

# 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 Prüfungsvorganges 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 Prüfungsvorgänge 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.

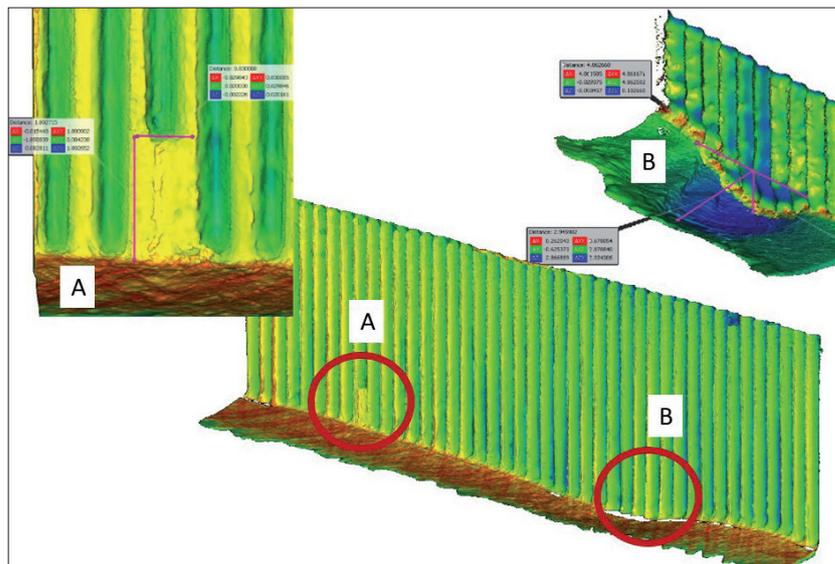


Abb. 1: Identifizierung einer Spundwandinstandsetzung (A), lokale, standsicherheitsrelevante Auskolkung vor der Spundwand (B)

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

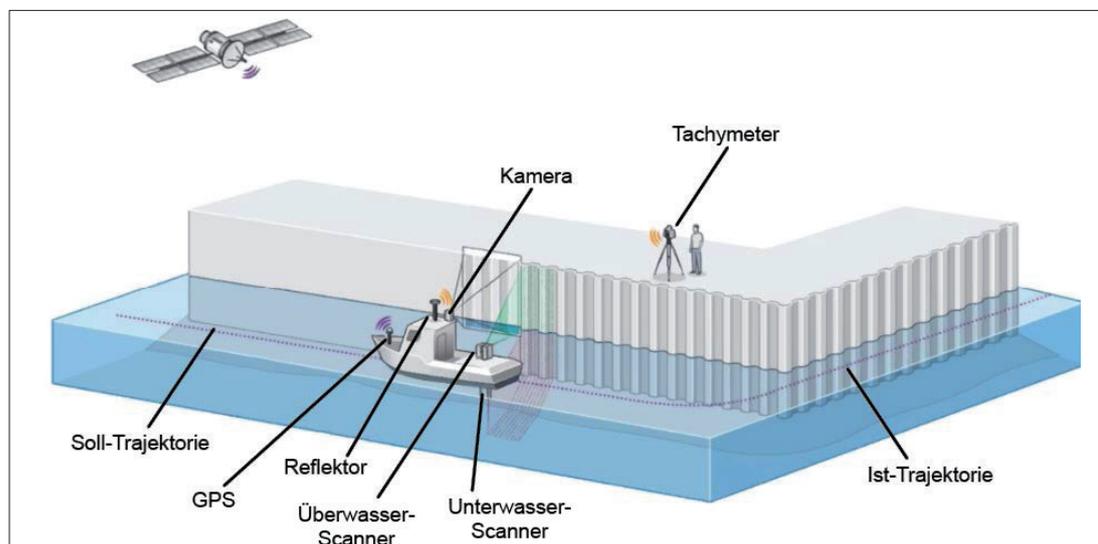


Abb. 2: 3D-Aufnahme einer Hafenanlage über und unter Wasser mit dem 3D HydroMapper

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

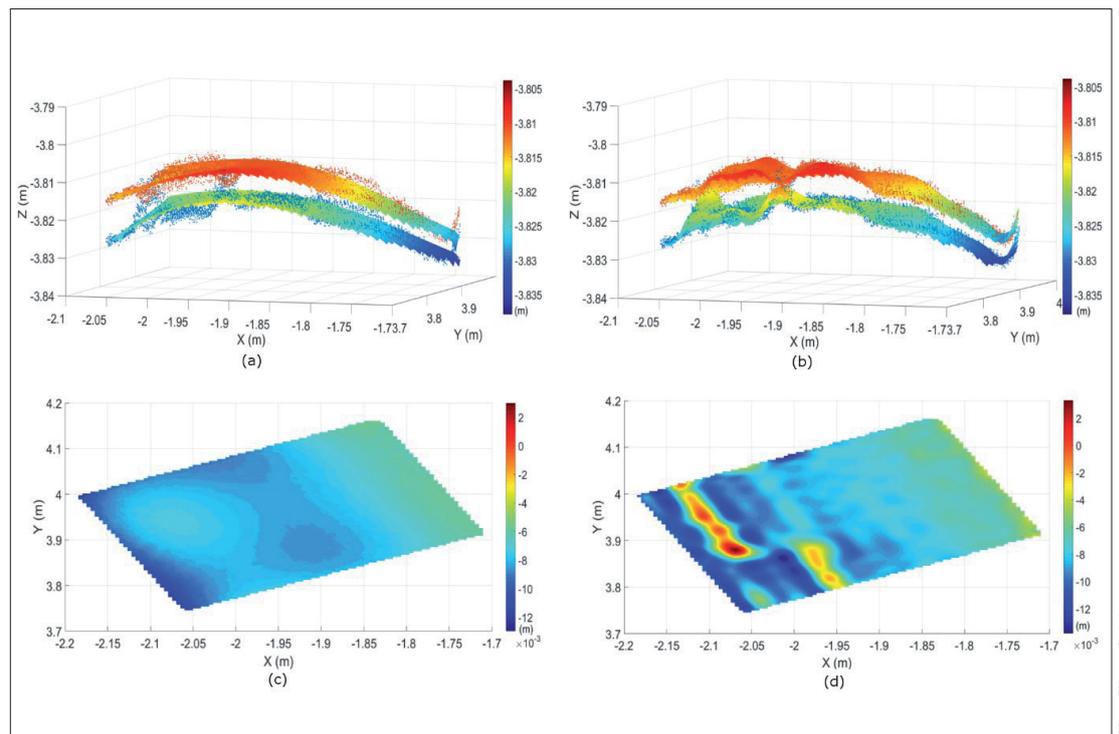


Bild aus: Zhao et al. 2018

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«