

Containertransport (2.1)

Dynamisches Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe unter extremen Flachwasserbedingungen

Dr.-Ing. Klemens Uliczka

Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg

Dipl. Ing. Bernhard Kondziella

Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg

Veranlassung

Die rasante Entwicklung der Containerschifffahrt hat die Prognosen der Schiffsgrößenentwicklung in den letzten Jahren deutlich übertroffen. Sehr große Post-Panmax-Containerschiffe mit Kapazitäten bis etwa 8.500 TEU laufen schon heute Hamburg und Bremerhaven an. Containerschiffe mit Kapazitäten von 9.700 TEU sollen in 2008 ausgeliefert werden. Für derartige Schiffe mit Längen um $l = 340$ m, Breiten um $b = 46$ m und Tiefgängen bis etwa $t = 14,5$ m ist die Kenntnis ihres fahrdynamischen Verhaltens bei Revierfahrt erforderlich, um zum einen die für weitere Fahrinnenanpassungen der Unter- und Außenelbe sowie der Außenweser eingesetzten Berechnungsansätze auf ihre Gültigkeit für derart große Fahrzeuge hin zu überprüfen sowie zum anderen der Schifffahrt eine wirtschaftlich optimale Nutzung der Wasserstraßen zu ermöglichen.

Erste Grundlagenuntersuchungen zum dynamischen Fahrverhalten derart großer Containerschiffe in hydraulischen Modellen (Maßstab 1:40) zeigten Tendenzen eines reduzierten Squats auf (Uliczka/Flügge, 2001; Flügge/Uliczka, 2001), die durch weitere Modellversuche in seitlich unbegrenztem sowie seitlich begrenztem, extremen Flachwasser ergänzt wurden (Uliczka et al., 2004). Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts der BAW wurde erstmals anhand von RANSE-Simulationen das Verhalten dieser Schiffsmo- delle im seitlich unbegrenzten, extremen Flachwasser numerisch nachvollzogen (Azcueta, 2003); diese Untersuchungsmethode ist jedoch z.B. hinsichtlich einer Fahrinnenbemessung noch immer dem Bereich der Forschung zuzuordnen.

Zur Ergänzung der systematischen Grundlagenuntersuchungen wurden mit Unterstützung der Hamburger Haf- und Lagerhaus AG (HHLA), der Hapag Lloyd Container Line GmbH (HLCL) und der Yang Ming Marine Transport Corporation (YM) umfangreiche Messungen zum fahrdynamischen Verhalten großer Containerschiffe bei Revierfahrt auf der Unter- und Außenelbe vorgenommen. Ein erster Vergleich mit den Systemversuchen aus dem hydraulischen Modell zeigte erwartungsgemäß eine gute Übereinstimmung des geschwindigkeitsabhängigen Squats (Uliczka et al., 2004). In Verbindung mit einer hydrodynamisch-numerischen

Hindcast-Modellierung der jeweiligen hydrologischen Randbedingungen auf der Elbe konnten zudem die Squat- und Trimm-Messungen nicht nur in einzelnen Querschnitten, sondern entlang der gesamten Fahrstrecke vom Hamburger Hafen bis in die Außenelbe auf ca. 120 km annähernd lückenlos mit ausgewählten Berechnungsansätzen verglichen und bewertet werden.

Neueste Erkenntnisse aufgrund weiterer Untersuchungen bei geringer Under Keel Clearance (UKC) verdeutlichen die Notwendigkeit zur kontinuierlichen Beobachtung der Schiffsentwicklung und deren Fahrverhalten unter extremen Flachwasserbedingungen, wie sie bei Revierfahrten in den deutschen Seeschifffahrtsstraßen gegeben sind (Uliczka/Wezel, 2005).

Der Fachbegriff „Dynamisches Fahrverhalten“ wird im folgenden reduziert auf die vertikalen Bewegungen des Schiffs (Squat und Trimm) in Wechselwirkung u.a. mit der Schiffsgröße, Schiffsform, der Schiffsgeschwindigkeit, den Fahrwasserbegrenzungen und den Sohlstrukturen. Als Squat ist die Absenkung des fahrenden Schiffs mit dem Primärwellen-System, das es selbst bei Fahrt erzeugt, definiert. Trimm ist die Verdrehung des Schiffs um die Querachse und wird beeinflusst u.a. von bestimmten Schiffsparametern sowie der Schiffsgeschwindigkeit.

Systemversuche im hydraulischen Modell

Die Systemuntersuchungen im hydraulischen Modell hatten das Ziel, der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) für kommende Ausbauplanungen die geschwindigkeits-, wasserstands- und tiefgangsabhängigen Parameter Squat und Trimm zur Festlegung der Fahrinnentiefen zur Verfügung zu stellen. Die Modelluntersuchungen waren in drei Teilprojekte unterteilt:

1. Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt über eine feste, ebene Sohle in seitlich unbegrenztem Flachwasser
2. Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt über eine feste Sohle mit Transportkörpern (TK) in seitlich unbegrenztem Flachwasser
3. Systematische Untersuchungen zur Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt im Revier mit seitlich begrenzter Fahrinne im Flachwasser

Ausgewählte Ergebnisse von den Teilprojekten 2 und 3 werden im Folgenden vorgestellt.

Die Untersuchungen zum fahrdynamischen Verhalten sehr großer Post-Panmax-Containerschiffe in der Wechselwirkung zu verschiedenen Transportkörpersohlen sowie zu seitlich begrenzten Fahrinnen wurden im Flachwasserbecken der BAW-DH (Länge ca. 100 m, Breite ca. 35 m, max. Wassertiefe 0,7 m) in einem Modellmaßstab von M 1:40 vorgenommen. Ausgewählte Schiffsparameter sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Bezeichnung	Länge	Breite	Tiefgang	UKC _R *	c _B -Wert**	SG ⁺	Gewichtstrimm	KG ⁺⁺
-	m	m	m	m	-	-	-	m
JUMBO	320	40	14,5	1-2	0,740	6,29	Hart	11,8
MEGA-JUMBO	360	55	15,5	1-1,5-2	0,677	6,10	Hart	10,2

*UKC_R: Under-Keel-Clearance ** c_B: Blockfaktor ⁺SG: Schlankheitsgrad ⁺⁺KG: Gewichtsschwerpunkt über Kiel

Tabelle 1: Schiffsparameter der Untersuchungen im hydraulischen Modell (Maßstab 1:40)

Seeschifffahrt, Seewasserstraßen und Seehäfen (2)

Dynamisches Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe unter extremen Flachwasserbedingungen

Durch Einhaltung der geometrischen und dynamischen Ähnlichkeitsbedingungen ist die Prognosefähigkeit der Untersuchungen sichergestellt. Mittels einer Laser-Zielplatten-Messanordnung auf den Modellschiffen war es möglich, das vertikale dynamische Verhalten der funkferngeschalteten (seilgeführten) selbstfahrenden Modelle über eine Strecke von etwa 90 m von der Beschleunigungsphase bis zum Abstoppen zu erfassen. Die interne geschwindigkeitsunabhängige Prognosegenauigkeit des Systems lag $\Delta S < 1$ mm im Modell; dies entspricht < 4 cm in der Natur. Beim punktuell messenden, laser-geometrischen Verfahren wurden in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit ($v_S < 18$ kn) Prognosewerte ebenfalls mit einer Genauigkeit von $\Delta S < 1$ mm (Modell) erreicht.

Fahrt über eine feste Sohle mit Transportkörpern (TK) in seitlich unbegrenztem Flachwasser

Das folgende Foto zeigt die Transportkörperstrecke im hydraulischen Modell zur Simulation des Einflusses von Sohlstrukturen auf die Schiffsdynamik im extremen Flachwasser (Beispiel: TK-Länge $\lambda = 50$ m).

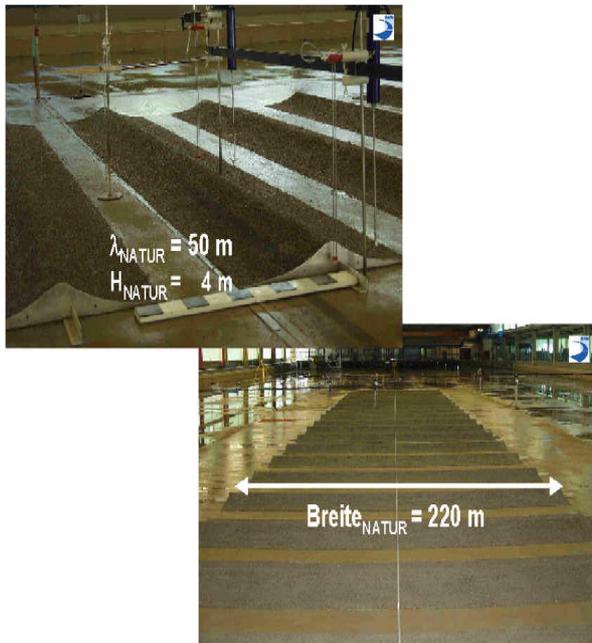
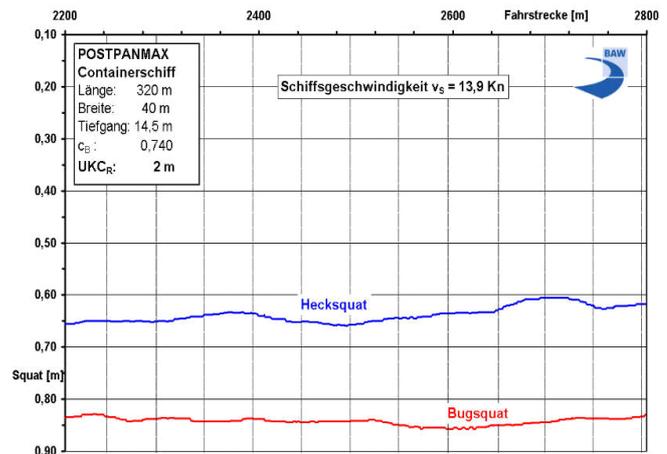


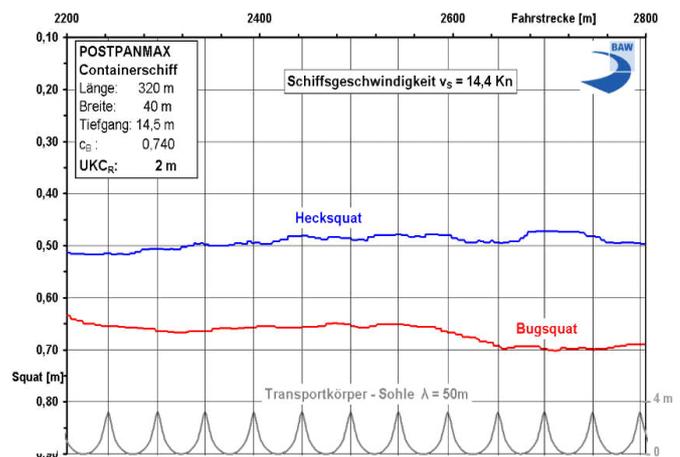
Bild 1: Transportkörperstrecke in seitlich unbegrenztem Fahrwasser im Modellmaßstab 1:40 (hier: TK-Länge $\lambda = 50$ m)

Die folgende Grafik in Bild 2 zeigt die kontinuierliche Aufzeichnung der vertikalen Bewegung von Bug und Heck eines JUMBO bei Fahrt über eine ebene Sohle sowie bei Fahrt über Transportkörper der Längen von 50 m bzw. 100 m sowie einer kombinierten Sohlstruktur. Ein Vergleich der Grafiken veranschaulicht das dynamische Verhalten des Containerschiffs in Abhängigkeit der Transportkörperlänge.

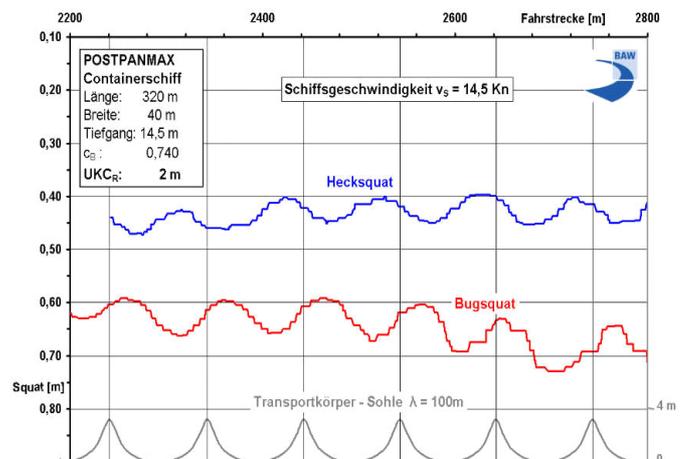
Bei der Fahrt über die Transportkörperstrecke mit $\lambda = 50$ m zeigte das Schiff im Verhältnis zur ebenen Sohle ein leicht unruhigeres Fahrverhalten. Mit $\lambda = 100$ m war ein Verhältnis von TK-Länge λ zu Schiffslänge l von etwa $\lambda = 1/3$ gewählt, so dass ein Stampfen des großen PPM-Containerschiffs mit der Periode der Transportkörper angeregt wurde. Der Grund liegt in einem lokal höheren Bugsquat bei geringerer UKC über dem



... ebene Sohle



... $\lambda_{TK} = 50$ m



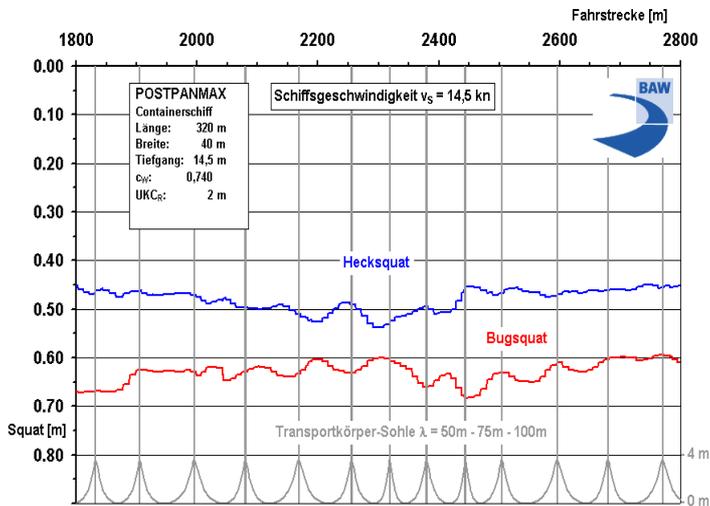
... $\lambda_{TK} = 100$ m

Bild 2a: Dynamisches Fahrverhalten eines großen Containerschiffs (JUMBO, Bug und Heck) bei der Fahrt über eine ebene Sohle und bei Fahrt über Transportkörper verschiedener Länge

Seeschifffahrt, Seewasserstraßen und Seehäfen (2)

Dynamisches Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe unter extremen Flachwasserbedingungen

TK-Berg und gleichzeitigem geringeren Hecksquats bei lokal größerer Wassertiefe im TK-Tal. Die Amplituden erreichten in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit im Maximum Werte bis zu $\Delta S = 0,16$ m ($v_S = 15,3$ kn).



... $\lambda_{TK} = 50 - 75 - 100$ m

Bild 2b: Dynamisches Fahrverhalten eines großen Containerschiffs (JUMBO, Bug und Heck) bei der Fahrt über eine kombinierte Sohlstruktur ($\lambda = 50$ m, 75 m und 100 m)

Die systematischen Untersuchungen mit TK-Feldern jeweils gleicher TK-Länge wurden ergänzt durch Fahrten über eine TK-Sohle mit unregelmäßigen Längen von $\lambda = 50$ m - 75 m - 100 m. Ein leichtes Stampfen des JUMBO wurde infolge der unregelmäßigen TK-Abfolge desgleichen in einer Größenordnung von etwa $\Delta S = 0,07$ m ($v_S = 16,8$ kn) registriert. Der Absolutwert des Squats wurde gleichermaßen reduziert wie bei den Versuchen mit konstanter TK-Länge.

Bild 3 zeigt den funktionellen Zusammenhang des geschwindigkeitsabhängigen Squats bei Fahrt des JUM-

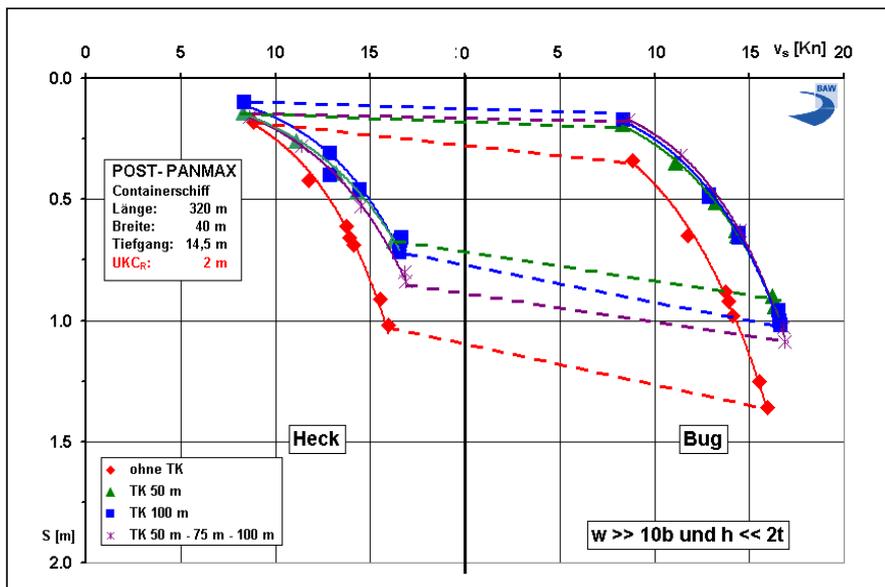


Bild 3: Einfluss der Sohlformen auf Squat und Trimm eines großen PPM-Containerschiffs (hier: JUMBO) bei $UKC_R = 2$ m

BO über verschiedene Sohlformen (ohne TK, $\lambda = 50$ m, $\lambda = 100$ m, $\lambda = 50$ m - 75 m - 100 m). Die Ergebnisse des punktuellen Messverfahrens zeigen eine deutliche Abnahme des Squats bei der Fahrt über eine TK-Strecke, was sich besonders klar bei einer Kiefreiheit von $UKC_R = 2$ m mit einer Größenordnung bis zu $\Delta S = 0,3$ m ($v_S = 15$ kn) ergab.

Wie beim JUMBO wurde auch beim MEGA-JUMBO der reduzierte, geschwindigkeitsabhängige Squat bei Fahrt über TK-Strecken deutlich ($UKC_R = 1,5$ m). Anders als beim JUMBO überlagerte beim MEGA-JUMBO unter extremen Flachwasserbedingungen der Hecksquats gegenüber dem Bugsquat, so dass sich ein negativer Trimmwinkel ergab. Dieses dynamische Verhalten war auf das Zusammenwirken der großen Schiffsbreite ($b = 55$ m) mit dem Ein-Schrauben-Antrieb bei extremem Flachwasser (ausgeprägtes Druckminimum durch Schraubensog am Heck) zurückzuführen.

Für die Diskussion und die Erklärung der gemessenen sehr geringen Squatwerte sind folgende hydromechanische Prozesse ausschlaggebend:

- Der Squat ist die Absenkung des fahrenden Schiffs mit dem sich ausbildenden Primärwellensystem, was zugleich eine kennzeichnende Größe des Schiffswiderstandes ist; durch Breiten- und Längenentwicklung sowie die strömungstechnische Optimierung der modernen Schiffsrümpfe haben sich die geometrischen Bedingungen für die Ausbildung des Primärwellensystems verändert, die Absinkwerte und folglich der Squat - bezogen auf die Schiffsgröße - wurden geringer.
- Die Wirkung von Sohlstrukturen (Transportkörper TK) auf das dynamische Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe unter extremen Flachwasserbedingungen war bisher nicht erforscht. Aus Gründen der nautischen Sicherheit wurde bislang die Soltiefe auf die Kuppen der Transportkörper bezogen. Es wurde von einer erhöhten Formrauheit des Systems, damit einer höheren Energiedissipation für die Schiffserzeugte Rückströmung ausgegangen mit der Folge eines stärkeren Primärwellensystems, das wiederum den Squat erhöht.

- Die systematischen Modellversuche zeigen jedoch, dass im Vergleich zur ebenen Sohle über einer TK-Sohle mit derart geringen Neigungen ($H = 4$ m; $\lambda = 50$ m - 100 m) ein vergrößerter Rückstromquerschnitt mit entsprechend verminderter Energiedissipation wirksam ist, der wiederum zu einer Abschwächung des Primärwellensystems und damit zu einer Verminderung des Squats führt.

- Die ergänzenden Untersuchungen zum Einfluss einer unregelmäßigen TK-Strecke auf das dynamische Fahrverhalten verdeutlichen, dass auch hier ein - aber geringeres - "Stamp-

fen" für alle untersuchten Schiffseinheiten festzustellen war und der Absolutwert des Squat in der gleichen Weise wie bei den vorherigen TK-Sohlen abgemindert werden kann.

Fahrt im Revier mit seitlich begrenzter Fahrrinne im Flachwasser

Die Systemversuche zur Erfassung von Squat und Trimm bei Fahrt im Revier mit seitlich begrenzter Fahrrinne wurden im Flachwasserbecken der BAW vorgenommen, indem die Unterwasserstrukturen schematisch mit flexibel einsetzbaren Aluminiumsystemen nachgebildet wurden. Untersucht wurden Fahrten in

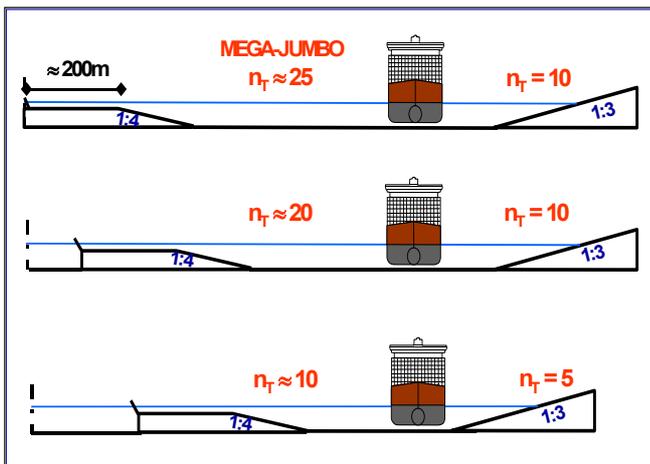


Bild 4: Schematische Darstellung der u. a. untersuchten Querprofile

Trapezprofilen (mittige und außermittige Fahrt) sowie in kombinierten Profilen von Böschung und Flachwasser. Eine schematische Darstellung der u.a. untersuchten, extrem engen Querprofile der Versuchsserien „Böschung/Flachwasser“ mit Querschnittsverhältnissen für den MEGA-JUMBO von $n = 17,5$ bis $n = 7,5$ und Teilquerschnittsverhältnissen von $n_T = 25 / 10$ bis $n_T = 10 / 5$ zeigt Bild 4.

Zur Verdeutlichung der Größenverhältnisse in der Versuchseinrichtung der BAW zeigt Bild 5 ein Foto der MEGA-JUMBO bei Fahrt durch ein Profil der Versuchsserie „Böschung/Flachwasser“.

Eines der hier ausgewählten Ergebnisse zum geschwindigkeitsabhängigen Squat des MEGA-JUMBO im Vergleich von mittlerer Fahrt z.B. für $n = 15$ und bei



Bild 5: Systemversuch zur Fahrt in seitlich begrenztem Flachwasser mit dem MEGA-JUMBO mit etwa $v_{S,MODELL} = 1,0$ m/s ($v_{S,NATUR} = 12,5$ kn; Trapezprofil $n = 15$; $n_T = 10 / 20$).

außermittiger Fahrt von $n_T = 10 / 20$ ($n = 15$) verdeutlichte, dass entgegen früherer Annahmen der Passierabstand vom Ufer, somit auch das Teilquerschnittsverhältnis einen annähernd unbedeutenden Einfluss auf den Squat hat, obwohl das einseitige Primärwellensystem, also die Uferbelastungen durch Schwall und Sunk sowie Rückströmung bei geringen Passierabständen stark ansteigen. Der einseitig höhere Wasserstraßenwiderstand bei außermittiger Fahrt wirkt sich lediglich auf die etwas geringere Schiffsgeschwindigkeit bei gleicher Schraubendrehzahl aus, was in erster Linie anhand der möglichen Maximalgeschwindigkeit ($\Delta v_{S,MAX} \approx 0,5$ kn) deutlich wird.

Wie stark sich seitliche Begrenzungen des Fahrwassers wie u.a. Flachwasserbereiche auf den Squat in einer Fahrrinne mit einem Tiefenverhältnis von $h_{RINNE} / h_{SEITE} = 3$ auswirken, zeigen die vergleichenden Auftragungen des geschwindigkeitsabhängigen Squat für den MEGA JUMBO in Bild 6.

Im Vergleich zum seitlich unbegrenztem Fahrwasser (rot) ...

- erhöht sich der Squat bei der Fahrt durch ein Trapezprofil mit $n = 25$ (grün) erst ab $v_S \approx 13$ kn (bei $v_S \approx 15$ kn steigt $\Delta S_{HECK} < 1$ dm)
- zeigt sich bei Einengung der Fahrrinne durch seitliche Flachwasserbereiche (dunkel-blau) eine Zunahme des Squat um etwa $\Delta S_{HECK} \approx 2$ dm bei $v_S \approx 13$ kn ($\Delta S_{HECK} \approx 3$ dm bei $v_S \approx 15$ kn)
- beträgt die hydraulische Wirksamkeit des an die Rinne angrenzenden Flachwasserbereichs (dunkel-blau) auf den Squat und zum Trapezprofil (grün) etwa 20 %

Eine Änderung des Querprofils von einer durchgehenden Böschung von 1:4 (hellblau) zu einer Fahrrinne in einen quasi seitlich unbegrenzten Flachwasserbereich (dunkelblau) führt zu einer erheblichen Reduzierung des Squat um annähernd $\Delta S_{HECK} \approx 4$ dm bei $v_S \approx 13$ kn.

Für die WSV sind die Beispiele der o.a. Grundlagenuntersuchungen von besonderer Bedeutung, weil einzelne Systemparameter zur Bemessung von Fahrriinntiefen hinsichtlich ihrer Wirkung auf Squat und Trimm näher betrachtet werden konnten.

Ergänzende Messungen in der Natur

In der Zeit von April 2003 bis Juni 2004 wurden zwölf Fahrten von POST-PANMAX-Containerschiffen sowohl bei sehr ruhigen als auch bei stürmischen meteorologischen Bedingungen (bis etwa Windstärke Beaufort 9) messtechnisch begleitet. Die Reederei Hapag Lloyd (HLCL) unterstützte acht Fahrten von Schiffen der Hamburg Express-Klasse (7.506 TEU), während durch Vermittlung des Tollerort Container Terminals (TCT) vier Messfahrten auf Schiffen der 5.500-TEU-Klasse der Reederei Yang Ming (YM) durchgeführt werden konnten.

Ausgewählte Kenndaten der Schiffstypen sowie der Bereich der middle-

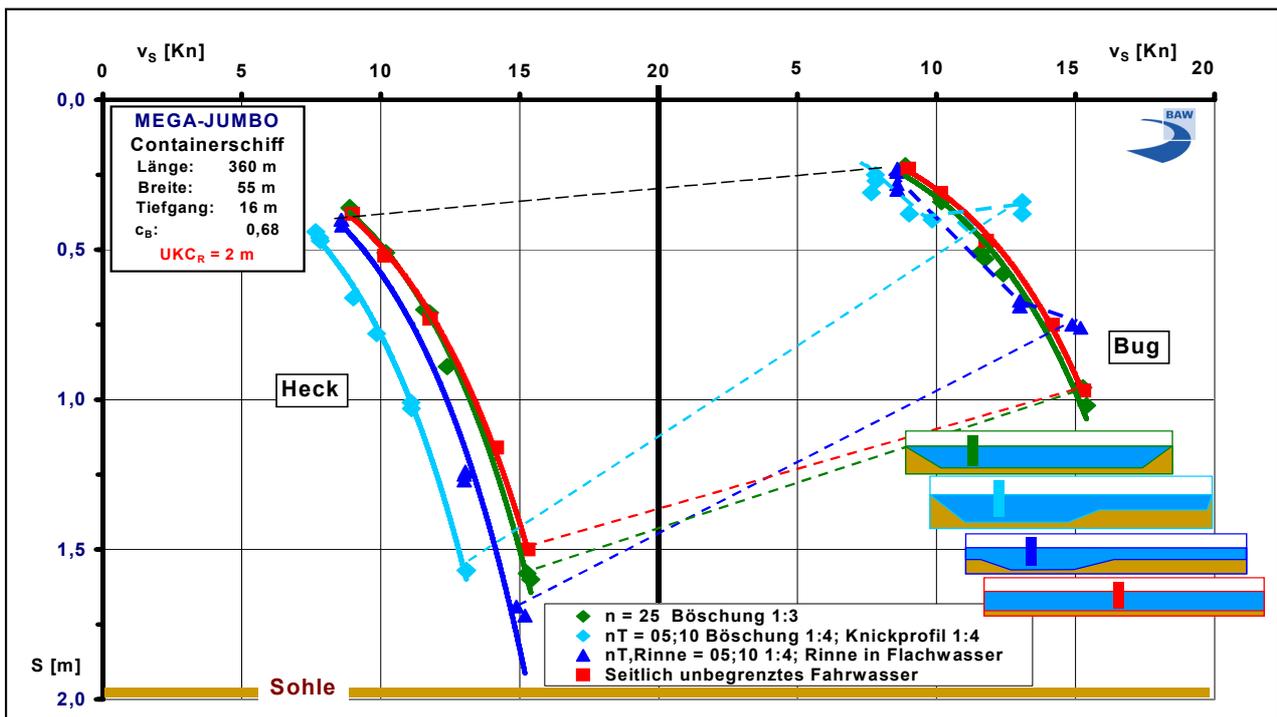


Bild 6: Einfluss von seitlichen Flachwasserbereichen ($h_{RINNE} / h_{SEITE} = 3$) auf Squat und Trimm eines MEGA-JUMBO bei außermittiger Fahrt $n = 7,5$ ($n_T = 5 / 10$) sowie Vergleich mit seitlich unbegrenztem Fahrwasser

ren Tiefgänge und des kennzeichnenden, tiefgangsabhängigen Blockfactors c_B während der Messfahrten sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Die Containerschiffe wurden im Hamburger Hafen mit vier autarken GPS-Messsystemen auf den Nocken und einem Datenerfassungssystem auf der Brücke bestückt. Die fahrdynamischen Daten wurden vom Container Terminal Altenwerder (CTA) bzw. vom TCT bis ca. nördlich Scharhörn (ca. 120 km \approx 65 sm) aufgenommen. Des Weiteren wurde an sechs Querprofilen der Unterelbe von einem kleinen, sehr schnellen Messschiff kurz vor der jeweiligen Schiffspassage Strömungs-, Temperatur- und Leitfähigkeitsmessungen durchgeführt. Während der Revierfahrt wurden Begegnungs- und Überholsituationen sowie außergewöhnliche Manöver (u.a. Lotsenwechsel) registriert und dokumentiert.

Bild 7 zeigt die Positionen der geodätischen GPS-Antennen exemplarisch auf dem Containerschiff CMS „Berlin Express“ von Hapag Lloyd. Die Manövriertdaten wurden vom jeweiligen Schiffsführungssystem abgegriffen.

Auf das satellitengestützte Messverfahren wird im Folgenden nur verkürzt eingegangen und für weitergehende Fragestellungen auf die Veröffentlichung von Maushake/Joswig (2004) verwiesen. Über spezielle Pegel-auswertungen, hochpräzise PDGPS-Messungen und Berechnungen virtueller Referenzstationen wurden in Verbindung mit den Schiffsdaten (Propellerdrehzahl, Ruderlage u.a.) die Schiffsbewegungen, die nautischen

Manöver, der örtliche Squat, der Trimm und die Krängung sowie die Netto-Verkehrsspurbreite analysiert.



Bild 7: Positionen der geodätischen GPS-Antennen am Beispiel der CMS BERLIN EXPRESS von HAPAG LLOYD (HLCL) Foto: BAW-DH

Die Überprüfung des Pegel-Interpolations-Verfahren erbrachte maximale Differenzen zwischen der Wasserspiegel-Interpolation und zusätzlichen PDGPS-Null-Messungen von unter einem Zentimeter. Die Extrapolation des Wasserspiegels vom Pegel St. Pauli in das Hafenbecken des TCT, dem Liegeplatz der Yang Ming Schiffe, wurde zusätzlich durch PDGPS-Messungen vom Begleitboot aus gestützt (Maushake/Joswig, 2004).

	Länge ü. A. l_{pp} [m]	Breite b [m]	mittlerer 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 2: Ausgewählte Kenndaten der untersuchten Post-Panmax-Containerschiffe

Seeschifffahrt, Seewasserstraßen und Seehäfen (2)

Dynamisches Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe unter extremen Flachwasserbedingungen

Die Güte der Squatbestimmung aus den GPS-Messungen wurde mit $\Delta S = \pm 0,05$ m abgeschätzt, bei der Bestimmung der Kieflfreiheit (Under Keel Clearance, UKC) kann aufgrund der Güte des digitalen Geländemodells aus Flächen- und aktuellen Verkehrssicherungspeilungen von einer Genauigkeit von besser als $\Delta UKC < \pm 0,2$ m ausgegangen werden. Für die Schiffsgeschwindigkeit (Fahrt über Grund) und Krängung wurden Genauigkeiten von $\Delta v_S = \pm 0,08$ Kn bzw. $\Delta \Phi = \pm 0,07$ abgeleitet (Maushake/Joswig, 2004).

Eine Analyse der begleitenden hydrologischen Querprofilmessungen ermöglichte die Berücksichtigung der Strömungs- und Dichteverhältnisse bei der gesamten Revierfahrt, so dass der Squat gegen Fahrt durch Wasser aufgetragen werden konnte (Bild 8).

Die geschwindigkeitsabhängigen Squatwerte in Bild 8 (Bug; HLCL = Quadrate; YM = Dreiecke) streuen zum einen aufgrund der unterschiedlichen Schiffstypen, zum anderen auch infolge der verschiedenen Wasserstraßenquerschnitte einhergehend mit unterschiedlicher UKC.

Der höhere Bugsquat der YM-Containerschiffe resultiert aus der sehr starken geschwindigkeitsabhängigen vorlichen Vertrimmung ab einer Schiffsgeschwindigkeit von etwa 11 kn, da diese Schiffe derart konstruiert sind, dass das Spiegelheck ab einem Tiefgang von 12 m eintaucht, das eingetauchte Heck für Auftrieb sorgt und somit das schlanke Vorschiff in die Absunkwelle vertrimmt. Wie die Spantenrisse dieses Schiffstyps zeigen, erfolgt eine deutliche Auftriebszunahme am Vorschiff erst ab Eintauchtiefen am Bug von rund 16 m. Der geringe Blockfaktor der YM-Containerschiffe resultiert dementsprechend im Wesentlichen aus dem Vorschiffsbereich.

Die HLCL-Containerschiffe zeigten eine deutlich geringere Vertrimmung, da auch bei größeren Tiefgängen das Spiegelheck nicht eintaucht und somit eine annähernd gleich verteilte Auftriebswirkung vorliegt. Damit wird deutlich, dass im extremen Flachwasser das

Trimmverhalten und damit der tiefste Punkt eines Schiffs, hier der Bugsquat, in nicht unerheblichen Maß von der Gesamtkonstruktion des Unterwasserschiffs und besonders von der Auftriebsverteilung in Längsrichtung abhängt. Der Blockfaktor c_B trifft zwar eine Aussage über die hydrodynamische Form des Unterwasserschiffs im Verhältnis zu einem Quader, kann aber aufgrund obiger Ergebnisse nicht als allgemeingültiger Parameter zur Beschreibung des fahrdynamischen Verhaltens eines Schiffs herangezogen werden, um die Schiffsdynamik im Flachwasser zu prognostizieren.



Bild 9: CMS „Ming Plum“ bei Fahrt auf der Unterelbe mit eingetauchtem Spiegelheck und sehr schlankem Unterwasserschiff im Bugbereich, Foto: BAW-DH

Bild 9 zeigt die Fahrt der CMS „Ming Plum“ bei der Fahrt auf der Unterelbe von Achtern, bei der das eingetauchte Spiegelheck den zusätzlichen Heckauftrieb bewirkt. Das Bild verdeutlicht zugleich das sehr schlanke Vorschiff im Verhältnis zum mittragenden Heckbereich.

Dieses im Flachwasser ausgeprägte vorliche Trimmverhalten großer Containerschiffe mit geringen c_B -Werten unter $< 0,6$ war bisher noch nicht bekannt und wurde bei diesen Naturmessungen erstmals messtechnisch erfasst.

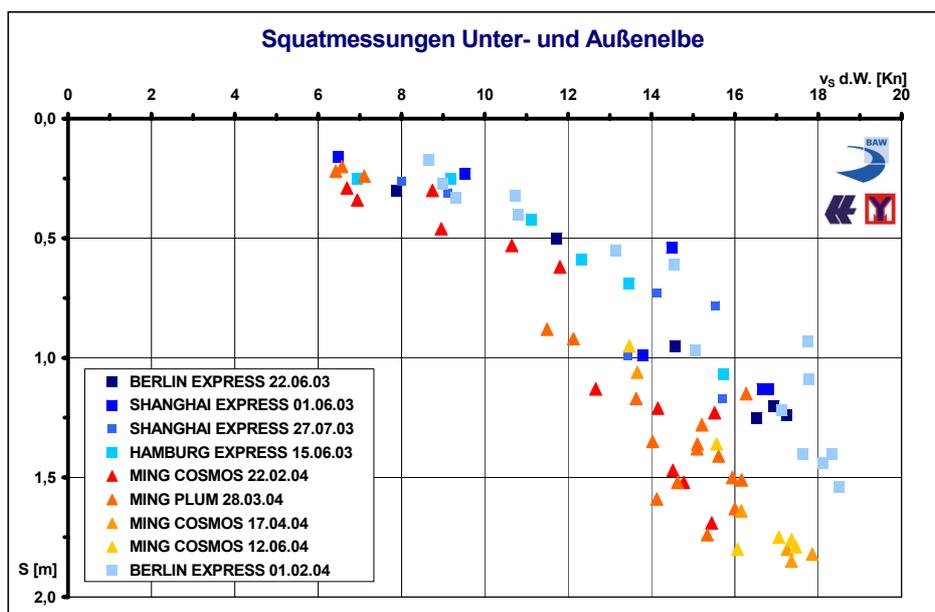


Bild 8: Geschwindigkeitsabhängiger Bug-Squat der Containerschiffe von HLCL (Quadrate) und YM (Dreiecke) auf dem Revier der Unter- und Außenelbe

An Bord der untersuchten Containerschiffe wird zur Bestimmung des Squat in begrenztem Fahrwasser die vereinfachte empirische „Faustformel“ nach Barras (u.a. 2004) eingesetzt. In diese Faustformel $S = c_B v_S^2 / 50$ (für begrenztes Fahrwasser) gehen nur der c_B -Wert, die Schiffsgeschwindigkeit und ein empirischer Faktor in die Berechnung ein (S = Squat [m]; c_B = Blockfaktor; v_S = Schiffsgeschwindigkeit [kn]), so dass für große Containerschiffe nicht nur eine deutliche Überbestimmung der Squatwerte berechnet wird, sondern auch die starke vorliche Vertrimmung bestimmter Schiffe

aufgrund des linearen Ansatzes des c_B -Werts widersprüchlich beschrieben wird.

Für den Betrieb ihrer Schiffe wurden den Reedereien die Squatanalysen der Messfahrten auf der Unter- und Außenelbe als Grafiken zusammen mit den an Bord vorliegenden Berechnungsansätzen nach Barrass (2004) übergeben, so dass aufgrund der gemessenen Differenzen eine wirtschaftlichere Nutzung der Seeschiffahrtsstraße ermöglicht wurde.

Überprüfung ausgewählter Bemessungsansätze

Zur Überprüfung der bei der Bemessung der Fahrrinnen der Seeschiffahrtsstraßen Elbe und Weser eingesetzten Berechnungsansätze hinsichtlich ihrer Gültigkeit für die großen Post-Panmax-Containerschiffe wurden die über das Hindcast-Verfahren berechneten und ergänzten hydrologischen Randbedingungen in die folgenden Formeln eingesetzt:

- ICORELS (PIANC/IAPH, 1997)
 $S = 2,0 c_B (b t / l) (Fr_h^2 / (1 - Fr_h^2))^{0,5}$
 - TUCK/SCHMIECHEN (SCHMIECHEN, 1997)
 $S = t / 3 (Fr_h)^3$
- mit: $Fr_h = v_s / (g h)^{0,5}$ Tiefen-Froude-Zahl [-]
 v_s : Schiffsgeschwindigkeit [m/s]

Zum Vergleich mit den gemessenen Squatwerten mussten für die großen Containerschiffe u.a. vereinfachte Annahmen für die Bodentopografie (Mittel über Schiffslänge und zwei Schiffsbreiten) getroffen werden. Bild 10 zeigt in den übereinander liegenden Grafiken für die Fahrt der CMS „Berlin Express“ am 01.02.2004 einen Ausschnitt aus dem Auswertetool der BAW mit der Elbe-Kilometrierung auf der horizontalen Achse und den gemessenen Squat, den berechneten Squat sowie die Differenzen zum maximalen Squat für o.a. Ansätze. Der zur Bemessung der Fahrrinnen eingesetzte Ansatz nach Icorels mit dem Vorfaktor 2,0 beschreibt das fahrdynamische Verhalten der HAMBURG-EXPRESS-Klasse (HLCL) bei Revierfahrt hinreichend gut. Der auf

Basis von Naturmessungen approximierter Ansatz nach Schmiechen zeigt gemäß seiner Gültigkeitsgrenze erst ab höheren Froude-Zahlen von $Fr_h > 0,7$ eine Übereinstimmung mit den Messwerten für die HLCL-Schiffe. Das extreme vorliche Vertrimmen der YM-Containerschiffe ab Schiffsgeschwindigkeiten von ca. 11 kn wird weder mit dem Ansatz nach Icorels ($F = 2,0$) noch mit dem nach Schmiechen erfasst (keine grafische Darstellung).

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zur Fahrrinnenbemessung sowie für die wirtschaftlich optimale Nutzung der Seeschiffahrtsstraßen ist die Kenntnis des fahrdynamischen Verhaltens großer Containerschiffe erforderlich. Die messtechnische Begleitung von Containerschiffen der Reedereien HLCL und YM auf der Unter- und Außenelbe ergänzten vorangehende Systemversuche in hydraulischen Modellen und bestätigten deren Ergebnisse.

Der WSV wurden die Analysen der Systemversuche und der Messungen in der Natur in verschiedenen Veröffentlichungen und Vorträgen vorgestellt, so dass die Ergebnisse hinsichtlich der geschwindigkeits-, wasserstands- und tiefgangsabhängigen Parameter Squat und Trimm zur Festlegung der Fahrrinntiefen für kommende Ausbauplanungen zur Verfügung stehen.

Den an den Naturmessungen beteiligten Reedereien wurden die schiffsspezifischen Squatkurven übergeben, die mögliche Tiefgangserhöhungen im Revier bis zu rund 1 m aufzeigten.

Anhand der jüngsten Untersuchungen wurde festgestellt, dass infolge der Vielfalt der heutigen Schiffsentwürfe allein bei den großen Containerschiffen das konstruktionsspezifische Fahrverhalten bestimmter Fahrzeuge ab höheren Schiffsgeschwindigkeiten (z.B. erhöhte vorliche Vertrimmung) von den für die Squatprognose eingesetzten Bemessungsansätzen nicht beschrieben werden kann.

Um die Konstruktionsvielfalt und das Fahrverhalten der heute und zukünftig auf den Seeschiffahrtsstraßen verkehrenden Containerschiffe hinsichtlich Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs beim Betrieb der Wasserstraßen berücksichtigen zu können, wird empfohlen, die Erfassung der Fahrdynamik großer Containerschiffe bei Revierfahrt als stetige Fachaufgabe in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung zu verankern.

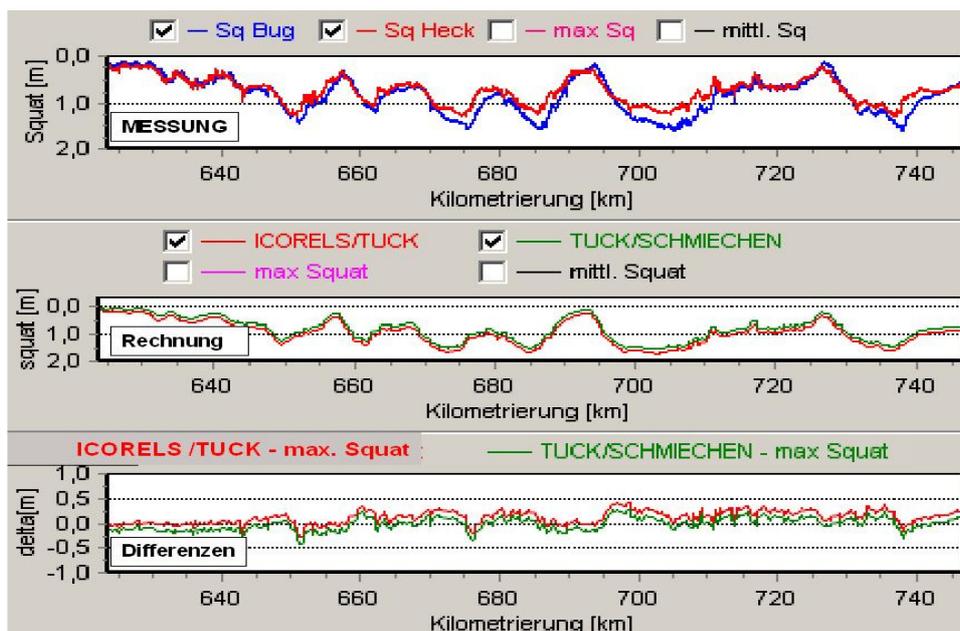


Bild 10: Ausschnitt aus dem Auswertetool der BAW mit dem gemessenen, dem berechneten, sowie den Differenzen zum maximalen Squat für die Fahrt der CMS „Berlin Express“ am 01.02.2004

Seeschifffahrt, Seewasserstraßen und Seehäfen (2)

Dynamisches Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe unter extremen Flachwasserbedingungen

Danksagung

Die zeitlich aufwendigen Messkampagnen in der Natur waren nur mit der zuvorkommenden Unterstützung durch die Hapag Lloyd Container Line GmbH und die YANG MING Marine Transport Corporation, das besondere Interesse deren Besatzungen sowie durch die Vermittlung der Hamburger Hafen- und Lagerhaus-AG (HHLA) und deren Terminals CTA und TCT möglich, denen hier nochmals der Dank der beteiligten Kollegen für die erfolgreiche Zusammenarbeit auszusprechen ist.

Literaturverzeichnis

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

BARRASS, C.B.: Thirty-two years of Research into Ship Squat, In: Tagungsband 2. Squat-Workshop 2004, Aspekte der Unterkielfreiheit in Analyse und Anwendung, Elsfleth / Oldenburg 2004

FLÜGGE, G., ULICZKA, K.: Dynamisches Fahrverhalten und Wechselwirkungen mit der Fahrrinnensohle von sehr großen Containerschiffen unter extremen Flachwasserbedingungen, Tagungsband HTG-Kongress 2001, Hamburg 2001

MAUSHAKE, CH. JOSWIG, S.: Messung von Squat, Trimm und Krängung sehr großer Containerschiffe im Rahmen von Grundsatzuntersuchungen auf der Elbe, Hydrographische Nachrichten Nr. 072, Deutsche Hydrographische Gesellschaft, 2004

PIANC/IAPH: Seehafenzufahrten - Ein Leitfaden zur Bemessung (Übersetzung), PIANC/IAPH AG II-30, Bulletin Nr. 95, Bonn 1997

SCHMIECHEN, M.: Squat-Formeln, Das Schiff in begrenzten Gewässern, 18. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik / Meerestechnik, Duisburg 1997

ULICZKA, K., FLÜGGE, G.: Squat-Untersuchungen für sehr große POSTPANMAX-Containerschiffe, HTG/STG-Sprechtage FA Seeschifffahrtstraßen, Hafen und Schiff, Hamburg 2001

ULICZKA, K., KONDZIELLA, B., FLÜGGE, G.: Dynamisches Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe in seitlich begrenztem extremen Flachwasser, HANSA, 141. Jahrgang, Nr. 1, 2004

ULICZKA, K., WEZEL, M.: Dynamisches Fahrverhalten großer Containerschiffe bei Revierfahrt auf der Unter- und Außenelbe, Tagungsband HTG-Kongress 2005, Hamburg 2005

Verfasser

Dr.-Ing. Klemens Uliczka
Referat Ästuarsysteme I
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), DSt Hamburg
Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg
Tel.: 040 81908 – 330
E-Mail: klemens.uliczka@baw.de

Dipl.-Ing. Bernhard Kondziella
Referat Ästuarsysteme I
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), DSt Hamburg
Wedeler Landstraße 157, 22559 Hamburg
Tel.: 040 81908 – 354
E-Mail: bernhard.kondziella@baw.de