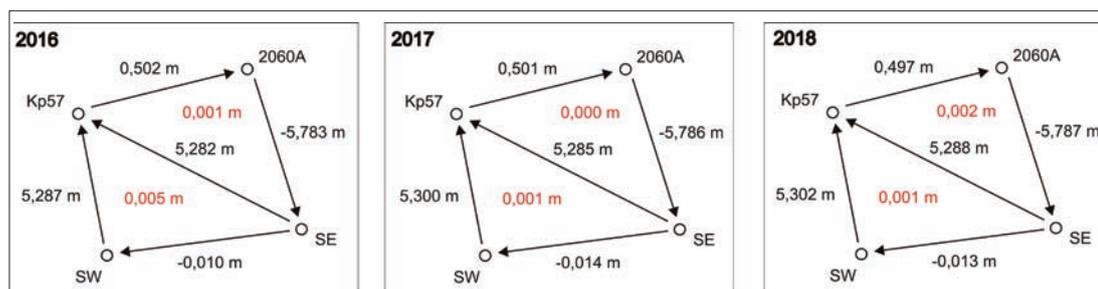


Abb. 9: Relative ellipsoidische Höhen der GNSS-Messungen als Ergebnis der Basislinienauswertung (in Schwarz) und die Dreiecksschlüsse (in Rot)

Tabelle 1: Ergebnis der relativen Höhenbestimmung über den See mittels GNSS zwischen den Punkten SE und SW sowie den Punkten Kp57 und 2060A, dargestellt sind ellipsoidische Höhenunterschiede und die Wiederholgenauigkeiten aus zwei unabhängigen Sessionen

Jahr	Δh [m] SE-SW	$\sigma_{\Delta h}$ [m] SE-SW	Δh [m] Kp57-2060A	$\sigma_{\Delta h}$ [m] Kp57-2060A
2016	-0,010	0,006	-0,502	-
2017	-0,014	0,003	-0,501	0,003
2018	-0,011	0,009	-0,497	-

Messeperioden liegen mit maximalen Werten von 0,005 m im Bereich des Genauigkeitsniveaus der GNSS-Messungen von einigen Millimetern.

Tabelle 1 stellt die relativen Höhenunterschiede der Punkte SE und SW sowie der Punkte Kp57 und 2060A als einfaches arithmetisches Mittel zwischen zwei Sessionen und deren Wiederholgenauigkeit dar. Sowohl 2016 als auch 2018 konnten die Messungen auf dem Punkt Kp57 aufgrund von Messfehlern nicht zur Auswertung verwendet werden, sodass hier keine Wiederholgenauigkeit vorliegt. Nicht dargestellt sind die relativen Höhen zwischen den Punkten SE und 2060A, SE und Kp57, SW und 2060A sowie SW und Kp57. Die Wiederholgenauigkeiten für diese Höhenunterschiede liegen zwischen 0,002 m und 0,006 m. Im Mittel kann eine Standardabweichung von 0,004 mm angegeben werden, sie ist damit eine Größenordnung schlechter als die des Präzisionsnivelements. Hier ist zu diskutieren, inwieweit das Messverfahren GNSS zur Stabilisierung des Höhennetzes beitragen kann. Während der Messkampagne 2018 wurden im Rahmen einer Masterarbeit Messungen mit geodätischen Messausrüstungen (Trimble-Antennen und Leica-Empfänger) durchgeführt, welche gegenüber der bisher verwendeten Antennen-Empfänger-Kombinationen Vorteile be-

züglich der Abschirmung gegen die unerwünschten Mehrwegeeffekte haben. Weiterhin erfolgten die statischen Messungen mit einer Beobachtungsdauer von mindestens acht Stunden. Die Auswertung hat gezeigt, dass die relativen Höhen über eine Beobachtungsdauer von 2 h mit einer mittleren Standardabweichung von 5,2 mm und über eine Beobachtungsdauer von 8 h mit einer Standardabweichung von 2,2 mm bestimmt werden konnten (Kunstmann 2019). Folglich ist auch mit Höhenunterschieden auf Basis von GNSS-Messungen eine Stabilisierung des Höhennetzes möglich, insofern die relativen Höhen entsprechend in der Netzausgleichung gewichtet werden.

RTK-Messungen zur Beobachtung von Hangrutschungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der RTK-Messungen ausschließlich für den Hauptrutschungsbereich Allmeind (Abb. 2), welcher unbebaut ist, betrachtet. In Abb. 10 sind die Lageverschiebungen in Rot und die Veränderungen in der Höhe in Blau dargestellt. Tabelle 2 fasst die jährlichen dreidimensionalen Verschiebebeträge für die am stärksten verschobenen sechs Punkte im Bereich Allmeind (3, 4, 12A, 41, 42, 43) zusammen. Im Bereich Allmeind gibt es für den Zeitraum zwischen 2004 und 2018 maximale Verschiebungen von 6 m in der Lage (3, 4, 41 und 43) und 2 m in der Höhe (3 und 302), was einer mittleren Lageverschiebung von 0,4 m/a und einer mittleren Höhenverschiebung von 0,1 m/a entspricht. Die Lageverschiebungen folgen der Neigung des jeweiligen Hanges. Wie schon in Schmidt und Möser (2006) diskutiert, sind die Punktbewegungen im oberen Bereich des Hanges größer als im Bereich des direkten Seeufers. Damit liegt die primäre Ursache der ausgeprägten Punktbewegungen nicht an der jährlichen Füllstandsänderung des Sees um bis zu 20 m, sondern findet seine Ursache in starken Schneeschmelzen und Regenereignissen. Besonders starke Verschiebebeträge wurden zwischen September 2004 und September 2005 detektiert. In Rücksprache mit dem Betreiber der Anlage gab es im August 2005 besonders starke Regenfälle mit insgesamt 334,4 mm. In den anderen Untersuchungsgebieten (Abb. 2, rot) liegen die Verschiebungsvektoren im Bereich von wenigen Zentimetern. Im Gebiet des Ortes Innerthal konnten im Zeitraum 2004 bis 2018 keine signifikanten Hangbewegungen beobachtet werden.

Abb. 10: Verschiebungsvektoren über 15 Jahre (2004 bis 2018) der Lagekomponente in Rot und der Höhe in Blau im Bereich Allmeind auf Basis von RTK-Messungen



Bild: Google Earth

5 Zusammenfassung

Die Zusammenarbeit mit dem Betreiber der Anlage, der AG Kraftwerk Wägital, ermöglicht es, den Studierenden eine Vielzahl von Messverfahren an der Stauanlage Schräh im Innerthal (Schweiz) praktisch anzuwenden. Für sichere Aussagen bzgl. Deformationen wird vorausgesetzt, dass sich sowohl die Messkonfiguration als auch die Instrumente und der Beobachter möglichst nicht

Punkte	Start- und Endjahr													
	2004 2005	2005 2006	2006 2007	2007 2009*	2009 2010	2010 2011	2011 2012	2012 2013	2013 2014	2014 2015	2015 2016	2016 2017	2017 2018	
3	0,66	0,41	0,42	1,46	0,38	–	–	0,56	0,12	–	–	0,19	0,22	
4	1,56	0,66	0,35	1,06	0,35	0,40	0,28	0,32	0,08	–	–	0,22	0,15	
12A	0,60	0,45	0,11	0,62	0,14	0,18	0,14	–	–	–	–	–	0,13	
41	0,74	0,50	0,29	1,08	0,33	0,33	0,34	0,66	0,20	0,74	0,27	0,30	0,36	
42	0,50	0,31	0,15	0,55	0,17	0,19	0,17	0,26	0,07	0,26	0,14	0,14	0,15	
43	1,39	0,61	0,31	1,05	0,34	0,43	0,29	0,42	0,08	0,32	0,24	0,28	0,30	

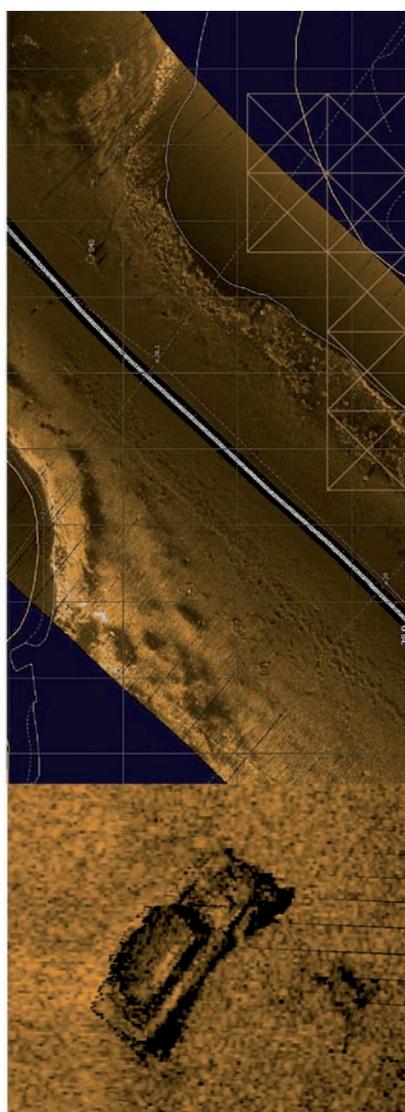
Tabelle 2: Dreidimensionale Verschiebungsvektoren in Metern pro Jahr für ausgewählte Punkte am Rutschhang Allmeind auf Basis von RTK-Messungen (* Zweijahresperiode)

ändern. Der Beitrag zeigt, dass trotz jährlich wechselnder personeller Besetzung eine hohe Genauigkeit auf Basis verschiedener Verfahren erreicht werden kann. Der Vergleich von vier Verfahren zur Höhenübertragung an der Mauer ergab Standardabweichungen besser einem Millimeter. Weiterhin lassen die Messungen und Deformationsanalysen, insbesondere des dreidimensionalen Netzes und des Präzisionsnivelements, der letzten 15 Jahre erkennen, dass die Stauanlage Schräh für den Zeitraum 2004 bis 2018 als stabil eingestuft werden kann. Die Überwachungsmessungen der Studenten sind dabei nur ein Zusatz zu den jährlich seit Baubeginn in unterschiedlicher Intensität durchgeführten Überwachungsmessungen durch den Betreiber. Von großem Inter-

esse sind dabei auch die RTK-Messungen an den Rutschhängen, welche für ausgewählte Punkte im Bereich Allmeind bis zu 0,5 m/a (dreidimensionale Verschiebungsvektoren) betragen können. Im bewohnten Bereich Innerthal konnten hingegen keine signifikanten Hangbewegungen beobachtet werden. //

Dank

Ein besonderer Dank geht an den Betreiber der Stauanlage Schräh, die AG Kraftwerk Wägital, hier insbesondere an den Ansprechpartner Herrn Alois Züger, ohne deren vertrauensvolle Zusammenarbeit eine Durchführung der jährlichen Vermessungspraktika nicht möglich wäre.



Sonar Mosaic

Kongsbergs neueste Software zum Mosaiken von Side-Scan-Daten in Echtzeit oder im Post Processing. Basierend auf unserer langen Erfahrung in der Hydrografie und bei militärischen Anwendungen (Minenjagd) wurde bei dieser Software großer Wert auf die einfache und intuitive Bedienung, sowie schnellste Datenverarbeitung gelegt. Dieses neue „Tool“ bietet dem Anwender eine schnelle Kartenerstellung und detaillierte Objektdarstellungen.

- Individuelle Ansichten mit georeferenzierter Karte, Wasserfall- und Objektdarstellung
- Import von Hintergrundkarte im ENC/IENC-S57 Standard und DXF-Format
- Direktes Einlesen von Kongsberg EA Echolot oder Kongsberg Pulsar Rohdaten, optional auch im XTF-Format
- Automatische Positionsinterpolation bei kurzzeitigem Ausfall des GNSS-Sensors (im Post Processing)
- Gesondertes Auswerten von Objekten mit Pos./Lage/Abmessungen und Sonarbild als XML-Report
- Speichern der georeferenzierten SONAR MOSAIC-Bilder als Geo-tiff.



KONGSBERG

Untersuchungen von optischen Scansystemen zur geometrischen Erfassung von Unterwasserstrukturen

Ein Beitrag von FRANK NIEMEYER, TIM DOLEREIT, MATTHIAS NEUMANN, JAN ALBIEZ, MATTHIAS VAHL und MICHAEL GEIST

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit optischen Erfassungs- und Scansystemen für den Bereich unter Wasser. Dabei wurde eine Einteilung in photogrammetrische, trigonometrische und impulsbasierte Systeme vorgenommen. Es wurden Messungen mit verschiedenen Systemen im Schleppkanal des Lehrstuhls für Strömungstechnik der Universität Rostock durchgeführt. Stellvertretend für photogrammetrische Erfassungssysteme kam das Stereokamerasystem vom Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung zum Einsatz. Das ULS-200-Scansystem von 2GRobotics und das SeaVision-Lasersystem von Kraken Robotik standen stellvertretend für trigonometrische Scansysteme zur Verfügung. Ein impulsbasiertes Scansystem stand für die Untersuchungen nicht bereit. Zusätzlich wurde das SeaVision-Scansystem in der Ostsee nahe des künstlichen Riffs bei Nienhagen unter realistischen Bedingungen getestet. Die Messungen spiegeln das derzeitige Potenzial optischer Messsysteme für den Bereich unter Wasser wider. Vor- und Nachteile der Systeme werden diskutiert.

Subsea | Laserscanner | Stereokamerasystem | ULS-200 | SeaVision | Schleppkanal | Ostsee

Einleitung

Der Bereich unter Wasser wird für die Wirtschaft immer interessanter. Nicht nur die Gas- und Ölindustrie, die schon seit Jahren in Tiefseegebenden Untersuchungen, Bohrungen und Förderungen vornimmt, sondern auch der Tiefseebergbau und der Bereich der erneuerbaren Energien weiten ihre Aktivitäten im Bereich unter Wasser aus. Dabei werden immer größere Tiefen exploriert, die für den Menschen ohne spezielle Hilfssysteme nicht mehr erreichbar sind. Diese Hilfssysteme müssen dabei an die Umgebungsbedingungen, wie z. B. an den hohen Wasserdruck, die Dunkelheit, den Salzgehalt und die Temperatur, angepasst sein. Mit dem Ausbau und der Zunahme der Unterwassertechnik steigt auch die Anzahl der Inspektionsaufgaben. Dabei wird die Strategie der Predictive Maintenance (vorausschauende Wartung) verfolgt, die im Umfeld von Industrie 4.0 Maschinen und Anlagen proaktiv wartet, um z. B. Havarien oder Ausfallzeiten vorzubeugen. Optische Scansysteme für den Bereich unter Wasser können hier einen wesentlichen Beitrag leisten.

Optische Scansysteme sind in der Lage, ihre Umgebung dreidimensional zu erfassen und in Form von 3D-Punktwolken abzubilden. So können Oberflächen von Unterwasserstrukturen erfasst und z. B. auf Deformationen untersucht werden. Die Einsatzgebiete sind zahlreich, sie reichen von Bestimmungen von Dellen, Beulen und Bewuchs, über Munitions- und Wracksuche, Navigationshilfe und Hinderniserkennung bis hin zu Inspektion von großen flächenhaften Strukturen unter Wasser. Bisher wurden für diese Aufgaben oft Sonargeräte eingesetzt, die zwar sehr weit

messen können, deren Messgenauigkeit und Auflösung jedoch meist im Zentimeter- bis Dezimeterbereich liegen. In den letzten Jahren war zu beobachten, dass Scanner vermehrt für den Gebrauch unter Wasser entwickelt wurden, um z. B. Schweißnähte an Unterwasserstrukturen zu inspizieren (Ekkel et al. 2014), ganze Infrastrukturen unter Wasser z. B. für die Gas- und Ölindustrie in großen Wassertiefen zu kartieren (3D at Depth 2018) oder Rohrleitungen zu überprüfen (2GRobotics 2018). Im Gegensatz zu akustischen Systemen bieten optische Scansysteme eine höhere Punktauflösung und Messgenauigkeit. Sie sind jedoch meist nur innerhalb des Sichtbarkeitsbereichs unter Wasser einsetzbar. Akustische Systeme hingegen können über mehrere 100 m eingesetzt werden.

Dieses Paper gibt einen Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen von optischen Unterwasserscansystemen. Auf Grundlage erfasster Unterwassermessungen ist es möglich, Fragestellungen hinsichtlich wichtiger Qualitätskriterien, wie z. B. Einflussfaktoren auf die Messunsicherheit und Streupunktanteil, zu beantworten. Die Untersuchungen wurden durch die Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) mit Hilfe von selbst entwickelten Prüfbjobjekten vorgenommen. Für die einzelnen Untersuchungen standen das Scansystem ULS-200 von 2G-Robotics als Leihgabe des Instituts für Ostseeforschung in Warnemünde (IOW), das SeaVision-Lasersystem von Kraken Robotik aus Bremen und das photogrammetrische Aufnahmesystem vom Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) aus Rostock zur Verfügung.

Autoren

Dr. Frank Niemeyer und Dr. Michael Geist sind wissenschaftliche Mitarbeiter an der Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) in Rostock.

Dr. Tim Dolereit und Matthias Vahl sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) in Rostock.

Matthias Neumann ist Geschäftsführer der IMAWIS Maritime Wirtschafts- und Schiffbauforschung GmbH in Rostock.

Dr. Jan Albiez ist Director of Engineering, Kraken Robotik GmbH in Bremen.

frank.niemeyer@
igp.fraunhofer.de

Prüfobjekt

Um vergleichbare Messungen durchzuführen, wurde ein Prüfobjekt mit offshoreähnlichen Strukturen verwendet (Abb. 1). An der einen Seite des Prüfobjekts befindet sich eine zylindrische Struktur; an ihr lassen sich z. B. verschiedene Auftreffwinkel des Laserstrahls von Scansystemen untersuchen. Zudem sind Löcher mit verschiedenen Durchmessern (1 mm bis 100 mm) vorhanden, um Aussagen zum Auflösungsverhalten, z. B. zur erkennbaren Größe von Rissen oder Öffnungen, abschätzen zu können. In der Mitte ist eine konvexe Kante im Winkel von 90° installiert, an der sich Kantenefekte analysieren lassen. Auf der anderen Seite befindet sich eine Ebene vor einer anderen Ebene, mit der sich Kantenübergangseffekte untersuchen lassen. Zur Bestimmung von Maßstäben wurden auf den Prüfkörper wasserfeste Schachbrettmarken (5 cm \times 5 cm) geklebt. Das Prüfobjekt hat die Abmessungen von 100 cm \times 60 cm, besteht aus Industriestahl und ist sehr stabil gegenüber äußeren Einflüssen (z. B. Stößen). Die Aufbauten haben Höhen zwischen 10 cm und 16 cm. Beschichtet ist das Prüfobjekt mit grauem Industrielack, der bei einigen Offshore-Strukturen verwendet wird. Zudem sind Vorrichtungen für Schäkel angebracht, um das System mit Hilfe von Seilen ins Wasser abzulassen.

Der Prüfkörper wurde im Verbund mit der IMA-WIS GmbH gefertigt und am Fraunhofer IGP mit Messsystemen höherer Genauigkeit vermessen, um flächenhafte Vergleichsmodelle (Soll-Modelle) zu erstellen und um die aufgeklebten Marken zu referenzieren. Zum Einsatz kamen dabei das Streifenlichtprojektionssystem GOM ATOS III und ein Leica Lasertracker. Abb. 2 stellt das erfasste Modell dem geplanten CAD-Modell gegenüber. Die Öffnungen auf dem Zylinderteil wurden neu arrangiert. Die farblich dargestellten Abweichungen liegen innerhalb der Fertigungstoleranz. Für die weiteren Vergleiche wird das gemessene Modell zur Referenz.

Optische Scansysteme für den Bereich unter Wasser

Optische Scansysteme für den Bereich unter Wasser können in photogrammetrische, trigonometrische und impulsbasierte Erfassungssysteme unterschieden werden (Hildebrandt et al. 2008). Bei photogrammetrischen Systemen werden zwei Kameras als Stereokamerasystem verwendet, die auf ein Messobjekt ausgerichtet sind. Mit Hilfe des stereoskopischen Effekts lassen sich über korrespondierende Bildpunkte in den Bildern der beiden Kameras und über die Orientierung der Kameras zueinander 3D-Punkte berechnen. Dazu müssen die inneren und äußeren Orientierungsparameter der Kameras durch Kalibrierung bestimmt werden. Korrespondierende Bildpunkte lassen sich dabei automatisch über codierte Marken oder durch einen direkten Vergleich der Bildpaare mit Hilfe bewährter Verfahren aus der Computer Vision bestimmen. Dieses sogenannte Stereo-Matching



Abb. 1: Prüfobjekt mit offshoreähnlichen Strukturen

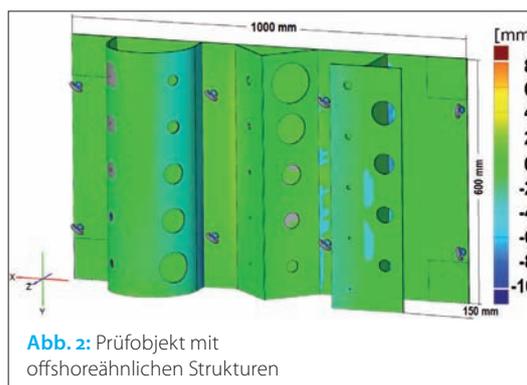


Abb. 2: Prüfobjekt mit offshoreähnlichen Strukturen

kann durch einen Vergleich anhand der geometrischen Ausrichtung eines Bildpaares oder anhand automatisch erkannter markanter Merkmale in beiden Bildern durchgeführt werden. Falls in den Bildern keine Punkte identifiziert werden können, z. B. weil die Flächen farblich zu homogen sind, bilden diese unberechneten Bereiche Löcher in der 3D-Punktwolke ab. Um diesem Effekt zu begegnen, kommen bei einigen photogrammetrischen Systemen Projektionseinheiten zum Einsatz, die auf den farblich homogenen Flächen erkennbare Muster projizieren (Bräuer-Burchardt et al. 2015). Der Sichtbereich unter Wasser grenzt den Aktionsradius solcher Systeme ein. Durch die zumeist geringe Basislänge zwischen den Kameras werden diese Erfassungssysteme in der Regel im Nahbereich eingesetzt, um, unter Berücksichtigung des Basis/Höhen-Verhältnisses, eine ausreichende Genauigkeit am Objekt erreichen zu können. Der Einsatz von Kameras im Unterwasserbereich ist mittlerweile eine verbreitete Praxis. Die eingesetzte Hardware kann dabei sowohl aus dem Consumer-Bereich stammen, wie beispielsweise aus der GoPro-Serie (Iscar et al. 2017), als auch aus der professionellen Filmtechnik (Rinaldi und Hordosch 2015). Die am häufigsten anzutreffende Variante sind jedoch Industriekameras in Kombination mit speziell gefertigten Unterwassergehäusen. Ein Beispiel sind die Stereokameras aus der Bumblebee-Serie (Łuczyński et al. 2017), die tauchergeführt (Bulow et al. 2013) oder am AUV (Autonomous Underwater Vehicle) verbaut (Pfungsthorn et al. 2016) eingesetzt werden können. Neben den tauchergeführten Systemen (Henderson et al. 2013) und

den AUVs (Johnson-Roberson et al. 2017) kommen als Trägerplattform für Stereokameras auch ROVs (Remotely Operated Vehicles) (Rossi et al. 2018) oder ASVs (Autonomous Surface Vessels) (Isicar und Johnson-Roberson 2015) infrage. Weiterhin ist es auch möglich, »Embedded Komponenten« für die direkte Verarbeitung der Bilddaten einzusetzen (Nawaf et al. 2018). Stellvertretend für photogrammetrische Messsysteme unter Wasser wurde das Stereokamerasystem mit externer Beleuchtung vom Fraunhofer IGD verwendet.

Trigonometrische Scansysteme arbeiten hingegen mit Kamera und Linienlaser. Kamera und Linienlasermodul werden über eine Halterung mit definiertem Abstand (Basislinie) so konstruiert, dass beide Einheiten auf das Messobjekt ausgerichtet sind. Die Kamera nimmt Bilder der projizierten Laserlinien auf dem Messobjekt auf und berechnet über die trigonometrischen Verhältnisse zwischen Kamera und Lasermodul 3D-Punkte entlang dieser Laserlinie. Wird der Laserstrahl über das Objekt bewegt, können die einzelnen Linienscans zu einem Flächenscan kombiniert werden. Trigonometrische Scansysteme sind seit Langem in der Qualitätskontrolle in der Industrie zu finden, z. B. im Automobilbau als Handprüfgeräte (z. B. Leica Absolute Scanner LAS) oder bei der Prüfung von langen Bauteilprofilen (Schlüter 2002).

Durch das relativ simple Messprinzip wird diese Art von Scanner auch unter Wasser verwendet. Lucht et al. (2018) entwickelten beispielsweise einen Low-Cost-3D-Laserscanner, der sich sowohl über als auch unter Wasser selbst kalibriert. Dieses System soll zudem durch die Wasseroberfläche hindurch messen. Durch den Einsatz der Kamera funktionieren trigonometrische Messsysteme un-

ter Wasser nur innerhalb des Sichtbereichs. Über die Variation der Entfernung (Basislinie) zwischen Kamera und Lasermodul können auch größere Messbereiche von mehreren Metern erfasst werden. Stellvertretend für trigonometrische Scansysteme wurden zum einen das Scansystem ULS-200 von 2G Robotics, das für maximale Entfernungen bis zu 2,5 m ausgelegt ist, und das Lasersystem SeaVision von Kraken Robotik mit einem maximalen Messbereich von bis zu 8 m verwendet.

Impulsbasierte Scansysteme bestimmen über die Laufzeit eines Laserstrahlimpulses die Entfernung zum Messobjekt. Wird der Laserimpuls im Raum über zwei definierte und zueinander orthogonal liegende Drehrichtungen abgelenkt, kann von der Umgebung eine 3D-Punktwolke erstellt werden. Durch Verstärkung des Laserstrahlimpulses ist eine Messung über den Sichtbereich hinaus möglich. Eine der ersten Lösungen der Unterwasser-Scantechnik stellt das System INScan der Firma Teledyne CDL dar. Bei diesem System wird das Pulslaufzeitverfahren in Kombination mit einem Scanner angewandt, womit Objekte unter Wasser geometrisch erfasst und rekonstruiert werden (Manning 2014). Die Firma »3D at Depth« bietet einen impulsbasierten Laserscanner für den Bereich unter Wasser an (Hardy 2018). Parallel wird am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) in Freiburg ein impulsbasiertes Laserscansystem für den Bereich unter Wasser entwickelt (Stemmler et al. 2019).

ULS-200

Der ULS-200 (Underwater Laser Scanner) reiht sich in die Produktfamilie von 2G Robotics ein, zu der auch der ULS-100 und der ULS-500 gehören. Während der ULS-100 zwischen 0,13 m und 1 m und der ULS-500 bis zu 15 m weit messen können, wurde das ULS-200-Scansystem für Bereiche zwischen 0,36 m und 2,5 m entwickelt.

Das ULS-200-Scansystem (Abb. 3) gehört zu den trigonometrischen Scannern und arbeitet mit blauem Laserlicht (440 nm, siehe Abb. 4). Die Laserlinie deckt einen Bereich von 68° an der Luft und 50° im Wasser ab. Es werden 480 Punkte pro Linie bestimmt. Durch die starre Verbindung zwischen Lasermodul und Kamera, die sich zusammen um eine Achse drehen, können 360°-Rundumscans durchgeführt werden. Dabei können bis zu 4750 Punkte pro Sekunde bzw. knapp 10 Profile pro Sekunde erfasst werden. Die Rotation des Systems kann in Schritten von bis zu 0,018° erfolgen, was die Messzeit zwar erhöht, jedoch die Scanauflösung der einzelnen Scanprofile zueinander verbessert. Das Scansystem wiegt an der Luft 3,9 kg, im Wasser 1,6 kg. Die Punktwolken werden als XYZ-Dateien im ASCII-Format übergeben (2G Robotics o. J.).

SeaVision

Das 3D-Lasersystem SeaVision von Kraken Robotik ist ein trigonometrisch arbeitendes Scansystem für

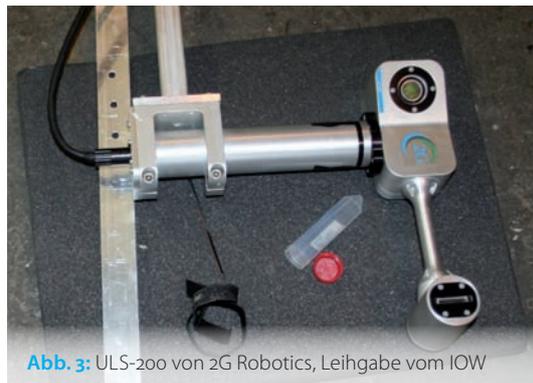


Abb. 3: ULS-200 von 2G Robotics, Leihgabe vom IOW



Abb. 4: ULS-200-Scansystem im Einsatz



Abb. 5: 3D-Lasersystem SeaVision von Kraken Robotik

Bild aus: Kraken Robotik, 2018



Abb. 6: SeaVision 3D-Lasersystem während der Messung mit drei verschiedenen Wellenlängen

Bild aus: Niemeyer et al., 2019

den Bereich unter Wasser. Es besteht aus einem Paar zylindrischer Druckkörper, in denen jeweils ein Linienlaser und eine Kamera verbaut sind (Abb. 5). Die Lasereinheit wird innerhalb des Druckkörpers geschwenkt und das Licht gelangt über ein zylindrisches Fenster nach außen, sodass sich keine bewegten Teile im Wasser befinden. Die Kamera des einen Druckkörpers korrespondiert dabei jeweils mit dem beweglichen Laser im anderen Druckkörper. Über den Abstand (Basislinie) der beiden Einheiten zueinander lässt sich die Entfernung des Messbereichs festlegen. Im Gegensatz zu anderen trigonometrischen Scansystemen arbeitet dieses System mit drei Laserlinien mit unterschiedlichen Wellenlängen: 637 nm (rot), 516 nm (grün) und 419 nm (blau) (Abb. 6). Dies führt zu einer Verdichtung der Punktwolke und zur Steigerung der Messgenauigkeit. Die spezielle Farbkamera ist besonders für schwaches Licht ausgelegt. Mit Hilfe der integrierten Beleuchtung können normale RGB-Bilder unter Wasser gemacht werden. Zum einen können diese Bilder genutzt werden, um die Punktwolken einzufärben, zum anderen können Bildverbände zur Bestimmung der Scanposition unter Wasser berechnet und die Ergebnisse zur Bewegungskompensation genutzt werden. So ist ein Scannen im Profiling-Modus möglich. Mit dem SeaVision-Lasersystem lassen sich 300 000 Punkte pro Sekunde bestimmen. Der Scanbereich wird mit 0,5 m bis zu 8 m Entfernung angegeben. Dabei liegt die Scanauflösung laut Kraken bei einer Entfernung von 2 m zwischen 0,1 mm und 3 mm, bei einer Entfernung von 5 m zwischen 1 mm und 10 mm. Eine Röhre hat die Abmaße von 460 mm × 113 mm und wiegt an der Luft 7 kg. Das System kann mit unterschiedlichen Auflösungen scannen,

wobei in der niedrigsten Auflösung Scanzeiten von wenigen Sekunden erreicht werden. Die Kamera arbeitet mit einer konstanten Belichtungszeit. Unter- bzw. Überbelichtungseffekte werden durch verschiedene Empfindlichkeitsstufen des Kamerasensors, die herstellerseitig als GAIN-Werte benannt werden, kompensiert (Niemeyer et al. 2019).

Stereokamerasystem vom Fraunhofer IGD

Das Unterwasserkamerasystem des Fraunhofer IGD besteht aus drei Druckgehäusen (Abb. 7). Jedes Druckgehäuse ist für eine Wassertiefe von 70 m ausgelegt. Eine Verbindung zur Wasseroberfläche ist über ein Ethernet-Kabel möglich. Zwei der Druckgehäuse sind für den Einbau von Kameras ausgelegt. Das dritte Gehäuse hat einen Durchmesser von 18 cm und eine Länge von 32,6 cm. Damit bietet es zusätzlichen Raum für Rechenmodule oder sonstige Peripherie. Der modulare Aufbau ermöglicht verschiedene Konfigurationen. Die im Rahmen der durchgeführten Experimente eingesetzte Konfiguration umfasst alle drei Druckgehäuse (Abb. 8). Damit ist ein Betrieb als Stereokamera mit einer variablen Basis im Bereich von 12 bis 30 cm möglich. Der Betrieb als Einzelkamera

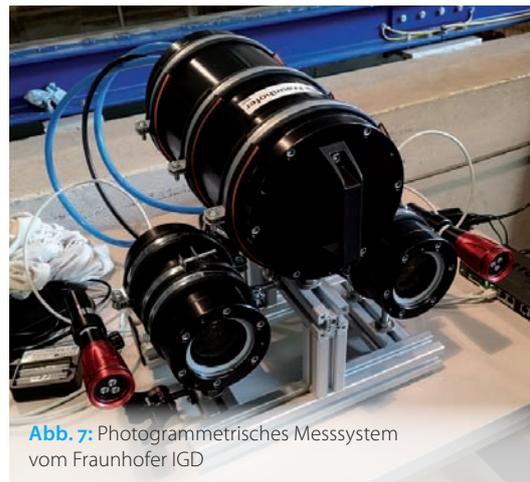


Abb. 7: Photogrammetrisches Messsystem vom Fraunhofer IGD

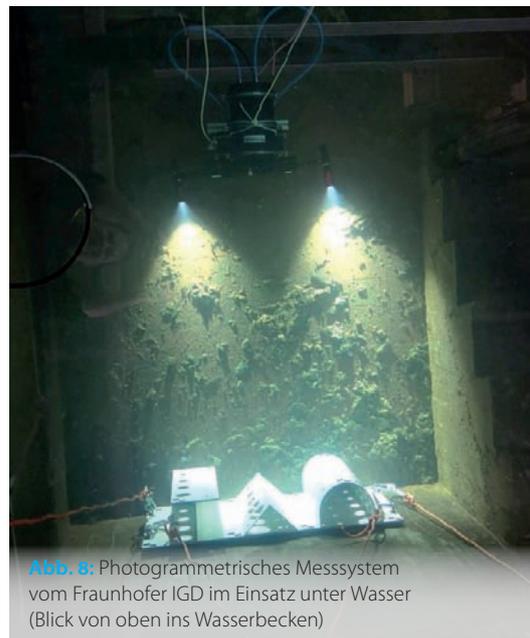


Abb. 8: Photogrammetrisches Messsystem vom Fraunhofer IGD im Einsatz unter Wasser (Blick von oben ins Wasserbecken)

Literatur

2GRobotics (o. J.): ULS-200 Data Sheet; online unter www.2grobotics.com/ULS-200_Data_Sheet.pdf, zuletzt geprüft am 11.03.2019

2GRobotics (2018): Accurate Pipe Profiling; online unter www.2grobotics.com/accurate-pipe-profiling/, zuletzt geprüft am 08.02.2019

3D at Depth (2018): 3D at Depth Expands Underwater Survey Services; online unter www.3datdepth.com/news/3d-at-depth-expands-underwater-survey-services, zuletzt geprüft am 08.02.2019

Bräuer-Burchardt, Christian; Peter Kühmstedt; Gunther Notni (2015): Optische 3D-Messtechnik auf Musterprojektionsbasis für den Unterwassereinsatz; in: Uwe Freiherr von Lukas, Eva-Maria Mahnke und Kristine Bauer (Hrsg.): Go-3D 2015 »Computergraphik für die Praxis«; Tagungsband zur Konferenz Go-3D 2015; Fraunhofer-Verlag, S. 141-153

Bulow, Heiko; Igor Sokolovski; Max Pflingstorn; Andreas Birk (2013): Underwater stereo data acquisition and 3D registration with a spectral method; 2013 MTS/IEEE OCEANS, Bergen, S. 1-7

Dolereit, Tim (2017): A virtual object point model for the calibration of underwater stereo cameras to recover accurate 3D information; Dissertation, Universität Rostock, online unter rosdok.uni-rostock.de/resolve/id/rosdok_disshab_0000001980, zuletzt geprüft am 16.03.2019

Ekkel, Tanja; Thomas Luhmann; Anna Maria Meyer; Niklas Conen; Heidi Hastedt; Folkmar Bethmann (2014): Präzise optische dreidimensionale Erfassung von Schweißnähten unter Wasser; in: Fachzeitschrift für Schweißen und verwandte Verfahren 2014

Hardy, Mark (2018): Bringing Laser Scanning to New Depths in the Subsea Oil and Gas Market; LIDAR News Magazine, Vol. 5, No. 2

Henderson, Jon; Oscar Pizarro; Matthew Johnson-Roberson; Ian Mahon (2013): Mapping Submerged Archaeological Sites using Stereo-Vision Photogrammetry; International Journal of Nautical Archaeology, Vol. 42, No. 2, S. 243-256

Hildebrandt, Marc; Jochen Kerdels; Jan Albiez; Frank Kirchner (2008): A practical underwater 3D-Laserscanner; OCEANS 2008, Quebec City, QC, Canada, S. 1-5

mit nur einem Druckgehäuse ist zudem problemlos möglich. Zwei optionale LED-Tauchlampen dienen der Beleuchtung. Die beiden Kameragehäuse haben einen Durchmesser von 11,5 cm, eine Länge von 19,1 cm und eine Glasdicke von 1 cm. Die Bauform und der Ethernet-Anschluss sind hierbei die einzigen einschränkenden Faktoren für die Auswahl und den Einbau von Kameras.

In der Stereokonfiguration werden aktuell zwei hochauflösende Farbkameras der IDS Imaging Development Systems GmbH vom Typ UI-5880CP Rev. 2 eingesetzt. Diese Kamera ermöglicht eine Framerate von ca. 18 fps bei einer maximalen Auflösung von 3088 x 2076 Pixeln. Eine Langzeitbeleuchtung von bis zu 120 Sekunden ist möglich. Beim Bildsensor handelt es sich um den CMOS-Sensor Sony IMX178. Dieser 1/1,8" große Sensor zeichnet sich durch seine lichtempfindlichen Pixel mit 2,4 µm Pixelgröße aus. Die Kameras haben einen großen Dynamikbereich, liefern kontrastreiche Bilder und sind extrem rauscharm. Diese Eigenschaften sind besonders im Unterwasserbereich von Vorteil. Die eingesetzten Objektive haben eine Brennweite von 6 mm. Daraus ergeben sich ein horizontaler Bildwinkel von ca. 63° und ein vertikaler Bildwinkel von ca. 45°. Der Interface-Standard der Kamera ist GigE. In der aktuellen Konfiguration kann pro Kamera eine Framerate von ca. 7 fps bei voller Auflösung erzielt und an die Wasseroberfläche übertragen werden. Die Synchronisierung der beiden Kameras ist in der aktuellen Konfiguration durch ein Softwaretriggering realisiert. Die Stromversorgung der Hardware wird über Power-over-Ethernet (PoE) bereitgestellt. An der Wasseroberfläche befindet sich die Hardware zur Bildaufzeichnung. Dies kann ein herkömmliches Notebook mit GigE-Interface sein.

Die Datenverarbeitung ist in das Postprocessing der Aufnahmen ausgelagert. Die notwendigen Arbeitsschritte für die Erstellung der 3D-Punktwolke umfassen die Kalibrierung der Stereokamera, die Entzerrung der Aufnahmen, das Finden korrespondierender Bildpunkte in rechter und linker Ansicht und eine Triangulierung zur Berechnung der 3D-Punkte. Die Besonderheit der auftretenden Lichtbrechung an den Medienübergängen zwischen Wasser, Glas und Luft wurde berücksichtigt. Diese Lichtbrechung hat direkte Auswirkungen auf die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion und sollte auf keinen Fall unberücksichtigt bleiben. Die umgesetzte Datenverarbeitung basiert auf einer Absorption der Brechungseffekte durch die kalibrierten Kameraparameter. Diese Absorption wird durch eine Kalibrierung unter Wasser erreicht. Dabei werden mit Hilfe einer Tafel mit einem Schachbrettmuster sowohl die inneren Orientierungsparameter der Kameras als auch die relative Orientierung der Kameras zueinander bestimmt.

Messumgebung

Die Messungen wurden im Schleppkanal des Lehrstuhls für Strömungstechnik der Universität

Rostock durchgeführt (Abb. 9). Zusätzlich wurde das SeaVision-Lasersystem in der Ostsee nahe des künstlichen Riffs bei Nienhagen (Abb. 10) unter realistischeren Bedingungen getestet.

Der Schleppkanal hat eine Länge von 37 m, eine Breite von 5 m und eine maximale Wassertiefe von 3 m. Die Messkonfigurationen im Schleppkanal wurden so konzipiert, dass der Abstand zwischen Prüfbjekt und Scansystem verändert werden kann. Hierfür wurden die Prüfbjekte auf dem Beckenboden positioniert. Die Scansysteme waren am Schleppwagen befestigt und unter Wasser auf die Prüfbjekte ausgerichtet. Durch Bewegung des Schleppwagens wurden unterschiedliche Messpositionen eingenommen.

Folgende Messungen wurden im Schleppkanal in Kombination mit dem Prüfkörper vorgenommen:

- ULS-200-Scansystem:
Messabstände: 0,95 m, 2,3 m und 3,7 m; für weitere Messungen stand das System nicht zur Verfügung.
- SeaVision-Lasersystem:
Abstand: ca. 1,58 m; ein Scan wurde mit festem Standpunkt und ein Scan im Profilmodus durchgeführt. Dabei wurde der Scanner mit Hilfe des Schleppwagens mit konstanter Geschwindigkeit an den Prüfbjekten während des Scanvorgangs vorbeigeführt.
- Stereokamerasystem vom Fraunhofer IGD:
Es wurden zahlreiche verschiedene Aufnahmen im Bereich zwischen 1,5 m und 2,8 m durchgeführt. Die Aufnahmezeit war dabei nur von der Belichtungszeit der Kameras abhängig. Fünf Messungen wurden exemplarisch für weitere Betrachtungen ausgewählt.



Abb. 9: Schleppkanal des Lehrstuhls für Strömungstechnik der Universität Rostock



Abb. 10: Messungen mit spezieller Rahmenkonstruktion in der Ostsee nahe des künstlichen Riffs Nienhagen

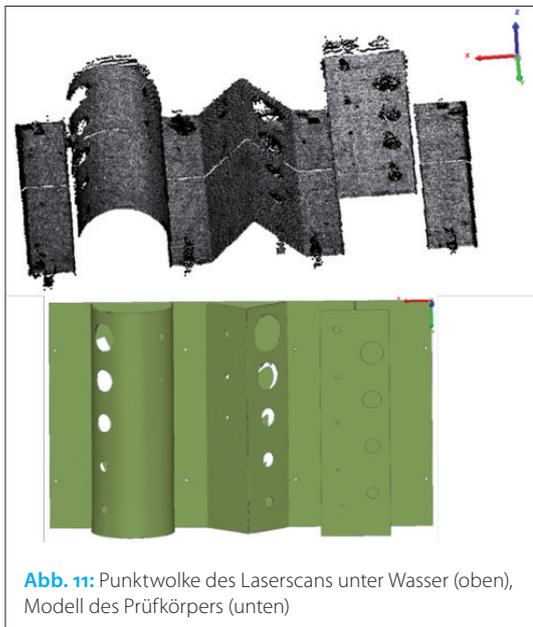


Abb. 11: Punktwolke des Laserscans unter Wasser (oben), Modell des Prüfkörpers (unten)

Bild aus: Niemeyer et al. 2019



Abb. 12: Gegenüberstellung der gescannten Punktwolke mit dem Modell des Prüfkörpers

Bild aus: Niemeyer et al. 2019

Die Messungen in der Ostsee gestalteten sich etwas schwieriger. Für diese Zwecke wurde ein zweiteiliges Rahmensystem verwendet, mit dessen Hilfe Scansystem und Prüfobjekte starr zueinander ausgerichtet werden konnten (Abb. 10). Mit Hilfe eines Krans wurde die ganze Konstruktion ins Wasser abgelassen. Die Prüfobjekte können in drei verschiedenen Abständen zum Scanner positioniert werden. Zudem ist es möglich, nur den Rahmenteil mit Scanner ohne Prüfkörperteil ins Wasser abzulassen, um Scans von Strukturen unter Wasser vorzunehmen. Zum Einsatz kam hier lediglich das SeaVision-Lasersystem. Die Messungen in der Ostsee wurden für den dichten (1,2 m) und den weitesten Abstand (2,7 m) zwischen Messsystem und Prüfobjekten in drei Wassertiefen (1 m, 6 m, 12 m) vorgenommen. Zudem wurde die Empfindlichkeit der Kamera (GAIN-Werte 10, 15, 20, 25) in vier Schritten in jeder Messkonfiguration vorgenommen. (Für eine detaillierte Auswertung siehe Niemeyer et al. 2019.)

Auswertung und Ergebnisse

Die Messungen der einzelnen Systeme fanden zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb von zehn Monaten statt. Während dieser Zeit wurde auch der Prüfkörper weiterentwickelt. Bei den anfänglichen Messungen mit dem ULS-System waren leider noch keine Messmarken angebracht. Bei den Messdatenauswertungen fiel auf, dass die gemessenen Punktwolken in ihren Ausmaßen nicht 100%ig mit dem Modell des Prüfkörpers übereinstimmten. Für die weiteren Untersuchungen wurden daher die Punktwolken mittels eines Maßstabsfaktors gleichmäßig skaliert. Abb. 11 und Abb. 12 zeigen exemplarisch eine in der Ostsee mit dem SeaVision-Lasersystem gemessene Punktwolke im Verhältnis zum 3D-Modell. Anschließend wurden Untersuchungen zu Streupunktanteilen und Messrauschen durchgeführt.

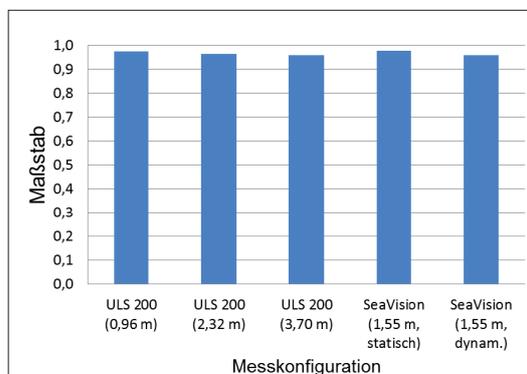


Abb. 13: Maßstabsbestimmung für die Messungen des ULS-200 und des SeaVision-Scansystems im Schleppkanal der Universität Rostock

...
 Iscar, Eduardo; Katherine A. Skinner; Matthew Johnson-Roberson (Hrsg.) (2017): Multi-view 3D reconstruction in underwater environments: Evaluation and benchmark; OCEANS 2017, Anchorage
 Iscar, Eduardo; Matthew Johnson-Roberson (2015): Autonomous surface vehicle 3D seafloor reconstruction from monocular images and sonar data; OCEANS 2015 - MTS/IEEE, Washington, DC, S. 1-6
 Johnson-Roberson, Matthew; Mitch Bryson; Ariell Friedman; Oscar Pizarro; Giancarlo Troni; Paul Ozog; Jon C. Henderson (2017): High-Resolution Underwater Robotic Vision-Based Mapping and Three-Dimensional Reconstruction for Archaeology; Journal of Field Robotics, Vol. 34, No. 4, S. 625-643
 Kraken Robotik (2018): 3D RGB Underwater Laser Scanner SeaVision; online unter krakenrobotics.com/products/seavision/, zuletzt geprüft am 11.03.2019
 Lucht, Joschka van der; Michael Bleier; Florian Leutert; Klaus Schilling; Andreas Nüchter (2018): Korrektur der Brechung an der Wasseroberfläche beim triangulationsbasierten 3D-Laserscanner; in: Thomas Luhmann; Christina Schumacher (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2018; Wichmann – VDE, Berlin, S. 87-102
 Łuczynski, Tomasz; Max Pflingsthorn; Andreas Birk (2017): The Pinax-model for accurate and efficient refraction correction of underwater cameras in flat-pane housings; Ocean Engineering, Vol. 133, S. 9-22
 Manning, Neil (2014): Teledyne CDL; Oceanology, 2014; online unter www.oceanologyinternational.com/novadocuments/498957v=635315295396130000, zuletzt geprüft am 27.02.2019
 Nawaf, Mohamad Motasem; Djamel Merad; Jean-Philip Royer; Jean-Marc Boi; Mauro Saccone; Mohamed Ben Ellefi; Pierre Drap (2018): Fast Visual Odometry for a Low-Cost Underwater Embedded Stereo System; Sensors, Vol. 18, No. 7
 ...

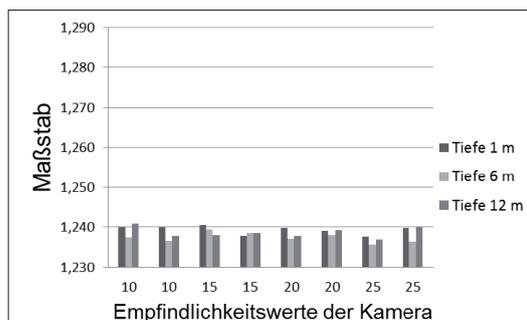


Abb. 14: Maßstabsfaktoren für die Messentfernung von ca. 1,2 m zwischen Scanner und Prüfobjekten

Bild aus: Niemeyer et al. 2019

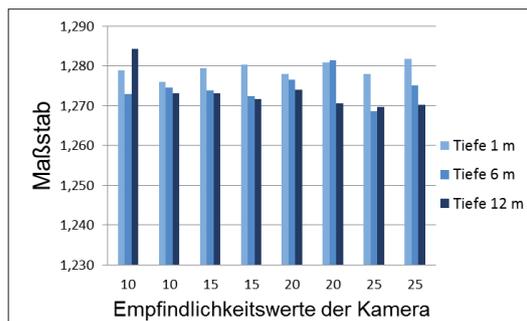


Abb. 15: Maßstabsfaktoren für die Messentfernung von ca. 2,7 m zwischen Scanner und Prüfobjekten

Bild aus: Niemeyer et al. 2019

Niemeyer, Frank; Matthias Neumann; Jan Albiez; Alexander Duda; Michael Geist (2019): Untersuchungen zu Messgenauigkeit von Laserscannern unter Wasser am Beispiel des SeaVision™ 3D Laser System; in: Thomas Luhmann; Christina Schumacher (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019; Wichmann – VDE Verlag, Berlin

Pfingsthorn, Max; Ravi Rathnam; Tomasz Łuczynski; Andreas Birk (2016): Full 3D navigation correction using low frequency visual tracking with a stereo camera; OCEANS 2016, Shanghai, China, S. 1-6

Rossi, Matija; Petar Trsljić; Satja Sivčev; James Riordan; Daniel Toal; Gerard Dooly (2018): Real-Time Underwater Stereo Fusion; Sensors, Vol. 18, No. 11

Schlüter, Martin (2002): Trackingsysteme für handgeführte 3D-Scanner – mechanisch, optisch, interferometrisch; in: Eckhardt Seyfert (Hrsg.): Zu neuen Märkten – auf neuen Wegen – mit neuer Technik; 22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung; Publikationen der DGPF, Vol. 11, S. 187-194

Stemmler, Simon; Christoph S. Werner; Alexander Reiterer (2019): Development of a time-of-flight laser scanning system for underwater applications; Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2019, Strasbourg, im Druck

Skalierung

Das ULS-200-Scansystem war herstellerseitig vorkalibriert. Eine Kalibrierung vor der Messung fand nicht statt. Die Kalibrierungsparameter wurden übernommen. Da zum Zeitpunkt der Messungen noch keine Marken zur Maßstabsbestimmung auf dem Prüfobjekt verklebt waren, wurde der Maßstab mit Hilfe der Gesamtgeometrie über Fitting-Methoden bestimmt. Das SeaVision-Lasersystem und das photogrammetrische System wurden im Schleppkanal im Vorfeld mit Hilfe von speziellen Tafeln mit Schachbrettmustern kalibriert. Da während der Messungen bereits Marken angebracht waren, konnten hierüber Korrekturmaßstäbe bestimmt werden.

Die Ergebnisse der Maßstabsbestimmung sind in Abb. 13 (S. 21) dargestellt. Die Werte liegen zwischen 0,978 und 0,960. Für das photogrammetrische System konnten keine Maßstabsfaktoren bestimmt werden, da die berechneten Punktwolken an den Markenpositionen zu stark variierten (Abb. 22, S. 23).

Die Ergebnisse der Maßstabsbestimmungen des SeaVision-Lasersystems in der Ostsee sind in Abb. 14 und Abb. 15 (S. 21) dargestellt. Für den Abstand von 1,2 m liegen die Maßstäbe zwischen 1,236 und 1,241 und für den Abstand von 2,7 m liegen die Maßstäbe zwischen 1,269 und 1,284 (siehe Niemeyer et al. 2019).

Streupunktanteile und Messrauschen

Die Qualität der gemessenen Punktwolke hängt bei kamerabasierten Aufnahmesystemen von Umgebungsbedingungen, wie z. B. Umgebungsbeleuchtung und Schwebstoffe im Sichtbereich, ab. So erkennt man beispielsweise bei trigonometrischen Scans vermehrt Streupunkteffekte in der Nähe von Kanten bei Überbelichtung (Abb. 16, oben links ausgegraute Punkte). Zudem erkennt man vereinzelt auch losgelöste Punkte, die sich jedoch leicht durch eine vorgelagerte Punktwolkenbereinigung entfernen lassen.

Außerdem unterliegt jedes Messsystem einer

Messgenauigkeit bzw. einem Messrauschen. Das Messrauschen gibt an, wie stark beispielsweise gemessene Punkte um eine Ebene (oder eine Regelgeometrie) variieren. Streupunkte und Messrauschen überlagern sich und können nur schwer getrennt werden. Für die praktischen Untersuchungen in diesem Paper wurde folgendes Trennkriterium angewendet:

Bevor eine Trennung zwischen Messrauschen und Streupunkten stattfinden kann, müssen die Punktwolken mittels Maßstabsfaktor nachskaliert und Punktwolkenbereinigungen durchgeführt werden. Danach findet eine Ausrichtung der Punktwolke zum Referenzmodell mittels Fitting-Methoden statt. Eine simultane Bestimmung des Maßstabsfaktors während des Fitting-Verfahrens ist nicht ratsam, da hier Streupunkte, die nicht zum Messobjekt gehören, das Ergebnis verfälschen würden. Anschließend wurden die Abweichungen zwischen Punktwolke und Referenzmodell bestimmt. In den einzelnen Scans waren homogene ebene Bereiche zu finden, in denen keine Streupunkte identifiziert werden konnten (Abb. 16, rechts). Über die Bestimmung von maximalen und minimalen Abweichungen lässt sich für diese Bereiche eine Spanne berechnen. Zur automatischen Klassifizierung und Zuordnung der Messpunkte zur Prüfebene wird eine Toleranzzone festgelegt, die der dreifachen Spanne entspricht. Schließlich wurden alle Punkte mit Abweichungen innerhalb der dreifachen Spanne rund um das Modell für die Bestimmung des Messrauschens verwendet und die übrigen Punkte als Streupunkte deklariert. In Abhängigkeit des Messrauschens wurde die Spanne für jeden einzelnen Scan individuell bestimmt. Nachdem die Streupunkte identifiziert und entfernt wurden, fand nochmals ein Best-Fit statt und das Messrauschen konnte bestimmt werden. In Abb. 17 (S. 23) sind die Streupunktanteile für das ULS-200-Scansystem und das SeaVision-Lasersystem für die Messungen im Schleppkanal dargestellt.

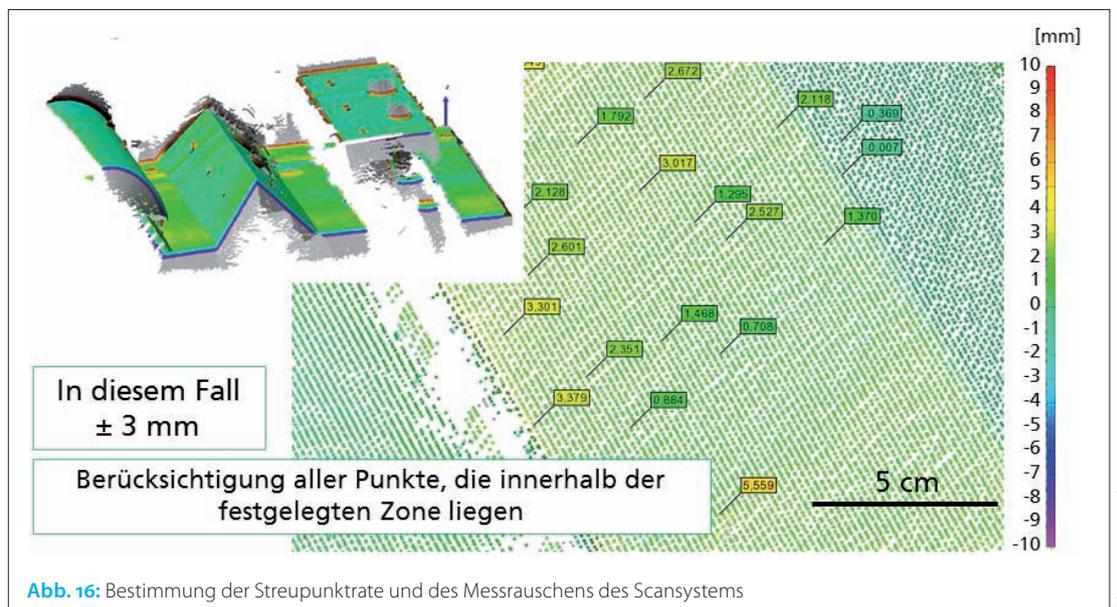
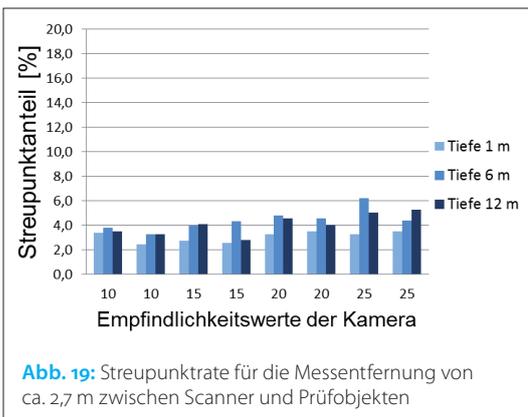
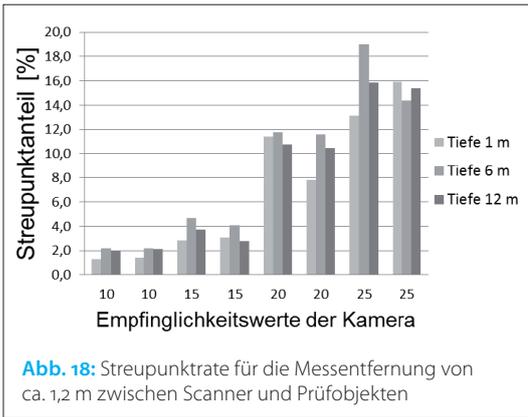
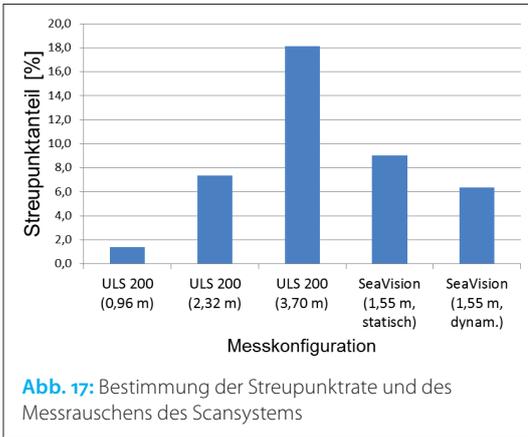


Abb. 16: Bestimmung der Streupunktrate und des Messrauschens des Scansystems

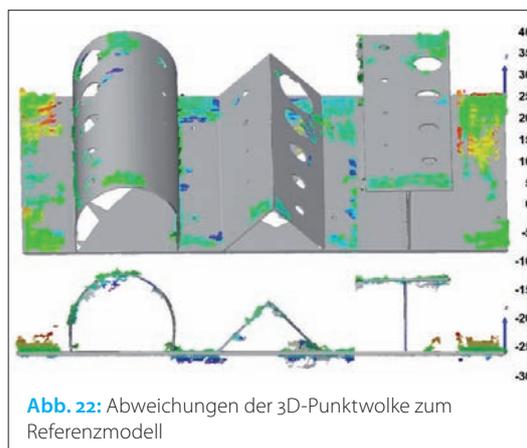
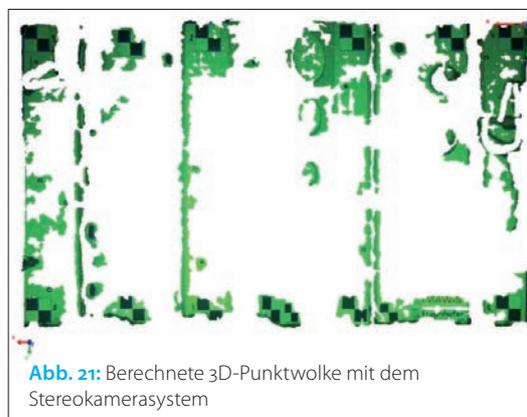
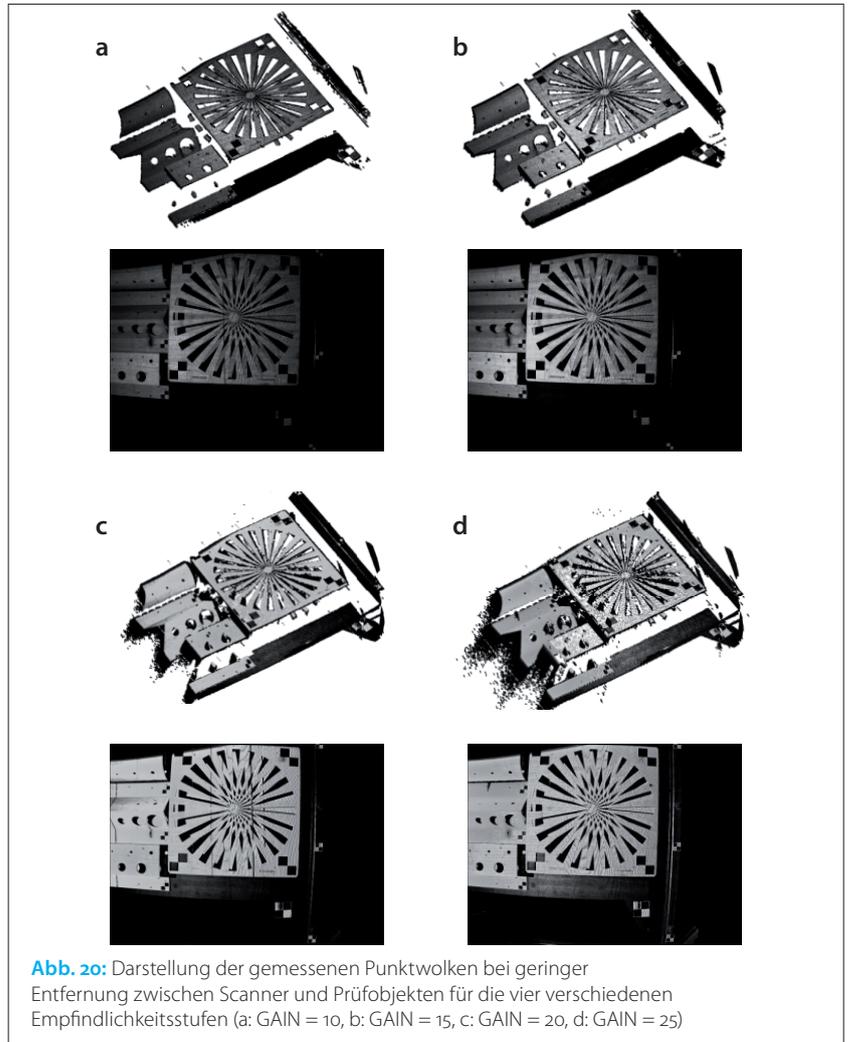
Bild aus: Niemeyer et al. 2019



Die Streupunktanteile für die Messung in der Ostsee sind in [Abb. 18](#) für die Messentfernung zwischen Scansystem und Prüfobjekten von 1,2 m und in [Abb. 19](#) für eine Messentfernung von 2,7 m dargestellt.

Beispielhaft sind die Streupunkte der gemessenen 3D-Punktwolken in [Abb. 20](#) (jeweils oben) dargestellt. Darunter sieht man die Kamerabilder, die in verschiedenen Empfindlichkeitsstufen des Kamerasensors gemacht wurden.

Beim Stereokamerasystem konnten keine Streupunkte festgestellt werden. Die 3D-Punktwolken weisen hingegen große löchrige Bereiche auf ([Abb. 21](#)). Die berechneten Punktwolken des Stereokamerasystems konnten wegen der farblichen Homogenität des Prüfkörpers lediglich zwischen 25 % und 35 % der sichtbaren Oberfläche in allen Aufnahmen abdecken. [Abb. 22](#) zeigt eingefärbt die Abweichungen der Messpunkte zum Prüfkörper.



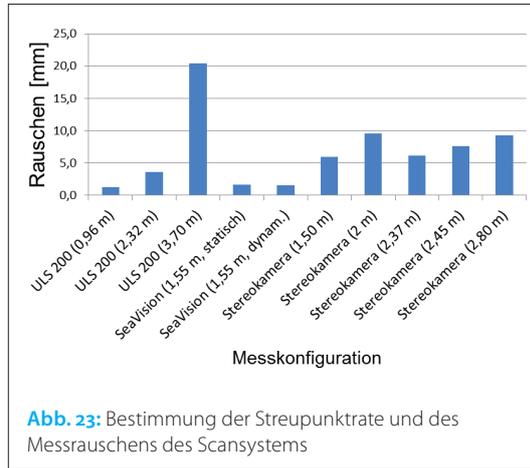


Abb. 23: Bestimmung der Streupunktrate und des Messrauschens des Scansystems

Das Messrauschen für die Messungen der einzelnen eingesetzten Aufnahmesysteme im Schleppkanal ist in Abb. 23 gegenübergestellt. Exemplarisch ist in Abb. 24 das Messrauschen des ULS-200-Scansystems für verschiedene Abstände dargestellt.

In Abb. 25 (S. 25) ist das Messrauschen des SeaVision-Lasersystems für die Messungen in der Ostsee für die Messentfernung von 1,2 m und in Abb. 26 (S. 25) für die Messentfernung von 2,7 m dargestellt.

Diskussion

Sowohl das photogrammetrische als auch das trigonometrische Vermessungsverfahren basieren auf der linearen Ausbreitung von Lichtstrahlen. Licht wird beim Übergang zweier unterschiedlich dichter Medien gebrochen. Jede Lichtbrechung muss in den Berechnungsmodellen berücksichtigt werden. Bei den Messsystemen finden Medienbrüche zwischen Luft (Kamerainneres), Glas (Linsensystem, Fensterscheibe) und Wasser statt. Zusätzliche Dichteunterschiede können auch in der Wassersäule stattfinden, z. B. in der Ostsee durch unterschiedliche Salzgehalte. Werden diese Einflüsse nicht richtig modelliert, kommt es zu Maßstabs- bzw. Verzerrungseffekten.

Das ULS-200-Scansystem war während der Messungen leicht zu handhaben. Die gemessenen

Punktwolken mussten kaum maßstäblich korrigiert werden. Für den Nahbereich erreicht dieses System ein Messrauschen von ca. 1,3 mm bei knapp 1 m Entfernung. Bei 2,3 m Entfernung stieg das Messrauschen auf 3,6 mm an. Im Abstand von 3,7 m, was schon außerhalb des Messbereichs des ULS-200 liegt, konnten dennoch Messungen durchgeführt werden. Das Messrauschen lag dabei bei 20,4 mm. Parallel ist die Zunahme der Streupunkte zu beobachten, die zwischen 1,4 % und 18 % lagen. Durch die starre Verbindung zwischen Kamera und Lasermodul lassen sich keine anderen Messbereiche einstellen. 360°-Rundumschans sind möglich. Das ULS-200-Scansystem erreicht damit schon sehr gute Ergebnisse für den vorgegebenen Messbereich. Viele Messaufgaben können mit ihm unter Wasser bereits gelöst werden. Die Messgenauigkeiten von terrestrischen Laserscannern über Wasser werden jedoch nicht erreicht.

Das SeaVision-Lasersystem gehört zu den leistungsstärkeren Scansystemen. Auch hier mussten kaum maßstäbliche Korrekturen bei den Messungen im Schleppkanal vorgenommen werden. Durch die variabel einstellbare Basislänge zwischen den Druckkörpern, können verschiedene Messbereiche explizit beobachtet werden. Mit einer Messrate von 300 000 Punkten pro Sekunde können Scans in wenigen Sekunden vorgenommen werden. Bei den Messungen im Schleppkanal wurde ein Messrauschen zwischen 1,5 mm und 1,6 mm bei einer Entfernung von ca. 1,5 m beobachtet, was vergleichbar mit dem ULS-200-Scansystem ist. Die Streupunkteanteile lagen mit 6,3 % und 9 % geringfügig höher als beim ULS-200-Scansystem. Bei den Messungen in der Ostsee unter realistischen Bedingungen wurde für den Messabstand von 1,2 m ein Messrauschen zwischen 1,4 mm bis 2 mm und für den Messabstand von 2,7 m ein Messrauschen von ca. 4 mm festgestellt. Durch die Umgebungsbedingungen und die unterschiedlichen Beleuchtungseffekte ergaben sich für den nahen Bereich Streupunkteanteile bis zu 18 % und für den weiten Bereich bis zu 6 %. Die maßstäblichen Korrekturen liegen mit Werten um die 1,238

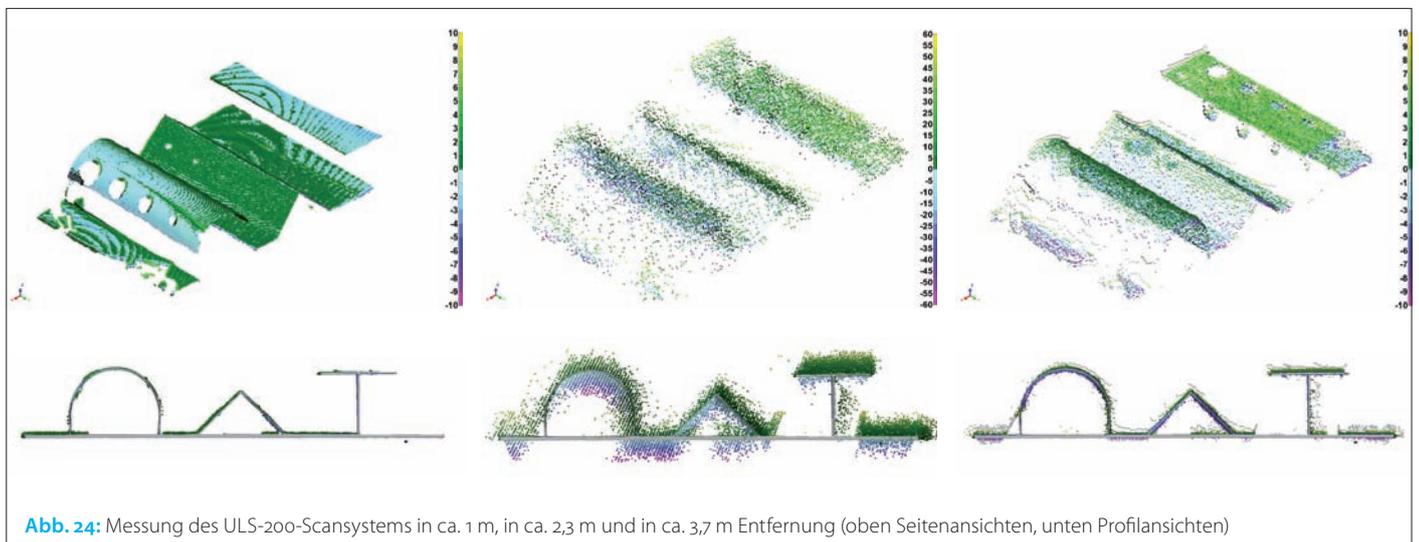


Abb. 24: Messung des ULS-200-Scansystems in ca. 1 m, in ca. 2,3 m und in ca. 3,7 m Entfernung (oben Seitenansichten, unten Profilsichten)

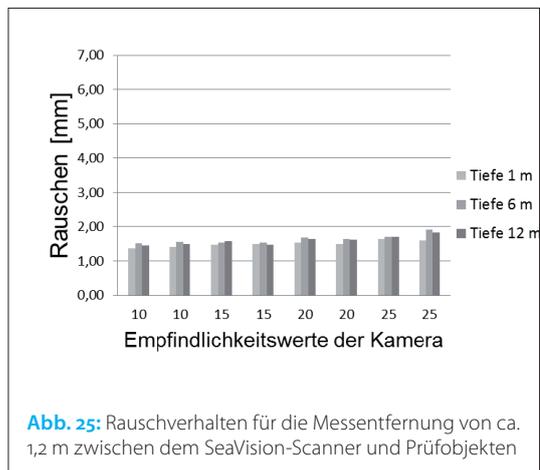


Abb. 25: Rauschverhalten für die Messentfernung von ca. 1,2 m zwischen dem SeaVision-Scanner und Prüfbjekten

Bild aus: Niemeier et al. 2019

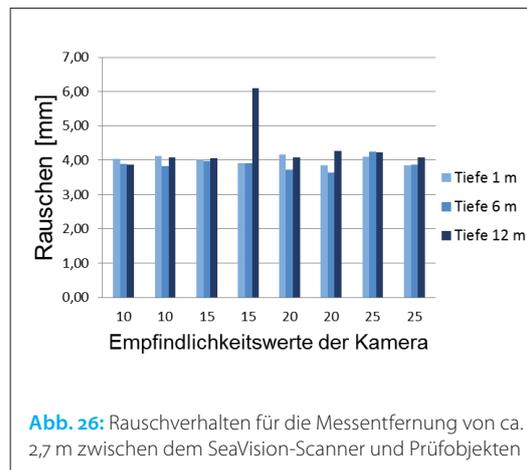


Abb. 26: Rauschverhalten für die Messentfernung von ca. 2,7 m zwischen dem SeaVision-Scanner und Prüfbjekten

Bild aus: Niemeier et al. 2019

für den nahen Bereich und 1,276 für den weiten Bereich insgesamt etwas höher.

Das Stereokamerasystem ist in der Lage, mit einer Framerate von 7 fps den Aufnahmebereich zu erfassen (Dolereit 2017). Diese Messgeschwindigkeit wird von den trigonometrischen Systemen nicht erreicht. Dabei hängt die Messqualität stark von der Beleuchtung und von der farblichen Inhomogenität des Messobjekts ab. Durch die farbliche Homogenität der Beschichtung ist das Prüfbjekt für photogrammetrische Anwendungen eher weniger geeignet. Dennoch sollte zu Vergleichszwecken der Prüfkörper verwendet werden. Im Gegensatz zu den trigonometrischen Scansystemen wird ein Messrauschen zwischen 6 mm und 10 mm erreicht. Dabei wurden erwartungsgemäß farblich homogene Bereiche nicht abgebildet, was zu einer Abdeckung des Messbereichs zwischen 25 % und 35 % der sichtbaren Oberfläche in allen Aufnahmen führte. Da Kanten und Öffnungen jedoch farbliche Unterschiede hervorrufen und zudem wichtige Orientierungsmerkmale an einer Struktur sind, ließen sich photogrammetrische Aufnahmesysteme im Unterwasserbereich, vorausgesetzt, die Sichtbarkeit ist gegeben, als Positions- und Orientierungssysteme verwenden. Maßstabsfaktoren konnten nicht bestimmt werden, da die Punktwolken um die Marken herum zu stark variierten.

Allgemein können mit den getesteten Systemen gute bis sehr gute Messergebnisse bei der geometrischen Erfassung von Unterwasserstrukturen erzielt werden. Die Einflussfaktoren sind unter Wasser sehr zahlreich und beeinflussen die Messungen. Streupunkte sind von der Leuchtquelle und der Belichtungszeit der Kamera abhängig. Der Messbereich und die Messgenauigkeit hängen von der Messkonfiguration, z. B. der Basislänge zwischen den Kameras bzw. der Kamera und dem Lasermodul, ab. Für die Untersuchungen wurden die maßstäblichen Korrekturen gleichmäßig auf die Punktwolken angewendet, jedoch können wegen unterschiedlicher Brechungswinkel auch nichtlineare Verzerrungen in den 3D-Punktwolken auftreten, die aber nicht Gegenstand dieses Papers sein sollten. Zudem wurden verschiedene Maßstä-

be für unterschiedliche Messbereiche bei gleichen Kalibrierungsparametern festgestellt. Umfassende Kalibrierungen sind daher notwendig. Da sich die Umgebungsbedingungen während einer Messkampagne ändern können, sollten Kalibrierungen simultan zu den Messungen vorgenommen werden.

Je nach Anwendungsfall können optische Systeme zur Vermessung unter Wasser eingesetzt werden. Preiswerte photogrammetrische Systeme reichen für viele Aufgaben aus, haben jedoch Schwächen in der Messgenauigkeit und im Umgang mit homogenen Flächen. Dafür eignen sie sich für Echtzeitanwendungen z. B. zur Navigation. Für anspruchsvollere Messaufgaben kommen eigentlich nur aufwendigere Laser-basierte Systeme infrage.

Ausblick

Durch die weiter voranschreitende Erschließung des Unterwasserbereichs werden auch mehr Überwachungs- und Inspektionssysteme zur Anwendung kommen. Optische Scansysteme zur geometrischen Erfassung von Strukturen unter Wasser werden hierfür immer wichtiger. //

Danksagung

Um Messungen im Bereich unter Wasser durchzuführen, bedurfte es einer umfangreichen Planung und Organisation. Wir danken daher dem Institut für Ostseeforschung in Warnemünde für die Bereitstellung des ULS-200-Scansystems und der Kraken Robotik GmbH aus Bremen für die Bereitstellung des SeaVision-Lasersystems sowie für die Unterstützung bei den Messungen. Zudem danken wir dem Lehrstuhl für Strömungstechnik der Universität Rostock für die Möglichkeit, dort Messungen unter laborähnlichen Bedingungen unter Wasser durchführen zu können. Der Baltic Taucher GmbH sei für die Unterstützung bei den Messungen in der Ostsee gedankt. Zudem sei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Projektförderung (Förderkennzeichen 03WKCR4D) gedankt.

3D HydroMapper

Automatisierte 3D-Bauwerksaufnahme und Schadenserkennung unter Wasser für die Bauwerksinspektion und das Building Information Modelling

Ein Beitrag von CHRISTIAN HESSE, KARSTEN HOLSTE, INGO NEUMANN, FREDERIC HAKE, HAMZA ALKHATIB, MICHAEL GEIST, LISA KNAACK und CHRISTIAN SCHARR

Mit dem 3D HydroMapper erfolgt die Durchführung einer flächigen Bauwerksaufnahme mit automatisierter Schadenserkennung an Bauwerken unter Wasser: Die erforderlichen Instandsetzungsbauteile können durch die 3D-Bauwerksdaten zuverlässig vorbereitet werden und der Taucher wird punktgenau zum Schaden geführt, um diesen zu reparieren. Durch eine mobile Träger- und Sensorplattform, eine neue und standardisierte Strukturierung der Bauwerksinspektion und insbesondere eine weitgehende Automation des Mess-, Auswerte- und Prüfvorganges mit künstlichen neuronalen Netzen (KNN) wird vom 3D HydroMapper die digitale Bauwerksinspektion durchgeführt. Alleinstellungsmerkmale des Systems und der Prozesse sind die Reduktion von langwierigen Sperrungen von Hafenanlagen für Tauchereinsätze (5-mal schnellere Erfassungsgeschwindigkeit), eine signifikante Reduktion der Gefährdung von Tauchern im Rahmen des händischen Prüfungsumfanges und eine dauerhafte, referenzierbare Dokumentation des Bauwerkszustandes mit der Möglichkeit der Erstellung und Fortschreibung von digitalen Bauwerksmodellen. Somit wird erstmalig auch die Transparenz und Reproduzierbarkeit der Prüfvorgänge gewährleistet, da subjektive manuelle Vorgänge durch automatisierte und digitale Verfahren ersetzt werden.

Autoren

Dr. Christian Hesse ist Geschäftsführer von Dr. Hesse und Partner Ingenieure (dhp:i) in Hamburg.
Dipl.-Ing. (FH) Karsten Holste ist Geschäftsführer der WKC Hamburg GmbH.
Prof. Dr. Ingo Neumann, M.Sc. Frederic Hake und Dr.-Ing. Hamza Alkhatib lehren und forschen an der Leibniz Universität Hannover.
Dr. Michael Geist, M. Eng. Lisa Knaack und M.Sc. Christian Scharr sind wissenschaftliche Mitarbeiter an der Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) in Rostock.

ch@dhp:i.com

3D HydroMapper | Multi-Sensor-System | Bauwerksinspektion | BIM | KNN

Einleitung

Die alternde Infrastruktur der See- und Binnenhäfen in Deutschland und der demografische Wandel erfordern neue Sichtweisen, Technologien und Methoden bei der Vorbereitung und Durchführung des Lifecycle-Managements. Die bisher personal- und zeitintensiven Arbeitsprozesse werden durch neue automatisierte, smarte und innovative Mess- und Analyseprozesse ersetzt, um transparent und ressourceneffizient sowie betriebssicher handeln zu können.

Die Bauwerksprüfungen an Wasserbauwerken werden über Wasser durch humansensorische Prüfungen durchgeführt. Mit erheblich höherem Aufwand ist die Zustandserfassung und -dokumentation von Schäden unter Wasser verbunden. Die humansensorischen Prüfungen und Schadensaufnahmen unter Wasser mit Tauchern sind in Qualität und Quantität starken Variationen unterworfen. Schadenslage, Schadensklassifizierung und Schadensentwicklung sind bei regelmäßigen Bauwerksprüfungen aufgrund der subjektiven Wahrnehmungen nicht reproduzierbar. Ein flächiges Abtauchen findet zudem in der Regel nicht statt. Die unter Wasser befindlichen Konstruktionsteile werden in Abständen von rund 50 bis 100 m abgetaucht, dabei gleitet der Taucher an der Konstruktion hinunter und versucht gleichzeitig zu strömungsbedingten Einflüssen die Konstruktion abzutasten oder im günstigsten Fall visuell zu inspizieren. Aufgrund der Sedimentbedingungen kann die visuelle Inspektion an der deutschen Küste allenfalls im Bereich der Ostsee und in einigen Bereichen der Nordsee statt-

finden. Insbesondere im Bereich der Ems, der Weser und der Elbe sind jedoch teilweise Sedimentgehalte vorhanden, die eine qualitätsgesicherte visuelle Inspektion fast unmöglich machen.

Durch den 3D HydroMapper wird mittels eines hybriden Multi-Sensor-Systems eine weitestgehend automatisierte, qualitätsgesicherte und reproduzierbare Über- und Unterwasser-3D-Aufnahme und Schadenserkennung von z. B. Hafenanlagen ermöglicht (siehe [Abb. 1](#), S. 27). Dies schließt ebenfalls die Modellierung mit ein, die für die Erstellung und Fortschreibung von digitalen Bauwerksmodellen (BIM) und Bauwerksplanungen notwendig ist. Einen wesentlichen Innovationsanteil hat dabei die weitestgehend automatische Ableitung und Klassifizierung von Bauwerksschäden mittels Mustererkennungsmethoden, die auf Grundlage von strukturierten Objekt- und Schadenskatalogen erfolgt.

Durch ca. 60 % geringere Erfassungskosten und eine 16-mal höhere Vollständigkeit als bei den üblichen Aufnahmeverfahren durch Taucher werden die so gewonnenen Ergebnisse durch den Hafentreiber genutzt, um die an die Bauwerksinspektion anschließenden Instandhaltungskonzepte und Bauleistungen transparent und betriebssicher zu gestalten. Somit werden Ausfallzeiten der Hafenanlagen und kostenintensive Änderungen im Bauprozess deutlich reduziert.

Im Ergebnis werden IT-basierte Hard- und Softwarelösungen für die kombinierte 3D-Aufnahme und -Modellierung von Über- und Unterwasserbauwerken sowie für die Ableitung von

Schadensklassifizierungen genutzt, die für das Lifecycle-Engineering inklusive der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen notwendig sind. Durch den hohen Automatisierungsgrad und die damit verbundene Steigerung der Verfügbarkeit des Umschlages werden für die Hafenerbetreiber erhebliche Kosten- und Zeitersparnisse realisiert.

Träger- und Sensorplattform

Von zentraler Bedeutung für die Aufnahme der Messdaten ist die Trägerplattform, die als bootsähnliches Fahrzeug Einflussgrößen wie Wind, Welle und Strömung ausgesetzt ist. Gleichzeitig dient die Trägerplattform auch der Aufnahme der Sensorplattform. Die Konstruktion von Träger- und Sensorplattform soll bewirken, dass strömungsbedingte Einflüsse nicht als qualitätsmindernde Verformungs- und Zwangskräfte in die Sensorplattform eingeleitet werden. Gleichzeitig ist ein Drift- und Torsionsausgleich vorgesehen.

Bauwerksinspektionen finden in der Regel auf Grundlage von strom- und schiffahrtspolizeilichen Genehmigungen statt, in denen Geschwindigkeits- und Abstandsbeschränkungen sowie Verhaltensregeln für den Schiffsverkehr für die Dauer der Bauwerksinspektion festgelegt sind.

Hybrides Multi-Sensor-System, Kalibrierung und Georeferenzierung

Für die Erfassung von Bauwerksgeometrie und Bauwerkszustand werden nicht nur genaue, sondern auch möglichst hochauflösende 3D-Daten für die unter Wasser wie auch über Wasser liegenden Bauwerksteile benötigt. Nur hierdurch kann eine zuverlässige Erfassung von Schäden und darauf aufbauend eine fundierte Beurteilung des aktuellen Bauwerkszustandes erfolgen.

Im 3D-HydroMapper-System werden für diese Erfassungsaufgabe drei unterschiedliche Sensortypen fusioniert (Abb. 2):

- ein hochauflösender hydroakustischer Unterwasserscanner,
- ein Überwasser-Profillaserscanner,
- fünf HDR-Flächenkameras.

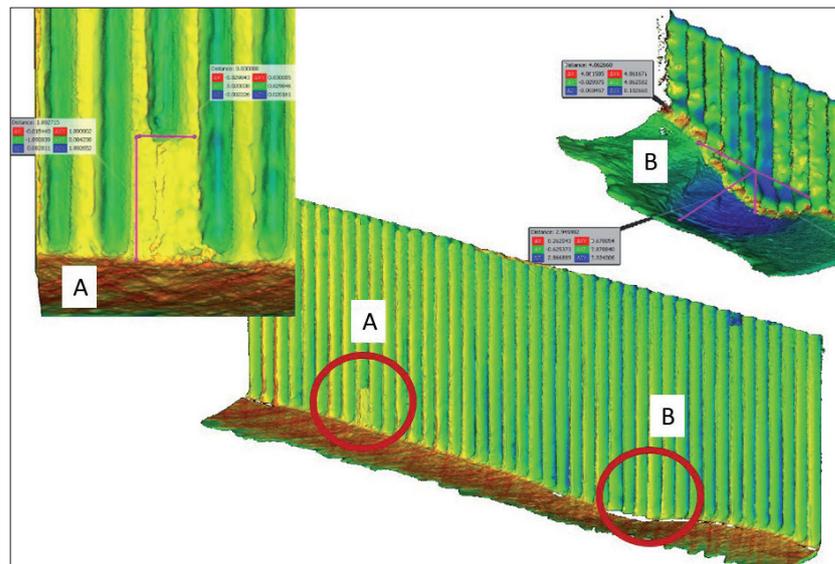


Abb. 1: Identifizierung einer Spundwandinstandsetzung (A), lokale, standsicherheitsrelevante Auskolkung vor der Spundwand (B)

Das Unterwasserscanning durch einen Teledyne Reson Seabat T50p erlaubt maximale Datendichte in Verbindung mit einer sehr guten 3D-Punktgenauigkeit. Im Überwasserbereich wird die Objekterfassung durch einen 200-Hz-Profillaserscanner vervollständigt, der bisher nur bei der Erfassung von Straßeninfrastruktur zum Einsatz kommt. Komplettiert wird die bildgebende Sensorik durch insgesamt fünf hochauflösende HDR-Flächenkameras, auf deren Grundlage nicht nur eine Echtfarbcolorierung der Punktdaten erfolgen kann, sondern auch weitergehende Auswertungen von Schadensstellen sowie die Berechnung von Orthobildplänen realisiert werden.

Erste Projekte haben gezeigt, dass diese innovative Sensorfusion geeignet ist, eine neue Stufe der Detailgenauigkeit und Datenqualität zu liefern, mit der Objektgenauigkeiten bis in den Zentimeterbereich hinein auch unter Wasser möglich sind.

Für die Positionierung kommt neben dem aus verschiedenen Anwendungen bekannten IMU-GPS/GNSS-Verfahren zusätzlich eine hybride Referenzierung mit automatisch zielverfolgenden Tachymetern zum Einsatz (Abb. 2). Hierbei wird

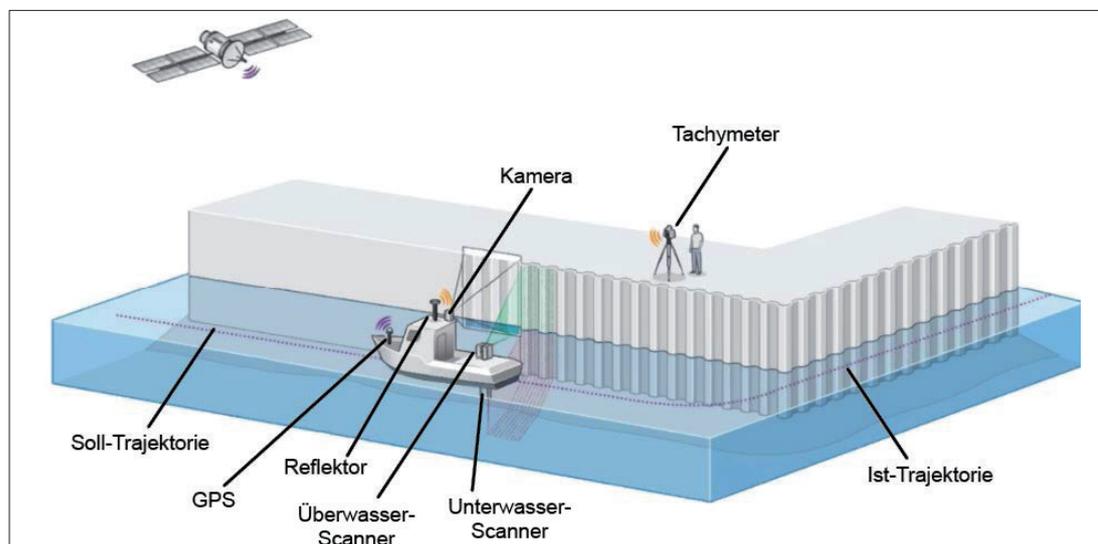


Abb. 2: 3D-Aufnahme einer Hafenanlage über und unter Wasser mit dem 3D HydroMapper

die Sensorplattform im regulären Einsatz über ein IMU-Dual-GPS-System positioniert. Insbesondere bei Hafengebäuden kommt es bekanntermaßen beim Einsatz von GPS häufig zu Signalabschattungen, die durch Kräne, Brückendurchfahrten, hohe Kaimauern, an der Pier liegende Schiffe und sonstige großvolumige Objekte hervorgerufen werden. Diese Abschattungen sind auch durch zusätzliche Satellitennavigationssysteme wie Beidou und Galileo nicht zu kompensieren und führen zwangsläufig zu einer deutlichen Verschlechterung der Positionierung, die sich direkt auf die Qualität der erfassten Objektgeometrien auswirkt.

In solchen Fällen kommt beim 3D-HydroMapper-System die hybride Positionierung mittels IMU und GPS sowie Tachymetrie zum Einsatz, bei der das Tachymeter die Georeferenzierung für diejenigen Bereiche nahtlos übernimmt, in denen GPS nur unzureichende Qualität liefert. Auf diese Weise sind Positioniergenauigkeiten von 1 cm und besser möglich, was sich sehr positiv auf das finale Bauwerksmodell auswirkt.

Dieses Verfahren liefert sehr hohe Synchronität zwischen allen Sensorkomponenten und kann sowohl in Echtzeit als auch offline im Postprocessing eingesetzt werden. Die hier entwickelten Verfahren wurden bereits zum Patent angemeldet.

Neben der Positionierung der Mess- und Sensorplattform ist die Kalibrierung aller Sensoren ein wesentliches Merkmal für die Qualität der Datenaufnahme. Auch hier werden beim 3D-HydroMapper-Projekt neuartige Verfahren zur In-situ-Kalibrierung aller Sensoren direkt am Objekt entwickelt, sodass eine gleichbleibende und hochwertige Qualität der Kalibrierung gewährleistet ist.

Qualitätsgesichertes Routing

Ein wesentlicher Faktor für eine qualitativ hochwertige Objektaufnahme stellt eine Routenplanung dar, die die jeweiligen Objekteigenschaften berücksichtigt. Hierfür müssen grobe Bestandspläne bzw. 3D-Daten als Vorinformationen vorhanden sein. Anders als bei herkömmlichen Routingaufgaben steht hier nicht die Suche nach dem kürzesten Pfad zwischen zwei Punkten im Vordergrund, sondern die vollständige und zuverlässige Aufnahme des Objektes mit gesicherten Qualitätsvorgaben. Hierbei sind insbesondere Genauigkeiten und Objektauflösung als relevante Qualitätsmaße zu nennen. Die Genauigkeiten ergeben sich z. B. an dieser Stelle maßgeblich aus dem Auftreffwinkel des Laserstrahles beziehungsweise der Multibeam-Messungen sowie der Messentfernung zum Objekt.

Zusätzlich zu Abstand und Auftreffwinkel fließen auch die Pegelstände in die Berechnung mit ein. So kommt am Ende nicht nur eine optimale Trajektorie zur Aufnahme des Objektes heraus, sondern auch Zeitfenster, zu denen unter optimalen Bedingungen erfasst werden kann.

Geometrische Schadensdetektion

Bei der Schadensdetektion mittels geometrischer Verfahren werden die 3D-Punktwolken durch Freiformflächen mathematisch approximiert. Eine spezielle Art von Freiformflächen sind B-Splines. Splines sind Funktionen, die stückweise aus Polynomen n-ten Grades zusammengesetzt sind. Dabei werden an den Knoten (Punkten, an denen die Segmente verbunden sind) bestimmte Bedingungen, wie z. B. stetige Differenzierbarkeit, gestellt. Ein besonders relevanter Aspekt bei der Approximation der 3D-Punktwolke ist in der Komplexitätswahl der Flächen zu sehen. Eine zu geringe Kom-

Abb. 3: Geometrische Schadensdetektion mit B-Spline-Flächen. Links eine Fläche ohne erkannte Schäden und rechts eine Fläche mit erkennbaren Schäden

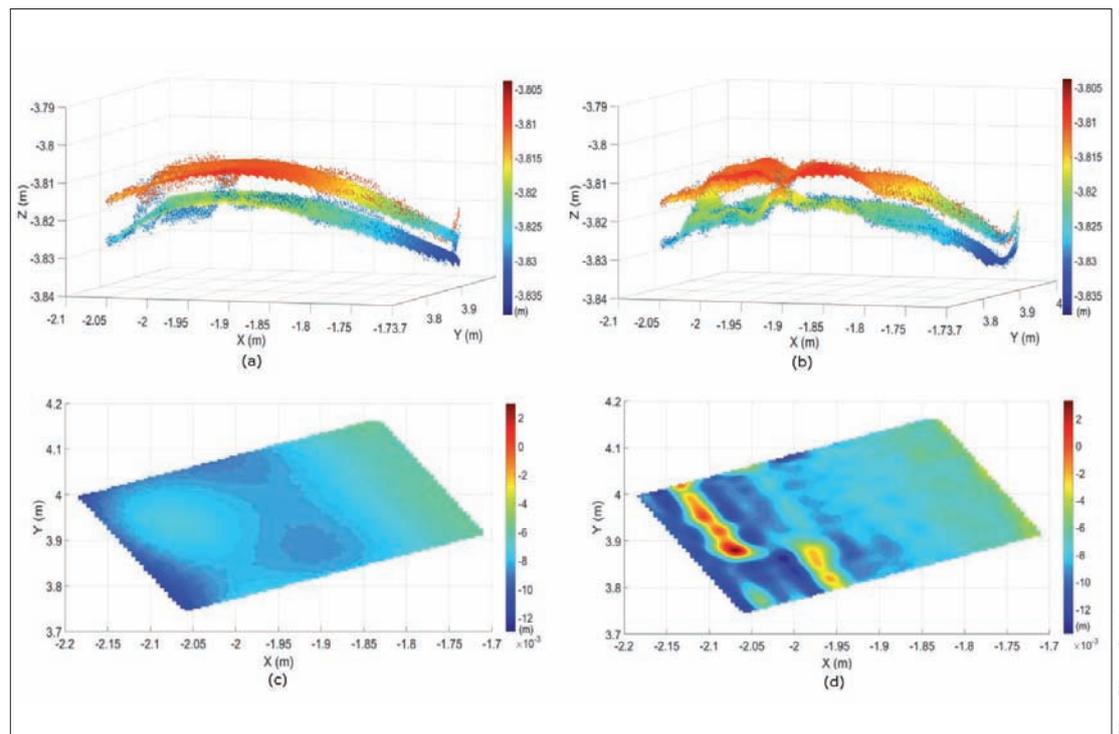


Bild aus: Zhao et al., 2018

plexität führt dazu, dass Schäden nicht erkannt werden können (vgl. Abb. 3, links, S. 28), während eine zu große Komplexität zur Approximation von Messrauschen führt.

In den B-Spline-Flächen wird anschließend nach Schäden gesucht. Abb. 3 zeigt exemplarisch eine Fläche ohne erkennbare Schäden und eine Fläche mit erkennbaren Schäden. Bei der Fläche mit erkennbaren Schäden wurde die mathematische Komplexität der Approximation korrekt gewählt.

Schadensdetektion mit künstlichen neuronalen Netzen

Neben den geometrischen Verfahren werden für die Schadenserkenkung und -klassifizierung neue Verfahren des Deep Learnings, im Speziellen der künstlichen neuronalen Netze (KNN), verwendet. KNN sind von der natürlichen Vernetzung von Neuronen in Lebewesen abgeleitet. Im Vordergrund steht dabei aber nicht die komplette Nachbildung eines neuronalen Systems, vielmehr werden die künstlichen neuronalen Netze zur Abstraktion und Modellbildung eingesetzt. Werden sehr viele verdeckte Schichten, sogenannte Hidden Layer, verwendet, wird von einem Deep-Learning-Verfahren gesprochen.

Zur Schadensdetektion wird ein spezielles künstliches neuronales Netz verwendet, das als Eingabegrößen die Punktwolken aus dem Laserscanner und dem Multibeam verwendet. Neben den geometrischen Eigenschaften werden auch Nachbarschaftsinformationen, die Laserintensität und, sofern verfügbar, auch Farbinformationen verwendet. Das Ergebnis sind segmentierte und klassifizierte Punktwolken. Hierbei soll neben der Erkennung des reinen Schadens auch der Typ und der Umfang der Schädigung zukünftig beurteilt werden.

Flächenhafte Modellierung für Building Information Modelling

Zur optimalen Planung und Verwaltung von Gebäuden und Infrastruktur über ihren gesamten Lebenszyklus stellt das BIM (Building Information Modelling) einen Prozess, basierend auf einem digitalen 3D-Modell aus Bauwerksdaten und allen relevanten Informationen, dar.

Innerhalb des gesamten Forschungsvorhabens soll mit den im Rahmen der Inspektion von Hafengebäuden erfassten Daten in einem durchgängigen Datenstrom ein BIM-fähiges Modell entstehen. Das Modell soll hierbei aus den oben genannten flächenhaften Sensordaten unterschiedlicher Genauigkeitsklassen erzeugt werden.

Bei der Modellierung von Punktwolken sollen die unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich der Nutzung von As-Built-Dokumentationen von Bestandsgebäuden sowohl für die Deformationsanalyse als auch für die Nutzung in einer BIM-Umgebung berücksichtigt werden.

Für die Modellierung können datengetriebene und wissensbasierte Verfahren verwendet werden. Ziel ist es, auf Basis vorhandener Unterlagen (z. B. Bauplänen und GIS-Systemen) und einer möglichst flexiblen Formulierung von Metainformationen für Objektstandards von Hafengebäuden eine Segmentierung und Klassifizierung zur Generierung einer verformungstreuen Abbildung aus den hybriden Messdaten (Punktwolken unter Wasser und über Wasser) umzusetzen.

Die zu entwickelnden Objektstandards, die approximierten Flächen sowie die Messdaten dienen als Basis für die Bauwerksinspektion einschließlich Deformationsanalyse, Schadensdetektion und -kartierung. Neben den Anforderungen an ein BIM werden auftretende Verformungen analysiert und entsprechend ihrer Relevanz zur Integration ins BIM klassifiziert.

Für die Verwendung in einem Infrastruktur-Lifecycle-Management werden Verfahren zur Modelltransformation der flächenhaften Abbildung entwickelt. Die Flächenmodelle werden in Kombination mit einer zu entwickelnden 3D-Kantenerkennung zur Definition der Berandungen und vordefinierten Metainformationen in Volumenkörper überführt. Dabei werden durch semantische Verknüpfung, Vereinigung und Verschneidung der vorliegenden Einzelflächen Flächenverbünde erzeugt. Es werden Festlegungen zu Übergangsbereichen und Entscheidungshilfen für den Umgang mit nicht erfassten Bereichen entwickelt und berücksichtigt. Diese Volumenmodelle stellen die maßgeblichen Informationsträger dar, wobei Geometrie, Semantik, Material, beschreibende Sachdaten und Relationen untereinander nur einige der Eigenschaften sind. Die Herausforderung besteht darin, möglichst viele dieser Informationen aus den Sensordaten abzuleiten.

Die Modellierung der Messdaten als Flächen- bzw. Volumenmodelle erfolgt unter Berücksichtigung der Geometrieklassen des BIM-Austauschformates Industry Foundation Classes (IFC). Für noch nicht beschreibbare, hafenspezifische Entities wird ein Vorschlag zur Erweiterung der IFC-Spezifikation erarbeitet. Einen spezifischen Untersuchungsgegenstand bildet dabei die Einbindung der Deformationsanalyse und der Schadenskartierung in das Austauschformat, um die Ergebnisse der Bauwerksinspektion im Grundgedanken eines BIM-Prozesses allen beteiligten Nutzern zur Verfügung zu stellen.

Die in den nächsten Jahrzehnten stattfindenden Infrastrukturplanungen und -ausführungen sind nach dem »Stufenplan Digitales Planen und Bauen« modellbasiert durchzuführen. Mit dem 3D HydroMapper können die Schritte von der Bauwerksaufnahme bis zum Building Information Model in diesem Sinne durchgeführt werden. //

Projektpartner

Die in diesem Beitrag vorgestellten Entwicklungen und Methoden sind Inhalt des Verbundprojektes 3D HydroMapper »Hybride 3D-Bestandsdatenerfassung und modellgestützte Prüfung von Verkehrswasserbauwerken für ein nachhaltiges Infrastruktur-Lifecycle-Management«, welches im Rahmen des Forschungsprogramms »Innovative Hafentechnologien« (IHATEC) vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gefördert wird. Neben dem Gesamtkoordinator Dr. Hesse und Partner Ingenieure in Hamburg (dhp:i) sind als Partner die WKC Hamburg GmbH (WKC), das Geodätische Institut Hannover (GIH), die Fraunhofer-Einrichtung für Großstrukturen in der Produktionstechnik (IGP) Rostock und der Hafentreiber und -dienstleister Niedersachsen Ports (NPorts) beteiligt. Als assoziierter Partner ist die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung in dem Projekt involviert.

Literatur

Zhao, Xin; Boris Kargoll; Mohammad Omidiazarandi; Xiangyang Xu; Hamza Alkhatib (2018): Model selection for parametric surfaces approximating 3D point clouds for deformation analysis; Remote Sensing, Jg. 10, Heft 4, Nr. 634, Special Issue: »3D Modelling from Point Clouds: Algorithms and Methods«

Multibeam-Vermessung von Spundwänden

Möglichkeiten und Grenzen anhand von Untersuchungen in Bremerhaven

Ein Beitrag von THORSTEN DÖSCHER

Die traditionelle Regelaufgabe der Hafengesellschaft bremenports GmbH & Co. KG in der Hydrographie ist die Bestimmung der Wassertiefe, um die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs im Hafen zu gewährleisten. Während für das Hafenamts, die Lotsen und die Baggerei die minimalen Wassertiefen relevant sind, ist für die Unterhaltung der Kaje die maximale Wassertiefe interessant, um lokale Kolke zu identifizieren und die Stabilität der Kaje zu prüfen. Ausgerüstet mit dem Multibeam R2Sonic 2024, können mit dem neuen Vermessungsschiff *Seedler* neben den Wassertiefen auch die Kajenbauwerke unter Wasser vermessen werden.

Autor

Dipl.-Ing. Thorsten Döscher leitet das Team »Peilerei und Vermessung« bei der bremenports GmbH & Co. KG. in Bremerhaven.

thorsten.doescher@
bremenports.de

Hafen | Bauwerksüberwachung | Multibeam | Punktwolke | Visualisierung

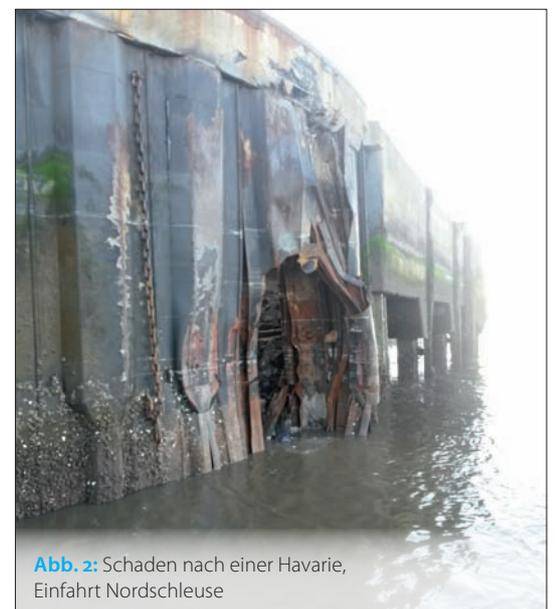
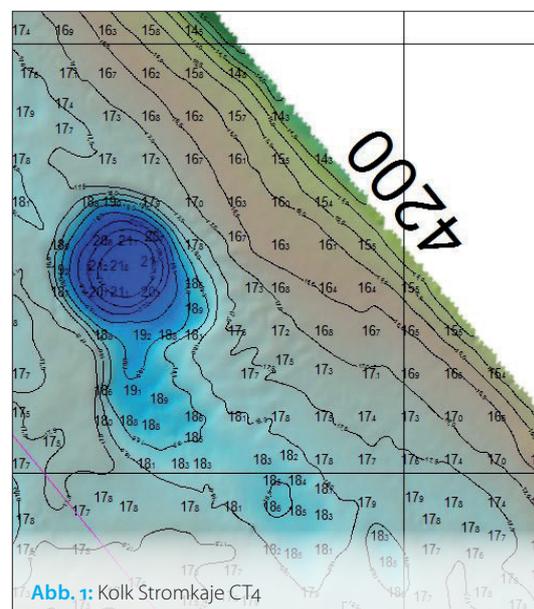
1 Einleitung

Eine Spundwand – oder allgemein eine Kajenwand (das Wort »Kaje« ist in der Region Bremen, Bremerhaven und Wilhelmshaven gebräuchlich, während in anderen Hafenstädten von »Kai« gesprochen wird) – bildet die Grenze zwischen Wasser und Land. Damit das Be- und Entladen eines Schiffes unbedenklich erfolgen kann, muss die Standsicherheit der Kaje gewährleistet sein. Verschiedene Gründe können eine Untersuchung der Standsicherheit notwendig machen. Die Solltiefe vor einer Kaje bestimmt die maximalen Schiffstiefgänge, demgegenüber definiert die Bemessungsgrenze die maximal statisch erlaubte Wassertiefe. Lokale Kolke, verursacht durch natürliche Strömungen oder durch Schraubenwasser, können eine statische Überprüfung notwendig machen und gegebenenfalls eine Kolkverfüllung erfordern. Die [Abb. 1](#) weist auf einen Kolkbereich vor dem

Container Terminal in Bremerhaven hin, welcher verfüllt werden musste.

Die [Abb. 2](#) zeigt den großen Schaden einer Kaje nach einer Schiffskollision. Die Gewässersohle vor der Schadensstelle musste auf Mindertiefen durch Sandaustritt und auf abgebrochene Teile der Kaje am Grund untersucht werden. Diese Beispiele zeigen klassische Einsätze hydrographischer Vermessung der Wassertiefen zur indirekten Überprüfung einer Kaje. Die direkte Vermessung einer Kajenwand dagegen soll das Bauwerk auf Deformationen überprüfen. Dies erfolgt einerseits an Land mit klassischen geodätischen Methoden der Bauwerksüberwachung, andererseits unter Wasser durch Taucher, die die Kajenwand auf Schäden untersuchen. Dabei muss der Taucher den Zustand der Kajenwand im trüben Hafenwasser mehr ertasten als sehen.

Dieser Beitrag zeigt drei aktuelle Untersuchun-



gen zur Bauwerksüberwachung unter Wasser durch Multibeam-Vermessung (Kapitel 3). Im Gegensatz zur Messung der Wassertiefe ist dabei der Blick nicht nur nach unten zum Grund gerichtet, sondern direkt auf das Bauwerk, das heißt vom Kajenfußpunkt vertikal nach oben bis nahezu zur Wasseroberfläche. Im zweiten Kapitel wird die technische Ausrüstung zur Kajenvermessung unter Wasser beschrieben. Abschließend wird in Kapitel 4 eine Zusammenfassung und ein Ausblick zu den derzeitigen Möglichkeiten und Grenzen der Vermessung einer Spundwand gegeben.

2 Vermessungsschiff *Seeadler*

Das bremenports-eigene Vermessungsschiff *Seeadler* (Abb. 3) wurde 2016 in Betrieb genommen. Ein wichtiges Kriterium für die Auswahl des Multibeams war eine gute Auflösung verbunden mit einer hohen Anzahl von Messwerten. Diese Anforderung ist im Hafen besonders wertvoll, um Hindernisse am Hafengrund orten und identifizieren zu können. Die Möglichkeit, das Multibeam auch für die Vermessung der Hafengebäude einzusetzen, wurde ebenfalls berücksichtigt, wenngleich zu der Zeit nur sehr spärliche Erfahrungen mit Bauwerksaufnahmen vorlagen.

Die Auswahl fiel auf das Multibeam R2Sonic 2024 mit dem optionalen 700-kHz-Modus UHR (Ultra High Resolution) und der TruePix-Backscatter-Funktion. Seit ca. einem Jahr kann durch ein Software-Update auch ein UHD-Modus (Ultra High Density) im Frequenzbereich von 170 bis 450 kHz genutzt werden. Der UHD-Modus generiert aus jedem der 256 Beams vier unabhängige Messwerte und erhöht somit die Punktdichte auf 1024 Messwerte pro Ping (R2Sonic 2017). Diese Neuerung hat die Ergebnisse der detaillierten Vermessung von Hindernissen am Hafengrund und der Vermessung von Bauwerken bedeutend verbessert. Die 700-kHz-Funktion mit einer Fokussierung der Beams auf $0,3^\circ \times 0,6^\circ$ kann nicht im UHD-Modus genutzt werden und eignet sich nur für den Na-



Abb. 3: Vermessungsschiff *Seeadler*

dirbereich, da das Multibeam fest im Schiffsrumpf installiert und der Öffnungswinkel des Fächers auf maximal 70° begrenzt ist.

Für die Positionierung der Messwerte des Multibeams ist die *Seeadler* mit dem GNSS-Empfänger Trimble SPS 855 und dem Inertial Navigationssystem IxBlue Hydrins ausgerüstet.

3 Multibeam-Ergebnisse von Spundwänden

Stromkaje am Container Terminal

Die Stromkaje mit einer Gesamtlänge von 4930 m und einem Umschlag von 5,5 Millionen TEU (bremenports 2018) ist in Bremerhaven von besonderer Bedeutung. Entsprechend häufig werden die Wassertiefen hier monatlich überprüft. Eine Vermessung der Spundwand muss jedoch gesondert von der Regelpeilung erfolgen, da hier andere Einstellungen am Sonar nötig sind als bei der Aufgabe einer Verkehrssicherungspeilung.

Zum Zwecke der Inspektion einer Spundwand gilt es, die bestmögliche Auflösung und Punktdichte zu erzielen. Ein Ausschnitt einer ersten Untersuchung im Übergang der Kajenabschnitte CT2 zu CT3 bei Station 1600 ist in Abb. 4 zu sehen. Hier wurde eine Punktdichte an der Spundwand von ca. 100 bis 120 Punkten auf einem Quadratmeter Kaje erreicht. Bei einer Vermessung des Gewässerbodens werden die

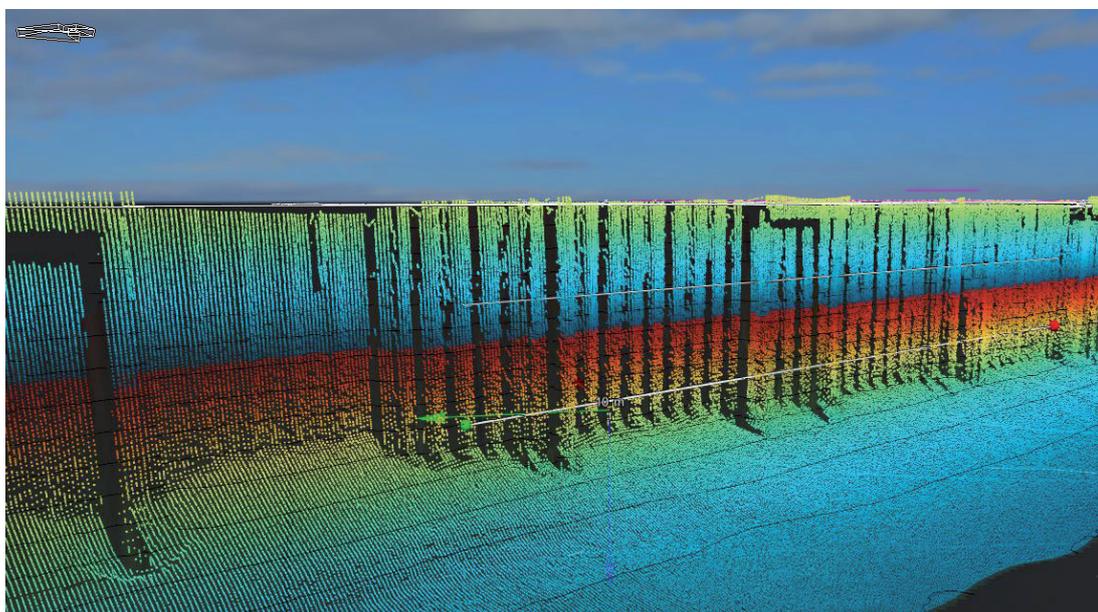


Abb. 4: Bereich der Stromkaje CT3/CT2 bei Kajenstation 1600

Literatur

R2Sonic (2017): Operation Manual V6.3; Austin, Texas, USA, 247 S.

bremenports (2018): Bremische Häfen in Zahlen – Statistiken; <https://bremenports.de/statistiken/>; zuletzt geprüft am 16.05.2019

Messpunkte in der horizontalen Ebene bereits während der Vermessung von der hydrographischen Software am Bildschirm angezeigt, um definierte Qualitätsstandards einzuhalten. Die Punktdichte in der vertikalen Ebene zu ermitteln, war dagegen nur durch grobes Auszählen möglich. Der Ausschnitt zeigt die Spundwand über ca. 80 m Länge über eine Tiefe von ca. 0 bis 10 m unter SKN. Durch den Kajenoberbau und die Fender liegen die Containerschiffe mit ihrer Außenwand ca. 6 m von der Spundwand entfernt; ab dort wird eine Solltiefe von 14,60 m unter SKN unterhalten.

Für die Bereinigung, Modellierung und Auswertung der Daten verwendet bremenports den EIVA NaviModel Producer. Der Screenshot aus dem NaviModel-Projekt kann nur einen Gesamteindruck von der erreichten Auflösung wiedergeben. Für die Analyse und Visualisierung der Daten kann das Projekt besser über den frei verfügbaren NaviModel Viewer den Kollegen, die für die Kajenunterhaltung und Kajeninspektion verantwortlich sind, zur Verfügung gestellt werden. Erste gemeinsame Analysen dieser Spundwandvermessung zeigen, dass man die allgemeine Kajenstruktur sehr gut erkennen kann. Die Auflösung reicht jedoch nicht aus für die Erfassung von sogenannten Schlosssprengungen (Öffnung der Kajenwand durch Deformation der Trag- und Füllbohle). Vielmehr kann der Betrachter die Struktur auf Unregelmäßigkeiten untersuchen. Dabei können z. B. auch die in Abb. 4 erkennbaren horizontalen Hilfslinien die Untersuchung der Kajenwand auf Deformation

unterstützen. Des Weiteren können Unregelmäßigkeiten in der Böschung vor der Kaje indirekt auf Schadstellen der Kajenwand hinweisen.

Columbuskaje

Das zweite Beispiel zeigt einen Ausschnitt der Columbuskaje, dem Kreuzfahrtterminal von Bremerhaven. Hier wurde getestet, Daten vom Multibeam mit Bilddaten einer Kopterbefliegung zu kombinieren. Aus den Bilddaten wurde über Passpunkte durch die Software Agisoft Photoscan eine georeferenzierte 3D-Punktwolke generiert, welche mit den Multibeam-Daten mit NaviModel zu einer gemeinsamen Punktwolke zusammengefügt, bearbeitet und visualisiert wurde (Abb. 5).

Hier wurden höhere Punktdichten erreicht, aus zwei Multibeam-Fahrtprofilen bei geringerer Wassertiefe gegenüber der Vermessung der Stromkaje wurden 400 bis 500 Messwerte pro Quadratmeter erzielt; die Befliegungsdaten liefern sogar eine 10-fach höhere Auflösung von ca. 5000 Messwerten pro Quadratmeter. Entsprechend lassen sich hier auch mehr Details insbesondere im betonierten Kajen-Oberbau erkennen. Trotz der hohen Auflösung können die Bilddaten eine visuelle Inspektion des betonierten Bauwerks im sogenannten Mannkorb nicht ersetzen, sondern nur ergänzen, da selbst die aus den Bilddaten generierten Orthofotos keine eindeutige Erkennung von Haarrissen im Beton ermöglichen. Die Bilddaten können aber für das Ausmessen der identifizierten Schadstellen hilfreich sein. Zudem bilden sie eine gute grafische Grundlage für die Dokumentation der Bauwerksinspektion. Analog zur Stromkaje bietet die Aufnahme der Spundwand unter Wasser mit dem Multibeam dagegen wertvolle Information. Hier wurde die Spundwand nicht senkrecht gerammt, sondern mit einer definierten Neigung, welche durch vertikale Hilfslinien überprüft werden kann. Ebenso lassen sich horizontale Deformationen im Unterwasserbereich analysieren und bemessen.

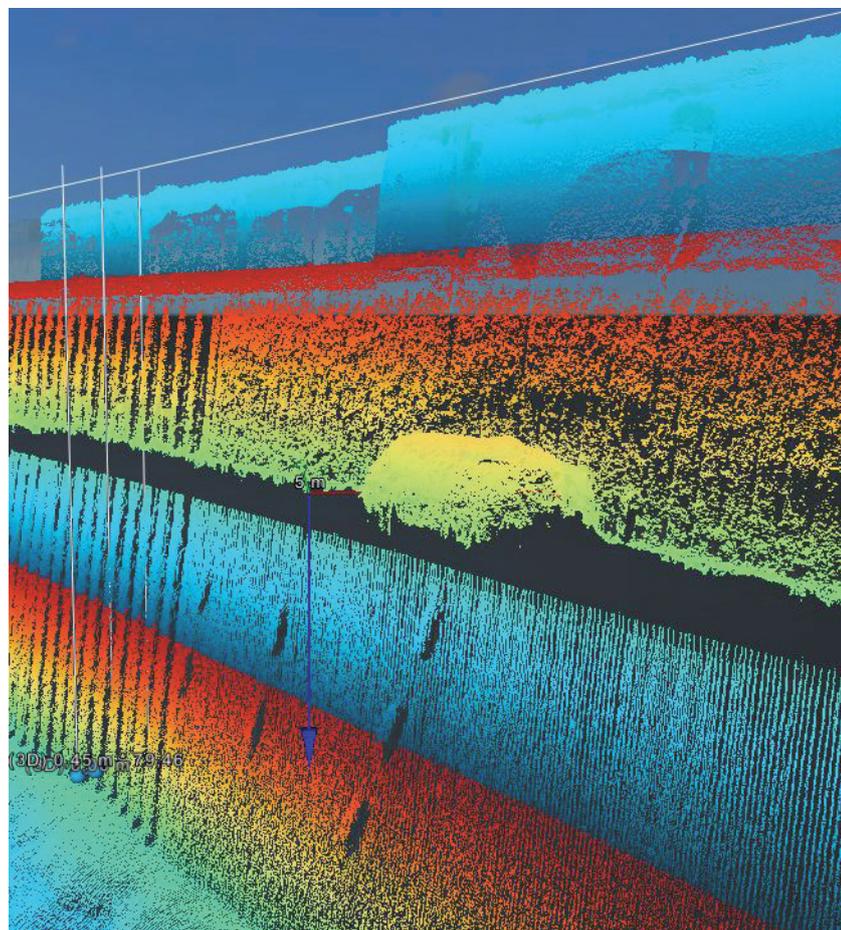
Fischereihafen

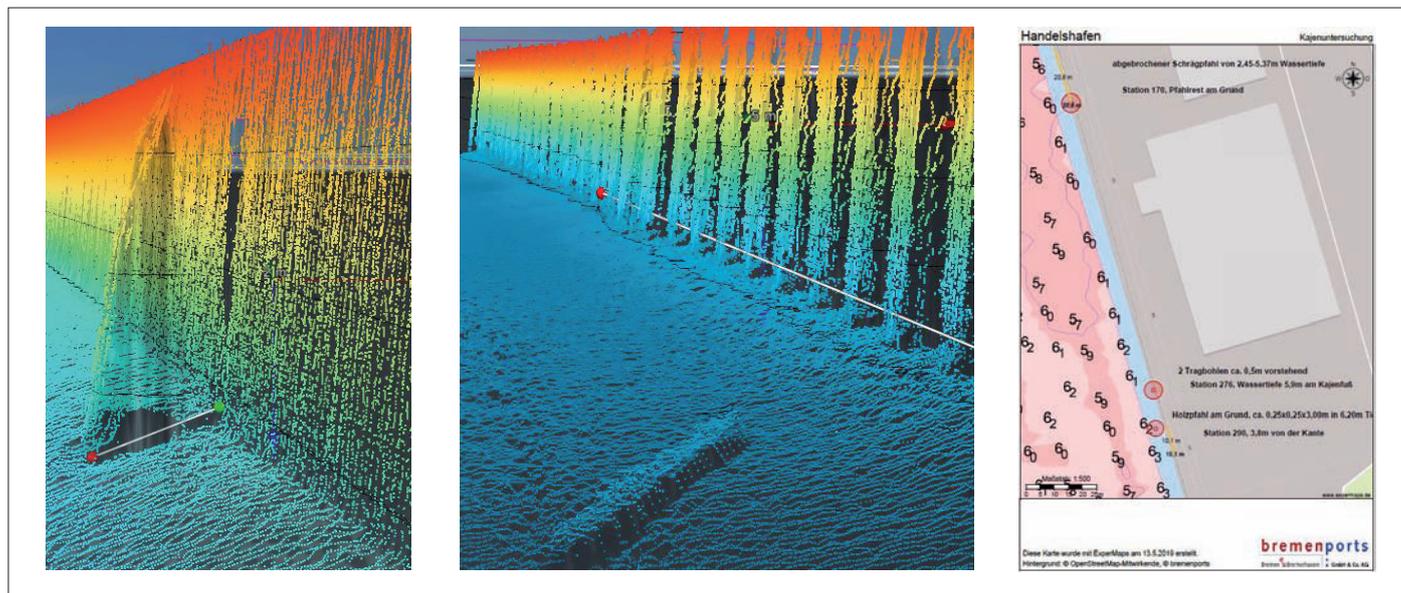
Das dritte Beispiel zeigt eine Aufnahme der Spundwand mit dem Multibeam im Fischereihafen in nur 6 m Tiefe. Hier konnte aufgrund der geringeren Wassertiefe und somit kleinerem Scanbereich eine Punktdichte von 500 bis 600 Punkten pro Quadratmeter erzielt werden. Die gemeinsame Analyse mit den Ingenieuren aus der Hafenunderhaltung konnte zudem nicht bekannte Problembereiche aufzeigen, welche durch die bremenports-Taucher demnächst näher untersucht werden sollen.

Es wurden ein abgebrochener Schrägpfahl ohne Funktion entdeckt (Abb. 6, links, S. 33), ein weiterer Pfahl am Hafengrund und eine größere Deformation der Spundwand. Dort stehen zwei Tragbohlen am Kajenfuß 0,5 bis 0,6 m aus der Spundwandachse hervor (Abb. 6, Mitte).

Die Positionen der Objekte können aus dem NaviModel Viewer entnommen und in das Hafen-GIS übertragen werden, um die zu untersuchen-

Abb. 5: Bereich der Columbuskaje bei Kajenstation 600





den Stellen so für die Taucher zu dokumentieren (Abb. 6, rechts).

4 Zusammenfassung und Ausblick

bremenports steht gerade erst am Anfang der Nutzung von Multibeam-Daten zur Untersuchung von Spundwänden. Die ersten Untersuchungen zeigen aber bereits, dass die vermessungstechnische Ausstattung der *Seeadler* dazu beitragen kann, den Zustand der Kajen in Bremerhaven zu analysieren und zu bewerten. Der UHD-Modus von R2Sonic hat die Ergebnisse der Kajenvermessung mit dem Sonar bedeutend verbessert. Entscheidend für die Qualität der Kajenaufnahme ist die Auflösung und Punktdichte der Multibeam-Vermessung. Es bedarf hierzu noch weiterer Untersuchungen und Erfahrungen in der optimalen Einstellung des Sonars wie auch in der Anordnung der hydrographischen Vermessung. NaviModel bietet gute Möglichkeiten zur Visualisierung und Analyse der Daten. Der NaviModel Viewer ermöglicht es, die Information allen beteiligten Kollegen einer Bauwerksinspektion zur Verfügung zu stellen. Damit haben Hydrographen, Vermessungsingenieure, Bauingenieure und Taucher eine gute Basis, ihre Kenntnisse über das Bauwerk auszutauschen und zu vertiefen,

um schließlich den Zustand des Bauwerks besser beurteilen zu können. bremenports möchte diese neuen Möglichkeiten in seine Arbeitsprozesse übernehmen und dadurch einen Mehrwert in der Bauwerksinspektion erzielen.

Die Visualisierung erfolgt derzeit ausschließlich über Punktwolken. Die Analyse der Daten erfordert vom Nutzer, sich die Punktwolke aus verschiedenen Perspektiven in unterschiedlichen Zoomstufen anzusehen, um so Details vom Bauwerk besser zu erkennen und zu interpretieren. Für die Erfassung von Deformationen sind gezeichnete Ebenen und Geraden hilfreich. Wünschenswert wäre eine 3D-CAD-Zeichnung nach Fertigstellung und Einmessung eines Neubaus, welche man dann später zu jedem Zeitpunkt mit einer aktuell aufgenommenen Punktwolke vergleichen kann. Es gibt aber auch aktuelle Entwicklungen von EIVA a/s, aus den Punktwolken mit NaviModel Producer 3D-Modelle (mesh) zu generieren. Ein erster Test erfolgte aus der hochauflösenden Punktwolke, generiert aus der Kopterbefliegung (Abb. 7). Dieser erste Versuch zeigt den Trend von der 2D-Karte oder -Zeichnung zur dreidimensional visualisierten Welt, welche noch viele spannende Perspektiven für die Zukunft der Bauwerksüberwachung verspricht. //

Abb. 6: Handelshafen im Fischereihafen

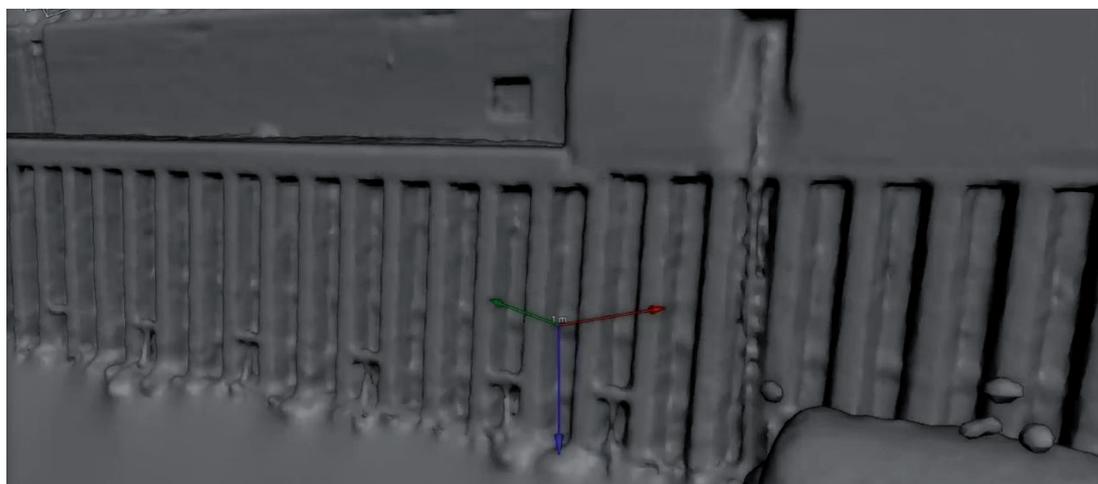


Abb. 7: Teil der Columbuskaje als 3D-Modell

Hydrographische Vermessung für den Neckarausbau

Ein Beitrag von DIETMAR SELINKA

Künftig soll die Bundeswasserstraße Neckar von 135 Meter langen Binnenschiffen befahren werden können. Das Amt für Neckarausbau Heidelberg (ANH) ist mit dem Ausbau beauftragt. Die im Zuge des Ausbaus erforderlichen Vermessungsarbeiten an Wehren, Schleusen und Fischaufstiegsanlagen sind vielfältig. Längst werden auch im Binnenland modernste Messverfahren eingesetzt.

Autor

Dietmar Selinka ist beim Amt für Neckarausbau Heidelberg (ANH) im Sachbereich 2 »Vermessung, Peilung, Karten« beschäftigt.

dietmar.selinka@wsv.bund.de

Neckar | Lauffen | ANH | Schleuse | Stauwehr | Fischaufstiegsanlage | Beweissicherung | Soll-Ist-Vergleich

Amt für Neckarausbau Heidelberg

Das Amt für Neckarausbau Heidelberg (ANH) gehört als Neubauamt zu der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Als Unterbehörde der Generaldirektion Wasserstraßen und Schifffahrt (GDWS) wurde das Amt am 26. November 2007 gegründet. Es erhielt den Auftrag, die Bundeswasserstraße Neckar auch für 135 Meter lange Binnenschiffe befahrbar zu machen. Die Gründung war eine Reaktion auf die »Stuttgarter Erklärung« vom 28. September 2005, in der über 80 Unternehmen und Institutionen des Landes Baden-Württemberg gefordert haben, die Bundeswasserstraße Neckar für Binnenschiffe auszubauen, die größer sind als die bisher maximal möglichen 105 Meter.

Ausbau des Neckars

Auf dem schiffbaren Teil des Neckars gibt es insgesamt 27 Schleusen, 27 Wehre und drei Hochwassersperrtore. Das Amt ist verantwortlich für die Instandsetzung und den Ausbau bzw. die Verlängerung der Schleusen sowie für den Neubau und die Instandsetzung der Wehre, außerdem für die Sicherung der Seitenkanäle und die Dammsicherung. Die Baumaßnahmen beinhalten auch Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen zur Kompen-

sation der baubedingten Eingriffe in Natur und Landschaft.

Unabhängig von den Instandsetzungsarbeiten an den Wehren, werden im Zuge der Ausbauarbeiten auch die Fischaufstiegsanlagen (FAA) am gesamten Neckar neu gebaut. Dies fordert die im Jahr 2000 von der EU veröffentlichte »Richtlinie zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik«, die im Jahre 2010 in das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) überführt wurde.

Regelmäßige Sohlaufnahmen

Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSÄ) benötigen für den Eigentumsnachweis nicht nur die Daten der Vermessungsverwaltungen (vor allem ALB und ALK), sondern fertigen auch selbst Karten und Pläne ihres Eigentums an. Diese Karten und Pläne erstrecken sich nicht nur auf die Landflächen, sondern im Besonderen auch auf die benetzten Flächen (Flusssohle). Die WSÄ müssen in periodischen Zeiträumen die Sohle der Fahrrinne und die Flächen des angrenzenden Flusses aufnehmen. Diese Aufgabe ist im Hinblick auf die geforderte Genauigkeit und die Wirtschaftlichkeit nur noch mit leistungsfähigen Echoloten durchführbar.

Gute Aufnahmen der Flusssohle sind auch im Zuge der Ausbaumaßnahmen gefragt. Da bei den heutigen Baumaßnahmen der Neckar nicht wie in der Zeit der Erstellung der Schleusen und Wehre in den Zwanziger- und Dreißigerjahren des letzten Jahrhunderts umgeleitet werden kann, müssen alle Arbeiten im Nassen durchgeführt werden. Für alle erforderlichen Planungen ist das Wissen über den Zustand, die Lage und Höhe sowie das Aussehen der Sohlgeometrie von Bedeutung. Gefragt sind nicht nur topografische Aufnahme der alten Schleusen und der alten Wehre einschließlich der dazugehörigen Uferbereiche über Wasser. Genau so wichtig sind Aufnahmen des Flussbodens mit den dazugehörigen Uferbereichen unter Wasser.

Vermessungen an der Fischaufstiegsanlage Lauffen

Im Ort Lauffen gibt es eine Staustufe, die aus einem Wasserkraftwerk, einem Stauwehr und einer Doppelschleuse bei Neckar-km 125 besteht (Abb. 1). Die

Abb. 1: Der Neckar bei Lauffen (Fließrichtung von Süd nach Nord) mit Doppelschleuse am rechten Ufer, einem dreifeldrigen Stauwehr und einem Wasserkraftwerk am linken Ufer im Altarm



Bildschirmfoto © 2012/2018 Apple Inc.

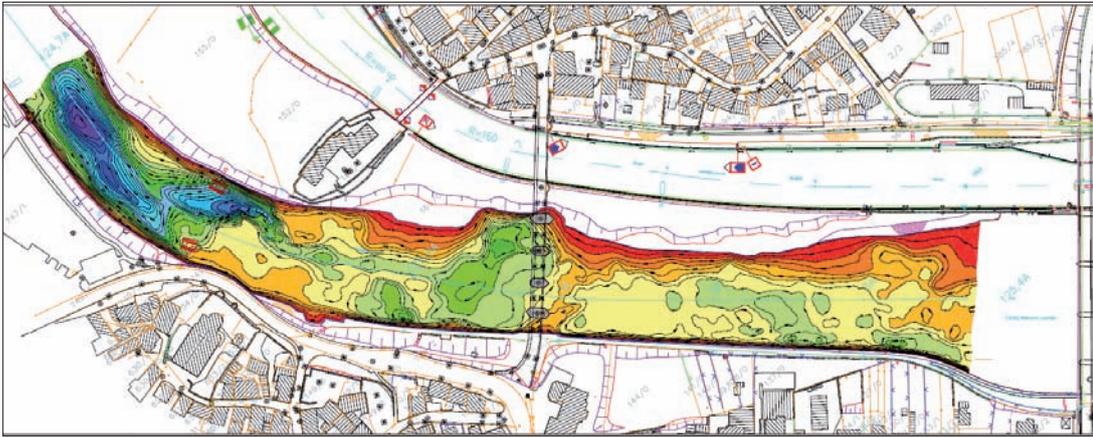


Abb. 2: Multibeam-Aufnahme im vorderen Teil des Neckaraltarms in Lauffen zur Feststellung der vorhandenen Wassertiefe, der vordere Teil vor dem Stauwehr (weiß, ganz rechts) wurde mit einer Single-Beam-Aufnahme ergänzt (siehe [Abb. 2](#))

gesamte Staustufe wird von einer Straßenbrücke überquert. Beim Bau der Brücke wurde die Fischtreppe zerstört, die ursprünglich beim Bau der Schleuse errichtet wurde.

Die neue Fischaufstiegsanlage liegt im Altarm des Neckars, wo eine Zufahrt nicht ohne weiteres möglich ist. Daher wurde die Baustelle über den Wasserweg vermessen. Hierfür wurde der gesamte Altarm bis etwa 100 Meter unterhalb des Wehres mittels eines Multibeam-Echolotes aufgenommen ([Abb. 2](#)). Der restliche Abschnitt konnte wegen zu geringer Wassertiefe nicht mit dem Multibeam-Echolot vermessen werden. Auch gab es für diese Wasserfläche keine Befahrungsgenehmigung wegen zu starkem Überfall des Wehres. Daher wurde der Abschnitt im Unterwasser des Stauwehres mit einem Single-Beam-Echolot auf einem ferngesteuerten Boot vermessen ([Abb. 3](#)).

Mit dem ferngesteuerten Boot ([Abb. 4](#)) ist eine Befahrung der Wasserfläche jederzeit möglich. Der Tiefgang des Bootes von nur etwa 5 cm ermöglicht eine Befahrung bei noch so geringer Wassertiefe. Und auch die Stärke des Überfalls am Wehr spielte keine Rolle.

Der Pilot des ferngesteuerten Bootes muss jedoch sehr erfahren sein, um das Boot auf den vorgegebenen virtuellen Peilungslinien zu halten. Zumal es trotz der geringen Durchflussmenge am Kraftwerk Probleme gab, gegen die Strömung anzukommen.

Nachteilig bei den Single-Beam-Aufnahmen ist, dass zwischen den einzelnen Linien keine Informationen über den Untergrund vorhanden sind und so wichtige Informationen fehlen können. Gerade im Bereich der Saugschläuche an Kraftwerken braucht die Planung von Fischaufstiegsanlagen genaue Daten des Untergrundes, da hier die Einstiege für die Fische geschaffen werden müssen.

Zu erwarten ist, dass es in naher Zukunft für das ferngesteuerte Boot wirtschaftliche Multibeam-Geräte auf dem Markt geben wird, da die Miniaturisierung der Geräte voranschreitet.

Vermessungsarbeiten im Zuge der Verlängerung der Schleuse Lauffen

Ein weiteres Beispiel für die Notwendigkeit von Unterwasseraufnahmen ist die Verlängerung der

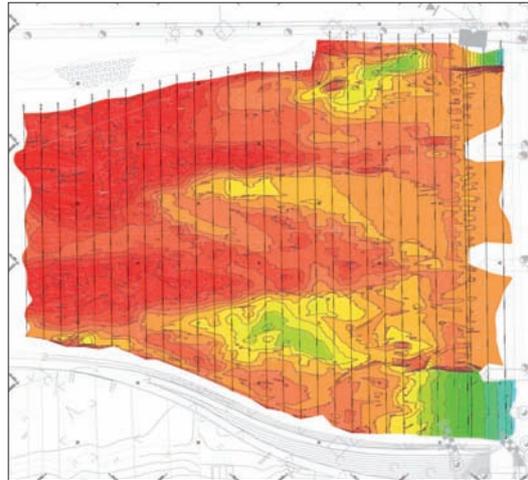


Abb. 3: Befahrung der Restfläche (in [Abb. 1](#) noch weiß) mit ferngesteuertem Boot als Single-Beam-Aufnahme



Abb. 4: Ferngesteuertes Boot mit Single-Beam-Echolot

Schleusen. Hierbei ist es wichtig, dass die Fahrrinnen vor den Schleusentoren vor jeder Bautätigkeit zum Zwecke der Beweissicherung aufgenommen werden. Nach Abschluss der Baumaßnahme müssen abermals Aufnahmen durchgeführt werden, damit ein Soll-Ist-Vergleich stattfinden kann. Die Aufnahmen sollen zeigen, dass keine Reste von Spundwänden, Stahlträgern oder Bauschutt in der Fahrrinne liegen.

Damit der Untergrund lückenlos untersucht und dargestellt werden kann, muss bei diesen Befahrungen immer ein Multibeam-Sensor eingesetzt werden. [Abb. 5](#) (S. 36) zeigt eine Multibeam-Aufnahme des Ein- und Ausfahrbereiches der Schleuse Lauffen, die vor Beginn der Baumaß-

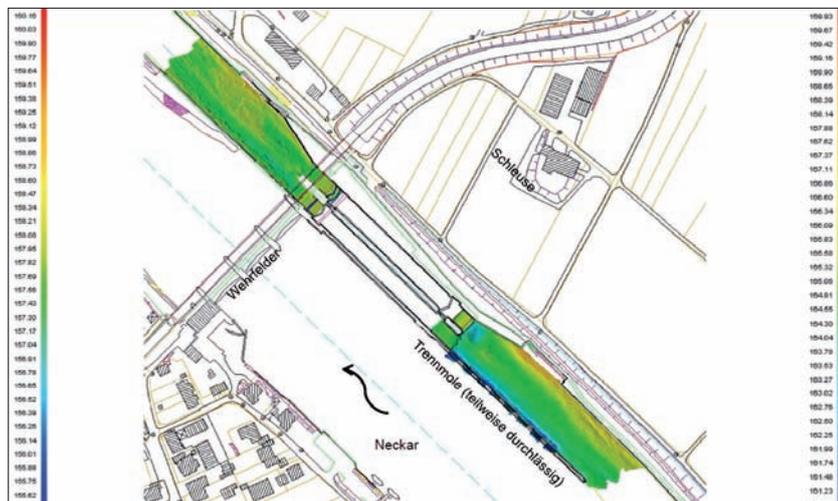


Abb. 5: Multibeam-Aufnahme des Ein- und Ausfahrbereiches der Schleuse Lauffen vor Beginn der Baumaßnahme

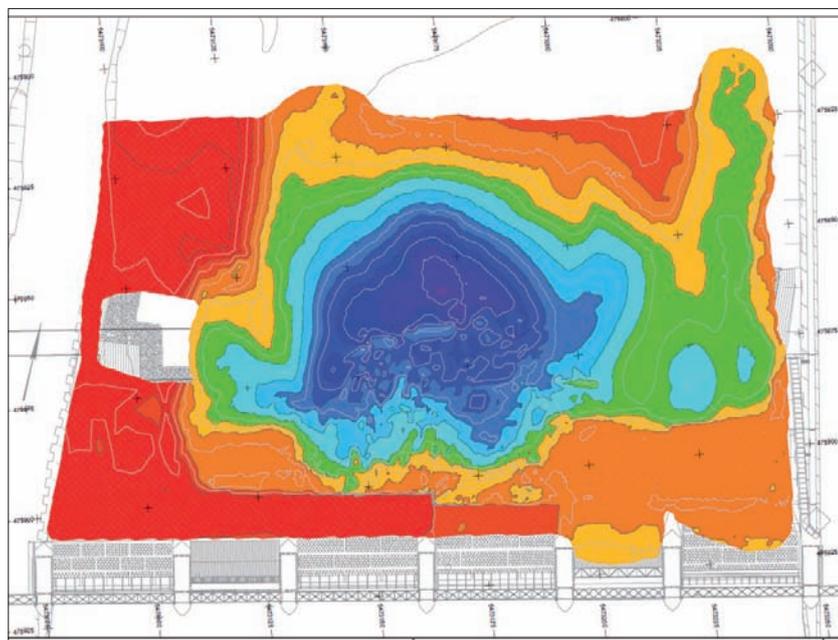
nahme erstellt worden ist. Da die Bauarbeiten noch nicht abgeschlossen sind, liegt noch keine Zweitaufnahme vor.

Vermessungsarbeiten beim Stauwehr Wieblingen

Eine sehr große Bedeutung hat die Unterwasservermessung im Bereich des Unterwassers von Wehren. Im Unterwasser haben sich in den letzten Jahrzehnten des Betriebes der Wehre oft große Kolke gebildet. Diese Kolke können zu einer Gefahr für das davor liegende Wehr werden. So geschehen am Wehr Wieblingen. Dort hat sich ein heute ca. 10 Meter tiefer Kolk vor dem Wehr gebildet. Dieser Kolk wurde jahrelang mit Hilfe einer Stangenpeilung überwacht. Diese Art der Peilung benötigte sehr viel Personal und dauerte sehr lange.

Das ANH bekam die Aufgabe übertragen, den im Unterwasser des Wehres Wieblingen entstandenen Kolk zu verbauen. Da das ANH kein Personal zur Durchführung von Stangenpeilungen besitzt, musste von Anfang an auf eine externe Vergabe dieser Peilarbeiten gesetzt werden.

Abb. 6: Absolute Tiefendarstellung des Wehres Wieblingen



Zu Beginn wurden die Peilarbeiten als Single-Beam-Lotungen mit Hilfe des bereits erwähnten ferngesteuerten Bootes auf den bestehenden Linien der Stangenpeilung durchgeführt. Wieder erwies es sich als problematisch, die vorgegebenen Linien sauber abzufahren. Immerhin entsprachen die Ergebnisse in ihrer Genauigkeit den Arbeiten der Stangenpeilung, die Arbeiten konnten aber wesentlich schneller erledigt werden.

Zu einem großen Fortschritt kam es, als die mit den Vermessungsarbeiten beauftragte Firma ein Fächerecholot auf einem Schlauchboot eingesetzt hat. Erst ab diesem Zeitpunkt war es möglich, sich ein vollständig flächenhaftes 3D-Bild des Unterwassergeländes zu machen. Die absolute Darstellung des Kolkes, der an seiner tiefsten Stelle immerhin ca. 10 Meter tief ist, ist in Abb. 6 zu sehen.

Durch den Einsatz des Fächerecholotes war es zum ersten Mal möglich, lagerichtig die unterspülten und dann abgerutschten Betonplatten des ehemaligen Wehrbodens zu erkennen (Abb. 7). Dies war vorher nur mit Fotografien möglich, die Taucher gemacht haben, die aber nie in einem geometrisch korrekten Zusammenhang zu sehen waren.

Aus den flächenhaften Fächerecholotaufnahmen werden auch weiterhin – quasi als Abfallprodukt – die Schnitte der ehemaligen Linienpeilung erzeugt. Denn die daraus resultierenden verschiedenartigen Darstellungen des Kolkes erlauben es, relative Änderungen im Vergleich zu vorherigen Aufnahmen zu erkennen.

Fazit

Auch im Binnenland werden heutzutage Echolotverfahren eingesetzt – auch das Multibeam-Echolot ist angekommen. Für die Erledigung der Vermessungsaufgaben des Amtes für Neckarausbau Heidelberg sind diese Messmethoden nicht mehr wegzudenken. //

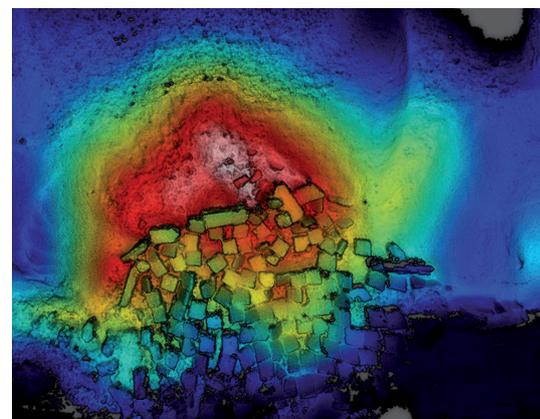
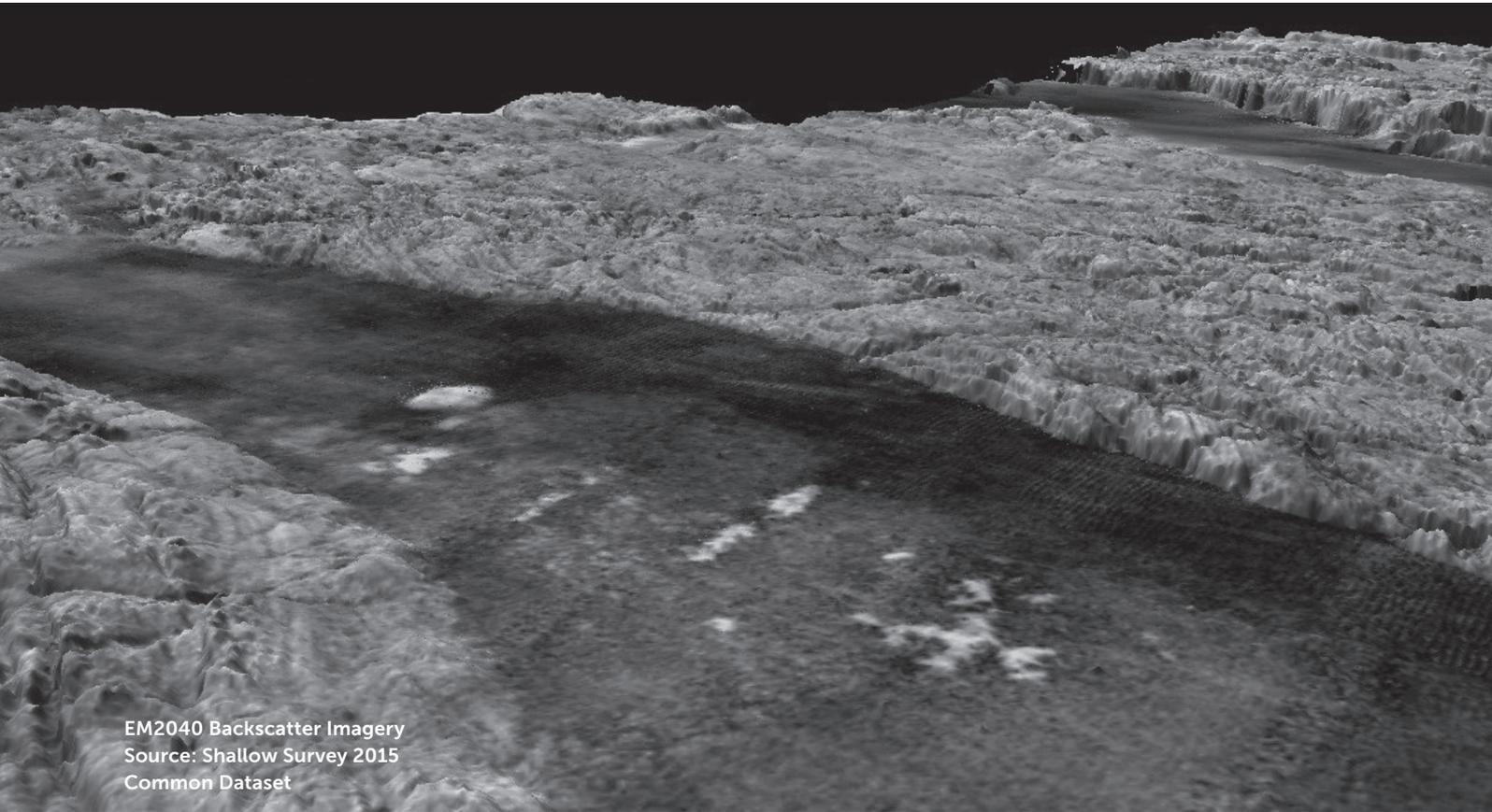


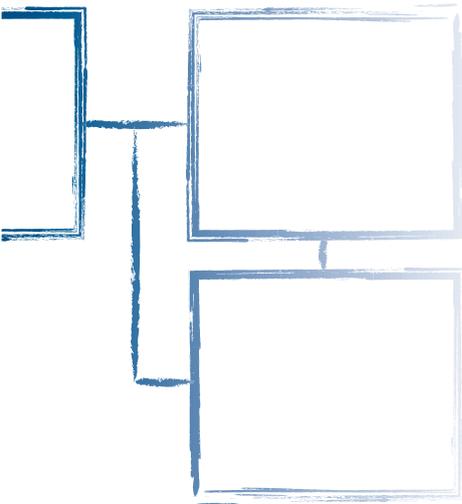
Abb. 7: Aufnahme des Kolkes am Wehr Wieblingen. Gut zu erkennen sind die Betonplatten des ehemaligen Wehrbodens



AUTOMATION FOR BACKSCATTER PROCESSING



EM2040 Backscatter Imagery
Source: Shallow Survey 2015
Common Dataset



CARIS HIPS and SIPS has your backscatter covered

The focus of most multibeam surveys is collecting quality depth information, but why should that lead to hours of adjusting data to end up with quality backscatter products? At CARIS we are taking the stress out of backscatter by providing industry leading automated backscatter corrections and mosaicing techniques.



Get more CARIS HIPS and SIPS details
www.teledynecaris.com/hips-and-sips



TELEDYNE CARIS
Everywhereyoulook™

Part of the Teledyne Imaging Group

»Ein Leben ohne Hydrographie wäre möglich, aber sinnlos«

Ein Wissenschaftsgespräch mit **HOLGER RAHLF***

Holger Rahlf leitet die Abteilung »Wasserbau im Küstenbereich« der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) am Standort Hamburg. Im Interview berichtet der studierte Bauingenieur, an welchen Forschungsfragen die BAW zur Zeit arbeitet. Außerdem erläutert er, wozu numerische Simulationsmodelle genutzt werden und weshalb Hydrographen dennoch weiterhin den Ist-Zustand in der Natur erfassen müssen. Und er verrät, wie die Küsten mit technisch-biologischen Ufersicherungen grüner werden könnten.

BAW | Ressortforschung | Meeresspiegelanstieg | numerische Modelle | Umweltverträglichkeitsprüfung

Die BAW ist zentraler Wissensträger und Dienstleister für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), wenn es um schwierige Fragen des Verkehrswasserbaus geht. Sie beraten die WSV als fachlich unabhängiger Gutachter, stellen also Ihr Know-how für Spezialfragen der Unterhaltung oder des Ausbaus der Wasserstraßeninfrastruktur Deutschlands zur Verfügung. Darüber hinaus ist die BAW auch Ressortforschungsanstalt. Was ist das, eine Ressortforschungsanstalt?

Als Ressortforschungsanstalt im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) ist es Aufgabe der BAW, wissenschaftliche Erkenntnisse des Verkehrswasserbaus für die administrativen oder politischen Entscheidungen des Ministeriums zur Verfügung zu stellen. Das beinhaltet auch eigene Forschungsaktivitäten. Die Forschungsaktivitäten sind dabei stark interdisziplinär und anwendungsorientiert geprägt. Sie sind daher nicht in Konkurrenz zu den Aktivitäten der universitären Grundlagenforschung zu sehen, sondern als Ergänzung. Derzeit werden circa 25 Prozent der zur Verfügung stehenden Ressourcen für Ressortforschung eingesetzt, das heißt, wir können Forschungsaktivitäten langfristig und kontinuierlich erbringen. Die BAW leistet dadurch einen wichtigen Beitrag zum Wissenstransfer. Denn die Erkenntnisse der Wissenschaftswelt werden speziell für die politischen und gesellschaftlichen Aufgaben des BMVI aufbereitet und zur Verfügung gestellt.

* Das Interview mit Holger Rahlf wurde im Mai per E-Mail geführt. Die Fragen stellten Lars Schiller und Christian Maushake.

»Für die Beschreibung des Ist-Zustands, des natürlichen und gemessenen Zustands eines Gewässers, ist die Hydrographie unverzichtbar«

Holger Rahlf

Damit ist sichergestellt, dass ständig neueste wissenschaftliche Erkenntnisse in die tägliche Arbeit des Ministeriums einfließen können.

Welche Aufgaben nimmt die BAW am Standort Hamburg wahr?

Am Standort Hamburg sind die drei Fachbereiche »Geotechnik«, »Wasserbau« und »Schiffstechnik« in insgesamt sechs Fachreferaten vertreten, die ausschließlich küstenbezogene oder zumindest norddeutsche Fragestellungen für die WSV bearbeiten. Die Abteilungsstruktur wurde 2018 den heutigen

Aufgabenbedürfnissen angepasst: Zum einen wurde ein Referat »Geotechnik Küste« eingeführt, in dem zum Beispiel die Beratungsleistungen der BAW für maritime Bauwerke, aber vor allem die Beratungsleistungen für das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) im Zusammenhang mit den Genehmigungen der Offshore-Windparks zusammengefasst sind. Das bisherige Referat »Geotechnik Nord« besteht weiterhin.

Zum anderen wurde ein neues Referat »Küsteningenieurwesen« eingerichtet, in dem die Ingenieurkompetenz für alle wasserbaulichen Fragestellungen an der Küste gebündelt ist. In diesem Fachreferat ist auch die Geschäftsstelle des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesens (KFKI) angesiedelt. In zwei weiteren Wasserbaureferaten werden Gutachten und Beratungen auf der Basis numerischer Simulationsmodelle der Nord- und Ostseehafenzufahrten erstellt.

Für die Hydrographen sicher besonders interessant: Das Referat »Schiffstechnik« berät einige Bundesressorts in allen Fragen zur Schiffstechnik. Dies beinhaltet vor allem die federführende Wahrnehmung von Entwicklungen und Beschaffungen von Wasserfahrzeugen. Im Rahmen der Erneuerung der deutschen Forschungsflotte ist zum Beispiel das Forschungsschiff *Sonne* nach den Anforderungen der Wissenschaft konzipiert worden. Hierfür musste auch die Installation von umfangreichen hydrographischen Systemen geplant werden. Derzeit wird der Ersatzneubau der *Polarstern* beplant. Und für das BSH begleiten meine Kollegen gerade den Bau der *ATAIR*.

Sie sind in Hamburg verantwortlich für die Abteilung »Wasserbau im Küstenbereich«. Was sind derzeit Ihre wesentlichen Forschungsschwerpunkte im Küstenwasserbau?

Unsere Forschungsaktivitäten in Hamburg verteilen sich in drei BAW-weit definierte Forschungsfelder: Infrastruktur, Mobilität, Umwelt.

Im Forschungsfeld Infrastruktur wird derzeit daran gearbeitet, die sektoral und verteilt vorliegenden, heterogenen behördlichen Datenbestände flächendeckend zu harmonisieren und daraus qualitätsgesicherte Datensätze zur Geomorphologie, Sedimentologie und Hydrodynamik in der

gesamten Deutschen Bucht zu erzeugen und frei zugänglich allen Fachbehörden mit Küstenbezug zur Verfügung zu stellen.

Im Forschungsfeld Mobilität werden Beiträge zu einer weiteren Optimierung der wirtschaftlichen Ausnutzung der Wasserstraße erstellt. Hier geht es im Wesentlichen um die Interaktion von Seeschiff und Seeschiffahrtsstraße. Das ist wichtig, weil die Schiffsdimensionen, also Länge, Breite, Tiefgang, in den letzten zwei Jahrzehnten zumindest im Containerverkehr stark zugenommen haben, ohne dass die Seeschiffahrtsstraßen daran angepasst worden sind. Deswegen sind sowohl die Potenziale der Befahrbarkeit einer Wasserstraße als auch die damit verbundenen schiffserzeugten Belastungen – wie zum Beispiel Schiffswellen als Belastung auf die Infrastruktur – zu untersuchen und Lösungskonzepte zur Optimierung der Befahrbarkeit unter Beachtung von Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffverkehrs aufzuzeigen.

Den größten Aufwand treiben wir derzeit allerdings im Forschungsfeld Umwelt. Das ist dem Umstand geschuldet, dass durch den gesellschaftlichen Wertewandel der letzten Jahrzehnte heute vielfach die naturschutzfachlichen Aspekte einer technischen Wasserbaumaßnahme mindestens gleichrangig mit den technischen Aspekten zusammen betrachtet werden müssen. Das ist auch logisch, denn Wasserbaumaßnahmen des Küstenschutzes und des Verkehrswasserbaus finden in unseren schützenswerten Naturräumen

statt. In diesem Zusammenhang werden auch Forschungsthemen als Schwerpunkt bearbeitet, die sich aus der aktuellen Diskussion zum Klimawandel ergeben. Dabei stehen Untersuchungen zu Anpassungsstrategien an einen beschleunigten Meeresspiegelanstieg im Vordergrund. Für meine Abteilung ist allerdings weniger die Betroffenheit des Küstenschutzes von Belang, was eine Obliegenheit der Länder ist. Vielmehr steht die Betroffenheit der Unterhaltung der Seeschiffahrtsstraßen und die Erreichbarkeit der Seehäfen im Fokus meiner Verantwortung. In diesem Zusammenhang untersuchen wir unter anderem Möglichkeiten und Potenziale eines adaptiven Sedimentmanagements als Beitrag für ein modernes Ästuarmanagement. Ein Ziel ist dabei, die WSV dahingehend zu unterstützen, dass sie durch Langfristvorhersagen für die hydrologischen Parameter des Ästuars den Einsatz der notwendigen Unterhaltungsbaggerei besser, das heißt vorausschauender steuern kann, um dadurch die Kosten und die Umweltauswirkungen der Unterhaltungsbaggerei in den Seehafenzufahrten zu reduzieren. **Das ist ja ein unglaublich weit gefächertes Spektrum an Forschungsthemen. Wie stellen Sie in Ihrer Abteilung sicher, dass Sie in Zeiten der sich immer schneller entwickelnden Wissenschaft überhaupt qualitativ hochwertige Beiträge leisten können?** Wesentliche Grundlagen der Qualitätssicherung sind eine hervorragende technische Ausstattung, die Kontinuität und Interdisziplinarität im Personal-



körper meiner Fachreferate, nationale und internationale Kooperationen mit einschlägigen Universitäten, Forschungsinstitutionen und Fachbehörden der Länder sowie eine vollständige Transparenz der Forschungsergebnisse. So sind zum Beispiel die eingesetzten Methoden und Verfahren auf den Internetseiten der BAW dokumentiert und für jedermann einsehbar.

»Der Verkehrswasserbau muss für bestimmte Szenarien des beschleunigten Meeresspiegelanstiegs Anpassungsoptionen für die Wasserstraßeninfrastruktur entwickeln«

Holger Rahlf

Die BAW hat darüber hinaus auch die Berliner Erklärung über den offenen Zugang zu wissenschaftlichem Wissen unterzeichnet. Eine weitere Hilfe ist auch, dass ich den jungen wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern die Möglichkeit zur Promotion an der BAW anbieten kann. Das hat offenbar seinen Reiz bei den

jungen Menschen, denn offene Stellen kann ich trotz einer befristeten Einstellung mit gut qualifiziertem Personal besetzen.

Welche längerfristige Perspektive können Sie den Jungwissenschaftlern Ihrer Abteilung geben, wenn doch ein hoher Prozentsatz des Personals – wie bei Forschungsvorhaben und an Universitäten üblich – nur befristet beschäftigt werden kann?

Da Dauerstellen für diese Aufgaben nicht zur Verfügung stehen, bleibt die befristete Beschäftigung alternativlos. Man kann dem ja auch insofern etwas Positives abgewinnen, da eine Personalfuktuation gefördert wird und regelmäßig neue Beschäftigte mit neuen Ideen und aktueller fachwissenschaftlicher Ausbildung meine Abteilung bereichern. Derzeit sind circa 25 Prozent der über 50 wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit befristeten Arbeitsverträgen ausgestattet. Genau wie an einer Universität habe ich die Möglichkeit, eine Befristung nach dem Wissenschaftszeitvertragsgesetz zu vereinbaren. Daraus ergibt sich die Möglichkeit einer befristeten Beschäftigung von sechs Jahren vor der Promotion und sechs Jahren nach der Promotion. Der Gesamtzeitraum kann je nach persönlichen Voraussetzungen noch verlängert werden. Das ist doch schon was! Ich habe es in meiner nun über 25-jährigen Zugehörigkeit zur BAW noch nicht erlebt, dass eine Kollegin oder ein Kollege in die Arbeitslosigkeit entlassen werden musste. Die BAW bietet eine anerkannt gute wissenschaftliche Ausbildung und die Möglichkeit, sich frühzeitig durch eigenverantwortliche und selbstständige Arbeitsmethoden ein eigenes berufliches Netzwerk aufzubauen. Das ist meines Erachtens die beste Perspektive, die wissenschaftliches Personal haben kann. Darüber hinaus ist es mein Bestreben, in den Zeiten des Fachkräftemangels die hervorragend qualifizierten und eingearbeiteten Beschäftigten frühzeitig in ein unbefristetes Arbeitsverhältnis zu überführen. Im letzten Jahr ist mir das immerhin bei sechs Beschäftigten gelungen.

Ihre Abteilung ist auch im sogenannten »Expertenetzwerk des BMVI« engagiert, das unter anderem die Auswirkungen des Klimawandels auf die Verkehrsinfrastruktur untersucht und daraus Anpassungsoptionen erarbeitet. Welche Erkenntnisse haben Sie bisher, wie sich Klimawandel und Meeresspiegelanstieg auf Küsten, Schifffahrtsstraßen und Häfen auswirken?

In der Wissenschaftswelt ist wohl unstrittig, dass aufgrund des Klimawandels zukünftig ein beschleunigter Meeresspiegelanstieg zu beobachten sein wird. Für mich steht jedoch weniger im Fokus, wie viel Zentimeter, Dezimeter oder Meter es wohl eines Tages sein werden. Regionale Aussagen zur Klimaänderung sind noch mit deutlichen Unsicherheiten behaftet, das heißt, die Bandbreite möglicher Änderungen mit gleicher Eintrittswahrscheinlichkeit ist groß. Der Verkehrswasserbau muss sich auf diese Unsicherheiten einstellen und für bestimmte wahrscheinliche Szenarien des beschleunigten Meeresspiegelanstiegs Anpassungsoptionen für die Wasserstraßeninfrastruktur entwickeln. Dafür ist es wichtig, das Verhalten der Natursysteme – also zum Beispiel der Tideelbe – auf der Basis von Systemuntersuchungen dem Grunde nach zu erforschen. Die Forschungsergebnisse werden zum Beispiel im Rahmen des Expertenetzwerkes erarbeitet und mit den Partnerbehörden fachlich diskutiert und aufbereitet. Für die Tideelbe sind die Erkenntnisse meiner Abteilung in den Hamburger Klimabericht übernommen worden. Dort ist nachzulesen, dass es bei einem starken Meeresspiegelanstieg unter anderem zu einem verstärkten Stromauftransport von Sediment kommen wird, was zum Beispiel die Unterhaltung des Hamburger Hafens erschweren wird. Die mit dem Klimawandel erwarteten langanhaltenden Perioden geringer Abflüsse verstärkt diesen Prozess. Dadurch wird insgesamt mehr Salz von der Nordsee in das Ästuar gelangen und Aspekte des Grundwassers, der Landwirtschaft, der Wasserwirtschaft et cetera negativ beeinflussen. Die Intensität der Auswirkungen hängt neben der Entwicklung der Abflüsse im Wesentlichen davon ab, inwieweit die Wattflächen in den Mündungsbereichen der Ästuarzeitgleich und in gleicher Größenordnung des Meeresspiegelanstiegs auflanden werden. Es bleibt dann zum Beispiel die Frage: Wo soll das Sediment herkommen? Oder sollte man den Prozess gegebenenfalls durch anthropogene Maßnahmen unterstützen? Letztere Frage untersuchen wir gerade in einer Kooperation mit dem LKN im Zusammenhang mit der Schleswig-Holsteiner Wattenmeerstrategie 2100, denn hier könnten sich Synergien durch gezielte Verwendung von Unterhaltungsbaggergut der WSV ergeben.

Die Gestalt des Gewässerbodens ändert sich heute bereits permanent. Gut beobachten lässt sich das, wenn die Wattflächen bei Ebbe trockenfallen. Man sieht es auch, wenn man Seekarten verschiedener Epochen vergleicht. Die Frage, wie sich die Topographie bei steigendem Meeresspiegel ändern wird, kann heute nicht sehr genau vorher-

gesagt werden. Welche grundsätzlichen Wechselwirkungen bestehen denn zwischen der Tidedynamik und der sich verändernden Topographie in der Deutschen Bucht?

Diese Frage lässt sich nicht so einfach nach dem Motto »wenn ..., dann ...« beantworten, weil es um das komplexe Wechselspiel verschiedenster Wirkbeziehungen geht. Andererseits verdeutlicht diese Frage aber genau den Bedarf nach leistungsfähigen Prognosewerkzeugen. Hier kommen hydrodynamisch-numerische Simulationsmodelle zum Einsatz, wie sie bei der BAW für die tägliche Arbeit eingesetzt werden. In den letzten Jahren sind die Anforderungen an die Aussagefähigkeit numerischer Simulationsmodelle und die Belastbarkeit der Rechenergebnisse immer weiter gestiegen, und es ist zu erwarten, dass sie weiter steigen werden. So müssen die in der Natur stattfindenden dynamischen Strömungs- und Transportprozesse immer detaillierter nachgebildet werden, und zwar sowohl auf sehr kleinen räumlichen und zeitlichen Skalen als auch auf sehr großen. Wenn nun aber eine Entwicklung, die sehr weit in der Zukunft liegt, mit einem hydrodynamisch-numerischen Modell simuliert werden soll, müssen die physikalischen Prozesse, die zu dieser Entwicklung beitragen, sehr gut verstanden und im Modell richtig nachgebildet sein. Nach derzeitigem Stand des Wissens sind aber noch nicht alle

relevanten Prozesse gut genug verstanden, um mit den Simulationsmodellen wirklich belastbare Rechenergebnisse als Grundlage für Langfristprognosen zu produzieren. Das betrifft auf der großen Skala zum Beispiel die Bildung von Unterwasserdünen in den Ästuarsystemen, beispielsweise in der Unterweser stromaufwärts von Nordenham. Um diese Prozesse zu studieren, sind wiederum Messungen, sowohl im Labor als auch in der Natur, unverzichtbar. Zu dem genannten Thema der Unterwasserdünen – oder allgemeiner der Bodenformen und deren Dynamik – führt die BAW zur Zeit ein Forschungsprojekt gemeinsam mit der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und der TU Hamburg-Harburg durch.

Auf der kleinen Skala könnte man die intratidale Dynamik von Schwebstoffen nennen. Ohne hierbei zu sehr ins Detail zu gehen, geht es darum, die Wechselwirkung von Turbulenz, der Mobilisierung von Sedimenten vom Gewässerboden, deren Einmischung in die Wassersäule und das Wieder-Absetzen im Tidezyklus zu verstehen. Hierbei spielen sehr komplexe Vorgänge wie zum Beispiel die Flokkulation eine Rolle, bei der sich die Schwebstoffe in der Wassersäule in Abhängigkeit der Turbulenz zu größeren Aggregaten zusammenschließen oder dann auch wieder zerbrechen. Solche sehr kleinskaligen Prozesse müssen wir verstehen, um zu richtigen und belastbaren Simulationsergebnissen

eomap.com

EOMAP

MAPPING AND MONITORING AQUATIC ENVIRONMENTS

We offer cutting-edge satellite analytics to support your activities in inland, coastal and offshore waters. We can help you reduce your project and planning risks, save time and cut costs.

zu kommen. Zu dem letztgenannten Thema ist die BAW übrigens derzeit in einem großen internationalen Forschungsprogramm mit insgesamt 16 Universitäten und Institutionen eingebunden, in dessen Rahmen ein großes Messprogramm in der Unterems durchgeführt wurde.

Wenn es um die Beschreibung eines tatsächlichen Ist-Zustands geht, kommen Sie um Messungen in der Natur nicht herum. Welche Rolle spielen hydrographische Vermessungen für die Tätigkeiten der BAW? Inwieweit fließen die Messergebnisse von Hydrographen in die mathematischen Modelle ein?

»Wo der Küstenschutz nicht gefährdet wäre, würde ich »living shorelines« favorisieren. Ich persönlich würde dort mehr Natur zulassen«

Holger Rahlf

Hochwertige Messungen in der Natur sind unverzichtbar für die Arbeit der BAW und zwar auf allen Skalen und in jeder Auflösung. Hierin besteht aus meiner Sicht auch eine große und vor allem auch interessante Herausforderung für den »messenden Ingenieur«, also zum Beispiel den Hydrographen. Ein numerisches Simulationsmodell muss an Naturdaten kalibriert werden und es muss der Nachweis erbracht werden, dass das Simulationsmodell »richtig« rechnet, das heißt, es muss validiert sein. Je mehr gewässerphysikalische Prozesse in dem Simulationsmodell berücksichtigt werden, desto mehr Messdaten müssen für einen hochwertigen Kalibrierungs- und Validierungsdatensatz erfasst werden. Da sich die Simulationsmodelle der BAW nicht nur über ein Ästuar, sondern über die gesamte Deutsche Bucht, die gesamte Nordsee oder Ostsee erstrecken, ist für meine Abteilung neben tatsächlichen Messungen auch die Fernerkundung per Satellit oder Flugzeug sehr hilfreich. Hier bringen die Hydrographen meiner Abteilung ihr fundiertes Spezialwissen ein und zeigen, dass sie, zumindest für die Erledigung meiner Facharbeit, unverzichtbar sind.

Nehmen wir mal an, die Hydrographie könnte den Ist-Zustand eines Gewässersystems vollumfänglich, also lückenlos in Raum und Zeit beschreiben. Wozu benötigt man dann noch ein Simulationsmodell der BAW?

Für die Beschreibung eines Ist-Zustands, das heißt eines natürlichen und gemessenen Zustands eines Gewässers, ist die Hydrographie unverzichtbar. Jedoch wird es Ihnen nicht allein auf der Basis von Messungen gelingen, die Auswirkungen einer Küstenschutzmaßnahme oder die Auswirkungen einer Ausbau- oder Strombaumaßnahme auf das Gewässer im Voraus zu ermitteln, das heißt zu prognostizieren. Jeder anthropogene Eingriff verändert die charakteristischen Parameter eines Gewässers wie zum Beispiel die Tidekennwerte des Wasserstands – also Thw, Tnw, Thb – eines Ästuars. Aber auch die Strömungen und mit ihnen transportierte Stoffe wie Salz oder suspendiertes Sediment werden beeinflusst. Im Rahmen der strengen Regeln einer Umweltverträglichkeits-

prüfung müssen diese erwarteten Auswirkungen für eine Planfeststellung, das heißt Genehmigung der Maßnahme, prognostiziert und bewertet werden. Dies geht nach den heutigen Standards nur unter Verwendung von hochkomplexen Simulationsmodellen, denn dort kann man gezielt einige Randwerte verändern – zum Beispiel die Ist-Topographie durch eine Ausbautopographie ersetzen – und nach einer erneuten Berechnung die Unterschiede in den Tidekennwerten oder anderen charakteristischen Gewässerparameter zum Ist-Zustand ausrechnen. Im Ergebnis bekäme man eine »ausbaubedingte Änderung« dieser Parameter. Der Rechenwert alleine stellt allerdings noch keine Prognose im Sinne der Umweltverträglichkeitsprüfung dar; hierfür müssen alle Rechenergebnisse noch interpretiert und bewertet werden. Die Prognosen der BAW sind Basisprognosen, die im Rahmen von Planfeststellungsverfahren großer Infrastrukturmaßnahmen wie zum Beispiel Fahrrienenanpassungen von den Umweltgutachtern für die Umweltverträglichkeitsprüfungen verwendet werden. Sollte eines der Fachgutachten meiner Abteilung gravierende Fehler enthalten, würde ein darauf aufbauender Planfeststellungsbeschluss zumindest anfechtbar und schlimmstenfalls rechtswidrig sein. Letzteres würde bedeuten, dass eine planfestgestellte Maßnahme nicht umgesetzt werden dürfte. Daraus ergibt sich die hohe Verantwortung, der meine Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gerecht werden müssen.

Neben den numerischen Modellen setzen Sie, wenn es zum Beispiel um die Untersuchung von Wasserbauwerken geht, auch gegenständliche Modelle ein. Für welche Fragestellungen ist welches Modell besser geeignet? Worin bestehen die jeweiligen Vorteile?

In diesem Zusammenhang sollte ich zunächst einmal grundsätzlich auf den »Werkzeugkoffer« des Wasserbauingenieurs eingehen. Hierin befinden sich neben der schon angesprochenen numerischen Simulation auch der Laborversuch und die Messungen in der Natur. Die in der Frage angesprochenen gegenständlichen Modelle gehören in den Bereich des Laborversuchs. Nun haben Modellversuche ganz allgemein – sowohl numerisch als auch gegenständlich – gegenüber den Messungen in der Natur den Vorteil, dass sie unter kontrollierten Randbedingungen stattfinden können. Messungen in der Natur wiederum erfassen zwar den tatsächlichen Ist-Zustand – allerdings auch immer unter allen herrschenden Randbedingungen, die dann in der Bewertung der Ergebnisse nicht immer ganz einfach voneinander zu trennen sind. Ein weiterer Vorteil des Modellversuchs ist, dass die Randbedingungen gezielt verändert werden können. So kann zum Beispiel die Wirkung eines Schiffs mit überkritischer Geschwindigkeit oder extremen Tiefgängen in einer Wasserstraße schlecht in einem Naturversuch untersucht werden, denn hierbei droht mitunter die Gefahr einer Havarie oder Beschädigung sonstiger Infrastruktur

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)

an der Wasserstraße – in einem Modellversuch lässt sich das aber machen!

Am Standort Hamburg werden die gegenständlichen Modelle derzeit ausschließlich für Fragestellungen im Zusammenhang mit der Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße eingesetzt, das heißt, es werden schiffserzeugte Belastungen auf Uferbauwerke sowie unter anderem das Squat-Verhalten der Seeschiffe bei Revierfahrt untersucht. Dafür fahren bis zu zehn Meter lange Modellschiffe, wie sie in den Schiffsbauversuchsanstalten verwendet werden, durch das gegenständliche Modell. Aufgrund der definierten Randbedingungen einer Versuchsfahrt werden qualitativ hochwertige Datensätze für die Kalibrierung und Validierung der numerischen Modelle gewonnen. Dies schließt im Übrigen auch Daten für die Verwendung in der Schiffsführungssimulation ein, die für die besonderen Belange der WSV verbessert werden sollen.

Sie sehen hier auch ein wesentliches Qualitätskriterium der BAW: Es werden alle verfügbaren wissenschaftlichen Methoden eingesetzt, um zielgerichtet die jeweiligen Vorteile der Methoden in den Forschungs- und Projektarbeiten zu nutzen.

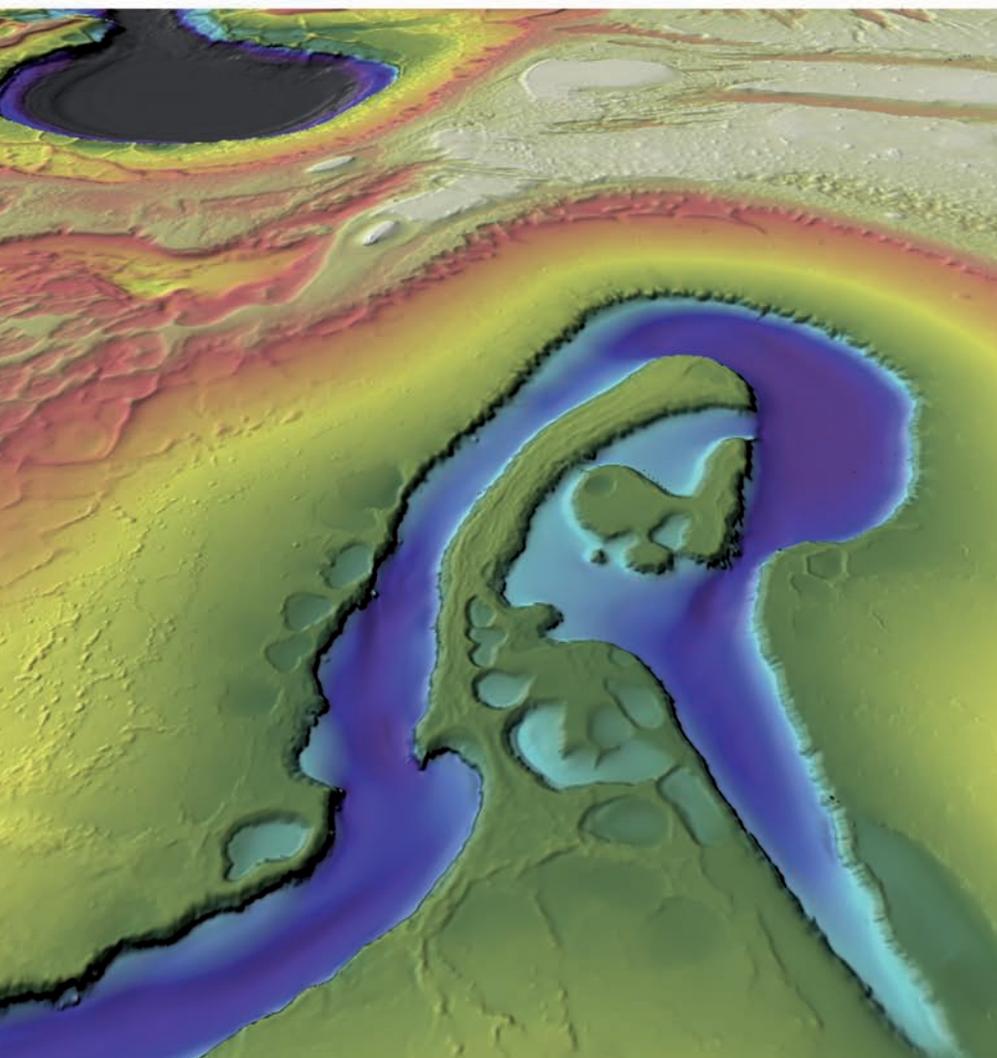
Die massiven Deckwerke an den Binnenwasserstraßen schützen die Böschungen der Binnenwasserstraße vor Schiffswellen und werden in letzter Zeit häufig mit naturnahen technisch-biologischen Ufersicherungen versehen. Einfach aus-

gedrückt: die Ufer werden begrünt. Wäre das nicht auch etwas für die Uferstreifen der Wasserstraßen im Küstenbereich?

Genau das untersuchen wir gerade im Auftrag der WSV. In Zusammenarbeit mit der BfG werden wir demnächst Handlungs- und Bemessungsempfehlungen für eine naturnahe Ufergestaltung im Küsten- und Ästuarbereich herausgeben. Die integrierten Bewirtschaftungspläne nach EG-Wasser-Rahmenrichtlinie haben zum Beispiel ein eindeutiges Ziel für den Lebensraumtyp »Ästuar« definiert: Erhaltung und Wiederherstellung ästuartypischer Dynamik sowie lebensraumtypischer Habitatstrukturen. Dazu zählt auch die natürliche Dynamik der Ufer, die jedoch sinnvollerweise nur dort zugelassen werden darf, wo der Küstenschutz nicht gefährdet ist. Technisch-biologische Ufersicherungen können helfen, einen guten Kompromiss zwischen den Belangen der Natur und des Küstenschutzes zu finden. Es gibt hierfür mittlerweile in allen Küstenrevieren gute Beispiele, die von den beteiligten Landes- und Bundesbehörden bereits umgesetzt wurden. Überall dort, wo der Küstenschutz nicht gefährdet wäre, würde ich darüber hinausgehend »living shorelines« favorisieren. Ich persönlich würde dort mehr Natur zulassen wollen.

Was wissen Sie, ohne es beweisen zu können?

Ein Leben ohne Wasserbau und Hydrographie wäre möglich, aber sinnlos. //



40+

YEARS OF HYDROGRAPHIC EXPERIENCE

Fugro's hydrographic and geophysical surveys inform energy, construction and mining projects around the world.

Our high resolution, large area multibeam surveys - facilitated by Fugro's precise positioning services - deliver IHO compliance, whilst our desktop studies and detailed surveys of cable routes, pipelay and subsea infrastructure, enhance the safety and efficiency of your project.

Fugro Germany Marine GmbH
+49 4212 239150
info-fgmg@fugro.com
www.fugro.com

Reconstruction and visualisation of historic underwater objects at the example of S.S. *Terra Nova*

An article by FRIEDERIKE TÄUBER

This article deals with the reconstruction and visualisation of the former expedition ship S.S. *Terra Nova*. A data set consisting of historic photographs and a construction plan of the S.S. *Terra Nova* is used for the reconstruction. Bathymetry data recorded during a research cruise in 2017 show the wreck of the vessel. The vessel is reconstructed in its original state by employing different modelling approaches. Besides CAD-modelling also the Structure-from-Motion technique is used. By digitising the information of the construction plan the CAD-model is created. The historical photographs are combined in the Structure-from-Motion process and enable the processing of a point cloud of the vessel. An overlay of the resulting models and the bathymetry data is an important part of this article. This overlay is carried out in terms of the identification of the wreck and to examine the usability of the models. Subsequently the models as well as the wreck are visualised in different ways. A categorisation of the visualisations for different user groups is part of the discussion at the end of this article.

Author

Friederike Täuber holds a M.Sc. degree in Geodesy with specialisation in Hydrography from HafenCity University in Hamburg.

Friederike.Taeuber@web.de

bathymetry | reconstruction | visualisation | wreck | Terra Nova | Structure-from-Motion | CAD modelling

1 Introduction

The S.S. *Terra Nova* was a steam assisted three-mast barque launched in 1884 in Dundee/Scotland and was built as whaler and sealer for arctic waters. Her most famous journey as an expedition ship was an Antarctic Expedition in 1910 under the lead of Robert Falcon Scott which ended in a race to the South Pole as a Norwegian crew under the lead of Roald Amundsen started an expedition at the same time with the same goal. Even though the race ended in a tragedy for the British team, the S.S. *Terra Nova* was saved and used afterwards.

The vessel then was mainly operated in her original function as whaler and sealer. In World War II the vessel was reconstructed for supplying military bases in Greenland. On the 12th September 1943 the S.S. *Terra Nova* was damaged by ice north-west of Kap Farvel/Greenland. To prevent a possible drift with the tidal currents into the Atlantic Ocean it was necessary to sink the vessel (Traver 2006).

The wreck of S.S. *Terra Nova* was rediscovered in 2012 by scientists on board of the *RV Falkor* from the Schmidt Ocean Institute (California, USA) during a multibeam survey (Schmidt Ocean Institute 2012).

During the research cruise MSM66 in 2017 the wreck was once again surveyed. Thereby, the following questions came into focus: Which options exist to create a 3D-model of the vessel S.S. *Terra Nova* in its original state? Which processes are in this case suitable for 3D-modelling?

Main issue of the modelling process is that only historical data show the vessel in its original state. Current data like the survey data only show the wreck. During the project methods to combine the current and historical data were developed. Furthermore, different reconstruction and visualisation methods are implemented for different user groups.

In this investigation a data set consisting of historic photographs and a historic construction plan of the S.S. *Terra Nova* were used for the reconstruction as shown in Fig. 1. Bathymetry data recorded during a research cruise in 2017 show the wreck of the vessel. An overlay of the models derived from historical data and the bathymetry data concludes the reconstruction part of this thesis. Following the different models and the bathymetry data showing the wreck will be visualised in different ways for different user groups. An overview of the data used for the reconstruction and visualisation is given in Fig. 1.

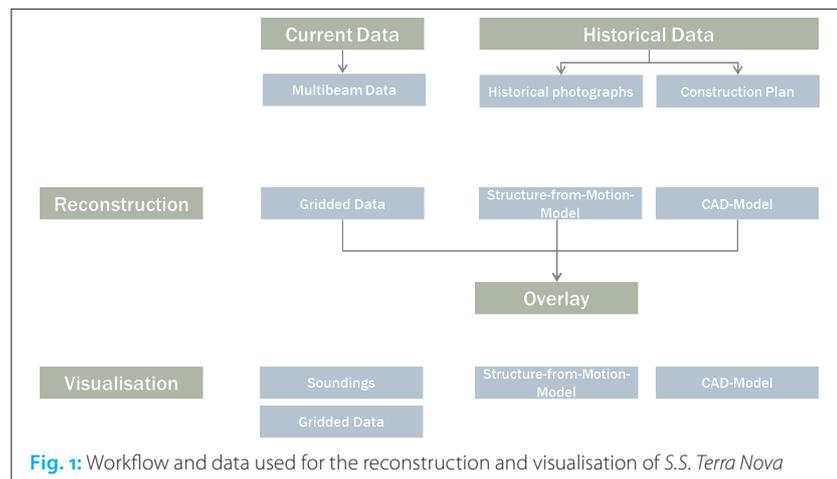


Fig. 1: Workflow and data used for the reconstruction and visualisation of S.S. *Terra Nova*

2 Multibeam data acquisition and postprocessing

On the 25th August 2017 the wreck of the S.S. *Terra Nova* was surveyed from the scientific crew during the expedition MSM66 on board of the German

research vessel *Maria S. Merian*. Chief scientist was Dr. Boris Dorschel. The aim of the cruise was the reconstruction of the Laurentide Ice Sheet drainage into the northwest Baffin Bay and the palaeoceanography of the west Baffin Bay (Dorschel 2017a). For the wreck survey as part of the expedition MSM66 the two Kongsberg multibeam echo sounders EM712 and EM122 were used.

During the data collection, several loops with different opening angles were sailed. The aim of the survey was first to locate the wreck and thus to get as detailed information as possible. A map with the tracks sailed is shown in Fig. 2.

This map contains both the tracks sailed during the survey using the EM712 as well as the tracks with the EM122. For the further investigation only EM712 data was post-processed.

As result of the postprocessing, two different grids were created. One grid was used as overview of the area of investigation while a more detailed grid was used to export the coordinates of the grid cells for the overlay.

After data postprocessing, it was possible to characterise the wreck. The water depth around the wreck ranges from 158.6 m as a minimum to 168.3 m as a maximum. The mean water depth is 166.5 m. The dimensions of the wreck can roughly be determined and used for a first identification of the wreck and to check if the dimensions of the wreck are in the same range like the original vessel. The length of the wreck is around 58 m, the width was measured at the front, in the middle and the rear part of the wreck. The results differ between 14 m at the front of the wreck, 15 m in the middle part and 12 m at the rear. The bathymetry data of the wreck are shown in Fig. 3.

3 Reconstruction

The vessel was reconstructed in its original state by employing different modelling approaches. Besides CAD-modelling also the Structure-from-Motion technique is used.

The CAD model was created by digitising information of a construction plan. The construction plan used for the CAD model is illustrated in Michael Tarver's book »The S.S. Terra Nova« (Tarver 2006) and provided by The Natural History Museum, London.

The construction plan, showing a cross section and two deck views of the vessel, was imported in AutoCAD 2017 and scaled by the known length of the vessel. After digitising the cross section and the decks, the decks were spatially rotated to fit the decks into the cross section. The result is a raw-CAD model which is used to create a 3D model by employing different AutoCAD functions. An extract of the plan and the resulting 3D model are shown in Fig. 4.

Structure-from-Motion (SfM), as a technique to create 3D point clouds out of 2D images, seems another promising method to create a 3D model of the vessel (Pomaska 2016, p. 122 ff.). Therefore 65 images taken by a professional photographer

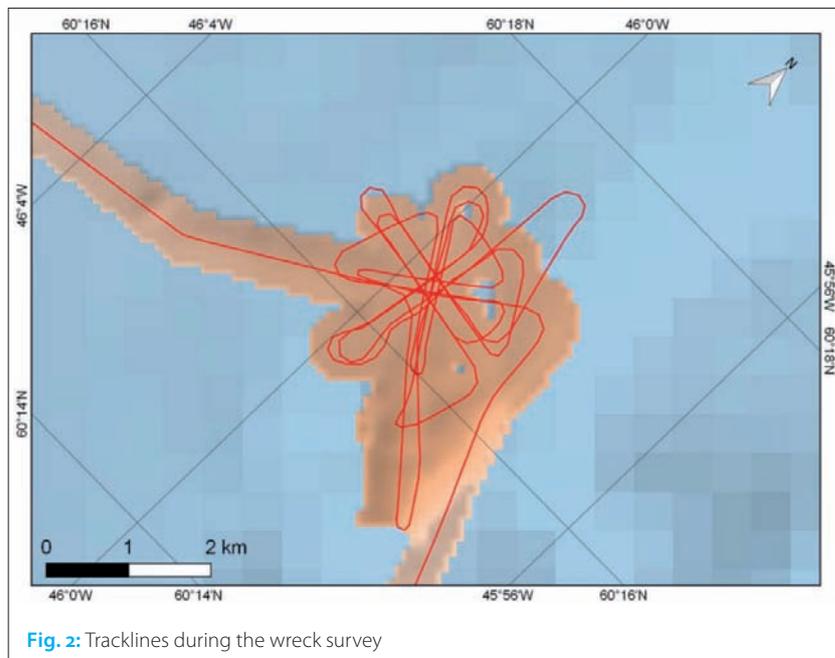


Fig. 2: Tracklines during the wreck survey

Source: Dorschel et al. 2017

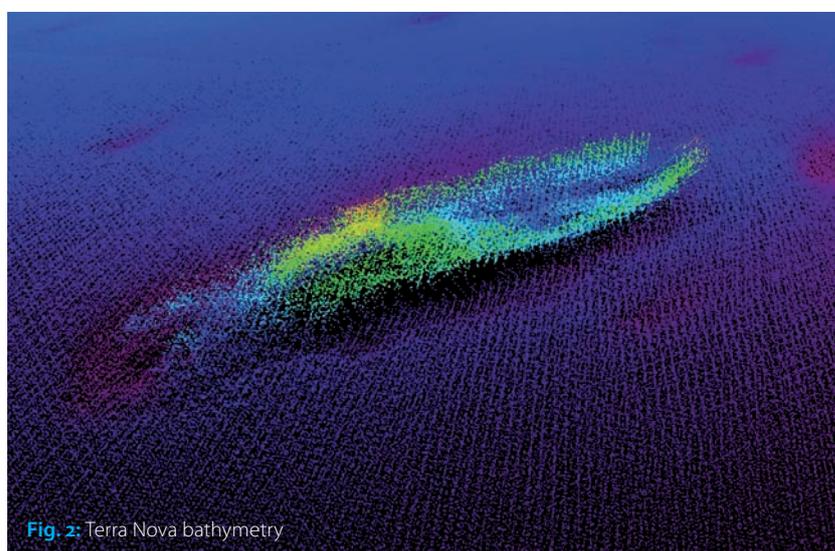


Fig. 2: Terra Nova bathymetry

Source: Dorschel 2017b

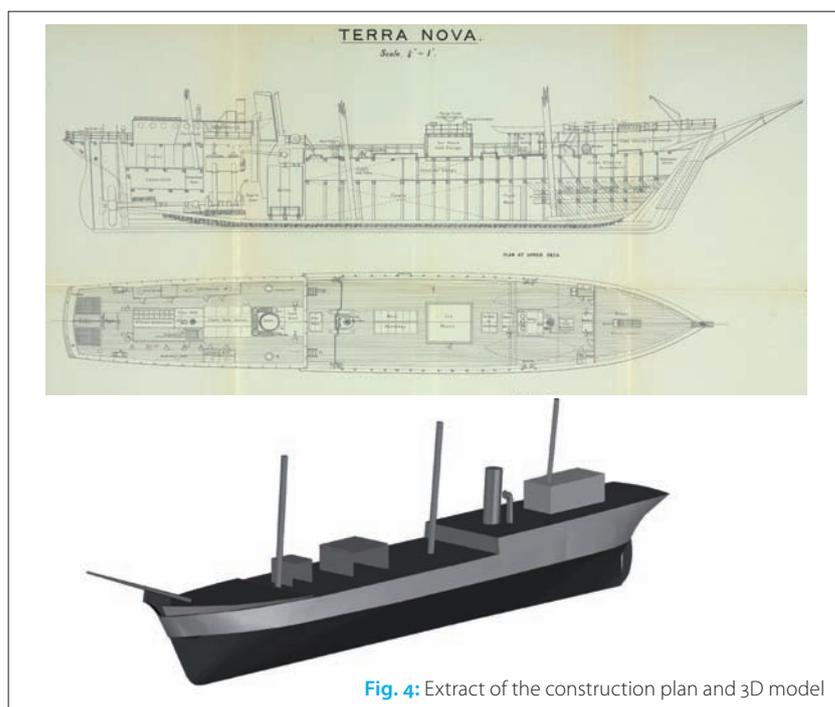


Fig. 4: Extract of the construction plan and 3D model

Source: Traver 2006 (construction plan); Tauber 2018 (3D model)

References

Dorschel, Boris (2017a): 1. Wochenbericht MSM66; www.ldf.uni-hamburg.de/merian/wochenberichte/wochenberichtemerian/msm65-msm68/msm66-wob1.pdf

Dorschel, Boris (2017b): 6. Wochenbericht MSM66; www.ldf.uni-hamburg.de/merian/wochenberichte/wochenberichte-merian/msm65-msm68/msm66-wob6.pdf

Dorschel, Boris et al. (2017): Cruise Summary Report – Maria S. Merian – MSM66; www.ldf.uni-hamburg.de/merian/wochenberichte/wochenberichtemerian/msm65-msm68/msm66-scr.pdf

Pomaska, Günter (2016): Bildbasierte 3D-Modellierung – Vom digitalen Bild bis zum 3D-Druck; Wichmann Verlag, Berlin

Schmidt Ocean Institute (2012): S S Terra Nova discovered; schmidtocan.org/s-s-terra-novadiscovered/

Täuber, Friederike (2018): Reconstruction and Visualisation of Historic Underwater Objects at the Example of S.S. Terra Nova; Master Thesis HafenCity University Hamburg

Tarver, Michael C. (2006): The S.S. Terra Nova (1884-1943) – From the Arctic to the Antarctic – Whaler, Sealer and Polar Exploration Ship (1st ed.); Pendragon Maritime Publications, Brixham, UK

during Robert F. Scott’s Antarctic expedition were first classified into four groups, showing the vessel from the front and back side, from side with sails set and the fourth group shows S.S. *Terra Nova* from the side without any sails.

With regard to the further scientific task in this investigation, which are the overlay and the visualisation, the resulting point cloud has to fulfil the following requirements: the number of points should be as high as possible whereas, at the same time, the representation of the vessel should be as detailed as possible.

The best result is achieved from images showing S.S. *Terra Nova* from the side without any sails set. This image group consists of 15 images. For the SfM process using the software Agisoft Photoscan, additional seven markers are set. In this context, markers are manually defined points in each image. The resulting point cloud includes 242,007 points and is shown in Fig. 5.

Using Geomagic Wrap, first the point cloud is cleaned carefully. Since the point cloud consists of a very limited number of points these were kept in the point cloud rather than deleted. The point cloud only shows one half of the vessel, cut through the longitudinal axis.

4 Overlay correlation

For the overlay correlation, different test scenarios have been developed. Besides the bathymetry

data, the CAD model and the point cloud resulting from the Structure-from-Motion process with the historical photographs are used. At first the CAD- and the Structure-from-Motion-model were overlaid with each other in order to compare the geometry and general fitting of both models. Fig. 6 shows the overlay of the Structure-from-Motion point cloud (green) and the CAD model (grey) and the distances measured between both. Distances are measured using different perspectives, like top and side view. Fig. 6 shows exemplary the measurement in the side view.

It is obvious that two of the three masts in the point cloud fit very well to the CAD model. For the mast at the bow, some deviations are apparent which have been determined by distance measurements at a lower point and the end of the mast. The distance between CAD model and the point cloud amounts to 1.1 m at the lower point of the bow mast and to 0.5 m at the point at the end of the same mast. For the other masts there is no need to measure distances due to the excellent fitting of both models. Furthermore, the draught of the vessel may be determined as the hull of the vessel is only part of the CAD model, but not part of the SfM point cloud. 2.0 m of the vessel are under the estimated water line. The length difference between both models amounts to 0.6 m at the bow and 0.9 m at the stern.

The overlay of the CAD- and the SfM models shows deviations within the metre range while the general shape of the vessel fits. The largest deviations can be seen in the top view and occur at the stern of the vessel which is expected due to very limited points in the Structure-from-Motion point cloud in this part of the vessel. Main structures of the vessel like the masts, funnel and bowsprit are prominent in both models and fit very well. The fact that these structures have different heights in both models is caused by missing height information in the construction plan for those features. In this case, the overlay of the models can lead to an addition of different information if the heights of the mast from the Structure-from-Motion point cloud are used to correct the masts heights in the CAD model.

In the next step the CAD model was overlaid with the gridded bathymetry data as shown in Fig. 7. Once again, distances were measured to evaluate the overlay. The distance between the stern of the vessel and the bathymetry point cloud amounts to 0.5 m. The highest point of the bathymetry point cloud and the corresponding part of the CAD model differ about 0.4 m. The distance of the lowest part of the point cloud and the upper deck of the CAD model amounts to 4.4 m. The difference between the bow of the CAD model and the bathymetry point cloud amounts to 1.0 m.

The elevation of the wreck in the area of the funnel is located at this part of the vessel where the former engine room is drawn in the construction plan. With regard to the construction of the engine which mostly consists of steel and other hardly

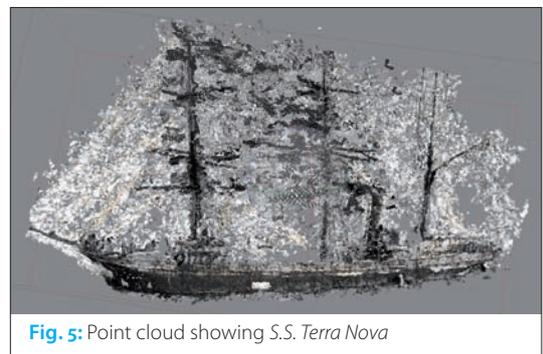


Fig. 5: Point cloud showing S.S. Terra Nova

Source: Täuber 2018

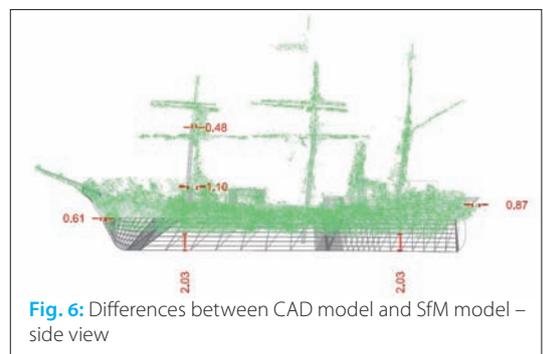


Fig. 6: Differences between CAD model and SfM model – side view

Source: Täuber 2018

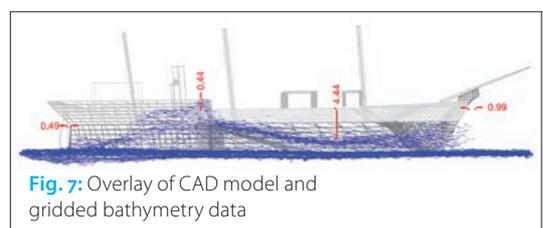


Fig. 7: Overlay of CAD model and gridded bathymetry data

Source: Täuber 2018

degradable materials the position of the engine in the wreck seems to be reliable. The occurring deviations between the wreck and the CAD model are mainly caused by the condition of the wreck especially in the part of the bow of the vessel. A further unknown factor that leads to the differences between the model and the wreck is the sinking of the vessel into the seafloor while the model is fitted in a way that the keel line hits the seafloor.

5 Visualisation

Subsequently, the models as well as the wreck were visualised in different ways and categorised for different user groups. The main issue for the classification is the question if the visualisations will be used for scientific purposes or rather as presentation for laypersons. In the case of the *S.S. Terra Nova* it is conceivable that the user group with the more scientific background consists for example of archaeologists, especially underwater archaeologists. To the group of laypersons for example visitors of museums or other interested laypersons can be counted.

As first visualisation the SfM point cloud was meshed and then textured with images showing *S.S. Terra Nova* during the Antarctic expedition 1910. The whole process was carried out in Agisoft Photoscan. The result is shown in Fig. 8.

With regard to the initial dense point cloud which is the basis for the mesh, the texture represents the vessel in a very promising way. The textured model allows extracting more information of the model than the dense point cloud does. The texture consisting of several images works best at the hull of the vessel. Regarding the masts or interior superstructures, the texture is severely distorted and disproportioned. The visualisation of the point cloud resulting from the Structure-from-Motion process was categorised as suitable for scientific use.

The main issue why this visualisation is only restrictedly suitable for laypersons is because it shows *S.S. Terra Nova* incompletely. That includes the facts that it is only a half vessel as well as that the part of the vessel under the water line is not depicted within the point cloud. Furthermore, the texture is significantly distorted especially viewing the textured 3D models from a top view. Nevertheless, the textured models provide more details of the vessel than the not textured 3D model extracted from the SfM process.

To get an idea of the condition, shape and the position of the wreck at the seafloor, a visualisation of the wreck by means of the bathymetry data is useful. For the visualisation of the wreck, two interrelated visualisation scenarios were developed. The first scenario was the creation of a meshed model of the wreck (Fig. 9). Following, the resulting 3D model is used for a subsequent visualisation which shows the wreck in an underwater scene to answer the question what a diver would see if one dives to the wreck (Fig. 10).



Fig. 8: Textured model created with Agisoft PhotoScan

Source: Tauber, 2018

The mesh of the soundings is classified into the scientist's category while the underwater scene is classified into the laypersons category. The mesh of the soundings shows the shape, size and condition of the wreck. Detailed structures are visible within this mesh.

6 Conclusion and outlook

This investigation deals with the reconstruction and visualisation of the former expedition ship *S.S. Terra Nova*. A data set consisting of historic photographs and a construction plan of the *S.S. Terra Nova* was used for the reconstruction. Bathymetry data show the wreck of the vessel.

Regarding the reconstruction, the methods CAD modelling and Structure-from-Motion are used. The reconstruction of the *S.S. Terra Nova* works with both methods. This investigation shows that it is possible to create a 3D model of an object that does not exist anymore. In this case conventional 3D modelling methods like laser scanning cannot be applied, since a direct relation to the object is mandatory. In contrast, especially Structure-from-

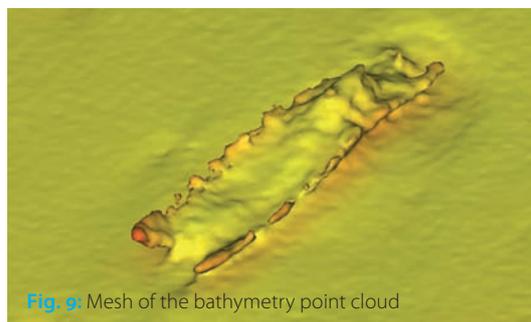


Fig. 9: Mesh of the bathymetry point cloud

Source: Tauber, 2018



Fig. 10: Underwater scene

Source: Tauber, 2018

Motion is a good alternative if a sufficient number of images showing the historical object is available. Furthermore, the images should have a sufficient resolution. This investigation shows that the meshing of a smaller number of images lead to a first result.

CAD modelling is a method that works very well if the input data, which is in this case a construction plan of the vessel, have a sufficient quality. That includes the details shown in the plan as well as the quality in terms of the readability.

Comparing the result of both the CAD and SfM method, there are obvious differences. As result of the modelling process the CAD model shows a complete vessel while the SfM point cloud only represents one half of the vessel. For the reconstruction of *S.S Terra Nova* both the Structure-from-Motion modelling as well as the CAD modelling are expedient. The transferability to other projects strongly depends on the data basis.

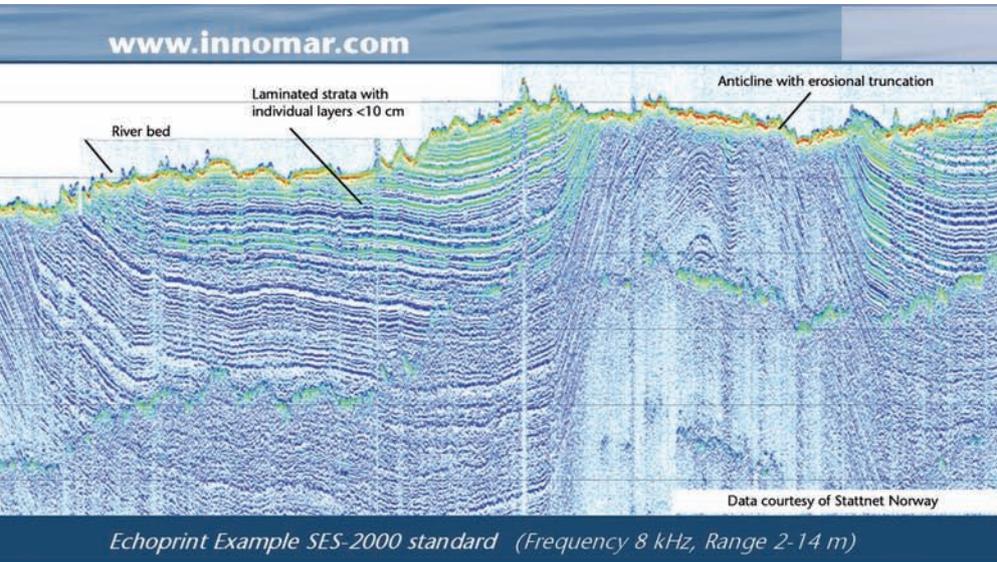
The combination of both reconstruction methods enables the creation of a more detailed model containing information of both the SfM point cloud and the CAD model. By overlaying the data provided by the CAD model with the SfM point

cloud data, the additional information from the SfM model can be added to the CAD model. The result is a more detailed and accurate CAD model.

The visualisation of such a historical object is always done for a predefined user group and with a defined purpose. Depending on user group and purpose there are different visualisation methods. For laypersons details of the object are less important than a visually appealing appearance of the object. For the scientific usage details of the historical object are the main focus. With more detailed background information, a visualisation for scientific purposes can also be usable for interested laypersons as well.

There are further applications where the scenarios of reconstruction and visualisation of historical underwater objects shown in this project can be used. Reconstruction and visualisation of historic underwater objects is always required to understand the lost scenario of sunken vessels, submarines or other watercrafts.

One example is the vessel *S.Y. Aurora* that can be seen as sister vessel to the *S.S. Terra Nova*. *S.Y. Aurora* is regarded as lost, results of this project can be applied to this case. //



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



High-resolution 3D sub-bottom profiling

Principles and case study

An article by FRITJOF BASAN

With sub-bottom profilers it is possible to investigate the subseafloor. However, common sub-bottom profilers are only providing two-dimensional depth slices of the subseafloor, that are difficult to interpret and that cannot display the complex three-dimensional reality of the subseafloor. Therefore there is a high demand for systems,

sub-bottom profiler | subseafloor | parametric effect | penetration depth | resolving capacity

Sub-bottom profilers are special echo sounders that are widely used for the investigation of the subseafloor. Among other fields of applications it is commonly used in the field of marine archaeology. Since most archaeological artefacts are concentrated in the top metres of the sediment these instruments enable the user to easily survey these layers. Sub-bottom profiling, in this context, is posing an effective, undisturbing alternative to excavations. For archaeological applications the resolution is more important than the penetration depth (Vandiver 2002). However, common sub-bottom profilers are only providing two-dimensional depth slices of the subseafloor, that are difficult to interpret and that cannot display the complex three-dimensional reality of the subseafloor. Therefore there is a high demand for systems, capable of mapping the sediment three-dimensionally (Vardy et al. 2008).

The SES-2000 sixpack is the most recent development of the Innomar Technologie GmbH from Rostock. This multitransducer system combines six parametric sub-bottom profilers (of the type SES-2000 smart), that can be arranged in different setups. These setups enable the user to record closely meshed survey lines at a time that can easily be transformed to three-dimensional representations of the survey area. Within the scope of this work this system was used to map the subseafloor at a historic pile structure, which was discovered off the coast of Markgrafenheide near Rostock. Three data sets with different array configurations and different signal frequencies were acquired.

This work aims to answer the questions how these settings affect the resolving capacity and the sediment penetration. The resolving capacity indicates how small a feature can be to still be detected. Besides that it will be shown whether the derived data is convenient for 3D modelling and the reconstruction of detected features. To investigate these questions self-conceived methods were applied, that will be discussed later in this article.

All systems by Innomar rely on the benefits of the parametric effect. Non-linear, parametric sub-bottom profilers are known for delivering high-res-

olution images due to the very short pulse lengths and small aperture angles. Compared to conventional sub-bottom profilers the size of the transducers can remain relatively small (Lowag et al. 2010). The theoretical principles of parametric sub-bottom profiling are described in detail in Wunderlich and Müller (2003) and in Wille (2005). It can be recapped to the procedure of the simultaneous transmission of two high-intensity sound pulses of slightly different frequency ($f_2/f_1 \approx 1$). Within the water column both waves interfere, leading to constructive as well as destructive superposition. Among the newly created frequencies, the difference frequency ($F = f_2 - f_1$) is of particular interest in the context of sub-bottom profiling, because it is able to penetrate the seafloor significantly. While the indispensable low frequencies can be created by this method, still narrow beamwidths and large bandwidths can be maintained. The narrow beamwidth allows the acoustic footprints on the seafloor to be rather small and guarantees a good lateral resolution (Hampton 1974). The large bandwidth enables the generation of very short pulses, that, besides the utilised frequency, are decisive for a good vertical resolution (Wille 2005).

The SES-2000 sixpack uses two primary frequencies near 100 kHz. The resulting difference frequencies can range from 5 kHz to 15 kHz. Because of the characteristic narrow sound beams it is possible to configure line arrays of individual parametric transducers with overlapping footprints. Obviously this is a method to create higher data density in across ship direction, which for single-transducer systems is only determined by the vessel's line spacing. By this, small archaeological artefacts or structures can be resolved (Missiaen et al. 2017). Working with the SES-2000 sixpack makes it possible to choose among five different operating modes. During the presented surveys the Hexa Beam Mode (HBM) and the Penta Beam Mode (PBM) were utilised. In both cases all six transducers are arranged next to each other in the bracket at the bow of the survey boat, creating a line of transducers perpendicular to the vessel's direction of motion. Utilising the HBM all six transducers are operated one after the other, thus six survey lines are created with one

capable of mapping the sediment three-dimensionally. The article describes what is possible with the SES-2000 sixpack from Innomar.

Author

Fritjof Basan holds a M.Sc. degree in Geodesy with specialisation in Hydrography from HafenCity University in Hamburg.

fritjofbasan@gmx.de

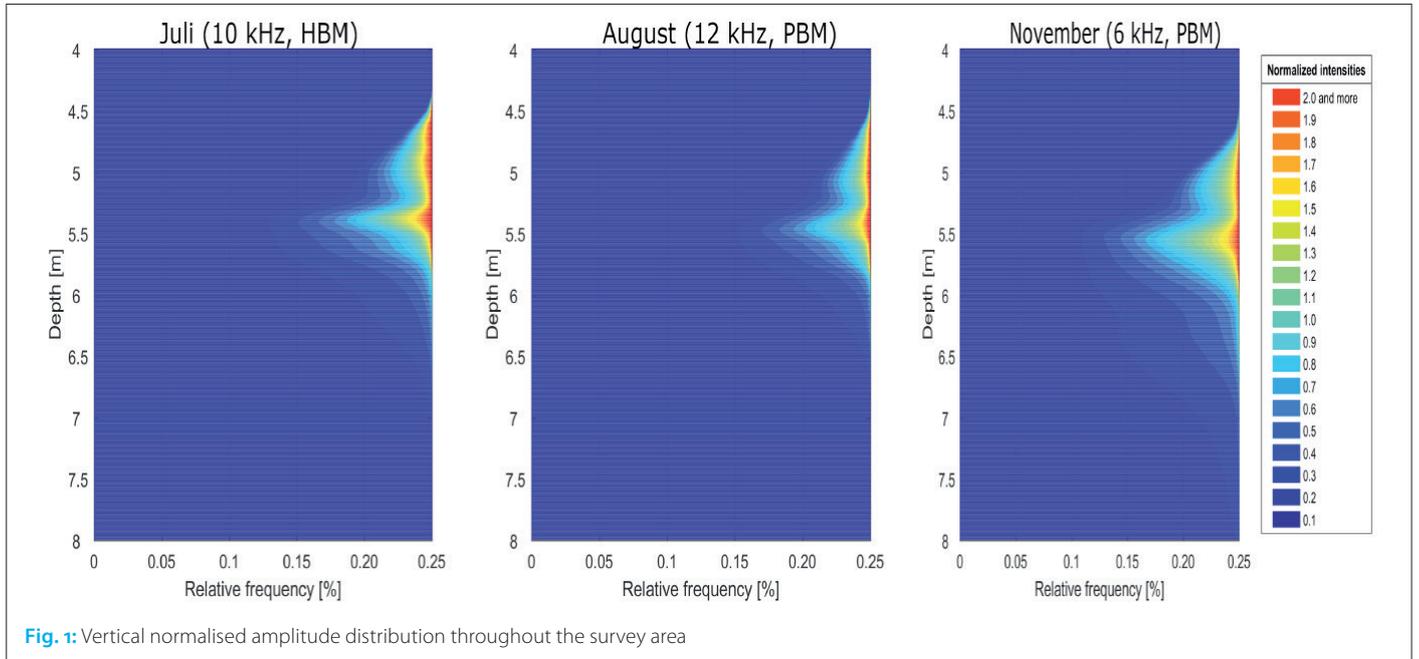


Fig. 1: Vertical normalised amplitude distribution throughout the survey area

run. The PBM uses two transducers at a time, thus resulting in five individual survey lines. In both cases the distance between the transducers, respectively between the virtual transducers is given to be 25 cm. In the course of the year 2017 three surveys with different settings could be conducted. Two surveys were conducted with the PBM (with 6 kHz and 12 kHz) and one with the HBM (10 kHz).

It was one aim to investigate the penetration depth. It proved to be convenient to investigate the energy, that penetrates the seafloor. Therefore the measured amplitudes per depth were sorted according to their intensity. The results for all three measurements are displayed in Fig. 1. The amplitudes are normalised to the mean intensity of the reflections from the seafloor, which is supposed to be the strongest reflector. This is done to compensate for different source levels, gain settings and for the different operating modes.

Investigating the whole survey area and several subareas has led to results, that eventually show, that the used frequency is primarily determining

the penetration depth and thus the lowest frequency (6 kHz) penetrates the deepest. This meets the expectations as high-frequency waves experience more attenuation in water and even more in denser materials like sediments. However, comparing the rather high frequencies (10 kHz and 12 kHz) not much of a difference can be seen, which is supposed to be due to the different operating modes. It is consequently assumed, that the utilisation of the HBM – and thus of several transducers at a time, can increase the penetration depth by increasing the source level.

Furthermore the resolving capacity in all three spatial directions was investigated. Therefore three different methods were conceived and applied for all three spatial directions. Two methods focussed on the investigation of one-dimensional samples. Here, the autocorrelation functions and the differences of neighbouring cells were investigated for varied grid sizes. It is assumed, that for a resolution, that is higher than the resolving capacity the gridding software (SES-Griddler 64) will inter-

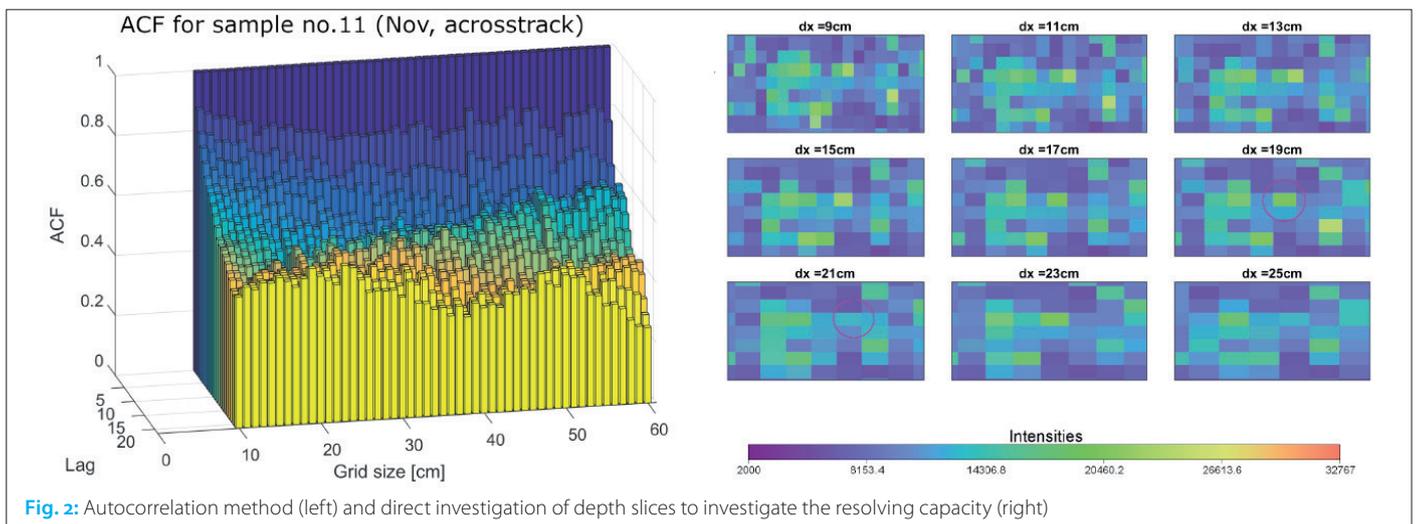
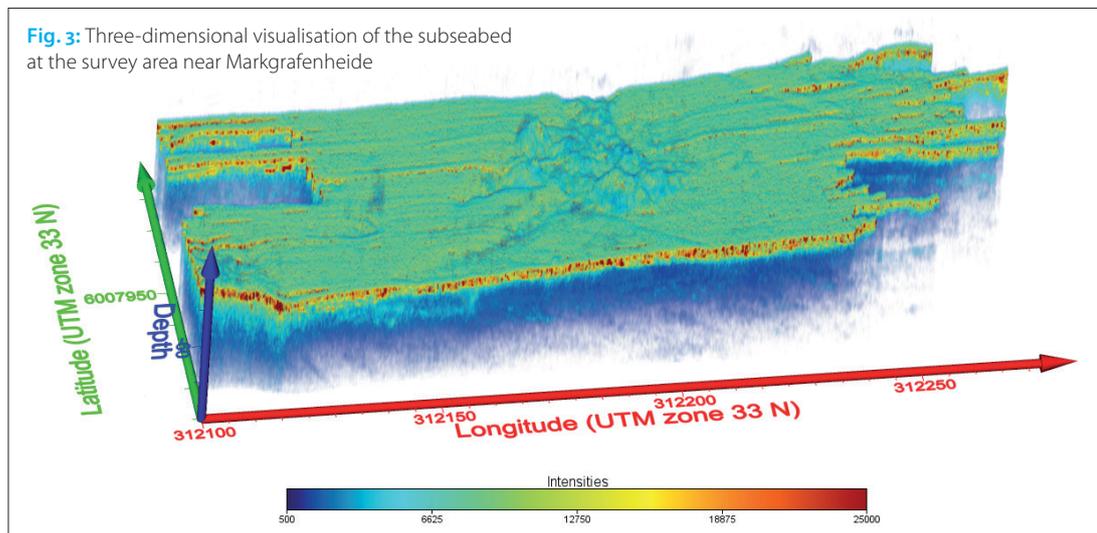


Fig. 2: Autocorrelation method (left) and direct investigation of depth slices to investigate the resolving capacity (right)

Fig. 3: Three-dimensional visualisation of the subseabed at the survey area near Markgrafenhede



polate between distinguishable features. As soon as the gridded interpolates between the cells, the autocorrelation should increase and the difference of neighbouring cells should decrease. In several samples for all spatial directions it was searched for such behaviour. The idea of the third and most straightforward method was to look at depth slices and search for neighbouring, distinguishable features. In the following the grid size was gradually increased until it was not possible anymore to distinguish between the two features. In Fig. 2 two examples for the investigation using the autocorrelation function and one example for the direct investigation of depth slices is shown. Both images only serve as examples for a much broader empirical study. In both cases a threshold for the resolving capacity of 21 cm was determined.

All three methods were qualitatively confirming the expected outcomes. In across-track direction the applied methods came to a result of 25 cm for all conducted surveys which corresponds with the transducer-, respectively the virtual transducer spacing. Although the results in along-track direction showed rather broad scattering the expected resolving capacities were met quite well. Depending on the boat speed at the different survey dates and the ping rates resolving capacities ranging from 17 cm to 24 cm could be achieved. Regarding the vertical resolving capacity it could be shown, that the used frequency and the corresponding effective pulse lengths are the defining factors. Hence, the low-frequent measurements (November) have the worst resolving capacity (9.0 cm in average). The measurements from August on the other hand were reaching better vertical resolving capacities (7.3 cm in average). It needs to be stated, that the applied methods for the resolving capacity were only yielding to subjective results for a confined number of samples. To obtain comprehensive results, that can quantify the exact resolving capacity these methods need to be elaborated in future research.

The whole survey area was mapped in 3D by using the software package Voxler 3D. One result,

of the measurement from November (6 kHz and PBM) is displayed in Fig. 3. With the help of a number of other software packages it was possible to distinguish and identify several features in the seabed. Among them were at least two wrecks, of which one was already known to be there, presumed wooden boxes, wooden poles and boulders. At the example of one wreck it was tried to model features in the subseafloor. The qualitative results can be seen in Fig. 4. To draw a conclusion it can be stated, that the results, obtained with the SES-2000 sixpack sub-bottom profiler can be used for detailed visualisation and reconstruction of the marine subseafloor, and by this prove to be especially useful for the field of marine archaeology. Regarding the research questions it could be shown, that the simultaneous utilisation of transducers (thus of the special operating modes) can lead to compensation of higher frequencies in terms of penetration depths. Further the factors, influencing the resolving capacity could be identified to be the transducer spacing, ping rate and range in lateral direction and the frequency and the effective pulse length in vertical direction. //

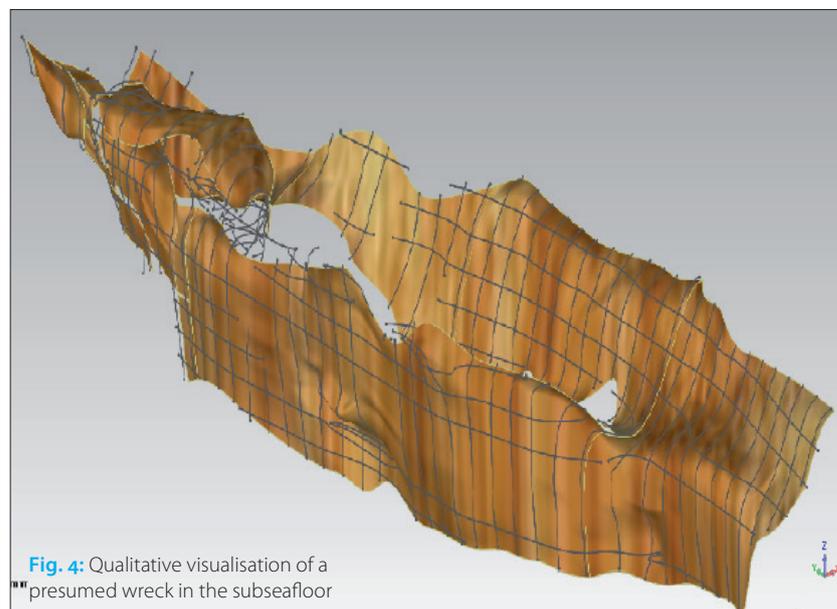


Fig. 4: Qualitative visualisation of a presumed wreck in the subseafloor

References

- Hampton, Lloyd (1974): *Physics of Sound in Marine Sediments*; Springer US, 569 pp.
- Lowag, Jens; Jens Wunderlich; Peter Huembs (2010): Three-dimensional investigation of buried structures with multi-transducer parametric sub-bottom profiler as part of hydrographical applications; Hydro 2010, Rostock, conference paper
- Missiaen, Tine; Dimitris Evangelinos; Chloe Claerhout; Maikel De Clercq; Marnix Pieters; Ine Demerre (2017): *Archaeological prospection of the nearshore and intertidal area using ultra-high resolution marine acoustic techniques: Results from a test study on the Belgian coast at Ostend-Raversijde*; *Geoarchaeology*, Vol. 33, No. 3, pp. 386-400
- Vandiver, Amy (2002): *Analysis of a Sub-Bottom Sonar Profiler for Surveying Underwater Archaeological Sites*; MA thesis, Massachusetts Institute of Technology
- Vardy, Mark E.; Justin K. Dix; Timothy J. Henstock; Jonathan M. Bull; Martin Gutowski (2008): *Decimeter-resolution 3D seismic volume in shallow water: A case study in small object detection*; *Geophysics*, Vol 73, No. 2
- Wille, Peter C. (2005). *Sound Images of the Ocean in Research and Monitoring*; Springer, 471 pp.
- Wunderlich, Jens; Sabine Müller (2003): *High-resolution sub-bottom profiling using parametric acoustics*; *International Ocean Systems*. Vol. 7, No. 4, pp. 6-11

Aus der Ferne in die Tiefe

Kartierung der Schleswig-Holsteinischen Ostsee durch Satellitendatenanalysen

Ein Beitrag von *KNUT HARTMANN, KIM KNAUER, ANDREAS MÜLLER und HANS-CHRISTIAN REIMERS*

Die Meeresbodensedimente und Substrate der Küstengewässer müssen alle sechs Jahre überwacht und der Zustand von Fauna, Flora und Habitaten muss bewertet werden. Zudem wird alle drei Jahre untersucht, welche Lebensräume wie besiedelt sind. Für die Seegrundkartierung, für die Quantifizierung der Habitattypen und für das marine Monitoring der Flachwasserbereiche werden heute Satellitendaten ausgewertet. Dadurch ist es möglich, eine flächenhafte Kartierung in vergleichsweise kurzer Zeit und kostengünstig durchzuführen.

Autoren

Dr. Knut Hartmann, Dr. Kim Knauer und Andreas Müller arbeiten bei der EOMAP GmbH & CO. KG in Seefeld. Dr. Hans-Christian Reimers arbeitet beim Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) in Flintbek.

hartmann@eomap.de

Habitatkartierung | Seegrundkartierung | Seegrundklassifikation | Satellitendatenanalyse | Seegrundhabitat

Hintergrund und Zielstellung

Schleswig-Holsteins Flachwassergebiete der Ostseeküste sind wichtige Lebensräume für Flora und Fauna und nehmen darüber hinaus eine bedeutende Stellung im marinen Umwelt- sowie im Küstenschutz ein. So sind die teilweise dichten und ausgedehnten Seegraswiesen wichtige Laichsubstrate für diverse Fischarten, sie mindern den Seegang und sind nicht zuletzt auch Kohlenstoffspeicher. Auch deswegen sind, im Rahmen der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL: 2000/60/EG), der Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-Richtlinie: 92/43/EWG) und der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL: 2008/56/EG), die Meeresbodensedimente und Substrate sowie die FFH-Lebensraumtypen in Zyklen von sechs Jahren und deren Besiedlung alle drei Jahre anhand entsprechender Überwachungsdaten aus dem marinen Monitoring zu bewerten. Dies konnte bisher im Flachwasserbereich der Ostsee aufgrund der schweren Erreichbarkeit nicht mit Schiffen durchgeführt werden. Daher stützten sich die Untersuchungen in der Vergangenheit auf lokale Unterwasserkartierungen mit flachwassertauglichen Schlauchbooten und auf den Einsatz von Tauchern. Diese Arbeiten sind naturgemäß sehr zeit- und kostenaufwendig und zudem nur bei geeigneten Wetterbedingungen möglich. Eine Komplettaufnahme des Flachwassersaumes der Schleswig-Holsteinischen Ostsee würde mit diesen Verfahren weit mehr als einen Bewirtschaftungszyklus in Anspruch nehmen. Gleiches gilt auch für den Übergangsbereich vom Eulitoral zum Sublitoral der Nordsee.

Die Auswertung von zum Teil neuartigen Satellitendaten zur Kartierung des Flachwasserseegrundes ist in anderen Gebieten der Welt bereits erfolgreich angewandt und in das Management von Flachwasserökosystemen einbezogen worden, so z. B. in der Nordsee zur Bewertung der Qualitätskomponente Substrat im 1. und 2. WRRL-Bewertungsplan (Umweltbundesamt 2019), in Australien für das Great Barrier Reef (Uni-

versity of Queensland 2019) und das Ningaloo Reef (Kobryn et al. 2013) oder in Abu Dhabi. Für Bereiche der Deutschen Ostsee wurden bisher keine intensiven Studien dieser Art durchgeführt. Seit 2018 arbeiten das Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR) und EOMAP zusammen, um dieses Potenzial auch für die Ostsee zu erschließen.

Zielstellung der Arbeiten war eine flächenhafte Kartierung der Schleswig-Holsteinischen Ostsee und Quantifizierung der Seegrundtypen. Zudem sollte der Mehrwert der Satellitendatenanalyse beurteilt werden, um diese gegebenenfalls in ein integriertes Monitoringkonzept einzubinden.

Methode

Für die Kartierung der Ostseeflachwasserbereiche wurden Satellitendaten von unterschiedlichen Sensoren und aus drei Aufnahmezeiträumen verwendet:

- Zeitraum 2001 bis 2014: auf Basis kommerzieller, sehr hoch aufgelöster Satellitendaten,
- Zeitraum 2015 bis 2017: ebenfalls auf Basis kommerzieller, sehr hoch aufgelöster Satellitendaten und
- Zeitraum 2018: basierend auf den frei verfügbaren Sentinel-2-Satellitendaten.

Die Kriterien für die Auswahl der Satellitendaten waren eine möglichst gute Sichttiefe, geringe Bewölkung, minimaler Einfluss der Spiegelreflexion der Wasseroberfläche, und die Aufnahmen sollten während der Vegetationsperiode des Seegrases erfolgt sein. Alle verwendeten Satellitendaten sind optische, multispektrale Satellitendaten, das heißt sie messen die Reflexion der Erdoberfläche des Sonnenlichtes in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen vom blauen Licht bis zum nahen Infrarot. Für die Analysen des Seegrundes bedeutet dies, dass das vom Satelliten gemessene Licht nicht nur vom Seegrund stammt, sondern auch aus der Wassersäule mitsamt optisch aktiven

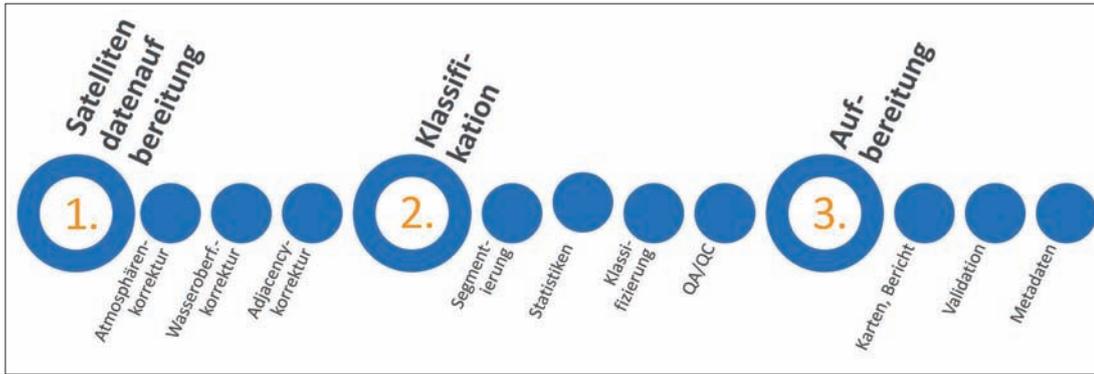


Abb. 1: Analyseketten der Seegrundklassifikation

Inhaltsstoffen (Trübung, Gelbstoffe, Chlorophyll), von der Wasseroberfläche (Spiegelreflexion, Öle usw.), aus der Atmosphäre und nicht zuletzt auch von benachbarten Landbereichen. All diese Einflüsse wurden minimiert, um eine standardisierte und störungsfreie Datengrundlage für die thematische Klassifizierung zu erhalten. Hierfür wurde das Modular Inversion Program (MIP) von EOMAP verwendet, ein Softwarepaket für die physikalische Inversion des Sonnenlichtes (Heege et al. 2014). Eine Inversion des Strahlungstransports ermöglicht es, aus Satellitendaten Aussagen über relevante Zustandsgrößen der Atmosphäre, der Wasserinhaltsstoffe und der Seegrundreflexion zu erhalten. Aufbauend darauf, erfolgte eine thematische Klassifizierung mittels eines objektbasierten Klassifikationsalgorithmus. Hierbei wurden alle Bildpunkte der Satellitendaten anhand gleicher spektraler und struktureller Eigenschaften kategorisiert und zu Segmenten zusammengefasst. Diese wurden, basierend auf Vor-Ort-Messungen und Expertenwissen, vier unterschiedlichen the-

matischen Seegrundtypen zugeordnet (siehe [Abb. 1](#)).

Die vier in der Schleswig-Holsteinischen Ostsee untersuchten Seegrundtypen umfassen ([Abb. 2](#)):

- *Seegrass (Zostera)*: Moderat bis dicht mit Seegräsern bewachsene Flächen, vorrangig auf sandigen Flächen zu finden, welche auf kleineren Flächen auch durchscheinen können.
- *Sand (stellenweise kiesig/steinig)*: Sedimente mit überwiegend feiner Korngröße, welche teils auch geringer als die des Sandes sein kann; vereinzelte Seegrass- und steinigere Flächen sind in dieser Klasse möglich.
- *Restsedimente mit Kies und Steinen*: Glazial geprägte Sedimente, welche überwiegend eine grobkörnige bis steinige Zusammensetzung aufweisen und teilweise mit Rot- und Braunalge bewachsen sein können.
- *Muschelbesiedlung (Mytilus)*: Überwiegend mit Muscheln der Gattung *Mytilus* besiedelte Flächen, welche meist ein sehr geringes Reflexionsverhalten aufweisen.

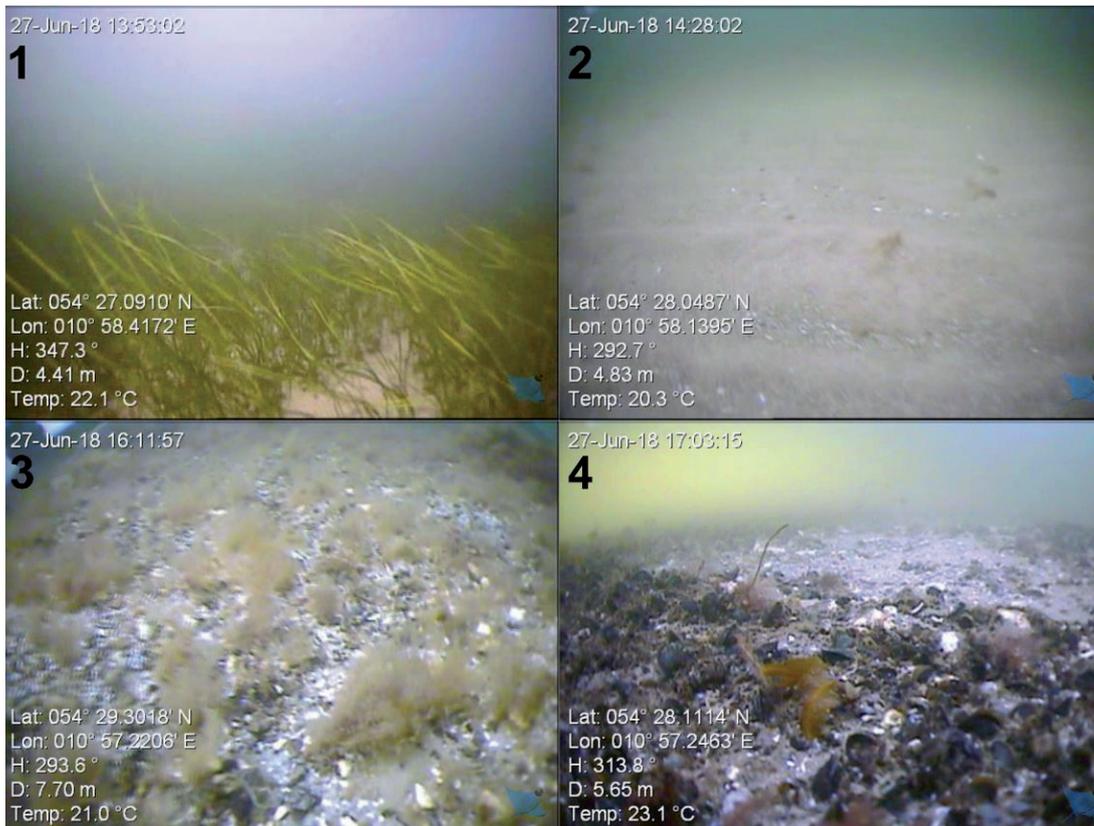


Abb. 2: Unterwasseraufnahmen des Ostseeseegrundes. 1: Seegraswiese, 2 Sediment, 3. Sand und 4 Muschelbank

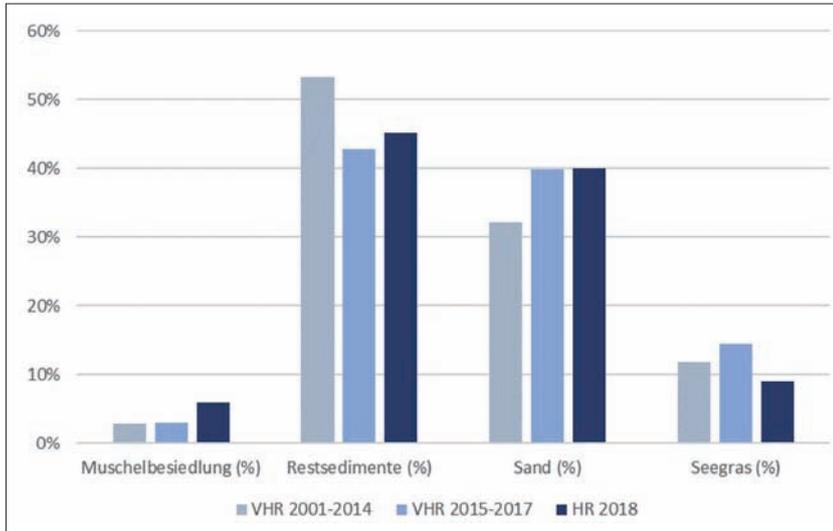


Abb. 3: Gesamtverteilung der Flachwasserseegrundhabitats für die drei untersuchten Zeiträume

Ergebnisse und Diskussion

Insgesamt konnte eine Gesamtfläche der Schleswig-Holsteinischen Ostsee von 505 km² für die Aufnahmen von 2001 bis 2014 kartiert werden, 659 km² für die Jahre 2015 bis 2017 und 520 km² für 2018. Dies entspricht circa 17 bis 22 % der gesamten Ostseefläche Schleswig-Holsteins. Die unterschiedlichen Flächengrößen beruhen auf unterschiedlichen Sichttiefen zu den verschiedenen Zeitschnitten. Die mittlere Sichttiefe betrug circa 8 bis 9 m, in Ausnahmehereichen konnte bis zu einer Tiefe von circa 12 bis 14 m kartiert werden.

Die Ergebnisse zeigen eine über die Jahre weitgehende Konsistenz der absoluten Flächenanteile der Seegrundtypen. Hierbei weisen die Restsedimente mit 45 bis 55 % den größten Anteil der Bedeckung des Flachwasserbereichs auf, gefolgt von Sand mit 32 bis 40 %, Seegras mit 9 bis 15 % und Muschelbesiedlung mit 4 bis 8 % (Abb. 3). Kleinräumig zeigen sich Unterschiede, so wurde beispielsweise im Fehmarnsund ein Rückgang der Seegrasbestände kartiert. Der Detailgrad der Kartierung war für alle Gebiete sehr hoch und ist exemplarisch in Abb. 4 für das Gebiet westlich von Fehmarn dargestellt.

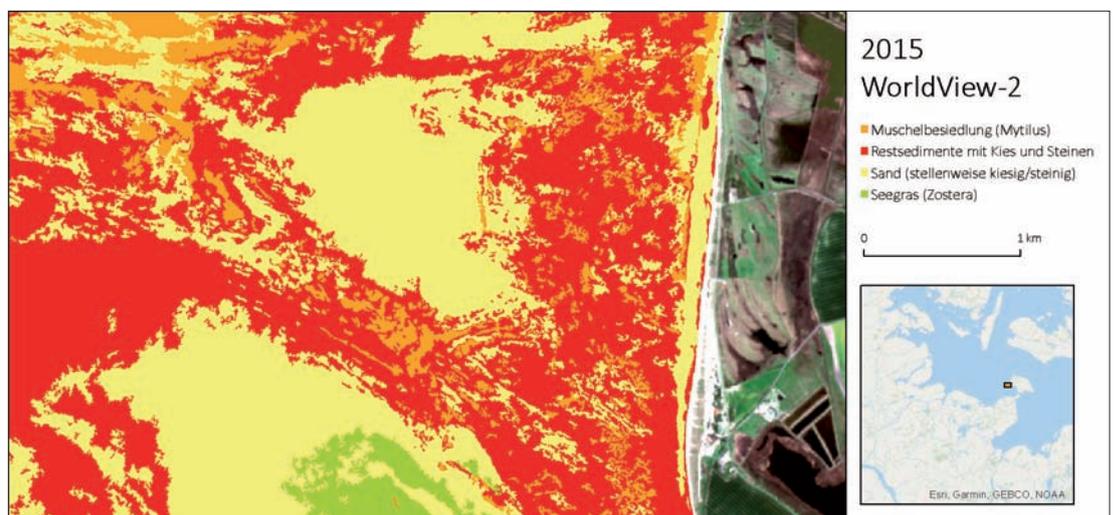
Dieser Datensatz stellt die derzeit einzige flächendeckende und hochaufgelöste Kartierung

des Gebietes dar. Er bildet unter anderem eine Grundlage für weitere, gezielte Vor-Ort-Messungen und dient als Planungsgrundlage für Umweltverträglichkeitsanalysen.

Die Auswertung der Satellitendaten und die erzeugte Seegrundkartierung beinhalten eigene Unsicherheiten und Spezifikationen, welche die Genauigkeit beeinflussen. Diese werden im Folgenden diskutiert.

- **Phänologie des Seegrases.** Je nach phänologischem Status des Seegrases bzw. der Seegrasbiomasse ist eine Erkennung begünstigt bzw. begrenzt. Ideal wären dementsprechend Kartierungen zu dem gleichen phänologischen Status des Seegrases, um einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Jahren zu ermöglichen. Diese Datengrundlage war nur bedingt vorhanden und in der vorliegenden Studie erfolgten die Auswertungen dementsprechend aus Satellitendaten, die im Zeitraum zwischen April bis Oktober aufgenommen wurden.
- **Wassertrübung.** Die Wassertrübung beeinflusst die Möglichkeit der Seegrundkartierung. Zum einen beschränkt sie die maximale Kartiertiefe, da die Reflexion des Sonnenlichtes nicht mehr vom Seegrund dominiert wird, zum anderen erhöht zunehmende Wassertrübung die Unsicherheiten in der Kartierung.
- **Oberflächenreflexion.** Mit Hilfe der Satellitenauswertungen werden lediglich die Informationen über die Seegrundoberfläche vermessen. So wäre z. B. eine mit geringer Sedimentmächtigkeit überdeckte Restsedimentfläche als Sediment erkannt worden.
- **Segmentierung.** Durch die Einteilung des Seegrundes in Segmente, also Geometrien mit ähnlichen Eigenschaften erfolgt eine Generalisierung der ursprünglichen räumlichen Auflösung der Satellitendaten. Bei der praktischen Anwendung wurde hier der Kompromiss zwischen ausreichendem Detailgrad der Kartierung und moderater Generalisierung gewählt.
- **Klassifizierung.** Die thematische Klassifizierung der Segmente wies jedem Segment eine der vier Klassen zu. Diese Klasse entspricht der

Abb. 4: Detailabbildung der Seegrundkartierung westlich von Fehmarn (vgl. auch das Titelbild)



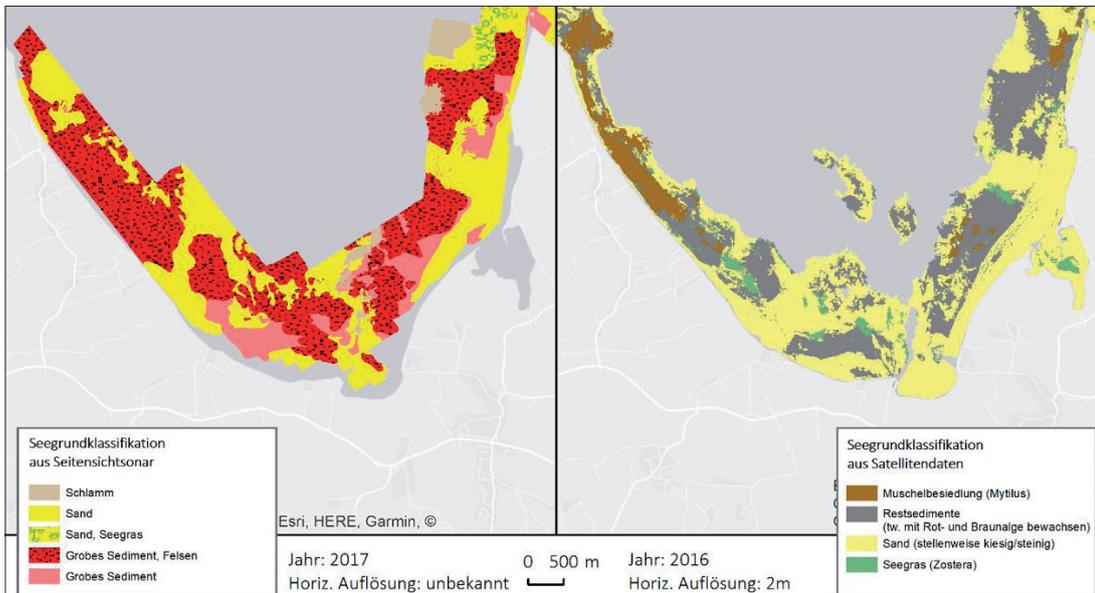


Abb. 5: Vergleich einer Seegrundklassifizierung basierend auf Seitensichtsonar-Backscatter (links) und der Seegrundkartierung auf Basis der optischen Satellitendaten (rechts)

dominierenden Seegrundbedeckung in diesem Gebiet. So ist es aber nicht ausgeschlossen, dass z. B. in der Klasse *Sand (stellenweise kiesig/steinig)* ebenfalls lockere Seegrassbedeckungen vorzufinden sind.

- Spektrale Ähnlichkeiten der Seegrundhabitate. Ein wesentlicher Teil der Auswertemethode basiert darauf, dass die Seegrundhabitate spektrale Unterschiede besitzen. Um diese zu erkennen wurde eine Reihe physikalischer Korrekturen auf die Satellitendaten angewendet (z. B. Atmosphärenkorrektur, Korrektur für Wasserinhaltsstoffe). Auch nach der Anwendung dieser Korrekturen kann z. B. eine Muschelbesiedlung dem Restsediment sehr ähnlich sein.

In der Studie wurden sowohl kommerzielle, sehr hoch aufgelöste Satellitendaten als auch die frei verfügbaren Sentinel-2-Satellitendaten untersucht. Die Daten unterscheiden sich sowohl in der räumlichen als auch spektralen Auflösung. Deren Eignung zur Analyse der Seegrundhabitate ist jedoch generell als ähnlich zu bewerten. Allerdings wird durch die erhöhte räumliche Auflösung der kommerziellen Daten eine genauere Klassifizierung erleichtert, da unter anderem die Textur der Seegrundoberfläche in besserem Detail erkannt wird und so die Genauigkeit für die Klassifikation von Seegrasswiesen erhöht wird.

Vergleich mit Vor-Ort-Messungen

Die Validation bzw. der Vergleich mit Vor-Ort-Messungen wurde im Rahmen der Datenverfügbarkeit durchgeführt und zeigte eine gute Korrelation mit Unterwasservideos, dem Backscatter der Seitensichtsonar-Mosaik und den resultierenden Kartierungsergebnissen (Abb. 5 und Abb. 6). So konnten die Ergebnisse bereits im Rahmen aktueller Untersuchungen zur Verbreitung der marinen FFH-Lebensraumtypen im Fehmarnsund überprüft und als ergänzende Kartiergrundlage eingesetzt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Arbeiten wurde der hohe Nutzen einer systematischen satellitengestützten Auswertung für die Seegrundkartierung im Flachwasserbereich der Ostsee demonstriert. Dieser liegt insbesondere in der flächenhaften Kartierung, die relativ zeitnah und kostengünstig erfolgen kann. Eine Einbindung dieser Verfahren in ein regelmäßiges Seegrundmonitoring erscheint dementsprechend möglich und nützlich. Hierzu werden in den kommenden Jahren weitere Untersuchungen und Optimierungen der Methode untersucht, derzeit bereits im Projekt ECO-MAP, in dem es auch um die ideale Kombination von akustischen und optischen Auswerteverfahren geht.

In zukünftigen Studien kann speziell durch die häufigen Aufnahmen der Sentinel-2-Satelliten und neuer kommerzieller (Mikro-)Satelliten eine verbesserte und kontinuierliche Kartierung mit verringerten Unsicherheiten erfolgen. So kann z. B. eine multitemporale Auswertung innerhalb der Vegetationsperiode speziell für die Kartierung der Seegrassbestände hilfreich sein und zur erhöhten Kartierungsgenauigkeit beitragen. Mittel- und langfristige werden hyperspektrale Satellitensensoren, also Sensoren, welche die Vermessung der Sonnenreflexion in mehr als 100 Wellenlängenbereichen zulassen, die Genauigkeit der Kartierung verbessern. //

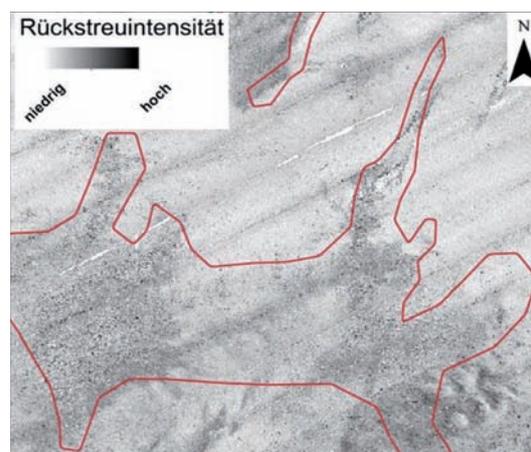


Abb. 6: Vergleich einer durch die Satellitendatenklassifizierung ermittelten Restsedimentfläche (rote Linie) mit dem Seitensichtsonar-Backscatter (Daten der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel); dunklere Grautöne zeigen eine höhere Rückstreuintensität an

Literatur

- Umweltbundesamt (2019): Wasser-rahmenrichtlinie-Bewertung der Hydromorphologie in den Küstengewässern Deutschlands; www.gewaesser-bewertung.de/index.php?article_id=67&clang=0, zuletzt geprüft am 20.05.2019
- University of Queensland (2019): Pressemitteilung zur Kartierung des Great Barrier Reefs, Australia; www.uq.edu.au/news/article/2019/04/new-mapping-set-improve-great-barrier-reef-management, zuletzt geprüft am 20.05.2019
- Kobryn Halina T.; Kristin Wouters; Lynnath E. Beckley; Thomas Heege (2013): Ningaloo reef: shallow marine habitats mapped using a hyperspectral sensor; PLoS One, DOI: 10.1371/journal.pone.0070105
- Heege, Thomas; Viacheslav Kiselev; Magnus Wettle; Nguyen Nghia Hung (2014): Operational multi-sensor monitoring of turbidity for the entire Mekong Delta; International Journal of Remote Sensing, Vol. 35, Issue 8, S. 2910-2926

Digitalisierung auf allen Meeren

Umfassende Aufgaben für die neue BSH-Chefin

Ein Beitrag von KATRIN BENNER

Seit November 2018 hat das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in Hamburg und Rostock eine neue Präsidentin. Die Juristin Dr. Karin Kammann-Klippstein hat die Aufgabe, den Übergang in die hochautomatisierte Schifffahrt in die Wege zu leiten. Um dieses Ziel zu erreichen, gibt es viel zu tun: Weltweit einheitliche Standards zu schaffen, damit die neuen hydrographischen Informationen verwertet werden können. Damit soll eine optimierte Routenplanung möglich sein. Ein wichtiger Beitrag zum Meeresumweltschutz.

Autorin

Katrin Benner ist stellvertretende Pressesprecherin am BSH in Hamburg.

katrin.benner@bsh.de

BSH | Digitalisierung | Automatisierung | autonome Schifffahrt | Standardisierung | Meeresumweltschutz
Offshore-Windenergie | ImoNAV | ATAIR | LNG-Antrieb | GtL-Treibstoff

Selbstfahrende Schiffe, Containerladungen per Mausclick oder landseitige Steuerung und Kontrolle der Flotten: Die Digitalisierung verändert die Möglichkeiten der Schifffahrt. Um diese Möglichkeiten nutzen zu können, bedarf es moderner weltweit einheitlicher Standards. Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) ist unmittelbar an der Entwicklung dieser künftigen Digitalisierungsprozesse und deren Standardisierung beteiligt.

Dr. Karin Kammann-Klippstein (Abb. 1) leitet seit November 2018 als neue Präsidentin die komplexen Aufgaben der Bundesoberbehörde und ist sich der Herausforderungen sehr bewusst: »Die technischen Neuerungen bieten Chancen auf mehr Effizienz in vielen Bereichen. Allerdings müssen digitale Innovationen auch immer daraufhin überprüft werden, ob sie die Schifffahrt nicht nur

›intelligenter‹, sondern auch sicherer und nachhaltiger gestalten. In manchen Bereichen wird bereits Künstliche Intelligenz (KI) eingesetzt, um Entscheidungsprozesse mittels Datenverarbeitung zu beschleunigen. Dies ist der Trend. Doch es will genau geprüft sein, wo Algorithmen bisherige Ressourcen ersetzen können. Digitalisierung impliziert Veränderungen an Bord und auch in den Hydrographischen Diensten. Das BSH beobachtet sehr genau, was da technisch möglich und sinnvoll ist, um im internationalen Rahmen und auch gemeinsam mit der Internationalen Hydrographischen Organisation (IHO) Standards zu entwickeln.«

Automatisierung der Schifffahrt und der Hydrographischen Dienste

Immer mehr Informationen wollen in immer komprimierterer Form aufgearbeitet und allen Nutzerinnen und Nutzern zeitnah zur Verfügung gestellt werden. Hierbei spielt neben der gigantischen Datenmenge die zeitliche Komponente eine wesentliche Rolle. Immer mehr Sensordaten auf der einen und steigende Nutzeranforderungen auf der anderen Seite bringen immer mehr automatisierte Aufbereitungsalgorithmen zum Einsatz. Hierdurch entwickeln sich große Datenmengen – also Big Data – zu »intelligenten Daten« – Smart Data –, was langfristig Arbeitsprozesse erleichtern und Ressourcen sparen soll. Dies technisch umzusetzen ist eine umfassende Aufgabe, die eine gute Kooperation mit technischen Partnerinnen und Partnern und eine punktgenaue Umsetzung voraussetzt, damit sämtliche Daten an einer Schnittstelle zeitgleich zur Verfügung stehen. Doch dies ist nur eine Aufgabe, um die sich die neue Präsidentin kümmert.

Dr. Karin Kammann-Klippstein hat gemeinsam mit den Expertinnen und Experten im BSH auch die Entwicklung der Navigationssysteme und die Sicherheit auf See im Blick. Dazu zählen mögliche Maßnahmen für digitale Abwehrtechniken bei Cyber-Risiken in der Schifffahrt genauso wie neue Informationssysteme zur Steuerung von Schiffen.



Abb. 1: Neue BSH-Präsidentin Dr. Karin Kammann-Klippstein

Gemeinsam mit der IHO beteiligt sich das BSH aktiv an der Gestaltung von internationalen Rahmenbedingungen. Auf deren Basis stellen Unternehmen zukunftsgerichtete Produkte her, die die Navigation künftig erleichtern sollen.

Die Automatisierung in der Schifffahrt nimmt stark zu bis hin zu autonom fahrenden Schiffen, und es ist fast keine Frage mehr, ob Schiffe autonom fahren, sondern eher, wann und mit welcher Technik sie das tun. Mittelfristig werden diese Systeme die Navigation und Routenplanung deutlich verändern. Herkömmliche Elektronische Seekarten reichen dann nicht mehr aus. Es sind umfassendere und genauere hydrographische und andere Informationen an Bord gefragt. Wenn Nautikerinnen und Nautiker mit Hilfe von virtuellen Ergänzungen der realen Umwelt – sogenannter Augmented Reality (AR) – Objekte beim Blick durch die Brückenfenster lagerichtig angezeigt bekommen, auch bei schlechter Sicht oder durch das Wasser, kann dies zu mehr Sicherheit auf See beitragen. Auch ist wahrscheinlich schon in ein paar Jahren eine bessere Routenplanung unter automatischer Berücksichtigung von Tiefen, Strömungen, Wetter und anderen Einflüssen möglich. Dies kann den Betriebsstoffverbrauch eines Schiffes erheblich senken und die Emissionen reduzieren.

»Dies wäre ein großer Vorteil«, betont die Präsidentin, »um die Schifffahrt und den Schutz der Umwelt in Einklang zu bringen.« Es ist ihr persönlich auch ein wichtiges Anliegen: »Denn die Meere waren vor Millionen Jahren da und sie werden noch Millionen Jahre da sein. Ihre Bedeutung für das gesamte Leben auf unserem Planeten wird vielfach stark unterschätzt. Umso größer ist unsere Verantwortung, diesen Lebensraum zu schützen. Das sehe ich als große Aufgabe des BSH.«

International unterwegs im Dienst für die deutsche Schifffahrt

Die Juristin Dr. Karin Kammann-Klippstein hat ihre berufliche Laufbahn im Referat »Internationale Schifffahrtspolitik« im Bundesverkehrsministerium gestartet. Damals in der Abteilung »Seeverkehr« in Hamburg, im selben Gebäude wie das heutige BSH. Insofern ist es ein Stück wie »nach Hause kommen«, sagt sie über ihre neue Position im BSH. Ihre Erfahrungen in der maritimen Branche ergänzt sie durch eine Karriere auf internationalem Niveau. Ihre vielseitigen Erfahrungen über den Tellerrand hinaus sind vor allem für die großen Themen wie Meeresumweltschutz oder nachhaltige Schifffahrt sehr von Vorteil. Und dafür ist das BSH als zentrale maritime Behörde auch zuständig.

Rund 90 Prozent des Welthandels werden auf dem Seeweg abgewickelt. Von daher haben Schiffe als wichtigste Verkehrsträger und die Seewege als zentrale Infrastruktur der Weltwirtschaft hohe Relevanz – sowohl als Wirtschaftsfaktor als auch für das Weltklima. Die Einrichtung von Emissionsschutzgebieten und die Festlegung von Grenzwerten für Schiffsemissionen durch die Interna-



Abb. 2: Messstation vor Wedel, die Teil eines größeren Schiffsabgasmessnetzes ist

tionale Seeschiffahrtsorganisation (International Maritime Organization – IMO) haben für den Meeresumweltschutz bereits wichtige Weichen gestellt, berichtet Dr. Karin Kammann-Klippstein zu den Erfolgen auf diesem Gebiet. Auch in Deutschland werden die Schiffe kontrolliert. Das BSH hat dafür ein Schiffsabgasmessnetz mit zahlreichen Partnerinnen und Partnern wie dem Institut für Umweltphysik der Uni Bremen initiiert und in Wedel, Kiel und Bremerhaven bereits erste Messstationen aufgestellt (Abb. 2). »Die Ergebnisse sind ermutigend. Fast 99 Prozent der Schiffe halten die Grenzwerte für Schwefelabgase ein«, berichtet Kammann-Klippstein. Demnächst werde das Netz ausgebaut. In Kooperation mit der Bundespolizei testet das BSH sogar mobile Stationen. In engem Kontakt mit den Anrainerstaaten von Nord- und Ostsee sind auch erste Schritte geplant, um das Überwachungsnetz auf die europäischen Küsten auszudehnen und so die Meeresumwelt nachhaltig zu schützen.

Offshore-Windenergie: Erneuerbare Energien, Energieeffizienz und Umweltschutz

Auch auf dem Gebiet der Nutzung von Offshore-Windenergie ist das BSH hinsichtlich der Förderung erneuerbarer Energien weit vorne. Mit der Übertragung weiterer Aufgaben, unter anderem für Flächenvoruntersuchungen, und der Schaffung der neuen Abteilung »Ordnung des Meeres« (siehe HN 111, S. 36–37) unterstützt das BSH die langfristigen umwelt- und energiepolitischen Ziele der Bundesregierung. Durch die Erstellung von Flächenentwicklungsplänen für Windenergie auf See und mit Genehmigung sowie Überwachung der Windenergieanlagen trägt das BSH zur erfolgreichen Energiewende in Deutschland bei. Die Ausweisung von Flächen zur möglichen künftigen

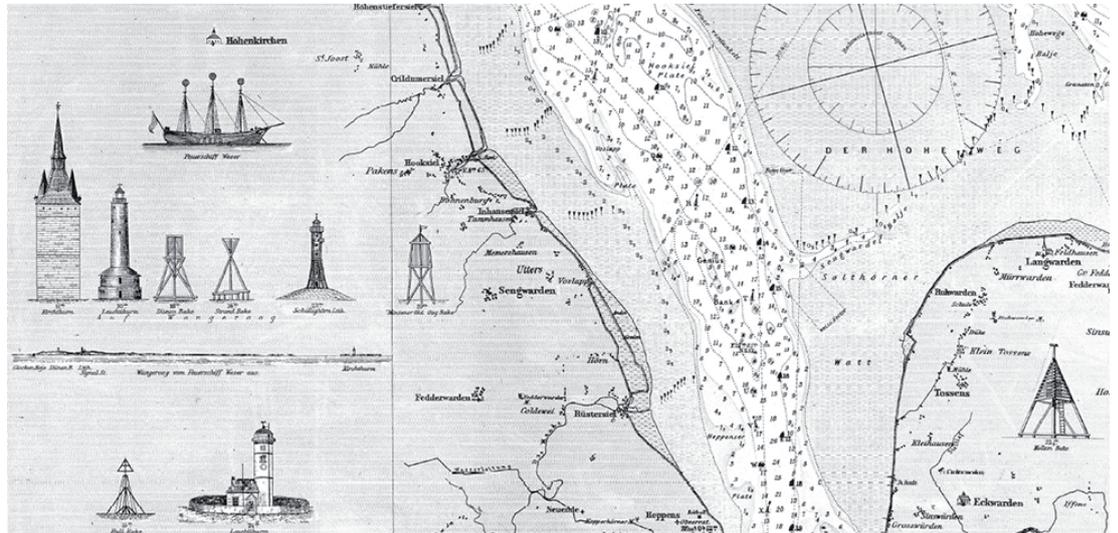


Abb. 3: Detailreiche historische Seekarte von 1878

Umwandlung von Windenergie in Wasserstoff und Nutzung als Speichermedium zum Erreichen von mehr Energieeffizienz und Umweltschutz wurde dem BSH erst Ende letzten Jahres gesetzlich zugewiesen.

»Wichtig«, sagt die Präsidentin, »sind auch zahlreiche Forschungsprojekte des BSH – meist in Kooperation mit diversen Institutionen, Behörden und Ministerien.« Die Projekte zielen auf weitere Fortschritte bei der Seevermessung und optimieren die nautisch-hydrographischen Informationen. Beispielsweise zielt das Projekt ImonAV darauf, die Daten für die Elektronischen Seekarten nicht mit Mindesttiefen, sondern mit hochaktuellen Wassertiefen bereitzustellen. Damit könnten Schiffe zukünftig noch effizienter und sicherer in schwierigen Revieren wie etwa der Elbe navigieren. Auch arbeitet das BSH gemeinsam mit den Lotsen an der Bereitstellung detaillierter Tiefeninformationen für Elektronische Seekarten. »Es ist schon faszinierend, was heute technisch alles möglich ist«, so Dr. Karin Kammann-Klippstein. »Allerdings konnte ich bei einer Ausstellung historischer Seekarten bei der IHO in Monaco vor Kurzem

Abb. 4: Die neue ATAIR mit LNG-Antrieb, die Anfang 2020 in Dienst gestellt werden soll



Alle Fotos: Claudia Thomsen, BSH

auch feststellen, wie beeindruckend präzise bereits vor über hundert Jahren gearbeitet worden ist. Diese historischen Seekarten sind wahre Kunstwerke und wahrscheinlich wäre die Entwicklung in diesem Bereich bei weitem nicht so weit fortgeschritten ohne diese wichtige Grundlage« (Abb. 3).

Nachhaltige BSH-Flotte

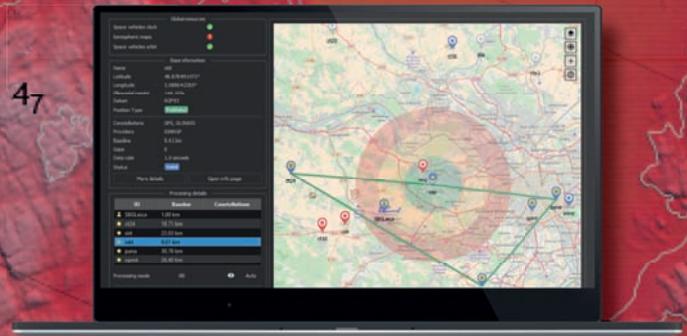
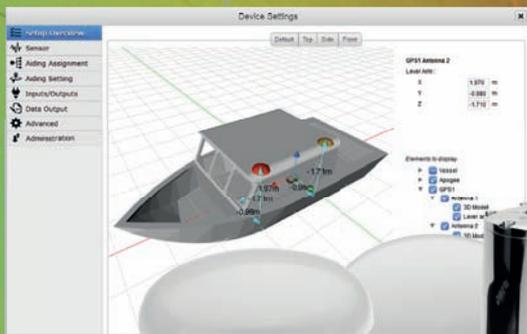
Daneben ist das BSH auch an zahlreichen Forschungsprojekten zum Zustand der Meere und den Auswirkungen des Klimawandels auf die Ozeane beteiligt. Es geht in puncto Klimaschutz mit gutem Beispiel voran. Die fünf BSH-Forschungs-, Vermessungs- und Wracksuchschiffe sind mit dem im Betrieb umweltfreundlichen Gas-to-Liquids-Treibstoff (GtL) unterwegs. Dabei wird Erdgas zu Erdöl verflüssigt, das deutlich weniger Schadstoffe enthält als herkömmlicher Diesel.

Das neue Vermessungs-, Wracksuch- und Forschungsschiff ATAIR (Abb. 4, siehe auch HN 112, S. 24–26), das Anfang 2020 in Dienst gestellt werden soll, erfüllt die Vorgaben des Umweltzeichens »Blauer Engel« für umweltfreundliches Schiffdesign und ist mit einem LNG-Antrieb (Liquefied Natural Gas) ausgestattet. Die Unterwassergeräusche des Schiffs sind minimiert. Diese Maßnahmen schützen die Meeresumwelt. Für die anstehenden Neubauten der BSH-Schiffe DENEK und WEGA werden ebenfalls Antriebe installiert, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen. Zurzeit ist das LNG.

Das BSH beobachtet somit auf Nord- und Ostsee die Entwicklungen der Meeresumwelt, nimmt zahlreiche Aufgaben wahr, die Sicherheit auf den Meeren zu gewährleisten und digitale Seekartenprodukte mit zu entwickeln, damit der Übergang in die hochautomatisierte Schifffahrt gelingt. »Die Papierseekarte«, so die Präsidentin, »wird aber neben all den digitalen Neuerungen wohl noch eine Weile Bestand haben. Denn als Navigations-Back-up ist sie für viele auf der Schiffsbrücke nach wie vor unverzichtbar.« Deshalb vertreibt das BSH auch weiterhin die wichtigsten Karten in Papierform. //

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





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