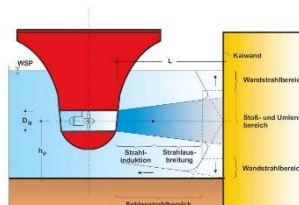


Gefördert durch:



# Gemeinsamer Schlussbericht

## Propellerstrahl - Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen



**Laufzeit:** 01.12.2021 – 31.05.2025

<b><u>Gesamtkoordinator:</u></b>	
	WK Consultants GmbH (WKC) Veritaskai 8 21079 Hamburg Dr. Olaf Drude Tel.: 040/790001-52 Mobil: 0172 4008511 E-Mail: olaf.drude@wk-consult.com
<b><u>Projektpartner:</u></b>	
	Technische Universität Hamburg (TUHH) Institut für Fluidodynamik und Schiffstheorie Am Schwarzenberg-Campus 4 21073 Hamburg Prof. Dr.-Ing. Moustafa Abdel-Maksoud
	Technische Universität Braunschweig (TUBS) Leichtweiß-Institut für Wasserbau Abteilung Wasserbau und Gewässermorphologie Beethovenstr. 51a 38106 Braunschweig Prof. Dr.-Ing. Jochen Aberle
<b><u>Korrespondierende Projektpartner:</u></b>	
Hansestadt LÜBECK 	Hansestadt Lübeck Lübeck Port Authority Ziegelstr. 2 23539 Lübeck Dipl.-Ing. Guido Kaschel
	Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Federal Waterways Engineering and Research Institute Kußmaulstr. 17 76187 Karlsruhe Tarek Beck, M.Sc.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	III
TABELLENVERZEICHNIS .....	IV
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	V
<b>1 PROJEKTVORSTELLUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1 Aufgabenstellung .....	1
1.2 Voraussetzungen für die Projektdurchführung .....	1
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	2
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand auf dem das Projekt aufbaute .....	3
1.5 Zusammenarbeit mit Dritten .....	6
<b>2 PROJEKTERGEBNISSE .....</b>	<b>8</b>
2.1 Arbeitspaket 1: Analyse der Betriebsfaktoren .....	8
2.2 Arbeitspaket 2: Feldmessungen .....	10
2.3 Arbeitspaket 3: Geschwindigkeits- und Druckverteilung .....	13
2.4 Arbeitspaket 4: Experimentelle Untersuchungen .....	16
2.5 Arbeitspaket 5: Numerische Simulation .....	22
2.6 Arbeitspaket 6: Entwicklung der Kolkformel .....	25
2.7 Arbeitspaket 7: Softwaresystem .....	30
2.8 Publikationen .....	31

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Abhängigkeiten der Arbeitspakete. ....	2
Abbildung 2: Ablegemanöver am Anleger 4 des Skandinavienkais. ....	10
Abbildung 3: Skizze der Position der beiden Messrahmen an Anleger 4; b) Skizze der Position der am Messrahmen montierten Messgeräten für Druck- (Pressure) und Strömungsgeschwindigkeitsmessungen (ADV-Vector); Die Drucksensoren S1-S12 (S13-S24) sind an Messrahmen 1 (2) Messrahmen befestigt; c) Fotografie vor einer Messung (Fotos und Grafiken: LWI). ....	11
Abbildung 4: Zeitlicher Ablauf und Übersicht über die durchgeführten Feldmessungen im Juni 2023 für die Zielschiffe Finntide und Finnbreeze. ....	11
Abbildung 5: Maximale Druckänderung in Abhängigkeit der Sensorposition von Rahmen 1 (links) und Rahmen 2 (rechts) für drei Ablegemanöver. ....	12
Abbildung 6: Stromlinien im vertikalen Schnitt durch den Propeller, um die Komplexität der Strömung zu veranschaulichen. ....	14
Abbildung 7: Oben: Der zeitlich gemittelte Druck in der Simulation an den Betrachtungspunkten, unten: Zeitverlauf der Geschwindigkeit in den verschiedenen Komponenten. ....	15
Abbildung 8: Der Druck auf den Propellerblättern und die auftretende schallemitierende Kavitation, hier in hellgrau dargestellt. Validierung der CFD-Ergebnisse gemäß Schalldruckpegel (am 22.06.2023 beim Anlegemanöver, siehe Abbildung 2). ....	16
Abbildung 9: a) Fotografie des GMS-Hinterschiffsmodells mit angebautem Zentralruder; b) Ansicht des Kaplan-Propellers in Kortdüse und Doppelruder; c) Ansicht des freischlagenden Wageningen-Propellers; d) Ansicht des Containerschiffs während der Versuchsdurchführung; e) Darstellung der digitalisierten Schiffshülle; f) Fotografie des RoRo-Zielschiffes in Travemünde; g) gegenständliches RoRo-Schiffsmodell (Fotos und Grafik: LWI). ....	18
Abbildung 10: a) Foto des Versuchsaufbaus für Kolkversuche in der 2 m Rinne mit dem Wageningen Propeller und Skizzen für den Versuchsaufbau im Hafenbecken für die Kolkversuche mit dem RoRo-Modell mit b) dem Hauptantrieb und c) mit dem Bugstrahlruder (Fotos und Skizzen: LWI). ....	19
Abbildung 11: a) Exemplarische Visualisierung der zeitlichen Entwicklung der Kolkgeometrie (3D-Modelle) im Wandbereich anhand von Messungen mit Ultraschallsensoren für Experimente mit dem Wageningen-Propeller (Grobsandsohle). ....	20

Abbildung 12: : a) Exemplarische Visualisierung der zeitlichen Entwicklung der Kolkgeometrie (3D-Modelle) im Wandbereich anhand von Messungen mit Ultraschallsensoren für Experimente mit dem Wageningen-Propeller (Grobsandsohle). .....	21
Abbildung 13: Vergleich der Sohlschubspannungsverteilung des Hauptantriebs des RoRo-Schiffs bei $t = 0$ s zum Rand des Kolkes bei $t = 10230$ s für a) großen und b) geringen Wandabstand für ausgewählte Simulationen. Dargestellt sind ausschließlich Schubspannungswerte, die größer als die kritische Sohlschubspannung sind. ....	22
Abbildung 14: Vergleich der gemessenen und numerisch berechneten horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitskomponenten. Links: EFD-Ergebnisse, rechts: CFD-Ergebnisse.....	23
Abbildung 15: Unterschiede der Strömungseigenschaften für zwei Bodenkonfigurationen. ....	24
Abbildung 16: Verteilung der Wandschubspannung und der Stromlinien im Heckbereich beider Antriebssysteme.....	25
Abbildung 17: Vergleich von gemessenen und mit der Binnenformel berechneten Kolkiefen für die experimentellen Daten (Kalibrierungs- und Validierungsdaten) und Literaturdatensätze. ....	28
Abbildung 18: Vergleich von gemessenen und mit der Zweischrauber-Formel (Hauptantrieb) berechneten Kolkiefen für die experimentellen Daten. ....	29
Abbildung 19: Vergleich von gemessenen und mit der Zweischrauber-Formel (Hauptantrieb) berechneten Kolkiefen für die experimentellen Daten. ....	29
Abbildung 20: Vergleich von gemessenen und mit der Zweischrauber-Formel (Hauptantrieb) berechneten Kolkiefen für die experimentellen Daten. ....	30

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Aufgabenbeschreibung der Hauptaufgaben der einzelnen APs .....	3
Tabelle 2: Parameter $c_1$ bis $c_{12}$ zur Vorhersage des zeitlichen Verlaufs der maximalen Kolkiefen nach Gln. 1 bis 3.....	27

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>Abkürzung</b>	<b>Definition</b>	<b>Einheit</b>
AP	Arbeitspaket	
BAW	Bundesanstalt für Wasserbau	
FDS	Institut für Fluiddynamik und Schiffstheorie	
LHG	Lübecker Hafengesellschaft mbH	
LPA	Lübeck Port Authority	
LWI	Leichtweiß-Institut für Wasserbau	
RoRo	Roll on, Roll off	
TUBS	Technische Universität Braunschweig	
TUHH	Technische Universität Hamburg	
WKC	WK Consultants GmbH	

# **1 Projektvorstellung**

## **1.1 Aufgabenstellung**

Die stetig zunehmenden Schiffgrößen und höheren Antriebsleistungen stellen Hafengebeteiber in deutschen See- und Binnenhäfen vor erhebliche Herausforderungen, da viele bestehende Hafeninfrastrukturen nicht auf die heute auftretenden propellerstrahlinduzierten Belastungen ausgelegt sind. Die bisherigen Literaturansätze können die komplexen Erosionsvorgänge an der Hafensohle nur unzureichend beschreiben, weshalb ein vertieftes Verständnis der hydrodynamischen Prozesse und Kolkmechanismen erforderlich ist.

Ziel des IHATEC-II-Verbundprojekts *Propellerstrahl – Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen* war es daher, die durch Bugstrahlruder und Hauptantriebe sowie moderne Propulsionssysteme erzeugten Strömungen in unmittelbarer Nähe zu Kaimauern systematisch zu untersuchen und die Auswirkungen auf die Kolkbildung am Fuß von Kaianlagen präzise zu erfassen. Hierfür wurden experimentelle Modellversuche, hochaufgelöste numerische Strömungssimulationen (CFD) und umfassende Feldmessungen kombiniert, in denen sowohl Strahlhydraulik als auch die Geräuschentwicklung über und unter Wasser erfasst wurden. Auf Basis der gewonnenen Daten wurden bestehende Berechnungsansätze zur Bestimmung der Kolktiefe weiterentwickelt, um die Belastungen auf Gewässersohle und Kaianlagen realitätsnah vorherzusagen. Damit schafft das Projekt neue Grundlagen für die Bemessung von Sohl- und Kalksicherungen, trägt zur Verlängerung der Lebensdauer von Kaianlagen bei, ermöglicht optimierte Instandsetzungsintervalle und hilft, Eingriffe in Ökosysteme zu reduzieren. Insgesamt leistet das Vorhaben einen wesentlichen Beitrag zu einem sicheren, wirtschaftlichen und nachhaltigeren Hafengebtrieb.

## **1.2 Voraussetzungen für die Projektdurchführung**

Das Projektteam bestand aus drei Konsortialpartnern, dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der Technischen Universität Braunschweig (TUBS), dem Institut für Fluidynamik und Schiffstheorie (FDS) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) und der WK Consultants GmbH (WKC).

Das LWI bringt Erfahrungen aus bereits durchgeführten Feld- und Modelluntersuchungen mit und stellte mit seiner Versuchshalle die benötigte Infrastruktur für die experimentellen Untersuchungen bereit. Zusätzlich besteht ein kontinuierlicher Kontakt zur Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), sodass diese als korrespondierender Partner, insbesondere für das Thema Propulsion, gewonnen werden konnte.

Das FDS ergänzt das Projektteam mit fundiertem Wissen über Antriebssysteme und deren numerischer Simulation sowie mit wertvollen Kontakten zu den Herstellern dieser Systeme.

Die WK Consultants GmbH deckt in der WK Unternehmensgruppe Teile des Geschäftsbereiches des Wasser- und Hafengebbaus ab. Fragestellungen, wie die aus dem Forschungsvorhaben, sind somit ein Bestandteil der täglichen Planungsaufgaben. Zudem besteht durch einige positive Projektabschlüsse ein guter Kontakt und ein verzweigtes Netzwerk in die Hafengebwirtschaft Norddeutschlands.

Die WKC verfügt außerdem über enge Verbindungen zum Lübecker Hafen, die sich aus früheren Projektkooperationen ergeben haben. Somit dient auch die Lübecker Port Authority (LPA) als korrespondierender Partner und stellt die Hafeninfrastuktur zur Umsetzung der Feldmessungen sowie zur Dokumentation von An- und Ablegemanöver.

Diese enge Zusammenarbeit der verschiedenen Partner schafft optimale Voraussetzungen für eine erfolgreiche Projektdurchführung.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Forschungsprojekt „Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen“ (kurz: Propellerstrahl) wurde nach erfolgreicher Bewilligung im Dezember 2021 aufgenommen. Die ursprüngliche Projektlaufzeit war mit drei Jahren angesetzt und sah ein planmäßiges Ende zum 30.11.2024 vor. Aufgrund mehrerer Verzögerungen sowie einzelner Abweichungen im Arbeitsfortschritt wurde im September 2024 eine kostenneutrale Verlängerung bis zum 31.05.2025 beantragt. Dieser Antrag wurde im Oktober 2024 genehmigt.

Die Bearbeitung des Vorhabens erfolgte auf Grundlage der im Antrag definierten und in der Vorhabenbeschreibung beschriebenen Arbeitspakete (AP). Ihre inhaltlichen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen sind in Abbildung 1 dargestellt. Zur Erreichung der Projektziele war eine teilweise parallele Bearbeitung der Arbeitspakete erforderlich. Dies wurde durch einen kontinuierlichen und engen Austausch zwischen den Projektpartnern ermöglicht.

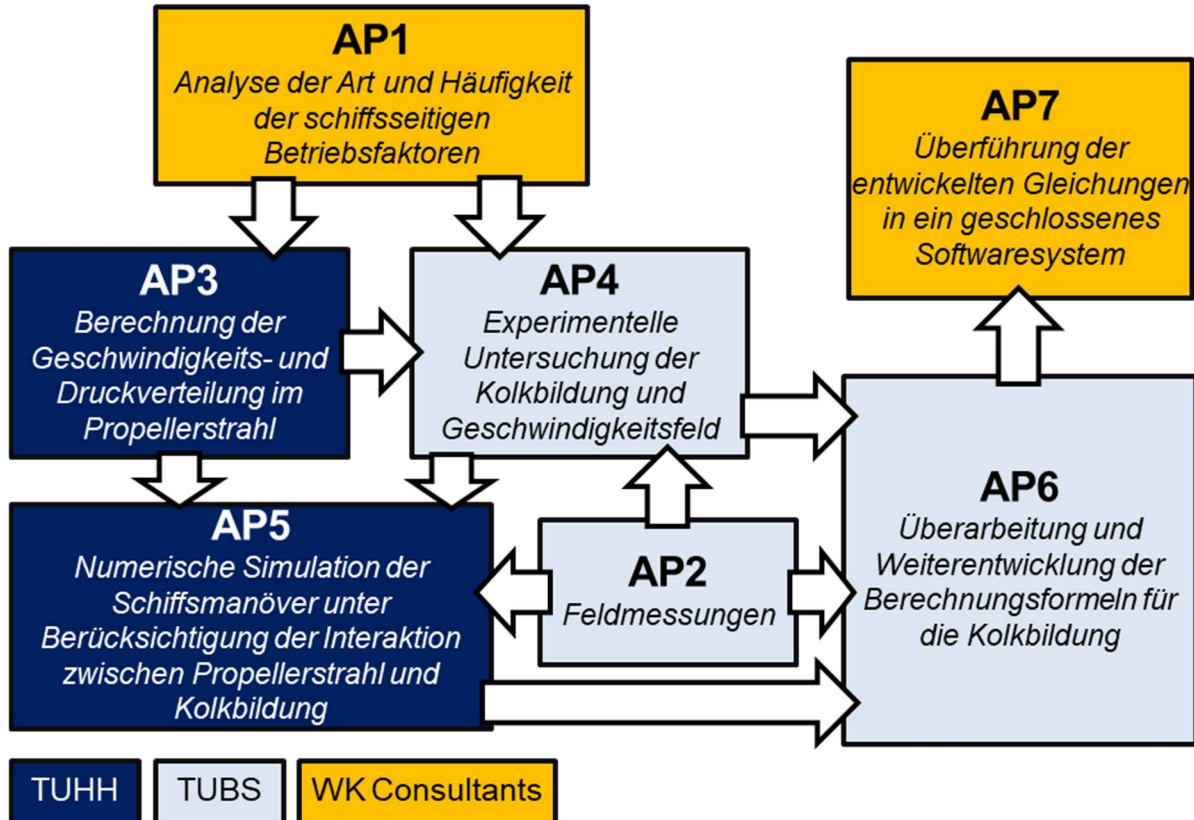


Abbildung 1: Abhängigkeiten der Arbeitspakete.

Die Aufgabenbeschreibung der einzelnen Arbeitspakete ist in der folgenden Tabelle stichpunktartig zusammengefasst (Tabelle 1).

**Tabelle 1: Aufgabenbeschreibung der Hauptaufgaben der einzelnen APs.**

Arbeitspaket	Aufgabenbeschreibung
AP 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswertung vorhandener Peilungen</li> <li>• Erstellung einer Schiffsdatenbank und fortlaufende Ergänzung</li> <li>• Definition von Standardmanövern</li> </ul>
AP 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konzeptionierung und Instrumentierung der Feldmessungen</li> <li>• Durchführung der Feldmessungen</li> <li>• Aufbereitung und Analyse der Messergebnisse</li> </ul>
AP 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modellierung und Simulation verschiedener Schiffstypen</li> <li>• Numerische Integration physikalischer Randbedingungen und Manöver</li> <li>• Propellerstrahlanalyse</li> </ul>
AP 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planung und Aufbau der Modellversuche</li> <li>• Definition und Festlegung der Randbedingungen</li> <li>• Durchführung der Modellversuche und Analyse der Ergebnisse</li> </ul>
AP 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementierung der Bodenverformung</li> <li>• Entwicklung der Interaktion zwischen Wirbel und Bauteil</li> <li>• Modellierung der Strahlausbreitung</li> <li>• Validierung anhand der Ergebnisse aus AP 2 und AP 4</li> </ul>
AP 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Weiterentwicklung der Kolkformeln</li> <li>• Validierung der Formeln</li> </ul>
AP 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyse bestehender Software der BAW und Integration neuer Formeln</li> <li>• Entwicklung eines Berechnungstool</li> </ul>

#### **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand auf dem das Projekt aufbaute**

Es ist bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts bekannt, dass Hafenanlagen und Schifffahrtsstraßen durch propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen an der Gewässer- bzw. Hafensohle erheblich beeinträchtigt werden können (Spitzer et al., 2012a, b). Entscheidend für die Ausbildung und Wirkung propellerstrahlinduzierter Strömungen sind neben dem Schiffs- und Antriebstyp insbesondere die Antriebsleistung, die Strahlausbreitung unter verschiedenen geometrischen und hydrodynamischen Randbedingungen (z. B. Flottwassertiefe, Tiefgang, Strahlumlenkung an Kaimauern, Turbulenz) sowie die Eigenschaften der Gewässersohle. In Hafengebieten ist insbesondere zu beachten, dass der hochturbulente Propellerstrahl durch die Interaktion mit der Kaimauer allseitig umgelenkt wird und anschließend als Wandstrahl entlang der Kaimauer verläuft. Trifft der nach unten gerichtete Wandstrahl im Fußbereich der Kaimauer die Hafenbeckensohle, kann er dort zu Erosionserscheinungen, d.h. zur Kolkbildung führen.

Zu dieser Thematik wurden bis heute zahlreiche empirische und semi-empirische Beziehungen entwickelt, um die Hydrodynamik des Geschwindigkeitsfelds von Propellerstrahlen zu beschreiben, Kolkiefen und Kolkgeometrien abzuschätzen und Schutzmaßnahmen für Hafen- und Gewässersohlen zu dimensionieren. Streng genommen gelten diese Beziehungen jedoch nur für die

Randbedingungen, unter denen sie ursprünglich abgeleitet wurden (z. B. BAW 2011; Lam et al. 2011; Hong et al. 2013; PIANC 2015; Wei et al. 2020). Bis heute existieren allerdings nur sehr wenige Prototypdaten zur Kolkentwicklung und zur Belastung von Kaimauern durch Propellerstrahlen. Zur Ableitung der Ansätze dienten überwiegend Daten aus gegenständlichen Modelluntersuchungen, die unter Berücksichtigung der wichtigsten Skalierungsgesetze für die Hydraulik des Propellerstrahls und des Feststofftransports durchgeführt wurden. Aufgrund messtechnischer Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der hydrodynamischen Strahleigenschaften während des Kolkvorgangs basieren die Ansätze jedoch meist auf einer stark vereinfachten Beschreibung des propellerstrahlinduzierten Geschwindigkeitsfeldes. Diese orientiert sich an Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten von Propellerstrahlen in einem unbegrenzten Fluidvolumen und ist nur indirekt mit dem hydrodynamischen System in der Propellerebene verknüpft (vgl. Hamill et al., 2004; Lam et al., 2011). Erwähnenswert ist außerdem, dass viele Modelluntersuchungen mit freien Propellern, d. h. ohne Schiffskörper, durchgeführt wurden. Der Einfluss der Schiffsgeometrie auf Strahlausbreitung und Kolkbildung bleibt daher bis heute größtenteils unberücksichtigt oder wird lediglich über empirische Koeffizienten berücksichtigt, die in unabhängigen Untersuchungen ermittelt wurden. Tatsächlich existieren nur wenige Untersuchungen, in denen der Einfluss der Schiffsform oder von Kaianlagen gezielt berücksichtigt wurde (z. B. Römisch 1993; Schmidt 1998; Stewart et al. 1991; LWI 2006, 2019; Wei et al. 2020). Ein allgemeingültiger Ansatz zur Einbeziehung dieser Effekte liegt bisher nicht vor.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Dynamik des Kolkvorgangs, d. h. die zeitliche Entwicklung der Kolkgeometrie. Da die maximal zu erwartende Kolkentiefe einen wichtigen Bemessungsparameter für Bauwerke in Hafenanlagen oder für Kanäle darstellt (z. B. BAW 2011), konzentrierten sich die meisten bisherigen Studien auf die Bestimmung der maximalen Kolkentiefe infolge eines Propellerstrahlengriffs der Gewässer- und Hafensohle, während nur wenige Betrachtungen zur Kolkbreite und Kolkgeometrie vorliegen. Zudem kann bislang nicht zuverlässig bestimmt werden, zu welchem Zeitpunkt welche maximale Kolkentiefe vorliegt. Für die Quantifizierung der Kolkentiefe in Abhängigkeit von der Belastungszeit der Gewässersohle, ein Faktor, der insbesondere bei Mänöversituationen in Häfen eine entscheidende Rolle spielt, liegen daher nur unzureichende Ansätze vor.

Neben der Durchführung von gegenständlichen Modelluntersuchungen ist inzwischen auch die Anwendung der numerischen Strömungsmechanik (CFD) zur Untersuchung der durch Propellerstrahlen verursachten Kolkbildung von wesentlicher Bedeutung für die Bewertung potenzieller Erosionsrisiken. In den letzten Jahrzehnten haben sich CFD-Methoden, insbesondere solche, die auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen basieren, erheblich weiterentwickelt (Abdel-Maksoud und Heinke, 1999). Diese Fortschritte ermöglichen eine detaillierte Analyse von Geschwindigkeitsfeldern, Druckverteilungen und Turbulenzstrukturen in lokal begrenzten hydrodynamischen Bereichen. Mithilfe moderner CFD-Verfahren lassen sich tiefgehende Einblicke in den Einfluss von Propellerstrahlen auf die Entstehung und Entwicklung von Kolken gewinnen (Ferraro et al., 2021; 2023). Diese Erkenntnisse sind entscheidend, um die maßgeblichen Parameter zu identifizieren, die die Form der Kolkprofile sowie die maximale Kolkentiefe bestimmen.

Vor diesem Hintergrund zielten die Arbeiten des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau (LWI) im Rahmen des Verbundforschungsprojekts darauf ab, die Auswirkungen unterschiedlicher

Schiffstypen, Propellerleistungen und Gewässersohlenbedingungen auf die Entstehung von Kolken an Kaimauern zu untersuchen. Aufbauend auf diesen Ergebnissen sollten die Forschungsergebnisse praxisnah auf die Bewertung und Weiterentwicklung von Berechnungsformeln zur Kolkbildung übertragen werden. Dabei lag der Fokus auf der Weiterentwicklung einer am LWI im Rahmen früherer Untersuchungen abgeleiteten Formel zur Beschreibung des zeitlichen Verlaufs der Kolkbildung, die ursprünglich für ein Binnenschiff und ohne den Einfluss einer Kaimauer entwickelt wurde.

Die Arbeiten des Instituts für Fluidodynamik und Schiffstheorie (FDS) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) verfolgten das Ziel, die komplexen hydrodynamischen Wechselwirkungen von Schiffsantrieben unter realistischen Hafenbedingungen numerisch zu analysieren und quantitativ zu erfassen. Dazu wurden unter Einsatz modernster CFD-Methoden auf Basis der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) maßgebliche Einflussgrößen wie Schiffstyp, Propulsorkonfiguration, Betriebszustand sowie die Geometrie der Hafeninfrasturktur detailliert modelliert, um das Verständnis der Eigenschaften des Propellerstrahls zu vertiefen.

### **Angaben zu bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechten**

Für die Umsetzung der Feldmessungen wurde auf die Erfahrungen aus einer Messkampagne in Spanien zurückgegriffen, indem eine ähnliche Konstruktion für die Installation der Messinstrumente an der Kaiwand verwendet wurde. Außerdem hat durch das LWI bzgl. der Umsetzung der experimentellen Versuche ein Austausch mit Kollegen der niederländischen Forschungsgruppe CROW stattgefunden (vgl. Abschnitt 1.5). Darüber hinaus wurden keine Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte Dritter in Anspruch genommen.

Für die Entwicklung eines Berechnungstools im Zuge des AP 7 wurde ein plattformunabhängiges Webtool konzipiert und in HTML5, Javascript und CSS realisiert wurde.

### **Fachliteratur**

Im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojektes wurde insbesondere die folgende Fachliteratur verwendet:

Abdel-Maksoud, M. & Heinke, H. J. (1999). *Investigation of viscous flow around modern propulsion systems*, Proceedings of CFD.

BAW (2011) (Hg.). *Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB) - Ausgabe 2010* (Merkblatt). Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.

EAU (2020). *Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“*. Ernst & Sohn. Berlin.

Ferraro, D., Lauria, A., Penna, N. & Gaudio, R. (2021). Temporal development of unconfined propeller scour in waterways, *Physics of Fluids*, 33(9).

Ferraro, D., Aristodemo, F., Lauria, A., Lazzaro, E., Pasquali, D., & Di Risio, M. (2023). Effect of wave motion on the scouring caused by a marine propeller jet: An experimental and numerical study', *Ocean Engineering*, 872.

Hamill, G.A., McGarvey, J.A, Hughes, D.A.B. (2004). Determination of the efflux velocity from a ship's propeller. *Water and Maritime Engineering*, 157(2), 83-91.

Hong, J.H., Chiew, Y.M.; Cheng, N.S. (2013). Scour caused by a propeller jet. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(9), 1003-1012.

Lam, W.H., Hamill, G.A., Song, Y.C., Robinson, D.J., Raghunathan, S. (2011). A review of the equations used to predict the velocity distribution within a ship's propeller jet. *Ocean Engineering*, 38(1), 1-10.

LWI (2006). *Literaturstudie zum Thema Kolkbildung durch Schraubstrahlen* (Bericht 916, unveröffentlicht). Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig.

LWI (2019). *Scour induced by inland ship propellers* (Bericht 1098, unveröffentlicht). Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig.

PIANC (2015). *Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships*. PIANC Report N° 180, ISBN 978-2-87223-223-9.

Römisch, K. (1993). Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen in Häfen. *HANSA*, 130(8), 62-68.

Schmidt, E. (1998). Ausbreitungsverhalten und Erosionswirkung eines Bugpropellers vor einer Kaiwand. *Mitteilungen des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau* 143. TU Braunschweig.

Spitzer, D., Söhngen, B., Aberle, J. & Geisenhainer, P. (2012a). Belastung der Gewässersohle durch Propellerstrahlen - Teil 1: Untersuchungen bis zum Zweiten Weltkrieg. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 5(4), 202-209.

Spitzer, D., Söhngen, B., Aberle, J. & Geisenhainer, P. (2012b). Belastung der Gewässersohle durch Propellerstrahlen - Teil 2: Untersuchungen nach dem Zweiten Weltkrieg. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 5(6), 321-330.

Stewart, D.P., Johnson, H.T. & Hamill G.A. (1991). The influence of quay structures on the scouring action of a ship's propeller wash. *Proceedings of the International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries* (pp. 1110-1125). Mombassa, Kenya.

Wei, M., Chiew, Y.M., Cheng, N.S. (2020). Recent advances in understanding propeller jet flow and its impact on scour. *Physics of Fluids*, 32(10), 101303.

## **1.5 Zusammenarbeit mit Dritten**

Neben den drei Hauptpartnern TUBS, TUHH und WKC wirkten die BAW und die LPA als korrespondierende Partner bei der Projektarbeit mit. Die BAW brachte ihr Fachwissen zu Bemessungsgrundlagen und Software für Propulsionsströmungen ein, während die LPA die erforderliche Hafeninfrastruktur für Feldmessungen bereitstellte und den Kontakt zur Reederei Finnlines herstellte, die zentrale schiffs- und antriebsspezifische Daten lieferte. Ergänzend unterstützten externe Experten wie Prof. Ziegler (Hochschule Flensburg) und Dr. Waldmann (damals Technische

Hochschule Lübeck) mit numerischen Simulationsdaten und Fachwissen zur Unterwasserschallausbreitung. Zudem bestand ein internationaler Austausch mit der niederländischen Forschungsgruppe CROW.

## 2 Projektergebnisse

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung vorgestellt, wobei die Ergebnispräsentation nach den Arbeitspaketen gegliedert ist. Zunächst werden Ergebnisse beschrieben, die einen direkten praxisrelevanten Hintergrund haben. So stand in AP 1 die Analyse der Art und Häufigkeit schiffsseitiger Betriebsfaktoren bei Manövern in Häfen im Vordergrund während in AP 2 sowohl Feldmessungen zur Belastung von Kaimauern und der Gewässersohle bei Ablegemanövern als auch Messungen zum Unterwasserschall durchgeführt wurden.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der gegenständlichen Modelluntersuchungen und der numerischen Untersuchungen in den AP 3 bis 5 lag auf der systematischen Variation zentraler Einflussgrößen wie Wassertiefe, Abstand zur Kaimauer, Rudereinstellung und Sohlentopographie. Für sämtliche Konfigurationen wurden Strömungsfelder, Druckverteilungen und Schubspannungen erfasst und ausgewertet, um die räumliche und zeitliche Entwicklung der Kolkiefen, die lokale Erosionsintensität und die Rückwirkungen auf das Schiffsantriebssystem unter variierenden Randbedingungen quantitativ zu erfassen.

Die Untersuchungen befassten sich mit insgesamt vier repräsentativen Schiffstypen: einem Binnenschiff, einem RoRo-Schiff, einem Containerschiff und einem Passagierschiff. Während das Containerschiff nur für die gegenständlichen Modelluntersuchungen (AP 4) am LWI zum Einsatz kam, wurde das Passagierschiff ausschließlich für die numerischen Untersuchungen (AP 3 und AP 5) eingesetzt. Da jeder Schiffstyp unterschiedliche Antriebskonfigurationen und Betriebsbedingungen aufweist, unterscheiden sich auch die Eigenschaften des Propellerstrahls und die daraus resultierende Wirkung auf die Hafensohle. Entsprechend wurden für die verschiedenen Schiffs- und Antriebskonfigurationen neue empirische Berechnungsformeln für die Vorhersage der Entwicklung der maximalen Kolkiefe in Abhängigkeit der Einwirkungszeit abgeleitet.

Mithilfe fortschrittlicher RANS-Verfahren konnten realitätsnahe Betriebsbedingungen verschiedener Schiffstypen, Antriebskonfigurationen sowie geometrischer Randbedingungen abgebildet werden. In die Modellierung wurden konventionelle Hauptantriebssysteme, Querstrahlruder und Pod-Antriebe einbezogen. Dabei wurden die komplexen Wechselwirkungen zwischen Propellerstrahl, Hafensohle, Kaimauer und Rudern berücksichtigt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Ausbildung und Ausdehnung der Kolke in direktem Zusammenhang mit der Ausbreitung des Propellerstrahls, den entstehenden Turbulenzen sowie den daraus resultierenden Druck- und Schubspannungsverteilungen an der Hafensohle stehen.

Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine fundierte Grundlage für die Optimierung von Infrastrukturmaßnahmen im Hafenbereich, die Auslegung von Manövrierstrategien und die Weiterentwicklung von Prognosemodellen zur Beschreibung propellerinduzierter Kolkprozesse.

### 2.1 Arbeitspaket 1: Analyse der Betriebsfaktoren

Zu Beginn der Bearbeitung des AP 1 wurden Peildaten aus den Jahren 2013 bis 2022 im Hafen Lübeck Travemünde ausgewertet, die von der Hafenbehörde in Lübeck zur Verfügung gestellt wurden. Dies zeigte deutlich, dass sowohl Bugstrahlruder als auch Hauptpropeller relevante Erosionsprozesse verursachen. Besonders in Bereichen, in denen das Bugstrahlruder (Querstrahler)

zum Einsatz kommt, konnten Kolke von bis zu zwei Metern Tiefe nachgewiesen werden, die sich über mehrere Jahre hinweg ausgebildet haben. Die Differenzanalyse der Peilungen bestätigte zudem eine fortschreitende Abtragung der Hafensohle, die insbesondere im direkten Einflussbereich der Querstrahler auftritt. Diese Befunde unterstreichen den erheblichen Einfluss der Antriebssysteme auf die Standsicherheit und Dauerhaftigkeit der Kaianlagen. Eine begleitende Umfrage bei Hafenbetreibern und -behörden verdeutlichte zusätzlich die Relevanz der Problematik. Ein Großteil der Befragten berichtete bereits von Kolken im Bereich von Anlegestrukturen und viele erwarten eine Zunahme der Erosionserscheinungen durch den Einsatz größerer und leistungsstärkerer Schiffe. Bereits in 45 % der befragten Häfen kommen Sohlensicherungssysteme zum Einsatz, was die praktische Bedeutung der Fragestellung unterstreicht.

Weiterhin wurde eine systematische Analyse der Betriebsfaktoren durchgeführt, die das Strömungsverhalten und die Kolkbildung in Hafenbereichen beeinflusst. Das Ziel bestand darin, relevante Betriebsdaten von Schiffen zu sammeln und zu analysieren, um die wichtigsten Parameter für die nachfolgenden numerischen und experimentellen Untersuchungen zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Datensätze aus dem Automatischen Identifikationssystem (AIS) und dem Reisedatenaufzeichner (VDR) ausgewertet. Diese Daten enthalten Informationen über Schiffsbewegungen, Geschwindigkeiten, Positionen, Ruderwinkel, Pod-Azimutwinkel, Propellerdrehzahlen und die Einstellung der Propellersteigung.

Parallel dazu wurde eine umfangreiche Schiffsdatenbank aufgebaut, die rund 2.500 Datensätze verschiedenster Schiffstypen umfasst. Die Datenbank enthält die für die Kolkberechnung wesentlichen schiffs- und antriebsspezifischen Informationen. Trotz der großen Datenmenge bestehen insbesondere bei propellerspezifischen Informationen weiterhin Lücken, da solche Daten häufig vertraulich behandelt werden. Die Datenbank bildet dennoch eine wichtige Grundlage für die späteren Berechnungsmodule und wurde so gestaltet, dass sie im Rahmen des AP 7 problemlos in das webbasierte Berechnungstool integriert werden kann.

Ein weiterer Schwerpunkt des Arbeitspakets lag auf der Betrachtung typischer Manövrierphasen wie das An- und Ablegen, da die hydrodynamischen Belastungen in diesen Phasen am höchsten sind und die Gefahr der Kolkbildung besonders groß ist. Daher erfolgte eine Protokollierung von An- und Ablegemanövern am Skandinavienkai in Lübeck Travemünde. Durch eine umfassende Dokumentation unter Einsatz von Videoaufnahmen, Skizzen, AIS-Daten und zeitabhängigen Protokollen konnte das tatsächliche Betriebsverhalten der dort verkehrenden RoRo-Schiffe in Zusammenarbeit aller Projektpartner analysiert werden. Die Auswertung zeigte, dass die Schiffsmanöver zwar grundsätzlichen Mustern folgen, ihr tatsächlicher Ablauf jedoch stark von lokalen Randbedingungen und der Erfahrung des Schiffsführers beeinflusst wird. Der Einsatz der Hauptpropeller und Querstrahler erfolgte dabei in variabler Intensität und Dauer. Dies zeigen auch die im Zuge der Feldmessungen des AP 2 gewonnenen AIS-Daten. Abbildung 2 zeigt den Verlauf von drei Ablegemanövern am Anleger 4 des Skandinavienkai in Lübeck Travemünde, die auf Basis von AIS-Daten rekonstruiert wurden, wobei die aufgezeichneten Kursdaten die unterschiedlichen Manöverfahrten bestätigen. Ein Vergleich der protokollierten Schiffsmanöver mit den Standardsituationen des BAW-Merkblattes GBB zeigte, dass diese nur bedingt auf die komplexen Manövrierbewegungen großer Seeschiffe übertragbar sind. Ergänzend wurden für das

Bemessungsschiff die Daten des Voyage Data Recorders (VDR) ausgelesen, die für die Validierung der im Projekt durchgeführten Feldmessungen von besonderer Bedeutung sind.

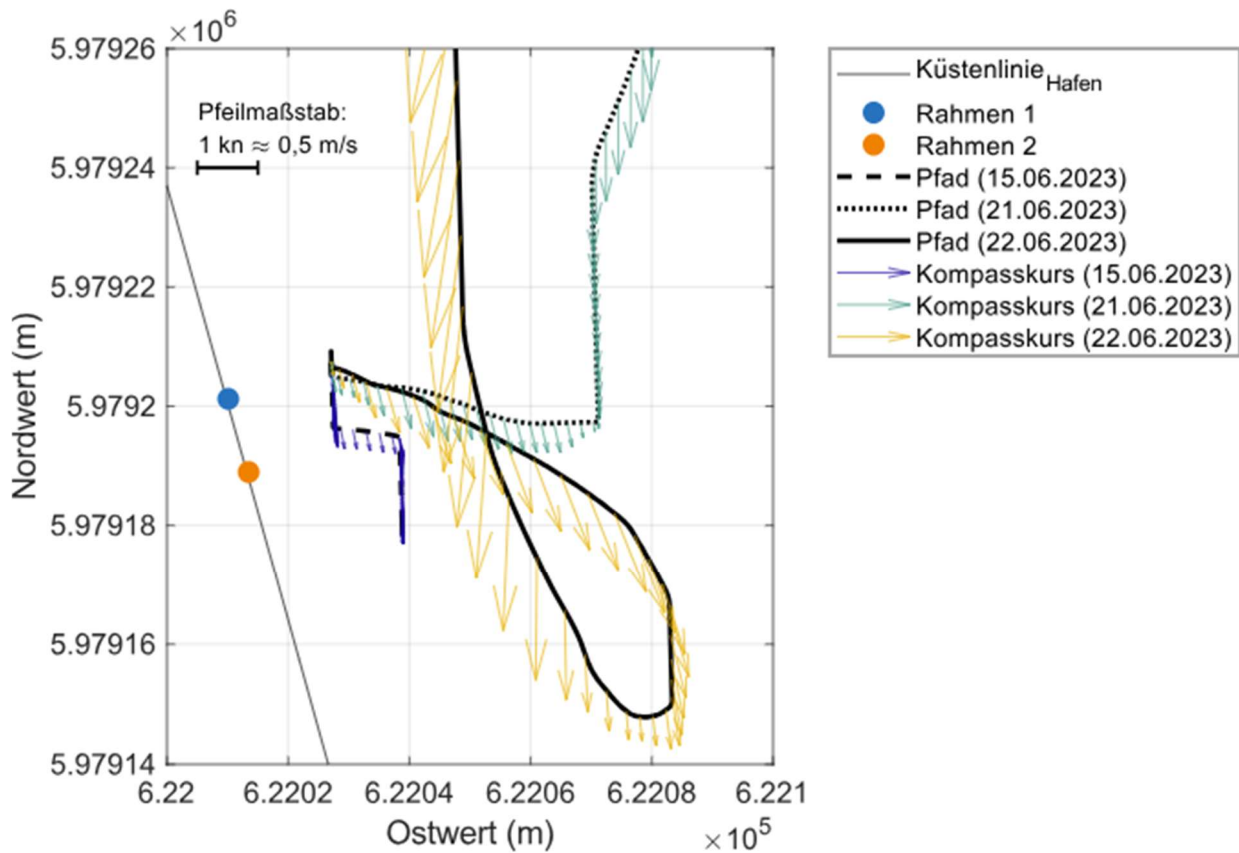


Abbildung 2: Ablegemanöver am Anleger 4 des Skandinavienkais.

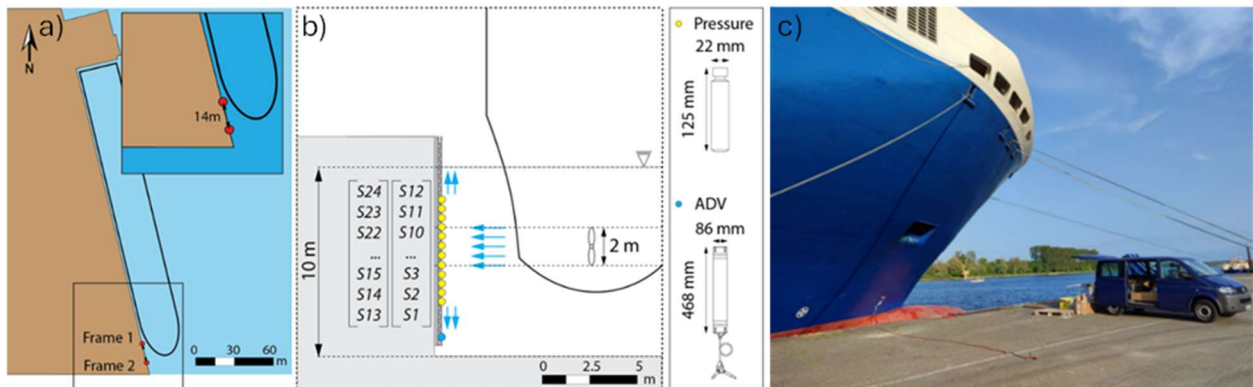
## 2.2 Arbeitspaket 2: Feldmessungen

Zur Erfassung der Druckbelastung auf eine Kaianlage und der Geschwindigkeiten in der Nähe der Gewässersohle wurden Feldmessungen am Skandinavienkai in Lübeck Travemünde durchgeführt, an dem RoRo-Fähren der Reederei Finnlines verkehren. Diese Messungen wurden durch bathymetrische und Unterwasserschallmessungen ergänzt. Ziel war es, detaillierte Datensätze zur Validierung der experimentellen und numerischen Untersuchungen bereitzustellen (AP 3 bis 5). Im Folgenden werden die Instrumentierung des Anlegers, die durchgeführten Messungen und exemplarische Ergebnisse kurz beschrieben. Details zu den verwendeten Instrumenten, dem Messaufbau und den Ergebnissen sind dem Schlussbericht des LWI zu entnehmen (LWI 2025).

Die Detailplanung des Versuchsaufbaus für die Geschwindigkeits- und Druckmessungen erfolgte auf Grundlage von AIS-Daten der Zielschiffe sowie visueller Beobachtungen zu Beginn des Projekts. Zur Berücksichtigung aller sicherheitsrelevanten Aspekte wurde dabei eng mit der Hafenbehörde und dem Verbundpartner WK Consultants GmbH zusammengearbeitet. Die Messgeräte wurden auf zwei speziell für das Projekt konstruierten Schienenrahmen montiert, die eine flexible Positionierung und Wartung der Instrumente ermöglichten. Diese wurden im Bereich der Bugstrahlruder in einem Abstand von 14 m installiert. Jeder Messrahmen wurde mit zwölf

Drucksensoren und einem 3D-Geschwindigkeitsmessgerät (ADV-Vector) ausgestattet (s. Abbildung 3). Der Wasserstand wurde von der Luftseite über Ultraschallsensoren erfasst.

Bathymetrische Messungen erfolgten mit der *Bottom-Track-Funktion* eines an einem Feldboot montierten Ultraschall-Doppler-Profil-Strömungsmessers (Acoustic Doppler Current Profiler; im Folgenden ADCP genannt). Diese Messungen erfolgten in der Nähe der Spundwand an Anleger 4 in Zeiten ohne Schiffsverkehr. Unterwasserschallmessungen wurden mit zwei 96 kHz-Hydrophonen durchgeführt.



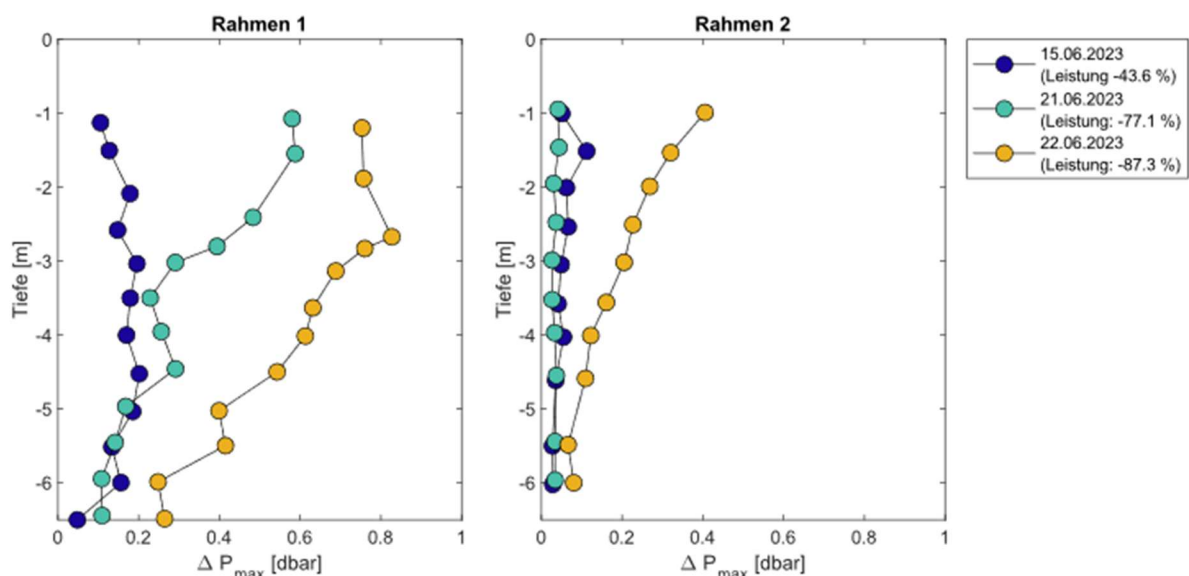
**Abbildung 3: Skizze der Position der beiden Messrahmen an Anleger 4; b) Skizze der Position der am Messrahmen montierten Messgeräten für Druck- (Pressure) und Strömungsgeschwindigkeitsmessungen (ADV-Vector); Die Drucksensoren S1-S12 (S13-S24) sind an Messrahmen 1 (2) Messrahmen befestigt; c) Fotografie vor einer Messung (Fotos und Grafiken: LWI).**

Die Messungen wurden im Juni 2023 an 10 Tagen während insgesamt 17 An- und Ablegemanövern der RoRo-Zielschiffe M/V Finnbreeze und M/V Finntide durchgeführt. Beide Schiffe sind mit einem Zweischrauber am Heck (Durchmesser  $D_p = 5$  m) und zwei Bugstrahlrudern ( $D_p = 2$  m) ausgerüstet. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die durchgeführten Druck- und Geschwindigkeitsmessungen, Bathymetriemessungen und Unterwasserschallmessungen. Zudem wurden die AIS-Daten der Schiffe eingeholt und für einige Manöver VDR-Daten (s. auch AP 1).

Tag	Manöver	Schiff	VDR-Daten	Druckmessungen	Geschwindigkeitsmessungen	Bathymetrie	Unterwasserschall
03.06.2023	Anlegemanöver	Finntide					
07.06.2023	Ablegemanöver	Finnbreeze					
08.06.2023	Ablegemanöver	Finntide					
10.06.2023	Ablegemanöver	Finntide					
11.06.2023	Ablegemanöver	Finnbreeze					
13.06.2023							
14.06.2023	Anlegemanöver	Finnbreeze					
14.06.2023	Ablegemanöver	Finnbreeze					
15.06.2023	Anlegemanöver	Finntide					
15.06.2023	Ablegemanöver	Finntide					
16.06.2023							
17.06.2023	Anlegemanöver	Finntide					
17.06.2023	Ablegemanöver	Finntide					
18.06.2023	Anlegemanöver	Finnbreeze					
18.06.2023	Ablegemanöver	Finnbreeze					
21.06.2023	Anlegemanöver	Finnbreeze					
21.06.2023	Ablegemanöver	Finnbreeze					
22.06.2023	Anlegemanöver	Finntide					
22.06.2023	Ablegemanöver	Finntide					

**Abbildung 4: Zeitlicher Ablauf und Übersicht über die durchgeführten Feldmessungen im Juni 2023 für die Zielschiffe Finntide und Finnbreeze.**

Abbildung 5 visualisiert die maximale Änderung des gemessenen Drucks über die Tiefe exemplarisch für drei Manöver (15., 16. und 22.06.2023). Als Referenzdruck wurde der Mittelwert der jeweiligen Druckmessungen ohne Schiffsbewegung verwendet. Die Ergebnisse für Rahmen 1, d.h. direkt gegenüber dem Bugstrahlruder, verdeutlichen, dass eine höhere Propellerleistung zu stärkeren Druckänderungen infolge des gestiegenen dynamischen Drucks führt. Dies ist insbesondere bis zur Höhe der Propellerdrehachsen zu beobachten. Am 22.06.2023 befanden sich die Drehachsen in Wassertiefen von 2,64 m (Bugstrahler 1) bzw. 3,8 m (Bugstrahler 2). Entsprechend ist bis etwa 4,5 m Tiefe ein stärkerer Einfluss auf die Druckänderung zu beobachten, während in tieferen Regionen der Druck geringer ist. Ein ähnliches Verhalten ist auch bei Rahmen 2 zu beobachten, wobei hier eine insgesamt geringere maximale Druckdifferenz auftritt.



**Abbildung 5: Maximale Druckänderung in Abhängigkeit der Sensorposition von Rahmen 1 (links) und Rahmen 2 (rechts) für drei Ablegemanöver.**

Durch die Positionierung von Messrahmen 1 gegenüber den Bugstrahlrudern konnten an diesem Rahmen maximale vertikale sohlennahe Wandstrahlgeschwindigkeiten bis zu ca. 1,2 m/s gemessen werden (für die größte betragsmäßige Leistung; eine negative Leistung der Bugstrahlruder entspricht einem in Strahl in Richtung der Spundwand). Entsprechend wurden an Rahmen 2 geringere Geschwindigkeiten gemessen, da dieser Rahmen nicht direkt gegenüber dem Bugstrahlruder lag und zusätzlich die Distanz zu den Bugstrahlrudern während der Ablegemanöver größer wurde. Insgesamt waren die Manöver durch eine größere Variabilität aufgrund lokaler und zeitlicher Randbedingungen (z. B. Wassertiefe, Wind und Schiffsverkehr) gekennzeichnet, was die Heterogenität der Druckbelastung erklärt (s. Abbildung 2).

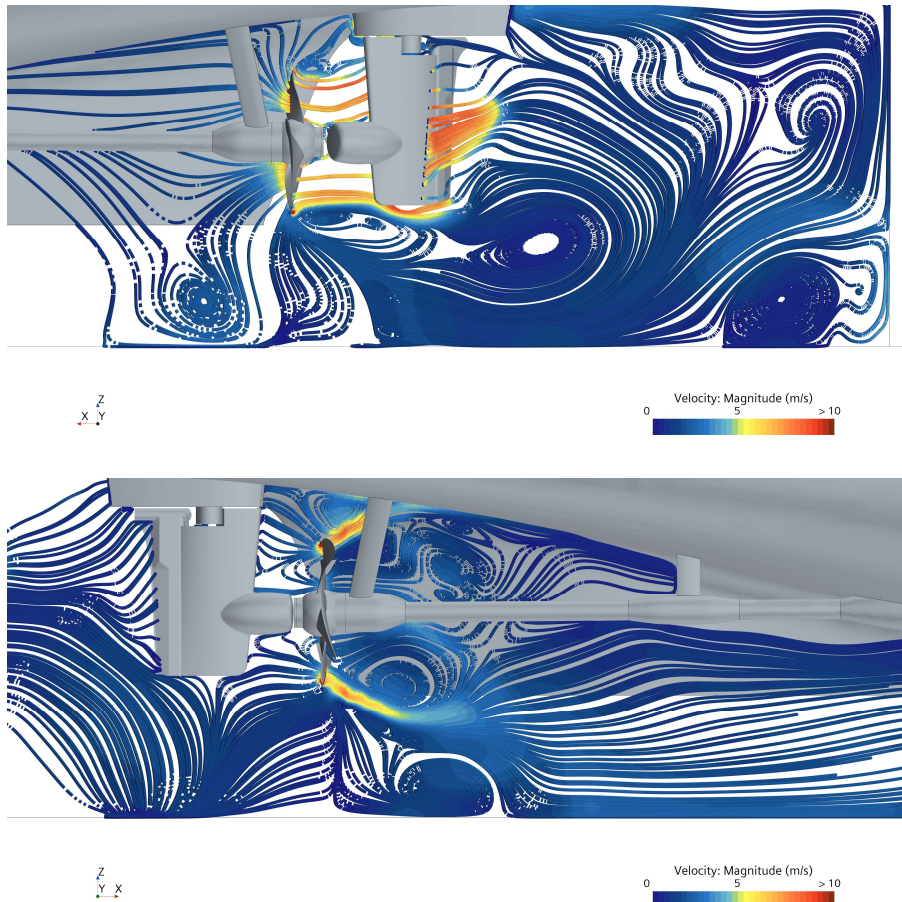
Die Bathymetriemessungen entlang des Anlegers 4 verdeutlichten größere Sohlentiefen in den von den Heckpropellern und Bugstrahlrudern beeinflussten Bereichen, wobei aber keine signifikanten Unterschiede zu den in AP 1 ausgewerteten Peilungen beobachtet wurden. Die Analyse von Sedimentproben der Gewässersohle ergaben einen hohen Anteil kohäsiver Partikel, wodurch eine kurzfristige Veränderung der Sohlentopografie durch die Schiffsmanöver als unwahrscheinlich eingeschätzt werden kann. Die Daten wurden, zusammen mit den Daten der Unterwasserschallmessungen den Partnern zur weiteren Verwendung zur Verfügung gestellt.

### **2.3 Arbeitspaket 3: Geschwindigkeits- und Druckverteilung**

In AP 3 wurden die geometrische Modellierung der untersuchten Schiffe (Binnenschiff, RoRo-Schiff und Passagierschiff) sowie RANS-basierte CFD-Analysen zur Untersuchung der Geschwindigkeits- und Druckverteilung im Propellerstrahl durchgeführt. Ziel war es, die raumzeitliche Entwicklung der Geschwindigkeits- und Druckfelder im Propellerstrahl zu analysieren und die Wechselwirkungen zwischen Propellerstrahl und Hafengebäude zu untersuchen. Kavitationsprozesse wurden mithilfe des eingesetzten RANS-Verfahrens und multiphasiger Strömungsmodelle abgebildet und zur Bestimmung hydroakustischer Signale herangezogen.

Die geometrische Modellierung erfolgte auf Grundlage von CAD-Daten, die aus Linienrissen und technischen Zeichnungen generiert wurden. Zur Diskretisierung des Strömungsgebiets und zur detaillierten Untersuchung der Strömungsstrukturen wurden verschiedene Strategien der Gittererzeugung angewendet. Für die bewegten Komponenten – den Propeller und das Flossenruder – kamen sowohl die Sliding-Mesh- als auch die Overset-Mesh-Methode zum Einsatz. Die numerischen Simulationen umfassten mehrere Betriebszustände, die sich insbesondere durch unterschiedliche Wassertiefen, Abstände zur Kaimauer, Propellerdrehzahlen und Ruderwinkel unterschieden.

Zunächst wurde ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der CFD-Simulationen und den Vorhersagen semi-empirischer Formeln durchgeführt. Die Simulationen zeigen in nahezu allen untersuchten Szenarien höhere Austritts- und Sohlengeschwindigkeiten als die von PIANC 2015 prognostizierten Werte. Dieses Verhalten tritt insbesondere in Bereichen mit komplexen Strömungswechselwirkungen innerhalb des Propellerstrahls deutlich hervor. Die CFD-Simulationen ermöglichen eine detailliertere Erfassung lokaler Turbulenz- und Diffusionsphänomene. Zudem berücksichtigen sie die Einflüsse bewegter Komponenten und den Coandă-Effekt an angrenzenden Begrenzungsflächen (s. Abbildung 6).

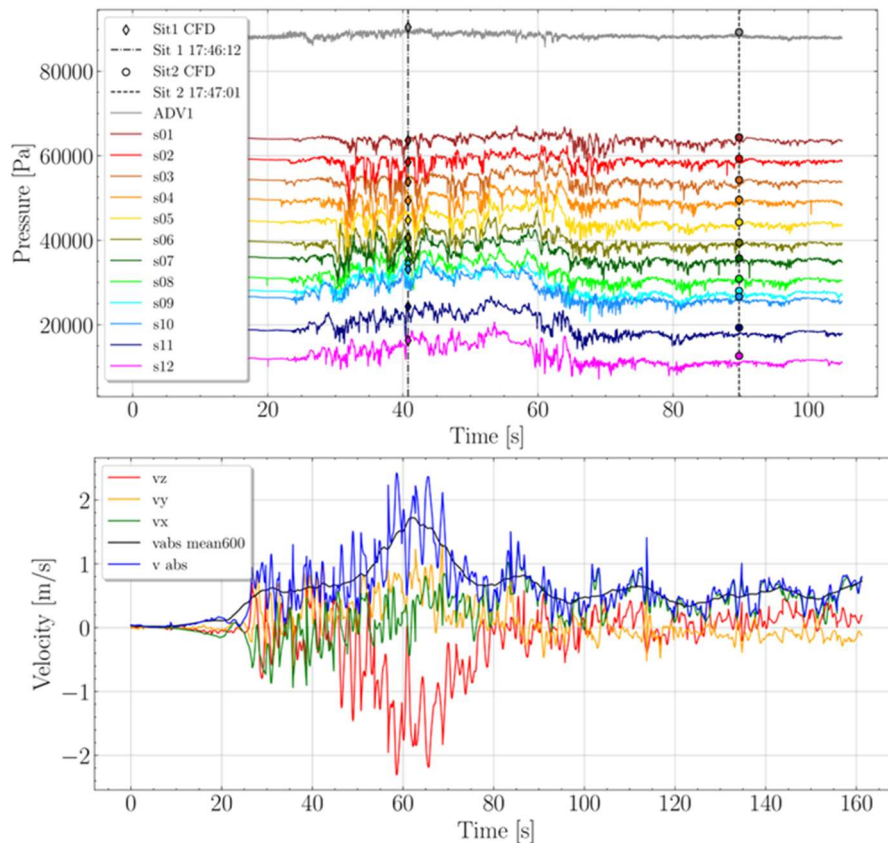


**Abbildung 6: Stromlinien im vertikalen Schnitt durch den Propeller, um die Komplexität der Strömung zu veranschaulichen.**

Die in AP 2 erhobenen Felddaten bezüglich der Drücke an der Kaianlage und der Geschwindigkeiten in Bodennähe erlaubten zusammen mit den in AP 1 erfassten manöverspezifischen Betriebsdaten ein Vergleich mit den Ergebnissen der numerischen Simulationen. Die Auswertung zeigt, dass die zeitlich gemittelten Drücke aus den CFD-Simulationen (s. Abbildung 7 oben) weitgehend mit den experimentellen Beobachtungen übereinstimmen. Die Drucksensoren (s1–s12) waren dabei vertikal vom Boden bis zur Wasseroberfläche angeordnet; ADV1 stellte die niedrigste Messposition dar. Die zeitlich gemittelten CFD-Ergebnisse für die betrachtete Zeit sind in Form von Punkten auf beiden vertikalen Linien eingetragen. Eine wesentliche Abweichung besteht jedoch in der Unterschätzung der Druckamplitude im niedrigen bis mittleren Frequenzbereich der CFD-Ergebnisse. Diese Abweichung ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass sich das Schiff während der Messungen in Bewegung befand, während in den CFD-Simulationen ein stationäres Schiff angenommen wurde. Ein Vergleich der Ergebnisse unter kontrollierten Laborbedingungen könnte diese Unsicherheit verringern, da die CFD-Simulationen dann unter denselben Versuchsbedingungen durchgeführt werden könnten.

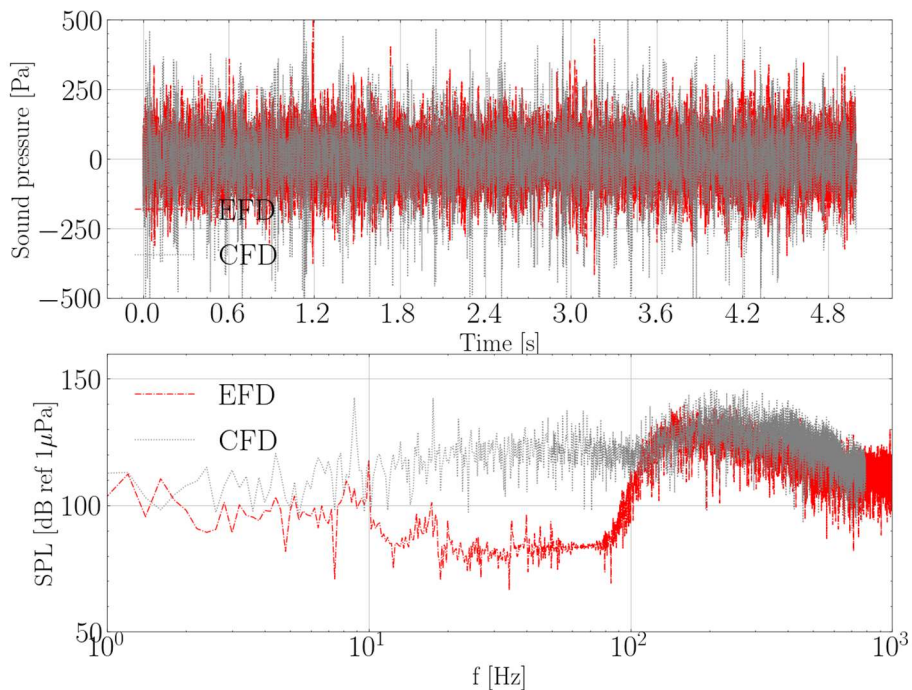
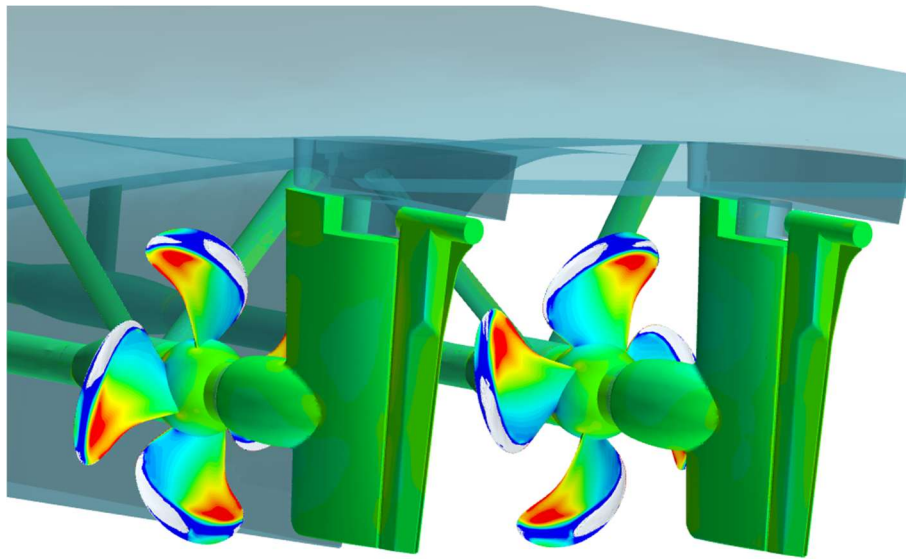
Gemäß der in der Nähe des Bodens gemessenen Geschwindigkeit wurde die CFD-Simulation an derselben Position ausgewertet, in welcher der am Messrahmen 1 installierte ADV-Vector aufzeichnete. Dabei ergibt sich eine berechnete Geschwindigkeit, die dem gemessenen Wert sehr nahekommt und lediglich eine Abweichung von etwa 4 % aufweist. Allerdings überschätzen sowohl der semi-empirische Ansatz nach dem niederländischen Verfahren (PIANC 2015), der den

Abbau der Geschwindigkeit im Propellerstrahl bis zur Sohle empirisch beschreibt, als auch die CFD-Simulation die prognostizierte Sohlengeschwindigkeit deutlich und liefern nahezu das Doppelte der gemessenen resultierenden Geschwindigkeit von 1,66 m/s, wie in Abbildung 7 unten dargestellt. Diese Abweichung entspricht den Erwartungen, da die von ADV1 aufgezeichnete Geschwindigkeit nicht die Sohlengeschwindigkeit repräsentiert.



**Abbildung 7: Oben: Der zeitlich gemittelte Druck in der Simulation an den Betrachtungspunkten, unten: Zeitverlauf der Geschwindigkeit in den verschiedenen Komponenten.**

Darüber hinaus wurde während der Vorbeifahrt des RoRo-Schiffes am Messboot des LWI im Rahmen von AP2 der durch das Schiff induzierte Schalldruck erfasst und anschließend analysiert. In Abbildung 8 ist die an den Propellern auftretende Kavitation hellgrau dargestellt, die Messergebnisse aus den Feldversuchen sind rot wiedergegeben. Zwischen Simulation und Messung besteht im Frequenzbereich oberhalb von 100 Hz sowie unterhalb von 10 Hz eine hohe Übereinstimmung. Im Frequenzbereich unterhalb von 10 Hz zeigen die Simulationsergebnisse jedoch höhere Schalldruckpegel als die im Feld gemessenen Werte. Diese Abweichung kann unter anderem auf die zeitlich gemittelte Turbulenzmodellierung, die Vernachlässigung von Strukturschwingungen oder die Verwendung eines für diesen Frequenzbereich nicht optimierten Hydrofons zurückgeführt werden.



**Abbildung 8:** Der Druck auf den Propellerblättern und die auftretende schallemitierende Kavitation, hier in hellgrau dargestellt. Validierung der CFD-Ergebnisse gemäß Schalldruckpegel (am 22.06.2023 beim Anlege- manöver, siehe Abbildung 2).

## 2.4 Arbeitspaket 4: Experimentelle Untersuchungen

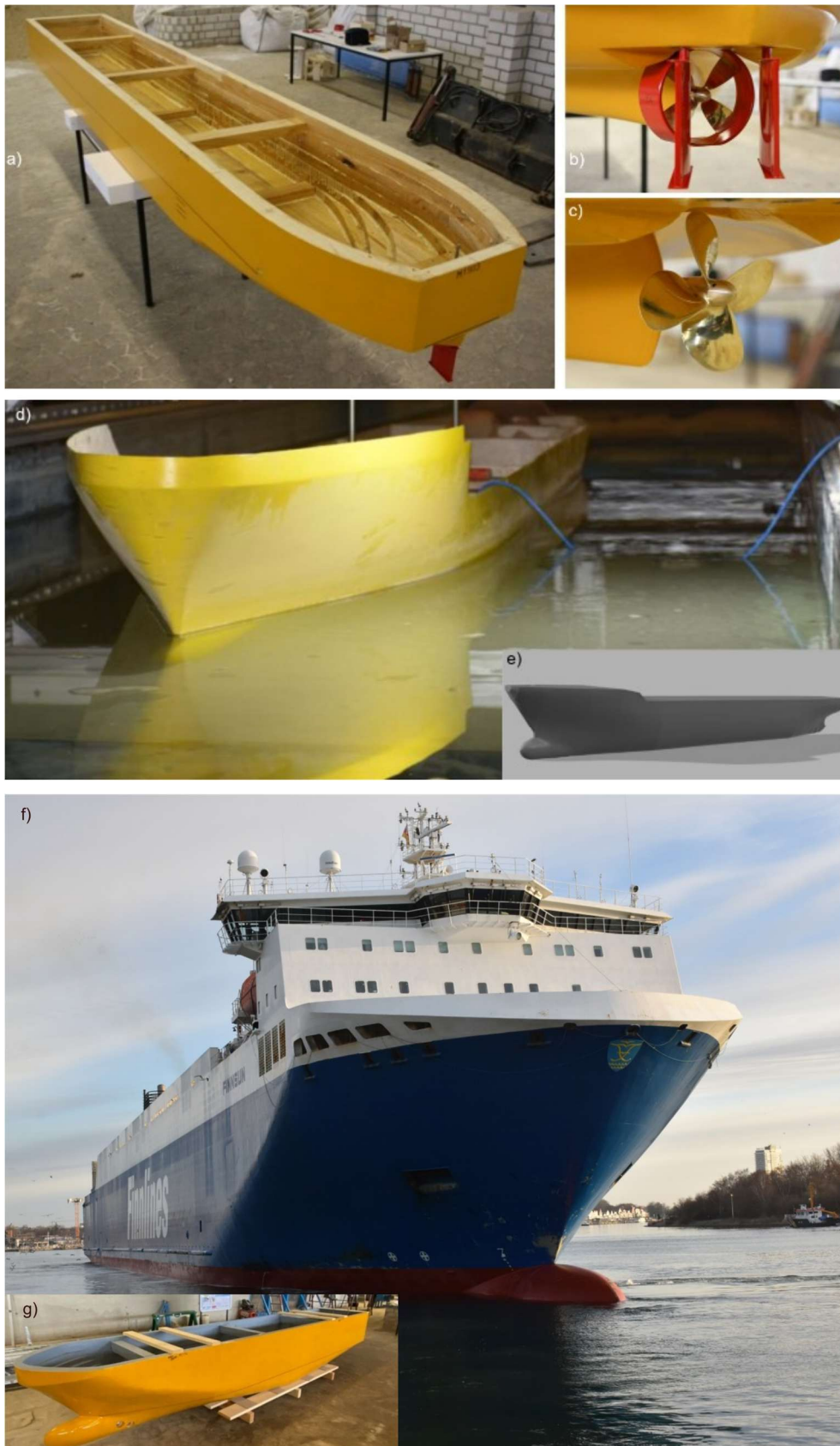
Die Kolkbildung am Fuß einer Kaimauer resultiert im Wesentlichen aus der Wechselwirkung des auf die Sohle treffenden Wandstrahls, den Eigenschaften des Sohlenmaterials sowie den geometrischen Randbedingungen der Kaimauer. Ziel des Arbeitspakets war es daher, die Kolkbildung und -geometrie unter systematischer Variation der Randbedingungskombinationen zu untersuchen (Tabelle 2). Hierzu wurden experimentelle Untersuchungen in der Versuchshalle des LWI durchgeführt. Der Schwerpunkt lag auf der Erfassung der Kolkbildung, wobei aber auch Datensätze zum Geschwindigkeitsfeld des Wandstrahls an einer Kaimauer und eines freien Propellerstrahls, sowie der Druckverteilungen an der Kaimauer erhoben wurden. Diese Datensätze dienten insbesondere der Validierung der numerischen Simulationen (s. AP 3 und 6) und werden in

diesem Kapitel nicht weiter beschrieben. Die durchgeführten Modelluntersuchungen zur Kolkbildung und die daraus abgeleiteten wichtigsten Ergebnisse werden im Folgenden kurz zusammengefasst. Ausführliche Informationen zu den eingesetzten Messverfahren, dem Messaufbau, der experimentellen Vorgehensweise und den Ergebnissen sind dem LWI- Schlussbericht zu entnehmen (LWI 2025).

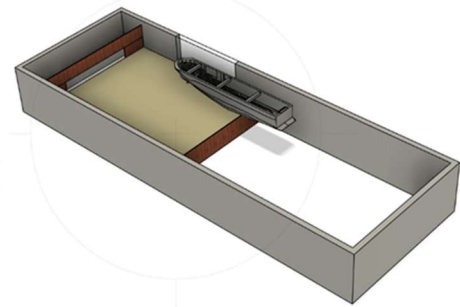
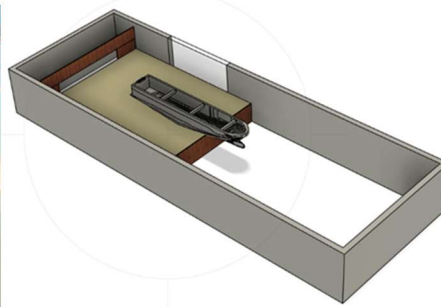
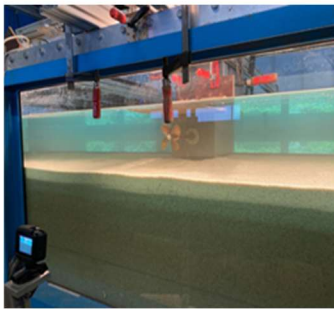
Die durchgeführten Experimente gliederten sich in Versuche, die ausschließlich mit freien Propellern durchgeführt wurden (also ohne Schiffskörper) sowie Versuche mit insgesamt drei verschiedenen Schiffsmo­dellen. Für die Versuche mit freien Propellern kamen ein Wageningen-Propeller (s. Abbildung 9c) und ein Kaplan-Propeller in einer Düse und mit Doppelruder (s. Abbildung 9b) zum Einsatz. Beide Propeller hatten einen Durchmesser von 0,11 m und wurden in Abwei­chung zu den genannten Abbildungen ohne den Schiffskörper verwendet.

Die verwendeten Schiffsmo­delle umfassten ein Hinterschiffsmodell eines Großgütermotorschiffs (GMS) im Maßstab 1:16, das mit dem Kaplan-Propeller ausgestattet war (s. Abbildung 9a für die Schiffshülle), ein Modellcontainerschiff im Maßstab 1:45 mit einem Bugstrahlruder (s. Abbildung 9d und e; Durchmesser des Bugtunnels 0,07 m) sowie ein RoRo-Schiffsmodell im Maßstab 1:30, das den Zielschiffstyp der Feldmessungen repräsentierte (siehe Abbildung 9g). Der Hauptantrieb des RoRo-Modells bestand aus zwei Propellern (Durchmesser jeweils 0,17) mit zugehörigem Ru­der. Das Bugstrahlruder bestand aus zwei Propellern mit einem Durchmesser von jeweils 0,067 m, die einem Tunnel betrieben wurden. Das Modell entsprach nicht in allen Details dem Prototyp, da es im Bereich des konstanten Querschnitts im Mittelschiffbereich entlang der Längsachse ver­kürzt wurde, um es in dem vorgesehenen Versuchsstand einsetzen zu können. Der anhand der Prototypgeometrie auszuschneidende Schiffsabschnitt wurde in Zusammenarbeit mit der TUHH festgelegt.

Die Kolkversuche wurden in zwei verschiedenen Versuchsständen durchgeführt. Die Experi­mente mit den freien Propellern fanden in einer als Tank genutzten 2 m breiten hydraulischen Rinne statt. In dieser Rinne wurden zusätzlich Untersuchungen zur Kolkbildung infolge von Able­gemanövern des Containerschiffs durchgeführt. Die Versuche mit den beiden weiteren Schiffs­modellen fanden in dem so genannten Hafenbecken statt. In beiden Versuchsständen fungierten die Wände als Kaimauer. Davor wurde jeweils ein Sedimentkasten installiert, der mit granularem Material befüllt war. Der genaue Versuchsaufbau wurde an die jeweiligen spezifischen Rand­bedingungen angepasst (s. Abbildung 10).



**Abbildung 9:** a) Fotografie des GMS-Hinterschiffsmodells mit angebautem Zentralruder; b) Ansicht des Kaplan-Propellers in Kortdüse und Doppelruder; c) Ansicht des freischlagenden Wageningen-Propellers; d) Ansicht des Containerschiffes während der Versuchsdurchführung; e) Darstellung der digitalisierten Schiffshülle; f) Fotografie des RoRo-Zielschiffes in Travemünde; g) gegenständliches RoRo-Schiffsmodell (Fotos und Grafik: LWI).

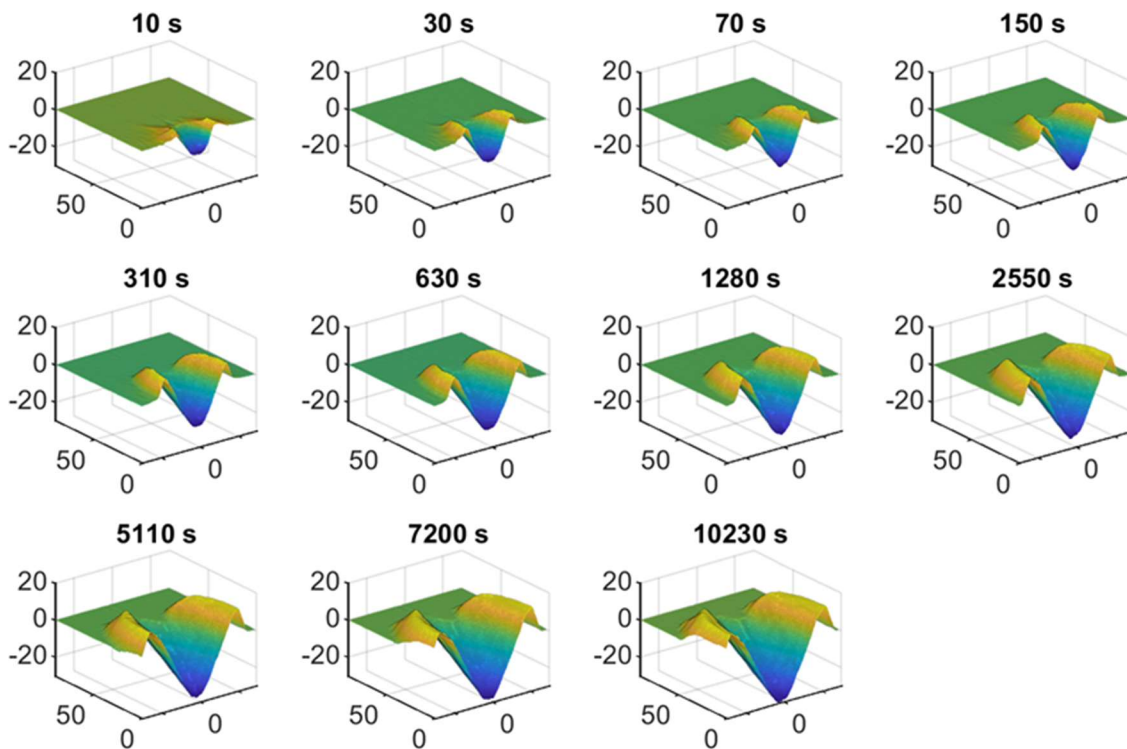


**Abbildung 10: a) Foto des Versuchsaufbaus für Kolkversuche in der 2 m Rinne mit dem Wageningen Propeller und Skizzen für den Versuchsaufbau im Hafenbecken für die Kolkversuche mit dem RoRo-Modell mit b) dem Hauptantrieb und c) mit dem Bugstrahlruder (Fotos und Skizzen: LWI).**

Im Hafenbecken wurden für das Bugstrahlruder des RoRo-Schiffs auch Geschwindigkeitsmessungen mit einem 2D-Laser Doppler-Anemometer (LDA) in direkter Wandnähe in Kombination mit einer festen Sohle durchgeführt. Weitere Geschwindigkeitsmessungen erfolgten mit einem 3D-LDA in einer 0,6 m breiten Versuchsrinne, in welcher der freie Wageningen-Propeller über einer festen Sohle betrieben wurde. Die Messungen der propellerstrahlinduzierten Drücke an der Kaimauer im Hafenbecken wurden mittels einem bündig in die Wand der simulierten Kaimauer integrierten Drucksensorfeldes durchgeführt, das aus 12 piezoresistiven Drucktransmittern bestand. Zur Erfassung der Sohlenschubspannung in ausgewählten Versuchen wurde vor dem Drucksensorfeld eine Scherplatte bündig in einer festen Sohle verbaut.

Die Kolkiefen und -geometrien wurden mithilfe akustischer und photogrammetrischer Messtechniken erfasst, deren Einsatz sich aus den experimentellen und instrumentellen Rahmenbedingungen ergab. Die photogrammetrische Methode Structure-from-Motion (SfM) kam nur vor Beginn und nach dem Ende einer Versuchsreihe bei abgelassenem Wasser zum Einsatz, während die akustischen Methoden auf Unterwassermessungen ausgelegt waren. Die entsprechenden Scans erfolgten nach 10, 30, 70, 150, 310, 630, 1280, 2550, 5110, 7200 und 10230 Sekunden Versuchszeit, nachdem die Antriebe der Modelle gestoppt wurden. Darüber hinaus wurde der Kolkvorgang während der Versuche durch die Glaswände der Versuchsstände mit einer Kamera dokumentiert. Die Kolkversuche endeten bewusst immer nach 10230 s, da die Kolkrate mit zunehmender Versuchszeit abnimmt und der Fokus der Untersuchungen auf der Kolkbildung zu Beginn der Belastung der ebenen Sohle lag. Dies erlaubte eine Durchführung der Versuche in einem zeitlich vertretbaren Rahmen. Ein Vergleich der verschiedenen Messverfahren zeigte eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse.

Abbildung 11 zeigt exemplarisch die zeitliche Entwicklung der Kolkgeometrie anhand digitaler Kolkmodelle, die mit der akustischen Methode in einem Versuch mit dem Wageningen-Propeller über einer Grobsandsohle erfasst wurde. Die Abbildung verdeutlicht sowohl die Kolkentwicklung zu Beginn der Versuche als auch die im Verlauf beobachtete Abnahme der Kolkrate.



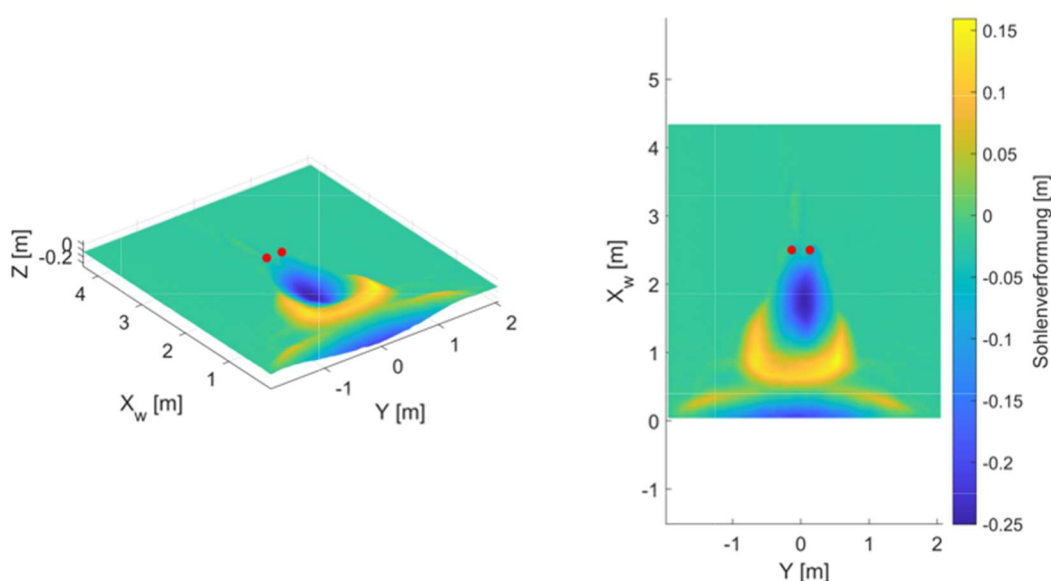
**Abbildung 11: a) Exemplarische Visualisierung der zeitlichen Entwicklung der Kolkgeometrie (3D-Modelle) im Wandbereich anhand von Messungen mit Ultraschallsensoren für Experimente mit dem Wageningen-Propeller (Grobsandsohle).**

In den Versuchen mit den freien Propellern zeigte sich eine Proportionalität zwischen der maximalen Kolktiefe und der Kolkbreite zu allen Zeitpunkten des Kolkvorgangs und unter unterschiedlichen Randbedingungen. Auch die Kolkgeometrien der GMS-Versuche folgten tendenziell diesem Zusammenhang, wobei jedoch eine höhere Streuung der Daten infolge des Einflusses Schiffskörpers auf die Hydrodynamik des Strahls und den damit verbundenen Kolkvorgang zu beobachten war. In einer weiteren Versuchsreihe unter identischen hydraulischen Randbedingungen, jedoch mit drei unterschiedlichen Sohlenmaterialien, wurde zudem der Einfluss des Sohlenmaterials auf die Kolkgeometrie untersucht. Wie zu erwarten, bildeten sich im Vergleich zu dem gröbsten Sohlenmaterial tiefere und breitere Kolke für die feinkörnigeren Sedimente. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Einfluss des Sohlenmaterials, wie in der Literatur zum Teil angenommen, nicht allein durch die dimensionslose densimetrische Froude-Zahl beschrieben werden kann.

Alle durchgeführten Kolkversuche zeigten den erwarteten logarithmischen Verlauf der Kolktiefe in Abhängigkeit der Versuchszeit. Neben den bereits angesprochenen Einflüssen der Sedimenteigenschaften verdeutlichten die Ergebnisse auch, dass mit zunehmender propellerinduzierter Strahlgeschwindigkeit, die sich in Abhängigkeit der Drehzahl und der unterschiedlichen Propellertypen charakterisieren lässt, die Kolktiefe und –breite tendenziell zunehmen. Dabei ist zu beachten, dass die Kolkgeometrie auch maßgeblich durch die Abstände der Propellerdrehachse zur Sohle ( $Z_b$ ) und des Propellers zur Kaimauer ( $X_w$ ) beeinflusst wird. Insbesondere die maximale Kolktiefe nimmt mit größer werdendem  $Z_b$  ab. Der Wandabstand  $X_w$  spielt in Kombination mit  $Z_b$  eine wichtige Rolle, da der Strahl bei größeren Wandabständen schon auf die Sohle treffen kann, bevor er die Kaimauer erreicht, sodass ggf. zwei getrennte Kolke entstehen können. Die

Ausbildung solcher getrennter Kolkbereiche bestehend aus einem Hauptkolk, der durch das direkte Auftreffen des Propellerstrahls auf die Sohle entsteht, sowie eines sekundären Kolks am Fuß der Kaimauer, der infolge der Strahlumlenkung an der Wand gebildet wird, ist exemplarisch in Abbildung 12 für einen Versuch mit dem RoRo-Hauptantrieb dargestellt.

Infolge der unterschiedlichen Schiffstypen, Antriebssysteme und Manöversituationen ergaben sich unterschiedliche Kolkgeometrien, weshalb zur Bestimmung der Kolktiefe am Fuß einer der Kaimauer getrennte Berechnungsansätze für die verschiedenen Schiffstypen abgeleitet wurden (s. AP 6). Auf die Ableitung eines Absatzes infolge der Ablegemanöver mit dem Containerschiff wurde aufgrund der stark vereinfachten Randbedingungen verzichtet (für Details siehe LWI, 2025).

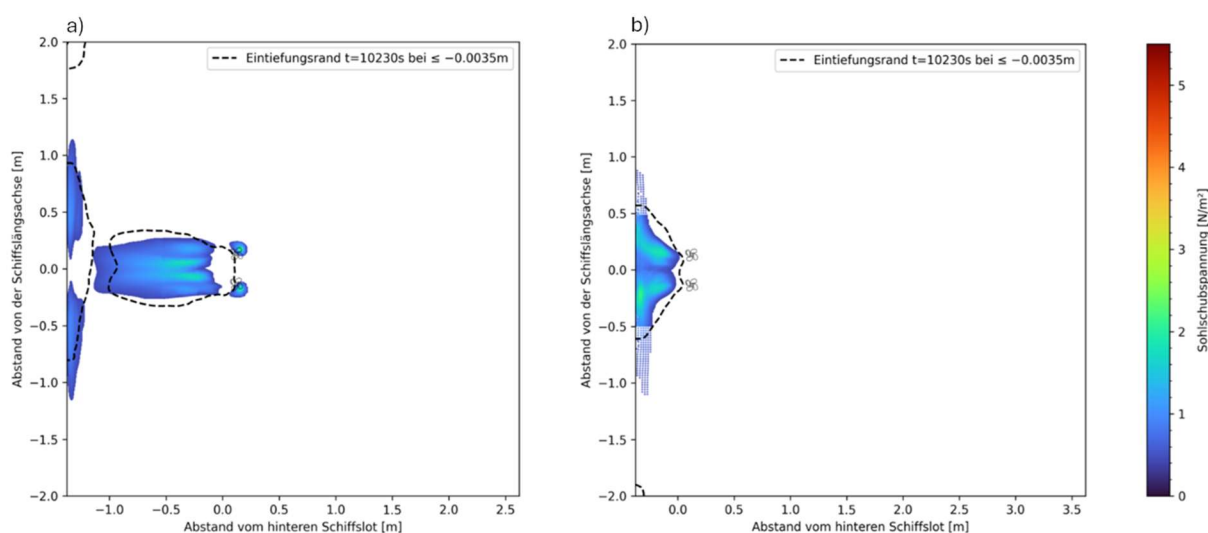


**Abbildung 12: : a) Exemplarische Visualisierung der zeitlichen Entwicklung der Kolkgeometrie (3D-Modelle) im Wandbereich anhand von Messungen mit Ultraschallsensoren für Experimente mit dem Wageningen-Propeller (Grobsandsohle).**

In einem weiteren Schritt wurden die Ergebnisse der numerischen Simulationen für das RoRo-Schiffsmodell, die mit fester Sohle aber unter Berücksichtigung der Kolkgeometrie durchgeführt wurden, hinsichtlich der räumlich hochaufgelösten Sohlenschubspannung und sohlennahen turbulenten kinetischen Energie mit den experimentellen Daten verglichen. Hierzu wurde vereinfacht auf theoretische Betrachtungen in Form des Bewegungsbeginns des Sohlensediments nach Shields (1936) zurückgegriffen. Über die mit diesem Ansatz definierten Schwellenwerte der kritischen Sohlenschubspannung wurden Bereiche identifiziert, in denen ein Bewegungsbeginn des Sediments zu erwarten war (z.B. durch Verwirbelungen im Kolkloch durch den Strahl) und in welchen mit einer unveränderlichen Kolkgeometrie gerechnet werden konnte. Zu beachten ist hierbei, dass das Kriterium nach Shields (1936) für ebene Sohlen und für eine gleichförmige offene Gerinneströmung abgeleitet wurde, deren hydrodynamische Eigenschaften sich signifikant von turbulenten und dreidimensionalen Propellerstrahlen unterscheiden.

Im Rahmen dieser Analysen zeigte sich trotzdem, dass für den Hauptantrieb grundsätzlich Rückschlüsse von der anfänglichen Sohlenschubspannungsverteilung auf die spätere Kolkgeometrie

möglich sind. So wird z.B. in Abbildung 13a die Geometrie des Haupt- und sekundären Wandkolks bei größerem Wandabstand  $X_w$  des Hauptpropellers gut erfasst und auch in Abbildung 13b spiegelt sich die Form des Kolks am Ende der Versuche für einen geringen Wandabstand  $X_w$  in der Sohlenschubspannungsverteilung wider. Für die Bugstrahlruder konnte dieses Ergebnis jedoch nur bedingt bestätigt werden. Zudem zeigte der entsprechende Vergleich für die Simulationen mit verformter Sohle größere Abweichungen und eine Korrelation zwischen maximaler Sohlenschubspannung und Sohleintiefung oder Volumenabtrag konnte nicht festgestellt werden. Die Gründe hierfür können vielfältig sein, wie z.B. der Einfluss der verformten Sohle auf die Strahlausbreitung, die steile Neigung der Kolkbänke, die komplexen hydrodynamischen Eigenschaften des Strahls und somit nicht zuletzt auch die Ansätze zur Quantifizierung der Turbulenz und des Bewegungsbeginns (s. auch AP 5). Diese hybride Analyse verdeutlicht somit weiteren Forschungsbedarf zur Quantifizierung der Sohlenschubspannung und des Bewegungsbeginns in Kolkbereichen, d. h. unter Berücksichtigung einer komplexen Topographie.



**Abbildung 13: Vergleich der Sohlenschubspannungsverteilung des Hauptantriebs des RoRo-Schiffs bei  $t = 0$  s zum Rand des Kolkes bei  $t = 10230$  s für a) großen und b) geringen Wandabstand für ausgewählte Simulationen. Dargestellt sind ausschließlich Schubspannungswerte, die größer als die kritische Sohlenschubspannung sind.**

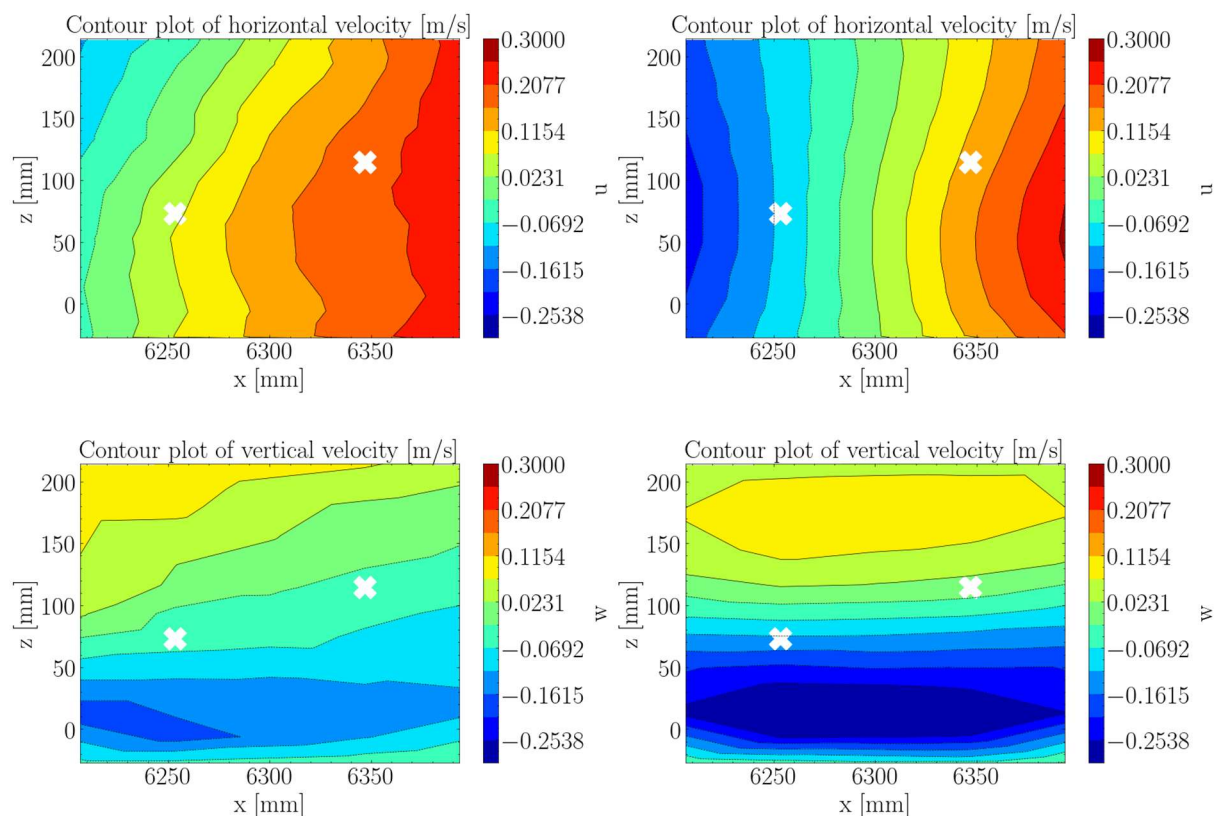
## 2.5 Arbeitspaket 5: Numerische Simulation

Wie in AP 3 dargelegt, können mithilfe von CFD-Berechnungen die durch den Propeller erzeugten Druck- und Geschwindigkeitsverläufe zuverlässig vorhergesagt werden. Die verbleibenden Abweichungen sind hauptsächlich auf Unsicherheiten in der Analyse zurückzuführen, die aus modellbedingten Vereinfachungen in der CFD-Konfiguration resultieren. Die Validierung dieser Ergebnisse wurde durch einen Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen des LWI für verschiedene Schiffstypen vertieft (s. AP 4). Dieser Aspekt ist ebenfalls Bestandteil der Aufgaben in AP 5. Mit dem validierten numerischen Modell wurden außerdem die dynamischen Wechselwirkungen zwischen Propellerstrahl, Ruder und Kolkbildung detailliert weiter untersucht.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse die hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit der eingesetzten numerischen Verfahren zur Simulation des Propellerstrahls, was durch die enge Übereinstimmung mit den Referenzdaten belegt wird. Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse

vorgestellt, während die ausführliche Analyse der CFD-Berechnungen im Abschlussbericht der Technischen Universität Hamburg dokumentiert ist, beispielsweise hinsichtlich des Einflusses des Ruders auf das Strahlverhalten bei unterschiedlichen Antriebskonfigurationen.

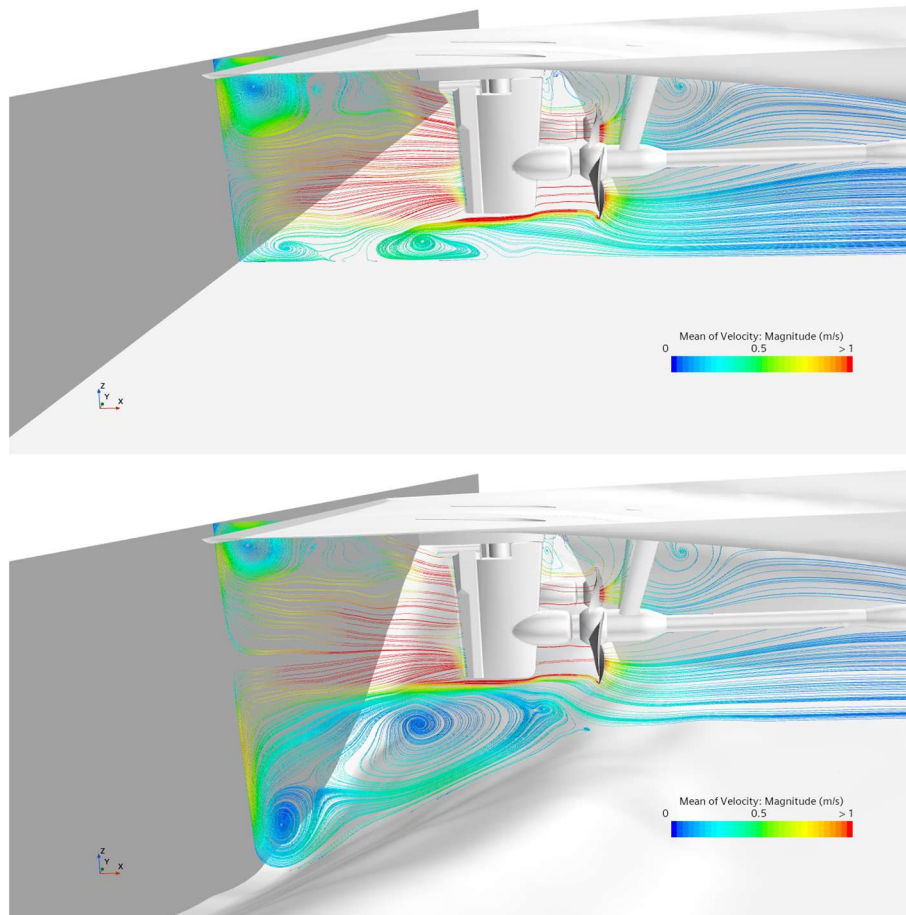
Ein Vergleich der numerischen Simulationsergebnisse mit den unter Laborbedingungen durchgeführten Messungen ergab eine gute Übereinstimmung hinsichtlich der Geschwindigkeitsverteilung, der Sohlenbeanspruchung und der Druckverteilung. Dabei konnten insbesondere eindeutige Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften des Propellerstrahls und der resultierenden Kolkentiefe festgestellt werden. Als Beispiel wurden im AP 4 exemplarisch experimentelle LDA-Messdaten erfasst. Ein Vergleich dieser Daten mit den Ergebnissen der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitskomponenten in einer Ebene 1 mm vor der Kaimauer, die aus CFD-Simulationen gewonnen wurden, zeigt trotz insgesamt ähnlicher Trendverläufe deutliche Abweichungen (s. Abbildung 14). In den experimentellen Ergebnissen erscheint die Strömungsstruktur diffuser als in den numerischen Simulationen. Als wahrscheinlichste Ursache für diese Diskrepanzen werden unterschiedliche geometrische Modellierungen und Randbedingungen zwischen den CFD- und experimentellen Strömungsmechanik (EFD)-Untersuchungen angesehen, die im Abschlussbericht der Technischen Universität Hamburg eingehend analysiert werden.



**Abbildung 14: Vergleich der gemessenen und numerisch berechneten horizontalen und vertikalen Geschwindigkeitskomponenten. Links: EFD-Ergebnisse, rechts: CFD-Ergebnisse.**

Mithilfe der in AP 3 verwendeten numerischen Modelle war eine umfassende Analyse der Wechselwirkungen zwischen Propeller und verformtem Boden sowie der daraus resultierenden Strömungs- und Schallfelder möglich. Wie in Abbildung 15 dargestellt, trifft der vom Propeller induzierte Strahl auf die Kaimauer und erzeugt eine Strömungsreflexion, die die Bodenerosion maßgeblich beeinflusst. Im Modellversuch wird das gelöste Sediment durch die rückströmende

Bewegung verdrängt und in weiter von der Kaimauer entfernten Bereichen abgelagert, insbesondere im Bereich unterhalb des Propellers sowie im Einflussbereich des Ruders. Daher ist in Simulationen mit später aufgetretenen Kolkgeometrien des Bodens die Strömung dort beeinträchtigt. Mit zunehmender Dauer des Erosionsvorgangs entwickelt sich eine immer komplexere Wechselwirkung zwischen Propellerstrahl, ausgekolktem Boden und Kaimauer. Diese Änderung der Strömungseigenschaften beeinflusst den Nachstrom und verändert somit die Druckverteilung über den Propeller. Infolgedessen wirkt sie sich auch auf den durch Kavitation induzierten Schalldruckpegel aus.



**Abbildung 15: Unterschiede der Strömungseigenschaften für zwei Bodenkonfigurationen.**

Zusätzlich wurden verschiedene Antriebskonfigurationen (Ein- und Zweischrauber) sowie die Wirkung unterschiedlicher Manövrierorgane untersucht. In dem Vorhaben wurde das Pod-Antriebssystem als alternative Antriebskonfiguration zu konventionellen Propeller-Ruder-Systemen anhand numerischer Strömungssimulationen untersucht. Die Wechselwirkungen zwischen Ruder und Propeller sowie zwischen Ruder und Propellerstrahl beeinflussen das Strömungsverhalten in Hafengebieten bei herkömmlichen Anlagen maßgeblich (s. Abbildung 16). Hieraus konnten Ansätze zur Betriebsoptimierung und zur Reduzierung erosiver Bodenbeanspruchungen abgeleitet werden.

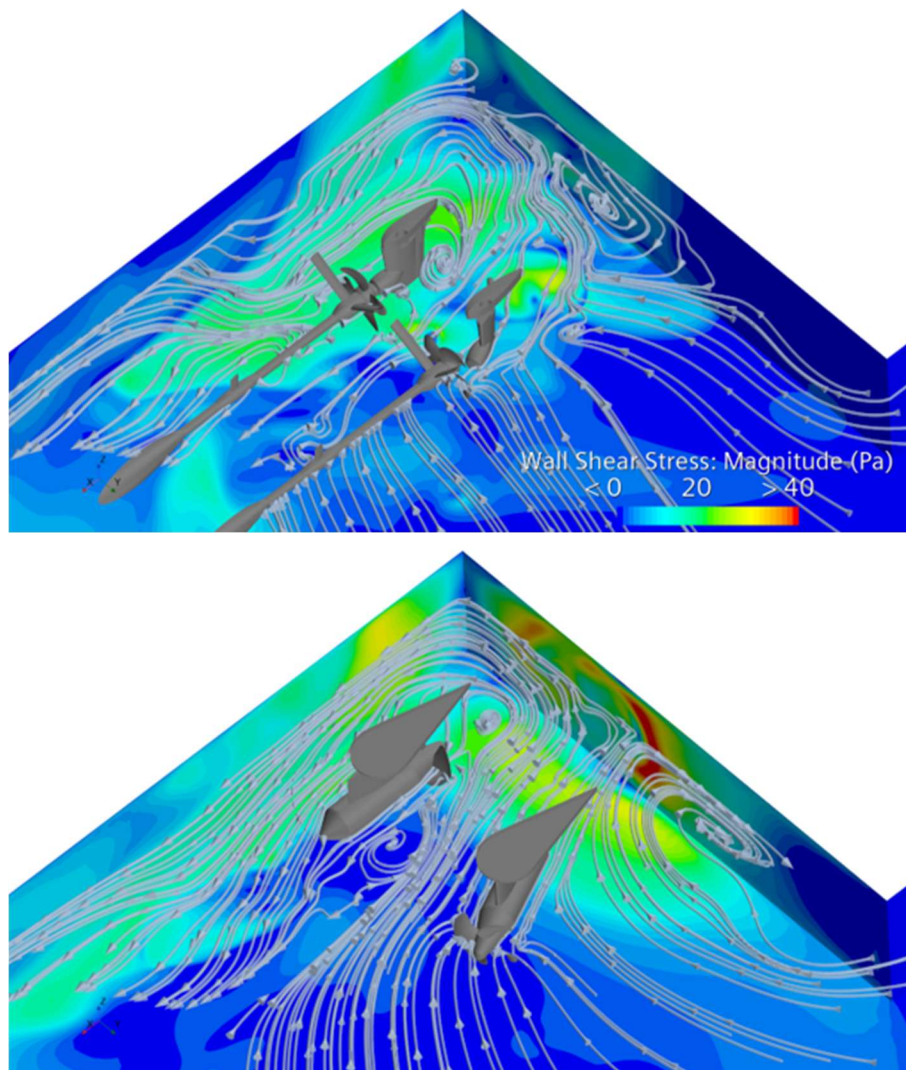


Abbildung 16: Verteilung der Wandschubspannung und der Stromlinien im Heckbereich beider Antriebssysteme.

## 2.6 Arbeitspaket 6: Entwicklung der Kolkformel

Auf der Basis der umfangreichen experimentellen Datensätze und der parametergestützten Simulationen wurden die wesentlichen Einflussparameter der Kolkbildung an einer Kaimauer identifiziert, darunter die Antriebskonfiguration und der Schiffstyp, die Propellerdrehzahl, die induzierte Propellergeschwindigkeit, die Abstände des Propellers zur Sohle und zur Kaimauer, Sedimenteigenschaften und die Zeitdauer. Für die Ableitung eines Formelwerks zur Ermittlung der zu erwartenden Kolkentiefe im Nahbereich von Kaianlagen in Abhängigkeit von der Belastungszeit wurden deshalb Beziehungen für drei unterschiedliche Konfigurationen kalibriert: Einzelpropeller (Binnenformel), Zweischauber mit jeweils einem Einzelruder (Hauptantrieb) und Zweischauber als Bugstrahlruder. Als weiteres Unterscheidungsmerkmal wurde das Verhältnis zwischen dem Abstand der Propellerebene zur Kaimauer und der Lage der maximalen Kolkentiefe im Endzustand im unbegrenzten Fall nach dem Ansatz von Hamill (1988)  $X_w/X_{m,u}$  eingeführt, um zwischen Haupt- und Sekundärkolken unterscheiden zu können. Für den Einzelpropeller (Binnenformel) wurden sowohl die Daten der freien Propeller als auch die Daten des GMS-Schiffs herangezogen. Trotz des Einflusses der Schiffsgeometrie auf die Kolkbildung waren die Abweichungen in den Kolkiefen in diesen Fällen in einem Bereich, der geringer war als die bisherige Vorhersagegenauigkeit

bestehender Literaturformeln, sodass diese Daten kombiniert wurden. Weitere Details finden sich in LWI (2025).

Die Grundlage für die Berechnungsformel stellt das nachfolgende Modell dar:

$$\frac{\varepsilon}{D_p} = \alpha \left[ \ln \left( \frac{t \cdot u_0}{D_p} \right) \right]^\beta \quad (1)$$

mit den folgenden dimensionsanalytisch abgeleiteten Beziehungen für den Faktor  $\alpha$ :

$$\begin{aligned} \alpha &= c_1 \cdot \left( \frac{Z_b}{D_p} \right)^{c_2} \cdot \left( \frac{X_w}{D_p} \right)^{c_3} \cdot \left( \frac{d_{50}}{D_p} \right)^{c_4} \cdot \left( \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot D_p}} \right)^{c_5} && \text{für Einzelpropeller} && \text{bzw.} \\ \alpha &= c_1 \cdot \left( \frac{Z_b}{D_p} \right)^{c_2} \cdot \left( \frac{X_w}{D_p} \right)^{c_3} \cdot \left( \frac{d_{50}}{D_p} \right)^{c_4} \cdot \left( \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot D_p}} \right)^{c_5} \cdot \left( \frac{a_p}{D_p} \right)^{c_6} && \text{für Zweischauber} && (2) \end{aligned}$$

und für den Exponenten  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \beta &= c_7 \cdot \left( \frac{Z_b}{D_p} \right)^{c_8} \cdot \left( \frac{X_w}{D_p} \right)^{c_9} \cdot \left( \frac{d_{50}}{D_p} \right)^{c_{10}} \cdot \left( \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot D_p}} \right)^{c_{11}} && \text{für Einzelpropeller bzw.} \\ \beta &= c_7 \cdot \left( \frac{Z_b}{D_p} \right)^{c_8} \cdot \left( \frac{X_w}{D_p} \right)^{c_9} \cdot \left( \frac{d_{50}}{D_p} \right)^{c_{10}} \cdot \left( \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot D_p}} \right)^{c_{11}} \cdot \left( \frac{a_p}{D_p} \right)^{c_{12}} && \text{für Zweischauber} && (3) \end{aligned}$$

$$\beta = \begin{cases} c_6 \left( \frac{Z_b}{D_p} \right)^{c_7} \left( \frac{X_w}{D_p} \right)^{c_8} \left( \frac{d_{50}}{D_p} \right)^{c_9} \left( \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot D_p}} \right)^{c_{10}} & \text{Einzelpropeller} \\ c_7 \left( \frac{Z_b}{D_p} \right)^{c_8} \left( \frac{X_w}{D_p} \right)^{c_9} \left( \frac{d_{50}}{D_p} \right)^{c_{10}} \left( \frac{u_0}{\sqrt{g \cdot D_p}} \right)^{c_{11}} \left( \frac{a_p}{D_p} \right)^{c_{12}} & \text{Zweischauber} \end{cases}$$

In diesen Beziehungen definieren  $\varepsilon$  die Kolkttiefe [m],  $D_p$  den Propellerdurchmesser [m],  $t$  die kumulative Einwirkungszeit [s],  $u_0$  die propellerinduzierte Strahlgeschwindigkeit [m/s],  $Z_b$  den Abstand der Propellerdrehachse zur ebenen Sohle [m],  $X_w$  den Abstand zwischen der Propeller-ebene und der Kaimauer [m],  $d_{50}$  den Korndurchmesser des Sohlensediments, bei dem 50 % der Korngrößenverteilung nach Gewicht kleiner und 50 % größer sind [m] und  $g$  die Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]. Bei den Zweischaubern wurde zusätzlich der Abstand  $a_p$  [m] zwischen den Propellern berücksichtigt (Faktoren  $c_6$  und  $c_{12}$ ; diese sind für Einzelpropeller zu Null zu setzen). Liegen sowohl horizontale als auch vertikale Komponenten des Abstands vor, wie im Fall der Bugstrahlruder, so wird  $a_p$  als die Hypotenuse der entsprechenden rechtwinkligen Dreiecks-komponenten berechnet.

Zur Kalibrierung der Parameter  $c_1$ - $c_5$  und  $c_6$ - $c_{11}$  für den Fall des Einzelpropellers (Binnenformel; mit und ohne GMS-Modell) wurden 60% der vorhandenen Datensätze herangezogen und 40% für die Validierung verwendet. Aufgrund der begrenzten Datenmenge wurde bei der Ableitung der Parameter für die Fälle der Zweischauber auf eine Aufspaltung des Datensatzes in Kalibrierungs- und Validierungsdaten verzichtet. Literaturdaten lagen für diese Fälle nicht vor.

Die Ergebnisse für die empirischen Parameter  $c_1$  bis  $c_{12}$  sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Das Modell beschreibt den zeitlichen Verlauf der maximalen Kolkttiefen am Fuß der Kaimauer und nicht zwingend die globalen maximalen Kolkttiefen. Zudem wurde für die Zweischauber-Beziehungen zwischen dem Hauptantrieb und dem Bugstrahlruder unterschieden, da beide Systeme unterschiedliche Strahl- und Kolkdynamiken aufweisen.

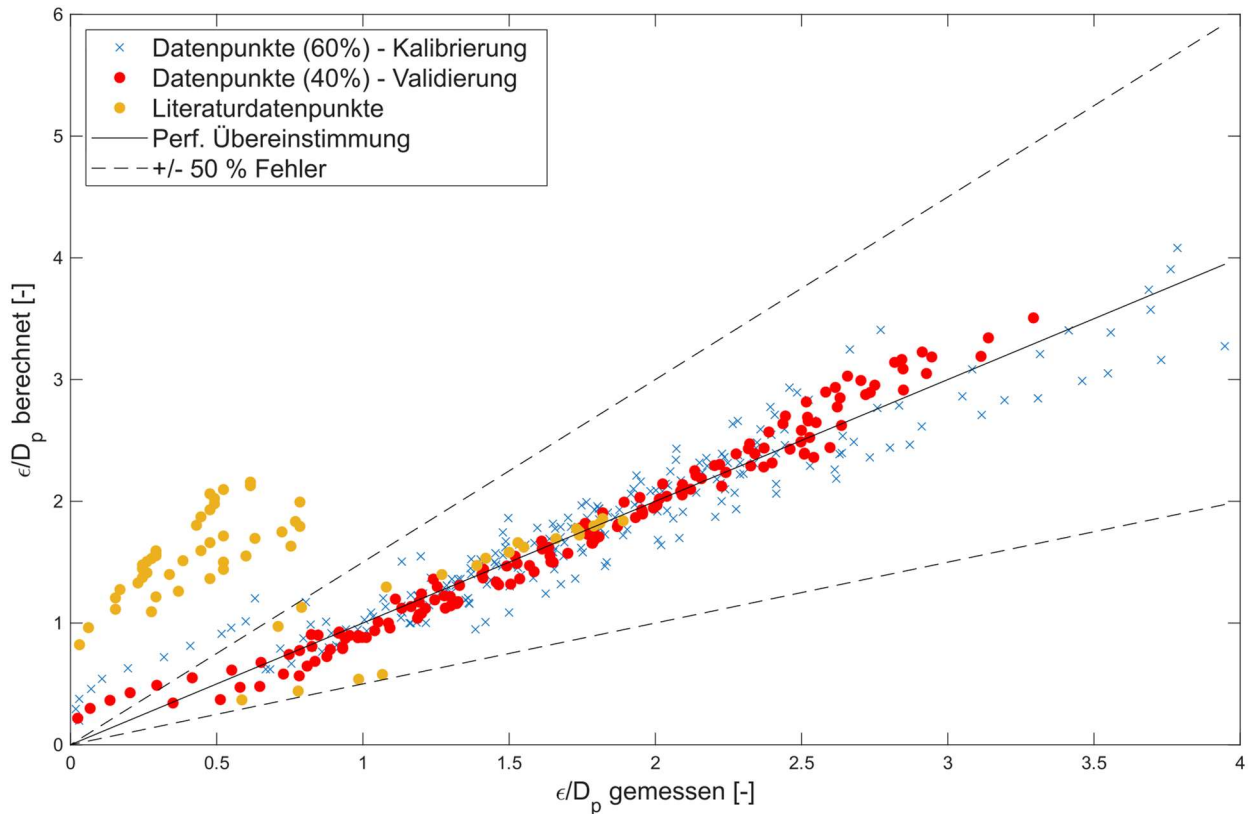
**Tabelle 2: Parameter  $c_1$  bis  $c_{12}$  zur Vorhersage des zeitlichen Verlaufs der maximalen Kolkiefen nach Gln. 1 bis 3**

		Fallunterscheidung			
		Einzelpropeller		Zweischrauber	
		Binnenformel	Hauptantrieb	Bugstrahlruder	
		$X_w/X_{m,u} < 1$	$X_w/X_{m,u} > 1$	$X_w/X_{m,u} < 1$	$X_w/X_{m,u} > 1$
$\alpha$	$c_1$	0,0436	1,0264	0,1881	0,0022
	$c_2$	0,5046	5,612	1,82	7,888
	$c_3$	-0,7842	-3,309	-1,242	-1,783
	$c_4$	-0,1387	-0,068	0,304	1,288
	$c_5$	0,957	-0,997	1,521	13,855
	$c_6$	---	0,306	-3,639	-14,025
$\beta$	$c_7$	0,8387	0,1005	0,132	0,103
	$c_8$	-0,1783	-0,767	-0,424	-0,564
	$c_9$	0,3176	0,447	0,241	0,852
	$c_{10}$	-0,0304	-0,237	-0,321	-0,258
	$c_{11}$	-0,041	0,487	-0,087	-0,986
	$c_{12}$	---	2,322	3,088	2,421

Abbildung 17 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten maximalen Kolkiefen, wobei zwischen Kalibrierungs-, Validierungs- und zusätzlichen Literaturdatenpunkten unterschieden wird. Über 94,5 % der zur Kalibrierung verwendeten Datenpunkte liegen innerhalb eines Fehlerintervalls von  $\pm 50$  %, wobei die größten Abweichungen für Versuche mit großen Wandabständen, geringen Propellerdrehzahlen und dem feinsten Sediment auftreten, in denen die resultierenden Kolkiefen niedrig waren (zwischen 0,2 cm und 6,5 cm über die Versuchszeit). Auch die Validierungsdaten zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Kolkiefen. Die größte Abweichung ergibt sich erneut aus einem Versuch mit dem feinsten Sohlenmaterial), der mit niedriger Drehzahl, jedoch bei geringerem Wandabstand durchgeführt wurde. Auch hier wurden nur geringe dimensionslose Kolkiefen gemessen.

Größere Abweichungen treten dagegen bei einem Teil der Literaturdaten auf, wiederum bei geringen dimensionslosen Kolkiefen. Für diese Daten gilt allerdings  $X_w/X_{m,u} > 1$ , d. h. streng genommen liegen diese Datenpunkte außerhalb des Gültigkeitsbereichs der abgeleiteten Formel. Da diese Versuche gleichzeitig mit niedrigen Drehzahlen durchgeführt wurden, lagen wiederum geringe Sohlbelastungen und somit Erosionstiefen vor. Für Literaturdaten mit  $X_w/X_{m,u} > 1$ , aber höheren Drehzahlen, ergaben sich hingegen wieder bessere Übereinstimmungen.

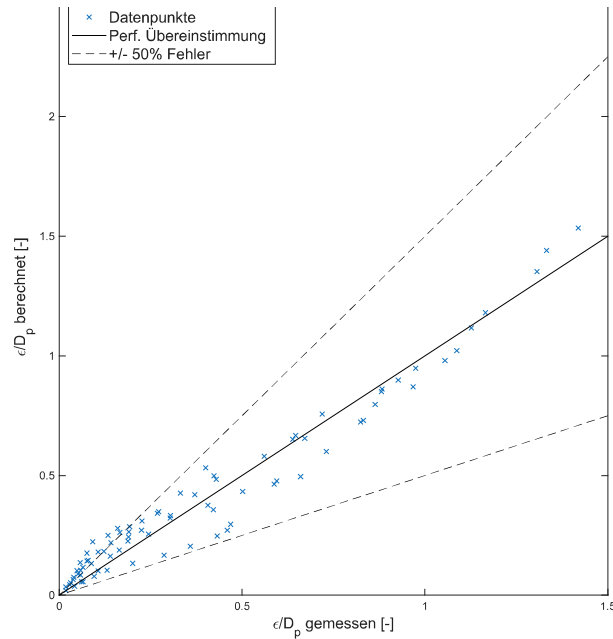
Insgesamt verdeutlicht die Abbildung eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung und somit die Anwendbarkeit des Modells für den Binnenbereich.



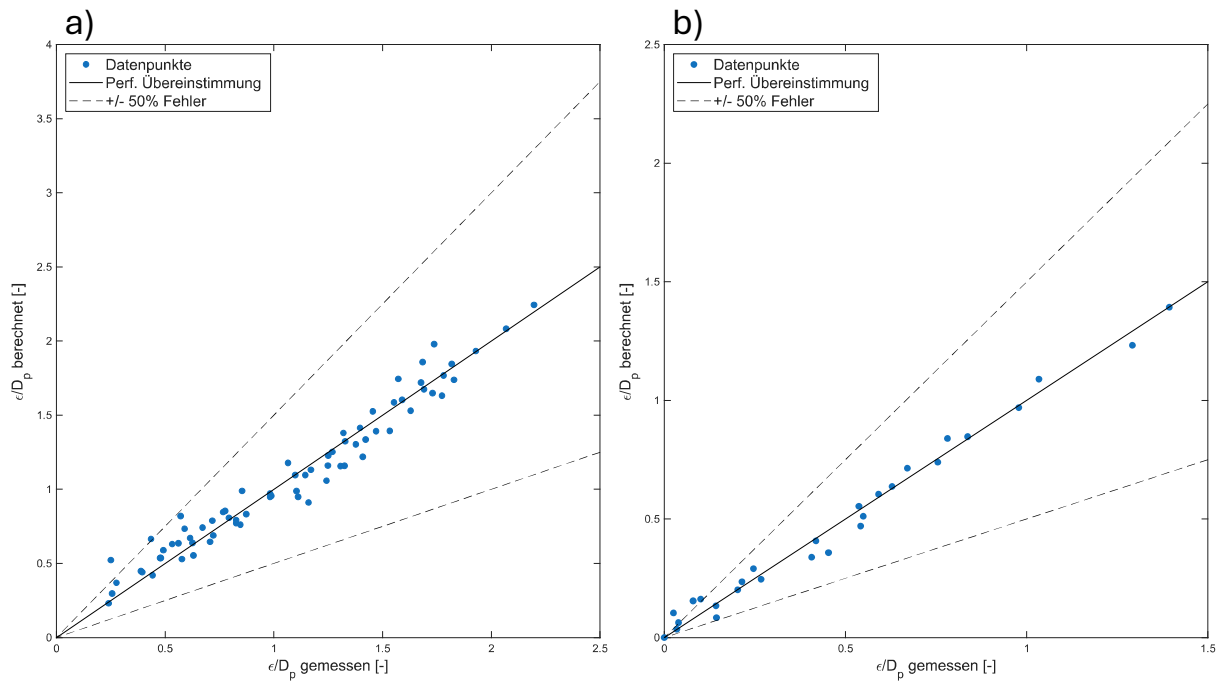
**Abbildung 17: Vergleich von gemessenen und mit der Binnenformel berechneten Kolk-tiefen für die experimentellen Daten (Kalibrierungs- und Validierungsdaten) und Literaturdatensätze.**

Abbildung 18 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen Kolk-tiefen und den mithilfe der für den Hauptantrieb abgeleiteten Zweischrauber-Beziehung berechneten Werten. Rund 75 % der Datenpunkte liegen innerhalb eines Fehlerbereichs von  $\pm 50\%$ . Abbildung 19 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Kolk-tiefen für die Bugstrahlruder für a)  $X_w < X_{m,u}$  und b)  $X_w > X_{m,u}$ . Etwa 97% der Datenpunkte für  $X_w < X_{m,u}$  liegen innerhalb des Fehlerbereichs von  $\pm 50\%$ . Für  $X_w > X_{m,u}$  liegen etwa 65% der Daten innerhalb dieses Fehlerbereichs. Insgesamt verdeutlichen beide Abbildungen gute Ergebnisse. Allerdings muss für die Zweischrauber-Beziehungen beachtet werden, dass zur Ableitung der Formeln aufgrund der begrenzten Datenmenge auf eine Aufteilung in Kalibrierungs- und Validierungsdaten verzichtet wurde.

Während durch die abgeleiteten Formeln größere Kolk-tiefen gut erfasst werden, treten bei sehr geringen Kolk-tiefen teilweise größere prozentuale Abweichungen auf. Für praxisrelevante Anwendungen ist dies jedoch zu vernachlässigen, da das Hauptinteresse in solchen Fällen auf der Vorhersage großer Kolk-tiefen liegt. Zur verbesserten Abbildung nichtlinearer Zusammenhänge könnten zukünftig auch Methoden der künstlichen Intelligenz zum Einsatz kommen. So können auf Basis künstlicher neuronaler Netze Prognosemodelle entwickelt werden, die aber derzeit nur bedingt in der Praxis Verwendung finden. Erste Tests der TUHH mit den erhobenen Datensätzen zeigten vielversprechende Ergebnisse, wobei aber für die Entwicklung solcher Ansätze ein größerer Trainingsdatensatz wünschenswert ist.

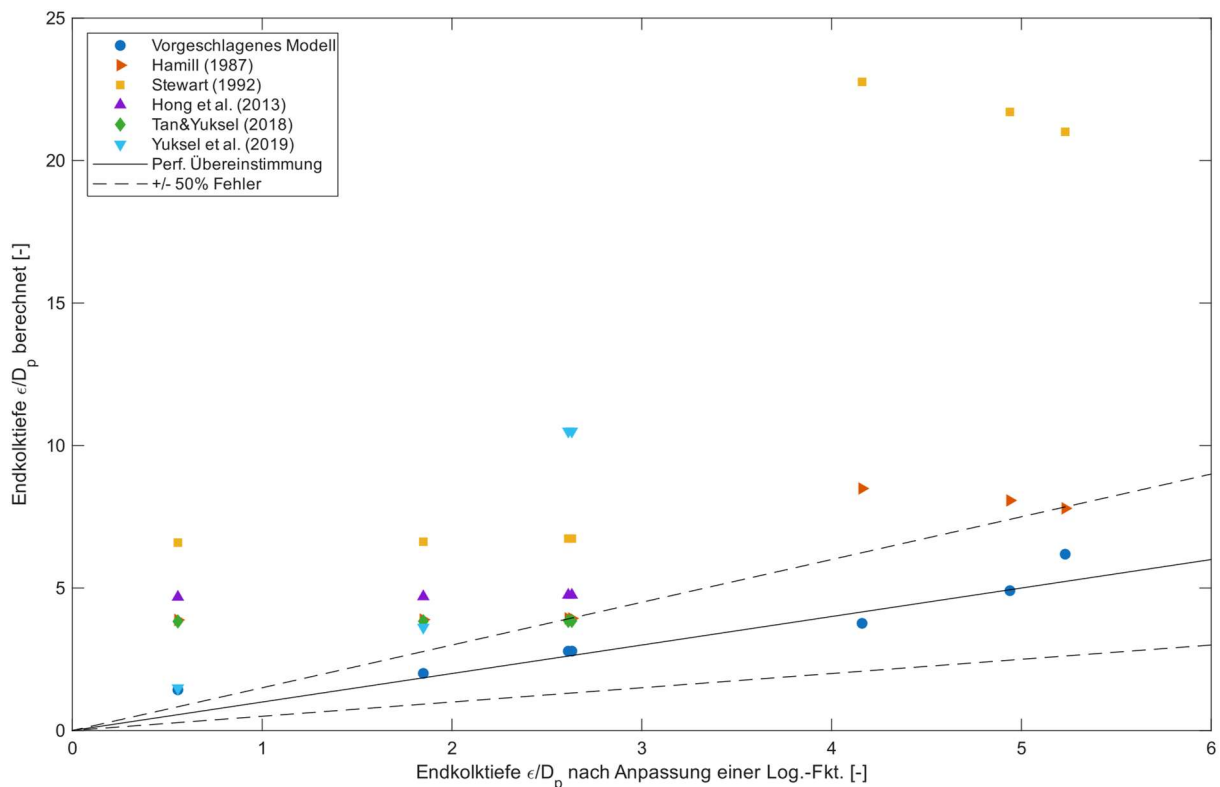


**Abbildung 18: Vergleich von gemessenen und mit der Zweischrauber-Formel (Hauptantrieb) berechneten Kolkiefen für die experimentellen Daten.**



**Abbildung 19: Vergleich von gemessenen und mit der Zweischrauber-Formel (Hauptantrieb) berechneten Kolkiefen für die experimentellen Daten.**

Das Ziel dieses Arbeitspakets bestand darin, die Vorhersagegenauigkeit der infolge eines Propellerstrahls an Kaianlagen auftretenden maximalen Kolkiefen zu erhöhen. Die erhöhte Prognosegüte des zeitlichen Kolkverlaufs unter verschiedenen Randbedingungen wird exemplarisch in Abbildung 20 für die Binnenformel dargestellt, dargestellt, da die meisten in der Literatur verfügbaren Ansätze für diesen Fall entwickelt wurden. Für die Erstellung der Abbildung wurden ausschließlich experimentelle Datensätze berücksichtigt, deren Randbedingungen vollständig innerhalb des Gültigkeitsbereichs sämtlicher relevanter Vergleichsansätze liegen. Die Ergebnisse zeigen, dass der neu abgeleitete Ansatz die beste Übereinstimmung mit den Messdaten erzielt.



**Abbildung 20: Vergleich von gemessenen und mit der Zweischrauber-Formel (Hauptantrieb) berechneten Kolkiefen für die experimentellen Daten.**

## 2.7 Arbeitspaket 7: Softwaresystem

In AP 7 wurde ein Berechnungstool entwickelt, welches die im Forschungsprojekt entwickelten Formelwerke zur Propellerstrahlausbreitung und Kolkbildung enthält (s. AP 6). Die webbasierte Berechnungsplattform soll die neu gewonnenen Erkenntnisse für eine breite Anwendergruppe zugänglich machen. Sie vereint die im Projekt erarbeiteten Berechnungsansätze sowie schiffs- und antriebspezifische Daten und stellt sie in einer intuitiv nutzbaren Oberfläche bereit. Ziel ist es, Forschung und Praxis miteinander zu verbinden und insbesondere Ingenieurbüros und Behörden bei der Planung von Hafenanlagen zu unterstützen.

Ein wesentlicher Bestandteil der Plattform ist die Integration der in AP 1 aufgebauten Schiffsdatenbank. Sie enthält schiffs- und antriebsbezogene Kenndaten, die die Grundlage für viele Berechnungen darstellen. Nutzerinnen und Nutzer können diese Daten durchsuchen, filtern und für konkrete Planungssituationen verwenden. Ergänzend wurden Module entwickelt, die die Geschwindigkeitsverteilung von Propellerstrahlen berechnen und darauf aufbauend die Kolktiefe sowohl im Seebereich anhand der neuen LWI-Formeln als auch im Binnenbereich nach geltenden Regelwerken bestimmen. Die Ergebnisse werden mit Hilfe interaktiver Diagramme visualisiert, sodass Einflussfaktoren und Parameterwirkungen verständlich nachvollzogen werden können.

Zusätzlich enthält die Plattform ein Modul zur Bemessung geeigneter Kolkmaßnahmen. Hier fließen sowohl etablierte Methoden aus der Literatur als auch die zuvor berechneten Einwirkungen der Propellerstrahlen sowie die Kolkiefen ein, sodass die Bemessung des Sohlenschutzes direkt an die hydraulischen Berechnungsergebnisse gekoppelt ist. Der modulare Aufbau der

Website ermöglicht zukünftige Erweiterungen, beispielsweise zur Abbildung weiterer Antriebssysteme wie des Voith-Schneider-Propellers, was Synergien mit dem benachbarten IHATEC II Forschungsprojekt „Eros-VSP“ erkennen lässt.

## 2.8 Publikationen

Die im Zuge des Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse wurden in verschiedenen Publikationen in Zusammenarbeit der Projektpartner veröffentlicht. Weiterhin wurde das Projekt durch mehrere Vorträge bei Fachkonferenzen vorgestellt. Eine Auswahl, bei der alle Projektpartner mitwirkten, ist im Folgenden aufgeführt.

- Aberle, J., Pinkenburg, P., Macías-Lezcano, J., Llull, T., Wang, K., Abdel-Maksoud, M. (2003). „*Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen im Hafensbereich*“ Tagungsbandeintrag und Präsentation im Zuge des HTG-Kongresses 2023 in Bremen
- Wang, K., Abdel-Maksoud, M., Weiss, M., Aberle, J., Pinkenburg, P., Macías-Lezcano, J., Llull, T. (2024). „*Numerical Study of Propeller Slipstream Characteristics during Berthing and Unberthing Maneuvers of RORO Vessel*“ Konferenzbeitrag. 8<sup>th</sup> International Symposium on Marine Propulsors (smp). <https://doi.org/10.15480/882.9354>
- Aberle, J., Macías-Lezcano, J., Schwartpaul, C., Abdel-Maksoud, M., Berndt, J., Wang, K., Drude, O., Pinkenburg, P., Palm, M. (2025). „*Kräfte am Fuß der Kaimauer – Wie Propellerstrahlen Kolke erzeugen – und was hilft.*“ iQ-Journal des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), Braunschweiger Bezirksverein e.V., 4/2025, 6-7.
- Wang, K., Weiß, M., Macías-Lezcano, J., Abdel-Maksoud, M., Aberle, J., Pinkenburg, P. (2026). „*Numerical investigation of propeller-induced erosion phenomena in confined environments.*“ Abstract submitted to smp'26 – International Symposium on Marine Propulsors 12 – 15th July, St. John's, Canada

Im Bereich der Lehre wurden am Leichtweiß-Institut für Wasserbau folgende Arbeiten angefertigt:

- *Einfluss einer vertikalen Kaiwand auf die schraubstrahlinduzierte Kolkbildung*; Bachelorarbeit (2023);
- *Einfluss der Sedimentgröße auf die schraubstrahlinduzierte Kolkbildung an einer vertikalen Kaimauer*; Bachelorarbeit (2023);
- *Schraubstrahlinduzierte Kolkbildung an einer vertikalen Kaimauer*; Masterarbeit (2023);
- *Modelluntersuchungen zu schraubstrahlinduzierten Kolken an vertikalen Kaimauern*; Bachelorarbeit (2024);
- *Experimentelle Studie zur Reduzierung der Kolkentiefe an Kaianlagen durch die Vorlagerung eines statischen Mischers*; Studienarbeit (2023);
- *Untersuchung der Sohlschubspannungsverteilung während eines schraubstrahl-induzierten Kolkprozesses an einer vertikalen Kaimauer*; Studienarbeit (2025);

- *Experimentelle Studie zur Reduzierung der Kolkentiefe an Kaianlagen durch Sohlenschutzmaßnahmen*; Studienarbeit (2025);
- *Einfluss der Spundwandgeometrie auf schraubstrahlinduzierte Kolken an vertikalen Kai-mauern*; Masterarbeit (Beginn November 2025)

An der TUHH wurden im Bereich der Lehre die folgenden Arbeiten angefertigt:

- Weiß, M. (2024). *Numerische Untersuchung der Propellerstrahlcharakteristik beim An- und Ablegemanöver eines RORO-Schiffes* (Unveröffentlichte Studienarbeit). TU Hamburg
- Weiß, M. (2025). *Validierung von Ansätzen zur Vorhersage des abgestrahlten Unterwasserschalls in Hafengebieten* (Unveröffentlichte Masterarbeit). TU Hamburg

Neben der oben vorgestellten Liste an Veröffentlichungen wurden die Ergebnisse sowohl der Feldmessungen (AP 2) als auch der gegenständlichen Modelluntersuchungen (AP 4) ebenfalls auf Konferenzen vorgestellt. Eine Auswahl dieser Veröffentlichungen ist im Folgenden aufgeführt.

- Macías-Lezcano, J., Schulz, L., Llull, T., Aberle, J. (2023, August). *Temporal development of propeller jet induced scours at quay walls* [Konferenzpräsentation]. 40th IAHR World Congress, Wien, Österreich.
- Llull, T., Macías-Lezcano, J., Aberle, J. (2023). *Field measurements on propeller jet induced loads on quay walls during unberthing manoeuvres*. Book of Abstracts 10th Short Course/Conference on Applied Coastal Research (SCACR) (p. 82).
- Macías-Lezcano, J., Llull, T., Aberle, J. (2024). *Scouring induced by a confined propeller jet nearby a vertical quay structure: scale model tests*. Proceedings of the 8th International Symposium on Marine Propulsors smp'24 (pp. 221-228). <https://doi.org/10.15480/882.9368>
- Macías-Lezcano, J.; Llull, T.; Aberle, J. (2024). *Propeller jet induced scouring in presence of a quay wall*. Book of Abstracts of the 8th IAHR Europe Congress (pp. 215-216). <https://doi.org/10.34638/jv1h-bs60>
- Weiß, M.; Wang, K.; Abdel-Maksoud, M. (2024). *Numerical Investigation of Propeller Slipstream Characteristics during Unberthing Manoeuvre of a RORO Vessel*. 6th International Workshop on Ship Propulsion and Hydrodynamics – IWSPH'24

Weiterhin wurden folgende Referenzen zur Bearbeitung herangezogen:

- Abramowicz-Gerigk, T., Burciu, Z., Górski, W. und Reichel, M. (2018). *Full scale measurements of pressure field induced on the quay wall by bow thrusters – indirect method for seabed velocities monitoring*, Ocean Engineering 162.
- Abramowicz-Gerigk, T. und Jachowski, J. (2022). *Ship Berthing and Unberthing Monitoring System in the Ferry Terminal*, Sensors 2223.

- Bundesanstalt für Wasserbau (2024). *Driving Dynamics of Inland Vessels: Vessel Behaviour on European Inland Waterways and Waterway Infrastructure with Special Respect to German Waterways*.
- Connelly, J., Schultz, M. und Flack K. (2005). *Velocity-defect scaling for turbulent boundary layers with a range of relative roughness*, Experiments in Fluids, 40.
- FreeCAD (2024). <https://www.freecad.org/>, Version 0.21.2, Open-source parametric 3D CAD modeler.
- Hamill, G., Mc Garvey, J. A. und MacKinnon, P. (1998). *A method for estimating the bed velocities produced by a ship's propeller wash influenced by a rudder*, 26th International conference on Coastal Engineer. (ICCE'98).
- Hamill, G.A. (1987). *Characteristics of the screw wash of a manoeuvring ship and the resulting scour*. Ph.D. thesis, Queen's University of Belfast, Northern Ireland, UK.
- Hamill, G.A. (1988). *The scouring action of propeller jet produced by a slowly manoeuvring ship*. Bulletin PIANC 62.
- Hong, J.-H., Chiew, Y.-M., Cheng, N.-S. (2013). *Scour Caused by a Propeller Jet*. J. Hydraul. Eng., 139, 1003-1012, doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000746.
- Kiraga, M., und Popek, Z. (2019). *Bed Shear Stress Influence on Local Scour Geometry Properties in Various Flume Development Conditions*, Water 11(11).
- Li, A., W. Melville, B., Yang, Y., Zhou, S., He, F., Y. Shamseldin, A., und Zhang, G. (2024). *The semi-empirical model for critical bed shear stress in the local scour hole downstream of a submerged structure based on turbulent velocity distribution*, Applied Ocean Research, 153.
- LWI (2025). *Schlussbericht zum IHATEC II Forschungsverbundprojekt Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen – Teilvorhaben: Experimentelle Untersuchungen und Weiterentwicklung der Kolk-Berechnungsformeln*. Bericht des Leichtweiß-Instituts für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig, Bericht Nr. 1129; online verfügbar unter <https://oa.tib.eu/renate/handle/123456789/26698>.
- Shields, A. (1936). *Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebepbewegung*. Zugl.: Berlin, TeH., Diss. Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau: H. 26. Preuß. Versuchsanst. f. Wasserbau u. Schiffbau.
- Schmidt, E. (2000). *Belastungen durch Bugstrahlruder*, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 18.
- Stewart, D.P.J. (1992). *Characteristics of a ship's screw wash and the Influence of quay wall proximity*. PhD thesis, Queen's University of Belfast, Northern Ireland, UK
- Tan, R.I., Yüksel, Y. (2018): *Seabed scour induced by a propeller jet*. Ocean Eng., doi:10.1016/j.oceaneng.2018.04.076.
- TUHH (2025). *Individueller Schlussbericht, Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen – Propellerstrahl Teilvorhaben: Analyse der Strahlausbreitung und Schallemissionen von Schiffsmanövrierorganen durch Simulation*, <https://oa.tib.eu/renate/handle/123456789/26723>.

- WK Consultants GmbH (2025). *Individueller Schlussbericht, Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen – Propellerstrahl Teilvorhaben: Analyse Schiffsmanöver – Softwareintegration*, <https://oa.tib.eu/renate/handle/123456789/26651>
- Yew, W.-T. (2017). *Seabed Scour Induced by Twin-Propeller Ships*, Phd Thesis, University of Malaya.
- Yüksel, Y., Tan, R.I., Celikoglu, Y. (2019). *Determining propeller scour near a quay wall*. Ocean Eng., doi:10.1016/j.oceaneng.2019.106331.

## Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b> -	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht
<b>3. Titel</b> Gemeinsamer Schlussbericht Propellerstrahl - Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen	
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Aberle, Jochen Dr. Abdel-Maksoud, Moustafa Dr. Drude, Olaf Dr. Macías Lezcano, Jesús Wang, Keqi Dr. Weiß, Marco Pinkenburg, Pia Schlüter, Frederic	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 31.05.2025  <b>6. Veröffentlichungsdatum</b> Dezember 2025  <b>7. Form der Publikation</b> Sonstiges
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> WK Consultants GmbH Veritaskai 8 21079 Hamburg	<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b> -  <b>10. Förderkennzeichen</b> 19H21006A  <b>11. Seitenzahl</b> 39
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> BMV Invalidenstraße 44 10115 Berlin	<b>13. Literaturangaben</b> 20  <b>14. Tabellen</b> 2  <b>15. Abbildungen</b> 20
<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b> -	
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b> -	
<b>18. Kurzfassung</b> Die alternde Infrastruktur der See- und Binnenhäfen muss an die modernen Schiffsantriebe angepasst werden. Diese werden laufend optimiert, was zu einer großen Belastung der Hafenanlagen und somit zu erhöhten Investitionskosten führt. Ziel des geplanten Vorhabens ist es, nachhaltige Bemessungsgrundlagen für die Hafenplanung zu schaffen, indem neue Ansätze zur genaueren Erfassung der Interaktion zwischen Schiff und Hafenanlage entwickelt werden. Dazu zählen auch die Bestimmung der Propellerstrahlausbreitung und die damit verbundenen Erosionsprozesse. Daher wurde im Vorhaben die Propellerstrahlausbreitung numerisch simuliert und die Kolkbildung im Modellversuch untersucht. Zudem wurden Felddaten wie Druck, Geschwindigkeit und Sohlentiefe erhoben. Ergänzend wurde die Geräuschentwicklung über und unter Wasser erfasst. Auf Basis der Forschungsergebnisse entstand eine Software, die neu entwickelte Bemessungsformeln abbildet, Kolkiefen berechnet und die Dimensionierung geeigneter Sicherungssysteme ermöglicht. Dies liefert Hafenbetreibern eine fundierte Entscheidungsgrundlage für nachhaltige und umweltverträgliche Investitionen.	
<b>19. Schlagwörter</b> Propellerstrahl, Erosionen, Kolk, Kolkbildung, Hafen, Kolkberechnung	
<b>20. Verlag</b> Technische Informationsbibliothek (TIB) Hannover, Welfengarten 1B, 30167 Hannover	<b>21. Preis</b> -

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2880954-3

## Document control sheet

<b>1. ISBN or ISSN</b> -	<b>2. type of document (e.g. report, publication)</b> Veröffentlichung (Publikation)	
<b>3. title</b> Gemeinsamer Schlussbericht Propellerstrahl - Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen		
<b>4. author(s) (family name, first name(s))</b> Aberle, Jochen Dr. Abdel-Maksoud, Moustafa Dr. Drude, Olaf Dr. Macías Lezcano, Jesús Wang, Keqi Dr. Weiß, Marco Pinkenburg, Pia Schlüter, Frederic	<b>5. end of project</b> 31.05.2025	
	<b>6. publication date</b> December 2025	
	<b>7. form of publication</b> Sonstiges	
<b>8. performing organization(s) name, address</b> WK Consultants GmbH Veritaskai 8 21079 Hamburg	<b>9. originators report no.</b> -	
	<b>10. reference no.</b> 19H21006A	
	<b>11. no. of pages</b> 39	
<b>12. sponsoring agency (name, address)</b> BMV Invalidenstraße 44 10115 Berlin	<b>13. no. of references</b> 20	
	<b>14. no. of tables</b> 2	
	<b>15. no. of figures</b> 20	
<b>16. DOI (Digital Object Identifier)</b>		
<b>17. presented at (title, place, date)</b>		
<b>18. abstract</b> The aging infrastructure of seaports and inland ports must be adapted to modern ship propulsion systems. These systems are constantly being developed further and growing in size and power, which places a heavy burden on port facilities and thus increases investment costs. The aim of the project was to create sustainable design principles for port planning by developing new approaches to more accurately capture the interaction between ships and port facilities. This included determining propeller jet spread of the ever-growing ships and the associated erosion phenomena. Therefore, the project numerically simulated propeller induced jet streams and investigated scour formation in model scale tests. Field data such as pressure, speed, and seabed position was also collected. Additionally, noise levels above and below the waterline were recorded. Based on the research results, software was developed that implements newly developed design formulas, calculates scour depths, and enables the dimensioning of suitable safety systems. This will provide port operators with a basis for making sustainable and environmentally investments in the future.		
<b>19. keywords</b> propeller jet stream. erosion, scour, scour depth, harbour, ports, scour calculation		
<b>20. publisher</b> Technische Informationsbibliothek (TIB) Hannover, Welfengarten 1B, 30167 Hannover	<b>21. price</b> -	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 2881066-13