JBO	Jörss – Blunck – Ordemann GmbH Beratende Ingenieure Im Bauwesen			
Reference Number	**19F502-JBO-RDMGAB-DE-9010**	**Revision**		Status **FIN**
Employer Number	**FKZ: 03SX495C**	JBO **1.0**	Employer **1.0**	Page **1/41**
Date of Issue	**25.06.2025**	**Schlussbericht**		

Projekt:

Neubewertung von OWEA-Tragstrukturen anhand von entwickelten Tools zur genaueren Berücksichtigung des marinen Bewuchses

Im Verbundvorhaben:

EnviSim4Mare

Testbettentwicklung und Untersuchung des Einflusses marinen Bewuchses auf Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen

FKZ: 03SX495C

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Projektträger:

ptj projektträger jülich

Abschlussbericht

zum JBO-Teil im Verbund EnviSim4Mare

Projektlaufzeit: 01.12.2019 bis 31.12.2024

JBO Rev.	Date	Author	QC	App.
1.0	25.06.2025	Sebastian Kelma, Albrecht Victor	Gerrit Haake	Falk Lüddecke

Revisionsindex

Rev. JBO	Rev. Employer	Date *Datum*	Description *Beschreibung*
1.0	1.0	25.06.2025	Erstellung

Document status abbreviation	
DRA	Draft
FIN	Final
PRE	Preliminary
IFR	Issued for review
IFE	Issued for execution
AB	As built
ERL	Early release

Inhaltsverzeichnis

Referenzen 5
Einleitung 7
I. Kurze Darstellung 8
1. Aufgabenstellung 8
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 10
3. Planung und Ablauf des Vorhabens 10
4. Wissenschaftlicher Stand, an den angeknüpft wurde 11
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 12
II. Eingehende Darstellung 13
6. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der Ziele 13
Allgemeines 13
AP 0 Projektsteuerung und externe Beratung 13
AP 1 Review und Recherchen 14
Mariner Bewuchs 15
Hydrodynamische Koeffizienten 17
AP 3 Experimentelle Untersuchungen Kraftkoeffizienten - Mariner Bewuchs 19
Versuche an Zylindern mit glatten und rauen künstlich erzeugten Oberflächen im 2m-Wellenkanal des LWIs 19
Versuche an Zylindern mit glatten und rauen, mit realem marinem Bewuchs versehenden Oberflächen im SWS-Kanal des LWIs 25
AP 5 Entwicklung eines Re-Assessment-Tools 33
Aufbau des Re-Assessment-Tools 33
Validierung des Re-Assessment-Tools 35
Anwendung des Re-Assessment-Tools 36
Zusammenfassung der Arbeiten im JBO-Projektteil zu EnviSim4Mare 37
7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 38
8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 38
9. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertung des Ergebnisses 39
10. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 40
11. Geplante Veröffentlichung des Ergebnisses 40
III. Erfolgskontrollbericht 41
IV. „Kurzfassung“ (Berichtsblatt) 41

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
AWI	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz Zentrum für Polar- und Meeresforschung
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
BMWE	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BSH	Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie
DNV	Det Norske Veritas
JBO	Jörss – Blunck – Ordemann GmbH
LWI	Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig
MP	Monopile
OBE	Ocean Breeze Energy GmbH
OSS	Offshore-Umspannplattform (*Offshore Sub Station*)
OWEA	Offshore-Windenergieanlage
OWP	Offshore-Windpark
PtJ	Projektträger Jülich
SWS-Kanal	Salzwasser-Wellen-Strömungskanal

Referenzen

Anhänge:

[A1] JBO: „Erfolgskontrollbericht zum JBO-Teil im Verbund EnviSim4Mare“, Bericht 19F502-JBO-RDMGEB-DE-9011, Jörss – Blunck – Ordemann GmbH, Rev.01, 25.06.2025.
- nicht öffentlicher Teil III dieses Abschlussberichts -

[A2] JBO: Berichtsblatt zu diesem Bericht gem. Merkblatt für Zuwendungsempfänger des BMWE, Jörss – Blunck – Ordemann GmbH, 20.05.2025.
- nicht öffentlicher Teil IV dieses Abschlussberichts -

Normen und Standards:

[N1] DNV-RP-C205: „Environmental conditions and environmental loads“, April 2025

[N2] DIN EN ISO 19902: „Erdöl- und Erdgasindustrie – Gegründete Stahlplattformen (ISO 19902:2020)“, März 2021

[N3] IEC 61400-3-1: „Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines“, April 2019

[N4] DNV-ST-0126: „Support structures for wind turbines”, Dezember 2021

[N5] DIN 18088-1: „Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen — Teil 1: Grundlagen und Einwirkungen“, Januar 2019

[N6] API RP 2A-WSD: „Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design”, 21. Ausgabe, November 2014

Literatur:

[L1] Morison, J. R., O’Brien, M. P., Johnson, J. W., Schaaf, S. A.: „The Force Exerted by Surface Waves on Piles“, Petroleum Transactions, 189:149-154, 1950

[L2] Schoefs, F., Boukinda, M.: „Modelling of Marine Growth Effect On Offshore Structures Loading Using Kinematics Field of Water Particle”, The Fourteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Toulon, France, 2004

[L3] Buck, B. H.; Buchholz, C. M.: „Response of offshore cultivated Laminaria saccharina to hydrodynamic forcing in the North Sea”, Aquaculture, 250(3-4):674-691, 2005

[L4] Nedrebo, E. L.: „Experimental Investigation of Marine Fouling on Piles in Currents”, Norwegian Unviersity of Science and Technology, Department of Marine Technology, Trondheim, 2014

[L5] Gudmestad, O. T., Moe, G.. „Hydrodynamic coefficients for calculation of hydrodynamic loads on offshore truss structures”, Marine Structures, 9(8):745-758, 1996

[L6] Loxton, J. et al.: „Setting an agenda for biofouling research for the marine renewable energy industry”, International Journal of Marine Energy, 19: 292-303, 2017

[L7] Baarholm, R., Skaugset, K.: „Modelling and Characterization of Artificial Marine Growth”, ASME 2008 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal, OMAE2008-57587, S. 863-870, 2008

[L8] Rolfes, R. et al.: „Lebensdauer-Forschung an den OWEA-Tragstrukturen im Offshore-Testfeld alpha ventus – GIGAWIND life – Teilvorhaben: Validierte Methoden und Strukturmodelle für ein integrales und wirtschaftliches Design von OWEA-Tragstrukturen“, Forschungsbericht, Leibniz Universität Hannover, 2018

[L9] Kelma, S.: „ Probabilistic design of support structures for offshore wind turbines by means of non-Gaussian spectral analysis “, Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2024

[L10] Dean, R. G.: „Stream function representation of nonlinear ocean waves”, Journal of Geophysical Research, 70(18):4561-4572, 1965

[L11] Wienke, J.: „Druckschlagbelastung auf schlanke zylindrische Bauwerke durch brechende Wellen“, Dissertation, TU Braunschweig, 2001

[L12] Irschik, K.: „Belastung schlanker zylindrischer Pfahlbauwerke durch nicht brechende und brechende Wellen“, Dissertation, TU Braunschweig, 2013

Einleitung

Die Jörss – Blunck – Ordemann GmbH (JBO) war mit dem BMWE-Projekt **EnviSim4Mare – Neubewertung von OWEA-Tragstrukturen anhand von entwickelten Tools zur genaueren Berücksichtigung des marinen Bewuchses** am F&E-Verbundvorhaben **EnviSim4Mare – Testbettentwicklung und Untersuchung des Einflusses marinen Bewuchses auf Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen** beteiligt. „EnviSim4Mare“ bezeichnet nachfolgend das Gesamtvorhaben.

EnviSim4Mare befasst sich mit der realitätsnahen Berücksichtigung von marinem Bewuchs bei der Bemessung neuer und Neubewertung bestehender OWEA-Tragstrukturen. Dabei sollen bisherige Unsicherheiten bei den Annahmen zum marinen Bewuchs und damit auch für die Lastannahmen an OWEA-Tragstrukturen reduziert werden. In der Folge werden wirtschaftlichere und ressourcenschonendere Tragstrukturen möglich sein. Dazu wird am LWI der TU Braunschweig ein Salzwasser-Wellen-Strömungskanal (SWS-Kanal) geplant, entwickelt und in Betrieb genommen, sowie in Zusammenarbeit mit Partnern erste Versuche durchgeführt. Im Rahmen des Forschungsprojekts sollen dort Einflüsse marinen Bewuchses auf OWEA-Tragstrukturen in Versuchen mit künstlichem und lebendem marinem Bewuchs ermittelt und ausgewertet werden. Die Versuchsergebnisse sollen anschließend in für die Bemessungspraxis geeignete Parameter (hydrodynamische Koeffizienten) überführt werden und in Vergleichsberechnungen an realen Offshore-Tragstrukturen angewendet werden.

Dieser Abschlussbericht stellt die Ergebnisse aus dem Projekt „EnviSim4Mare – Neubewertung von OWEA-Tragstrukturen anhand von entwickelten Tools zur genaueren Berücksichtigung des marinen Bewuchses“ zusammen und gibt einen Überblick in die Einordnung der Arbeiten in den Verbund EnviSim4Mare. Die nachfolgenden Kapitel orientieren sich in ihrer Struktur an den Vorgaben des BMWE bezüglich Anforderungen an Schlussberichte. Dabei sind folgende Teile enthalten:

I. Kurze Darstellung des Projekts
II. Eingehende Darstellung, insbesondere der fachlichen Ergebnisse in Kapitel II.6
III. Erfolgskontrollbericht (nicht öffentliche Anlage des Schlussberichts) [A1]
IV. „Kurzfassung“ in Form eines Berichtsblatts (nicht öffentliche Anlage des Schlussberichts) [A2]

Das Projekt EnviSim4Mare ist gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, die Administration liegt beim Projektträger Jülich (PtJ). Beiden sei für ihre Unterstützung und damit zum Gelingen des Vorhabens gedankt! Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Das Projekt „EnviSim4Mare – Neubewertung von OWEA-Tragstrukturen anhand von entwickelten Tools zur genaueren Berücksichtigung des marinen Bewuchses“ steht mit anderen Forschungsprojekten (bezüglich der Forschungspartner s. Abschnitt I.5) im Verbund „EnviSim4Mare – Testbettentwicklung und Untersuchung des Einflusses marinen Bewuchses auf Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen“. Nachfolgende Darstellungen der Projekte entsprechen denen der Gesamtvorhabenbeschreibung bzw. der Teilvorhabenbeschreibung JBO.

Gesamtvorhaben:

Das Forschungsprojekt setzt sich zum Ziel, die Auswirkungen des marinen Bewuchses auf die Gesamtlasten zu untersuchen, in Prognosewerkzeugen zu parametrisieren und biologische Randbedingungen für den Bewuchs in der deutschen Nordsee und darüber hinaus zu erforschen. Im Speziellen ergeben sich daher die folgenden Teilzielstellungen:

1) Entwicklung eines neuen Versuchskonzepts für marinen Bewuchs (lebend, Ersatzmodelle)
2) Entwicklung einer Wachstumsüberwachung, Bestimmung der Artengemeinschaften, Sukzessionen und Dominanzen zur Feststellung der Oberflächenrauigkeit
3) Entwicklung einer neuen Versuchseinrichtung (Salzwasser-Wellen-Strömungskanal) als Testbett für marinem Bewuchs an Tragstrukturen unter kombinierten Wellen-Strömungsbedingungen und Entwicklung einer Infrastruktur für die artgerechte Hälterung des Lebendaufwuchses
4) Ermittlung und Verifikation von hydrodynamischen Koeffizienten unter dem Einfluss von marinem Bewuchs
5) Verbesserung des Verständnisses hydrodynamischer Prozesse und der Belastungen von Offshore-Tragstrukturen mit marinem Bewuchs
6) Entwicklung und Anwendung eines Re-Assessment-Tools für Offshore-Tragstrukturen
7) Ausweisung von Optimierungspotential für Gründungsstrukturen

Die hierdurch zu erzielenden Ergebnisse setzen Planer und Behörden in die Lage, die Auswirkungen des marinen Bewuchses an Offshore-Tragstrukturen besser beurteilen zu können. Ingenieure können die Ergebnisse in Form von Handlungswissen zukünftig verwenden.

Teilvorhaben:

JBO wirkt am Projekt in den folgenden Bereichen mit:

i. Review und Recherchen zum Stand der Technik
ii. Verifikation der hydrodynamischen Koeffizienten aus der experimentellen Untersuchung
iii. Bereitstellung von Methoden und Routinen für das Re-Assessment,
iv. Ausweisung von Optimierungspotential für Gründungsstrukturen

Diese Arbeiten finden sind in den Arbeitspaketen (AP) AP 1, AP 3 und AP 5 wieder. Dabei übernimmt JBO im Verbund als Designer von Offshore-Gründungsstrukturen auch die Rolle des Anwenders. In der ersten Phase des Projekts wird vorbereitend auf die folgenden Arbeitspakete der Stand der Technik und über Literaturstudien Analyseansätze sowie Berechnungsverfahren zusammengetragen. Ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsprojekts sind experimentelle Untersuchungen zu hydrodynamischen Koeffizienten, die durch die Expertise von JBO durch Analysen und Auswertungen unterstützt werden und mit Blick auf ingenieurmäßige Anwendung in der Praxis beurteilt werden. Hauptschwerpunkt der Arbeiten liegt in der Entwicklung eines Re-Assessment-Tools, mit dem mariner Bewuchs über hydrodynamische Koeffizienten und damit verbundenen

hydrodynamischen Einwirkungen auf die stahlbauliche Bemessung von Gründungsstrukturen bewertet werden kann. Ziel ist es, durch verbesserte numerische Ansätze sowie einer verbesserten Datengrundlage marinen Bewuchs über hydrodynamische Koeffizienten zu berücksichtigen, um Optimierungen an Offshore-Gründungsstrukturen zu ermöglichen.

Im Detail umfasst EnviSim4Mare sechs Arbeitspakete (AP), die eng zwischen den Verbundpartner verstrickt sind. Nachfolgend sind die Teilaufgaben seitens JBO aufgeführt:

- AP 0: Projektsteuerung und externe Beratung
  - AP 0.3: Gremienarbeit, Normenbildung, Wissenstransfer
- AP 1: Review und Recherchen
  - AP 1.4: Marktanalyse verschiedener OWEA-Gründungen und Assessment zukünftiger Strukturen
- AP 3: Experimentelle Untersuchungen Kraftkoeffizienten – Mariner Bewuchs
  - AP3.5: Analyse der zeitlich veränderlichen Kraftkoeffizienten
- AP 5: Entwicklung eines Re-Assessment Tools
  - AP 5.1: Entwicklung und Implementierung notwendiger Routinen in JBOOST
  - AP 5.2: Vergleichende Berechnungen und Validierungen an Anlagen aus dem Windpark Bard Offshore 1
  - AP 5.3: Aufzeigen von Optimierungspotential an typischen Gründungsstrukturen für OWEA

Abweichend konnten geplante Berechnungen und Validierungen an Anlagen aus dem WP Bard Offshore 1 nicht durchgeführt werden. Alternativ wurden Daten von bereits in der Vergangenheit in einem anderen Wellenkanal durchgeführten wissenschaftlichen Versuchen herangezogen.

Der anvisierte Zeitplan ist in nachfolgender Übersicht dargestellt.

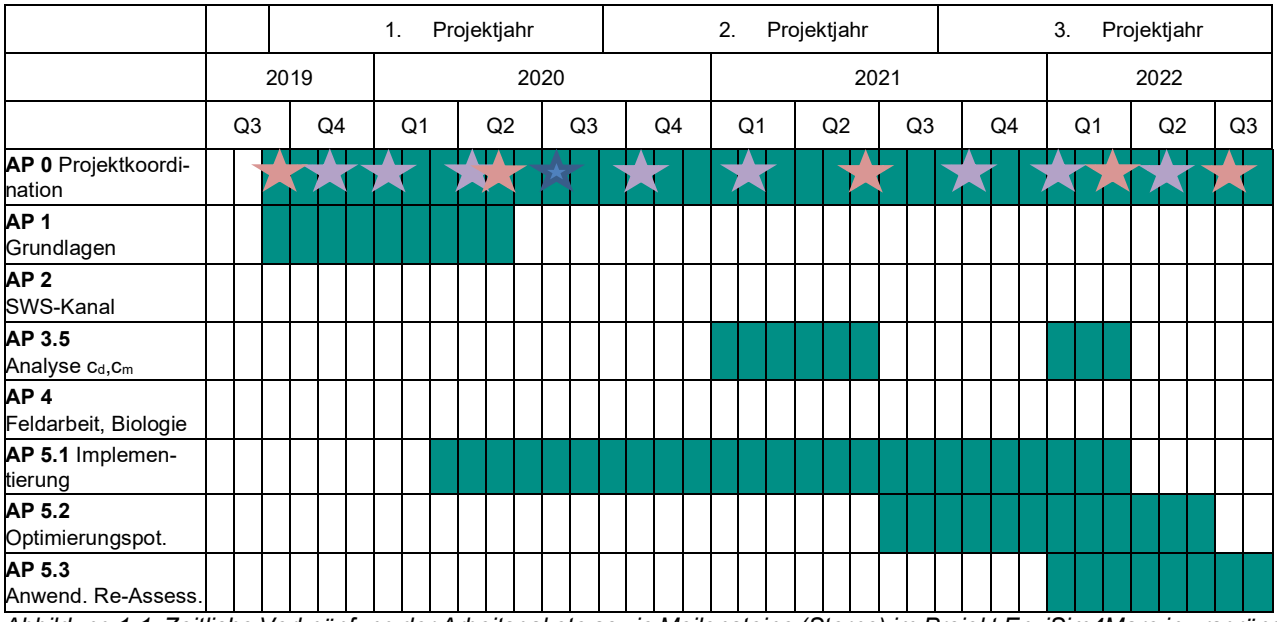

Abbildung 1-1: Zeitliche Verknüpfung der Arbeitspakete sowie Meilensteine (Sterne) im Projekt EnviSim4Mare in ursprünglich geplanter Fassung (Farblich hervorgehoben sind Arbeiten bei JBO)

Der anvisierte Zeitplan musste – wesentlich bedingt durch Verzögerungen beim Bau des SWS-Kanals als auch bei den Versuchen – um 25 Monate verlängert werden.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben ist im engen Verbund mit den Projektpartnern (s. Kap. I.5) im Rahmen eines Kooperationsvertrags durchgeführt worden. Wesentliche Voraussetzung zur Durchführung war die Förderung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) sowie die administrative Unterstützung durch den Projektträger Jülich (PtJ). Der Förderanteil im Vorhaben von JBO betrug 71%.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundvorhaben EnviSim4Mare war ebenso wie das JBO-Teilvorhaben über eine Laufzeit von 36 Monaten vorgesehen und hat planmäßig am 01.12.2019 begonnen. Alle Partner im EnviSim4Mare-Verbund gem. Kap. I.5 haben eine Kooperationsvereinbarung geschlossen, in der wesentliche Eckpunkte der Zusammenarbeit geregelt sind.

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte gem. vorgesehenem Arbeitsplan, d. h. alle geplanten Arbeiten wurden umgesetzt. Im Zeitplan kam es zu erheblichen Verzögerungen, die insbesondere in der verspäteten Inbetriebnahme des Seewasser-Wellen-Strömungskanals (auch bedingt durch erschwerte Randbedingungen) und damit verzögerter Durchführung der Versuche begründet sind. So kam es zu zwei für JBO kostenneutralen Verlängerungen der Projektlaufzeit um insgesamt 25 Monate:

- 1. Verlängerung, bewilligt am 21.07.2022, um 18 Monate bis zum 31.05.2024
- 2. Verlängerung, bewilligt am 04.07.2024, um 7 Monate bis zum 31.12.2024

Bedingt durch die späte Bereitstellung der Versuchsergebnisse kam es bei JBO einerseits zu Zeiträumen ohne nennenswerte Bearbeitungsfortschritte und andererseits zu einer besonderen Konzentration von Arbeiten im 4. Quartal 2024, mit der Folge, dass die geplante Bearbeitungstiefe in gestraffter Form zum Ende geführt werden musste.

4. Wissenschaftlicher Stand, an den angeknüpft wurde

Eine ausführliche Darstellung wird in Kapitel 6 im Abschnitt AP 1 „Review und Recherchen“ wiedergegeben. Im Folgenden wird daher nur ein Kurzüberblick gegeben.

Für die Ermittlung hydrodynamischer Belastungen auf Offshore-Bauwerke stehen verschiedene Berechnungsansätze zur Verfügung, die von sehr komplexen numerischen Modellen wie beispielsweise Computational Fluid Design (CFD) Modellen bis hin zu einfacheren, praxiserprobten und weitverbreiteten Modellen reichen.

Zu den weniger aufwändigen Berechnungsansätzen zählt die Methode von Morison [L1], mit der sich Strömungslasten nicht-brechender Wellen auf Offshore-Bauwerke berechnen lassen. Die Methode kann sowohl auf glatte als auch auf raue zylindrische Strukturen angewendet werden. Auch mariner Bewuchs lässt sich damit bewerten. Grundsätzlich wird dabei auf hydrodynamische Koeffizienten (Kraftkoeffizienten) zurückgegriffen, die aus Versuchen ermittelt wurden und seit vielen Jahren Bestandteil der einschlägigen Berechnungsnormen wie z.B. [N1] [N2] sind.

Mariner Bewuchs ist ein tiefen- und standortabhängiger biologischer Bewuchs auf in Seewasser getauchten Oberflächen sowie in der Spritzwasserzone. Mariner Bewuchs lässt sich in harten und weichen Bewuchs unterteilen, der hinsichtlich der hydrodynamischen Koeffizienten unterschiedlichen Anteil hat. Während der harte Anteil des marinen Bewuchses querschnitts- und widerstandsvergrößernd wirkt, ist der Einfluss des weichen Anteils hinsichtlich des Grenzschichtausbildung beeinflussend und bislang nur bei wenigen Makrophyten untersucht worden [L2] [L3].

Bisherige Versuche haben überwiegend künstliche Oberflächenrauigkeiten berücksichtigt. Die komplexeren Wirkmechanismen von marinem Bewuchs (Struktur, Form, weicher/harter Bewuchs etc.) werden stark vereinfacht auf die Parameter Durchmesservergrößerung und Rauigkeitserhöhung reduziert und über die hydrodynamischen Koeffizienten in der Lastberechnung berücksichtigt. Während für beschichtete Stahloberflächen Rauigkeiten von $k = 5.0 \cdot 10^{-6}\ m$ angesetzt werden, liegt der Bereich für Strukturen mit marinem Bewuchs zwischen $k = 5.0 \cdot 10^{-3}\ m$ und $k = 5.0 \cdot 10^{-2}\ m$ (zwischen 5 mm und 5 cm). Zahlreiche Autoren in der jüngeren Vergangenheit haben dabei auf die uneinheitliche Variabilität der hydrodynamischen Koeffizienten in und zwischen verschiedenen Regelwerken hingewiesen [L4] [L5].

Die Auswirkungen marinen Bewuchses auf Offshore-Bauwerke ist durch erhöhte hydrodynamische Belastung gekennzeichnet, die sowohl unter extremen Bedingungen (Sturmereignis) als auch über die Lebensdauer eine bemessungsrelevante Größe darstellt. Werden die Effekte aus marinem Bewuchs überschätzt, kann dies aufgrund zu hoher Belastungen zu einer weniger wirtschaftlichen Bemessung der Offshore-Bauwerke führen. Ein Unterschätzen der Effekte aus marinem Bewuchs hat ebenfalls negative Auswirkungen (z.B. verkürzte Lebensdauer) und wird üblicherweise durch konservative Annahmen (Dicke und Rauigkeit) vermieden. Um zu wirtschaftlicheren Bemessungen zu gelangen, ist ein verbessertes Verständnis der Wirkung von realem marinem Bewuchs notwendig. Fundamentale Probleme des Verständnisses von Grenzschichtentwicklung bei bewachsenen Oberflächen [L6] lassen sich nur in Laborstudien mit zuvor besiedelten Oberflächen unter kontrollierten Bedingungen testen. Erste Versuche mit künstlichem marinem Bewuchs sind vielversprechend, benötigen allerdings ebenfalls Versuche mit realem marinem Bewuchs [L7].

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Verbundvorhaben EnviSim4Mare wurde während der gesamten Projektlaufzeit eng zwischen den folgenden Partnern zusammengearbeitet:

- Technische Universität Braunschweig, Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI, Koordinator)
- Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI)
- Jörss – Blunck – Ordemann GmbH (JBO)
- Ocean Breeze Energy GmbH & Co. KG (OBE)

Die Partner haben zum Zweck der Zusammenarbeit einen Kooperationsvertrag geschlossen. Die Koordination des Verbundvorhabens liegt beim LWI.

Regelmäßig – auf halbjährlicher Basis – haben Projekttreffen unter Beteiligung aller Partner stattgefunden, zu denen jeweils auch der Projektträger eingeladen war. Auf den Projekttreffen sind die Zwischenergebnisse und Erkenntnisse der Teilprojekte vorgestellt und eingehend diskutiert worden. Als wesentlicher Aspekt zum Ablauf des Gesamtprojekts sind hier die Planungen des SWS-Kanals und der Versuche zu nennen.

II. Eingehende Darstellung

6. Erzielte Ergebnisse und Gegenüberstellung der Ziele

Allgemeines

Nachfolgende Abschnitte sind nach Arbeitspaketen strukturiert. Alle Arbeitspakete wie in der Aufzählung in Kapitel 1 dargestellt sind während der Projektlaufzeit durchgeführt worden. Wesentliche Arbeiten und Zwischenergebnisse sind dargestellt. Die nachfolgenden Darstellungen beziehen sich auf vier Arbeitspakete, an denen JBO mitgewirkt hat.

- AP 0: Projektsteuerung und externe Beratung
- AP 1: Review und Recherchen
- AP 3: Experimentelle Untersuchungen Kraftkoeffizienten - Mariner Bewuchs
- AP 5: Entwicklung eines Re-Assessment Tools

Anhand der Struktur des Gesamtprojekts wird deutlich, dass die Schwerpunkte von JBO in der Anfangs- und Endphase des Projekts liegen. An der Kernaufgabe, dem Bau des Salzwasser-Wellen-Strömungskanals (SWS-Kanal), der Probengenerierung und der Durchführung der Versuche, ist JBO nicht direkt beteiligt. Vor dem Hintergrund ist ein Mehrwert der Ergebnisse vor allem in Verbindung mit den Arbeiten der Projektpartner zu sehen. Ergebnisse hierzu finden sich in den Abschlussberichten der Partner gem. Aufstellung in Kapitel 5.

AP 0 Projektsteuerung und externe Beratung

JBO hat im Rahmen der Projektkoordination Aufgaben der internen Kommunikation, Steuerung und Kontrolle der Arbeitsfortschritte geleistet. Durch Abstimmungen mit Projektpartnern, Projekttreffen und regelmäßigen Besprechungen wurde die zielorientierte Bearbeitung des Projekts gewährleistet und auf Verzögerungen, die sich aufgrund der Corona-Pandemie ergaben, reagiert.

Auf Projektebene wurden Meetings in verschiedenen Formaten durchgeführt. Zu Beginn des Projekts fand am 22.01.2020 ein Kick-Off Meeting in Bremen bei Ocean Breeze statt. Die geplante Auftaktveranstaltung mit externen Vertretern der Industrie musste aufgrund der Corona-Pandemie auf unbestimmte Zeit verschoben werden. Die Projektkoordination konnte durch Online-Meetings trotz Einschränkungen der Corona-Pandemie fortgesetzt werden. Im September 2021 fand ein Workshop am LWI in Brauschweig statt, zu dem auch assoziierte Partner eingeladen wurden. Im ersten Halbjahr 2022 zeichnetet sich ab, dass die geplanten Forschungsarbeiten nicht innerhalb der vereinbarten Projektlaufzeit erfolgen können, weil der Bau des SWS-Kanals mit erheblichen Verzögerungen einherging. Somit waren auch die geplanten Versuche im SWS-Kanal als auch die Bereitstellung der Versuchsdaten direkt betroffen. Im Mai 2022 wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern eine kostenneutrale Verlängerung beantragt und der Projektzeitplan aktualisiert.

Ein weiteres Verbundtreffen wurde im Juni 2023 in Brauschweig abgehalten. Es wurden fachliche Themen präsentiert und diskutiert sowie die Fortschritte des geplanten SWS-Kanals in der Wasserbauversuchshalle besichtigt. Ein weiteres Verbundtreffen fand am 13.Dezember 2023 online statt, bei dem Versuchsergebnisse (Vorversuche) aus dem vorhandenen 2m-Wellenkanal vorgestellt und diskutiert wurden.

Am 10.04.2024 wurde in Abstimmung mit dem LWI der TU-Brauschweig eine zweite Projektlaufzeitverlängerung um weitere sieben Monate beantragt, der sich der Projektpartner AWI nicht mehr anschloss.

Am 29.04.2024 fand die feierliche Eröffnung und Inbetriebnahme des SWS-Kanals statt. Seitens des LWI wurden in den darauffolgenden Monaten weitere Test- und Schulungsläufe am SWS-Kanal durchgeführt,

bevor dann im Oktober 2024 mit der Durchführung der Versuche an Zylindern mit und ohne marinen Bewuchs begonnen wurde. Schließlich lagen Anfang Dezember 2024 alle vereinbarten Versuchsdaten zur weiteren Bearbeitung durch JBO vor.

AP 1 Review und Recherchen

Offshore-Windenergieanlagen bestehen aus der Rotor-Gondel-Gruppe, dem Turm sowie der Unterstruktur. Für die Unterstruktur gibt es unterschiedliche Varianten, die entsprechend den wirtschaftlichen und technischen Bedingungen konstruiert werden. Die Gruppe aus Turm und Unterstruktur wird oftmals als Tragstruktur bezeichnet.

Der am weitesten verbreitete Gründungstyp ist der Monopile. Er wird als Fundament für Offshore-Windenergieanlagen bevorzugt verwendet und kann in hoher Stückzahl gefertigt werden. Für Umspannwerke auf See sind eher Jacket-Gründungen – aufgelöste fachwerkartige Tragwerke – anzutreffen. Gelegentlich werden auch Jacket-Strukturen für Windenergieanlagen als Gründung gewählt. In beiden Fällen, sowohl bei Monopiles als auch bei Jacket-Strukturen, kommen zylindrische und konische Rohre zum Einsatz. Durchmesser von Monopiles liegen in der Regel bei 6 m bis 10 m. Für Jackets werden Rohre mit Durchmessern zwischen 0.5 m und 2 m typischerweise verwendet.

Offshore-Windenergieanlagen sind während ihrer Lebensdauer den ständigen harschen Bedingungen des Meeres ausgesetzt. Die aus Wind, Seegang und Betrieb resultierenden Lasten werden dabei durch die Tragstruktur in den Meeresboden geleitet. Die Tragstruktur und alle weiteren Komponenten der Offshore-Windenergieanlagen sind derart auszulegen, dass sie den Lasten widerstehen. Die Nachweise sind sowohl für Extremlasten als auch für Ermüdungslasten zu führen.

Für die Auslegung von Offshore-Windenergieanlagen sind mehrere Zehntausende von numerischen Simulationen erforderlich, die die unterschiedlichen Lastfälle, die innerhalb der Lebensdauer von mehreren Jahrzehnten auftreten können, abbilden. Diese Lastfälle sind beispielsweise der normale Regelbetrieb, Windböen oder schnelle Richtungswechsel des Windes, Start- und Stoppvorgänge des Rotors oder auch der 50-Jahres-Sturm. Die zu untersuchenden Lastfälle (Design Load Cases, DLCs) sind in den maßgebenden Normen [N3] [N4] beschrieben. Diese Lastsimulationen berücksichtigen die strukturdynamische Antwort der Offshore-Windenergieanlage infolge von Wind, Seegang, Regelung und Controlling der Rotor-Naben-Gruppe nebst den Rotorblättern sowie deren Interaktionen untereinander. Diese Simulationen werden im Zeitbereich durchgeführt und erfordern aufgrund der großen Anzahl an Simulationen einen enormen Rechenbedarf.

Aufgrund dieses schon hohen Aufwands ist die Berechnung der Lasten infolge von Wellen und Seegang nicht mit sehr aufwändigen Verfahren, wie zum Beispiel Strömungssimulationen mit „Computational Fluid Dynamics“ (CFD), sinnvoll. Die hydrodynamischen Belastungen auf Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen infolge von nicht-brechenden Wellen- und Strömungsbelastung werden über die allgemein anerkannte Morison-Gleichung berechnet [L1]. Die Morison-Gleichung ist für schlanke, zylindrische Bauteile anwendbar. Das Verhältnis von Durchmesser zu Wellenlänge der betrachteten Welle soll hierbei nicht den Wert von 0.2 überschreiten. Die Methode von Morison basiert auf einer Unterteilung der wellen- und strömungsinduzierten Anteile in Trägheits- und Widerstandsterme (Formrauheit) und erfordert die Kenntnis der Wellenkinematik am Standort einer marinen Tragstruktur,

$$f = f_d + f_m = C_d \cdot D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot U \cdot |U| + C_m \cdot \rho_w \cdot A \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \qquad \text{Gl. 6-1}$$

mit der welleninduzierten Last f, Lastanteil f_d, der aus dem Strömungswiderstand des Elements resultiert, Lastanteil f_m, der auf die Trägheit der Masse des Elements zurück geht, hydrodynamischer Koeffizient für den

Strömungswiderstand C_d, hydrodynamischer Koeffizient für die Trägheit C_m, lokale Partikelgeschwindigkeit U, Durchmesser des umströmten Elements D, Querschnittsfläche des umströmten Elements A sowie Dichte des Wassers ρ_w.

Je nach Welle und Strukturdurchmesser ist die welleninduzierte Kraft entweder vom Trägheits- und Widerstandsterm dominiert. Dieses ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Unter der Annahme, dass die lineare Wellentheorie zur Berechnung der Wasserpartikelkinematik verwendet wird, entspricht das Verhältnis H/D auf der Ordinate dem $(1/\pi)$-fachen der Keulegan-Carpenter-Zahl. Mit steigender Keulegan-Carpenter-Zahl nimmt der Einfluss des Widerstandsterms bei der Berechnung der welleninduzierten Last zu. Für Monopiles, deren Durchmesser heutzutage im Bereich zwischen 8 m und 10 m liegen, ist bis zu Wellenhöhen von bis zu 15 m der Trägheitsterm maßgebend und der Widerstandsterm von untergeordneter Bedeutung.

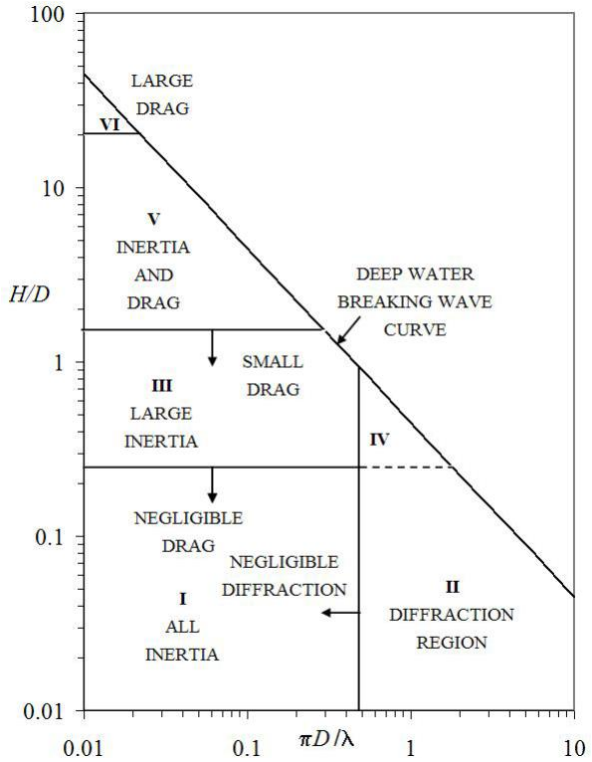

Abbildung 6-1: Vorherrschende Anteile der welleninduzierten Last nach [N1]

Die hydrodynamischen Koeffizienten hängen sowohl von den Strömungsbedingungen als auch von der Oberflächenrauigkeit ab. Dieses wird mit dem Bezug zu marinem Bewuchs im Folgenden erläutert. Mariner Bewuchs hat einen merklichen Einfluss auf die Berechnung der welleninduzierten Lasten und ist somit auch bei der Anwendung der Morison-Gleichung zu berücksichtigen.

Mariner Bewuchs

Offshore-Strukturen sind für die marine Fauna und Flora wie künstliche Riffe. Unterschiedliche Pflanzen und Tiere bilden hier einen Lebensraum. Sie besiedeln die Oberflächen der Unterstrukturen und setzen sich hier fest. Diese sind zum Beispiel Muscheln, Seepocken, Flohkrebse, Seeanemonen oder Algen. Im Allgemeinen wird zwischen hartem und weichem Bewuchs unterschieden. In Abhängigkeit der Tiefe unterhalb des Meeresspiegels sind unterschiedliche Arten in unterschiedlichen Auftretenshäufigkeiten zu finden. Beispielsweise sind in der deutschen Nordsee vornehmlich Miesmuscheln in der Wasserwechselzone zu finden.

Je nach Jahreszeit ändert sich die Dicke des marinen Bewuchses und die Zusammensetzung der marinen Fauna und Flora. Während Stürmen, die hauptsächlich in den Herbst- und Wintermonaten auftreten, werden teilweise Teile des marinen Bewuchses durch die hohen einwirkenden Kräfte von den Unterstrukturen abgerissen. Im Frühjahr werden diese freien Stellen wieder neu besiedelt bzw. von neuen Larven besetzt, die während der dann folgenden Monate wieder wachsen. Der zeitliche Verlauf der mittleren Dicke des marinen Bewuchses ist für die Offshore-Messstation FINO1 sowie für ausgewählte Offshore-Windenergieanlagen im Offshore-Windpark alpha ventus an verschiedenen Tiefen unterhalb des Meeresspiegels in [L8] und [L9] dargestellt, siehe Abbildung 6-2. Bei FINO1, die im Herbst 2003 installiert wurde, zeigt sich im Zeitraum von 2005 bis 2007 der beschriebene Verlauf, während die über das Jahr gemittelte Dicke des marinen Bewuchses nahezu konstant ist. Der Offshore-Windpark alpha ventus wurde im Sommer 2009 errichtet, sodass erst ab dem Frühjahr 2010 ein merklicher mariner Bewuchs festgestellt werden konnte.

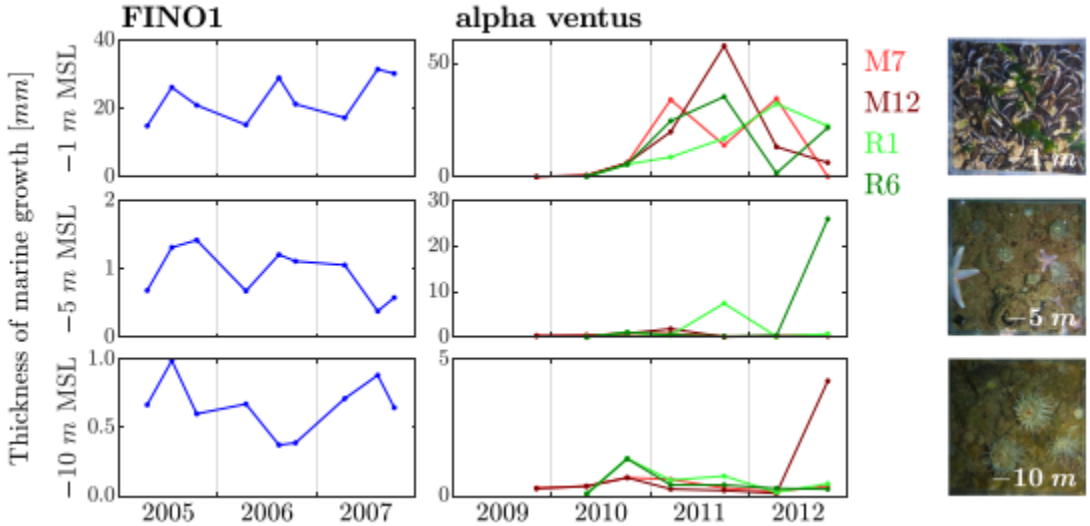

Abbildung 6-2: Zeitlicher Verlauf der Dicke von marinem Bewuchs bei FINO1 und an ausgewählten Offshore-Windenergieanlagen im Offshore-Windpark alpha ventus (aus [L9])

Mariner Bewuchs hat einen großen Einfluss auf die welleninduzierten Lasten und die Strukturdynamik. Daher ist er bei der Lastermittlung und der strukturellen Auslegung der Unterstrukturen zu berücksichtigen. Qualitativ lassen sich allgemein die folgenden Einflüsse von marinem Bewuchs beschreiben. Durch den Aufwuchs erhöhen sich der effektive Durchmesser der bewachsenen Bauteile und die Masse entlang der Bauteile. Durch die höhere Masse, aber unveränderter Steifigkeit, da der marine Bewuchs zu ihr nicht oder höchstens vernachlässigbar beiträgt, reduziert sich die Eigenfrequenz des Bauteils bzw. der Unterstruktur im Allgemeinen. Diese Änderung des strukturdynamischen Verhaltens allein führt zu veränderten Lasten. Ebenso werden durch den erhöhten Durchmesser und den veränderten Oberflächeneigenschaften, da insbesondere durch die erhöhte Rauigkeit die entsprechenden hydrodynamischen Koeffizienten geändert werden, die welleninduzierten Lasten erhöht.

Wie der marine Bewuchs bzw. die damit einhergehende Oberflächenrauigkeit in der Lastsimulation und Strukturauslegung zu berücksichtigen ist, ist in den relevanten Normen und Richtlinien ([N1] [N2] [N3] [N5] [N6]) geregelt und oftmals auch in den projektspezifischen Standortgutachten beschrieben. Jahreszeitliche Veränderungen werden jedoch für gewöhnlich nicht bei der Strukturauslegung berücksichtigt.

Der marine Bewuchs wird wie in Abbildung 6-3 gezeigt für die Lastsimulation modelliert. Der effektive Durchmesser D', der die Dicke des marinen Bewuchses beinhaltet, ist die Summe aus dem Durchmesser D und dem doppelten Wert der mittlere Dicke t des marinen Bewuchses. Dieser Wert wird in der Morison-Gleichung eingesetzt. Die Rauigkeit k ist als mittlerer Abstand aller aufeinanderfolgenden lokalen Minima und Maxima des marinen Bewuchses definiert.

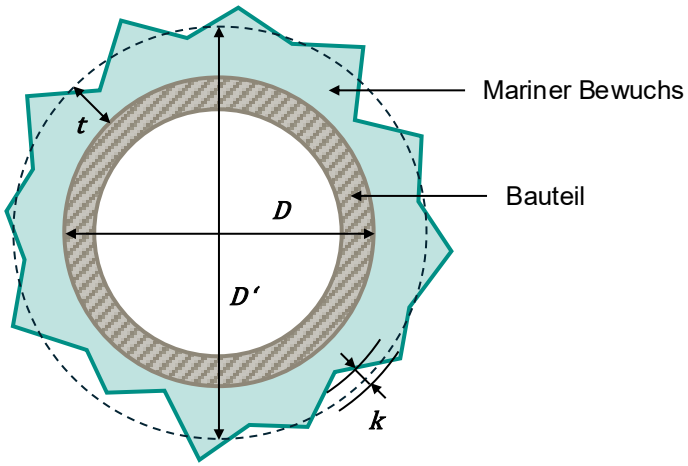

Abbildung 6-3: Definition der Rauigkeit und Dicke infolge marinen Bewuchses

Hydrodynamische Koeffizienten

Die hydrodynamischen Koeffizienten hängen hauptsächlich von den dimensionslosen Kennzahlen Reynolds-Zahl Re, Keulegan-Carpenter-Zahl KC und relativer Rauigkeit e ab. Die aufgezählten dimensionslosen Kennzahlen sind wie folgt definiert.

- Die Reynolds-Zahl gibt das Verhältnis von Trägheitskräften zu viskosen Kräften in einer Strömung an.

  $$Re = U \cdot D/\nu \qquad \text{Gl. 6-2}$$

- Die Keulegan-Carpenter-Zahl beschreibt das Verhältnis der Widerstandskraft zur Trägheitskraft, die auf einen Körper wirken, das relativ zu einem Medium oszilliert. Die Keulegan-Carpenter-Zahl ist klein, wenn die Trägheitskraft dominiert, bzw. groß, wenn die Widerstandskraft dominiert.

  $$KC = U \cdot T/D \qquad \text{Gl. 6-3}$$

- Die effektive Rauigkeit ist das Verhältnis der gemessenen Rauigkeit zum Durchmesser des unbewachsenen Durchmessers.

  $$e = k/D \qquad \text{Gl. 6-4}$$

Die hydrodynamischen Koeffizienten für Wellen und Seegänge berechnen sich in Abhängigkeit von der effektiven Rauigkeit, der Keulegan-Carpenter-Zahl und dem Widerstandskoeffizient bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit. Der Einfluss der Reynolds-Zahl findet zumindest in den Normen keine explizite Berücksichtigung. Der Widerstandskoeffizient für Wellen und Seegänge berechnet sich als Produkt des Widerstandskoeffizienten bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit C_{ds} und dem Wellennachlauferhöungsfaktor WAF bzw. C_d/C_{ds} („wake amplification factor“ im Englischen),

$$C_d = C_{ds} \cdot WAF \qquad \text{Gl. 6-5}$$

Der Widerstandskoeffizient bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit ist von der effektiven Rauigkeit abhängig, und der Wellennachlauferhöungsfaktor ist ebenfalls eine Funktion von der Keulegan-Carpenter-Zahl und der effektiven Rauigkeit.

Die einschlägigen Normen ([N1] [N2] [N3] [N6]) beinhalten Formeln und Kurven für den Widerstandskoeffizient bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit, den Wellennachlauferhöungsfaktor und den Trägheitskoeffizient. Der Widerstandskoeffizient bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit ist konstant für raue Oberflächen mit einer effektiven Rauigkeit $e < 10^{-4}$ und für glatte Oberflächen mit einer effektiven Rauigkeit $e > 10^{-2}$. Für den

Wellennachlauferhöungsfaktor und den Trägheitskoeffizient sind entsprechende Kurven für raue und glatte Oberflächen gegeben. Für effektive Rauigkeiten im Bereich von 10^{-4} bis 10^{-2} werden die entsprechenden Beiwerte mittels Interpolation ermittelt.

Die hydrodynamischen Beiwerte sind auf Grundlage von verschiedenen Versuchsergebnissen ermittelt, wie in Abbildung 6-4, Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 gezeigt. Diese Versuche unterscheiden sich von der Rauigkeit der Probekörper, dem umströmenden Medium sowie den Strömungsbedingungen. Die Datenpunkte in den Abbildungen sind wie untenstehend definiert. Die direkten Quellen sind in den Normen [N2] und [N6] aufgeführt. Da hier der Vergleich und die Bewertung der Versuchsbedingungen im Vordergrund steht, wie in diesem besonderen Fall auf das direkte Referenzieren verzichtet.

- Umströmendes Medium im Versuch: Wasser (gefülltes Symbol), Luft (ungefülltes Symbol)
- Strömungsform: konstant (grau), sinusförmig (hellgrün), Einzelwelle (grün), Seegang (dunkelgrün), unbekannt (hellgrau)
- Rauigkeit: glatt (Kreis), künstliche Rauigkeit (Dreieck), realer mariner Bewuchs (Quadrat)

Zusätzlich sind in den Abbildungen die entsprechenden Ansatzfunktionen zur Modellierung nach [N3] gezeigt. Ohne sie hier darzustellen, ist darauf hingewiesen, dass die Ansatzfunktionen zwischen [N3] und [N1] kleine Unterschiede aufweisen, deren Einfluss auf die Lastberechnung von untergeordneter Relevanz ist.

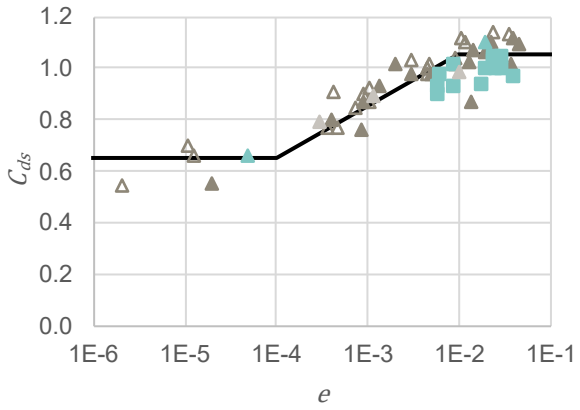

Abbildung 6-4: Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf den Widerstandskoeffizient bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit C_{ds}: Versuch (Datenpunkte) und Modellierung nach [N3] (schwarze Linie)

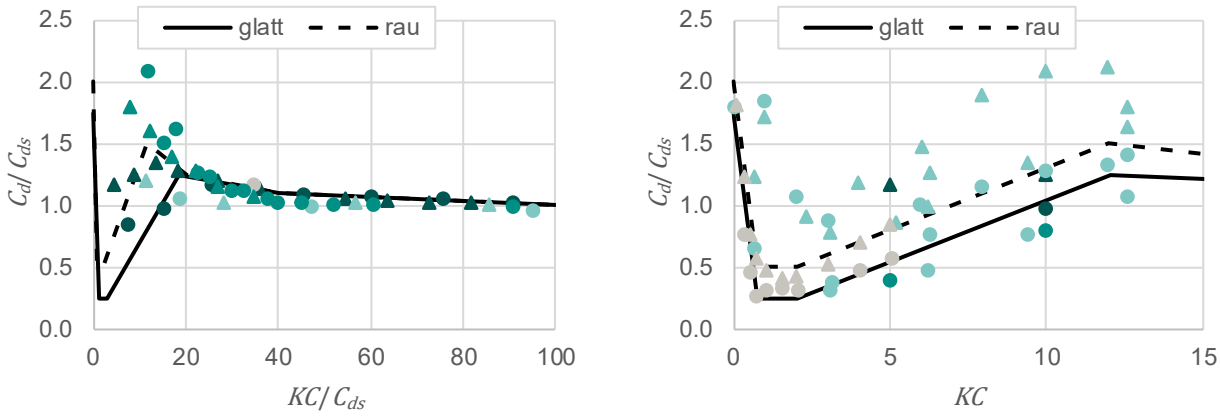

Abbildung 6-5: Einfluss der Keulegan-Carpenter-Zahl auf den Wellennachlauferhöungsfaktor C_d/C_{ds}: Versuch (Datenpunkte) und Modellierung nach [N3] (schwarze Linien)

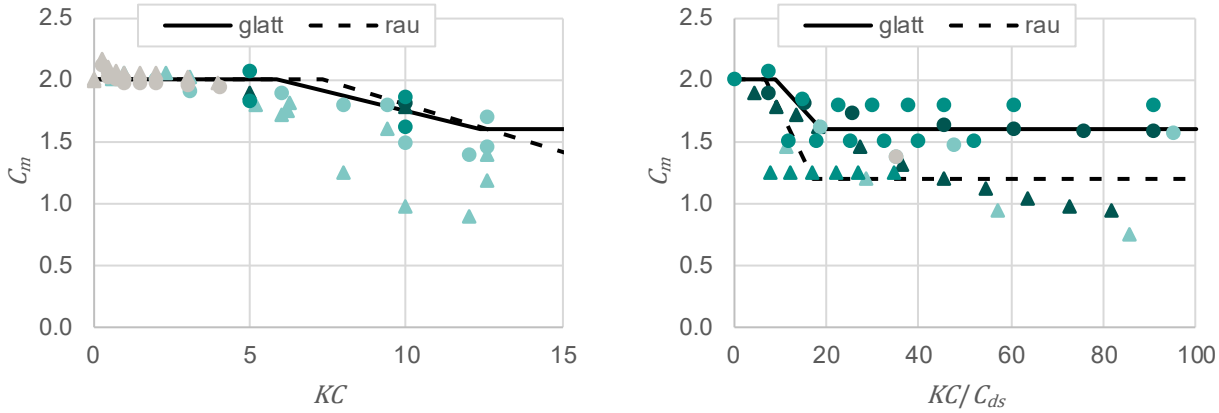

Abbildung 6-6: Einfluss der Keulegan-Carpenter-Zahl auf die Trägheitskoeffiziente C_m: Versuch (Datenpunkte) und Modellierung nach [N3] (schwarze Linien)

Nur wenige Versuche mit realem marinem Bewuchs wurden bisher durchgeführt und sind somit Teil der Datengrundlage für die oben gezeigten Kurven zur Berechnung der hydrodynamischen Koeffizienten. Die einzigen Versuche mit marinem Bewuchs sind bei dem Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf den Widerstandskoeffizienten bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit in Abbildung 6-4 berücksichtigt.

AP 3 Experimentelle Untersuchungen Kraftkoeffizienten - Mariner Bewuchs

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Versuche an maßstäblichen Probekörpern in mehreren Wellenkanälen geplant und durchgeführt. Zum einem wurden Versuche an glatten und mit rauen, künstlich erzeugten Oberflächen im 2m-Wellenkanal des LWIs durchgeführt. Zum anderen wurden nach Fertigstellung des SWS-Kanals im Oktober und November 2024 Probekörper mit lebendem marinem Bewuchs in diesem neuen Kanal untersucht. Die Versuche sind mit Bezug zu den durchgeführten Arbeiten von JBO im Folgenden beschrieben.

Versuche an Zylindern mit glatten und rauen künstlich erzeugten Oberflächen im 2m-Wellenkanal des LWIs

Im November 2023 wurden Versuche an Zylindern mit glatten und mit rauen, künstlich erzeugten Oberflächen im 2m-Wellenkanal des LWIs durchgeführt. Aufgrund der Verzögerungen beim Bau des SWS-Kanals werden mit diesen Versuchen die Methodiken und Algorithmen entwickelt und validiert, die später für die Versuchsauswertung im SWS-Kanal genutzt werden sollen. Unterschiedliche regelmäßige Wellen mit unterschiedlichen Wellenhöhen und -perioden wurden erzeugt, mit denen der jeweilig installierte Probekörper belastet wurde. Der schematische Versuchsaufbau mit relevanten Kenngrößen ist in Abbildung 6-7 gezeigt.

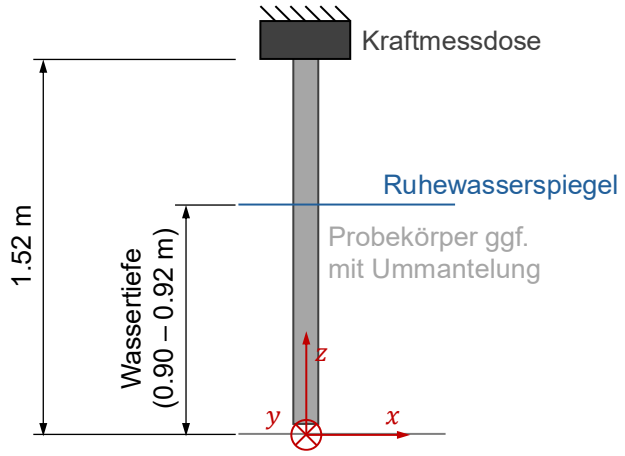

Abbildung 6-7: Schematischer Versuchsaufbau im 2m-Wellenkanal des LWIs

Der Probekörper wird senkrecht an der über dem 2m-Wellenkanal montierten Kraftmessdose befestigt. Das untere Ende des Zylinders hängt frei und ist circa 1 cm bis 2 cm über dem Boden des Versuchsbeckens. Für die numerische Modellierung der Lasten kann der Zylinder als einseitig festeingespannter Kragarm interpretiert werden. Der Kraftsensor misst die Kräfte und Momente in allen sechs Freiheitsgraden. Das dazugehörige kartesische Koordinatensystem ist derart ausgerichtet, dass die x-Achse in Wellenrichtung zeigt, die z-Achse senkrecht entgegen der Richtung der Erdbeschleunigung zeigt und die y-Achse senkrecht zur Wellenrichtung zeigt, wie auch in Abbildung 6-7 gezeigt.

Probekörper

Mehrere unterschiedliche Probekörper wurden im 2m-Wellenkanal untersucht. Die Basis bildet in allen Fällen ein zylindrisches Stahlrohr mit einem Durchmesser von 101.7 mm und einer Wanddicke von 3.2 mm. Dieses wird zum einen direkt als Probekörper verwendet. Zum anderen wird es mit unterschiedlichen Schalen verkleidet, deren Innendurchmesser dem Außendurchmesser des Stahlrohres entsprechen. Diese Schalen wurden vom LWI als 3D-Drucke aus Kunststoff gefertigt. Die äußeren Oberflächen der Schalen bilden entweder die Oberflächen von Miesmuscheln oder die dazugehörige mittlere Dicke. Somit ist ein direkter Vergleich zwischen glatten und rauen Oberflächen möglich, während der mittlere Durchmesser in beiden Fällen gleich ist. Die Muscheloberflächen sind in einem Maßstab von 1:50 den real bewachsenen Bauteilen nachempfunden. Muscheln unterschiedlicher Größe und Orientierung sind als 3D-Druck aufgebaut. Zwei unterschiedliche Modelle von marinem Bewuchs mit verschiedenen effektiven Rauigkeiten von 0.017 und 0.034 sind verfügbar, die auch in Abbildung 6-8 gezeigt sind. Das Stahlrohr kann mit bis zu sechs Elementen der Modelle entlang der Höhe ummantelt werden. Somit sind unterschiedliche Zusammenstellungen der Pfahloberfläche aus den Schalen möglich, um ein Tiefenprofil abzubilden. Mehrere von diesen Zusammenstellungen wurden im 2m-Wellenkanal untersucht.

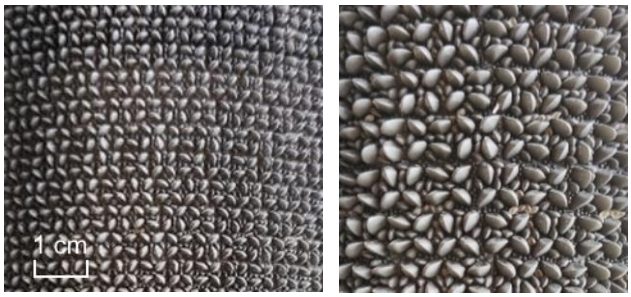

Abbildung 6-8: Modellierte Oberflächen mit effektiven Rauigkeiten von 0.017 (links) und 0.034 (rechts) (Bilder: LWI)

Von dem eingebauten Stahlrohr wurden für die darauffolgenden Versuche die Eigenfrequenzen experimentell ermittelt. Hierzu wurde mit einem Impulshammer der Probekörper angeregt und die resultierenden Energiespektraldichten der Bewegung im Folgenden analysiert. Eigenfrequenzuntersuchungen des Probekörpers nach Einlass des Wassers wurden nicht durchgeführt. Da das Wasser im Probekörper als auch die bei Anregung außerhalb des Probekörpers mitschwingende Wassermasse einen Einfluss auf die Eigenfrequenzen hat, wurde der Pfahl von JBO numerisch abgebildet und hinsichtlich seiner Strukturdynamik analysiert. Der Pfahl und die Einspannung wurden in einer Finite-Elemente-Software modelliert. Die Steifigkeit wurde an der Einspannung an der Kraftmessdose derart kalibriert, dass die ersten beiden Biegeeigenfrequenzen des Probekörpers ohne Wasser den gemessen Werten entsprechen. Nach dieser Validierung des numerischen Modells wurde die Eigenfrequenzanalyse mit einem Wasserspiegel von 0.90 m durchgeführt. Die gemessenen und numerisch ermittelten Eigenfrequenzen sind in Tabelle 6-1 aufgeführt.

Tabelle 6-1: Eigenfrequenzen des eingespannten Probekörpers in Luft und Wasser

	Erste Biegeeigenfrequenz	Zweite Biegeeigenfrequenz
gemessen (trocken)	7.6 Hz	29.4 Hz
modelliert (trocken)	7.60 Hz	29.42 Hz
modelliert (im Wasser)	5.53 Hz	28.15 Hz

Untersuchte Wellen

Die Versuche im Wellenkanal wurden bei Wassertiefen im Bereich von 0.90 m bis 0.92 m vom LWI durchgeführt. Mehrere unterschiedlichen Einzelwellen wurden im 2m-Wellenkanal erzeugt. Diese hatten Wellenhöhen von 0.10 m, 0.15 m, 0.20 m, 0.25 m und 0.30 m sowie Wellenperioden von 1.25 s, 1.50 s, 1.75 s und 2.00 s. Bis auf die Kombination von 0.30 m und 1.25 s, die eine zu steile Welle ist, konnten alle möglichen Kombinationen aus Wellenhöhe und -periode im Versuch erzeugt werden.

Wird ein Maßstab von 1:50 für den Versuchsaufbau angenommen, entspricht das Stahlrohr einem Monopile mit einem Durchmesser von ca. 5 m bei einer Wassertiefe von 45 m. Die Wellen entsprechen Wellenhöhen von 5.0 m, 7.5 m, 10.0 m, 12.5 m und 15.0 m sowie Wellenperioden von 8.8 s, 10.6 s, 12.4 s und 14.1 s.

Ergebnisse

Im Rahmen der von JBO durchgeführten Untersuchungen wurden die Versuchsergebnisse für das nicht ummantelte, glatte Stahlrohr, das vollständig mit der modellierten Oberfläche mit einer effektiven Rauigkeit von 0.017 ummantelten Stahlrohr und das vollständig mit der modellierten Oberfläche mit einer effektiven Rauigkeit von 0.034 ummantelten Stahlrohr analysiert.

Die an der Kraftmessdose gemessenen Kräfte und Momente wurden derart umgerechnet, als sei der Pfahl am Boden eingespannt. Die Kräfte und Momente werden für diese Position im Folgenden analysiert.

Bei den vom LWI übermittelten Messzeitreihen werden nur die Bereiche mit vollständig ausgebildeten Einzelwellen berücksichtigt. Die Zeitreihen werden sowohl als Ganzes für die Spektralanalysen als auch nach Einzelwellen unterteilt genutzt. Die Unterteilung erfolgt wie im Folgenden kurz beschrieben. Die gemessenen Zeitreihen werden für jeden Zeitpunkt mit den dazugehörigen simulierten Wasserspiegelauslenkung verglichen. Hierbei wird die Kreuzkorrelation des momentanen Abschnitts der gemessenen Zeitreihe mit der simulierten Zeitreihe gebildet. Jene Zeitfenster mit ihren dazugehörigen Zeitpunkten, für die die Kreuzkorrelationen ein lokales Maximum erreichen, entsprechen dann den Zeitfenster der Einzelwellen. Neben den Wasserspiegelauslenkungen werden auch die gemessenen Kräfte und Momente für diese Zeitfenster extrahiert und der jeweiligen Einzelwelle zugeordnet. Die Unterteilung einer Messzeitreihe der Wasserspiegelauslenkung in die Einzelwellen ist beispielhaft in Abbildung 6-9 gezeigt.

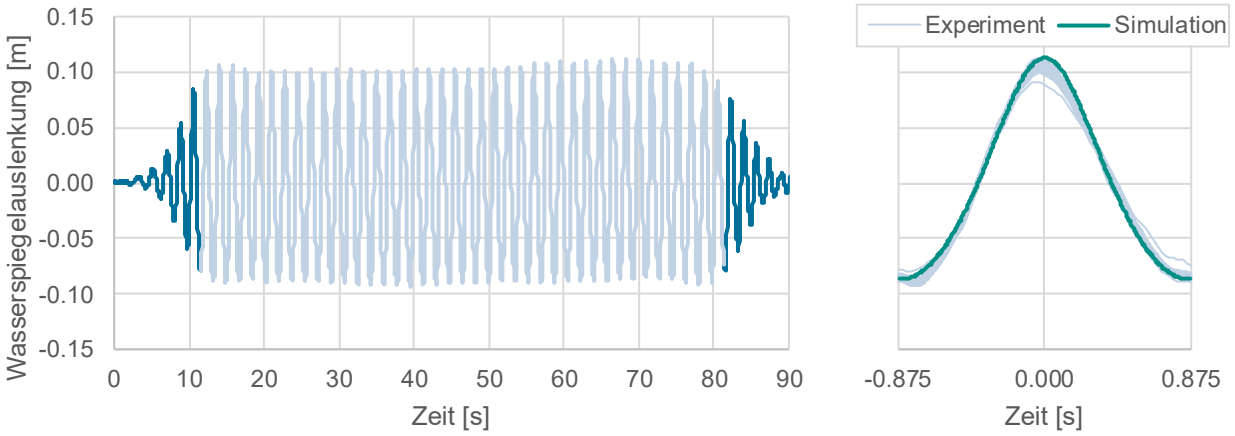

Abbildung 6-9: Messzeitreihe der Wasserspiegelauslenkung (links) und Unterteilung in Einzelwellen (rechts)

Bei der Untersuchung der Messzeitreihen zeigten sich gewisse Auffälligkeiten in den Signalen, auf die im Folgenden eingegangen wird. Beispielhaft sind dazu in Abbildung 6-10 die Schubkraft für den glatten Pfahl und für eine Welle mit einer Wellenhöhe von 0.15 m und einer Wellenperiode von 1.50 s sowie in Abbildung 6-11 das Biegemoment für den Pfahl mit einer effektiven Rauigkeit von 0.017 und für eine Welle mit einer Wellenhöhe von 0.20 m und einer Wellenperiode von 1.75 s, jeweils in und quer zur Strömungsrichtung, dargestellt. Neben den Einzelzeitreihen sind zudem die Energiespektraldichten der gesamten Zeitreihe gezeigt.

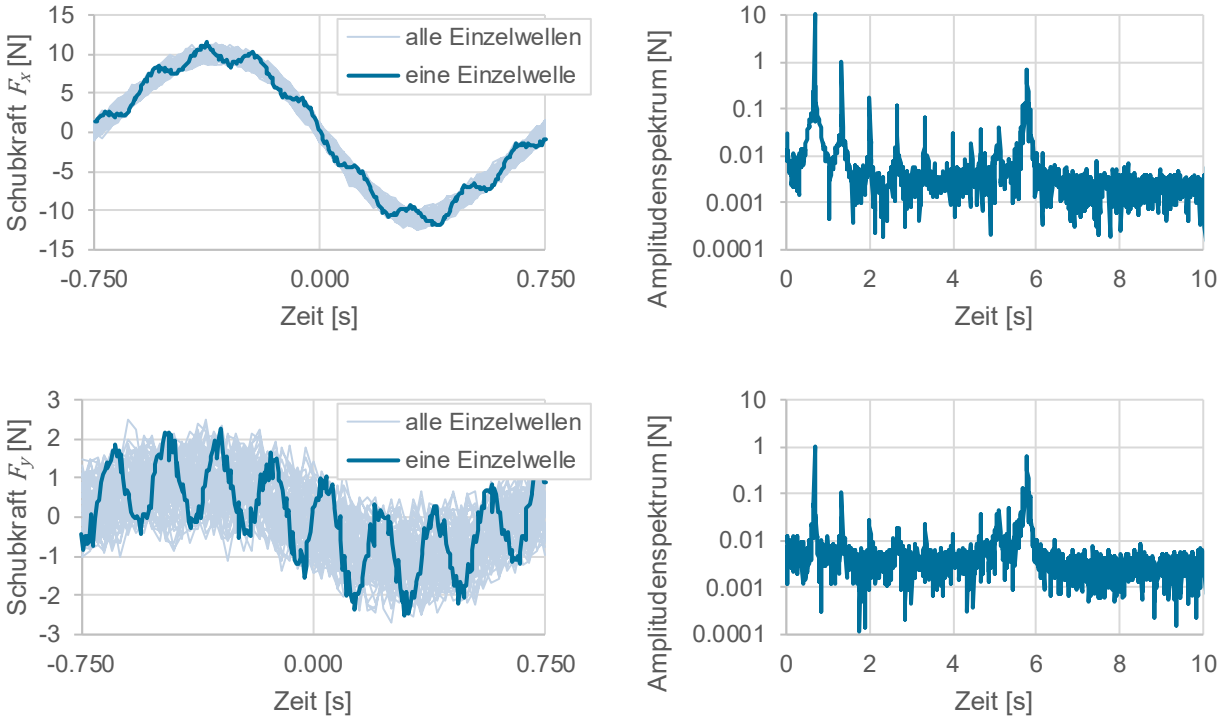

Abbildung 6-10: Einzelzeitreihen (links) und Amplitudenspektren der berücksichtigten Wellen (rechts) für Schubkraft für den glatten Pfahl und für eine Welle mit einer Wellenhöhe von 0.15 m und einer Wellenperiode von 1.50 s (oben: in Strömungsrichtung, unten: quer zur Strömungsrichtung)

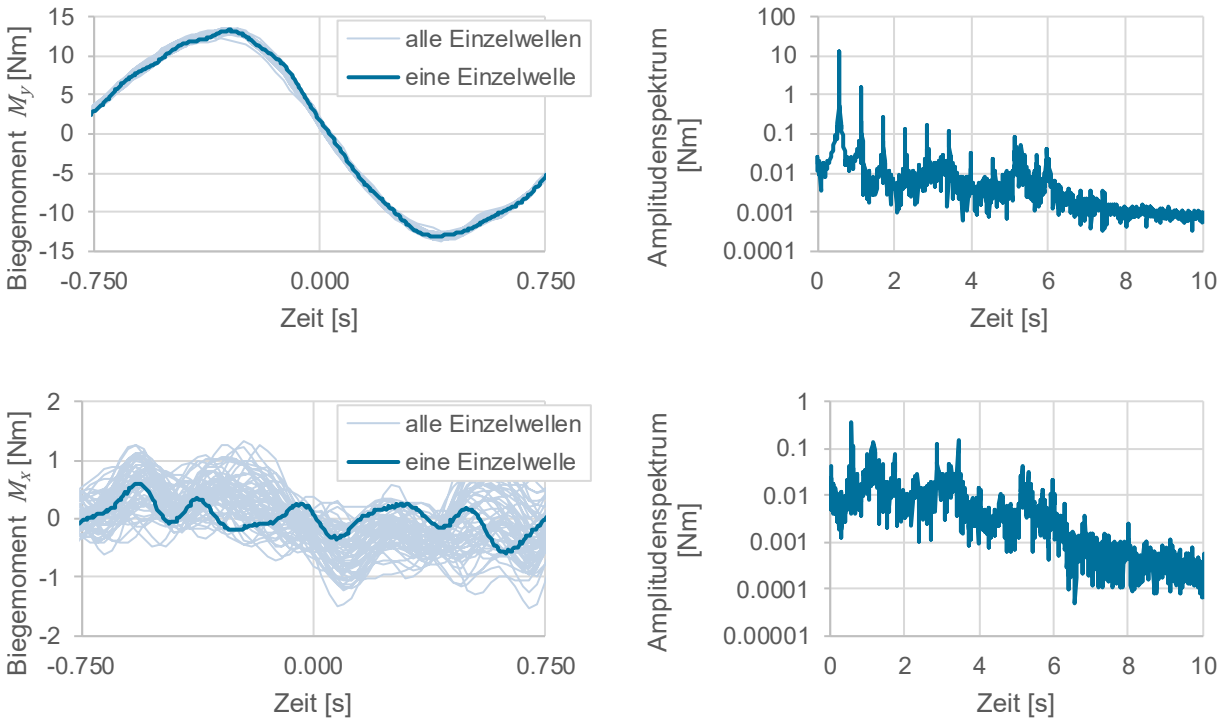

Abbildung 6-11: Einzelzeitreihen (links) und Amplitudenspektren der berücksichtigten Wellen (rechts) für das Biegemoment für den Pfahl mit einer effektiven Rauigkeit von 0.017 und für eine Welle mit einer Wellenhöhe von 0.20 m und einer Wellenperiode von 1.75 s (oben: in Strömungsrichtung, unten: quer zur Strömungsrichtung)

Hauptsächlich ist in den Signalen die Einzelwelle zu erkennen. Bei den Amplitudenspektren sind eindeutig die Amplituden bei der Frequenz der Welle (Kehrwert der Wellenperiode) sowie deren Vielfachen zu erkennen. Zudem sind noch weitere höherfrequenten Anteile in den Signalen zu sehen, die nicht direkt mit der Welle zusammenhängen. Sowohl in Abbildung 6-10 als auch in Abbildung 6-11 ist bei einer Frequenz von ca. 5.5 Hz eine deutliche Erhöhung zu erkennen. Hier wird offensichtlich die erste Biegeeigenfrequenz durch den Versuch angeregt, was sich dann auch in den Verläufen der Lasten wiederfindet. Diese Anregung ist sowohl in Strömungsrichtung als auch quer zu ihr zu beobachten. In Abbildung 6-11 ist zusätzlich bei ca. 1.5 Hz und bei ca. 3.0 Hz eine zusätzliche Anregung im Signal zu erkennen. Hier kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Pfahl durch den Versuch weitere Anregungen, wie zum Beispiel wirbelerregte Quer- und/oder Längsschwingungen, erfährt.

Da die welleninduzierten Lasten bzw. die hydrodynamischen Koeffizienten von der Anströmgeschwindigkeit bzw. Keulegan-Carpenter-Zahl abhängen, ist es auch möglich, dass durch diese zusätzliche induzierte Schwingungsanregung mit einhergehender zusätzlicher Bewegungsgeschwindigkeit des Pfahls die Lasten nichtlinear beeinflusst werden. Mit Bezug auf die Morison-Gleichung nach Gl. 6-1 hat eine zusätzliche Schwingung nicht nur Einfluss auf den zeitlichen Verlauf der Wasserpartikelkinematik, sondern auch auf die hydrodynamischen Koeffizienten. Der Einfluss auf die Wasserpartikelkinematik kann aus den Versuchszeitreihen extrahiert werden, jedoch ist das für den Einfluss auf die hydrodynamischen Koeffizienten nicht möglich.

Unter der Annahme, dass die beschriebenen induzierten Schwingungen keinen Einfluss auf die hydrodynamischen Koeffizienten haben, werden im Folgenden für alle untersuchten Versuche diese Beiwerte ermittelt. Dazu wird mit der Least-Square-Methode die hydrodynamischen Koeffizienten in einem iterativen Prozess derart bestimmt, dass die Summe der Fehlerquadrate für alle Zeitpunkte einer jeden Einzelwelle minimal wird. Aufgrund der konstanten Zeitschrittweite ist die Summe der Fehlerquadrate proportional zum zeitlich gemittelten Fehlerquadrat. Bei nicht-konstanter Zeitschrittweite ist anstatt der Summe der Fehlerquadrate das zeitlich

gemittelte Fehlerquadrat mithilfe numerischer Integration zu ermitteln. Die erforderliche Wasserpartikelkinematik wurde mit der „Stream function wave theory“ nach [L10] modelliert.

Die unten dargestellten Ergebnisse wurden mit den Zeitreihen der Schubkraft ermittelt. Ebenso hätten auch die Biegemomente genutzt werden können. Wie eine kurze, hier nicht aufgeführte Analyse gezeigt hat, hat es keinen merklichen Einfluss, ob die Zeitzeiten der Kräfte oder die der Biegemomente genutzt worden wären.

Für die Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten wurde angenommen, dass diese konstant über die Höhe sind. Ebenso wäre es möglich, die hydrodynamischen Koeffizienten für unterschiedliche Höhen oder für jede einzelne Stromlinie unterhalb der Wasseroberfläche zu bestimmen. Beispielhaft sind in Abbildung 6-12 die hydrodynamischen Koeffizienten für alle Einzelwellen innerhalb einer Zeitreihe für den glatten Pfahl und für eine Welle mit einer Wellenhöhe von 0.20 m und einer Wellenperiode von 1.75 s gezeigt. Die hydrodynamischen Koeffizienten aller untersuchten Pfähle sind in Abbildung 6-13 aufgetragen. Neben den Mittelwerten sind zudem die 90%-Konfidenzintervalle gezeigt.

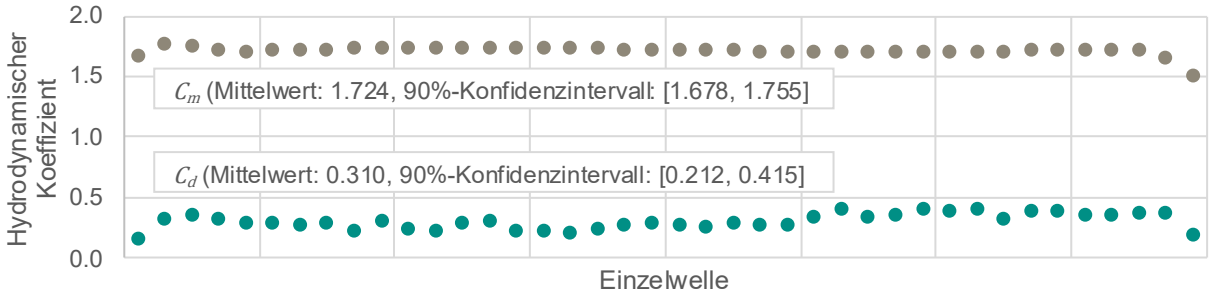

Abbildung 6-12: Hydrodynamische Koeffizienten für alle Einzelwellen innerhalb einer Zeitreihe (hier für den glatten Pfahl und für eine Welle mit einer Wellenhöhe von 0.20 m und einer Wellenperiode von 1.75 s)

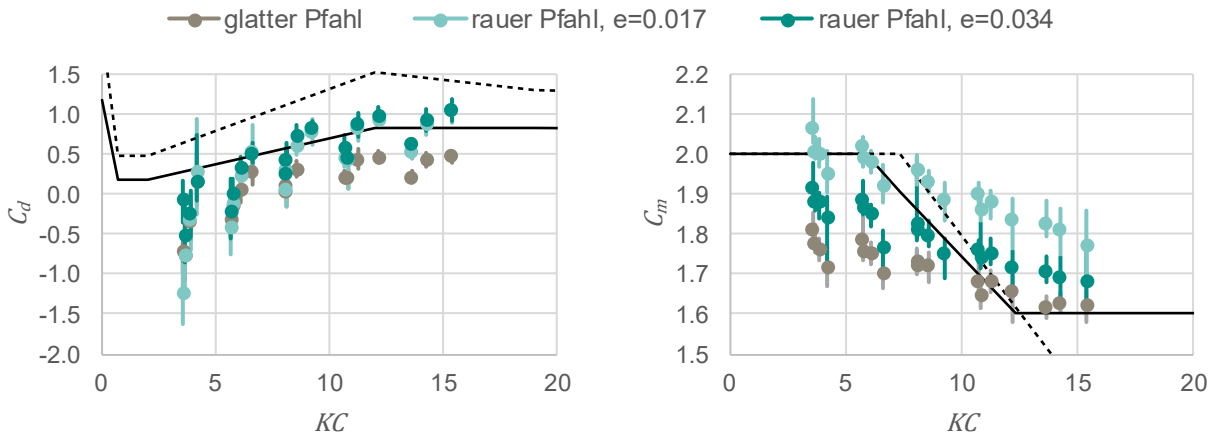

Abbildung 6-13: Hydrodynamische Koeffizienten in Abhängigkeit der Keulegan-Carpenter-Zahl für die drei untersuchten Pfähle (schwarze Linien: hydrodynamische Koeffizienten nach [N3])

Allgemein lässt sich feststellen, dass die aus den Versuchen ermittelten hydrodynamischen Koeffizienten den Verläufen, wie sie in den relevanten Normen aufgeführt sind, gut folgen. Vor allem die Abhängigkeit von der Keulegan-Carpenter-Zahl ist gut zu erkennen und wird vom Trend her korrekt wiedergegeben. Die Werte für die Trägheitskoeffizienten liegen im Bereich der Ergebnisse, die auch in Abbildung 6-6 zu sehen sind. Die Werte für die Widerstandskoeffizienten werden eher unterschätzt, wobei auch einige Werte negativ sind. Hier ist jedoch auch zu beachten, dass nach Abbildung 6-1 die Lasten stark vom Trägheitsterm dominiert werden und damit die Bestimmung des Widerstandskoeffizienten mit größeren Unsicherheiten verbunden ist.

Im Folgenden wird kurz aufgezeigt, welchen Einfluss ein zeitlicher Versatz auf die ermittelten hydrodynamischen Koeffizienten hat. Hierzu werden lediglich die Zeitreihen für den Pfahl mit einer effektiven Rauigkeit von 0.034 analysiert. Unter der Annahme, dass die Lastzeitreihe einen Versatz von -0.05 s bzw. +0.05 s hat, ergeben sich die in Abbildung 6-14 dargestellten hydrodynamischen Koeffizienten. Lediglich Mittelwerte sind hier gezeigt. Auch wenn die gewählten Werte für den simulierten Versatz relativ gering sind, ist der Einfluss auf die hydrodynamischen Koeffizienten sehr sichtbar. Es ist jedoch anzumerken, dass die Unterschiede beim Widerstandskoeffizient für steigende Keulegan-Carpenter-Zahl abnehmen, während beim Trägheitskoeffizient das Gegenteil der Fall ist. Mit Verweis auf Abbildung 6-1 lässt sich festhalten, dass die Unterschiede vor allem in den Bereichen der Keulegan-Carpenter-Zahl größer werden, in denen der Einfluss der jeweiligen Lastanteile geringer wird.

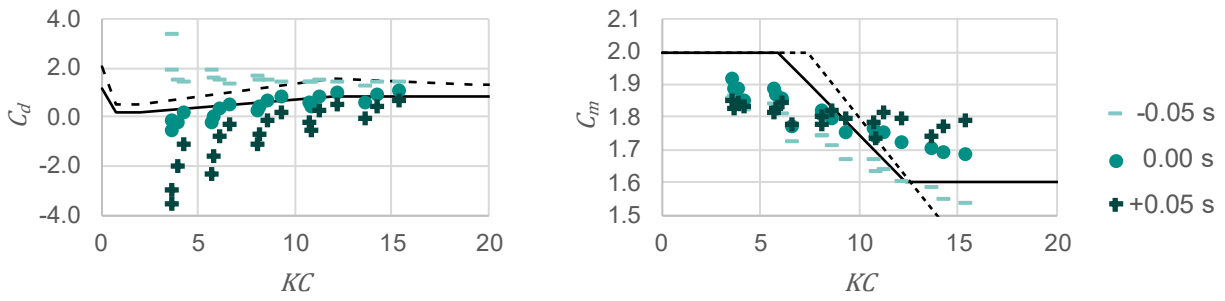

Abbildung 6-14: Einfluss des zeitlichen Versatzes auf die hydrodynamischen Koeffizienten für den Pfahl mit einer effektiven Rauigkeit von 0.034 (schwarze Linien: hydrodynamische Koeffizienten nach [N3])

Versuche an Zylindern mit glatten und rauen, mit realem marinem Bewuchs versehenden Oberflächen im SWS-Kanal des LWIs

Im Oktober und November 2024 wurden Versuche an Zylindern mit glatten Oberflächen und mit realem marinem Bewuchs bewachsenen Oberflächen im SWS-Kanal des LWIs durchgeführt. Unterschiedliche regelmäßige Wellen mit unterschiedlichen Wellenhöhen und -perioden wurden erzeugt, mit denen der jeweilig installierte Probekörper belastet wurde. Der schematische Versuchsaufbau im SWS-Kanal mit relevanten Kenngrößen ist in Abbildung 6-15 gezeigt.

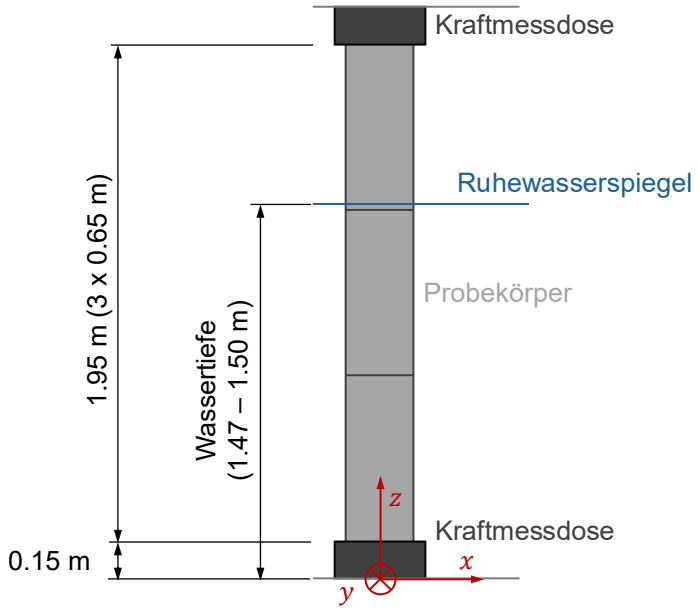

Abbildung 6-15: Schematischer Versuchsaufbau im SWS-Kanal des LWIs

Der Probekörper besteht aus drei Segmenten mit einer jeweiligen Länge von 0.65 m, die übereinander senkrecht auf der am Boden montierten Kraftmessdose befestigt werden. Am oberen Ende des Probekörpers wird eine weitere Kraftmessdose montiert, die über mit einer vom LWI gebauten Konstruktion auf den massiven Wänden des SWS-Kanals verbunden ist. Die Kraftsensoren messen die Kräfte und Momente in allen sechs Freiheitsgraden. Das dazugehörige kartesische Koordinatensystem ist derart ausgerichtet, dass die x-Achse in Wellenrichtung zeigt, die z-Achse senkrecht entgegen der Richtung der Erdbeschleunigung zeigt und die y-Achse senkrecht zur Wellenrichtung zeigt, wie auch in Abbildung 6-15 gezeigt.

Der Versuchsaufbau ist statisch überbestimmt. Entgegen der Vermutung bei Betrachtung des schematischen Versuchsaufbaus kann der Zylinder für die numerische Modellierung der Lasten nicht als beidseitig festeingespannter Balken interpretiert werden. Die Auswertung der vom LWI gemessenen Eigenfrequenzen, die hier nicht aufgeführt ist, lässt diese Annahme nicht zu. Aufgrund der unbestimmten Lagerbedingungen, die durch die Lagerkonstruktion an der oberen Kraftmessdose gegeben ist, kann die Steifigkeit der Anschlüsse nicht hinreichend bestimmt werden. Aufgrund der unbestimmten Lagerbedingungen kann lediglich die Summe der einzelnen Kraftkomponenten von den Kraftmessdosen für die Analyse der Lasten berücksichtigt werden. Eine Verwendung der Biegemomente ist aufgrund der unbestimmten Lagerbedingungen nicht sinnvoll. Ebenso ist es nicht möglich, aus den unabhängig betrachteten Messdaten beider Kraftmessdosen auf eine Verteilung der Last entlang der Probekörper zu schließen. Somit kann lediglich die Summe der Kräfte in Wellenlaufrichtung für die Analyse sinnvoll verwendet werden.

Probekörper

Die Probekörper bestehen aus drei Segmenten, die jeweils eine Höhe von 0.65 m haben. Probekörper mit einem Durchmesser von 0.273 m und 0.102 m wurden untersucht. Die Segmente mit marinem Bewuchs wurden mehrere Jahre zuvor an zwei Orten bei Wilhelmshaven in der Nordsee installiert. Je nach Ort und Tiefe unterhalb des mittleren Wasserspiegels bildeten sich unterschiedliche Lebensgemeinschaften an marinen Bewuchs auf den Segmenten. Hauptsächlich waren die Oberflächen der Stahlrohre von Miesmuscheln und den Bauten von Flohkrebsen besiedelt. Vereinzelt waren Algen und Seeanemonen auf den Oberflächen.

Die folgenden Probekörper wurden im SWS-Kanal untersucht:

- P01 bis P05: Probekörper mit einem Durchmesser von 0.273 m
  - P01: Referenzprobekörper ohne marinen Bewuchs
  - P02: küstennah, geringerer mariner Bewuchs
  - P03: küstennah, geringerer mariner Bewuchs
  - P04: küstenfern, größerer mariner Bewuchs
  - P05: der gleiche Probekörper wie P04, der aus einer anderen Richtung angeströmt wurde
- P06 bis P10: Probekörper mit einem Durchmesser von 0.102 m
  - P06: Referenzprobekörper ohne marinen Bewuchs
  - P07: küstennah, geringerer mariner Bewuchs
  - P08: der gleiche Probekörper wie P07, der aus einer anderen Richtung angeströmt wurde
  - P09: küstenfern, größerer mariner Bewuchs
  - P10: der gleiche Probekörper wie P09, der aus einer anderen Richtung angeströmt wurde

Nach dem Transport der ausgelagerten Probekörper mit dem marinen Bewuchs von Wilhelmshaven zum LWI werden sie im Hälterungsbecken des SWS-Kanals gelagert, um den lebenden marinen Bewuchs zu erhalten. Für die Versuche wurden die verschiedenen Probekörper dem Hälterungsbecken entnommen und jeweils drei Segmente mit marinem Bewuchs im SWS-Kanal übereinander installiert.

Untersuchte Wellen

Die Versuche im SWS-Kanal wurden bei Wassertiefen im Bereich von 1.47 m bis 1.50 m durchgeführt. Mehrere unterschiedlichen Einzelwellen wurden im SWS-Kanal erzeugt. Diese hatten vorgesehene Wellenhöhen von 0.10 m, 0.20 m, 0.30 m, 0.40 m, 0.50 m und 0.60 m sowie Wellenperioden von 2.00 s, 2.50 s, 3.00 s, 4.00 s, 5.00 s und 6.00 s. Nicht jede Kombination aus Wellenhöhe und Wellenperiode wurde für jeden Probekörper erzeugt. Die durchgeführten Versuche sind in Abbildung 6-16 für Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.273 m und in Abbildung 6-17 für Probekörpern mit einem Durchmesser von 102 mm gezeigt. Hier sind zudem die im Versuch gemessenen mittleren Wellenhöhen gezeigt. Allgemein ist zu sehen, dass die gemessenen Wellenhöhen kleiner als die als Zielwert eingestellten Wellenhöhen sind.

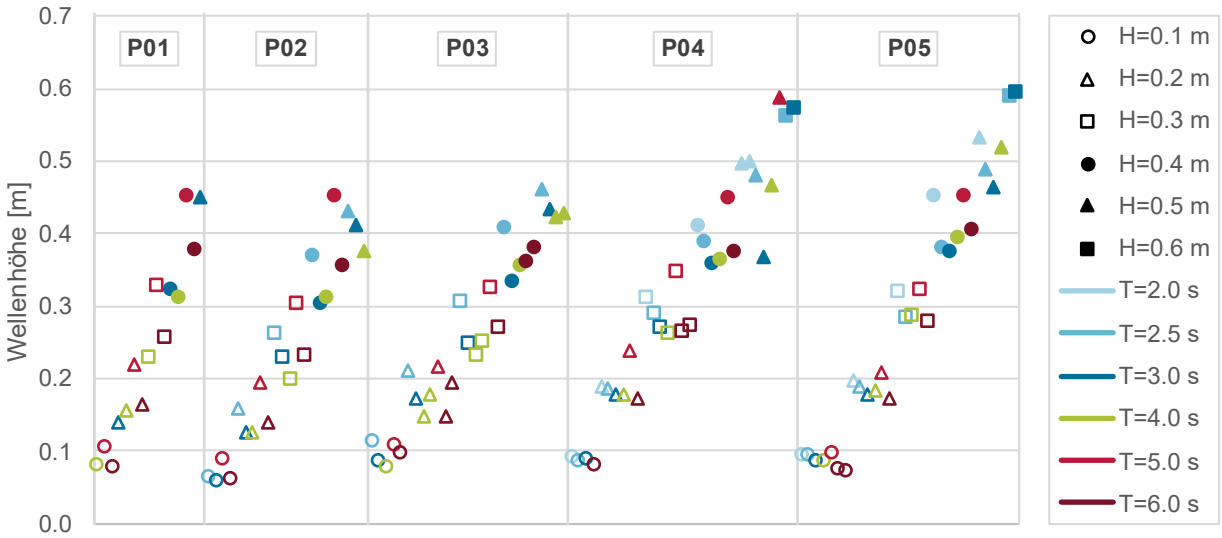

Abbildung 6-16: Gemessene Wellenhöhen für die einzelnen Versuche mit Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.273 m

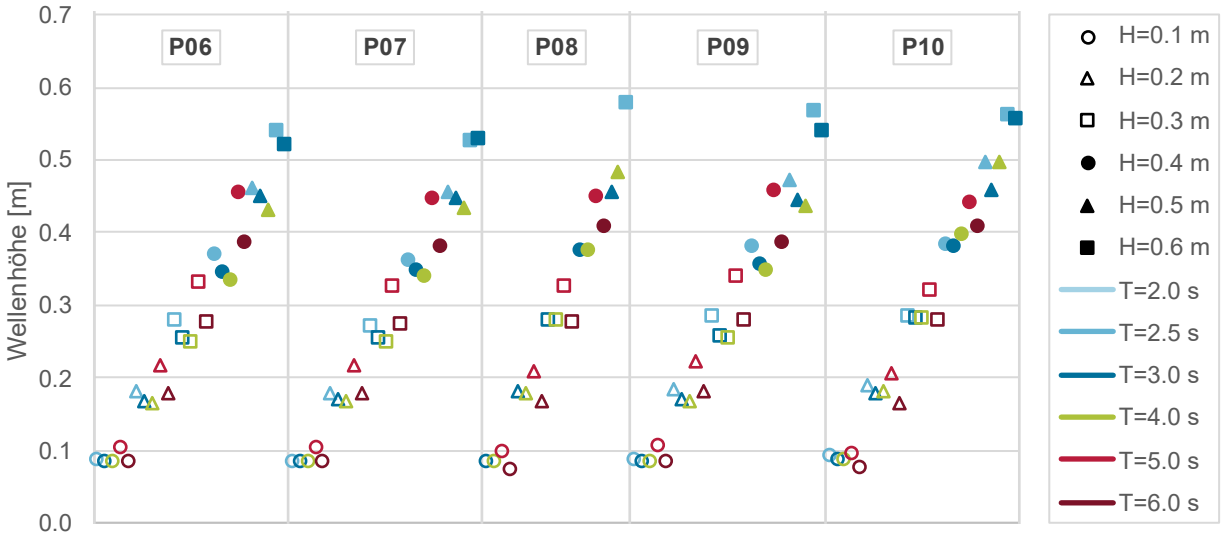

Abbildung 6-17: Gemessene Wellenhöhen für die einzelnen Versuche mit Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.102 m

Modellierung des lebenden marinen Bewuchses

Vor der eigentlichen Versuchsdurchführung wurden die Oberflächen der im SWS-Kanal installierten Probekörper photogrammetrisch aufgenommen und als skaliertes virtuelles 3D-Modell abgebildet.

Jedes der vom LWI bereitgestellten 3D-Modelle wurde virtuell rotiert, verschoben und auf die reellen Abmessungen der Probekörper skaliert. Der Ursprung des kartesischen Koordinatensystems liegt nach dieser durchgeführten Operation am Boden des SWS-Kanals und entlang der Mittelachse der Probekörper, wobei die x-Achse entlang der Wellenrichtung, die y-Achse senkrecht zur Wellenrichtung und die z-Achse nach oben entlang der Mittelachse der Probekörper ausgerichtet ist. Beispielhaft ist in Abbildung 6-18 der originale und der rotierte Probekörper dargestellt.

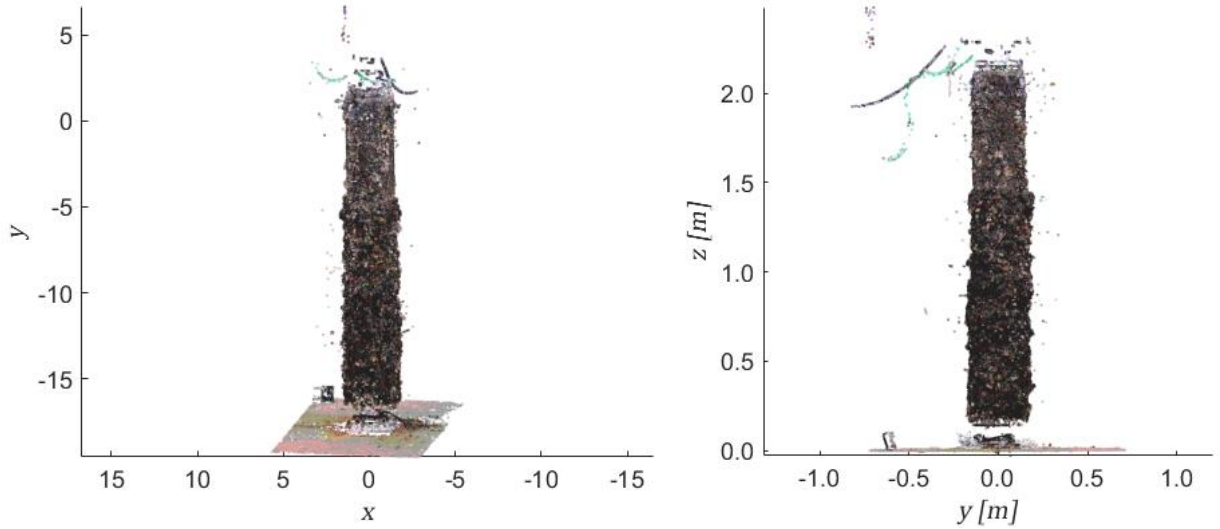

Abbildung 6-18: Photogrammetrisches 3D-Modell des Probekörpers P04: original (links), rotiert, verschoben und skaliert (rechts)

Von besonderer Wichtigkeit ist hierbei die Skalierung der 3D-Modelle, um die Dicke des marinen Bewuchses ohne Modellierungsfehler ermitteln zu können. Die Dicke des marinen Bewuchses wird entlang der vertikalen Achse ermittelt. Für jede entlang der gewählten vertikalen Position werden die gemessenen Oberflächenpunkte über ihren Umfang aufgetragen. Dies ist beispielsweise in Abbildung 6-19 für den Probekörper P04 gezeigt.

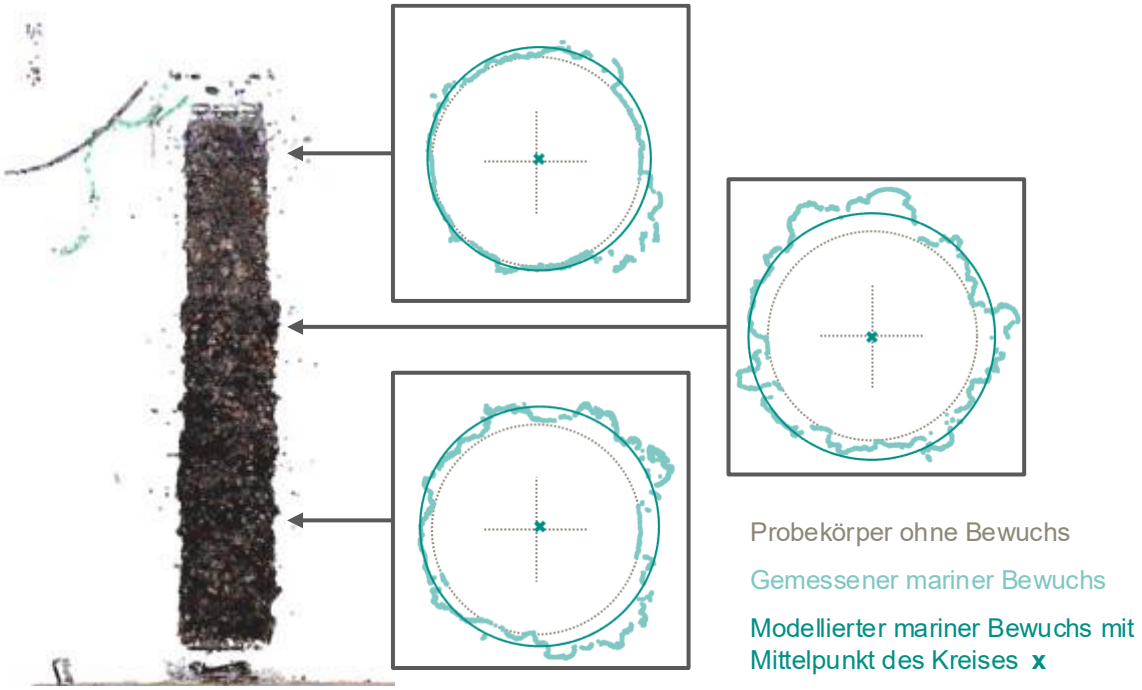

Abbildung 6-19: Probekörper P04 mit Profilen des marinen Bewuchses auf verschiedenen Höhen

Der mittlere Radius wird für jede gewählte vertikale Position durch numerische Integration des Abstands der Messpunkte vom Mittelpunkt des Stahlrohres entlang des Umfangs ermittelt. Dabei wird auf eine ungleichmäßige Umfangsverteilung nicht eingegangen, sondern die Oberfläche nur als idealisiert kreisrund angenommen. Für den Fall, dass zwischen zwei benachbarten Messpunkten der Abstand grösser als 5° ist, wird dieser Abschnitt als unbekannt angesehen und nicht in der Integration und der Berechnung des mittleren Durchmessers berücksichtigt. Die anschließende Subtraktion des Radius‘ der ursprünglichen unbewachsenen Probekörper ergibt dann die mittleren Dicke des marinen Bewuchses für jede gewählte vertikale Position. Die aus den 3D-Modellen abgeleiteten Dicken des marinen Bewuchses entlang der vertikalen Position sind für die untersuchten Probekörper in Abbildung 6-20 gezeigt. Diese Dicken des marinen Bewuchses werden im Folgenden für die Lastsimulation mit dem Re-Assessment-Tool verwendet.

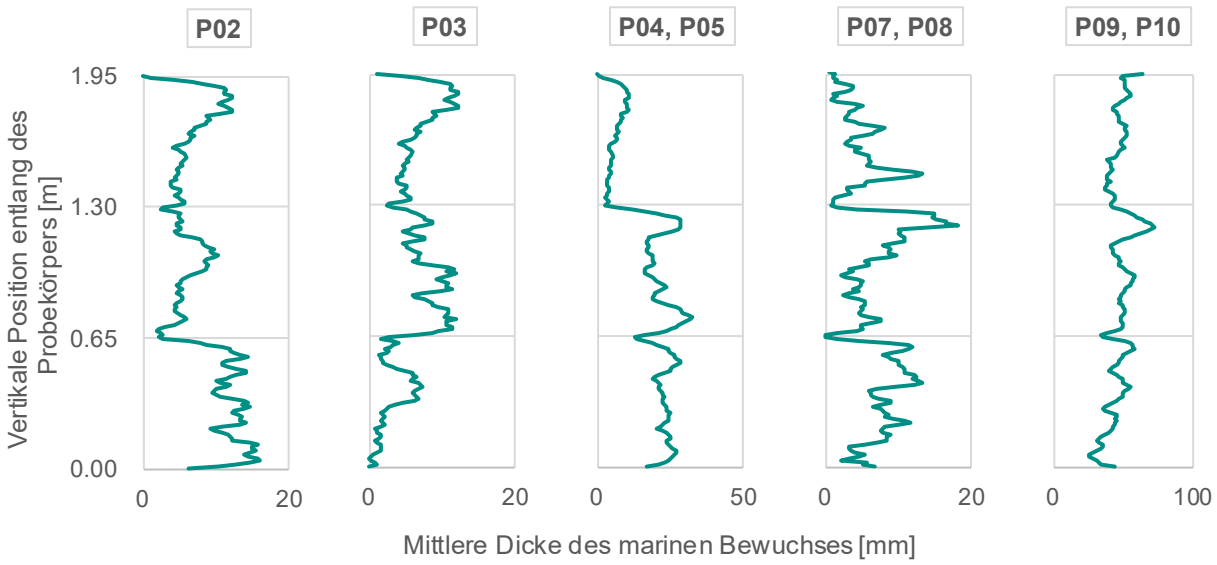

Abbildung 6-20: Mittlere Dicke des marinen Bewuchses für die im SWS-Kanal untersuchten Probekörper

Ergebnisse

Im Folgenden werden die im SWS-Kanal gemessenen und die mit dem Re-Assessment-Tool simulierten Kraftverläufe verglichen. Wie bereits beschrieben, wird lediglich die Kraft in Wellenrichtung betrachtet. Wie schon bei der Auswertung der Versuche im 2m-Wellenkanal wird von den Zeitreihen nur der Bereich mit vollständig ausgebildeten Einzelwellen berücksichtigt. Für die Versuche im SWS-Kanal werden zunächst nur die Kraftverläufe analysiert.

Im Re-Assessment-Tool werden die Wellen mit den im SWS-Kanal gemessenen Wellenhöhen und Wellenperioden simuliert, wie sie in Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 gegeben sind. Der marine Bewuchs für die Probekörper P02 bis P05 sowie P07 bis P10 wird entsprechend der Angaben in Abbildung 6-20 abgebildet. Die Wellen werden mit der „Stream function wave theory“ nach [L10] modelliert. Die hydrodynamischen Koeffizienten für die Morison-Gleichung nach Gl. 6-1 werden nach [N3] in Abhängigkeit der Rauigkeit und Keulegan-Carpenter-Zahl ermittelt. Beispielhaft sind in Abbildung 6-21 die Wasserspiegelauslenkung und die Schubkraft für die Probekörper P01 und P04 für eine Welle mit einer vorgesehenen Wellenhöhe von 0.4 m und einer Wellenperiode von 4.0 s gezeigt. Die Verläufe aus dem Versuch im SWS-Kanal und die berechneten Verläufe aus dem Re-Assessment-Tool werden hier verglichen.

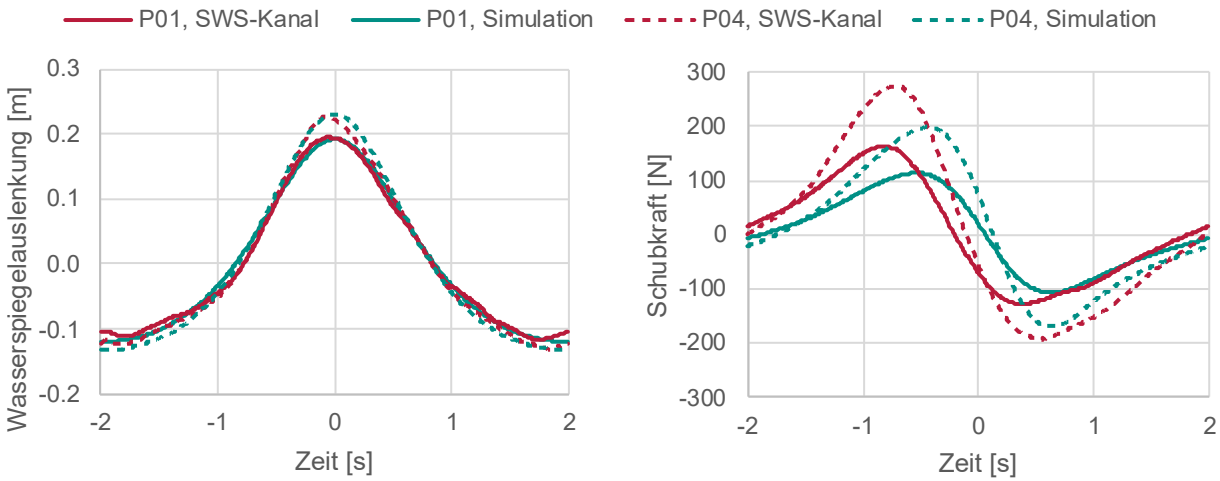

Abbildung 6-21: Wasserspiegelauslenkung (links) und Schubkraft (rechts) für die Probekörper P01 und P04 für eine Welle mit einer vorgesehenen Wellenhöhe von 0.4 m und einer Wellenperiode von 4.0 s

Wie in Abbildung 6-21 (links) zu erkennen ist, liegt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessener und simulierter Wasserspiegelauslenkung bei beiden Versuchen vor. Die sehr gute Übereinstimmung der Verläufe lässt sich auch über die Kreuzkorrelationen der Verläufe ausdrücken, die hier bei 0.9973 für den Probekörper P01 und 0.9986 für den Probekörper P04 liegen. Für alle Versuche lag der Wert der Kreuzkorrelation über 0.96 und für über 90% aller Versuche über 0.99. Diese Werte der Kreuzkorrelation bei der Wasserspiegelauslenkung wurden auch bei der Validierung des Re-Assessment-Tools festgestellt.

Für die in Abbildung 6-21 (rechts) gezeigte Schubkraft liegt keine derartig gute Übereinstimmung vor. Auffällig ist hier bereits, dass die Werte der gemessenen Schubkraft für den Auftretenszeitpunkt des Wellenberges negativ ist, was einen negativen Wert für den Widerstandskoeffizient der Morison-Gleichung bedeuten würde. Die Qualität der Übereinstimmung zeigt sich auch bei der Kreuzkorrelation, den Maxima und den Auftretenszeitpunkten der Maxima. Hier liegen die Kreuzkorrelationen bei 0.8859 für den Probekörper P01 und 0.9048 für den Probekörper P04 (grüne gefüllte Kreise in Abbildung 6-22). Ein Großteil der Kreuzkorrelationen aller durchgeführten Versuche für die Schubkraft liegt unterhalb von 0.90, wie in Abbildung 6-22 gezeigt ist.

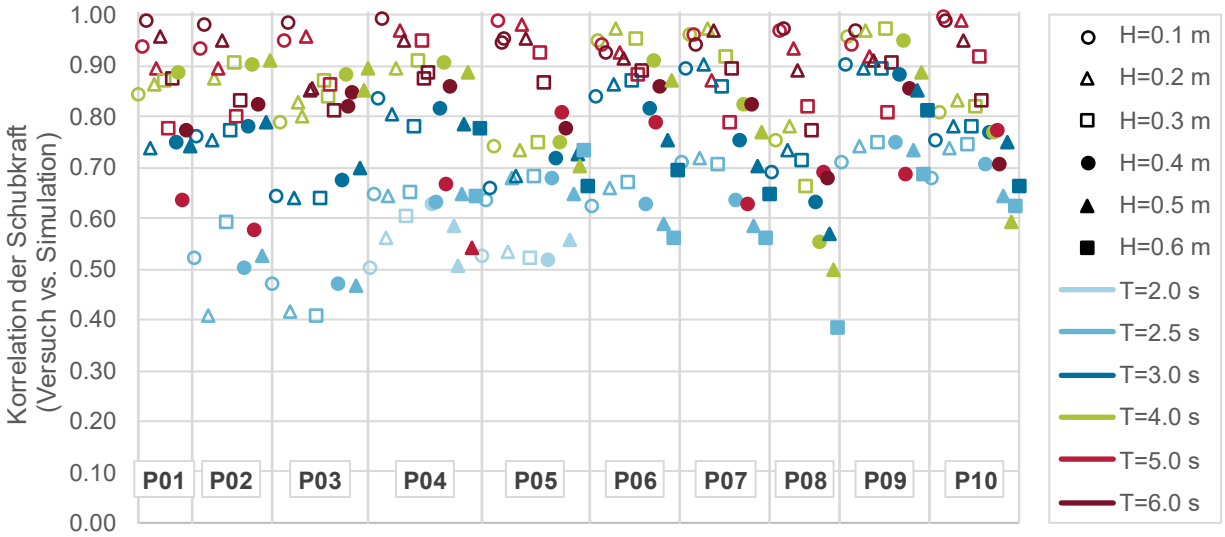

Abbildung 6-22: Korrelation von gemessener und simulierter maximalen Kraft für die einzelnen Versuche

Die Verhältnisse der Maximalkräfte aus Versuch und Simulation sind in Abbildung 6-23 für die Versuche mit Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.273 m und Abbildung 6-24 für die Versuche mit Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.102 m dargestellt. Die Verhältnisse der Maximalkräfte liegen im Bereich zwischen 0.5 und 2.0. Auffällig ist, dass für nahezu alle untersuchten Probekörper die Verhältnisse der Maximalkräfte mit der Wellenperiode steigen, wobei die Wellen mit der Wellenperiode von 5.0 s eine sehr auffällige Ausnahme bilden. Hier sind die Werte deutlich reduziert. Bei den Versuchen mit den Probekörpern P05 und P10 liegen die Verhältnisse der Maximalkräfte für alle Wellen außer derer mit einer Wellenperiode von 6.0 s sehr nahe beieinander. Allgemein sind die Werte für die Verhältnisse der Maximalkräfte für alle Wellen mit einer Wellenperiode von 6.0 s deutlich größer als für die anderen Wellenperioden.

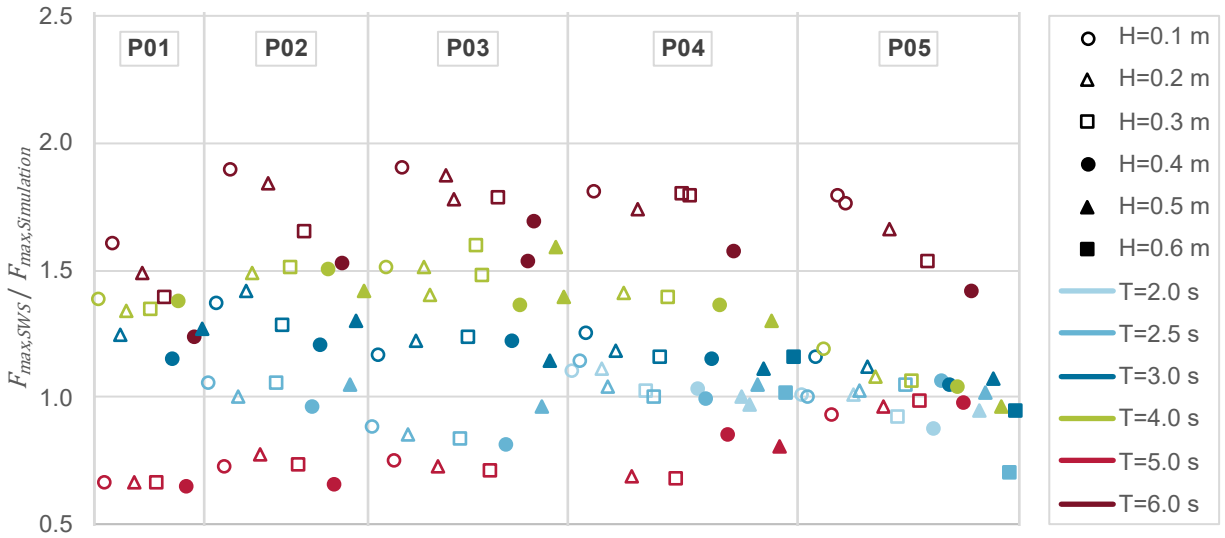

Abbildung 6-23: Verhältnis von gemessener und simulierter maximaler Kraft für die einzelnen Versuche mit Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.273 m

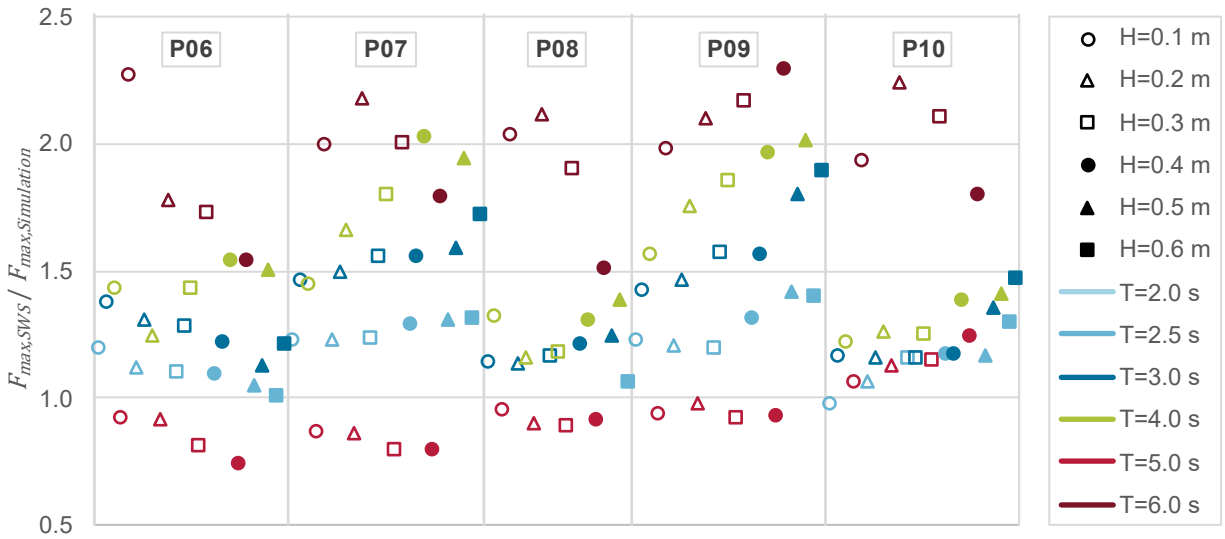

Abbildung 6-24: Verhältnis von gemessener und simulierter maximaler Kraft für die einzelnen Versuche mit Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.102 m

Die relativen Unterschiede zwischen den Auftretenszeitpunkten von gemessener und simulierter maximaler Kraft sind in Abbildung 6-25 für die Versuche mit Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.273 m und Abbildung 6-26 für die Versuche mit Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.102 m gezeigt. Hier wurde die Differenz zwischen den Auftretenszeitpunkten von gemessener und simulierter maximaler Kraft mit der vorliegenden Wellenperiode dividiert. Wie zu sehen ist, tritt bis auf wenige Ausnahmen die maximale Kraft im Versuch früher auf als in den mit dem Re-Assessment-Tool simulierten Verläufen. Die maximalen absoluten Unterschiede liegen bei circa einem Fünftel der Wellenperiode, was einer Phasenverschiebung von 72° entspricht. Für alle Probekörper lässt sich zudem feststellen, dass mit steigender Wellenperiode der Absolutwert des relativen Unterschieds zwischen Versuch und Simulation kleiner wird.

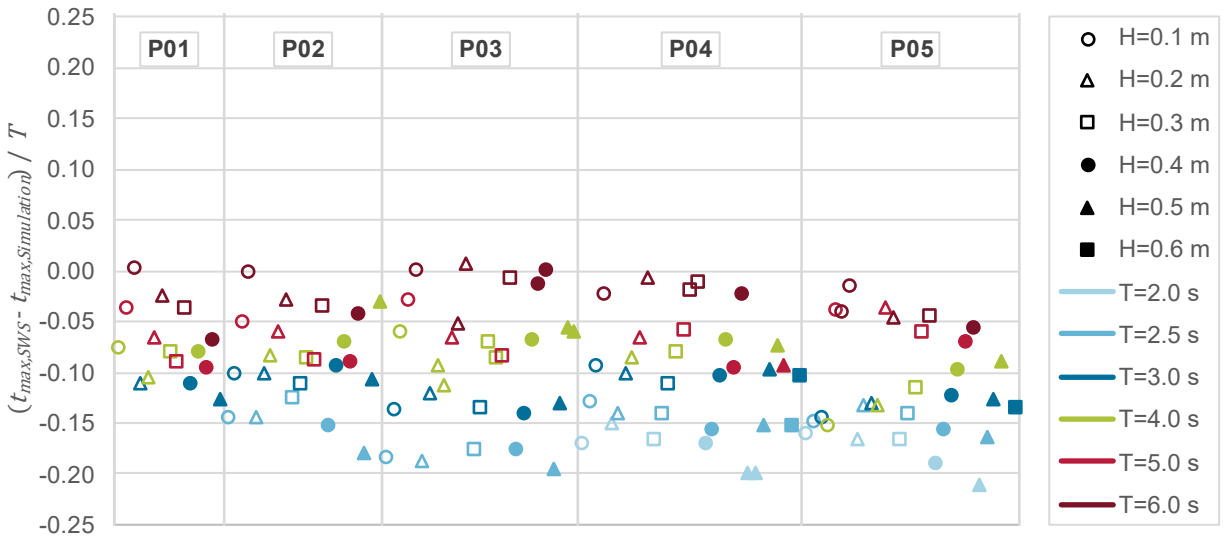

Abbildung 6-25: Relativer Unterschied zwischen den Auftretenszeitpunkten von gemessener und simulierter maximaler Kraft für die einzelnen Versuche mit Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.273 m

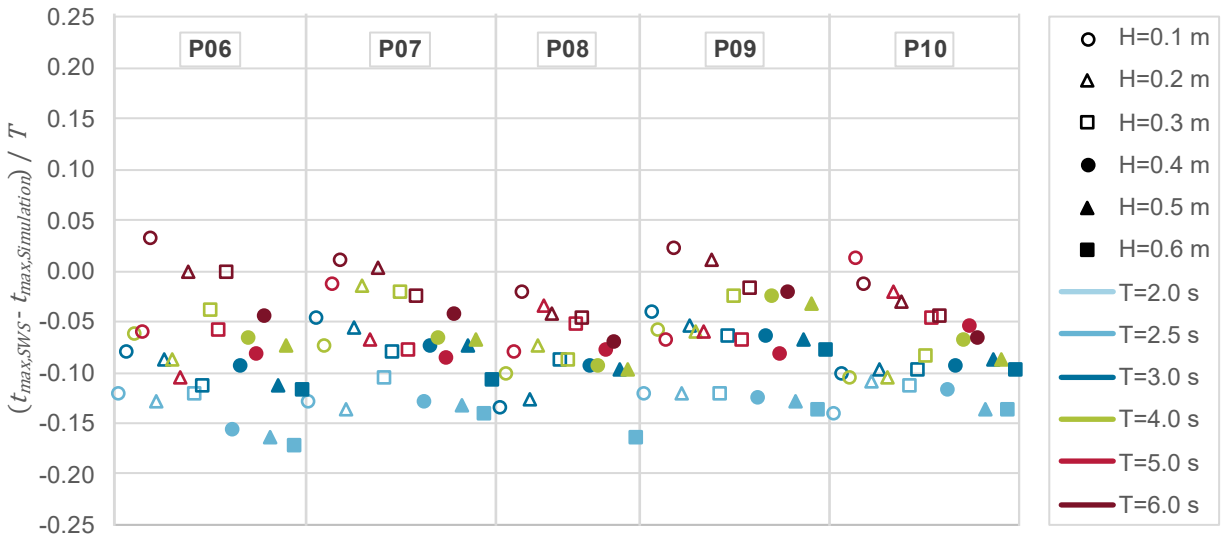

Abbildung 6-26: Relativer Unterschied zwischen den Auftretenszeitpunkten von gemessener und simulierter maximaler Kraft für die einzelnen Versuche mit Probekörpern mit einem Durchmesser von 0.102 m

Die gemessenen Schubkräfte bei den Versuchen aus dem SWS-Kanal weichen unerwartet stark von den mit dem Re-Assessment-Tool simulierten Schubkräften ab. Mit den bereitgestellten Messdaten ist daher eine Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten für diese Versuche nicht zielführend. Die Problematik wurde gemeinsam mit dem Partner LWI besprochen und erörtert. Eine Lösung wurde nicht gefunden.

Dadurch, dass diese Unterschiede sowohl bei glatten als auch mit realem marinem Bewuchs versehenden Probekörpern auftreten, sind diese Unterschiede auch nicht auf den marinen Bewuchs zurückzuführen. Konkrete Gründe für die Unterschiede können zum derzeitigen Zeitpunkt nicht mit Sicherheit genannt werden. Hierzu sind seitens der Versuchsdurchführung noch weitere Untersuchungen an den Messeinrichtungen und Messkonstruktionen erforderlich. Ebenso ist eine Überprüfung der im Versuch erzeugten Wasserpartikelkinematik mit den im Re-Assessment-Tool simulierten Werten sinnvoll. Die Überprüfung der Wasserpartikelkinematik im SWS-Kanal wurde noch nicht durchgeführt.

AP 5 Entwicklung eines Re-Assessment-Tools

Im Rahmen des Teilvorhabens wurde von JBO ein Re-Assessment-Tool entwickelt und implementiert, das die Berechnung und Bewertung von welleninduzierten Lasten mit und ohne marinen Bewuchs ermöglicht. Neben der Verwendung von Ansätzen, die in den relevanten Bemessungsnormen aufgeführt sind, können auch spezifische Ansätze zur Beschreibung von marinem Bewuchs und seinen Einfluss auf die Lastberechnung genutzt werden.

Aufbau des Re-Assessment-Tools

Die Berechnung der welleninduzierten Lasten auf zylindrische Bauteile nach der Morison-Gleichung lässt sich systematisch durchführen und für eine zeitsparende, wiederholende Arbeit in Software-Programmen umsetzen. Die Struktur, wie ein solches Programm aufgesetzt werden kann, ist in Abbildung 6-27 gezeigt. Wie auch der Morison-Gleichung zu entnehmen ist, siehe Gl. 6-1, sind drei Hauptmodule erforderlich. Die hier abgefragten Werte sind für die Berechnung der welleninduzierten Lasten erforderlich. Diese drei Module sind im Folgenden kurz erläutert.

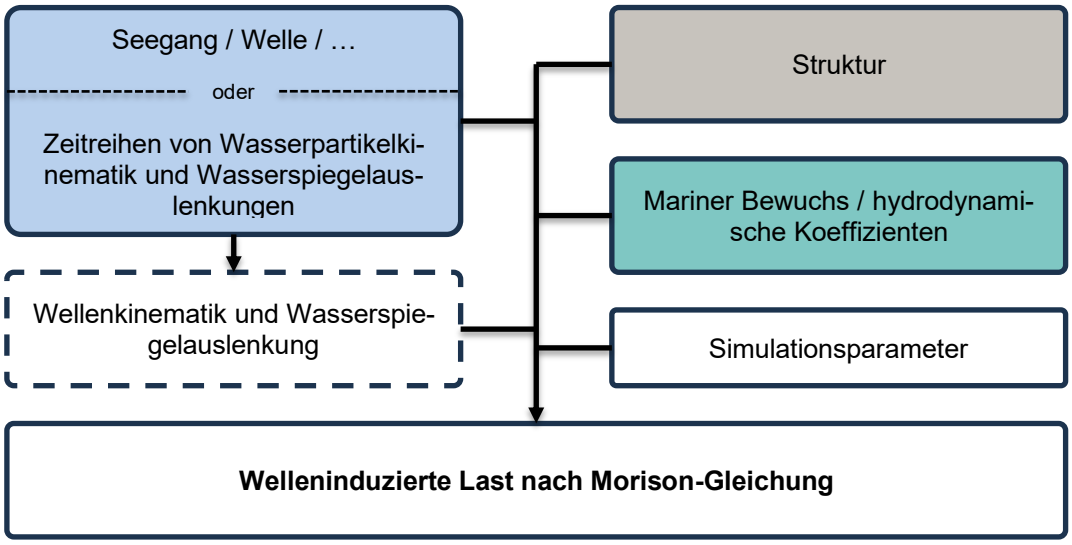

Abbildung 6-27: Schematische Darstellung einer Programmstruktur zur Berechnung welleninduzierter Lasten

- **Struktur**: Die Dimensionen der zylindrischen Bauteile, für die welleninduzierte Lasten berechnet werden sollen, werden hier definiert. Sie umfassen die räumlichen Start- und Endpunkte sowie die dazugehörigen Durchmesser. Die Mittelachsen der Bauteile müssen hierbei nicht zwingend senkrecht sein.
- **Seegang / Welle oder Zeitreihen von Wasserpartikelkinematik und Wasserspiegelauslenkungen**: Die Parameter zur Beschreibung des zu simulierenden Seegangs bzw. der zu simulierenden Einzelwelle werden hier definiert. Diese sind u.a. die Form des Energiedichtespektrums der Wasserspiegelauslenkung, die signifikante Wellenhöhe und Peak-Periode für Seegänge bzw. Wellenhöhe und Wellenperiode für Einzelwellen. Zusätzlich sind die aktuelle Wassertiefe, Strömungsprofile und die Ordnung zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten anzugeben. Weitere Eingabeaufforderungen können beispielsweise das Einbetten ein Einzelwellen in Seegänge oder Berücksichtigung von Diffraktion sein. Diese Angaben sind erforderlich, um die für Berechnung der welleninduzierten Lasten erforderlichen Wellenkinematik und Wasserspiegelauslenkungen zu berechnen. Alternativ können auch Zeitreihen von Wellenkinematik und Wasserspiegelauslenkungen in das Programm eingespeist werden, die beispielweise aus Messungen abgeleitet wurden.
- **Mariner Bewuchs und hydrodynamische Koeffizienten**: Aufgrund der wissenschaftlichen Fragestellung des Forschungsvorhabens EnviSim4Mare wird hier ausführlicher auf die Berücksichtigung von marinem Bewuchs und hydrodynamischen Koeffizienten bei der Berechnung welleninduzierter Lasten eingegangen. Für die Berechnung der hydrodynamischen Koeffizienten nach Norm ([N1] [N2] [N3] [N5] [N6]) ist es empfehlenswert, die hydrodynamischen Koeffizienten bereits als Bausteine in diesem Hauptmodul integriert zu haben. Die in den Normen gegebenen Abhängigkeiten der hydrodynamischen Koeffizienten von den dimensionslosen Parametern der effektiven Rauigkeit, der Keulegan-Carpenter-Zahl und des Widerstandskoeffizienten bei konstanter Strömungsgeschwindigkeit können so bereits berücksichtigt werden. Die Dicke des marinen Bewuchses ist oftmals in Bereiche mit großen vertikalen Ausmaßen unterteilt, in denen die Dicke als konstant angesetzt wird. Das Profil ist für gewöhnlich in den projektspezifischen Dokumenten vorgegeben.

Zusätzlich zu den drei genannten Hauptmodulen ist es empfehlenswert, Simulationsparameter wie Zeitschrittweite sowie Dauer der zu simulierenden Zeitreihe als Eingabewerte abzufragen. Die obige Aufzählung soll keinen Anspruch auf Vollständigkeit darstellen, sondern zeigt nur die wesentlichen Komponenten für die Berechnung welleninduzierter Lasten auf.

Validierung des Re-Assessment-Tools

Wie in jeder Entwicklung üblich wurden die Erweiterungen der Berechnungssoftware im Projekt EnviSim4Mare durch Validierungen und Tests begleitet. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass die Modifikationen korrekt implementiert wurden und zuverlässig funktionieren.

Im Rahmen der Validierungen konnte auf Messdaten zurückgegriffen werden, die 1998 im großen Wellenkanal in Marienwerder bei Hannover aufgezeichnet worden sind und Gegenstand früherer, wissenschaftlicher Untersuchungen und Arbeiten waren [L11] [L12].

Der Versuchsaufbau bestand aus einem glatten großen Pfahl mit einem Durchmesser von 0.7 m im Wellenkanal. Es wurden Wellen der Höhe 1.35 m und Periode 6.0 s bei einer Wassertiefe von 4.78 m erzeugt. In unmittelbarer Nähe zum Pfahl wurden Zeitreihen zur Wasserspiegelauslenkung und zur Wasserpartikelgeschwindigkeiten in der Wasserwechselzone aufgezeichnet. Der Versuchsaufbau wurde im Re-Assessment-Tool modelliert und mit den entwickelten Berechnungsroutinen nachgerechnet. Die Welle wurde mit der „Stream function wave theory“ nach [L10] modelliert. In Abbildung 6-28 werden die im Versuch gemessenen Wasserspiegelauslenkungen und horizontaler Wasserpartikelgeschwindigkeiten auf einer Höhe von -0.14 m unterhalb des Ruhewasserspiegels den Berechnungsergebnissen aus dem Re-Assessment-Tool gegenübergestellt. Die Wasserspiegelauslenkungen werden sehr gut nachgebildet, was sich unter anderem in der Kreuzkorrelation mit einem Wert von 0.9900 widerspiegelt. Wellenberg und Wellental werden sehr gut getroffen. Abweichungen wurden lediglich im Bereich des Wellentals beobachtet, deren Relevanz aber nach weiteren Auswertungen als gering eingeschätzt wurde. Die horizontalen Wasserpartikelgeschwindigkeiten zeigen ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Absolutwerten und den berechneten Werten. Nach diesem ersten Schritt ließ sich feststellen, dass die Wasserpartikelkinematik durch das Berechnungsmodell am betrachteten Beispiel ausreichend genau nachgebildet wird.

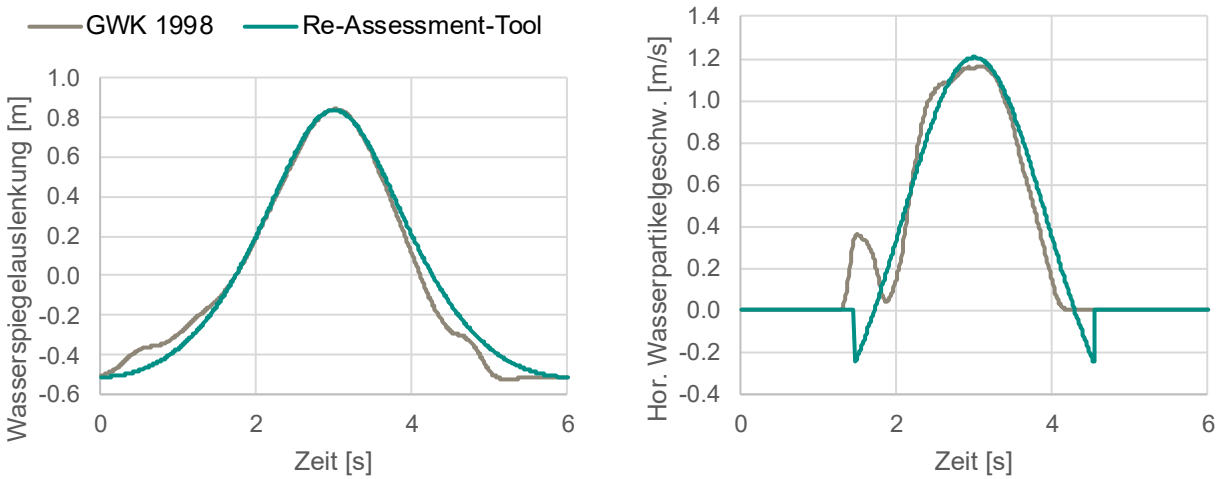

Abbildung 6-28: Vergleich der Wasserspiegelauslenkung (links) und Wasserpartikelgeschwindigkeit in Wasserwechselzone (rechts): Versuch (GWK 1998) vs. Re-Assessment-Tool

Um die hydrodynamischen Koeffizienten und Berechnungen der hydrodynamischen Lasten zu validieren, waren weitere Vergleiche zwischen gemessenen und berechneten Lasten erforderlich, die in Abbildung 6-29 als Schubkraft und Biegemoment gezeigt sind. Auch hier zeigt sich ein hoher Grad an Übereinstimmung. Die Maxima und Minima werden sowohl für Schubkräfte als auch Biegemomente sehr gut abgebildet. Eine geringfügige Phasenverschiebung ist zwischen Messung und Rechnung im Verlauf der Schubkraft zu erkennen. Die Kreuzkorrelationen liegen bei 0.9846 bzw. 0.9839, was ebenfalls den hohen Grad an Übereinstimmung widerspiegelt.

Abbildung 6-29: Vergleich der Schubkraft (links) und des Biegemoments (rechts): Versuch (GWK 1998) vs. Re-Assessment-Tool

Anwendung des Re-Assessment-Tools

Für die Neubewertung oder auch Nachrechnung existierender Offshore-Unterstrukturen sind sowohl die gemessenen Verteilungen der Dicke des marinen Bewuchses entlang der vertikalen Achse als auch die hydrodynamischen Koeffizienten als Funktionen der vertikalen Position sowie relevanter dimensionsloser Kennzahlen in das Software-Programm einzugeben. Vor allem die Verteilung der Dicke des marinen Bewuchses ist räumlich deutlich feiner zu diskretisieren, als dieses für die Profile des marinen Bewuchses nach Normen oder projektspezifischen Angaben der Fall ist.

Die Beiwerte können auch die Form des marinen Bewuchses berücksichtigen, sofern die Form aufgrund der unterschiedlichen Dicken des marinen Bewuchses in Umfangsrichtung nicht mehr als kreisrund angesehen werden kann. Der Einfluss der mittleren Querschnittsform ist besonders bei Querschnitten zu berücksichtigen, deren Durchmesser im Verhältnis zur mittleren Dicke des marinen Bewuchses relativ klein ist. Dies kann vor allem bei den zylindrischen Rohren von Jacket-Unterstrukturen von Bedeutung sein. Bei Monopiles, deren Durchmesser für gewöhnlich erheblich größer als die Dicke des marinen Bewuchses ist, ist eine wesentliche Abweichung von der kreisrunden Form des glatten Monopiles nicht zu erwarten.

Das Optimierungspotential an bestehenden Offshore-Tragstrukturen hängt mit Bezug auf marinen Bewuchs maßgeblich von den hydrodynamischen Koeffizienten ab und konnte im Rahmen von EnviSim4Mare aufgrund fehlender bzw. ungeeigneter Koeffizienten nicht beziffert werden. Das Re-Assessment-Tool ist jedoch so vorbereitet, dass eine Ermittlung des Optimierungspotentials anhand von validen hydrodynamischen Koeffizienten direkt möglich ist.

Zusammenfassung der Arbeiten im JBO-Projektteil zu EnviSim4Mare

JBO hat sich hauptsächlich im Bereich des Re-Assessment-Tools (AP 5) als auch bei der Bestimmung der hydrodynamischen Koeffizienten (AP 3) in das Projekt eingebracht, und hat darüber hinaus auch in anderen Bereichen und bei der Auswertung der Versuchsergebnisse unterstützt.

Im Rahmen des Projektes wurden Routinen zur Berechnung und Bewertung von welleninduzierten Lasten mit und ohne marinen Bewuchs entwickelt und in ein Berechnungsprogramm implementiert. Insbesondere die zeitliche und räumliche Auflösung der hydrodynamischen Koeffizienten stand dabei im Mittelpunkt sowie die Möglichkeit, Versuchsmessreihen zu verarbeiten und Wellenkinematiken, hydrodynamische Koeffizienten als auch Lasten zu modellieren bzw. berechnen. Die Entwicklung des Re-Assessment-Tools wurde anhand von unabhängigen Messdaten erfolgreich validiert und anschließend im Rahmen der Mess-Kampagne eingesetzt.

Im Forschungsvorhaben EnviSim4Mare wurden Versuche an glatten und rauen (mit künstlichem und echtem marinem Bewuchs) zylindrischen Probekörpern in einem 2m-Wellenkanal und dem SWS-Kanal durchgeführt. Die Messdaten wurden mittels des Re-Assessment-Tools ausgewertet und gegenübergestellt. In der ersten Versuchsreihe im 2m-Wellenkanal konnten die Wasserspiegelauslenkungen modellseitig gut repliziert werden. Auf Grundlage der bereitgestellten Messdaten wurden hydrodynamischen Koeffizienten ermittelt.

Anhand der im SWS-Kanal durchgeführten Versuche und generierten Messdaten (Hauptmesskampagne) konnten die Wasserspiegelauslenkungen im Berechnungsmodell gut nachvollzogen werden, während dies für die an den Kraftmessdosen aufgezeichneten Kraftverläufe nicht der Fall war. Anhand der durchgeführten Versuche und bereitgestellten Messdaten ließen sich keine sinnvollen hydrodynamischen Koeffizienten bestimmen, die zu einer präziseren Abbildung des marinen Bewuchses in den Berechnungsmodellen führen könnten. Die Ursachen dafür werden in den Versuchen bzw. Versuchsdaten vermutet. Folglich konnte das mögliche Optimierungspotential an Offshore-Tragstrukturen auch im Projektzeitraum nicht näher beziffert werden.

7. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Zur Durchführung des Forschungsprojekts sind im Kosten von insgesamt **93.249,00 €** kalkuliert worden. 71% davon, nämlich **66.206,00 €** sind mit dem Zuwendungsbescheid des BMWE/PtJ vom 02.12.2019 bewilligt worden. Die übrigen 29% der Projektkosten werden durch den Eigenanteil von JBO aufgebracht. Der Bearbeitungszeitraum ist mit Änderungsbescheiden vom 18.07.2022 und 05.07.2024 um 25 Monate kostenneutral verlängert worden und reicht vom 01.12.2019 bis zum 31.12.2024. In diesem Zeitraum sind die Leistungen erbracht und zahlenmäßig wie folgt nachgewiesen worden. Nachfolgende Zusammenstellung der Einzelpositionen der Gesamtkalkulation basieren auf dem letzten Änderungsbescheid vom 05.07.2024.

Tabelle 7-1: Zusammenstellung des zahlenmäßigen Nachweises

Pos.	bewilligte Kosten gem. Bescheid vom	Verwendung gem. Nachweis
0837 Personalkosten	91.749,00 €	100% + 1.080,60 € aus der Pos. 0838 Reisekosten *(mit Schlussrechnung beantragt)* Nachweis: Stundennachweis
0838 Reisekosten	1.500 €	419,40 € (1.080,60 € nach Pos. 0837 Personalkosten verschoben) Nachweis: Reisekostenabrechnungen
Summe	**93.249,00 €**	**93.249,00 € (100,00%)**

Die bewilligten Mittel sind demnach zu 100% verwendet worden. Die tatsächlichen Projektkosten lagen ca. 1.4% höher als kalkuliert. Diese zusätzlichen Kosten hat JBO übernommen. Eine Verschiebung von Reisemitteln nach Personalmittel war notwendig, um Mehraufwand durch erhöhten Abstimmungsbedarf zu Versuchen im Salzwasser-Wellen-Strömungskanal abzudecken. Im Gegenzug sind weniger Reisekosten angefallen, da Projekttreffen und weiteren Treffen bedingt durch die Corona-Pandemie zu einem Großteil online stattgefunden haben.

8. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Projektes EnviSim4Mare (JBO-Teil, FKZ 03SX495C) geleisteten und im Kapitel 6 dieses Berichts dokumentierten Arbeiten sind gemäß Projektantrag und Bewilligungsbescheid vom 02.12.2019 bzw. seinen Änderungsbescheiden durchgeführt worden. Der Beitrag seitens JBO zum Gesamtvorhaben betrifft im Wesentlichen die Überführung der Erkenntnisse in ein Re-Assessment-Tool zur präzisen Berücksichtigung des marinen Bewuchses im Design sowie die Begleitung des Projekts aus Sicht eines Ingenieurdienstleisters für die Auslegung von Offshore-Tragstrukturen. Damit sichert die Beteiligung von JBO wesentlich die praxisrelevante Ausrichtung des Projekts.

Die finanziellen Mittel zur Durchführung des JBO-Projektteils waren bezogen auf das Gesamtprojekt eher gering. Insofern steht der Aufwand seitens JBO in einem günstigen Verhältnis zum Mehrwert.

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geplanten Arbeiten ist kontinuierlich während des Projektablaufs überprüft worden. Mittel sind nur dort eingesetzt worden, wo es erforderlich für das Gelingen des Gesamtprojekts war. So sind in Zeiten, in denen auf Input gewartet werden musste, nur geringfügig Mittel aufgewendet worden, um die Partner wo nötig zu unterstützen, und am Ende des Projekts standen noch ausreichend Mittel zur Auswertung der Messdaten und abschließenden Kalibrierung des Re-Assessment-Tools zur Verfügung.

Insofern waren die geleisteten Arbeiten in vollem Umfang notwendig und angemessen zur Erreichung der Projektziele.

9. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertung des Ergebnisses

Mariner Bewuchs an Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen führt infolge des höheren Durchmessers und der höheren Rauigkeit der Oberfläche im Bereich der Wassersäule zu höheren hydrodynamischen Lasten aus Welle und Strömung. Diese werden in der Lastsimulation durch angepasste hydrodynamische Koeffizienten berücksichtigt. Mit den Projektergebnissen liegen erstmals Messergebnisse der hydrodynamischen Koeffizienten unter welleninduzierter Belastung unter realitätsnahen Seewasserbedingungen vor, die zu präziseren Angaben für die Lastenrechnung und Reduzierung der Unsicherheiten im Design führen sollen.

Die Ergebnisse können einerseits zur Neubewertung (Re-Assessment) bestehender Gründungsstrukturen eingesetzt werden, um Reserven im Design zu mobilisieren und ggf. eine Nutzungsverlängerung zu ermöglichen. Dazu sind die Erkenntnisse aus dem Projekt bereits in ein bestehendes Re-Assessment-Tool bei JBO implementiert und prototypisch angewendet worden. Andererseits können die Erkenntnisse in der Lastenrechnung neuer Offshore-Windparks berücksichtigt werden.

Insbesondere die Neubewertung bestehender Strukturen ist im Anbetracht von rund 1700 Offshore-Windenergieanlagen allein in Deutschland von zunehmender Bedeutung. Der Nutzen der weniger konservativen Ansätze liegt u.a. im Nachweis einer verlängerten Lebensdauer oder in der Kompensierung von unvorhergesehenen, ungünstigen Umwelt- oder Betriebseinflüssen. Die Praxisrelevanz beider Aspekte steigt mit zunehmendem Alter der Anlagen.

JBO wird die Ergebnisse (Berechnungsmethoden) mit dem erweiterten Re-Assessment-Tool verwenden und Windparkbetreibern gegenüber anbieten. Die Verwertung der experimentellen Ergebnisse ist mit Einschränkungen gegeben und hauptsächlich auf weitere Forschungsarbeiten bezogen.

Die Neubewertung von Offshore-Strukturen gewinnt bei JBO zunehmend an Bedeutung. Mit der Erweiterung des Tools basierend auf den Projektergebnissen nehmen die Einsatzmöglichkeiten zu und die Nachfrage steigt. Auch in Lastenrechnungen für neue Projekte wird JBO die Erkenntnisse einsetzen und somit günstigere Designs ermöglichen. Darüber hinaus wird sich JBO auch an der Verbreitung der Ergebnisse in der Wind-Branche engagieren.

Damit entsprechen die geplanten Verwertungsabsichten weitestgehend dem Verwertungsplan aus dem Projektantrag.

10. Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine Entwicklungen von anderen Stellen bekannt, die den Einfluss des marinen Bewuchses auf die Lasten derart präzise analysieren und die Erkenntnisse in ein verwertbares Tool integrieren.

11. Geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Dieser Abschlussbericht wird – vorbehaltlich von Anpassungsbedarfen aus der Freigabe – in der Technischen Informationsbibliothek in Hannover (TIB) veröffentlicht. Er ist in Verbindung mit den Abschlussberichten der Projektpartner als Teil des Ergebnisses aus dem Verbund EnviSim4Mare zu sehen.

Weitere Veröffentlichungen sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht geplant. Da nicht alle Versuchsdaten vollständig ausgewertet werden konnten, ist es denkbar, dass weitere Ergebnisse aus dem erstellten Datenumfang generiert werden und weitere Erkenntnisse abgeleitet werden können.

III. Erfolgskontrollbericht

Dieser Abschnitt ist Bestandteil des vertraulichen Berichtsteils, s. Anhang [A1].

IV. „Kurzfassung“ (Berichtsblatt)

Dieser Abschnitt ist Bestandteil des vertraulichen Berichtsteils, s. Anhang [A2].