

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Report, Published Version

Uliczka, Klemens; Kondziella, Bernhard; Jansch, Hanne
Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiffahrtsstraße. FuE-
Abschlussbericht B3955.02.04.10055

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106564>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2018): Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiffahrtsstraße. FuE-Abschlussbericht B3955.02.04.10055. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

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.

Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten

FuE-Abschlussbericht
Wechselwirkung
Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße

B3955.02.04.10055

März 2018

FuE-Abschlussbericht

Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße

Beginn des Vorhabens: Januar 2000

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. B3955.02.04.10055

Aufgestellt von:

Abteilung:	Wasserbau im Küstenbereich
Referat:	Ästuarsysteme I (K2)
Projektleiter:	Dr.-Ing. Klemens Uliczka
Bearbeiter:	Dr.-Ing. Klemens Uliczka Dipl.-Ing. (FH) Bernhard Kondziella Dipl.-Ing. (FH) Hanne Jansch

Hamburg, März 2018

Der Bericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.

Zusammenfassung

Die Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße (WSS) erforderte aufgrund der Größenentwicklung der Seeschiffe und der daraus notwendigen Befahrbarkeitsanalyse der Tideästuare fortlaufende Forschungsanstrengungen auf den Gebieten der schiffserzeugten Belastungen, der Schiffsdynamik und der Schiffsführungssimulation.

Folgende Forschungsschwerpunkte wurden im Rahmen des FuE-Projekts Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße in einem Zeitraum von etwa 17 Jahren bearbeitet:

- Hydraulische Modellversuche zum Prozessverständnis der querschnitts- und größenabhängigen Schiffsdynamik (Squat, Trimm) sowie schiffserzeugten Belastungen (Wellen, Verdrängungsströmung) bei Revierfahrt,
- Messungen in der Natur zum fahrdynamischen Verhalten (u.a. Squat, Trimm) großer Containerschiffe bei Revierfahrt zur Absicherung der Ergebnisse aus den kleinmaßstäblichen Modellversuchen,
- Grundsatzuntersuchungen im hydraulischen Modell zur Reduzierung langperiodischer, schiffserzeugter Belastungen von Sportboothäfen an SeeSchStr,
- Weiterentwicklung numerischer Verfahren aus dem Schiffbau (CFD) zum einen als „schnelles Werkzeug“ für Aspekte der WSS sowie als weitere anerkannte Methode zur Bearbeitung der Fachaufgabe WSS nach Stand von Wissenschaft und Forschung,
- Möglichkeiten und Grenzen von Schiffsführungssimulatoren für die Anwendung bei der Bemessung und der Befahrbarkeitsanalyse in SeeSchStr,
- Optimierung der Schiffsführungssimulation zur Befahrbarkeitsanalyse und Bemessung von SeeSchStr für die Belange der WSV u. a. durch Erarbeitung fachwissenschaftlich abgesicherte Eingangsdaten im hydraulischen Modell zum Bank-Effekt.

Die Entwicklung der Forschungsfelder und zukünftige Forschungsstrategien für das FuE-Projekt WSS wurden auf BAW-Kolloquien mit Stand 2010 präsentiert, während ein Überblick wissenschaftlicher Methoden bei der Bearbeitung der Fachaufgabe WSS zusammenfassend in den BAW-Mitteilungen Nr. 100 von 2017 veröffentlicht wurde.

Das im Rahmen der übergeordneten gleichnamigen Fachaufgabe begleitend durchgeführte FuE-Projekt „Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiffahrtsstraße“ wurde 2018 vorerst mit diesem zusammenfassenden Abschlussbericht beendet.

Inhaltsverzeichnis		Seite
1	Hintergrund und Forschungsbedarf	1
2	Bedeutung für die WSV	3
3	Forschungsschwerpunkte für die Belange der WSV	3
4	Technische Voraussetzungen	4
5	Prozessverständnis zur Schiffsdynamik und schiffserzeugten Belastungen bei Revierfahrt	5
6	Messungen in der Natur zum fahrdynamischen Verhalten großer Containerschiffe bei Revierfahrt	10
6.1	Messkampagne SeeSchStr Elbe 2003/2004	10
6.2	Messkampagne SeeSchStr Elbe 2013/2016	15
7	Grundsatzuntersuchungen zur Reduzierung langperiodischer, schiffserzeugter Belastungen von Anliegern an SeeSchStr	21
8	Weiterentwicklung numerischer Verfahren aus dem Schiffbau (CFD) als anerkannte Methode für WSS	24
9	Optimierung der Schiffsführungssimulation zur Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse an SeeSchStr	32
9.1	Evaluierung der SFS	32
9.2	Erarbeitung fachwissenschaftlich abgesicherter Eingangsdaten für die Schiffsführungssimulation	38
9.3	Weiterentwicklung der Schiffsführungssimulation für die Belange der WSV	40
10	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	41
11	Forschungsberichte des FuE-Projekts	42
12	Publikationen aus dem FuE-Projekt	44
13	Literaturverzeichnis	47

Bildverzeichnis		Seite
Bild 1:	Größenentwicklung der Seeschifffahrt in TEU (aus: HANSA 152 (5), 2015)	2
Bild 2:	Blick auf Modellversuche im Schiffswellenbecken am Standort Hamburg (Foto: BAW, 2002)	4
Bild 3:	Einfluss der Schiffslänge auf den geschwindigkeitsabhängigen Squat in seitlich unbegrenztem Flachwasser ($UKC_R = 2$ m; aus: Flügge und Uliczka, 2001a)	5
Bild 4:	Einfluss einer Transportkörpersohle verschiedener TK-Längen auf den geschwindigkeitsabhängigen Squat (aus: Flügge und Uliczka, 2001c)	6
Bild 5:	Einfluss von seitlichen Flachwasserbereichen ($h_{RINNE} / h_{SETTE} = 3$) auf Squat und Trimm eines MEGA-JUMBO bei außermittiger Fahrt $n = 7,5$ ($n_T = 5 / 10$) sowie Vergleich mit seitlich unbegrenztem Fahrwasser (aus: Uliczka et al., 2004)	7
Bild 6:	Geschwindigkeitsabhängiger Squat großer Containerschiffe aus Messungen im hydraulischen Modell (Bug, Trapezprofil, mittige Fahrt) im Vergleich zum Squat aus Natur-messungen (Bug, Untereibe: Nienstedten, Lühesand, Pagensand; aus: Uliczka et al., 2004)	8
Bild 7:	Geschwindigkeitsabhängige Absunkbelastung einer Seeschiffahrtsstraße (schematisch) bei mittiger Passage eine PostPanMax-Containerschiffs ($n = 15$; Uliczka, 2008)	9
Bild 8:	Zusatzauswertungen der FuE-Systemversuche aus den Jahren 2002/2003 zur Verdeutlichung des Zusammenhangs der Uferbelastung durch den Absunk z_A und dem Teilquerschnittsverhältnis n_T einer SeeSchStr (u. a. BAWiki, 2017)	9
Bild 9:	Geschwindigkeitsabhängiger Squat der Containerschiffe von HLCL (Quadrat) und YM (Dreiecke) auf dem Revier der Unter- und Außenelbe (u. a. Uliczka und Wezel, 2005)	12
Bild 10:	Zusätzlicher Squat von großen Containerschiffen bei der Begegnung mit anderen Fahrzeugen auf der Unter- und Außenelbe (12 Messfahrten, 125 Ereignisse, Flottenstruktur 2003/2004; u. a. Uliczka, 2008).	13
Bild 11:	Netto-Verkehrsspurbreite der Containerschiffe sortiert nach Fahrrinnenradien auf der Unter- und Außenelbe Analyse der Verkehrsbreite (netto) bei 12 Fahrten (u. a. Uliczka und Wezel, 2005)	13
Bild 12:	Graphische Darstellung von Berechnungsansätzen zum Squat (hier: BARRASS) mit den Messergebnissen der CMS BERLIN EXPRESS auf dem Revier des Elbeästuars (BAW, 2004)	14
Bild 13:	Einbindung der BAW über das FuE-Projekt WSS in die Projektstruktur der WSV (Behm und Jansch, 2015)	16
Bild 14:	Vorgesehene Zeitschiene und geplante Untersuchungsmatrix der Messkampagnen (nach Jansch et al., 2015)	16
Bild 15:	Berechnungsbeispiel zur Qualitätssicherung für eine orts- und zeitabhängige Abschattung bei der 3D-Satellitennavigation am Bug eines Containerschiffs (Verfahren © 2001-2010 by Trimble Navigation on Limited; BAW-FuE, 2013)	17
Bild 16:	Qualitätssicherung der Berechnungen des „Tatsächlichen Squats“ aus Messungen auf der Seeschiffahrtsstraße Elbe zwischen Hafen Hamburg und See sowie deren Differenzen (Beispiel; BAW-FuE, 2014))	18

Bild 17:	Zunahme der Ungenauigkeit des Squat (oben, rote Gerade) und der Tiefgangsänderung (unten, rote Gerade) anhand der Berechnung der Standardabweichung aufgrund des Ausfalls eines schiffsgestützten Sensors zur Dichtemessung (BAW-FuE, 2015)	19
Bild 18:	Verhältnis zwischen Sieltorbeschleunigung und Schiffsgeschwindigkeit über Grund aus Messdaten am Siel Käseburg (Unterweser; grau) und Deichsiel Hollerwettern (Elbe; schwarz; Uliczka et al., 2008)	23
Bild 19:	Vergleich von Squat und Trimm aus numerischen RANSE-Berechnungen und Messungen im hydraulischen Modell für den MEGA-JUMBO (BAW-FuE 2003; Daten nach Azcueta, 2003)	24
Bild 20:	Berechnetes Schiffswellenbild für ein POST-PANMAX-Containerschiff im Außenweserabschnitt IMSUM mit unterlegter Bathymetrie (Programm BESHiWa der VBD; BAW nach VBD 2001)	25
Bild 21:	Vergleich von Berechnungsergebnissen aus potentialtheoretischen Verfahren mit den Validierungsdaten aus dem hydraulischen Modell der BAW (BAW u. a. nach FutureShip, 2009)	28
Bild 22:	Geschwindigkeitsabhängige dynamische Tauchung (Squat) aus Berechnungen mit FS-Flow, FS-FOAM und Messungen im hydraulischen Modell (Maßstab 1:40) für den Kanalfall NOK (n=3,8; nach FutureShip, 2011)	31
Bild 23:	Fahrsimulation mit Historie von Passagen im Peenestrom zwischen den Tonnen PN22 und PN26 bei Standardeinstellung (links) und Änderung des Bank-Effekts um +30 % bis zum Abbruch der Simulation (rechts; BAW-FuE, 2006)	34
Bild 24:	Schematische Darstellung des Konzepts der Schiffsführungssimulation zur Befahrbarkeitsanalyse und Bemessung von Schiffahrtsstraßen (BAW-FuE, 2007)	36
Bild 25:	Vergleich der Basis-ENC (links) mit einer gemäß Peildaten verfeinerten bENC (rechts) am Beispiel des Unterweserabschnitts Rechtenfleth als Basis einer Prüfprozedur (nach: von Morgenstern, 2008; aus BAW-FuE, 2008)	37
Bild 26:	Messkonfiguration zur Erfassung von Querkräften und Giermomenten (links; unmaßstäblich) sowie Zeitreihen und Maxima des Giermoments N und der Querkraft Y eines Festliegers (PPM55; rechts) bei Passage eines großen Containerschiffs (PPM46) mit etwa $v_s \approx 10$ kn (aus Uliczka et al., 2013)	39
Bild 27:	Querkraft Y (links) und Giermoment N (rechts) an einem Festlieger (PPM55) in Abhängigkeit der Tiefen-Froude-Zahl bei wechselnder Fahrtrichtung (Begegnen schwarz; Überholen grau) eines großen Containerschiffs (PPM46; aus Uliczka et al. 2013)	39
Bild 28:	Vorstellung eines Netzwerks zur Optimierung der SFS zwischen Nutzern aus Nautik und Wasserbau, den Betreibern, den Herstellern von Schiffsführungssimulatoren sowie universitären Einrichtungen und Klassifizierungsbüros (BAW, Beispiele nach: von Morgenstern, 2007)	40

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1: Ausgewählte Kenndaten der untersuchten Post-Panmax-Containerschiffe (u. a. Uliczka und Kondziella, 2006b)	11

1 Hintergrund und Forschungsbedarf

Nach den gutachterlichen Bewertungen der Ausbaumaßnahmen der Seeschiffahrtsstraßen zwischen 1990 und 2000 für größere Container- und Massengutschiffe und deren Umsetzung durch die WSV etablierte die BAW als Ressortforschungsanstalt des Bundesministeriums für Verkehr die Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße (WSS) auch als entsprechendes Forschungsprojekt am Standort Hamburg-Rissen (Forschungsbereich K1: Grundsatzzuntersuchungen Wasserbau Küste, Projekt-Nr. 8149).

Die damalige weltweite Entwicklung des Container-Verkehrs mit ungebrochenen großen Zuwachsraten führte zum Einsatz immer größerer Containerschiffe. Für den Ausbau der Außenweser sowie der Unter- und Außenelbe wurde vormals noch ein Bemessungs-Containerschiff mit 4.800 TEU¹ zu Grunde gelegt. Inzwischen waren aber schon zahlreiche Containerschiffe mit einer Kapazität von 6.600 TEU bis 8.000 TEU in Dienst gestellt. Die Kapazitätserhöhung dieser Fahrzeuge ging einher mit Längenzunahmen sowie breiteren Hauptspantquerschnitten. Diese damals größeren Schiffe verkehrten auch in den Seeschiffahrtsstraßen (SeeSchStr) Außenweser sowie Unter- und Außenelbe. Es gab jedoch bis dahin keine zuverlässige Grundlage für die Beurteilung des dynamischen Fahrverhaltens dieser langen und breiten Containerschiffe unter extremen Flachwasser-Bedingungen in seitlich begrenzten Fahrwassern. Die Formeln zur Berechnung des Squat waren empirisch entwickelt und durften nicht ohne weiteres auf derartige Schiffsgrößen und extreme Flachwasserbedingungen extrapoliert werden.

Ziel des Forschungsprojekts war es anfangs, durch gezielte Untersuchungen für die Bedingungen in den deutschen SeeSchStr fachlich abgesicherte Grundlagen für die Beurteilung von Squat und Trimm und damit für die Zulassung der Verkehre sowie ggf. erforderliche weitere Ausbauparameter für die Bemessung zu erarbeiten.

Die als Vorlaufforschung etablierten Untersuchungen waren aber nicht nur auf die Schiffsdynamik wie Squat und Trimm dieser längeren Seeschiffe fokussiert, sondern waren aufgrund der Erfahrungen aus den öffentlich rechtlichen Ausbauvorhaben zudem auf die schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen dieser breiteren Fahrzeuge in Abhängigkeit der Fahrwasserquerschnitte ausgerichtet.

Wie im Laufe des FuE-Projekts dieser Forschungsansatz bestätigt, der vorläufige Zeitplan dieser „Vorlaufforschung“ durch die tatsächliche Entwicklung im Seeschiffsverkehr eingeholt und somit als ständige Forschungsleistung der BAW erforderlich wurde, zeigt die Entwicklung des Seeschiffsverkehrs ab Beantragung des FuE-Projekts im Jahr 2000 anhand der Grafik in Bild 1.

Die Kapazitätzunahme während des Projekts von ca. 8.000 TEU im Jahr 1997 bis zu derzeit ca. 21.000 TEU führte von Abmessungen mit ca. 350 m Länge und mit ca. 42 m Breite in 1997 zu heutigen Dimensionen mit Längen von ca. 400 m und Breiten bis zu ca. 60 m (2017). Eine weitere Anpassung der Fahrrinnen der SeeSchStr war bis Ende des FuE-Projekts nicht erfolgt.

¹ TEU: Twenty-foot Equivalent Unit = Standardcontainer (Länge 6,06 m, Breite 2,44 m , Höhe 2,59 m)

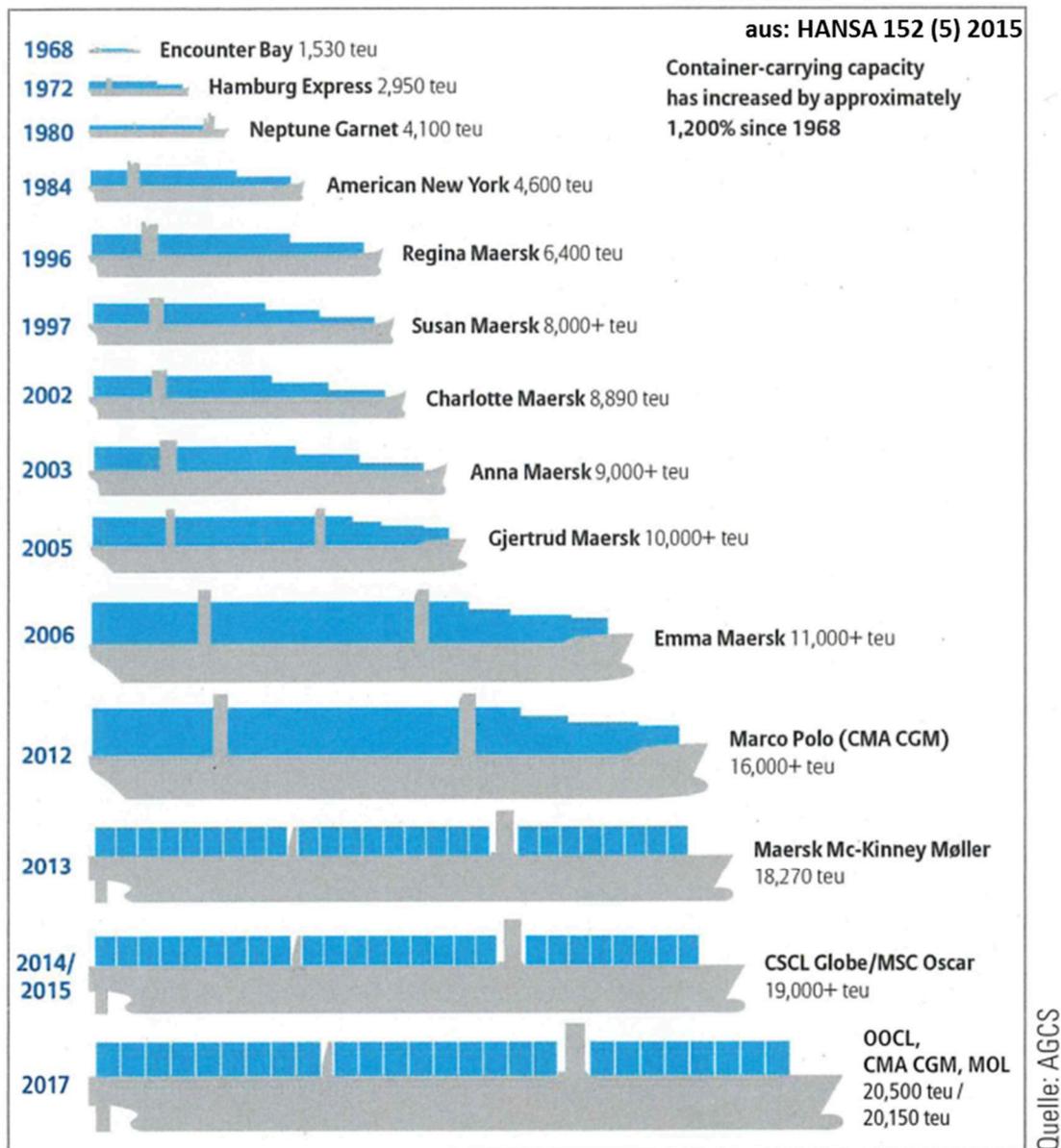


Bild 1: Größenentwicklung der Seeschifffahrt in TEU (aus: HANSA 152 (5), 2015)

Des Weiteren war die Methodenentwicklung nach Stand von Wissenschaft und Forschung für zukünftige Verfahren in den Vordergrund gerückt, da bei den numerischen Berechnungsverfahren im Wasserbau, vor allem aber auch im Schiffbau (CFD²) enorme Entwicklungsschritte stattfanden.

Ferner wurde die für die Ausbildung der Nautiker auf See entwickelte und für diesen Zweck international zertifizierte Schiffsführungssimulation (SFS) zunehmend für die Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse von Seeschiffahrtsstraßen und Hafenzufahrten „zweckentfremdet“ eingesetzt, obwohl die Gültigkeit dieses „Werkzeugs“ für Flachwasserbedingungen und Revierfahrt bisher nur eingeschränkt nachgewiesen werden konnte.

² CFD: Computational Fluid Dynamics

Dementsprechend war und ist es weiterhin unerlässlich, dass die Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße fortlaufend mit begleitenden, in der Ausrichtung flexiblen, Forschungsprojekten speziell für die Belange der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) unterstützt wird.

2 Bedeutung für die WSV

Die verschiedenen in der obigen Bedarfsanalyse erwähnten Forschungsgebiete, die die Fachaufgabe WSS begleiteten, hatten und haben weiterhin für die WSV eine sehr hohe Bedeutung, da sich die gegenwärtigen Fahrrinnenanpassungen an die Containerschiffahrt für Außenweser sowie Unter- und Außenelbe verfahrensbedingt deutlich verzögerten. Für die Befahrbarkeitsanalyse sowie die Fahrrinnenbemessung werden zuverlässige Angaben z. B. über den Squat und Trimm verschiedenster Schiffsgrößen, aber auch zum Bank-(Ufer)-Effekt sowie der Schiff-Schiff-Interaktion dringend benötigt.

Für öffentlich rechtliche Genehmigungsverfahren werden gutachterliche Ergebnisse nach Stand von Wissenschaft und Forschung erwartet, so dass auch hierfür die vorhabenbegleitenden Forschungsergebnisse zur WSS nachdrücklich verwendet wurden und werden.

3 Forschungsschwerpunkte für die Belange der WSV

Wie in der Beschreibung des Projekthintergrunds und dem Forschungsbedarf angerissen, entwickelten sich die Forschungsschwerpunkte des FuE-Projekts WSS über den Zeitraum von ca. 17 Jahren (2000 – 2017) gezielt hinsichtlich der jeweils aktuellen Belange der WSV.

Folgende Forschungsschwerpunkte wurden bearbeitet und deren Ergebnisse in entsprechenden Berichten dokumentiert sowie vor Fachgremien und bei Fachkonferenzen veröffentlicht:

- Hydraulische Modellversuche zum Prozessverständnis der querschnitts- und größenabhängigen Schiffsdynamik (Squat, Trimm) sowie schiffserzeugten Belastungen (Wellen, Verdrängungsströmung) bei Revierfahrt,
- Messungen in der Natur zum fahrdynamischen Verhalten (u.a. Squat, Trimm) großer Containerschiffe bei Revierfahrt zur Absicherung der Ergebnisse aus den kleinmaßstäblichen Modellversuchen,
- Grundsatzuntersuchungen im hydraulischen Modell zur Reduzierung langperiodischer, schiffserzeugter Belastungen von Sportboothäfen an SeeSchStr,
- Weiterentwicklung numerischer Verfahren aus dem Schiffbau (CFD) zum einen als „schnelles Werkzeug“ für Aspekte der WSS sowie als weitere anerkannte Methode zur Bearbeitung der Fachaufgabe WSS nach Stand von Wissenschaft und Forschung,
- Möglichkeiten und Grenzen von Schiffsführungssimulatoren für die Anwendung bei der Bemessung und der Befahrbarkeitsanalyse in SeeSchStr,

- Optimierung der Schiffsführungssimulation zur Befahrbarkeitsanalyse und Bemessung von SeeSchStr für die Belange der WSV u. a. durch Erarbeitung fachwissenschaftlich abgesicherter Eingangsdaten im hydraulischen Modell zum Bank-Effekt.

Die teils parallel bearbeiteten Schwerpunkte wurden in dem vorliegenden Abschlussbericht des FuE-Projekts nach Fachgebieten gegliedert, wobei eine methodenübergreifende Beschreibung nicht gänzlich auszuschließen war und Kapitel übergreifende Verweise erforderlich wurden.

4 Technische Voraussetzungen

Voraussetzung zur fachwissenschaftlich abgesicherten Bearbeitung des Forschungsprojekts war in Anlehnung an die umfangreichen Erfahrungen der Schiffbauversuchsanstalten in Hamburg, Potsdam oder auch Duisburg der Bau eines Flachwasserbeckens in der großen Versuchshalle am Standort Hamburg, das physikalische Modellversuche in einem hinreichend großen Froude'schen Maßstab von z. B. 1:40 bei Reynold-Zahlen in einer Größenordnung von 10^5 ermöglichte. Somit konnten die Erfahrungen aus bisher bearbeiteten WSV-Projekten sowie der Schiffbauversuchsanstalten u. a. aus Propulsionsversuchen in Schlepptanks mit dem Alleinstellungsmerkmal eines seitlich unbegrenzten Flachwasserbeckens beim Einsatz von Drehzahl geschalteten, selbstfahrenden Modellschiffen verknüpft werden.

Die Abmessungen des Schiffswellenbeckens mit einer Fläche von ca. 1.500 m² sind:

- Länge ca. 100 m (konstante Messstrecke ca. 40 m),
- Breite ca. 35 m,
- Tiefe ca. 0,9 m für maximale Wasserstände von 0,7 m.

Neben den vorhandenen Tiefbehältern (Gesamtvolumen ca. 400 m³) zur Zwischenspeicherung des Modellwassers zusätzlich zum lokalen Tiefbrunnen, konnten sowohl die Krananlagen u. a. zum Transport der Modellschiffe (Längen bis 9 m, Leergewicht bis 600 kg) als auch die Hubarbeitsbühnen u. a. als Messgeräteträger eingesetzt werden. Bild 2 vermittelt einen Blick auf Modellversuche im Schiffswellenbecken am Standort Hamburg (Foto: BAW, 2002).



Bild 2: Blick auf Modellversuche im Schiffswellenbecken am Standort Hamburg (Foto: BAW, 2002)

5 Prozessverständnis zur Schiffsdynamik und schiffserzeugten Belastungen bei Revierfahrt

Die im Jahr 2001 im fertiggestellten Schiffswellenbecken begonnenen Modellversuche (EFD³) im Maßstab 1:40 zum dynamischen Fahrverhalten großer Containerschiffe bei Revierfahrt waren in drei Teilprojekte unterteilt:

- TP1: Fahrt über eine feste, ebene Sohle in seitlich unbegrenztem extremen Flachwasser (u. a. Einfluss der Schiffslänge),
- TP2: Fahrt über eine feste, unebene Sohle in seitlich unbegrenztem Flachwasser (u. a. Einfluss von Transportkörpern),
- TP3: Fahrt im Revier mit seitlich eingeschränkter Fahrrinne im Flachwasser (u. a. Einfluss von Querschnittseinengungen).

Die ersten Ergebnisse aus Vorversuchen sowie den Systemversuchen wurden bei verschiedenen Fachveranstaltungen mit Fachleuten u. a. aus der WSV vorgestellt und diskutiert (Uliczka, 2000; Flügge und Uliczka, 2001a, 2001b, 2001c; Uliczka, 2002).

Ein ausgewähltes Ergebnis aus den Untersuchungen des TP1 zeigt die Grafik in Bild 3, die den Einfluss der Schiffslänge auf den geschwindigkeitsabhängigen Squats in seitlich unbegrenztem Flachwasser verdeutlichte (Strecken des Hauptspantquerschnitts bei derselben Bug- und Heckform; Flügge und Uliczka, 2001a). Tendenziell war eine Abnahme des Squats für die längeren Schiffseinheiten zu erwarten, was besonders beim Vergleich des PPM350 mit dem PPM450 bei höheren Schiffsgeschwindigkeiten deutlich wurde ($\Delta s_{\text{BUG}} \approx 0,3 \text{ m}$, $v_s \approx 17 \text{ Kn}$, $UKC_R = 2 \text{ m}$).

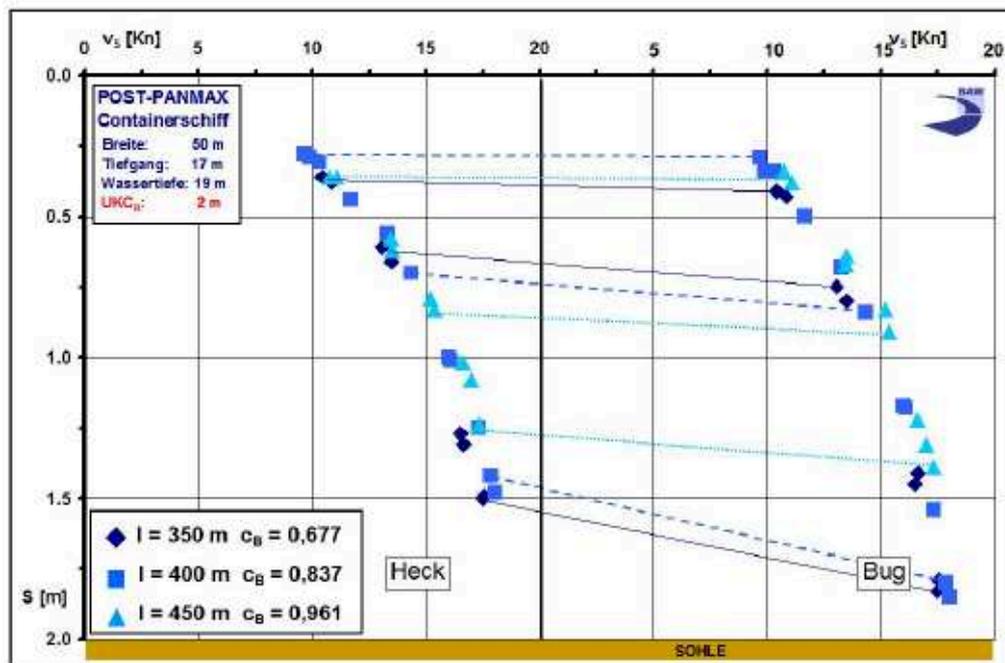


Bild 3: Einfluss der Schiffslänge auf den geschwindigkeitsabhängigen Squats in seitlich unbegrenztem Flachwasser ($UKC_R = 2 \text{ m}$; aus: Flügge und Uliczka, 2001a)

³ EFD: Experimental Fluid Dynamics

Trapezprofil (grün) betrug etwa 20 %. Eine Änderung des Querprofils von einer durchgehenden Böschung von 1 : 4 (hellblau) zu einer Fahrrinne in einem quasi seitlich unbegrenztem Flachwasserbereich (dunkelblau) führte zu einer erheblichen Reduzierung des Squats um annähernd $\Delta S_{\text{HECK}} \approx 4 \text{ dm}$ bei $v_S \approx 13 \text{ kn}$ (u. a. Uliczka et al., 2004).

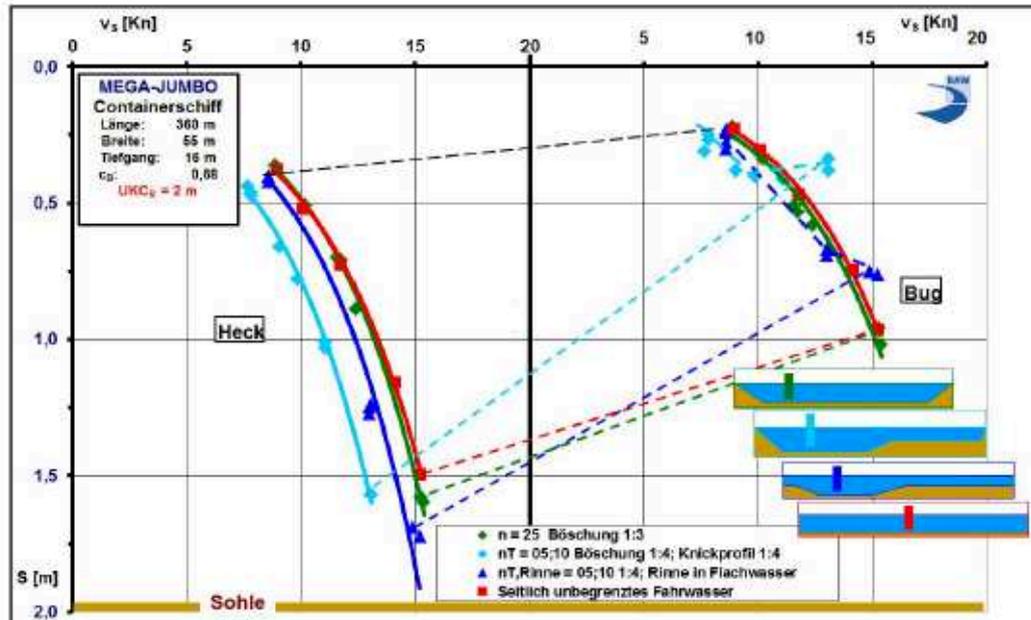


Bild 5: Einfluss von seitlichen Flachwasserbereichen ($h_{\text{RINNE}} / h_{\text{SEITE}} = 3$) auf Squat und Trimm eines MEGA-JUMBO bei außermittiger Fahrt $n = 7,5$ ($n_T = 5 / 10$) sowie Vergleich mit seitlich unbegrenztem Fahrwasser (aus: Uliczka et al., 2004)

Um die Ergebnisse aus dem hydraulischen Maßstabsmodell fachwissenschaftlich abzusichern, wurden von der BAW im Rahmen des FuE-Projekts entsprechende Messungen in der Natur auf der Unter- und Außenelbe vorgenommen, die ausführlich in Kapitel 6 vorgestellt werden.

Vergleichbare Ergebnisse des geschwindigkeitsabhängigen Squats am Bug von Messungen in der Natur und aus dem hydraulischen Modell wurden in Bild 6 aufgetragen. Dargestellt wurden ausgewählte Squatwerte einer Messfahrt auf der Unterelbe (CMS BERLIN EXPRESS am 22.06.2003; gelb) für drei Querschnittsverhältnisse $n = 17$, $n = 20$ sowie $n = 34$ zusammen mit den Squat-Ergebnissen aus den kleinmaßstäblichen Systemversuchen des annähernd gleichgroßen JUMBO mit $n = 14$ bis $n = 35$ (dunkel- bis hellblau). Durch den unterschiedlichen Tiefgang ($t_{\text{MODELL}} = 14,5 \text{ m} - t_{\text{NATUR}} = 12,5 \text{ m}$) und den Breitenunterschied ($b_{\text{MODELL}} = 40 \text{ m} - b_{\text{NATUR}} = 42,8 \text{ m}$) ergab sich ein etwa 8 % geringerer Hauptspantquerschnitt (d. h. geringere Verdrängung) der BERLIN EXPRESS. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt deshalb erwartungsgemäß bei höheren Geschwindigkeiten geringere Squatwerte für die BERLIN EXPRESS. Die gute Kongruenz der Messwerte bestätigte von neuem die Prognosefähigkeit der Modelluntersuchungen bei Einhaltung der Froude'schen Ähnlichkeits- bzw. der Reynolds'schen Grenzbedingungen (Uliczka et al., 2004; Uliczka und Kondziella, 2009).

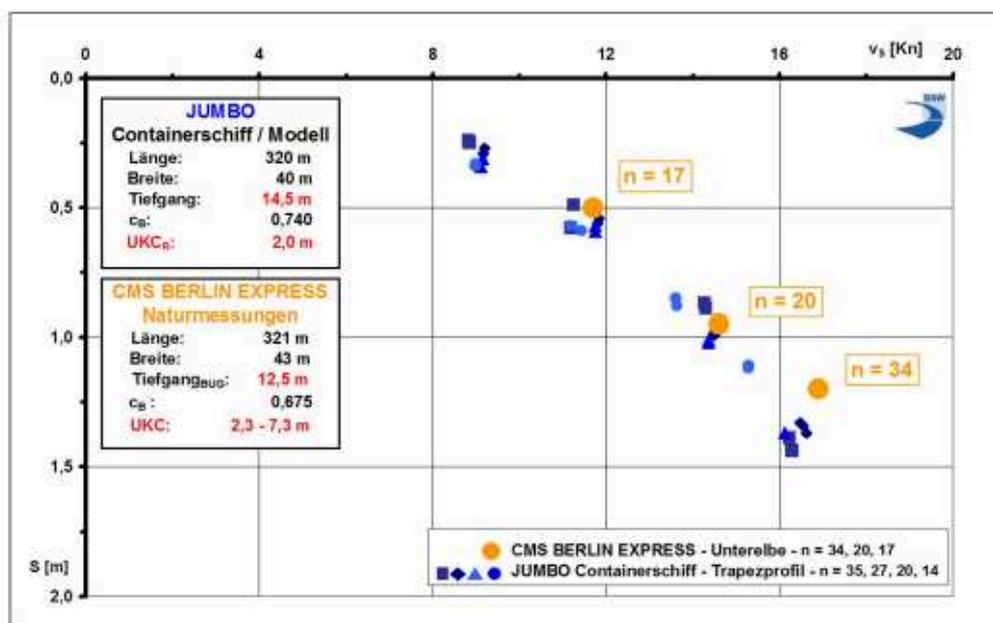


Bild 6: Geschwindigkeitsabhängiger Squat großer Containerschiffe aus Messungen im hydraulischen Modell (Bug, Trapezprofil, mittige Fahrt) im Vergleich zum Squat aus Naturmessungen (Bug, Unterelbe: Nienstedten, Lühesand, Pagensand; aus: Uliczka et al., 2004)

Neben der Aufzeichnung des geschwindigkeitsabhängigen Squat und Trimm wurde parallel der Einfluss der Querschnittsverhältnisse auf die schiffserzeugten Wellen- und Strömungsbelastungen erfasst, analysiert veröffentlicht (u. a. Uliczka et al., 2004; Uliczka, 2008).

Ein Beispiel zur geschwindigkeitsabhängigen Verteilung des Absinks z_A im schematischen Querschnitt einer SeeSchStr aus den Systemversuchen zeigt Bild 7. Die geschwindigkeitsabhängigen Maximalwerte der Absunkmulde seitlich des mittig verkehrenden JUMBO-Containerschiffs sind in Bild 7 im Querprofil für ein n -Verhältnis von $n = 15$ aufgetragen. Farblich gekennzeichnet sind die Absunkwerte je nach Passiergeschwindigkeit des Containerschiffs von $v_s = 9,2$ kn (schwarz) bis $v_s = 16,1$ kn (hellblau). Die maximale Wellen- (Druck-) und Strömungsbelastung treten zwischen Schiff und Sohle sowie im Nahbereich des Schiffs auf. Zur Uferböschung hin nimmt die Belastung beidseits infolge der Energiedissipation im Wasserkörper durch Reibung und Turbulenz überproportional ab (aus: Uliczka, 2008).

Die Ergebnisse dieser Grundsatzuntersuchungen des FuE-Projekts wurden von der BAW (u. a. BAWiki, 2017) im Zusammenhang mit WSV-Projekten an der SeeSchStr Elbe zu weitere Auswertungen herangezogen. Anhand dieser Systemversuche (BAW 2002/2003) wurden z. B. Passagen eines PPM40 (sog.: JUMBO) in Trapezprofilen ($m = 1:3$) unterschiedlicher Breite und somit für unterschiedliche Teilquerschnittsverhältnisse ausgewertet. Die Analyseergebnisse sind in Bild 8 zum gemessenen Absenk z_A am jeweiligen Böschungsfuß für verschiedene Schiffsgeschwindigkeiten ($v_s =$ Mittelwert; Standardabweichung $0,1 \text{ kn} < \sigma_{v_s} < 0,34 \text{ kn}$) aufgetragen. Anhand der geschwindigkeitsabhängigen Ausgleichskurven wurde deutlich erkennbar, dass kein linearer Zusammenhang von langperiodischer, schiffserzeugter Belastung (hier: Absenk z_A) und dem Teilquerschnittsverhältnis n_T besteht und desgleichen kein linearer Zusammenhang zwischen

Belastung und Schiffsgeschwindigkeit existiert. Direkt aus der Grafik abzulesen ist z. B. die Abnahme der langperiodischen Wellenbelastung z_A bei einer Zunahme des Teilquerschnittsverhältnisses n_T für verschiedene Schiffsgeschwindigkeiten. Damit wurde der direkte Bezug der Ressortforschung zu nachfolgenden WSV-Projekten dokumentiert.

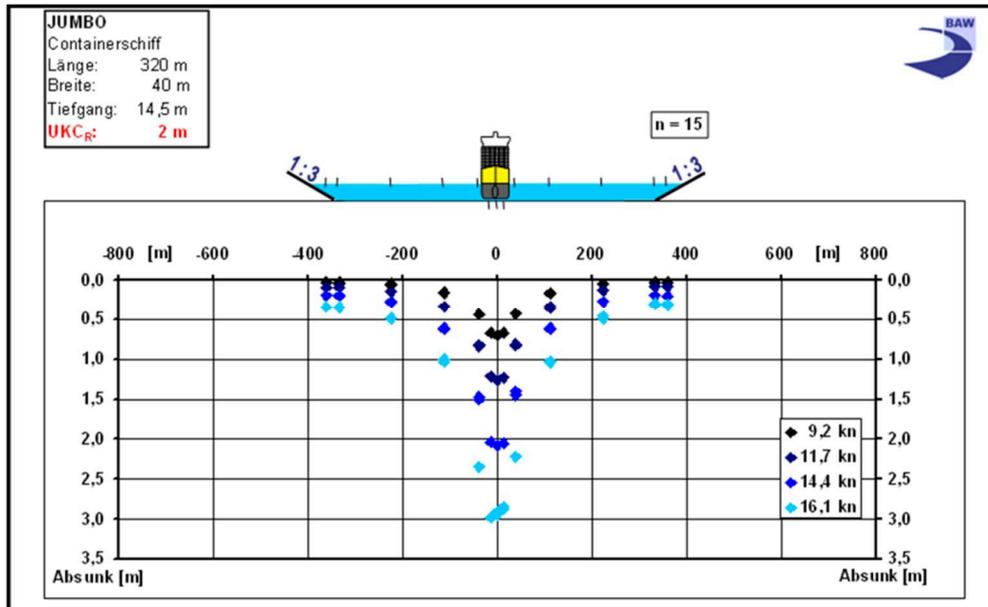


Bild 7: Geschwindigkeitsabhängige Absunkbelastung einer Seeschiffahrtsstraße (schematisch) bei mittlerer Passage eines PostPanMax-Containerschiffs ($n = 15$; Uliczka, 2008)

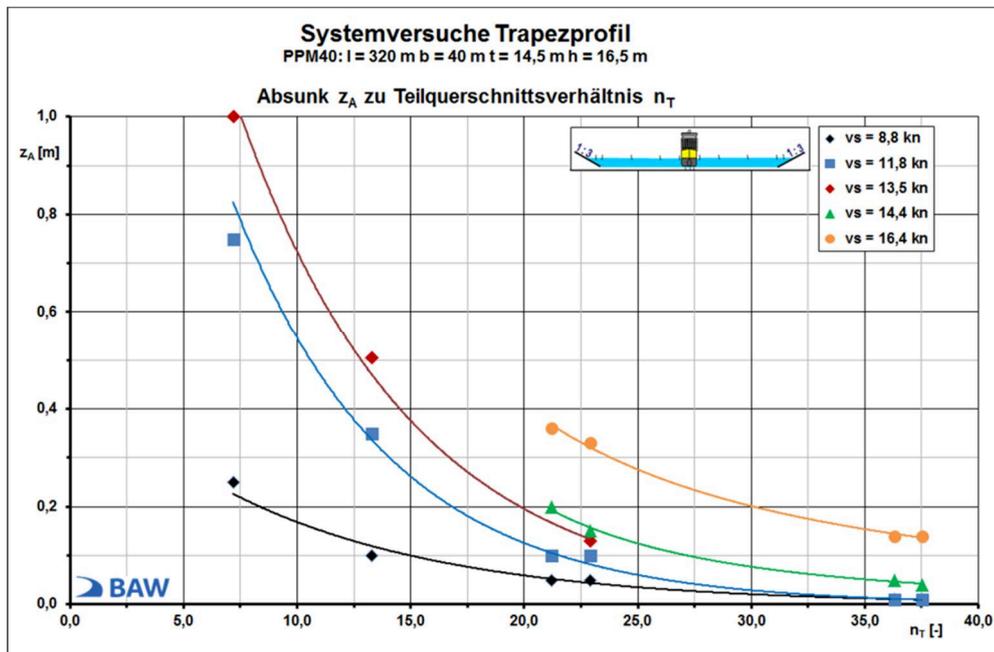


Bild 8: Zusatzauswertungen der FuE-Systemversuche aus den Jahren 2002/2003 zur Verdeutlichung des Zusammenhangs der Uferbelastung durch den Absink z_A und dem Teilquerschnittsverhältnis n_T einer SeeSchStr (u. a. BAWiki, 2017)

6 Messungen in der Natur zum fahrdynamischen Verhalten großer Containerschiffe bei Revierfahrt

Für die Bemessung der Fahrrinntiefen zu den deutschen Seehäfen wurden zuverlässige reierspezifische Angaben zu Squat, Trimm und Krängung benötigt. Bisher zu Grunde gelegte Berechnungsansätze wurden für andere Schiffsgrößen und Schiffsformen ermittelt und waren nicht allgemeingültig, wie in verschiedenen Gutachten der BAW für WSV-Projekte nachgewiesen wurde.

Erste Forschungsergebnisse auf Basis hydraulischer Modellversuche bei der BAW zeigten, dass durch die in der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung eingesetzten Berechnungsformeln zur Festlegung der Fahrrinntiefe für die modernen großen Containerschiffe zu große Squat-Werte ermittelt wurden.

6.1 Messkampagne SeeSchStr Elbe 2003/2004

Ziel der damaligen Untersuchungen auf der Unter- und Außenelbe war es, für diese modernen, (damals) sehr großen Containerschiffe zuverlässige Werte für Squat, Trimm und Krängung zu ermitteln. Auch um die Ergebnisse aus dem hydraulischen Maßstabsmodell fachwissenschaftlich abzusichern, wurden von der BAW im Rahmen des FuE-Projekts diese Messungen in der Natur vorgenommen und in einem Zwischenbericht dokumentiert (BAW, 2004).

Die Erfordernis dieser Vorlauftforschung für die Belange der WSV wurde darin gesehen, dass auf der Basis der Messwerte eine wirtschaftlich optimale Nutzung der Wasserstraßen ermöglicht werden bzw. die Ausbau-Planung auf abgesicherten Grundlagen erfolgen sollte, da zudem für eine weitere Vertiefung des Fahrwassers der Elbe zum Hamburger Hafen Kosten von rd. 1 Mio. € je 1 cm nutzbare Fahrrinntiefe (ohne künftige Unterhaltungskosten) abgeschätzt wurden. Aber auch für den täglichen Betrieb, d. h. die Ermittlung der zulässigen Tiefgänge für die unterschiedlichen Wasserstände (auch bei Mindertiden), war es als erforderlich angesehen, den tatsächlichen Squat zu kennen, um eine wirtschaftlich optimale Nutzung des Fahrwassers zu ermöglichen (nach BAW, 2004).

Die Messkampagnen in der Natur wurden in den Jahren 2003 und 2004 bei ruhigem Wetter, aber auch gezielt bei Starkwindereignissen vorgenommen, um gleichfalls außergewöhnliche Randbedingungen bei der Revierfahrt erfasst zu haben. Ausgewählte Kenndaten der untersuchten Containerschiffs-Klassen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

In einem Zwischenbericht der BAW (2004) zu den Messungen in der Natur zwischen Hamburg CT Altenwerder und Außenelbe (etwa Scharhörnriff Tn2) auf den großen Containerschiffen der Reederei HAPAG-LLOYD (HLCL) wurden erste Ergebnisse der Fahrten der CMS SHANGHAI EXPRESS, CMS HAMBURG EXPRESS, CMS BERLIN EXPRESS und CMS HONGKONG EXPRESS vom Mai bis August 2003 dargestellt und bewertet.

Die erarbeiteten Ergebnisse aus den Messungen in der Natur zum fahrdynamischen Verhalten der großen Containerschiffe bei Revierfahrt auf der SeeSchStr Elbe wurden sowohl vor Vertretern des Hafens Hamburgs und der beteiligten Reederei vorgetragen (Flügge et al., 2003), in

Fachzeitschriften veröffentlicht (Maushake und Joswig, 2004) sowie in Fachausschüssen präsentiert und diskutiert (Flügge und Uliczka, 2003).

Nach der Möglichkeit, den Umfang der Schiffsflotte auf große Containerschiffe der chinesischen Reederei YANG MING, Taiwan mit den Schwesterschiffen YM COSMOS und YM PLUM zu erweitern und damit besondere Konstruktionseigenschaften von Fahrzeugen dieser Klasse bei Fahrt (u. a. eingetauchtes Spiegelheck, hoher Spantausfall am Vorschiff, geringer Blockfaktor; Tabelle 1) zu erfassen, war es dringend geboten, die Ergebnisse dieser Containerschiffstypen bei Revierfahrt mit den in der Fachwelt bisher nur unzureichend betrachteten Wechselwirkungen zum Squat und Trimm bei nationalen wie internationalen Konferenzen darzulegen (Uliczka und Wezel, 2005; Uliczka und Kondziella, 2006a; Uliczka und Kondziella, 2006b).

	Länge l_{0A} [m]	Breite b [m]	mittl. Tiefgang t_m [m]	Blockfaktor c_B [-]	Kapazität TEU [-]
HAMBURG EXPRESS- Klasse	320,4	42,8	10,8 – 12,6	0,62 - 0,65	7.506
5.500-TEU YM-Klasse	274,7	40	11,4 – 13,2	0,56 - 0,59	5.500

Tabelle 1: Ausgewählte Kenndaten der untersuchten Post-Panmax-Containerschiffe (u. a. Uliczka und Kondziella, 2006b)

Einige Beispiele der wesentlichen Ergebnisse der Messung des fahrdynamischen Verhaltens großer Containerschiffe bei Revierfahrt sind in den folgenden Grafiken zusammengefasst:

Aufgrund der begleitenden hydrologischen Querprofilmessungen konnten die Strömungs- und Dichteverhältnisse bei der gesamten Revierfahrt berücksichtigt und damit der Squat gegen die Fahrt durchs Wasser (Bild 9) aufgetragen werden. Die geschwindigkeitsabhängigen maximalen Squatwerte in Bild 9 (Bugsquat; HLCL = Quadrate; YM = Dreiecke) streuten zum einen aufgrund der unterschiedlichen Schiffstypen, zum anderen auch infolge der verschiedenen Wasserstraßenquerschnitte einhergehend mit unterschiedlicher Kielfreiheit (Uliczka und Wezel, 2005).

Der deutlich höhere Bugsquat der YM-Containerschiffe ($\Delta S \approx +0,6$ m bei $v_{saw} = 14$ kn) resultierte aus der sehr starken geschwindigkeitsabhängigen vorlichen Vertrimmung ab einer Schiffsgeschwindigkeit von etwa 11 kn, da diese Schiffe derart konstruiert waren, dass das Spiegelheck ab einem Tiefgang von 12 m eintauchte und so dort für Auftrieb sorgte. Wie die Spantenrisse dieser Schiffsklasse zeigten, erfolgte eine deutliche Auftriebszunahme am Vorschiff aufgrund des hohen Spantausfalls erst ab Eintauchtiefen des Bugs von rund 16 m, so dass die Fahrzeuge beträchtlich vorlich vertrimmen konnten. Der geringe Blockfaktor der YM-Containerschiffe resultierte dementsprechend im Wesentlichen aus dem Vorschiffsbereich, wodurch klar wurde, dass nur ein Blockkoeffizient c_B für das gesamte Schiff zur Beschreibung des dynamischen Fahrverhaltens nicht hinreichend ist und zudem nicht linear in die Berechnungsansätze zu Squat und Trimm eingehen kann (nach Uliczka und Wezel, 2005).

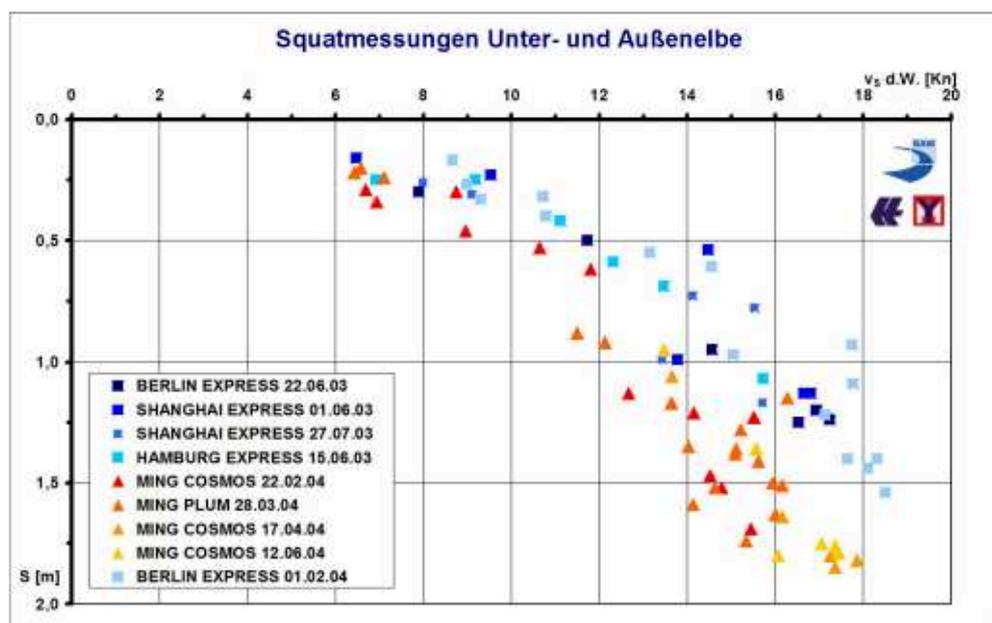


Bild 9: Geschwindigkeitsabhängiger Squat der Containerschiffe von HLCL (Quadrate) und YM (Dreiecke) auf dem Revier der Unter- und Außenelbe (u. a. Uliczka und Wezel, 2005)

Die erfassten Daten in der Natur ermöglichten zusätzliche Analysen zur Wechselwirkung von Schiffen untereinander, wenn sie sich bei Revierfahrt begegneten. Da jedes Schiff bei Fahrt „seine“ Welle „mitführte“, fuhr jedes Schiff auch in die Absunkwelle seines Begegners hinein, so dass eine kurzzeitige Zunahme des jeweiligen Squats in Abhängigkeit des Passierabstands und der geschwindigkeitsabhängigen Absunkwelle des Begegners erfolgte.

Die entlang der Unter- und Außenelbe vorgenommenen zwölf Messungen zum dynamischen Fahrverhalten großer Containerschiffe wurden hinsichtlich der Beeinflussung des Squats bei Begegnungen analysiert. Der zusätzliche Squat bei 125 Begegnungssituationen wurde nach der Größe sortiert und als Summenkurve getrennt nach Bug und Heck aufgetragen (Bild 10, blaue Raute: zus. Bugsquat, rotes Quadrat: zus. Hecksquat).

Die Auftragung in Bild 10 verdeutlicht, dass bei der Flottenstruktur von 2003/2004 im Fahrwasser der Elbe bei etwa 50 % aller Begegnungen mit einem zusätzlichen Squat unter $\Delta S < 0,16$ m gerechnet werden musste und dass bei 90 % aller Begegnungssituationen die Squatzunahme der großen Containerschiffe unter rund $\Delta S < 0,35$ m lag. Die Zunahmen betrafen gleichermaßen sowohl den Bug- als auch den Hecksquat (u. a. Uliczka, 2008).

Die Netto-Verkehrsspurbreite der erfassten Containerschiffe (Verkehrsspur ohne Sicherheitsabstände) wurde anhand eines grafischen Auswertetools der BAW analysiert und nach Fahrinnenradien der Unter- und Außenelbe sortiert (Bild 11). Ziel der Analyse war es, einen Anhalt hinsichtlich des Verkehrsspurbedarfs dieser großen Fahrzeuge bei ruhigen als auch unruhigen meteorologischen Randbedingungen zu bekommen. Bei den mittleren Radien der Revierfahrt zwischen ca. 4.000 m und rund 9.000 m wurde eine Netto-Verkehrsspurbreite von $w_{NETTO} \approx 1,7$ b bis 1,5 b, im Mittel ca. 1,6-fache Schiffsbreite ermittelt (HLCL: $w_{MAX} = 70/42,8 = 1,7$; YM: $w_{MAX} = 60/40 = 1,5$ Bild 11, gelbe Dreiecke). Diese Ergebnisse bestätigten die „Faustformel“ der

auf der SeeSchStr Elbe verantwortlichen Nautiker. Der hohe Verkehrsspurbedarf bei Brunsbüt-
 tel (Radius unendlich) resultierte aus Schiffsmanövern zum Lotsenwechsel (nach Uliczka und
 Wezel, 2005).

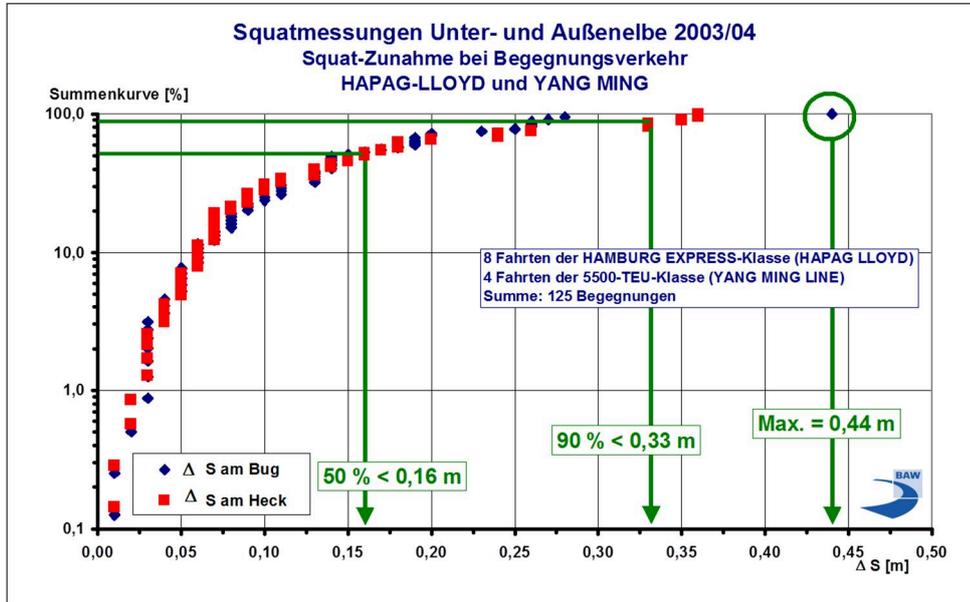


Bild 10: Zusätzlicher Squat von großen Containerschiffen bei der Begegnung mit anderen Fahrzeugen auf der Unter- und Außenelbe (12 Messfahrten, 125 Ereignisse, Flottenstruktur 2003/2004; u. a. Uliczka, 2008).

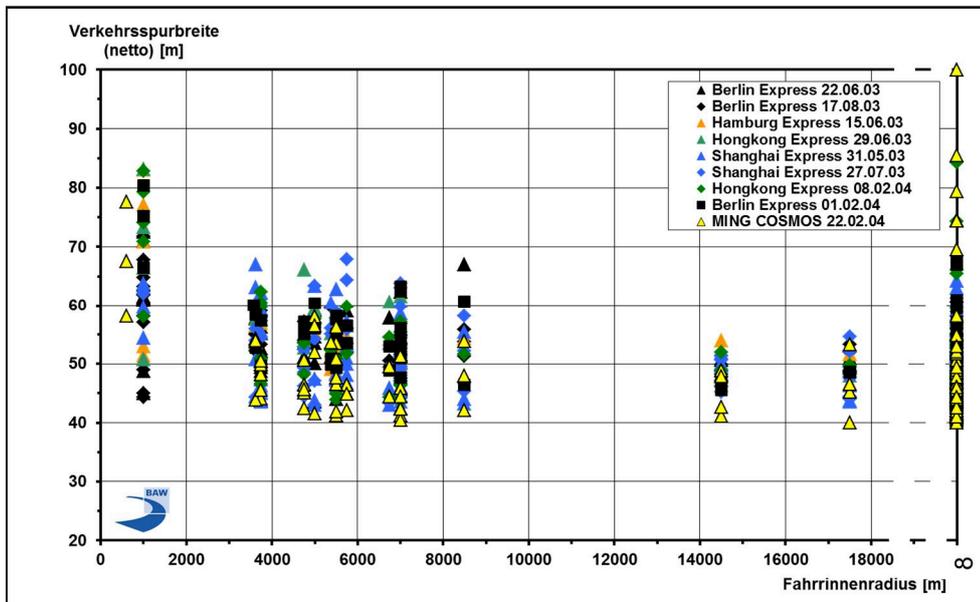


Bild 11: Netto-Verkehrsspurbreite der Containerschiffe sortiert nach Fahrinnenradien auf der Unter- und Außenelbe Analyse der Verkehrsbreite (netto) bei 12 Fahrten (u. a. Uliczka und Wezel, 2005)

Die an Bord der untersuchten Containerschiffe vorliegenden Graphiken und Tabellen zur Abschätzung des Squats in offenem und seitlich begrenztem Fahrwasser gingen auf vereinfachte Ansätze nach BARRASS zurück. Diese vereinfachten Ansätze beinhalteten besonders für begrenzte Fahrwasser sehr hohe Sicherheiten (z. B.: $\Delta S \approx 1,3$ m bei $v_{sdw} \approx 12$ kn), wie der Vergleich der Messungen auf der CSM BERLIN EXPRESS auf der Unterelbe mit entsprechend berechneten Squatwerten nach BARRASS zeigte (Bild 12; Bugsquat über Fahrt durch Wasser; BAW, 2004).

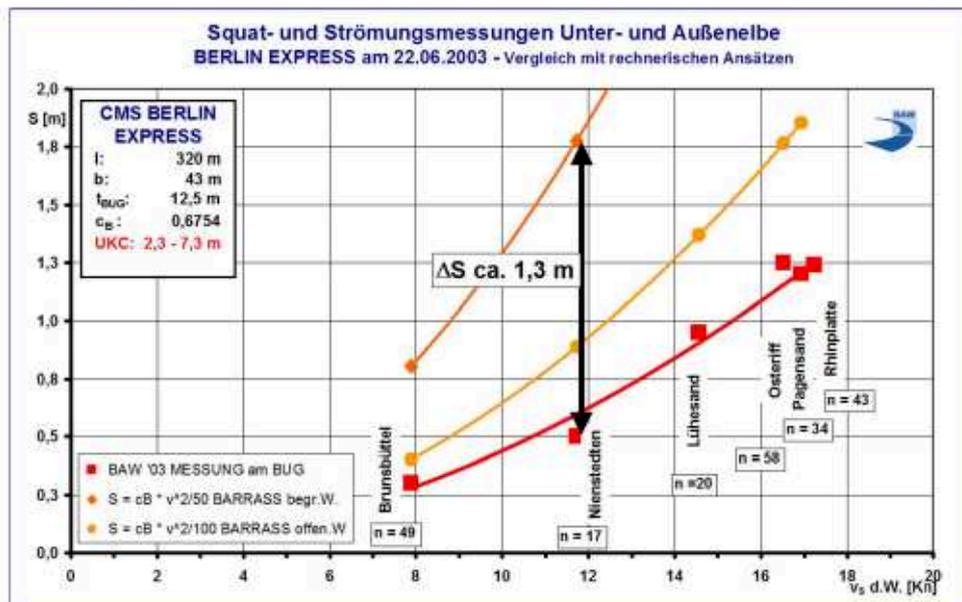


Bild 12: Graphische Darstellung von Berechnungsansätzen zum Squat (hier: BARRASS) mit den Messergebnissen der CMS BERLIN EXPRESS auf dem Revier des Elbeästuars (BAW, 2004)

Aufgrund dessen wurde in den darauf folgenden Veröffentlichungen besonders darauf hingewiesen, dass die Vielfalt der heutigen Schiffsentwürfe allein bei den großen Containerschiffen deutlich machte, dass das konstruktionsspezifische Fahrverhalten bestimmter Fahrzeuge ab höheren Schiffsgeschwindigkeiten durch die überprüften Bemessungsansätze nicht annähernd genau beschrieben werden konnte. Zudem konnte die Verwendung des Blockkoeffizienten c_B als linearer Term in bekannten Berechnungsansätzen zum Squat nicht bestätigt werden.

Um die Konstruktionsvielfalt und das Fahrverhalten der auf den Seeschiffahrtsstraßen verkehrenden Containerschiffe hinsichtlich Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs beim Betrieb der Wasserstraßen berücksichtigen zu können, wurde empfohlen, die Erfassung der Fahrdynamik großer Containerschiffe bei Revierfahrt als stetige Fachaufgabe in der WSV zu verankern (u. a. Uliczka und Kondziella, 2005).

Des Weiteren waren die Ergebnisse der Messungen im Revier der Elbe Grundlage für weitere internationale wissenschaftliche Arbeiten u. a. zum Vergleich und zur Validierung von Vorhersageverfahren zu Squat und Trimm (Briggs et al., 2009; Briggs et al., 2010).

Zusätzliche Veröffentlichungen zu den Ergebnissen aus den Modellversuchen sowie aus den Messungen in der Natur erfolgten z. B. bei der ersten „International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water“ in Antwerpen, initiiert von Ghent University und Flan-

ders Hydraulics Research unter Beteiligung von The Royal Institution of Naval Architects, London (Uliczka und Kondziella, 2009).

6.2 Messkampagne SeeSchStr Elbe 2013/2016

Die Bemessung der Sollsohle der derzeitigen Fahrrinne gemäß Planfeststellungsbeschluss von 1999 sowie auch der zukünftigen Fahrrinne der Unter- und Außenelbe gemäß Planfeststellungsbeschluss von 2012 (derzeit noch nicht rechtskräftig) erfolgte unter anderem unter Verwendung des Tidefahrplanprogramms Elbe. Das Programm wurde zudem im Tagesgeschäft beim Überprüfen der Anlaufbedingungen sowie für das Anordnen von Befahrensrestriktionen für außergewöhnlich große Fahrzeuge (AdF), hier insbesondere großer Containerschiffe, sowohl vom Nautiker vom Dienst (NvD) in der Verkehrszentrale Brunsbüttel als auch im nautischen Büro des WSA Hamburg genutzt (Behm und Jansch, 2015).

Der Schiffsverkehr hatte sich allerdings in den letzten Jahren massiv verändert. Bei leicht abnehmender Anzahl an Fahrzeugen hatten sich vor allem Schiffslänge und Breite deutlich vergrößert. Fakt war aber auch: Die Bathymetrie der Unter- und Außenelbe hatte sich, von natürlichen Veränderungsprozessen einmal abgesehen, seit der Fahrinnenanpassung von 1999 nicht wesentlich geändert (nach Behm und Jansch, 2015).

Das Programm Tidefahrplan Elbe wird eingesetzt zur Berechnung von zulässigen tideunabhängigen und tideabhängigen Tiefgängen sowie von Zeitfenstern, in denen Schiffe die Unter- und Außenelbe sicher befahren können. Um das Programm verlässlich einsetzen zu können, bestand die Notwendigkeit von revierspezifischen, fachwissenschaftlich abgesicherten Daten zum dynamischen Fahrverhalten von aktuell auf der auf Unter- und Außenelbe verkehrenden großen- und tiefgangsrelevanten Fahrzeugen, wie dies die BAW empfohlen hatte (Uliczka und Kondziella, 2005).

Von WSV und BAW wurde einvernehmlich entschieden, dass im Rahmen des FuE-Projekts WSS die BAW die Geschäftsleitung des behördenübergreifenden Projekts übernahm. Des Weiteren war die BAW als Fachberater sowie in der Steuerungsgruppe vertreten, wie die Projektstruktur in Bild 13 verdeutlicht (Behm und Jansch, 2015).

Die Geschäftsleitung unterstützte das WSA Hamburg mit der Erarbeitung der Vergabeunterlagen, der Koordination des WSV-Projekts sowie mit der Qualitätssicherung während der Durchführung und Analyse der Messkampagnen, da entsprechende Erfahrungen der BAW aufgrund der selbst durchgeführten Messungen in 2003 und 2004 vorlagen. Den Zuschlag zur Durchführung der Messkampagnen erhielt nach öffentlicher Ausschreibung die Ingenieurgesellschaft von Liebermann, Hamburg mit dem Unterauftragnehmer TU Hamburg-Harburg, Institut für Wasserbau (Behm und Jansch, 2015).

Die Messkampagnen zur Validierung der Parameter und Berechnungsformeln des Tidefahrplans auf der SeeSchStr Elbe fand für sieben Containerschiffstypen mit der Begleitung von je drei Fahrten statt (je 2 Abgänger, 1 Aufkommer). Zusätzlich wurden drei Fahrten großer Massengutschiffe in die Untersuchungsmatrix aufgenommen. Die vorgesehene Zeitschiene sowie die geplante Untersuchungsmatrix wurde in deutscher Übersetzung in Bild 14 grafisch dargestellt (nach Jansch et al., 2015).

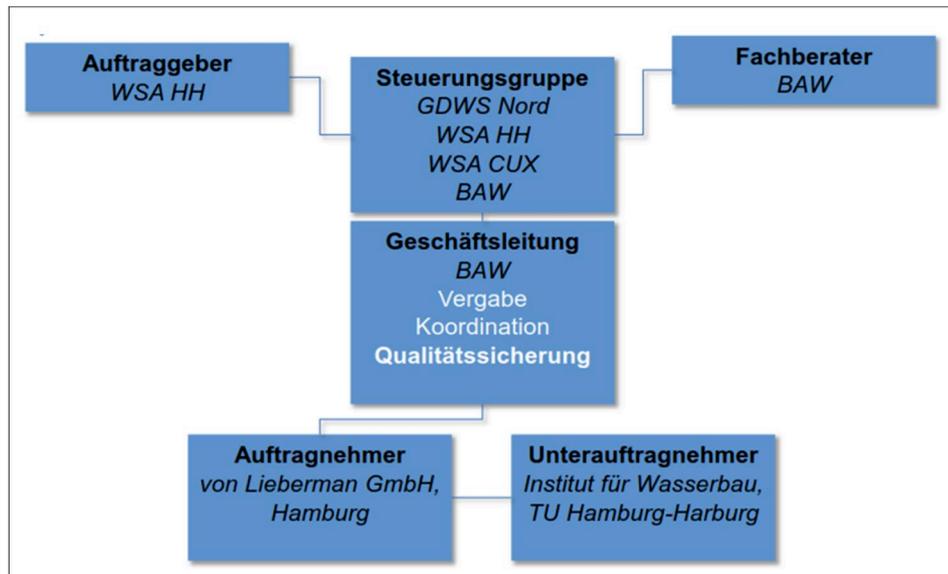


Bild 13: Einbindung der BAW über das FuE-Projekt WSS in die Projektstruktur der WSV (Behm und Jansch, 2015)

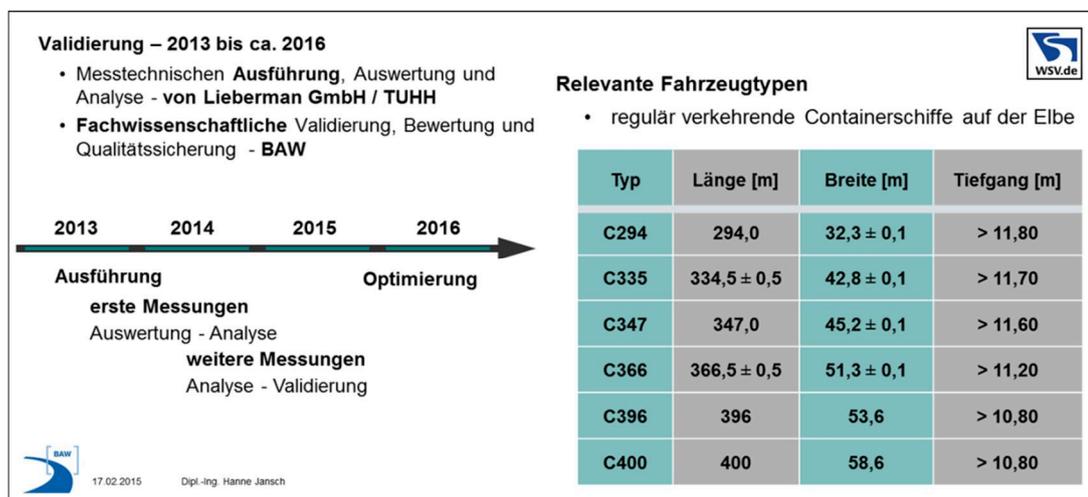


Bild 14: Vorgesehene Zeitschiene und geplante Untersuchungsmatrix der Messkampagnen (nach Jansch et al., 2015)

Mit der Vergabe des Projektmanagements und der Durchführung der Messkampagnen fielen für die BAW umfangreiche Entwicklungsarbeiten zur Qualitätssicherung bezüglich der durch den Auftragnehmer (AN) zu erfassenden und zu bearbeitenden Daten an. Die von der BAW zu entwickelnde Methodik zur Qualitätssicherung war über die gesamte Zeit der Projektdauer (ca. 30 Monate für ca. 20 Messkampagnen) an die Erfahrungen mit dem AN anzupassen.

Ein Augenmerk der BAW wurde u. a. auf einen möglichen Genauigkeitsverlust der dreidimensionalen Positionsbestimmung bei der Satellitennavigation in Abhängigkeit einer zeit- und orts-

abhängigen Abschattung durch das Ladungsbild von Containerschiffen gelegt (Bild 15; Beispielrechnung Bug; Verfahren © 2001-2010 by Trimble Navigation on Limited). Diese Teilmaßnahme der Qualitätssicherung bei der Planung jeder Messkampagne zeigte gerade bei den derzeit größten Containerschiffen (Brücke im vorderen Fahrzeugdrittel) die Notwendigkeit einer Erhöhung der Anzahl von Satellitenempfängern sowie deren Anordnung an Bug, Nock und Heck (BAW-FuE, 2013).

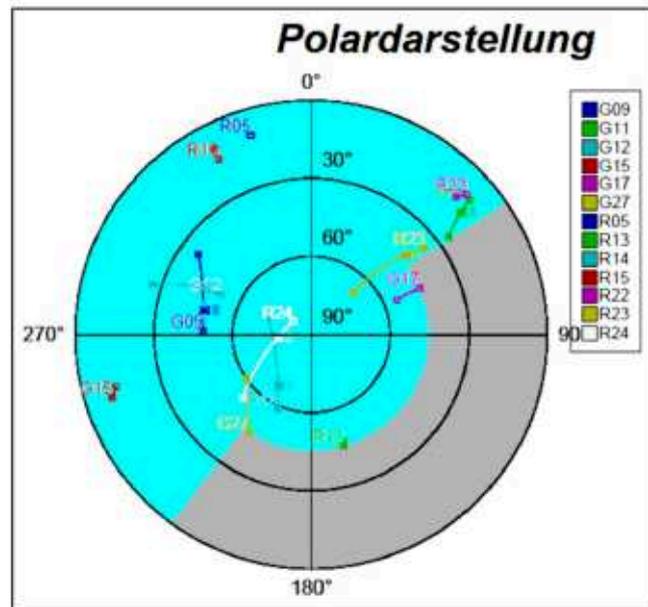


Bild 15: Berechnungsbeispiel zur Qualitätssicherung für eine orts- und zeitabhängige Abschattung bei der 3D-Satellitennavigation am Bug eines Containerschiffs (Verfahren © 2001-2010 by Trimble Navigation on Limited; BAW-FuE, 2013)

Anhand eines weiteren Beispiels wird deutlich, dass schon die Ermittlung der verschiedenen Eingangsdaten in die Berechnung des gemessenen Squats in einem Tideästuar (z. B. Methode zur Ermittlung des Tidewasserstands an der aktuellen Schiffsposition) zu unterschiedlichen Ergebnissen des tatsächlichen Squats führen konnte.

Bild 16 zeigt beispielhaft für die Fahrt eines 18.000 TEU Containerschiffs auf der Elbe zwischen dem Hafen Hamburg (ca. Elbe-km 625) bis hinter der Insel Neuwerk (Elbe-km 750) den aus GNSS-Daten berechneten „Tatsächlichen Squat“ des AN (Zeitreihen Bug dunkelgrün/Heck dunkelrot) und die Berechnungen nach den Methoden der BAW (Zeitreihen Bug hellgrün/Heck orange) sowie die entsprechenden Differenzen (unten). Die Genauigkeitsanforderungen der Erfassung des „Tatsächlichen Squats“ von $\Delta S \leq \pm 0,1$ m wurden vorerst nicht erreicht. Besonders deutlich wurde dabei die Differenz beim Verwenden unterschiedlicher Korrekturdaten für die GNSS-Nachbereitung im Elbe-Abschnitt km 690 bis km 695 (nach BAW-FuE, 2014).

Die Auswirkungen des Ausfalls eines Messparameters auf die Genauigkeit der Squat-Messergebnisse wurden am Beispiel der für die Squatberechnungen erforderlichen ortsabhängigen Dichte des Wassers aufgezeigt. Bild 17 zeigt die aus GNSS-Daten berechneten Standardabweichungen des Hecksquats sowie die Standardabweichung der ortsabhängigen Tiefgangsänderung während der Fahrt zwischen Brunsbüttel und Nordsee. Die ausgeschriebene maximale

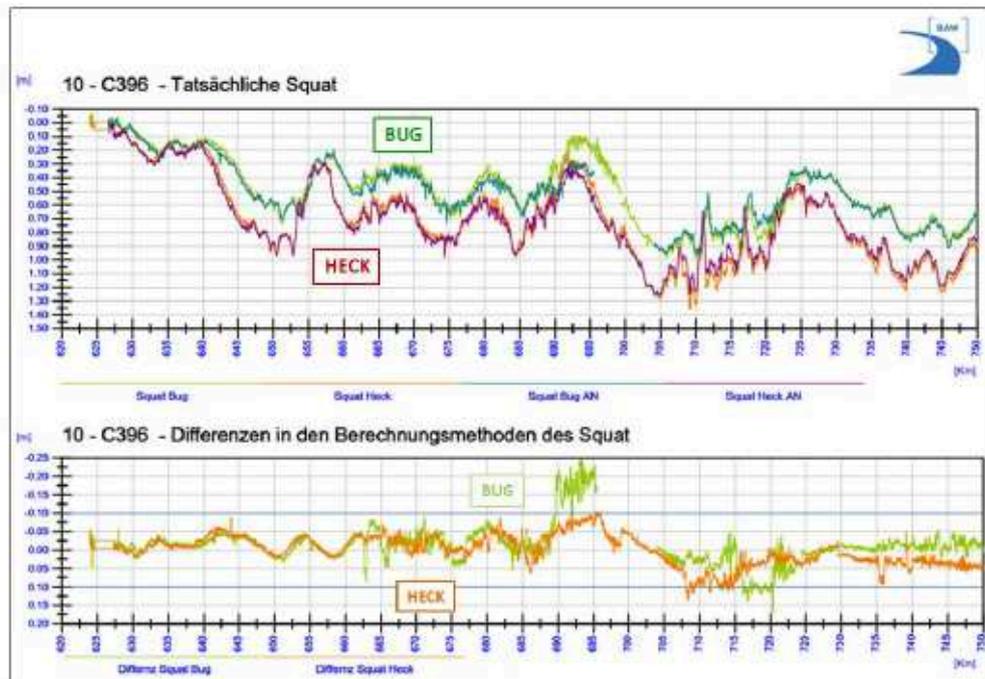


Bild 16: Qualitätssicherung der Berechnungen des „Tatsächlichen Squats“ aus Messungen auf der Seeschiffahrtsstraße Elbe zwischen Hafen Hamburg und See sowie deren Differenzen (Beispiel; BAW-FuE, 2014))

Standardabweichung des zu erfassenden Squats betrug $\sigma_S = 0,10$ m und des ortsabhängige Tiefgangs $\sigma_t = 0,09$ m. Während fünf Fahrten die Genauigkeitsanforderungen der WSV problemlos erfüllen (Bild 17, grüne und blaue Zeitreihen), führte bei der sechsten Fahrt der Ausfall nur eines einzelnen Messparameters, der Dichte, seewärts von Cuxhaven zu einer Überschreitung der erforderlichen Genauigkeit der gesamten Messung. Da die Dichteänderung vom Zeitpunkt des Messgeräteausfalls bis zur festgelegten Position auf See extrapoliert werden musste, ergab sich somit eine ortsabhängige Ungenauigkeitszunahme beim Squat um 50 % bis zu $\sigma_S = 0,15$ m bzw. eine Tiefgangsungenauigkeit bis zu $\sigma_t = 0,12$ m (Bild 17, jeweils rote Gerade; nach BAW-FuE, 2015).

Bei einem erforderlichen Einsatz von 12 schiffsgestützten Messsystemen zur Erfassung des revierabhängigen Squat bemessungsrelevanter Fahrzeuge auf Seeschiffahrtsstraßen ist allein aus wirtschaftlichen Gründen bei einer Messkampagne nicht nur eine Redundanz der Erfassungssysteme sondern vor allem eine detaillierte Qualitätssicherung der einzelnen Messergebnisse sowie die entsprechenden Auswirkungen auf das Gesamtergebnis unabdingbar.

Aufgrund der komplexen Messkampagnen erforderte die laufende Qualitätssicherung der bis August 2016 vorgenommenen Messungen in der Natur einen deutlichen Mehraufwand an Prüfverfahren, Beratung und Schulung des Auftragnehmers im Rahmen des FuE-Projekts, so dass eine Projektverlängerung bis Ende 2017 notwendig wurde (BAW-FuE, 2015).

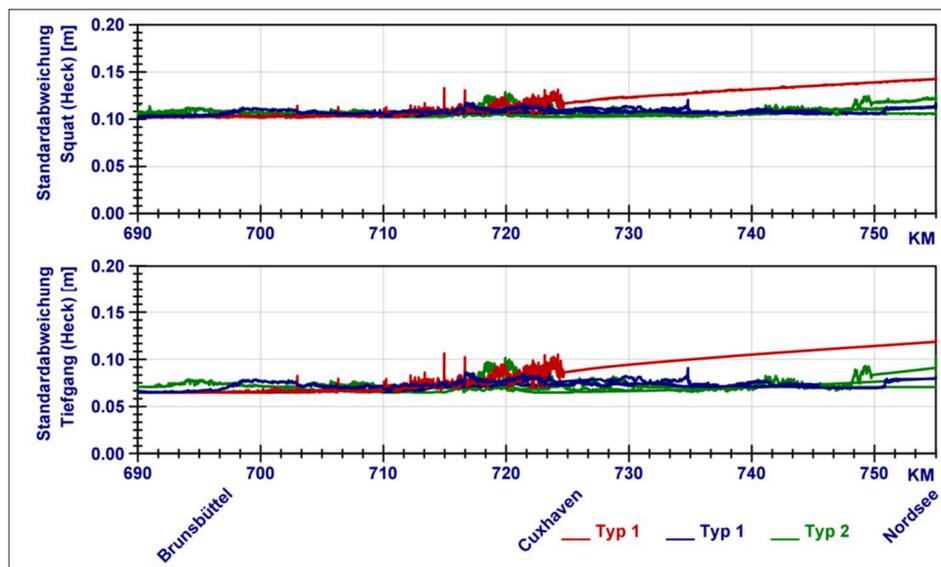


Bild 17: Zunahme der Ungenauigkeit des Squat (oben, rote Gerade) und der Tiefgangsänderung (unten, rote Gerade) anhand der Berechnung der Standardabweichung aufgrund des Ausfalls eines schiffsgestützten Sensors zur Dichtemessung (BAW-FuE, 2015)

Auf Basis der begleitenden Qualitätssicherung im FuE-Projekt der BAW wurden im Rahmen des WSV-Auftrags „Validierung der Parameter der Tidefahrplan-Berechnung Elbe“ des WSA Hamburg (BAW-Nr. B3955.02.33.10127, Stand: Januar 2018) die abschnittsabhängigen Koeffizienten der ICORELS-Formel zur Berechnung des Squats der Schiffstypen auf der Unter- und Außenelbe vorgeschlagen, um weiterhin mit den Ergebnissen des validierten Tidefahrplanprogramms Elbe die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs auf der SeeSchStr Elbe auch für die derzeit in Fahrt befindlichen größten Containerschiffe zu gewährleisten.

Das BAW-Gutachten kam – basierend auf der Qualitätssicherung im FuE-Projekt - zu dem Ergebnis, dass die Genauigkeit der Validierung mit einer durchschnittlichen scheinbaren Standardabweichung von $\pm 0,11$ m ermittelt worden ist. Bei Betrachtung der einzelnen 22 Messkampagnen waren die größten Unsicherheiten von den Parametern der Strömungs- und Dichtemessung abhängig. Die derzeitige in der Tidefahrplan-Berechnung für den Squat von Massengutfrachtern vorgesehene Berechnung nach Barras kann durch die ICORELS-Formel mit den validierten Koeffizienten ersetzt werden. Die Analyse der Messdaten hinsichtlich der Begegnungen hat ergeben, dass bei einer Gesamtanzahl von 213 auswertbaren Ereignissen 99,5 % zu einer zusätzlichen vertikalen Auslenkung von $< 0,30 \pm 0,05$ m der erfassten Fahrzeuge führten.

Neben den fachlichen Aspekten u. a. der Qualitätssicherung der Messergebnisse im Rahmen des FuE-Projekts kamen die Fachkräfte der BAW hinsichtlich der Vergabep Praxis zu der Schlussfolgerung, dass für derart komplexe Aufgaben der WSV bei Ingenieurbüros in der freien Wirtschaft kein Markt für Vergaben vorhanden ist. Aufgrund der hohen Vergabekosten einerseits, aber vor allem aufgrund der Schulung sowie laufenden intensiven Betreuung der AN trotz detaillierter Ausschreibung vom Zeitpunkt des Zuschlags bis hin zur Berichtsabgabe, war dieses Vorgehen als nicht wirtschaftlich zu betrachten, sondern muss als kostenlose Ausbildung von Dritten

durch Vertreter des öffentlichen Dienstes gewertet werden. Für derartig komplexe und außergewöhnliche Messkampagnen sollte zukünftig wieder auf das Fachwissen und die Fähigkeiten spezialisierter erfahrener Kräfte der BAW zurückgegriffen werden.

7 Grundsatzuntersuchungen zur Reduzierung langperiodischer, schiffserzeugter Belastungen von Anliegern an SeeSchStr

Die BAW hatte im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur weiteren Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe vom Planungsbüro des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamts (WSA) Hamburg und der Hamburg Port Authority (HPA) den Auftrag, u. a. die ausbaubedingten Änderungen der schiffserzeugten Belastungen infolge der weiteren Fahrrinnenanpassung unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklung der Schiffsgrößen zu ermitteln und zu begutachten. Die Bewertung der prognostizierten Belastungsänderungen für das untersuchte Referenzgebiet (Elbeabschnitt Hamburger Yachthafen) infolge der zukünftig größeren und tiefer gehenden Containerschiffe und deren Begegnungen kam zu folgender Feststellung: Die zukünftig längeren und breiteren Schiffe verursachen bei gleicher Schiffsgeschwindigkeit in den Yachthafenzufahrten eine Zunahme der resultierenden Strömung, da sich u. a. aufgrund der längeren Absinkzeit eine stärkere Gefälleströmung zwischen dem Absink am Schiff und dem Hafenwasserstand einstellen wird. Aus der Bewertung der zu erwartenden schiffserzeugten Belastung von Yachthafeneinfahrten wurde im Rahmen des Forschungs und Entwicklungsvorhabens (FuE) der BAW „Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße“ (WSS) die ingenieurwissenschaftliche Fragestellung abgeleitet, inwieweit diese langperiodischen Strömungsvorgänge durch bauliche Maßnahmen beeinflusst werden können.

Für die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) lag die Bedeutung dieses FuE-Teilprojekts darin, dass innerhalb der Ausbauverfahren die BAW u. a. die Aufgabe hatte, den Trägern der Vorhaben Vorschläge zur Minimierung des Eingriffs zu unterbreiten, im vorliegenden Fall Vorschläge zur Reduzierung der schiffserzeugten Belastungen von Anliegern wie z. B. Sportboothäfen,.

In dem FuE-Teilprojekt „Grundsatzuntersuchungen zur Reduzierung langperiodischer, schiffserzeugter Belastungen von Sportboothäfen an Seeschiffahrtsstraßen“ des FuE-Vorhabens WSS war zu prüfen, ob durch zusätzliche Molenbauwerke entweder eine Verlängerung des Strömungswegs zwischen Einfahrt und Wasserstraße zu einer Reduzierung der Strömungsamplitude oder ob eher eine Überlagerung der langperiodischen Schiffswellensysteme zu einer Reduzierung der Strömungsamplituden in den Yachthafeneinfahrten führen kann (BAW, 2010).

Das Konzept der Grundsatzuntersuchungen beinhaltete folgende Unterpunkte:

1. Aufarbeitung vorhandenen Expertenwissens der BAW,
2. Schrifttumsrecherche zu bisher umgesetzten Maßnahmen zur Reduktion langperiodischer Belastungen in Hafenanlagen,
3. Bewertung bisher umgesetzter Maßnahmen hinsichtlich langperiodischer, schiffserzeugter Belastungen in Sportboothäfen an Seeschiffahrtsstraßen,
4. Entwicklung wirksamer Maßnahmen auf Basis des vorhandenen Expertenwissens der BAW zur Reduzierung langperiodischer, schiffserzeugter Belastungen an Seeschiffahrtsstraßen,
5. Voruntersuchungen zur Wirksamkeit von Baumaßnahmen anhand hydrodynamisch-numerischer (HN) Modellierungen von parametrisierten langperiodischen Belastungen aus

- Modellversuchen, z. B. mit dem bei der BAW eingesetzten Verfahren UnTRIM (nicht umgesetzt),
6. Bewertung der Voruntersuchungen – Auswahl von Maßnahmen für tiefer gehende Untersuchungen anhand der Modellierung langperiodischer, schiffserzeugter Belastungen und deren Ausbreitung (nicht umgesetzt),
 7. Überprüfung ausgewählter Maßnahmen für komplexe Strukturen am Beispiel des Hamburger Yachthafens an der Unterelbe (Stand der Technik: Physikalisches Modell Maßstab 1:40)
 8. Bewertung der Maßnahmen für eine Auswahl anderer komplexer Hafenstrukturen an Seeschiffahrtsstraßen,
 9. Erstellung eines Berichts über die Wirksamkeit von ausgewählten Maßnahmen mit Übergabe an die WSV.

Der Abschlussbericht des FuE-Teilprojekts enthielt die Bewertung der Wirksamkeit ausgewählter Maßnahmen auf der Basis des aufgestellten Untersuchungskonzepts ohne den Einsatz von HN-Modellierungen, da diese aufgrund von dringlicheren WSV-Projekten nicht zur Verfügung standen (nach BAW, 2010).

Das Ergebnis der Variantenuntersuchungen wurde von der BAW in BAW (2010) wie folgt zusammengefasst: Der Einsatz eines Linienbauwerks vor einem Hafen zur Reduzierung der schiffserzeugten Gefälleströmung in der Einfahrt unter Ausnutzung der Überlagerung schiffserzeugter langperiodischer Wellen ist prinzipiell möglich. Der Anteil der Verlängerung des Strömungswegs an der Verringerung der Ein- und Ausstromamplitude in der Einfahrt wurde nicht explizit ermittelt, wird aber aufgrund der hohen potentiellen und kinetischen schiffserzeugten Wellenenergie nur gering sein. Am Beispiel des Hamburger Yachthafens wurde durch die Liniemole eine deutliche Reduzierung der Strömung in der Hafeneinfahrt um ca. -60 %, eine Dämpfung der Wellenhöhe vor und in der Hafeneinfahrt um ca. 50 % und eine Verringerung der hafenternen Wellenunruhe um ca. -50 % erreicht (BAW, 2010).

Zur optimierten Anwendung eines Linienbauwerks für andere Hafenanlagen an Wasserstraßen wurden von der BAW zusätzliche fachwissenschaftliche Untersuchungen empfohlen.

Im Rahmen der Erstellung der Planfeststellungsunterlagen zur weiteren Fahrrinnenanpassung von Unter- und Außenelbe beauftragte die Projektgruppe Fahrrinnenanpassung die BAW, eine Prognose der zukünftigen ausbaubedingten schiffserzeugten Belastung auf Ufer und baulichen Anlagen infolge größerer und tiefer abgeladener Schiffe und veränderter Unterwassertopologie vorzunehmen. Dazu war u. a. die schiffserzeugte Belastung des an exponierter Stelle der Unterelbe liegenden Siels Hollerwettern zu erfassen, auszuwerten und zu dokumentieren. Die Ergebnisse dieser Messkampagne im Auftrag des WSA Hamburg wurden im Abschlussbericht des AN Ingenieurbüros Dipl.-Ing. Fittschen im Mai 2006 dem Auftraggeber übergeben.

Im Zusammenhang mit der Aufgabe der BAW, Vorschläge zur Minimierung von Ausbaumaßnahmen für den TdV zu erarbeiten, waren im Rahmen des FuE-Projekts zusätzliche Auswertungen zur schiffserzeugten Bewegung der Stemmtore des Deichsiels Hollerwettern an der Unterelbe vorzunehmen. Darüber hinaus waren Möglichkeiten zur Reduzierung der Sieltorbelastungen bei Schiffspassagen zu diskutieren und hinsichtlich der jüngsten Messkampagne zu bewerten.

Diese weitergehenden Auswertungen wurden von der BAW ebenso an das Ingenieurbüro Fittschen vergeben und im Dezember 2006 von diesem in einem weiteren Kurzbericht dokumentiert (Ingenieurbüro Fittschen, 2006).

Als Schutz gegen Schäden an den Stemmtoren durch schiffserzeugte Belastungen wurden in Anlehnung an frühere wissenschaftliche Arbeiten u. a. Geschwindigkeitsbeschränkungen für die Schifffahrt, Verriegelung der Sieltore, Dämpfung der Torbewegungen sowie Anschlagpuffer diskutiert. In der Geschwindigkeitsbeschränkung vor allem der größeren Schiffe wurde der größte und unmittelbar wirksame Erfolg – wie im Schrifttum beschrieben – gesehen, da diese an der Ursache, den hohen langperiodischen schiffserzeugten Wellen, ansetzen würde (Ingenieurbüro Fittschen, 2006).

Die Thematik der schiffserzeugten Belastungen wurde von Uliczka et al. (2008) aufgegriffen, indem Vergleiche von schiffserzeugten Sieltorbelastungen an der Unterweser und der Unterelbe betrachtet wurden. Die Sieltorbeschleunigungen durch langperiodische Absunk- und Primärwellen wurden in Bild 18 gegen die Schiffsgeschwindigkeit über Grund aufgetragen.

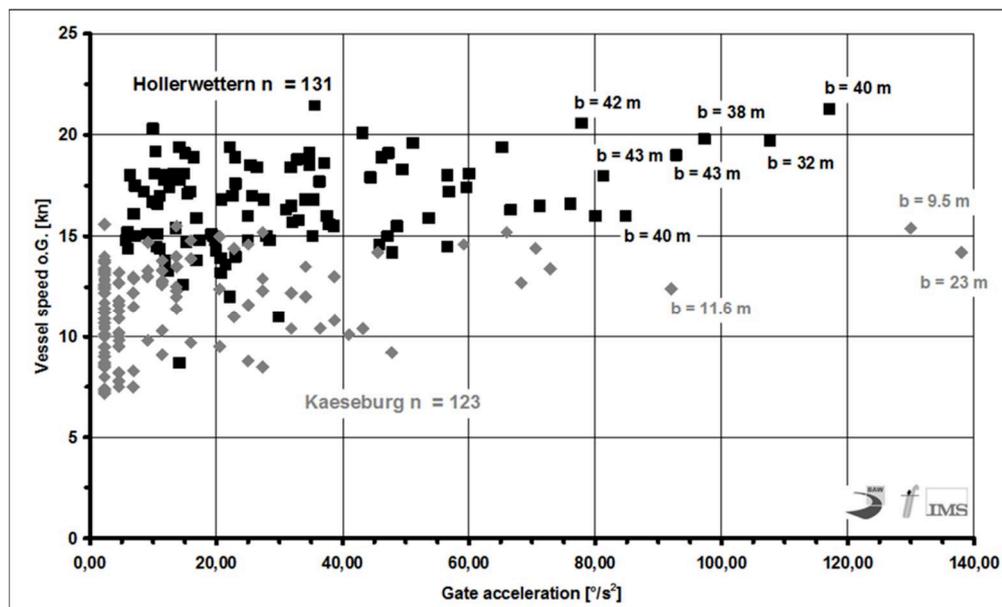


Bild 18: Verhältnis zwischen Sieltorbeschleunigung und Schiffsgeschwindigkeit über Grund aus Messdaten am Siel Käseburg (Unterweser; grau) und Deichsiel Hollerwetter (Elbe; schwarz; Uliczka et al., 2008)

Die Grafik verdeutlicht den Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit auf die Torbeschleunigung (damit auch auf das ungedämpfte Zuschlagen der Tore), während andere Einflussfaktoren wie die Wirkung des Tidewasserstands oder der Außentieflänge anhand dieser Grafik nicht ersichtlich wurde (Uliczka et al., 2008). Die in Bild 18 zusätzliche Bezeichnung der Schiffsbreiten bei den jeweils höchsten Beschleunigungen verdeutlicht den dominierenden Einfluss der Schiffsgeschwindigkeit, die zu einer sehr steilen Heckwelle mit Umformungsprozessen in längeren Außentiefs führte, was beim Zuschlagen der Sieltore extrem hohe Belastungen mit Schäden an der Gesamtkonstruktion zur Folge hatte (Uliczka et al., 2008).

8 Weiterentwicklung numerischer Verfahren aus dem Schiffbau (CFD) als anerkannte Methode für WSS

Die Beratung der WSV durch eine Ressortforschungsanstalt erforderte gerade auch vor dem Hintergrund öffentlich rechtlicher Verfahren eine Kompetenz der BAW nach Stand von Wissenschaft und Forschung. Damit war das FuE-Projekt WSS schon bei der Beantragung im Jahr 2000 auch auf die Weiterentwicklung numerischer Verfahren (CFD) auf dem Gebiet des Flachwasser-effekte in SeeSchStr im Rahmen von Forschungs-Kooperationen mit Instituten aus dem Fachgebiet Schiffbau ausgerichtet (BAW-FuE, 2000).

Die erste vielversprechende Kooperation mit Vertretern des Instituts für Schiffbau der TU Hamburg-Harburg (ICCM 2000) konnte aufgrund des Wechsels der Institutsleitung nicht direkt weitergeführt werden. Die Entwicklung des numerischen RANSE-Verfahrens *COMET* am Institut für Schiffbau wurde weiterhin verfolgt. Um die Leistungsfähigkeit des dreidimensionalen Berechnungsverfahrens (Verfahren *COMET* von ICCM, Hamburg, mit zusätzlichem Body-Motion Modul) zu überprüfen, wurde das Büro Dr. R. Azcueta beauftragt, das von ihm entwickelte Bewegungsmodul für Flachwasserbedingungen zu erweitern und ein neues Berechnungsverfahren für ein Dreischichtenmodell (Luft, Wasser, Boden) bei Einsatz nur eines Berechnungsgitters zu implementieren (Azcueta, 2003).

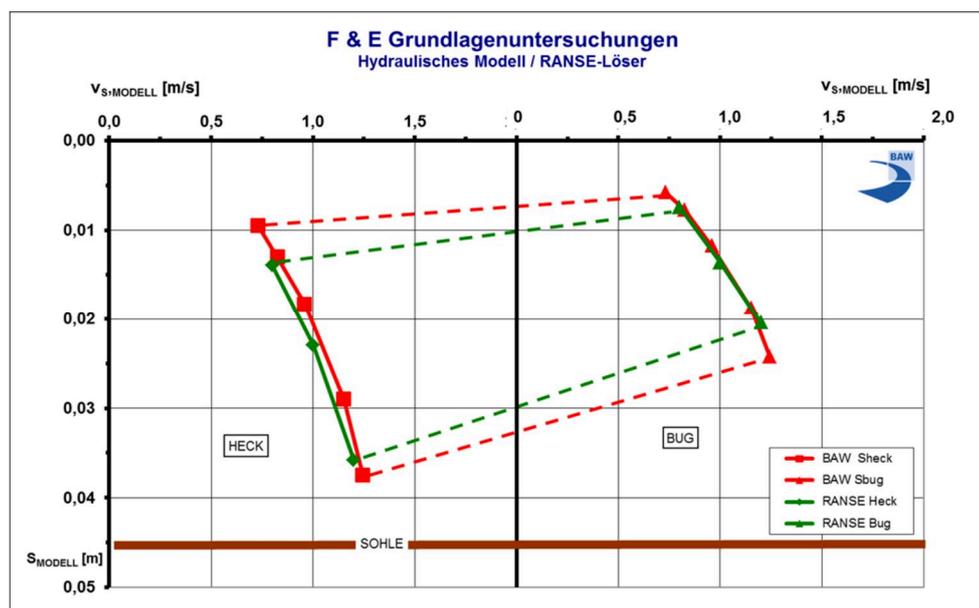
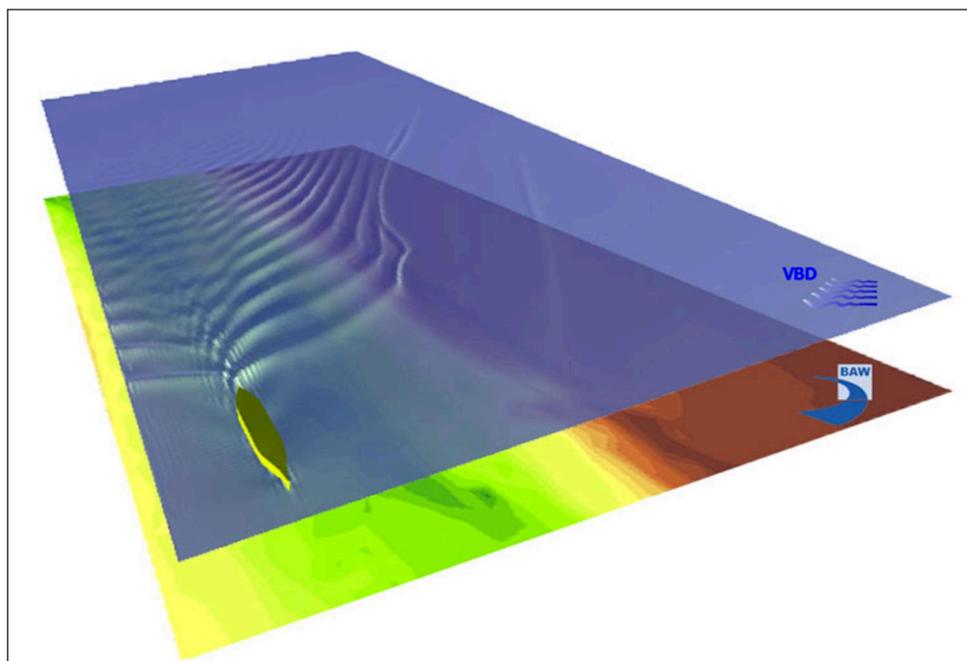


Bild 19: Vergleich von Squat und Trimm aus numerischen RANSE-Berechnungen und Messungen im hydraulischen Modell für den MEGA-JUMBO (BAW-FuE 2003; Daten nach Azcueta, 2003)

Neben Squat und Trimm für drei Schiffsgeschwindigkeiten wurde das Nahfeld hinsichtlich Rückströmung und Schiffswellen berechnet. Um Maßstabeffekte beim Vergleich mit Messungen aus dem hydraulischen Modell (1:40) auszuschließen, wurden die numerischen Simulationen für die Modellabmessungen durchgeführt. Der Vergleich von Squat und Trimm (Bild 19) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten mit den im Modell gemessenen Werten, wobei bei der

Berechnung der Schraubenantrieb nicht berücksichtigt war (BAW-FuE, 2001). Die Weiterentwicklung des dreidimensionalen RANSE-Verfahrens nach Dr. R. Azcueta zur Berechnung des Schiffsnahfelds musste vorerst zurückgestellt werden, da sich u. a. die Schwerpunkte des Büros Dr. R. Azcueta in Richtung der Optimierung von Segelyachten verschoben hatten.

Die strategische Neuausrichtung der numerischen Berechnungsverfahren erfolgte daraufhin in Absprache mit den Fachkollegen der Abteilung W der BAW in Karlsruhe hinsichtlich einer Zusammenarbeit mit den Flachwasserspezialisten bei der Versuchsanstalt für Binnenschiffbau (VBD) in Duisburg. Für die numerische Ermittlung und Ausbreitung von Schiffswellen in breiten inhomogenen Querschnitten der SeeSchStr wurde nach ersten Fachgesprächen mit der VBD die Weiterentwicklung und Validierung des Programms BESH*i*Wa (Boussinesq Equations for Ship Waves) im Rahmen einer Forschungs-Kooperation mit der VBD bei Mitwirkung eines Mitarbeiters der Universität Duisburg, Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme vereinbart. Die Strömung im Nahfeld eines Schiffs wurde der Schlankkörper-Theorie (potentialtheoretisches Verfahren) angenähert, so dass die Wellengenerierung aufgrund spezifischer Schiffsformen nicht abgebildet wurde. Erste Berechnungen mit dem Programm BESH*i*Wa zur Machbarkeit von Berechnungen von Schiffswellen und deren Ausbreitung in Längs- und Querrichtung inhomogener Unterwasserprofile erfolgten in 2001.



*Bild 20: Berechnetes Schiffswellenbild für ein POST-PANMAX-Containerschiff im Außenweserabschnitt IMSUM mit unterlegter Bathymetrie (Programm BESH*i*Wa der VBD; BAW nach VBD 2001)*

Eine Plausibilisierung der Wellenausbreitungsprozesse konnte anhand der Messdaten aus der Natur vorgenommen werden (Bild 20; nach VBD 2001). Für die quantitative Simulation von Fahrten im Tidegebiet war die Einbeziehung natürlicher Strömungsverhältnisse unabdingbar, da die zeitliche Verzerrung des langperiodischen Wellensystems lokal eine andere Belastung bewirkte, wenn als Schiffsgeschwindigkeit „Fahrt durch Wasser“ anstatt „Fahrt über Grund“ angesetzt wurde.

Gegenstand des Folgeauftrags an die VBD war die Verifizierung des Programms BESH*i*Wa zur numerischen Berechnung der Schiffswellenausbreitung unter genauer Berücksichtigung der Bodentopographie im Weser-Ästuar für vier ausgewählte Großcontainerschiffe beim unterschiedlichen Wasserstand. Details zum Berechnungsverfahren und der Kopplung von Wellengenerierung am Schiff und der Bathymetrie abhängigen Wellenausbreitung sind dem Bericht der VBD zu entnehmen (VBD, 2003). Im Vergleich zu den ersten Berechnungen der VBD (2001) kann im Allgemeinen festgestellt werden, dass die neuen Berechnungen durch Anwendung eines modernen Glättungsverfahrens ein ausgeprägteres sekundäres Wellensystem lieferten (VBD, 2003).

Zur deutlichen Verbesserung der Aussagequalität für die untersuchten, instationären und großräumigen Fälle waren Weiterentwicklungen empfohlen, die im Wesentlichen die Berücksichtigung der genauen Geometrie der Schiffsoberfläche einschließlich der dynamischen Trimmlage, insbesondere am Bug und Heck behandeln sollten. Dazu wurde einvernehmlich die Validierungsrechnungen mittels einer interaktiven Kopplung zwischen BESH*i*Wa im Fernfeld und UNOPAM (Unsteady Nonlinear Panel Method) für die Berechnung der schiffsnahen Strömung das Paneelverfahren UNOPAM basierend auf der Potentialtheorie vorgenommen, da diese Nahfeldverfahren aus dem Schiffbau die Schiffsgeometrie sehr viel genauer als die Schlankkörpertheorie berücksichtigten. Der Auftrag zur Kopplung der Verfahren wurde an das Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST - Development Centre for Ship Technology and Transport Systems; ehemals VBD) vergeben und mit dem Abschlussbericht der DST (2004) dokumentiert. Die Berechnungen mit dem Nahfeldverfahren UNOPAM zeigten eine gute qualitative, doch begrenzt quantitative Übereinstimmung der Wasserspiegelauslenkung für hohe Schiffsgeschwindigkeiten bei ebener Sohle. Für geringere Tiefen-Froudezahlen als $Fr_h < 0,7$ war das Nahfeld und die Kopplung noch nicht hinreichend validiert; die Energiedissipation bei der Wellenausbreitung war auch für langperiodische Wellen noch deutlich zu hoch. Die Kopplung und Weiterentwicklung der Verfahren wurde von der BAW für die Auftragsbearbeitung in der WSV als unabdingbar bewertet.

Die BAW diskutierte mit der DST die Weiterentwicklung der einzelnen Verfahren sowie deren Kopplung (UNOPAM/BESH*i*Wa) mit der Maßgabe, inwieweit die Verfahren zukünftig einen erfolgreichen Einsatz zum Nutzen der WSV in öffentlich rechtlichen Verfahren versprechen könnten.

Da die von der BAW beauftragten Entwicklungen zur Kopplung des Berechnungsverfahrens UNOPAM mit BESH*i*Wa von der BAW als nicht hinreichend für die Auftragsbearbeitung in der WSV bewertet wurde, war es unabdingbar, von einem als unabhängig gewerteten internationalen Fachmann auf dem Gebiet der CFD (Computational-Fluid-Dynamics) die bisherige und geplante Vorgehensweise der BAW begutachten zu lassen. Dazu wurde in 2005 Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Bertram, ENSIETA, Brest (jetzt DNV-GL) beauftragt, in einer Expertise die "Wege zur numerischen Simulation schiffserzeugter Belastungen im extrem flachen, seitlich begrenzten, inhomogenen Fahrwasser" aus Sicht des Schiffbaus aufzuzeigen. Als Ergebnis der Expertise kann zusammenfassend festgestellt werden (nach Bertram, 2005):

Für die numerische Simulation schiffserzeugter Belastungen werden in der Fachwelt unterschiedliche Gleichungen benutzt, um die Strömungsprobleme zu lösen. Die Gleichungen bringen

mehr oder weniger weit reichende Vereinfachungen der tatsächlichen Physik mit sich. Die verschiedenen Gleichungen können mit unterschiedlichen numerischen Techniken gelöst werden. Verschiedene kommerzielle Programme sind auf dem Markt, u. a. COMET, STAR-CD, FLUENT, TASCFLOW. Kein Verfahren kann für sich die Erzeugung (teilweise brechender) Wellen am Schiff, deren Ausbreitung über (im Vergleich zum Schiff) relativ große Entfernung und anschließende Aufsteilung und Brechung am Ufer modellieren. Wasserbauer bevorzugen andere Techniken als Schiffshydrodynamiker.

Von wenigen Ausnahmen abgesehen, gibt es wenig direkten Austausch und interdisziplinäre Entwicklungen zwischen Schiffshydrodynamikern und Wasserbauingenieuren. Einige Verfahren kombinieren bereits verschiedene Methoden für Nahfeld am Schiff und Fernfeld, die zeigen, dass verschiedene Verfahren durchaus erfolgreich in hybriden Verfahren kombiniert werden können, wobei gute Kompromisse zwischen Genauigkeit und Aufwand erzielt werden. Allerdings wurden dabei bislang entweder im Nahfeld oder im Fernfeld nach heutigem Stand zu einfache Verfahren benutzt. Kein einzelnes Verfahren kann praktisch das Problem der Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße numerisch behandeln.

Bei der Entwicklung hybrider (schwach oder stark gekoppelter) Verfahren ist unbedingt auf modulare Entwicklung mit sauber definierten Schnittstellen zwischen den Verfahren oder Programmteilen in Nahfeld und Fernfeld zu achten. Dies erlaubt eine Anpassung an den sich entwickelnden Stand der Technik und der Hardware. So kann dann ggf. ein Laplace-Löser im Nahfeld in einigen Jahren gegen einen RANSE-Löser ausgetauscht werden, oder höherwertige Boussinesq-Löser einfachere Modelle ersetzen (Bertram, 2005). Die von Bertram in 2005 vorgelegte Expertise bestätigte die "grundsätzlich korrekte Strategie der BAW der letzten Jahre in Planung und Umsetzung".

In den darauffolgenden Jahren verschoben sich die Forschungsschwerpunkte im FuE-Projekt WSS in Richtung Schiffsführungssimulation (siehe Kapitel 9).

Die ab 2009 vorgenommene Aufteilung der Forschung im Rahmen der Fachaufgabe WSS u. a. in das Teilprojekt Schiffsdynamik führte dazu, dass einer der Schwerpunkte dieses Teilprojekts die Bereitstellung von fachlich abgesicherten Daten zur Diagnose und Prognose der Schiffsdynamik (Squat, Trimm und Bank-Effekt) großer Fahrzeuge (AgF⁴) für das Befahren der Flachwasserreviere wurde. Da validierte und international anerkannte hydrodynamisch-numerische RANSE-Verfahren inzwischen als gleichwertig zum hydraulischen Modellversuch bei der abgesicherten Bearbeitung der Schiffsdynamik bei Revierfahrt bewertet waren, wurden Validierungsdaten für die Weiterentwicklung numerischer Verfahren für die Belange der Revierfahrt aufbereitet (BAW-FuE, 2009).

Die Validierung verschiedener hydrodynamisch-numerischer Prognoseverfahren wurde an eine renommierte, international anerkannte Institution mit spezieller Fachkenntnis zur Schiffshydrodynamik vergeben. Neben den hohen fachlichen Qualifikationen und der entsprechenden Fachausrüstung in der numerischen Simulation (Abteilung Fluidodynamik) sowie das Wissen über die Vielfalt der Schiffsentwürfe aufgrund der hohen Anzahl von weltweiten Schiffsklassifi-

⁴ AgF: Außergewöhnlich großes Fahrzeug

zierungen (über 6.600) kam im nationalen Bereich eine fachgerechte Bearbeitung für das Fachgebiet Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße nur die Klassifizierungsgesellschaft Germanischer Lloyd AG (GL), Hamburg zusammen mit ihrer Tochterfirma FutureShip, Potsdam in Betracht (BAW-FuE, 2009).

Das Büro FutureShip hatte im Vorfeld schon im Auftrag der BAW einige Aufträge zur Weiterentwicklung des potentialtheoretischen Verfahrens FS-FLOW aus dem Schiffbau für die Belange der WSV bearbeitet, das tendenziell zunächst gute Ergebnisse zum Squat und Trimm in engem Flachwasser andeutete. Das Modellverfahren FS-Flow (FutureShip, 2009), welches u. a. lokale Grenzschichtaufdickungen zwischen Schiff und Sohle sowie den Propellersog mittels Senke/Quelle-Scheibe berücksichtigte, zeigte für Passagen eines großen Containerschiffs in dem untersuchten Trapezquerschnitt mit $n = 20$ eine deutliche Annäherung der Rechenergebnisse an die Validierungsdaten aus dem hydraulischen Maßstabsmodell, wie an der Grafik in Bild 21 deutlich wurde (FutureShip, 2009a, 2009b). Es war vorgesehen, weitere Entwicklungsschritte dieses (schnell rechnenden) potentialtheoretischen Verfahrens in Sinne einer Verwendung für die Belange der WSV zu unterstützen.

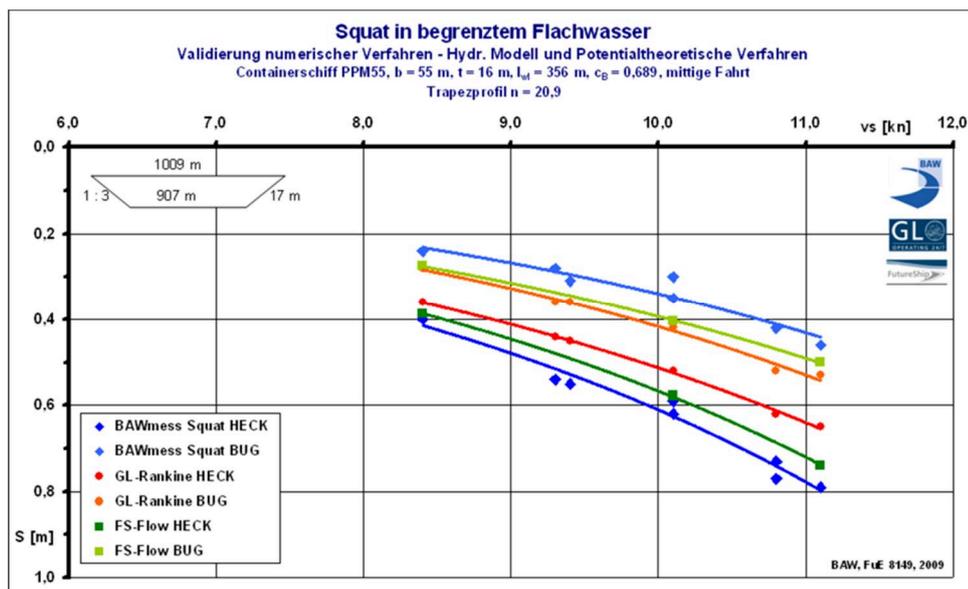


Bild 21: Vergleich von Berechnungsergebnissen aus potentialtheoretischen Verfahren mit den Validierungsdaten aus dem hydraulischen Modell der BAW (BAW u. a. nach FutureShip, 2009)

Die Ergebnisse der umfangreichen Untersuchungen der Germanischen Lloyd AG zur Validierung hydro-dynamisch-numerischer Berechnungsverfahren wurden im Bericht „Zur Validierung numerischer Verfahren zur Vorhersage des Squat großer Frachtschiffe in Revierfahrt“ aufbereitet und bewertet (GL, 2010). Über den beauftragten Umfang der Untersuchungen wurden in eigener FuE-Leistung des GL weitergehende Berechnungen mit der bekannten Modellen (stationäre bzw. instationäre Slender-Body-Methoden) vorgenommen, für die eine Nichteignung für Seereviere bestätigt wurde.

Das Gesamtergebnis des FuE-Projekts mit dem GL zeigte deutlich den damaligen Stand der Technik und Wissenschaft der hydrodynamisch-numerischen Berechnungsverfahren zu Fragen der Schiffsdynamik bei Revierfahrt (GL, 2010):

- Programme, die auf der Potentialtheorie basierten, waren nicht in der Lage, das fahrdynamische Verhalten großer Fahrzeuge (Squat und Trimm) bei Revierfahrt zu beschreiben. Diese Verfahren konnten somit für die Belange der WSV nicht weiterempfohlen werden.
- RANSE-Verfahren waren prinzipiell geeignet, Squat und Trimm in der richtigen Größenordnung zu berechnen, doch mussten derzeit noch Vereinfachungen u. a. in der Unterwasserbathymetrie (wie in der Regel auch beim physikalischen Modellversuch) hingenommen werden. Die Validierung der RANSE-Verfahren zum mittleren Squat waren für alle Fahrzeuge hervorragend. Die Genauigkeit hinsichtlich des maximalen Squats lag für moderne Containerschiffe in der Größenordnung etwa eines Dezimeters (≤ 1 dm) infolge einer größeren Unschärfe bei der Berechnung des Trimm. Instationäre Vorgänge (Beschleunigung, Fahrtreduzierung) waren auch mit dieser Methode nicht nachvollziehbar. Bei Massengutschiffen lagen die Abweichungen von den Modellmessungen im Bereich von etwa zwei Dezimetern (≤ 2 dm), das Trimmverhalten war rechnerisch nicht validierbar. Die RANSE-Verfahren waren nur von Fachleuten aus der Numerik einsetzbar.

Für die WSV konnte aus dem Projektergebnis die Erkenntnis abgeleitet werden, dass für die Zulassung eines jeden AgFs ein Einzelfallnachweis gefordert werden musste. Dieser könnte in Form von entweder geeigneten Schleppversuchen im Flachwasserkanal oder numerischer Berechnungen basierend auf RANSE-Verfahren erfolgen. Das Entwicklungskonzept, im vorgesehenen Zeitrahmen ein schnell rechnendes Programm auf Basis von Übertragungsfunktionen RANSE/Potentiallöser zu erstellen, konnte trotz Einbeziehung anerkannter Experten des GL nicht verwirklicht werden (BAW-FuE, 2009).

In dem FuE-Projekt wurden zusammen mit der Firma FutureShip weitere Anstrengungen unternommen, für Fragestellungen der WSV ein „schnelles“ HN-Werkzeug u. a. zur Anwendung bei Variantenuntersuchungen im Auftrag der Planungsgruppe Nord-Ostsee-Kanal (NOK, Oktober 2009) zu entwickeln.

Die Ergebnisse der in 2010 beauftragten Untersuchungen der Firma FutureShip zur Validierung hydrodynamisch-numerischer Berechnungsverfahren wurden im Bericht „Berechnung zur Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße mit dem Potentiallöser FS-Flow“ aufbereitet und bewertet (FutureShip, 2010). Nach ersten teils erfolgversprechenden Berechnungen in 2009 für Querschnittsverhältnisse von $n = 20$ (vergl. Bild 21) und $n = 10$ waren im Rahmen dieses Projekts Passagen eines PanMax-Containerschiffs für extrem enge Querschnittsverhältnisse von $n = 3,8$ entsprechend der SeeSchStr NOK-Oststrecke beauftragt worden.

Als Ergebnis der weiterentwickelten potentialtheoretischen Berechnungen zur Schiffsdynamik bei Revierfahrt war u. a. im Vergleich zu den Validierungsdaten aus dem hydraulischen Modell der BAW festzuhalten:

- Für die extrem engen Querschnittsverhältnisse waren die Unterschiede der Berechnungen mit Grenzschicht am Schiffsrumpf und zusätzlicher Grenzschicht am Kanalboden vernachlässigbar klein.
- Die geschwindigkeitsabhängige Zunahme der Absenkung (Squat) und des Trimm wurde durch Berücksichtigung der Grenzschichtdicke verstärkt. Die Aktivierung des Propellermodells war erforderlich.
- Die Berechnungsergebnisse für $n = 3,8$ weichen trotz Berücksichtigung der Grenzschichtdicke hinsichtlich Squat und Trimm sowie bezüglich der Wasserspiegelauslenkung seitlich des Fahrzeugs deutlich von den Messungen im hydraulischen Modell ab.
- Das weiterentwickelte potentialtheoretischen Programm ist nach heutigem Stand nicht in der Lage, das fahrdynamische Verhalten großer Fahrzeuge (Squat und Trimm) bei Revierfahrt in sehr engen Querschnitten wie z. B. dem NOK zu beschreiben.

Für die WSV kann aus dem Projektergebnis die Erkenntnis abgeleitet werden, dass dieses Verfahren bei dem derzeitigen Entwicklungsstand für die Belange der WSV am NOK nicht weiterempfohlen werden kann. Die einzige Möglichkeit nach Stand von Technik und Wissenschaft war somit weiterhin, mit rechnerisch und zeitlich aufwändigen, hochauflösenden, reibungsbehafteten RANSE-Modellen das fahrdynamische Verhalten der Fahrzeuge für geometrisch einfache Querschnitte berechnen zu lassen und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Genauigkeitsspanne für die Belange der WSV zu bewerten (nach BAW-FuE, 2010).

Der logisch darauffolgende Entwicklungsschritt zur Bereitstellung eines „schnellen Werkzeugs“ für Variantenuntersuchungen zur Schiffsdynamik in einer engen und extrem flachen SeeSchStr wie dem NOK wurde mit der Vergabe an die GL-Tochter FutureShip in 2011 eingeleitet. Ziel dieser Weiterentwicklung war eine umfangreiche Analyse des Squat bei der Berechnung mit dem RANS-Löser FS-FOAM sowie dem Potentiallöser FS-Flow, um die Möglichkeit zu prüfen, die beiden methodisch unterschiedlichen numerischen Berechnungsverfahren im Sinne eines „Hybridsystems“ zur effizienten Squat Vorhersage zu kombinieren. Dazu war auf Basis der erzielten Ergebnisse ein generischer Korrelationsansatz (Übertragungsfunktion) zu entwickeln, mit dem sich die FS-Flow Ergebnisse für zukünftige Anwendungsfälle der BAW auf die absolut gesehen genaueren Vorhersagen aus FS-FOAM korrelieren lassen, ohne aber im gossen Umfang ressourcenintensive FS-FOAM Analysen durchführen zu müssen (FutureShip, 2011).

Den Vergleich der geschwindigkeitsabhängigen dynamischen Tauchung (Squat) aus Berechnungen mit FS-Flow, FS-FOAM und Messungen im hydraulischen Modell (Maßstab 1:40) für den Kanalfall NOK ($n=3,8$) zeigte die Grafik in Bild 22 (FutureShip, 2011).

Als Ergebnis dieser Untersuchungen war festzuhalten, dass die Übereinstimmung zwischen FS-FOAM und den BAW Modellversuchsergebnisse für den Fall NOK und extremen Tiefgangsverhältnis als gut zu bezeichnen war, die FS-Flow Ergebnisse durchweg richtige Trends zeigten, aber in den absoluten Werten für Trimm und Tauchung unterhalb der Vergleichsergebnisse lagen (vergl. Bild 22; FutureShip, 2011).

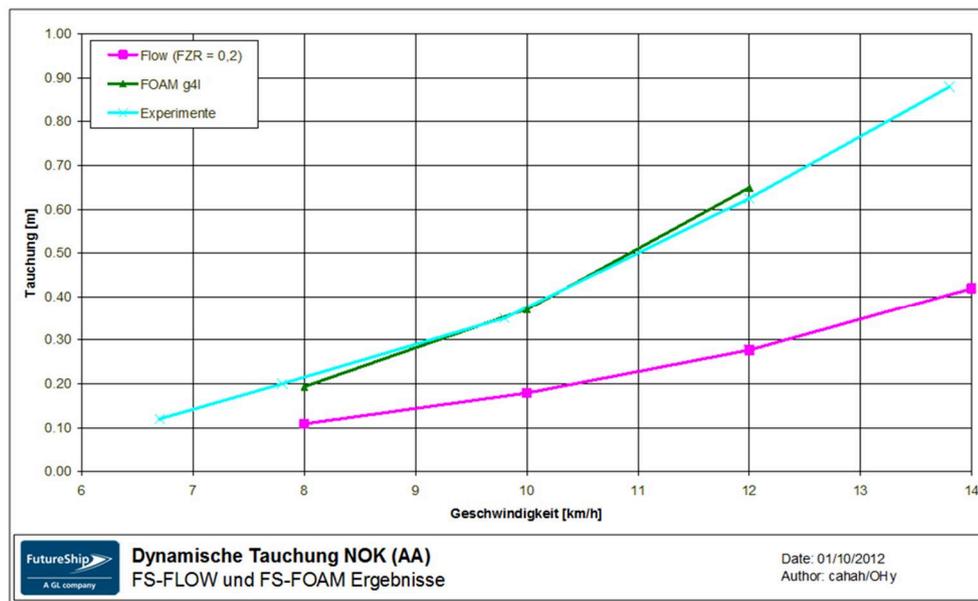


Bild 22: Geschwindigkeitsabhängige dynamische Tauchung (Squat) aus Berechnungen mit FS-Flow, FS-FOAM und Messungen im hydraulischen Modell (Maßstab 1:40) für den Kanalfall NOK (n=3,8; nach FutureShip, 2011)

Um mittels einer Regressionsanalyse die FS-Flow Ergebnisse geeignet auf FS-FOAM umrechnen bzw. korrelieren zu lassen, wurde ein nichtlinearer Ansatz als Funktion der unabhängigen Variablen Geschwindigkeit, Verhältnis Tiefgang zu Wassertiefe, Böschungsneigung und Verblockungsverhältnis definiert. Die Ergebnisse waren nicht zufriedenstellend und FutureShip empfahl, dass für eine verlässliche Regressionsanalyse in 4 bis 5 unabhängigen Variablen die Menge an Abtastpunkten erhöht werden sollten, um für zukünftige Anwendungen ein robustes Korrelationsschema verfügbar zu machen (nach FutureShip, 2011).

Nach nochmaliger intensiver Diskussion in der BAW zu den bisherigen Fortschritten bei der Weiterentwicklung des Tools FS-Flow von FutureShip mit aufgezeigten Implementationen eines weiteren Grenzschichtverfahrens wurde u. a. die grundsätzliche Frage nach dem Nutzen dieses (oder eines anderen potentialtheoretischen) Tools für die BAW und die WSV erörtert. Bei der BAW bestand Einvernehmen, dass die Bearbeitung der aus der WSV an die BAW herangetragenen Fragestellungen zur WSS mittel- bis langfristig prinzipiell derartige 'schnelle' numerische Verfahren erforderte.

Andererseits wurde aus fachwissenschaftlichen und wirtschaftlichen Überlegungen entschieden, die Unterstützung einer ergebnisoffenen Weiterentwicklung dieses Tools vorerst nicht mehr zu verfolgen. Von Seiten der BAW wurde entschieden, auf den hausinternen Einsatz des kommerziellen RANS-Lösers STAR-CCM+ (heute: Fa. Siemens) zu setzen, bei dessen Reengineering vor einem Jahrzehnt über diverse Umwege u. a. auch ehemalige Wissenschaftler der Firma ICCM, Hamburg beteiligt waren (vergl.: ICCM, 2000).

Weitere CFD-Arbeiten mit u. a. STAR-CCM+ erfolgten dann unter dem neu beantragten FuE-Projekt „Schiffshydrodynamik im Flachwasser“ (BAW-Nr. B3955.02.04.70133).

9 Optimierung der Schiffsführungssimulation zur Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse an SeeSchStr

Die Schiffsführungssimulation (SFS) war und ist in der Seeschiffahrt für die Aus- und Fortbildung von nautischem Personal als anerkanntes Werkzeug zertifiziert, um u. a. die Phänomene der Schiffshydrodynamik in der Wechselwirkung mit äußeren Randbedingungen auf See und in Hafenzufahrten zu trainieren. Aus Sicht der Nautik war dieses Werkzeug bei Anpassung einiger Randbedingungen auch für Fragestellungen bei Revierfahrt geeignet, da die Anwendung von Simulatoren u. a. für kritische Randbedingungen von nautischen Fachgremien und Arbeitsgruppen empfohlen wurde (PIANC, 1992, 1997).

Die BAW war seit etwa 20 Jahren aufgrund der hausinternen Weiterentwicklung der hydrodynamisch-numerischen Modellierung der Ästuardynamik in die Optimierung der SFS eingebunden, da u. a. lokale hochaufgelöste Tidestromdaten der SeeSchStr Elbe für die SFS an der damaligen Seefahrtsschule Hamburg (Simulator SUSAN) zur Verfügung gestellt werden konnten.

Bei der endgültigen Festlegung der Fahrrinnenabmessungen bei Revierfahrt waren zudem seit Ende des letzten Jahrhunderts die Ergebnisse aus der SFS von erheblicher Entscheidungsrelevanz geworden, obwohl die Grenzen für eine derartige Anwendung – zum Teil auch für die Auftraggeber aus der WSV – noch unsicher waren.

In 2004 war die BAW zu einer Schiffsführungssimulation im Rahmen der Bemessung der Begegnungsstrecke stromab des Hafens Hamburg eingeladen, bei der unter den Nautikern u. a. die erforderliche Fahrrinnenbreite kontrovers diskutiert wurde. Nachfragen der BAW bei verschiedenen Simulatorbetreibern hinsichtlich der Genauigkeit der SFS bei Fahrten in engen Revieren führten zu ausweichenden Antworten bis hin zur Aussageverweigerung. Somit wurde von der BAW diese Fragestellung im Rahmen des FuE-Projekts WSS aufgegriffen, um die Möglichkeiten und Grenzen des damaligen Stands der SFS für die Belange der WSV zu ermitteln.

9.1 Evaluierung der SFS

Die BAW erarbeitete in enger Kooperation mit Vertretern der WSD-Nord einen Beitrag zur Absicherung der „Möglichkeiten und Grenzen von Schiffsführungssimulatoren für die Anwendung der Fahrrinnenbemessung“. In einem ersten Schritt sollte eine Bestandsaufnahme der Leistungsfähigkeit vorhandener Schiffsführungssimulatoren und ein Konzept zur Leistungsverbesserung erarbeitet werden, sowie die mittelfristig erforderlichen Arbeitsschritte zur Zielerreichung dargestellt werden. Dieses Ziel konnte nur erreicht werden, wenn die fachübergreifenden wasserbaulichen und nautischen Aspekte gemeinsam betrachtet und bewertet wurden.

Für die Berücksichtigung der nautischen Aspekte war eine fachwissenschaftliche Expertise aus Sicht eines auf diesem Fachgebiet langjährig erfahrenen und international anerkannten Nautik-Experten erforderlich. Die Ergebnisse dieser Expertise sollten von Seiten der BAW in eine Stellungnahme aus wasserbaulicher Sicht eingearbeitet und der WSV als Empfehlung zur Verfügung gestellt werden.

Die im Rahmen des FuE-Projekts der BAW zu erstellende Expertise zu den Möglichkeiten und Grenzen von Schiffsführungssimulatoren für die Anwendung bei Bemessungsaufgaben in SeeSchStr sollte folgende Abschnitte behandeln:

- Analyse und Wertung der heute verfügbaren Simulatortechnik der einschlägigen Einrichtungen im deutschsprachigen sowie im europäischen Raum wie z. B. MARIN, SSPA, Danish Maritime oder Flanders Hydraulics Research hinsichtlich der „Genauigkeit“ der modellierten Parameter (z. B. Verwendung linearer oder nichtlinearer Ansätze, Gültigkeitsgrenzen der Ansätze) und der „Einwirkmöglichkeiten“ auf die Parameter. Für die Analyse und Bewertung sollte (i) freie Revierfahrt im beschränktem Fahrwasser, (ii) Fahrt eines Schleppverbandes, (iii) Brückendurchfahrt (z. B. Effekt einer Dalbenberührung) sowie (iv) Schleuseneinfahrt berücksichtigt werden.
- Grenzen der Anwendung der SFS für die Fahrrinnenbemessung hinsichtlich z. B. Ausbaubreite, Ausbautiefe, Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße und Wechselwirkung Schiff/Schiff.
- Entwicklungspotenziale ausgewählter Schiffsführungssimulatoren für die Verwendung zukünftiger Fahrrinnenbemessungen hinsichtlich der u. a. Anforderungen der WSV.
- Empfehlungen für die WSV hinsichtlich möglicher Kooperationspartner für die Weiterentwicklung von Schiffsführungssimulatoren für eine abgesicherte Bemessungsaufgabe in SeeSchStr (Breite, Tiefe etc.).
- Konzeptionen zum wirtschaftlichen Einsatz der Schiffsführungssimulation bei der Fahrrinnenbemessung und der Befahrbarkeitsanalyse z. B. durch Kombination von fast-time-Simulation und SFS.

Für die fachliche Begleitung des FuE-Projekts aus nautischer Sicht und für die Erstellung einer Expertise zu den Möglichkeiten und Grenzen von Schiffsführungssimulatoren für die Anwendung bei Bemessungsaufgaben in SeeSchStr wurde mit Dipl. Naut. Kapt. H. von Morgenstern (ehem. Schiffsführungssimulationsanlage SUSAN, Hamburg) ein auf diesem Fachgebiet langjährig erfahrener und international anerkannter Nautik-Experte gewonnen.

Eine der ersten Sensitivitätsstudien zum Einfluss der mathematisch formulierten Parameter des Bank-Effekts erfolgte zum Beispiel am Institut für maritime Simulation der Hochschule Bremen (IfmS) u. a. mit Nautikern der WSD Nord und Lotsen des NOK. Die prozentuale Änderung der o. a. Parameter des dort verwendeten SFS (RDE ANS500) um bis zu $\pm 30\%$ hatte gezeigt, dass die Manövrierbarkeit eines Schiffs am stärksten durch gezielte Veränderungen des Simulationsparameters „Bank-Effekt“ beeinflusst werden konnte. Damit wurde deutlich, dass die naturähnliche mathematische Formulierung u.a. dieses Parameters sehr stark die Qualität der Schiffsführungssimulation, damit auch die Belastbarkeit einer Simulation z. B. zu einer Fahrrinnenbemessung beeinflusste. Beispielhaft für die Sensitivitätsstudie wurde die Historie von Passagen im Peenestrom zwischen den Tonnen PN22 bis PN26 mit Standardeinstellung und mit Änderung des Bank-Effekt um $+30\%$ dargestellt (Bild 23). Das Schiff war trotz jeweils anfänglich mittiger Fahrt nach Anhebung des Bank-Effekts und bei Annäherung an das linke Ufer auch von erfahrenen Nautikern nicht mehr auf stabilen Kurs zu bringen, so dass die Versuchsfahrt wegen Grundberührung abgebrochen werden musste (Bild 23, rechts).

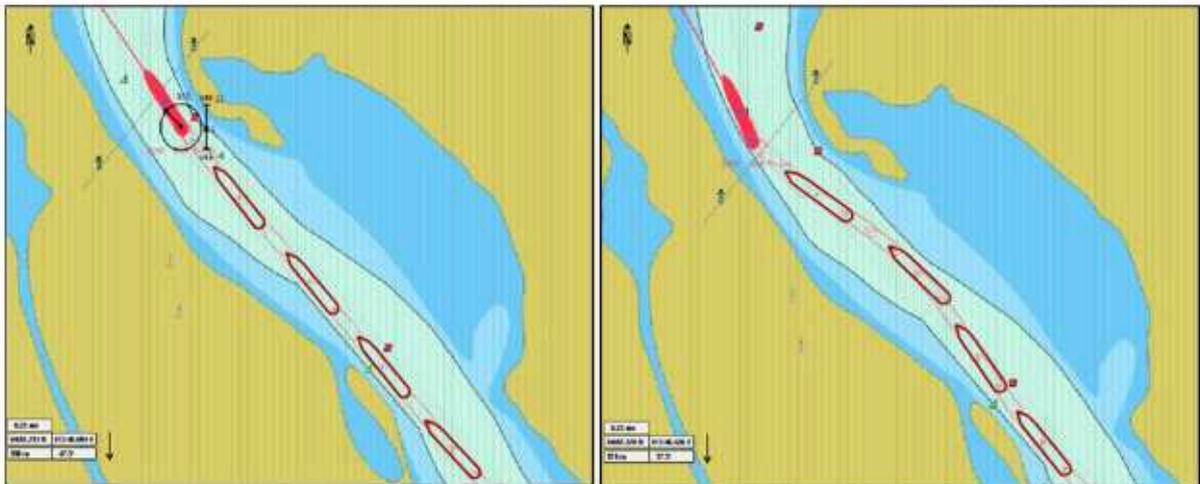


Bild 23: Fahrsimulation mit Historie von Passagen im Peenestrom zwischen den Tonnen PN22 und PN26 bei Standardeinstellung (links) und Änderung des Bank-Effekts um +30 % bis zum Abbruch der Simulation (rechts; BAW-FuE, 2006)

Die Erfassung des heutigen Technologiestandards von Schiffsführungssimulatoren erfolgte durch persönliche Fachgespräche mit den wichtigsten 13 deutschen und europäischen Herstellern und Betreibern von Simulatoren sowie Instituten mit Simulatoren. Dazu zählten u. a. kommerzielle Hersteller wie Force Technology in Lyngby, Dänemark, Simulatorbetreiber wie Maritimes Simulationszentrum Warnemünde (MSCW) und Institute wie z. B. Flandern Hydraulics Research in Antwerpen, Belgien. Es wurde von allen Institutionen eine große Bereitschaft zur Mitarbeit an der Expertise gezeigt, wobei bei den kommerziellen Herstellern eine deutliche Zurückhaltung in der Offenlegung der verwendeten mathematischen Modelle erkennbar war, was mit dem Hinweis auf „kommerzielles Wissen“ begründet wurde (von Morgenstern, 2006).

Nach der Bestandsaufnahme der Leistungsfähigkeit vorhandener Schiffsführungssimulatoren und der Diskussion auf einem internationalen Workshop zur „Usability and Limitations of Ship Handling Simulators for the Fairway Design Process“ im April 2007 in Hamburg waren als besondere Ergebnisse die Punkte Qualitätsprüfung und Entwicklungsrichtungen hervorzuheben.

Anhand der Bestandsaufnahme (von Morgenstern, 2007a) und deren Bewertung (von Morgenstern, 2007b) wurden zwei notwendige Kategorien von Qualitätsprüfungen deutlich:

- Zur Ermittlung der Qualität und der Belastbarkeit der Simulationsergebnisse waren gezielt Sensitivitätsprüfungen durch Parameter-Variation zu erarbeiten, für die Datensätze z. B. aus Maßstabsmodellen oder aus hoch aufgelösten numerischen Modellen vorliegen müssen.
- Die Verfahrenskompetenz der Simulatorbetreiber war hinsichtlich des originären, spezifischen und erweiterten Wissensbereichs z. B. durch Referenzprojekte zu prüfen und bei einer Vergabe von Simulationsleistungen zu berücksichtigen.

Damit wurde deutlich, dass die Qualitätsprüfung auch hohe Anforderungen an die Vertreter des Auftraggebers stellt, die bei einer Vergabe von Simulationsleistungen ebenfalls ein entsprechendes Expertenwissen vorweisen müssen.

Die Anforderungen an Simulationsanlagen aus wasserbaulicher Sicht wiesen auf Schwerpunkte der zukünftigen Entwicklungen hin, die bezüglich der Ergebnisqualität der SFS bei gleichzeitig geringsten Fehlertoleranzen eine erhebliche Verbesserung der Simulationsmodelle in nahezu allen Bereichen erforderte. Folgende Entwicklungsschwerpunkte wurden mit Blick auf die Belange der WSV herausgearbeitet und empfohlen (von Morgenstern, 2007b):

- Qualität von Eingangsgrößen
 - Bathymetriedaten (hohe Peildatendichte)
 - Strömungsdaten (hohe dreidimensionale Datendichte)
 - Topologiedaten (z. B. dreidimensionale Bauwerksdaten)
- Qualität der Modellrechnung
 - Bank- und Flachwassereffekt (nach aktuellem Geländemodell)
 - Squat (nach aktueller Fahrrinnenbathymetrie)
 - Interaktion Schiff/Schiff bzw. Schiff/Wasserstraße (u. a. Kräfte, Wellenwirkung)
 - Mechanische Interaktion (u. a. Anker und Leinenwirkung)

Die Verbesserung der „Eingangsgrößen“ könne nur über die WSV und deren Dienststellen erfolgen oder durch diese veranlasst werden (Auftrag an Oberbehörden oder Vergabe an Dritte).

Bezüglich der Entwicklungsschwerpunkte „Modellrechnung“ müssten im Wesentlichen die Hersteller der Simulationssoftware angesprochen sein, was allerdings auch einer entsprechenden Unterstützung durch die Nutzer z. B. im Rahmen von FuE-Projekten bedürfe. Die Vorteile der Entwicklungen des „Gesamtsystems“ könnten z. B. in erster Linie bei dem für die Fahrrinnenbemessung bzw. Befahrbarkeitsanalyse zuständigen Nutzer (z. B. WSV), andererseits auch bei Anwendern aus dem nautischen Fachgebiet (z. B. Ausbildung, Lotsenwesen) liegen, da auch für diese Fachgebiete eine höhere Qualität der Schiffsführungssimulation von Nutzen sein würde.

Ein für die WSV eher zielführender Weg hinsichtlich der Verbesserung der „Modellrechnung“, der auch von der BAW empfohlen wurde, bestand in der Entwicklung nutzerspezifischer Simulations-Module, die bei Bedarf über Schnittstellen eine erweiterte Nutzung der Gesamtinfrastruktur eines Simulatorherstellers ermöglichten. Der Vorteil dieser Lösung lag in der flexiblen Anpassungsmöglichkeit verschiedener einzelner Simulationsmodule entsprechend der Aufgabenstellung des Nutzers (z. B. Bemessung Fahrrinnebreite oder -tiefe, Hafenmanöver) und des Stands der Technik unabhängig von den in erster Linie kommerziellen Entwicklungszielen der Hersteller.

Das Konzept der Schiffsführungssimulation zur Befahrbarkeitsanalyse und Bemessung von Schifffahrtsstraßen wurde schematisch in Bild 24 dargestellt. Das grafisch dargestellte Konzept zeigt die Trennung von WSV/BAW-interner sowie WSV/BAW-externer Aufgabenbearbeitung.



Bild 24: Schematische Darstellung des Konzepts der Schiffsführungssimulation zur Befahrbarkeitsanalyse und Bemessung von Schifffahrtsstraßen (BAW-FuE, 2007)

Nach einer Informations- und Diskussionsveranstaltung im Februar 2008 wurde das weitere Vorgehen hinsichtlich der Optimierung der SFS zum Zweck einer Befahrbarkeitsanalyse und Fahrrinnenbemessung einvernehmlich zwischen BAW und WSV festgelegt. Die BAW empfahl, das bisher erarbeitete Konzept zur internen Weiterentwicklung der Schiffsführungssimulation für Aufgaben der Befahrbarkeitsanalyse und Bemessung von Seeschiffahrtsstraßen im Rahmen des FuE-Projekts der BAW abzuarbeiten.

In einem nächsten Entwicklungsschritt des FuE-Projekts wurden zur Qualitätssicherung der SFS für die Belange der WSV in einer Expertise zusammen mit der BAW Prüfprozeduren entwickelt und bereitgestellt, die zum einen auf konkreten Validierungsdaten basierten, des Weiteren Daten aus Standardmanövern abfragten sowie zum anderen den Stand der Entwicklung vorhandener Simulatoren als auch das Expertenwissen der jeweiligen Betreiber anhand von Fachfragen prüfen sollten (von Morgenstern, 2008).

Dazu wurden nach erneuter Inbetriebnahme des Flachwasserbeckens der Dienststelle Hamburg in einem FuE-Teilprojekt Kenngrößen für große Containerschiffe zur Abhängigkeit des Bankeffekts bei flachen Uferböschungen mittels hydraulischer Modellversuche bestimmt (u. a. Giermoment, Querkraft), die u. a. als Eingangsdaten für eine optimierte Schiffsführungssimulation vorgesehen waren (siehe Kapitel 9.2).

Als Beispiel einer weiteren entwickelten Prüfprozedur mit konkreten Validierungsdaten wurde von v. Morgenstern (2008) die Qualitätsprüfung eines Simulators anhand der in Wasserstraßen erforderlichen Berücksichtigung der Flachwassereffekte vorgestellt. Dazu konnte ein Vergleich der im Simulator berechneten, geschwindigkeitsabhängigen Schiffsdynamik (z. B. Squat, Trimm)

auf der Basis einer im Handel erhältlichen üblichen elektronischen Seekarte und einer gemäß Peildaten verfeinerten elektronischen Seekarte verwendet werden. Nach dem damaligen Stand der Technik arbeiteten SFS auf der Basis von handelsüblichen „Elektronischen Seekarten“ (ENC, Electronic Navigational Chart), in denen u. a. die für die Fahrrinne garantierte Wassertiefe (Dredged Area) eingetragen war (Bild 25, links, gerasterte Fläche). Für eine Befahrbarkeitsanalyse kann aber u. a. die tatsächliche, teilweise natürlich vorhandene, tiefere Sohle entscheidend sein, so dass für diese Fragestellungen die Weiterentwicklung der ENC als bENC (bathymetric Electronic Navigational Chart) erforderlich wurde und ein SFS diese neue Datenbasis im Rahmen einer Prüfprozedur bei der Berechnung der Schiffsdynamik entsprechend zu berücksichtigen hatte. Eine Basis-ENC und eine mittels Peildaten verfeinerte bENC wurde für den Unterweserabschnitt Rechtenfleth in Bild 25 dargestellt. Auf der bENC (Bild 25, rechts) sind die tatsächlich vorhandenen Wassertiefen, deren Strukturen sowie anhand der Tiefenlinien die detaillierten Unterwasserböschungen zu erkennen (nach: von Morgenstern, 2008).

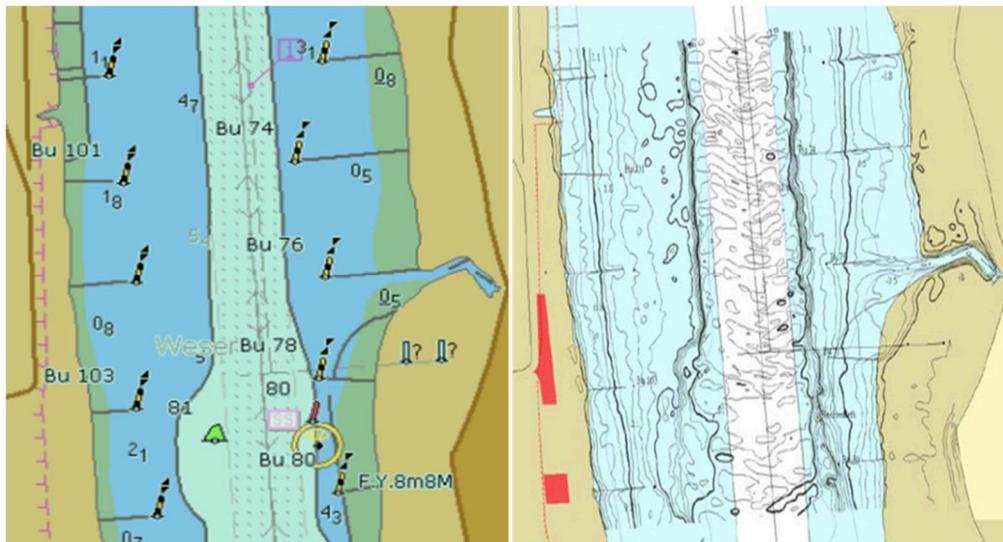


Bild 25: Vergleich der Basis-ENC (links) mit einer gemäß Peildaten verfeinerten bENC (rechts) am Beispiel des Unterweserabschnitts Rechtenfleth als Basis einer Prüfprozedur (nach: von Morgenstern, 2008; aus BAW-FuE, 2008)

Mittels Vergleichsdaten zum geschwindigkeitsabhängigen Squat eines Massengutschiffs aus dem hydraulischen Modell Rechtenfleth der BAW konnte somit die Qualität der Berechnung der Schiffsdynamik (Squat, Trimm) in einem SFS überprüft und somit die Belastbarkeit der Simulationsergebnisse für eine Befahrbarkeitsanalyse bewertet werden.

Während des FuE-Projekts wurden im hydraulischen Maßstabsmodell weitere Daten zum Fahrverhalten großer Containerschiffe im seitlich- und tiefenbegrenzten Flachwasser erarbeitet und international diskutiert (u. a. Uliczka, 2008), die je nach Stand des Bearbeitungsfortschritts als zusätzliche Prüfprozeduren mit konkreten Validierungsdaten zur Bewertung von Schiffsführungssimulatoren im Interesse der WSV hinzugezogen werden konnten.

9.2 Erarbeitung fachwissenschaftlich abgesicherter Eingangsdaten für die Schiffsführungssimulation

Zur Optimierung der Schiffsführungssimulation zur Befahrbarkeitsanalyse und Bemessung von SeeSchStr für die Belange der WSV waren fachwissenschaftlich abgesicherte Eingangsdaten u. a. zur Bestimmung der geschwindigkeits- und abstandsabhängigen Kräfte und Momente durch den Bank-Effekt zu erarbeiten.

Die Kenntnis der auf ein Schiff wirkende Kräfte wie Querkraft und Giermoment sind Voraussetzung für eine fachlich fundierte Simulation von Schiffsfahrten bei Revierfahrt in Schiffsführungssimulatoren, wenn aufgrund des Passierabstands zum Ufer im Wesentlichen die Bank-Effekte das Steuerverhalten des Schiffsführers bestimmen. Dies betrifft ebenso die Kräfte zwischen großen Fahrzeugen bei Begegnungs- und Überholverkehr im Revier. Querkräfte und Giermomente wurden vorerst in hydraulischen Maßstabsmodellen ermittelt, auf die Großausführung übertragen und in Abhängigkeit der Schiffskenndaten (z. B. Länge, Breite, Tiefgang), der Schiffspassagedaten (z. B. Passierabstand zum Ufer oder/und Begegner, Schiffsgeschwindigkeit) und der Wasserstraßendaten (z. B. Böschungsneigung) abgelegt.

Zur systematischen Ermittlung der auf ein Schiff wirkenden Querkräfte und Giermomente u. a. in Abhängigkeit verschiedener Böschungsneigungen wurden bei der BAW-DH Modellversuche im Maßstab 1:40 vorgenommen. Dabei wurden die verschiedenen Parameter bis hin zum ungünstigsten Fall (u. a. geringer Kursabstand, hohe Geschwindigkeit, geringe Under-Keel-Clearance) variiert und die Kräfte auch für damals große Containerschiffe ermittelt, um bei zukünftigen Schiffsführungssimulationen auf eine qualitativ hochwertige Datenbasis zurückgreifen zu können.

Von Juni 2009 bis Juni 2013 wurden mit Unterbrechungen für WSV-Projekte in 78 Serien ca. 1300 Modellversuche bei folgenden Randbedingungen durchgeführt (Angaben in Naturwerten):

- Modellschiffe
 - Containerschiff PPM55: $b = 55 \text{ m}$ $l_{pp} = 360 \text{ m}$ $t = 14,5 \text{ m}$ $c_B = 0,689$
 - Containerschiff PM32: $b = 32 \text{ m}$ $l_{pp} = 280 \text{ m}$ $t = 11,9 \text{ m}$ $c_B = 0,671$
 - Massengutschiff MG32: $b = 32 \text{ m}$ $l_{pp} = 225 \text{ m}$ $t = 11,9 \text{ m}$ $c_B = 0,845$
- Kursachsen zur Wand bzw. Böschungsfuß
 - Senkrechte Wand $K_S = 80 \text{ m}, 120 \text{ m}$
 - Böschung 1:6 $K_S = 27,5 \text{ m}, 80 \text{ m}, 120 \text{ m}$
 - Böschung 1:10 $K_S = 27,5 \text{ m}, 80 \text{ m}, 120 \text{ m}$
 - Böschung 1:15 $K_S = 27,5 \text{ m}, 80 \text{ m}, 120 \text{ m}$
- Kielfreiheit
 - $UKR : 10 \%, 15 \%$ und 20% von t
- Schiffsgeschwindigkeiten
 - v_S ca. $8 \text{ kn}, 10 \text{ kn}, 12 \text{ kn}, 14 \text{ kn}$ (soweit möglich).

Die Messkonfiguration im hydraulischen Modell 1:40 zur Erfassung von Querkräften und Giermomenten beispielhaft für eine Böschungsneigung 1:6 mit dem geringsten Kursabstand ist unmaßstäblich in Bild 26 (links) schematisch dargestellt.

Die Messdaten aller Versuchsserien wurden für eine weitergehende Verwendung zur Optimierung der SFS aufbereitet und dokumentiert sowie in einer Datenbank abgelegt.

Weitere Versuchsserien wurden zur Interaktion Schiff-Schiff bei Revierfahrt vorgenommen. Der Verlauf der Zeitreihen und der auszuwertenden Maxima des Giermoments N [MNm] und der Querkraft Y [MN] an einem Festliegers (hier: PPM55) bei Passage eines weiteren großen Containerschiffs (hier: PPM46; $l_{pp} = 331,4$ m, $b = 46$ m, $t = 14,5$ m, $c_B = 0.584$) mit etwa $v_S \approx 10$ kn zeigt die Grafik in Bild 26 (rechts; aus Uliczka et al., 2013).

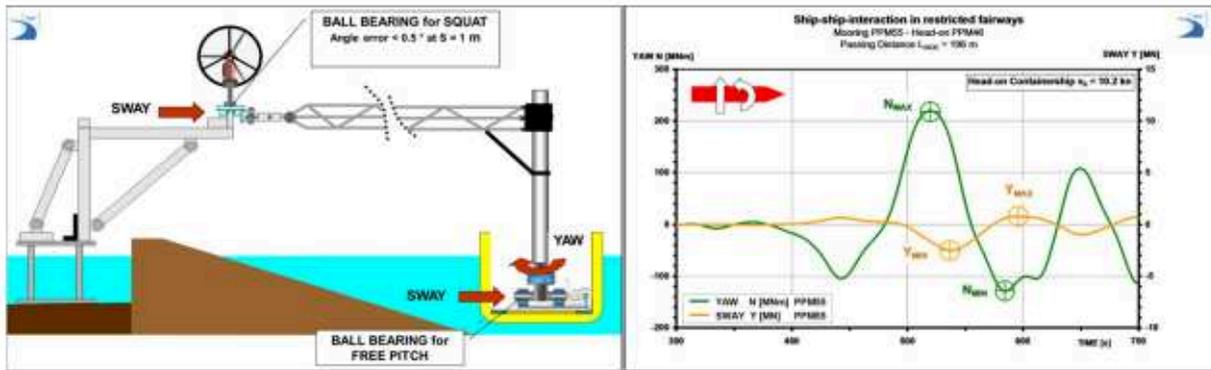


Bild 26: Messkonfiguration zur Erfassung von Querkräften und Giermomenten (links; unmaßstäblich) sowie Zeitreihen und Maxima des Giermoments N und der Querkraft Y eines Festliegers (PPM55; rechts) bei Passage eines großen Containerschiffs (PPM46) mit etwa $v_S \approx 10$ kn (aus Uliczka et al., 2013)

Die auf einen großen Festlieger wirkenden maximalen Querkräfte und Giermomente in einem engen Fahrwasserquerschnitt sind in Abhängigkeit der Tiefen-Froude-Zahl beispielhaft für eine Passierabstand von ca. 200 m in den Grafiken von Bild 27 aufgetragen. Die Messergebnisse weisen auf unterschiedliche Belastungsgrößen in Abhängigkeit der Fahrtrichtung des passierenden Fahrzeugs (hier PPM46) hin (aus Uliczka et al., 2013).

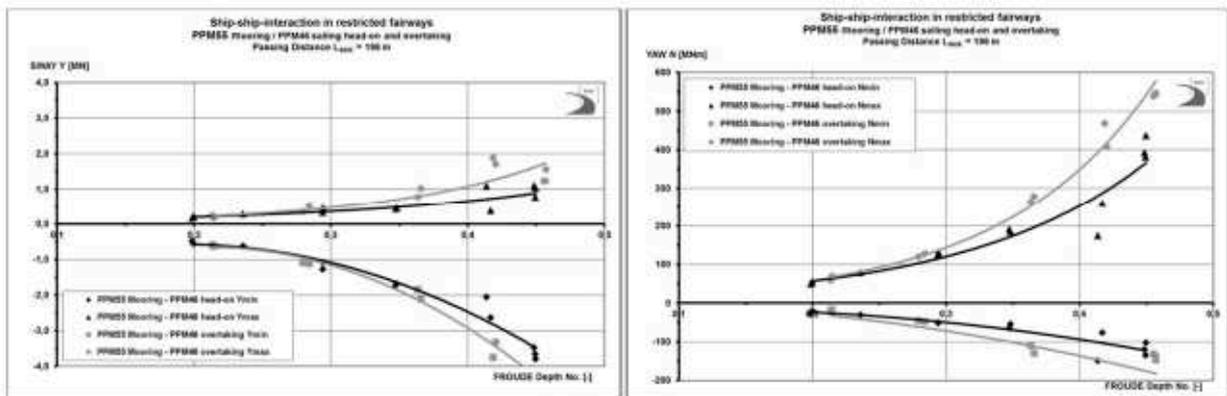


Bild 27: Querkraft Y (links) und Giermoment N (rechts) an einem Festlieger (PPM55) in Abhängigkeit der Tiefen-Froude-Zahl bei wechselnder Fahrtrichtung (Begegnen schwarz; Überholen grau) eines großen Containerschiffs (PPM46; aus Uliczka et al. 2013)

Ausgewählte Ergebnisse zu den gemessenen Querkräften und Giermomenten infolge von Bank-Effekt sowie Schiff-Schiff-Interaktion wurden auf internationalen Fachkonferenzen zur Diskussion gestellt (u. a. Uliczka und Kondziella, 2009; Uliczka et al., 2013).

10 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße (WSS) erforderte aufgrund der Größenentwicklung der Seeschiffe und der daraus notwendigen Befahrbarkeitsanalyse der Tideästuare fortlaufende Forschungsanstrengungen auf den Gebieten der schiffserzeugten Belastungen, der Schiffsdynamik und der Schiffsführungssimulation.

Folgende Forschungsschwerpunkte wurden im Rahmen des FuE-Projekts Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße in einem Zeitraum von etwa 17 Jahren bearbeitet:

- Hydraulische Modellversuche zum Prozessverständnis der querschnitts- und größenabhängigen Schiffsdynamik (Squat, Trimm) sowie schiffserzeugten Belastungen (Wellen, Verdrängungsströmung) bei Revierfahrt,
- Messungen in der Natur zum fahrdynamischen Verhalten (u. a. Squat, Trimm) großer Containerschiffe bei Revierfahrt zur Absicherung der Ergebnisse aus den kleinmaßstäblichen Modellversuchen,
- Grundsatzuntersuchungen im hydraulischen Modell zur Reduzierung langperiodischer, schiffserzeugter Belastungen von Sportboothäfen an SeeSchStr,
- Weiterentwicklung numerischer Verfahren aus dem Schiffbau (CFD) zum einen als „schnelles Werkzeug“ für Aspekte der WSS sowie als weitere anerkannte Methode zur Bearbeitung der Fachaufgabe WSS nach Stand von Wissenschaft und Forschung,
- Möglichkeiten und Grenzen von Schiffsführungssimulatoren für die Anwendung bei der Bemessung und der Befahrbarkeitsanalyse in SeeSchStr,
- Optimierung der Schiffsführungssimulation zur Befahrbarkeitsanalyse und Bemessung von SeeSchStr für die Belange der WSV u. a. durch Erarbeitung fachwissenschaftlich abgesicherte Eingangsdaten im hydraulischen Modell zum Bank-Effekt.

Die Entwicklung der Forschungsfelder und zukünftige Forschungsstrategien für das FuE-Projekt WSS wurden auf BAW-Kolloquien mit Stand 2010 präsentiert (Uliczka, 2010), während ein Überblick wissenschaftlicher Methoden bei der Bearbeitung der Fachaufgabe WSS zusammenfassend in den BAW-Mitteilungen 100 von 2017 veröffentlicht wurde (Kösters et al., 2017).

Das im Rahmen der übergeordneten gleichnamigen Fachaufgabe begleitend durchgeführte FuE-Projekt „Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße“ wurde 2018 vorerst mit diesem zusammenfassenden Abschlussbericht beendet.

Bundesanstalt für Wasserbau
Hamburg, März 2018

gez.
Dr.-Ing. Klemens Uliczka
Projektleiter

11 Forschungsberichte des FuE-Projekts

Azcueta, R. (2003): On the dynamic response of very large container vessels in extremely shallow water by means of RANSE simulations. Report, Hamburg.

BAW (2004): Grundsatzuntersuchungen zu Squat, Trimm und Krängung sehr großer Containerschiffe bei Fahrt unter extremen Flachwasserbedingungen – Zwischenbericht. (BAW-Bericht, FuE – K1 – Nr. 8149)

BAW (2007): Möglichkeiten und Grenzen von Schiffsführungssimulatoren für die Anwendung bei Bemessungsaufgaben in Seeschiffahrtsstraßen. FuE-Vorhaben der BAW, Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße, Forschungsbereich K1: Grundsatzuntersuchungen Wasserbau Küste (BAW-Bericht, A3955.02.50010 – K1 – Nr. 8149).

BAW (2010): Grundsatzuntersuchungen zur Reduzierung langperiodischer, schiffserzeugter Belastungen von Sportboothäfen an Seeschiffahrtsstraßen (am Beispiel des Hamburger Yachthafens). (BAW-Bericht, BAW-Nr. A3955 02 10055).

Bertram, V. (2005): Wege zur numerischen Simulation schiffserzeugter Belastungen im extrem flachen, seitlich begrenzten, inhomogenen Fahrwasser. Jesselallee 29f, D-22145 Hamburg.

DST (2004): Validierungsrechnungen mittels einer interaktiven Kopplung zwischen BESHwa im Fernfeld und UNOPAM im Nahfeld. Bericht Nr. 1755a, Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e. V., DST – Development Centre for Ship Technology and Transport Systems, Duisburg.

FutureShip (2009a): Computation of the squat effect by FS-Flow for the PPM55 container carrier in shallow and confined water. 441-01-01-Squat_PPM55_Report, 091015.ppt, FutureShip GmbH - A GL Company, Behlertstr. 3a, D-14467 Potsdam, Germany.

FutureShip (2009b): FS-Flow based investigation of the squat effect for the PPM55 container carrier in a canal. 441-02-01-Squat_PPM55_Report_091210.ppt, FutureShip GmbH – A GL Company, Behlertstr. 3a, D-14467 Potsdam, Germany.

FutureShip (2010): Berechnung zur Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße mit dem Potentiallöser FS-Flow. Bericht Nr. 441-03-01 Version 4/2010-08-11 Abteilung SO-FH, FutureShip GmbH – A GL Company, Behlertstr. 3a, D-14467 Potsdam, Germany.

FutureShip (2011): Bereitstellung eines "schnellen" HN-Werkzeugs zur Variantenbewertung bei Voruntersuchungen von Ausbauplanungen an Seeschiffahrtsstraße – Pilotstudie. Bericht Nr. 441-04-01 Version 4/2012-01-23 Abteilung SO-EO, FutureShip GmbH – A GL Company, Behlertstr. 3a, D-14467 Potsdam, Germany.

GL (2010): Squat Berechnung für ein Containerschiff bei Revierfahrt. Bericht Nr. SO-FF 2010.147, Germanischer Lloyd, Abteilung Fluid Dynamics/SO-FF, Hamburg.

ICCM (2000): Berechnung der Strömung in einem Drei-Fluid-System (Schlamm, Wasser, Luft). Bericht von ICCM Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH, Bramfelder Straße 164, 22305 Hamburg.

Ingenieurbüro Fittschen (2006): Naturmessungen zur schiffserzeugten Belastung des Deichsiels Hollerwettern – Bericht zur ergänzenden Auswertung von Torbewegungen. Bericht, ingenieurbüro dipl.-ing. fittschen, Hamburg.

VBD (2001): Numerische Bearbeitung der Schiffswellenausbreitung Teilaufgabe A – Variation des Passierabstands. Bericht 1624, Europäisches Entwicklungszentrum für Binnen- und Küstenschiffahrt, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e. V., Duisburg.

VBD (2003): Numerische Bearbeitung der Schiffswellenausbreitung Teilaufgabe B – Verifikation des numerischen Verfahrens. Bericht 1664, Europäisches Entwicklungszentrum für Binnen- und Küstenschiffahrt, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e. V., Duisburg.

von Morgenstern, H. (2006): Nutzung und Grenzen von Simulatoren für Fahrinnenbemessungen. Präsentation und Sachstandsbericht, Projekt [901], Bremen.

von Morgenstern, H. (2007a): Usability and Limitations of Ship Handling Simulators for the Fairway Design Process, Part A. Project : MR_901-BAW-Simulators-2006, Bremen

von Morgenstern, H. (2007b): Usability and Limitations of Ship Handling Simulators for the Fairway Design Process, Möglichkeiten und Grenzen von Schiffsführungssimulatoren für die Anwendung bei Bemessungsaufgaben in Seeschiffahrtsstraßen, Part/Teil B. Projekt : MR_901-BAW-Simulators-2006, Bremen.

von Morgenstern, H. (2008): Entwicklung und Bereitstellung von Prüfprozeduren für Schiffssimulatoren – Expertise. Projekt : MR_932-BAW-Prüfprozeduren, Bremen.

Des Weiteren:

BAW-FuE (2000 bis 2015): Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße – Jahresbericht des Projektleiters. In: Forschungskompodium Verkehrswasserbau, Karlsruhe.

12 Publikationen aus dem FuE-Projekt

Behm, J.; Jansch, H. (2015): Anforderung der Seeschifffahrt – Optimale Nutzung der Bundeswasserstraße Elbe. In: BAW-Kolloquium am 18. Juni 2015, Hamburg.

Böttner, C.-U.; Uliczka, K.; Heimann, J. (2011): Numerical prediction of Squat of large Container Carriers on Waterways. Vortrag und Tagungsband. In: International Conference: Developments in Marine CFD, 22 - 23 March 2011, RINA HQ, London, UK.

Briggs, M.; Debaillon, P.; Uliczka, K.; Dietze, W. (2009): Comparisons of PIANC and numerical ship squat predictions for rivers Elbe and Weser. Vortrag und Tagungsband. In: Nautical Aspects of Ship Dynamics, 3rd Squat-Workshop 21-22 October 2009, University of Applied Sciences, Elsfleth, Germany.

Briggs, M.; Vantorre, M.; Uliczka, K.; Debaillon, P. (2010): Prediction of Squat for Underkeel Clearance. In: Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Hg.: Young C. Kim, World Scientific Publishing, Singapore.

Flügge, G.; Uliczka, K. (2001a): Squat-Untersuchungen für sehr große PostPanMax-Containerschiffe. Vortrag und Tagungsband. In: Sprechtag des HTG/STG-Fachausschuss Seeschiffahrtsstraßen, Hafen und Schiff, Bremerhaven / Hamburg.

Flügge, G.; Uliczka, K. (2001b): Dynamisches Fahrverhalten und Wechselwirkungen mit der Fahrrinnensohle von sehr großen Containerschiffen unter extremen Flachwasserbedingungen. Vortrag und Tagungsband. In: HTG-Kongress 16. bis 19. September 2001, Hamburg.

Flügge, G.; Uliczka, K. (2001c): Fahrverhalten großer Containerschiffe in extrem flachem Wasser. In: HANSA, 138. Jhrg. Heft Nr. 12, Hamburg.

Flügge, G.; Uliczka, K. (2002): Squat und Trimm sehr großer Containerschiffe bei Flachwasserbedingungen für mittige und außermittige Fahrt. Vortrag 40. HTG/STG-Fachausschuss Seeschiffahrtsstraßen, 23./24.Okt. 2002, Emden.

Flügge, G.; Uliczka, K.; Maushake, Ch. (2003): Dynamisches Verhalten großer Containerschiffe bei der Revierfahrt auf der Untereibe. Vortrag bei Hamburger Hafen- und Lagerhausgesellschaft (HHLA), Hamburg.

Flügge, G.; Uliczka, K. (2003): Dynamisches Verhalten großer Containerschiffe bei Revierfahrt. Vortrag 42. HTG/STG-Fachausschuss Seeschiffahrtsstraßen, 28.10.2003, Bremen.

Jansch, H.; Albers, Th.; Treuel, F. (2015): Beneficial exploitation of the waterway Elbe - Validation of the tidal transit-schedule - Determination of vessel dynamics. Vortrag u. a. bei Reederei CSCL am 17. Februar 2015, Hamburg.

Kösters, F.; Uliczka, K.; Böttner, C-U.; Kastens, M. (2017): Wechselwirkung von Schiff und Wasserstraße im Küstenbereich – Ein Überblick wissenschaftlicher Methoden. In: Kompetenz für die Wasserstraßen – Heute und in Zukunft. Forschungs- und Entwicklungsprojekte der BAW, BAWMitteilungen 100, Karlsruhe.

Maushake, Ch.; Joswig, S. (2004): Messung von Squat, Trimm und Krängung sehr großer Containerschiffe im Rahmen von Grundsatzuntersuchungen auf der Elbe. In: Hydrographische Nachrichten, Heft 062, Deutsche Hydrographische Gesellschaft, ISSN 0934-7747, Rostock.

Reiter, B.; Albers, T.; Treuel, F.; Jansch, H. (2016): Applicability of artificial neural networks to squat prediction of very large and ultra large container vessels based on measurements on the Elbe estuary. Vortrag und Tagungsband. In: 4th MASHCON, Hamburg - Uliczka et al. (eds), Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-38-0 (online) DOI: 10.18451/978-3-939230-38-0_18, Karlsruhe.

Uliczka, K. (2000): Zum Squat im hydraulischen Modell. Vortrag und Tagungsband In: Squat Workshop, Oldenburg/Elsfleth, 08./09.11.2000, FH Oldenburg/Ostfriesland/Wilhelmshaven.

Uliczka, K. (2002): Verkehrswasserbau an Seeschiffahrtsstraßen. Vortrag und Tagungsband In: Das Schiff in Wechselwirkung mit der Wasserstraße, 23. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik/Meerestechnik – 13. bis 15. Juni 2002, Universität Duisburg-Essen, Institut für Schiffstechnik und Transportsysteme, Duisburg.

Uliczka, K.; Kondziella, B. (2003): Dynamisches Fahrverhalten extrem großer Containerschiffe unter Flachwasserbedingungen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 86, Karlsruhe.

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

Uliczka, K.; Wezel, M. (2005): Dynamisches Fahrverhalten großer Containerschiffe bei Revierfahrt auf der Unter- und Außenelbe. Vortrag und Tagungsband. In: HTG-Kongress 14.-17. September 2005, Bremen.

Uliczka, K.; Kondziella, B. (2006a): Dynamic Response of very large container ships in extremely shallow water. Vortrag und Tagungsband. In: 31st PIANC World Congress, 14-18 May 2006, Estoril, Portugal.

Uliczka, K.; Kondziella, B. (2006b): Dynamischen Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe unter extremen Flachwasserbedingungen. In: Tagungsband 31. Internationaler Schifffahrtskongress in Estoril, 14.-18. Mai 2006. Deutsche Beiträge, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Deutsche Sektion von PIANC, Bonn.

Uliczka, K.; Peters, K.; Fittschen, Th. (2008): Ship-induced tide gate load on the lower river Weser and lower river Elbe. Vortrag und Tagungsband. In: Proceedings of the 31st International Conference on Coastal Engineering, 31st August to 5 September 2008 in Hamburg, World Scientific Publishing Company Pte Ltd, Singapore.

Uliczka, K. (2008): Seeschiffe auf Seeschiffahrtsstraßen am Beispiel der Unter- und Außenelbe. Vortrag und Tagungsband. In: Hamburg – die Elbe und das Wasser sowie weitere wasserhistorische Beiträge, Schriften der DWhG, Band 13, Siegburg 2009, ISBN 978-3-8370-2347-3.

Uliczka, K. (2008): Erforderliche Entwicklungen für die Wechselwirkungen zwischen Seeschiff und Seeschiffahrtsstraße unter Berücksichtigung der Anforderungen in der WSV – Schiffsführungssimulation für die Anwendung bei Bemessungsaufgaben und Befahrbarkeitsanalysen. Vortrag, 51. HTG/STG-Fachausschuss Seeschiffahrtsstraßen, Hafen und Schiff, 21. Mai 2008, Hamburg.

Uliczka, K.; Kondziella, B. (2009): Research on ship dynamics of large containerships in confined fairways. Vortrag und Tagungsband. In: 2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Bank Effects, May 13-15, 2009, Editors: Eloot, K. and Vantorre, M.; Ghent University/Flanders Hydraulics Research, Antwerp, Belgium, The Royal Institution of Naval Architects, London, GB, ISBN No: 978-1-905040-46-9.

Uliczka, K. (2010): Optimierung von Kenngrößen für die Bemessung von Seeschiffahrtsstraßen - Forschungsfelder und -strategien zur Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff - Seeschiffahrtsstraße. Vortrag BAW-Kolloquium 27. April 2010, Hamburg.

Uliczka, K.; Böttner, C.-U.; Carstens, D. (2013): Head-on traffic at the approach channel to Port of Hamburg. Vortrag und Tagungsband. In: 3rd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship Behaviour in Locks, June 3-5, 2013, Ghent, Belgium. Editors: Royal Institution of Naval Architects, Flanders Hydraulics Research and Ghent University – Maritime Technology Division.

13 Literaturverzeichnis

BAW (2017): Systematische Untersuchungen zur Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt im Revier mit seitlich begrenzter Fahrrinne im Flachwasser. In: BAWiki, Internetpräsentation.

[http://wiki.baw.de/de/index.php5/Systematische Untersuchungen zur Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt im Revier mit seitlich begrenzter Fahrrinne im Flachwasser](http://wiki.baw.de/de/index.php5/Systematische_Untersuchungen_zur_Erfassung_von_Squat_und_Trimm_sowie_schiffserzeugter_Druck-_und_Wellensysteme_bei_Fahrt_im_Revier_mit_seitlich_begrenzter_Fahrrinne_im_Flachwasser)

(Aufruf am 16.02.2018).

PIANC (1992): Capability of ship manoeuvring simulation models for approach channels and fairways in harbours. Report of Working Group PTC II-20, Supplement to Bulletin no 77, Brussels, Belgium.

PIANC (1997): Approach Channels – A Guide for Design. Final Report of joint PIANC-IAPH Working Group PTC II-30, Supplement to Bulletin no 95, Brussels, Belgium.



Kußmaulstraße 17 · 76187 Karlsruhe
Tel. +49 (0) 721 97 26-0 · Fax +49 (0) 721 97 26-45 40

Wedeler Landstraße 157 · 22559 Hamburg
Tel. +49 (0) 40 81 908-0 · Fax +49 (0) 40 81 908-373

www.baw.de