

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Uliczka, Klemens

Wasserbauliche Modellversuche zur Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffahrtsstraße

Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100902>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Uliczka, Klemens (2014): Wasserbauliche Modellversuche zur Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffahrtsstraße. In: RWTH Aachen (Hg.): 44. Internationales Wasserbau-Symposium Aachen, 9. und 10. Januar 2014. Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen Bd. 168. Aachen: RWTH Aachen. S. 1-19.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





44. IWASA

Internationales Wasserbau-Symposium
Aachen 2014

**Wasserbauliches Versuchswesen –
Aus Anlass der Neuen Wasserbauhalle
des IWW**

9. und 10. Januar 2014

Wasserbauliche Modellversuche zur Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße

Klemens Uliczka

Abstract

The Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW) works on the interaction of sea-going ships and approach channels (WSS) in charge of the German Federal Waterways and Shipping Administration (WSV) as well as in R&D-Projects. The focus lies on ship-induced wave and current loads as well as in ship dynamics in waterways of the North Sea and the Baltic. The basic mechanisms of interaction of a ship in channel cruise and the waterway are discussed in detail. A selection of projects confirm exemplarily the hydraulic laboratory practice on the task of WSS as the state of the art and the need of the combination with other methods as field measurement, future numerical calculations and ship handling simulations.

Zusammenfassung

Die BAW bearbeitet im Rahmen der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße (WSS) im Auftrag der WSV sowie in FuE-Projekten sowohl Fragestellungen zur schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastung als auch zur Schiffsdynamik in den Seeschiffahrtsstraßen von Nord- und Ostsee. Die physikalischen Zusammenhänge zwischen der Fahrt eines Schiffs bei Revierfahrt und dessen Wechselwirkung im Revier werden erläutert. Das wasserbauliche Versuchswesen als eine Methode zur Bearbeitung der WSS wird derzeit als unverzichtbar eingestuft und anhand von Projektbeispielen belegt. Die Verknüpfung der verschiedenen Methoden (u. a. Messungen im Modellmaßstab und in der Natur, Numerik, SFS) bei der Bearbeitung von Aufträgen der WSV sowie von Forschungsprojekten zur WSS wird aufgezeigt und für die zukünftige Projektbearbeitung bewertet.

1 Veranlassung

Die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) berät als Oberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) das Ministerium sowie die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) zu Fragen des Verkehrswasserbaus. Die Dienststelle Hamburg der BAW unterstützt diesbezüglich für den Bereich der Seeschiffahrtsstraßen die zuständigen Ämter an Nord- und Ostsee. Im Rahmen von z. B. Ausbaumaßnahmen oder Befahrbarkeitsanalysen werden u. a. von der Abteilung Wasserbau Küste in Hamburg Gutachten und Stellungnahmen im Auftrag

der WSV zur Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffverkehrsstraße erarbeitet sowie Forschungsvorhaben in Kooperation mit Hochschulen oder Universitäten durchgeführt.

Infolge der rasanten Entwicklung der Schiffsgrößen im Seeverkehr in den letzten Jahrzehnten wurden die Zufahrten zu den Seehäfen teilweise an neu festgelegte Bemessungsschiffe angepasst, teils wurden aufgrund von Befahrbarkeitsanalysen außergewöhnlich große Fahrzeuge (AGF's) unter Restriktionen auf den Seeschiffverkehrsstraßen zugelassen.

Trotz Formulierung empirischer und analytischer Ansätze zur Interaktion zwischen Schiff und Wasserstraße seit über 100 Jahren sowie enormen Fortschritten bei der Entwicklung hydrodynamisch-numerischer Berechnungsverfahren im Schiffbau seit ca. 20 Jahren sind gerade für viele Untersuchungen an inhomogenen Seeschiffverkehrsstraßen wasserbauliche Modellversuche nach Stand der Technik erforderlich. Dies betrifft nicht nur Prognosen zur schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastung der Fahrrinnen und Uferzonen sowie z. B. die Ermittlung von schiffserzeugten hydraulischen Bemessungsgrößen für Strombaumaßnahmen, sondern auch die Voraussage der Schiffsdynamik (u. a. Squat, Trimm, Schiff-Ufer- und Schiff-Schiff-Interaktion) im seitlich begrenzten Flachwasser der Seeschiffverkehrsstraßen.

Im Folgenden wird kurz auf die Dimensionen von Seeschiffen und deren Fahrtrevier eingegangen, werden die erforderlichen Randbedingungen und auch die Grenzen wasserbaulicher Modellversuche für die Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffverkehrsstraße aufgezeigt sowie die Anwendung dieser Methode anhand von Beispielen vorgestellt.

2 Seeschiffe und Seeschiffverkehrsstraßen

Auf die heutige Vielfalt sowie die zeitliche Entwicklung der Seeschiffe in Form und Größe wird hier nicht weiter eingegangen, sondern lediglich die derzeitigen Maximalabmessungen von Containerschiffen in Tabelle 1 aufgezeigt.

Tab. 1: Maximalabmessungen der derzeit größten Containerschiffe (Stand 2013)

| | |
|---|-----------------|
| Länge | ca. 400 m |
| Breite | ca. 60 m |
| Tiefgang | ca. 16 m |
| Ladekapazität | ca. 18 000 TEU* |
| * TEU : Twenty-foot Equivalent Unit (ca. 2,5 x 2,5 x 6 m) | |

Einen Eindruck hinsichtlich Größe und Form großer Containerschiffe soll das Foto einer Begegnung von zwei Containerschiffen einer Ladekapazität von ca. 14 000 bzw. ca. 16 000 TEU auf der Unterelbe bei Hamburg vermitteln (Abb. 1).



Abb. 1: Begegnung sehr großer Containerschiffe auf der Seeschiffahrtsstraße Elbe (Foto: BAW, 2012)

Die Wasserstraßen, sowohl Teile der Binnenwasserstraßen als auch der Seewasserstraßen, auf denen Seeschiffe verschiedenster Größe entsprechend zugelassen sind, sind anhand der Seeschiffahrtsstraßen-Ordnung (SeeSchStrO) definiert (u. a. BMVBS, 2013) und durch jeweils aktuelle Bekanntmachungen der WSV ergänzt.

Der Geltungsbereich der SeeSchStrO ist vereinfacht anhand der Karte der WSV in Abbildung 2 kenntlich gemacht.

Damit wird deutlich, dass z. B. die Weser von Bremen bis deutlich nördlich von Wangerooge, der Nord-Ostsee-Kanal zwischen Brunsbüttel und Kiel, die Tideelbe von Hamburg bis seewärts der Insel Scharhörn oder auch der Peenestrom zwischen Festland und der Insel Usedom den Seeschiffahrtsstraßen zuzuordnen sind.

Je nach Ausbauzustand der Fahrrinnen bzw. der Beschaffenheit des Fahrwassers, der jeweiligen Schiffsgröße im Revier sowie der ortsabhängigen Geschwindigkeit der Fahrzeuge durchs Wasser sind mit entsprechenden Wechselwirkungen zwischen den Seeschiffen und der entsprechenden Seeschiffahrtsstraße zu rechnen.

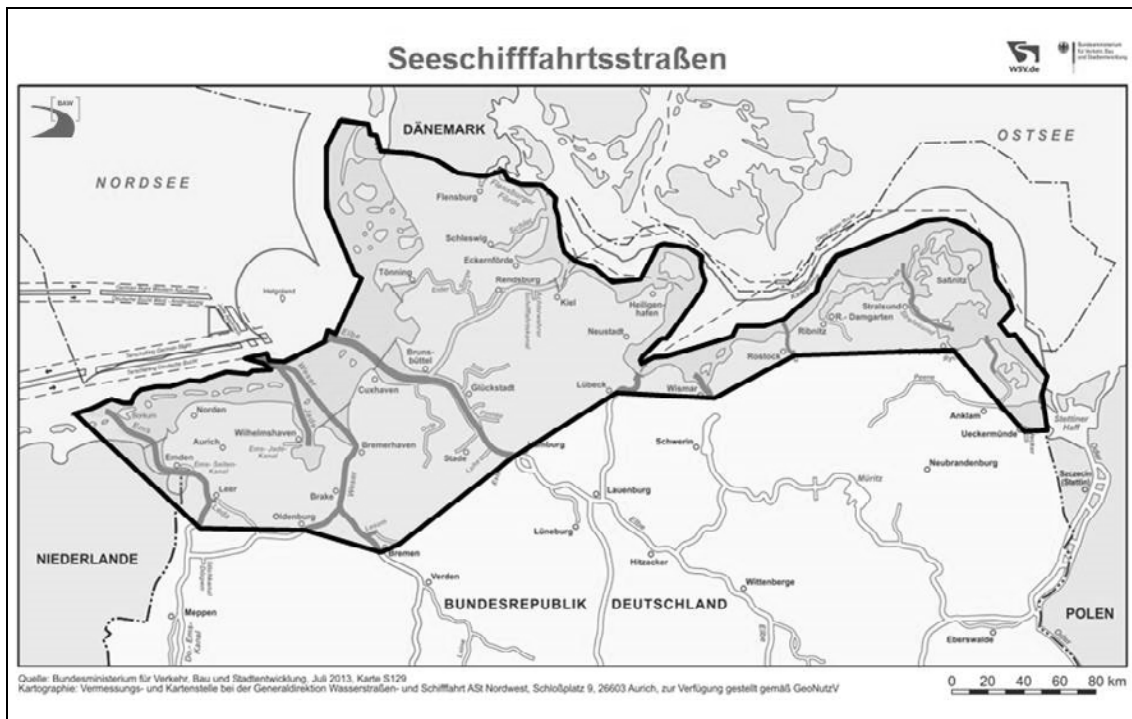


Abb. 2: Geltungsbereich der Seeschiffahrtsstraßen-Ordnung (vereinfacht nach BMVBS, 2013)

3 Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße (WSS)

Bei der Fahrt eines Schiffes durch das Wasser treten infolge der durch das Schiff verursachten Verdrängungsströmung und der damit verbundenen Druck- und Wasserspiegeländerungen am Schiffskörper kurz- und langperiodische Wellensysteme auf.

Die langperiodischen Wasserspiegel- und Strömungsänderungen in tiefen- und seitenbegrenztem Fahrwasser entlang des Ufers der Seeschiffahrtsstraße Elbe bei Hamburg während der Passage eines AGF's sind in Abbildung 3 (oben) dargestellt und definiert (Containerschiff, $l = 366$ m, $b = 52$ m, $t = 12,7$ m, Ladekapazität ca. 14 000 TEU, Fahrt ca. 8–9 kn etwa bei Tnw). Die Wasserstraße, hier sichtbar das Ufer, wird durch die schiffserzeugte Strömung und durch die schiffserzeugte Wellen „belastet“.

In ihrer zeitlichen Abfolge werden anhand Abbildung 3 folgende Änderungen im Flussregime deutlich: Absenk (umgangssprachlich auch: Sog) bis zum maximalen Wasserspiegelabfall etwa mittschiffs, eng verknüpft mit der schiffserzeugten Verdrängungs- oder Rückströmung gegen die Fahrtrichtung, ab etwa mittschiffs die Schwellströmung und auf Höhe des Hecks dann folgend die Heckwelle bzw. Primärwelle (umgangssprachlich auch: Schwell). Dieses langperiodische Wellenbild ist „schiffsgebunden“, d. h. es läuft in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit über Grund mit dem Schiff am Ufer entlang.

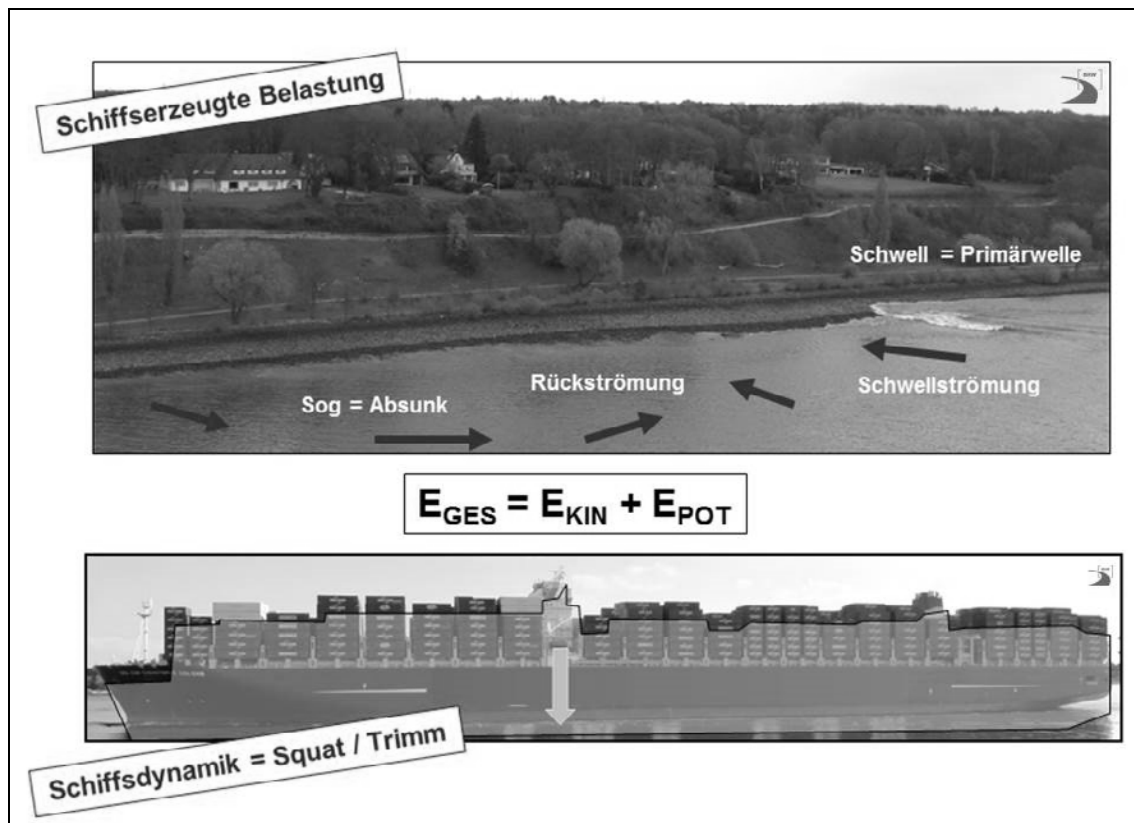


Abb. 3: Fotografische Darstellung und Definition von langperiodischer schiffserzeugter Belastung sowie Squat und Trimm bei der Passage eines außergewöhnlich großen Containerschiffs auf der Seeschiffahrtsstraße Elbe (Fotos: BAW, 2012)

Die schiffserzeugten kurzperiodischen Sekundärwellen sind auf Abbildung 3 nicht sichtbar, da diese aufgrund des Passierabstands von über 200 m zum Ufer und der Wellenfortschrittsgeschwindigkeit dieser Wellen erst später das Ufer erreichen.

Die Größenordnung des Absunks und der Primärwellenhöhe sowie der Verdrängungsströmung wird im Wesentlichen durch die Schiffsgeschwindigkeit und den Passierabstand zum Ufer bestimmt.

Die gegenseitige Abhängigkeit von Wasserspiegeländerung und Verdrängungsströmung kann auch anhand der Energiegleichung (vergl. Abb. 3) beschrieben werden: Die Gesamtenergie E_{GES} , die das Schiff mittels Propeller in die Wasserstraße einträgt, ergibt sich aus der Summe der hier erst ansteigenden kinetischen Energie E_{KIN} - der zunehmenden Rückströmung - und der entsprechend abnehmenden potentiellen Energie E_{POT} - des Wasserspiegel-Absunks. Ab etwa dem hinteren Drittel des Schiffs nimmt die kinetische Energie aufgrund des geringeren achterlichen Spantquerschnitts wieder ab und die potentielle Energie erreicht nach Durchgang der Heckwelle annähernd den Ausgangszustand, den Ruhewasserspiegel.

Die Schiffsdynamik wird in seitlich begrenztem Flachwasser derart beeinflusst, dass die geschwindigkeitsabhängige Wasserspiegeländerung und Verdrängungsströmung zum

einen zu einer Verringerung der Kielfreiheit führt, da das Schiff in das selbsterzeugte langperiodische Wellensystem absinkt (Squat) und in Abhängigkeit der Schiffsform vorlich oder achterlich vertrimmt (Abb. 3 unten). Zum anderen wird bei außermittiger Fahrt ein Ufereffekt (oder: Bank-Effect) eintreten, da die einseitig stärkere seitliche Strömungserhöhung eine Druckdifferenz zum Ufer hin bewirkt, was in etwa - vertikal betrachtet - mit dem Auftriebseffekt an einem Flugzeugflügel verglichen werden kann.

4 Wasserbauliches Versuchswesen zur WSS

Das schiffbauliche Modellversuchswesen in England ist u. a. schon im 18. Jahrhundert illustriert worden (siehe Schneekluth, 1988) und wurde dann im 19. Jahrhundert u. a. durch William Froude in Modellgesetze gefasst. Bei Beachtung der FROUDEschen Ähnlichkeitsbedingungen sowie der REYNOLDSschen Grenzbedingungen sind wasserbauliche Modellversuche zur Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße prognosefähig (vgl. Kobus, 1984). Mögliche Maßstabeffekte können u. a. durch Wahl eines entsprechend großen Modellmaßstabs minimiert werden.

Der Dienststelle Hamburg der BAW steht für wasserbauliche Untersuchungen eine Versuchshalle mit einer Grundfläche von 100 m x 40 m zur Verfügung. Wasserbauliche Flächenmodelle nach Stand der Technik sind derzeit nur für die Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße erforderlich („dreidimensionaler Körper in dreidimensionaler Wasserstraße“). Des Weiteren werden für Grundsatzuntersuchungen zwei Umlaufrinnen betrieben (Freispiegelgerinne: 80 m x 1,5 m x 1,5 m bzw. 30 m x 0,5 m x 0,5 m).

Beispielhaft ist in der Abbildung 4 ein Modellversuch zur Prognose der schiffserzeugten Belastung einer Uferböschung bei gleichzeitiger Erfassung der Schiffsdynamik (Squat und Trimm) sowie der am Schiffsmodell auftretenden Querkräfte und Giermomente dokumentiert.



Abb. 4: Modellversuch Maßstab 1:40 zur Ermittlung der schiffserzeugten Belastung einer Böschung bei Passage eines PanMax-Containerschiffs (Foto: BAW, 2009)

Der BAW verfügt derzeit u. a. über eine Schiffs-Modellfamilie im Maßstab 1:40 mit 10 Modellen, die neben PanMax- und PostPanMax-Containerschiffen auch PanMax-

und PostPanMax-Massengutschiffe sowie Sonderfahrzeuge repräsentieren¹. Die Modellschiffe fahren als funkferngeschaltete Selbstfahrer (Propellerantrieb), deren vertikale Bewegung (Squat, Trimm) ermöglicht ist, welche mittels Laser-Zielplattensystem gemessen wird. Querkräfte und Giermomente werden über ein seitliches, zusätzlich angetriebenes Führungssystem abgetragen, über das redundant (Biegestab sowie Drucksensoren) die jeweiligen Größen erfasst werden.

4.1 Bewertung alternativer Methoden zur Prognose der WSS

4.1.1 Empirische und analytische Berechnungsansätze

Zur Berechnung der schiffserzeugten Belastung einer Wasserstraße, z. B. durch schiffserzeugte kurz- und langperiodische Wellensysteme oder Strömungsgeschwindigkeiten sowie zur Schiffsdynamik in begrenztem Flachwasser, z. B. von Squat, Trimm und Schiff/Schiff- bzw. Schiff/Ufer-Effekten, liegen eine Vielzahl von Ingenieuransätzen in einschlägigen Lehrbüchern vor. Entsprechend ihrer Entstehungszeit auf analytischen Betrachtungen sowie auf der Basis empirischer Faktoren aus Messungen entwickelt, ist deren Gültigkeit im Wesentlichen auf die damaligen Randbedingungen begrenzt. Vergleichsuntersuchungen der BAW zu aktuellen Schiffsgrößen und Abmessungen zeigten, dass eine Allgemeingültigkeit dieser Ansätze nicht gewährleistet ist. Zu einer ersten Abschätzung der zu erwartenden Größenordnung von z. B. Wellenhöhen und bei Beachtung der Gültigkeitsgrenzen der Eingangsgrößen können jüngere Ansätze bedingt herangezogen werden, wobei dabei die Aussageschärfe der Ergebnisse sowie eventuelle Sicherheitszuschläge (möglichst anhand von aktuellen Validierungsdaten) bewertet werden müssen.

4.1.2 Messungen in der Natur

Zur Erfassung des „Ist-Zustands“ sind Messungen in der Natur in fachlich ausreichenden Zeitabständen unerlässlich, um u. a. bei Änderungen der Flottenstruktur im Revier z. B. die Bemessungsansätze für Deckschichten von Strombauwerken überprüfen zu können und anhand von Unterschreitungswahrscheinlichkeiten eine Belastungsintensität abschätzen zu können.

Messungen in der Natur zur Interaktion eines Schiffs mit der Wasserstraße können nur einen aktuellen Zustand der schiffserzeugten Belastungen oder der Schiffsdynamik beschreiben und sind trotz einer möglicherweise hohen Zahl an erfassten Ereignissen nicht prognosefähig, da die zu bewertenden Fahrzeuge z. B. noch in Bau oder im jeweiligen Revier noch nicht in Fahrt sind.

¹ Die Abmessung der Schleusenammern des Panama-Kanals für Schiffe mit einer Breite bis maximal $b = 32,2$ m führte zu den entsprechenden Größenbezeichnungen mit u. a. PanMax bzw. PostPanMax.

Zur Absicherung und Validierung z. B. von wasserbaulichen Modellversuchen sowie von numerischen Modellen sollten grundsätzlich Messungen aus der Natur hinzugezogen werden.

4.1.3 Numerische Simulation

Seit etwa zwei Jahrzehnten initiiert und unterstützt die BAW für die Fachaufgabe WSS im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten (FuE) die Weiterentwicklung von numerischen Modellverfahren im Grenzbereich zwischen Schiffbau und Wasserbau für die Belange der WSV, d. h. vornehmlich für Grenzbedingungen in engen Fahrwasser (u. a. Chen / Uliczka, 1999).

Etwa seit 2009 werden auch in der Dienststelle Hamburg numerische Modellverfahren zur WSS betrieben und deren Einsatz für Fragestellungen aus der WSV geprüft.

Vergleichsbetrachtungen und Benchmark-Tests mit Messungen in der Natur sowie zu wasserbaulichen Modellversuchen zeigten, dass potentialtheoretische Verfahren für die Grenzbedingungen der WSV nicht hinreichend aussagefähig sind, dass andererseits Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Equations (RANSE) auf dem Weg zum Stand von Wissenschaft und Technik sind, um auch für abgesicherte Prognosen in öffentlich-rechtlichen Verfahren eingesetzt zu werden.

4.2 Randbedingungen und Grenzen beim WSS-Modellversuch

Wasserbauliche Modellversuche zur WSS sind nur prognosefähig, wenn, wie oben erwähnt, die FROUDEschen Ähnlichkeitsbedingungen sowie die REYNOLDSschen Grenzbedingungen eingehalten werden.

Die BAW hat mit dem Bau eines Versuchsbeckens von rund 90 m x 35 m die Voraussetzungen geschaffen, dass in diesem „Schiffswellenbecken“ Untersuchungen zur WSS in einem entsprechend großen Modellmaßstab von z. B. derzeit 1:40 durchgeführt werden können. Abbildung 5 zeigt einen Blick in die Versuchshalle mit dem Schiffswellenbecken und Buhneneinbauten im Maßstab 1:40.

Die Abmessungen der Modellschiffe bis zu einer Länge von 9 m sind im Detail in ihren Modellabmessungen in Tabelle 2 aufgeführt.



Abb. 5: Blick in die Versuchshalle und das Schiffswellenbecken der BAW in Hamburg-Rissen (Foto: BAW, 2013)

Tab. 2: Abmessungen des Schiffswellenbeckens sowie der wesentlichen Modellschiffe bei der BAW in Hamburg-Rissen

| | |
|------------------------|---------------------------|
| Schiffswellenbecken | ca. 90 m x 35 m x 0,7 m |
| Modellschiffe (M 1:40) | Länge: 4,7 m bis 9,0 m |
| | Breite: 0,7 m bis 1,4 m |
| | Tiefgang: 0,2 m bis 0,4 m |

Die Naturähnlichkeit der WSS-Untersuchungen ist gesichert, indem im Modell u. a. die gleichen relativen Anteile von Trägheits- und Schwerkraften wie in der Natur eingehalten werden. Dieses Verhältnis wird bei dem Einsatz der Modellschiffe durch die dimensionslose FROUDEsche Zahl Fr_1 , hier das Verhältnis der Schiffsgeschwindigkeit zur Wurzel aus der Schiffslänge und Erdbeschleunigung, gewährleistet:

$Fr_1 = v_s / (l \cdot g)^{0,5}$ mit Fr_1 : FROUDE-Zahl, v_s : Schiffsgeschwindigkeit, l : Schiffslänge zw. d. Loten, g : Erdbeschleunigung.

Beispielsweise betrug bei Untersuchungen zur schiffserzeugten Belastung der Unterelbe die FROUDEsche Zahl $Fr_1 = 0,05$ bis $0,12$ bei Schiffsgeschwindigkeiten von $v_s = 5$ kn (Massengutschiff, $v_{s,MODELL} = 0,4$ m/s) bis $v_s = 13,5$ kn (Containerschiff $v_{s,MODELL} = 1,1$ m/s). Bei seegehenden Handelsschiffen beträgt die FROUDEsche Zahl in tiefen, seitlich unbegrenztem Wasser etwa $Fr_1 \approx 0,15$ bis $0,32$, wobei mit annähernd $Fr_1 = 0,3$ die obere Grenze des optimalen und somit noch wirtschaftlichen Bereichs der Schiffsgeschwindigkeit erreicht wird (SCHNEEKLUTH, 1988).

Die REYNOLDSzahl Re als Ausdruck der Ähnlichkeit der turbulenten Strömungsprozesse von Modell und Natur, beschrieben durch das Verhältnis von Schiffsgeschwindigkeit und Schiffslänge zur Zähigkeit des Wassers, kann in Natur und Modell bei gewählter FROUDEScher Ähnlichkeit nicht übereinstimmen:

$Re = v_s \cdot l / \nu$ mit Re : REYNOLDSzahl, v_s : Schiffsgeschwindigkeit, l : Schiffslänge zw. d. Loten, ν : Kinematische Zähigkeit

Die REYNOLDSzahlen betragen z. B. bei den o. a. Modellversuchen $Re = 2,8 \cdot 10^6$ bis $8,5 \cdot 10^6$. Als unterer Grenzwert zur Laminarströmung im Modell wird u. a. im Schiffbau eine REYNOLDSzahl von $Re < 5 \cdot 10^5$ angegeben (u. a. SCHNEEKLUETH, 1988). Für Modellversuche im Schiffbau zur Ermittlung von Schiffswiderstand und Propulsion bei maximaler Geschwindigkeit sind REYNOLDSzahlen zwischen $Re \approx 10^6$ und 10^7 im Modell, bei Werten von $Re \approx 10^8$ bis 10^9 in der Natur, üblich.

Somit wurde durch die Wahl eines des großen Modellmaßstabs 1:40 und entsprechend hohen Modellgeschwindigkeiten die Prognosefähigkeit der Untersuchungen bei gleichzeitig geringen Maßstabeffekten gewährleistet.

Die Grenzen dieser Modelluntersuchungen zur WSS im Maßstab 1:40 wurden erreicht, wenn extrem hohe Schiffsgeschwindigkeiten zu Rollbrechern am nahen Ufer führten und für diese extremen Situationen Fragestellungen z. B. zur Uferstabilität zu bearbeiten waren. Die Luftaufnahme der brechenden Wellen im Uferbereich, wie z. B. in Abbildung 4 oder 6 sichtbar, sind im kleinmaßstäblichen Modell aufgrund deutlich geringerer Energiedissipation bei vergleichbarer Oberflächenspannung des Wassers nicht naturähnlich.

5 Anwendungsbeispiele

In den folgenden Kapiteln werden beispielhaft ausgewählte Projekte für wasserbauliche Modellversuche zur Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtstraße vorgestellt, die sowohl die Prognose von schiffserzeugten Belastungen der Seeschiffahrtstraßen im Rahmen von Ausbaumaßnahmen oder Forschungsprojekten als auch die Schiffsdynamik bei Revierfahrt für eine Optimierung der Befahrbarkeitsanalyse mittels Schiffsführungssimulation betreffen.

5.1 Prognose bei Ausbauvorhaben

Im Rahmen der Planungen für die Vertiefung einer Seeschiffahrtsstraße beauftragte das zuständige Wasser- und Schiffahrtsamt (WSA) als Träger des Vorhabens (TdV) die BAW, neben weiteren umfangreichen Untersuchungen zur Ermittlung der Auswirkungen der Fahrrinnenvertiefung, die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen infolge der Vertiefung unter Berücksichtigung der zukünftigen Schiffstiefgänge zu ermitteln und zu begutachten.

Die Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen aufgrund von Fahrrinnenvertiefungen, Tiefgangszunahme großer Fahrzeuge sowie Tidefahrplanänderungen für bemessungsrelevante Schiffe erfolgte auf Grundlage von ausgewählten Beurteilungskriterien für die charakteristischen Abschnitte der Seeschiffahrtsstraße eines Tideästuars.

Systemversuche und Parameterstudien in einem wasserbaulichen Modell im Maßstab 1:40 ermöglichten eine revierspezifische Quantifizierung der zu erwartenden Belastungsänderungen durch Autotransporter sowie Massengutschiffe unter Zugrundelegung der maximal möglichen Tiefgangszunahme und der lokalen Ausbautiefe.

Die Abbildung 6 zeigt die Passage eines PanMax-Schiffs (hier: Autotransporter) mit einer Schiffsgeschwindigkeit von etwa $v_{S,NATUR} \approx 12$ kn entlang einer 1:6 geneigten Böschung bei extrem geringem Uferabstand. Deutlich sichtbar in Abbildung 6 ist des Weiteren die schiffserzeugte langperiodische Wasserspiegelauslenkung, charakterisiert durch den Absenk und die als „Rollbrecher“ mit Schiffsgeschwindigkeit mitlaufende Primärwelle auf der Böschung.

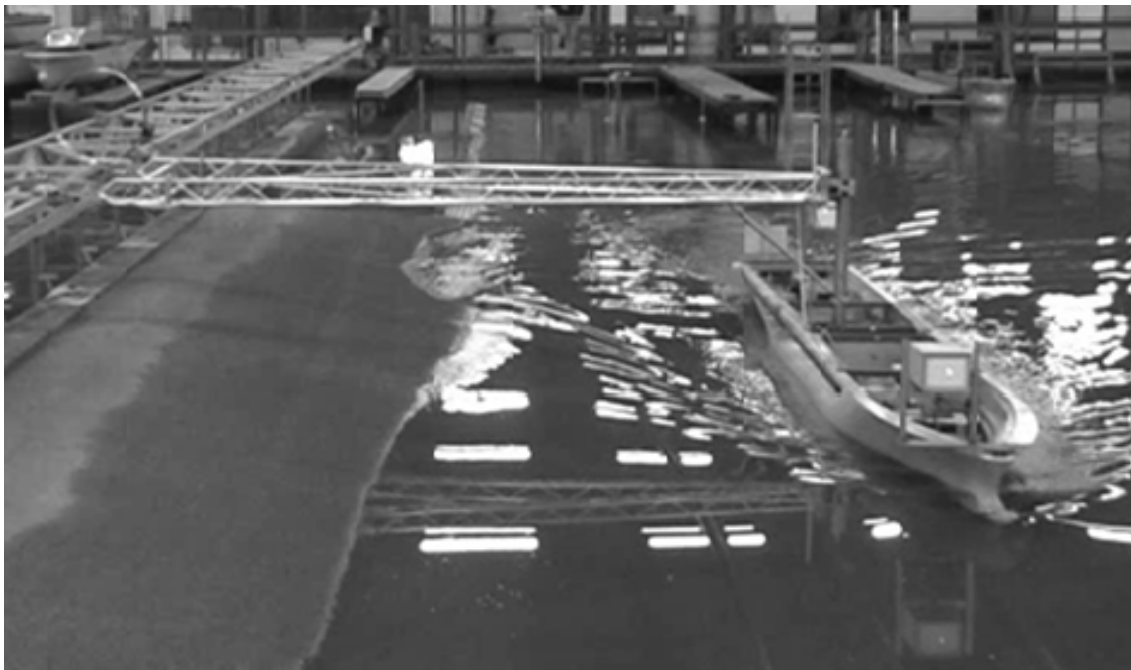


Abb. 6: Passage eines PanMax-Schiffs mit Absenk und Primärwelle an einer 1:6 geneigten Böschung im Modellwellenbecken der BAW ($v_{S,NATUR} \approx 12$ kn)

Als Ergebnis derartiger wasserbaulicher Modellversuche sind in Abbildung 7 die geschwindigkeitsabhängigen Fahrkurven eines PanMax-Schiffs bei tideabhängiger und tideunabhängiger Fahrt aufgetragen. Die Grafik verdeutlicht, dass bei einer gegebenen Unterwassertopographie bei gleicher Schiffsgeschwindigkeit trotz geringeren Tiefgangs eine höhere Belastung bei tideunabhängiger Fahrt, also etwa Tideniedrigwasser, als bei tideabhängiger Fahrt, etwa bei Tidehochwasser, trotz dann größeren Schiffstiefgangs zu

erwarten ist und zeigt die revierspezifische Quantifizierung des jeweiligen Absunks an der Uferböschung.

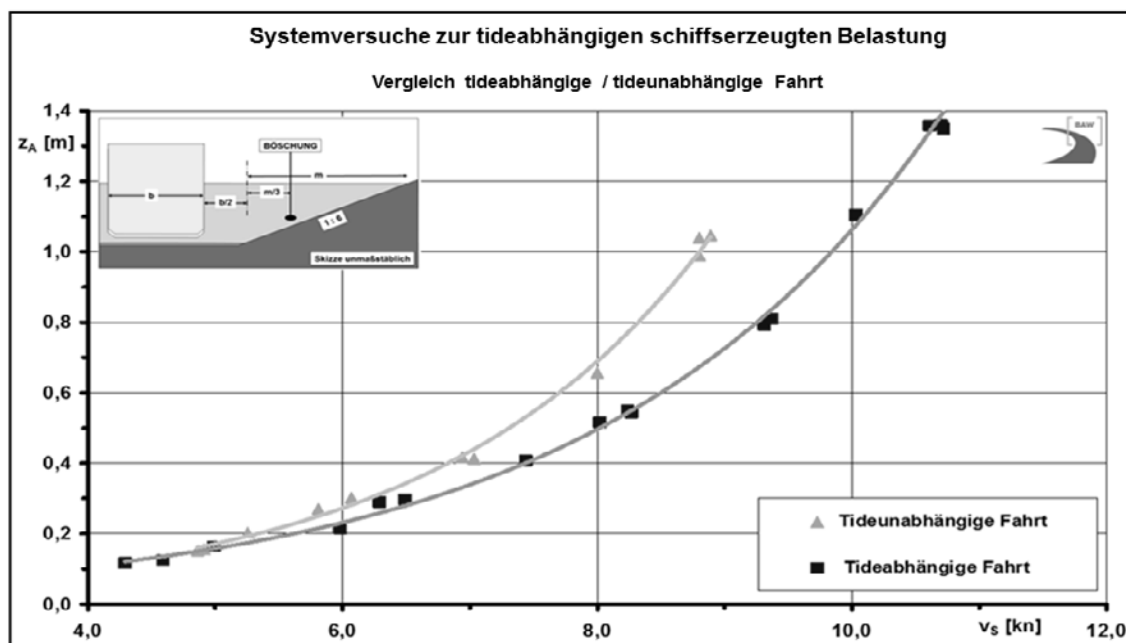


Abb. 7: Geschwindigkeitsabhängiger Absunk bei tideunabhängiger und tideabhängiger Fahrt eines PanMax-Autotransporters zur revierspezifischen Quantifizierung (MT_{nw}, t_{Tnw} bzw. MThw, t_{Thw})

Parallel zur Aufgabenstellung des Auftraggebers zur Prognose der ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen wurden mittels des Führungssystems die durch den Bank-Effect bewirkten Querkräfte und Giermomente bei extrem außermittiger Fahrt erfasst (siehe Abb. 6). Letztere werden im Rahmen eines FuE-Projekts zur Optimierung der Schiffsführungssimulation (SFS) für die Belange der WSV analysiert, um bei einer Befahrbarkeitsanalyse von Seeschiffahrtsstraßen die für die SFS erforderlichen Parameter anhand von Daten aus dem wasserbaulichen Modellversuch abzusichern.

5.2 Langperiodische hydraulische Belastungen von Strombauwerken

In der letzten Dekade wurden von den Küstenämtern der WSV verstärkt Schadensfälle an Leitwerken und Buhnen sowie an Deckwerken der Seeschiffahrtsstraßen von Außenweser und Unterelbe aufgrund schiffserzeugter Belastungen festgestellt. Während zum Lastfall Seegangsbelastung wie auch für den Lastfall kurzperiodische Schiffswellen auf langjährig anerkanntes Schrifttum zurückgegriffen werden kann, liegen für Lastfälle aus langperiodischen schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen an Leitdämmen und Buhnen keine fachwissenschaftlich abgesicherten Ansätze zur Bemessung der Deckschichten vor. Besonders extrem instationäre und hoch turbulente hydrodynamische - zudem in Tideästuaren wasserstandsabhängige - langperiodische schiffser-

zeugte Belastungen, wie in Abbildung 8 (links) dokumentiert, führen zu komplexen Untersuchungsaufgaben mit einer hohen Zahl von zu erfassenden und physikalisch zu beschreibenden hydrodynamischen Parametern, verteilt über verschiedene Abschnitte von Leitdämmen und Bühnen.

Dazu wurde in Kooperation mit universitären Partnern des Leichtweiß-Instituts (LWI) der Technischen Universität Braunschweig und des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen sowie der Hamburg Port Authority (HPA) ein längerfristiges Verbundvorhaben auf der Grundlage des FuE-Projektantrags der BAW vereinbart. Dieses Verbundprojekt „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen“ setzt sich aus den folgenden, aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen zusammen:

- AP1: Schadensanalyse (BAW, WSV, HPA)
- AP2: Prozessanalyse (IWW)
- AP3: Parametrisierung der Schiffswellen (LWI)
- AP4: Laborversuche im kleinen Maßstab (IWW, BAW)
- AP5: Numerische CFD/CSD-Untersuchungen (LWI)
- AP6: Großmaßstäbliche Modellversuche
- AP7: Probabilistische Bemessungsansätze

Derzeit wird vom IWW und der BAW das Arbeitspaket „Kleinmaßstäbliche 2D- und 3D- Modellversuche“ (AP4) bearbeitet und weitergehende wissenschaftliche Untersuchungen zur „Numerischen Simulation“ (AP5) vorbereitet.

Die BAW bearbeitet derzeit in dem Schiffswellenbecken der Dienststelle Hamburg das AP4b mit dreidimensionalen Modellversuchen im Maßstab 1:40 (Abb. 8, rechts), bei denen das geschwindigkeitsabhängige, schiffserzeugte Wellen- und Strömungssystem durch ein großes PostPanMax-Containerschiff erzeugt wird ($l = 360$ m; $b = 55$ m; $t = 13,8$ m; Passierabstand $L_{KOPF} = 260$ m).



Abb. 8: Ablauf der dynamischen Belastung einer Buhne durch die schiffserzeugte Primärwelle (links) und untersuchte Buhnenvarianten im Modellmaßstab 1:40 bei der BAW (Fotos: BAW)

Diese kleinmaßstäblichen Systemversuche berücksichtigen vornehmlich die wasserstands- und geschwindigkeitsabhängigen, dreidimensionalen, langperiodischen physikalischen Prozesse infolge der Passage großer Seeschiffe beim Einsatz alternativer Buhnen-systeme. Analysiert werden:

- Wellenamplituden und Wellenumformung im Nahbereich der Buhnenbauwerke
- Wasserspiegeländerungen und Strömungsvorgänge in den Buhnenfeldern
- Auswirkungen alternativer Buhnenvarianten:
 - konventionelle Bauweise (Seiten 1:3; Kopf 1:4)
 - abgeflachtes, ausgerundetes Buhnenprofil (Seiten 1:4; Kopf 1:5)
 - hinterströmtes, abgeflachtes Buhnenbauwerk (Seiten 1:4; Kopf 1:5)

Aufgrund des Modellmaßstabs von 1:40 werden aufgrund der Oberflächenspannung des Versuchsmediums Wasser vor allem physikalische Prozesse, deren Energiedissipation u. a. durch Luftaufnahme oder Sohlreibung (z. B. Wellenbrechen, turbulente Überströmung) bestimmt wird, nicht korrekt vollkommen naturähnlich abgebildet, so dass dementsprechend keine Stabilitätsuntersuchungen der Deckschichten vorgenommen werden können.

Ausgewählte Beispiele von langperiodischen schiffserzeugten Wasserspiegel- und Strömungsänderungen in zwei Buhnenfeldern sowie im Nahbereich der Strombauwerke sind in drei Phasen (v. l. n. r.) in Abbildung 9 dargestellt ($v_S \approx 13,7$ kn).

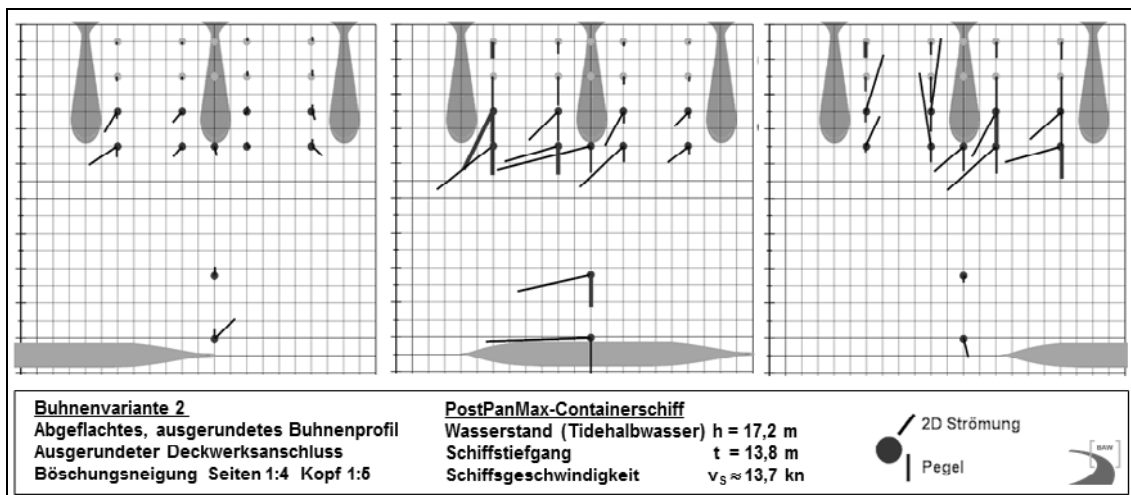


Abb. 9: Phasenabhängige Darstellung der Wasserspiegel- sowie Strömungsänderungen in Betrag und Richtung in einem Bühnenfeld bei Passage eines großen Containerschiffs (v. l. n. r.)

Der Maximalwert der Primärwelle im Nahbereich und über der Bühnenwurzel wird in diesem Versuch allerdings erst erreicht, wenn das Schiff mit dem Heck das übernächste Bühnenfeld passiert hat (keine Darstellung in Abb. 9). Zu diesem Zeitpunkt wird zudem der größte, kurzzeitig auftretende Wasserstandsgradient über der Bühnenwurzel von Luv zu Lee gemessen, was in etwa mit einer maximalen (stationären) Überfallhöhe über einem Wehrbauwerk (ohne Wellendynamik) gleichzusetzen ist. Für die Bemessung der Deckschicht wird diese Phase als ungünstigster Lastfall infolge des langperiodischen, dynamischen schiffserzeugten Wellensystems bewertet (Primärwelle über der Bühnenwurzel beim Absink im nächsten Bühnenfeld).

Die Ergebnisse dieser kleinmaßstäblichen 3D-Modellversuche sind u. a. Grundlage für die Auswahl maßgeblicher großmaßstäblicher Untersuchungen zur hydraulischen Stabilität von Deckschichten zum Lastfall „Langperiodische Schiffswellen“ und die weitere Entwicklung zuverlässigkeitsbasierter Bemessungsansätze im Rahmen des FuE-Verbundprojekts von LWI, IWW, HPA und BAW.

5.3 Schiffsdynamik im Flachwasser

Die WSV setzte zur Überprüfung der vorgesehenen Abmessungen im Rahmen von Anpassungsmaßnahmen der Seeschiffahrtsstraßen an die Entwicklung der Schiffsgößen neben anderen Methoden auch verschiedene, für die Ausbildung von Nautikern zertifizierte, Schiffsführungssimulatoren ein. Die Eingangsgrößen für eine Schiffsführungssimulation (SFS) stützen sich im Wesentlichen auf Messungen unter Tiefwasserbedingungen, so dass eine Anpassung der hydrodynamischen Parameter für die Flachwasserbedingungen der Revierfahrt u. a. auf der Basis von Erfahrungswissen fachkundiger Nautiker erforderlich wurde.

Zur Optimierung der SFS für die Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse von Seeschiff-fahrtsstraßen wurde die BAW von der WSV mit der fachwissenschaftlichen Absiche-rung der Eingangsdaten für die SFS bei Revierfahrt beauftragt.

Vorhandene Ergebnisse der BAW aus Modellversuchen im Schiffswellenbecken zum Squat und Trimm (u. a. Uliczka et al., 2004; Uliczka / Kondziella, 2009) konnten unmit-telbar für die Optimierung der SFS verwendet werden. Umfangreiche wasserbauliche Modellversuche waren erforderlich, um die Interaktion Schiff/Ufer (den Bank-Effect) als geschwindigkeitsabhängige Querkräfte und Giermomente in Abhängigkeit von Bö-schungsneigung, Passierabstand, Schiffsgröße und Schiffsform sowie der Kielfreiheit zu erfassen. Die Ergebnisse werden derzeit für die SFS aufbereitet.

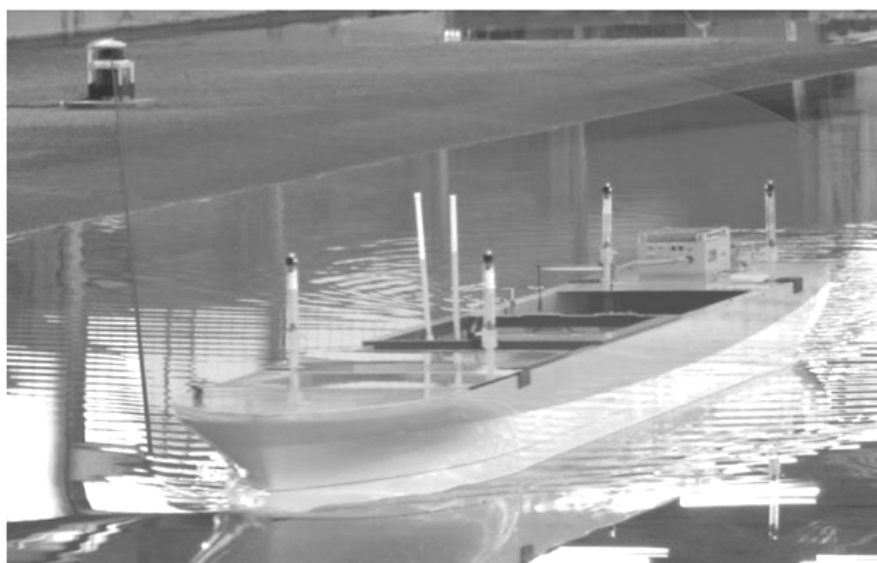


Abb. 10: Kodierter Rotationslaser zur Erfassung der Schiffsdynamik im Flachwasser während Freifahrt- versuchen bei IMO-Standardmanövern im Schiffswellenbecken der BAW (Foto: BAW)

Darüber hinaus wurden erste Modellversuche mit einem freifahrenden Massengutschiff vorgenommen, um über zertifizierte Standard-Manöver der International Maritime Organization (IMO) das fahrdynamische Verhalten dieses Fahrzeugs im Flachwasser zu erfassen und die Ergebnisse (z. B. das Überschwingverhalten) in die SFS zu implemen-tieren.

Die Zig-Zag 20/10 Freifahrtversuche wurden im Maßstab 1:40 mit einem ferngesteuert-ten PanMax-Massengutschiff ($l = 230$ m, $b = 32,2$ m, $t = 10,9$ m) mit verschiedenem Geschwindigkeiten und Kielfreiheiten gefahren. Die dreidimensionalen Bewegungen des Modellschiffs infolge einer vorgeschriebenen Abfolge von Ruderlagen wurden mit einem Inertialkreiselssystem und über ein kodiertes Rotationslaser-System mit entspre- chenden optischen Sensoren auf dem Schiffmodell erfasst. Das Messverfahren ist schematisch in Abbildung 10 dargestellt.

Beispielhaft sind in Abbildung 11 die aufgezeichneten Zeitreihen der Ruderlagen, des Headings (Steuerkurs) bei drei Geschwindigkeiten während eines Zig-Zag 20/10-Manövers zusammengestellt: Nach Legen des Ruders auf 20° und dem daraus folgendem Drehen des Schiffskörpers bis auf 10° wird Gegenruder auf -20° gelegt. Je nach Schiffsgeschwindigkeit und Größe des Schiffswellenbeckens können mehrere Manöver hintereinander gefahren werden und daraus z. B. das Überschwingverhalten des Fahrzeugs für die Umsetzung in die SFS-Software abgeleitet werden.

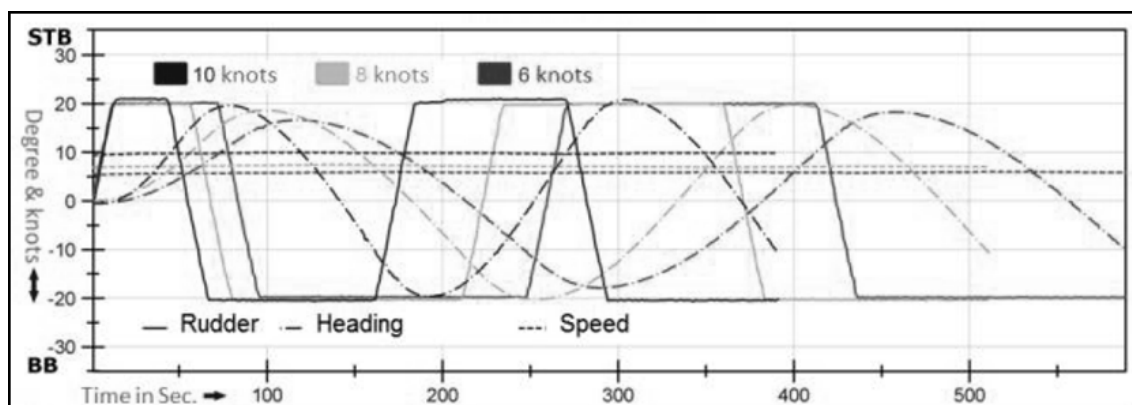


Abb. 11: Zeitreihe von Ruderlage, Heading und Schiffsgeschwindigkeit beim IMO-Standardmanöver Z 20/10 im Flachwasser

Da ein Chartern von verschiedenen realen Schiffen für die IMO-Standardmanöver im Flachwasser mit entsprechenden Messungen in der Natur mit den heute zur Verfügung stehenden Satelliten-Navigationsgeräten zwar machbar, aber u. a. wegen hydrologischer und metrologischer Bedingungen auf See erheblich aufwändiger, zeitintensiver und deutlich teurer (bei größeren Containerschiffen für die Forschung unbezahlbar) ist, sind wasserbauliche Modellversuche unter definierten Randbedingungen z. B. im Schiffswellenbecken der BAW fachwissenschaftlich anerkannt und zudem die wirtschaftlichere Bearbeitungsmethode.

5.4 Weitere laufende Projekte für die WSV

Für weitere Aufträge aus der WSV im Küstenbereich sind wasserbauliche Modellversuche u. a. zur Schiff/Schiff-Interaktion bei der Begegnung großer Fahrzeuge im Revier (z. B. Abb. 12, links) als auch zur Wechselwirkung von großen, an Stromkajen vertäuten, Schiffen bei Passagen größerer Fahrzeuge (z. B. Abb. 12, rechts) mit der Messung der jeweiligen Kräfte und Momente erforderlich. Zur Bearbeitung einer vorgesehenen Untersuchungsmatrix sind neben den Modellversuchen im Schiffswellenbecken erstmals auch numerische Berechnungsverfahren geplant, wobei eine teilweise Bearbeitung von ausgewählten Szenarien mit beiden Methoden zur Absicherung und Validierung der numerisch ermittelten Ergebnisse von der BAW derzeit noch als unbedingt notwendig angesehen wird.

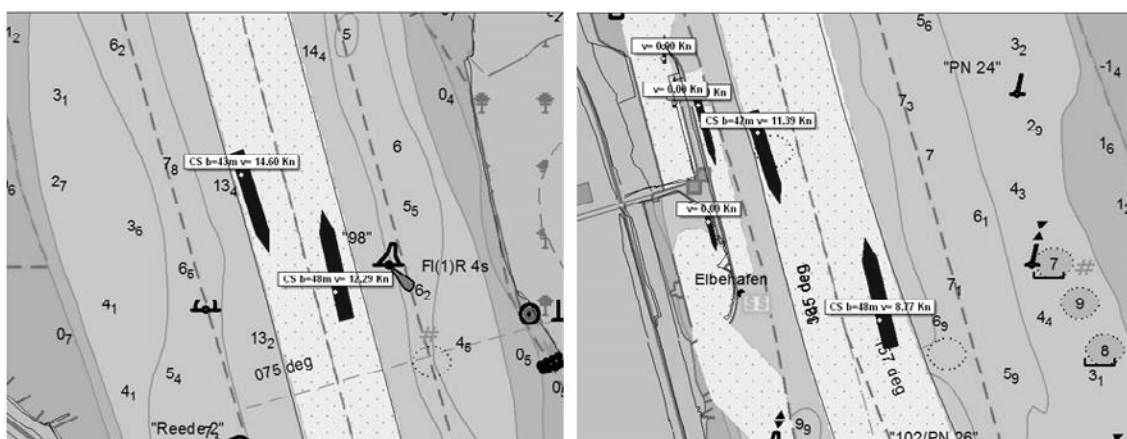


Abb. 12: Visualisierung von Aufgabenstellungen der WSV zur Befahrbarkeitsanalyse an Seeschiffahrtsstraßen: Schiff/Schiff-Interaktion bei Begegnungen sowie bei der Passage von Festliegern

6 Fazit zum wasserbaulichen Modellversuch zur WSS

Wasserbauliche Modellversuche zur Bestimmung der Wechselwirkung eines Seeschiffs in einer Seeschiffahrtsstraße sind bei Beachtung der Modellgesetze nach Stand von Wissenschaft und Technik prognosefähig.

Für komplexe Aufgabenstellungen z. B. im Zusammenhang mit der Schiff/Schiff/Ufer-Interaktion sind wasserbauliche Modellversuche derzeit unerlässlich

Mittelfristig werden zur Validierung numerischer Modellverfahren weiterhin wasserbauliche Modellversuche zur Erfassung der Wechselwirkung Seeschiff/Seeschiffahrtsstraße erforderlich sein.

Durch die Entwicklung der Messtechnik im wasserbaulichen Modellversuchswesen werden weiter ins Detail gehende Fragestellungen zu physikalischen Prozessen (u. a. bei der WSS) auch zukünftig von Wasserbauingenieuren zu lösen sein, so dass es unerlässlich ist, die Versuchseinrichtungen sowie das Erfahrungswissen zu dieser wissenschaftlich anerkannten Methode weiterhin in den entsprechenden Hochschulen, Universitäten und Forschungsinstitutionen vorzuhalten.

7 Team WSS

Für die messtechnische Konzeptionierung von wasserbaulichen Modellversuchen zur WSS sowie der fachwissenschaftlich abgesicherten Aufbereitung und Analyse der Messdaten kann sich der Projektleiter WSS bei der BAW in Hamburg Rissen auf ein erfahrenes Team verlassen. Auf diesem Wege Dank an die Herren Dipl.-Ing. (FH) B. Kondziella (Versuchstechnik, Datenanalyse, Qualitätssicherung), PA D. Carstens (Versuchstechnik, Datenerfassung, Datenanalyse), TA U. Petrasch (Versuchstechnik, Datenauswertung) und TA K. Heuer (Versuchstechnik, Elektronik) für eine über 15-

jährige erfolgreiche Zusammenarbeit sowie Dank an den Technischen Betriebsdienst der Dienststelle Hamburg für die regelmäßige Unterstützung bei technischen Fragen und Baumaßnahmen.

Auf dem Fachgebiet SFS und Numerik wurde das Team WSS vor rund 5 Jahren durch die Herren Dr.-Ing. C.-U. Böttner und Dipl.-Ing. (FH) M. Wezel sowie Dipl.-Geoökol. M. Kastens verstärkt. Messungen in der Natur werden zusätzlich durch Frau Dipl.-Ing. (FH) H. Jansch sowie die Herren Dipl.-Ing. (FH) Ch. Maushake und TA D. Sellhorn begleitet.

8 Literatur

BMVBS (2013): Seeschiffahrtsstraßen. Karte S129. GDWS, ASt. Nordwest, Aurich, zur Verfügung gestellt gemäß GeoNutzV

Chen, X.-N., Uliczka, K. (1999): On Ships in Natural Waterways. Proceedings of International Conference on Coastal Ships and Inland Waterways, The Royal Institution of Naval Architects (RINA), London, UK - ISBN 0-903055-50-3

Kobus, H. (Hrsg.; 1984): Wasserbauliches Versuchswesen, 2., rev. Auflage, DVWK Schriften H. 39, Hamburg; Berlin; Paul Parey - ISBN 3-490-03997-1

Schneekluth, H. (1988): Hydromechanik zum Schiffsentwurf. Vorlesungen. 3., verbesserte und erweiterte Auflage, Herford: Koehler - ISBN 3-7822-0416-6

Uliczka, K., Kondziella, B., Flügge, G. (2004): Dynamisches Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe in seitlich begrenztem extremen Flachwasser. HANSA, Jahrgang 141, Heft Nr. 1.

Uliczka, K., Kondziella, B. (2009): Research on ship dynamics of large containerships in confined fairways. Proceedings of Int. Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Bank Effects, RINA / Ghent University / FHR, Antwerpen, ISBN 978-1-905040-46-9

Anschrift des Verfassers

Dr.-Ing. Klemens Uliczka
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Wedeler Landstraße 157
22559 Hamburg