

ABTEILUNG II
SEEHÄFEN UND ZUFahrTEN
(für Handelsschiffahrt, Fischerei und Freizeitschiffahrt)

zu Thema 1:

Thema des Berichts:

Zur Wechselwirkung von Seeschiff und Seewasserstraße

Berichterstatter:

Dr.-Ing. Klemens O. K. Uliczka Bundesanstalt für Wasserbau - Abteilung Küste (BAW-AK)

Schlagworte

Schiffserzeugte Belastungen, Risiko von Uferschäden, Wechselwirkung Schiff / Sohle, Squat.

Problemstellung

Durch Zunahme der Schiffsgrößen und der Fahrge-
schwindigkeit in begrenztem Fahrwasser ist entspre-
chend mit einem Anstieg der schiffserzeugten Bela-
stung für bestehende Uferbiotope und Deckwerke zu
rechnen. Bei der Überplanung von inhomogenen
Wasserstraßen (u.a. Ästuar, Flußsysteme, Wasser-
straßen in Seenketten) hinsichtlich Fahrrinntiefe, -
breite sowie -trassierung ist desgleichen das Risiko
von Ufer- und Deckwerksschäden oder der Aufwand
einer Neubemessung der Uferbefestigungen abzu-
schätzen. Zur Prognose schiffserzeugter Belastungen
an Seewasserstraßen sowie der Wechselwirkung von
Seeschiff und Seewasserstraße (u.a. Squat) wurden
von der Bundesanstalt für Wasserbau - Abteilung
Küste (BAW-AK), umfangreiche Untersuchungen auf
der Basis hydraulischer als auch numerischer Modelle
vorgenommen. Die Ergebnisse sollen einen Beitrag
leisten zur „Bemessung“ der Seewasserstraßen als
Hafenzufahrten bei der Planung neuer Hafenanlagen.

**Schiffserzeugte Belastungen - Theoretische
Grundlagen und Stand der Wissenschaft**

Bei der Fahrt von Schiffen durchs Wasser im unter-
kritischen Geschwindigkeitsbereich v_S (die kritische
Geschwindigkeit entspricht etwa der Wellenfort-
schrittsgeschwindigkeit $v_L \approx c = (g \cdot d)^{0,5}$) treten in
Wechselwirkung von Schiff und Wasserstraße fol-
gende Belastungen auf: Der langperiodische Anteil
von Bugstau s_B , Absunk z_A , Primär-(Heck-)welle H_P
sowie der Verdrängungs-(Rück-)strömung v_R
(Periode ca. 1 bis 3 Minuten). Die langperiodischen
Belastungen werden durch das Sekundärwellensystem
 H_S (Perioden ca. 4 s bis 5 s) überlagert. Die Amplitu-
den der schiffserzeugten Belastung sind eine Funktion
von Schiffsgeschwindigkeit v_S , dem Passierabstand L ,
den Schiffsabmessungen (Länge l , Breite b , Tiefgang
 t , benetzter Hauptspantquerschnitt A_S) und der
Schiffsform sowie der Geometrie der Wasserstraße
(Wasserspiegelbreite B , Sohlbreite B_S , Wassertiefe d ,
benetzter Querschnitt A etc.). Das Querschnittsver-
hältnis n ergibt sich aus dem Verhältnis von Wasser-
straße zu Schiff ($n = A / A_S$). In inhomogenen Was-
serstraßen bestimmt das Teilquerschnittsverhältnis n_T

als Funktion des Passierabstands L und definiert als
 $n_T = A_T / 0,5 A_S$ die asymmetrische Belastung der
Ufer.

Anhand empirischer und analytischer Ansätze der
„eindimensionalen Kanaltheorie“ zur Berechnung von
Schiffswellen und Verdrängungsströmung lassen sich
folgende Abhängigkeiten zusammenstellen:

- Absunk: $z_A \propto v_S^k$ ($2 < k < 3,5$) und
 $z_A \propto n^m$ ($-1,5 < m < -1$)
- Rückströmung: $v_R \propto v_S$ und
 $v_R \propto n^{-1}$.

Zur Ermittlung und Prognose schiffserzeugter Bela-
stung in Wasserstraßen mit unregelmäßigen Quer-
schnitten sind zusätzlich zur Wechselwirkung von
Schiff und Wasserstraße Wellenausbreitungsprozesse
wie Refraktion, Diffraktion, Teilreflexion und Sho-
aling sowie Strömungsrefraktion maßgebend. Nach
Berücksichtigung dieser physikalischen Prozesse bei
der Ermittlung schiffserzeugter Belastung in Zusam-
menarbeit mit dem CANADIAN HYDRAULIC
CENTRE, OTTAWA (NRC, 1996) wurden die Er-
gebnisse aus dem tiefenintegrierten zweidimensio-
nalen (2D) Programm WAKE2D, das auf einer neuen
Form der BOUSSINESQ-Gleichungen zur Berech-
nung windgenerierter Wellen in Flachwasser basiert,
mit Meßdaten aus einem hydraulischen Modell der
BAW-AK verglichen. Zur Berechnung der Passage
eines Containerschiffes der PANMAX-Klasse (Länge
280 m; Breite 32,25 m; Tiefgang 13,8 m) in einem
Abschnitt der Unter-Elbe waren bei einer Auflösung
von 4 m x 4 m 337.500 Gitterelemente für eine Flä-
che von 1,8 km x 3 km erforderlich. Bei relativ gerin-
gen Abweichungen der langperiodischen Anteile
wurden die kurzperiodischen Sekundärwellen im
numerischen Modell aufgrund der „grob“ Auflö-
sung stark überschätzt. Der Vergleich neuester Be-
rechnungen mit einer Auflösung von 2 m x 2 m
(NRC, 1997) und Ergebnissen aus dem hydraulischen
Modell verdeutlichen den Einfluß der Schiffsform auf
die Amplituden der Sekundärwellen ($v_S \approx 15,5$ Kn;
Abbildung 1). Zur Prognose schiffserzeugter Bela-
stungen inhomogener Wasserstraßen ist die numeri-
sche Bearbeitung (z.B. mit WAKE2D) noch nicht als
wissenschaftliches Hilfsmittel geeignet, so daß eine
gesicherte, quantitative Ermittlung derzeit nur auf
Basis von hydraulischen Modellversuchen in einem

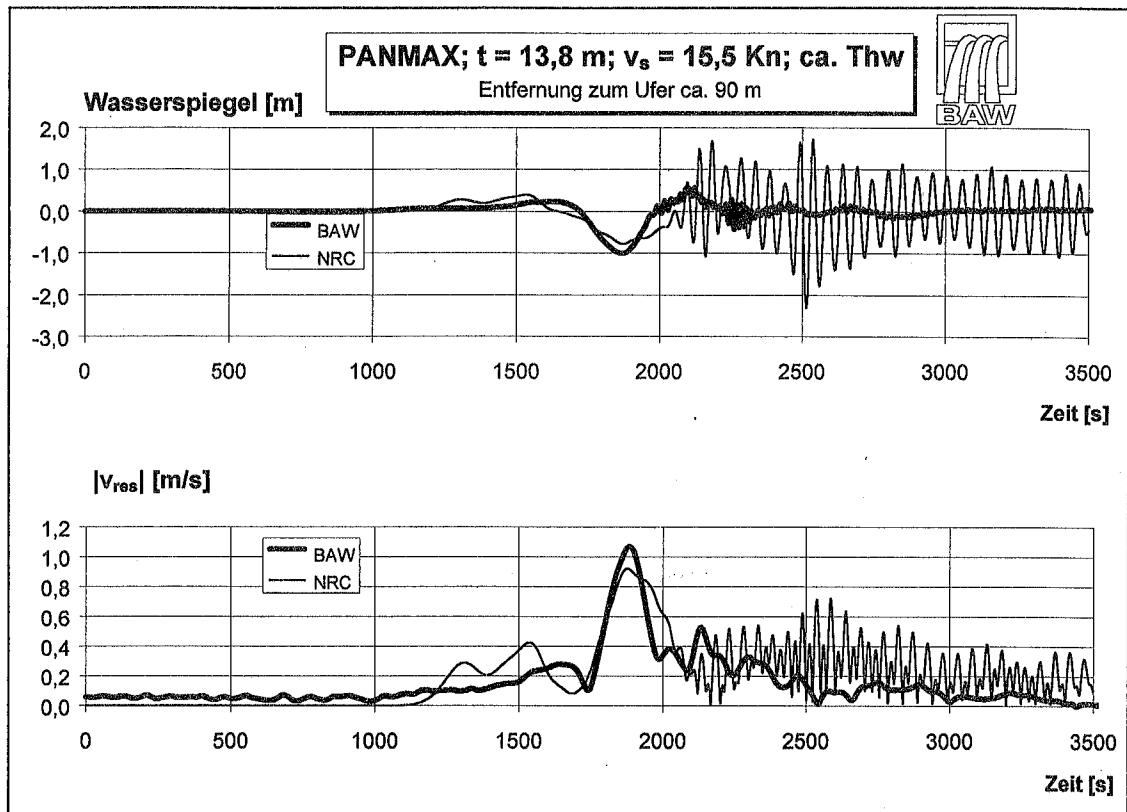


Abbildung 1: Vergleich berechneter (NRC, 1997) und gemessener Zeitreihen (BAW-AK, hydraulisches Modell Unter-Elbe; PANMAX-Containerschiff, Aufkommer unterhalb von Hamburg)

fachwissenschaftlich abgesicherten Modellmaßstab möglich ist.

Squat - Theoretische Grundlagen

Seit etwa Mitte dieses Jahrhunderts werden Arbeiten zur Prognose des Squats S in tiefenbegrenztem Wasser veröffentlicht, die folgende vereinfachte Zusammenhänge aufzeigen:

- Squat: $S \propto t/d$ und $S \propto v_s^2$ und $S \propto n$.

Die analytischen und empirischen Gleichungen basieren u.a. auf Modell- und Naturmessungen, zeigen aber für die hier vorgestellten örtlichen Randbedingungen unbefriedigende Ergebnisse. SCHMIECHEN (1997) stellte im Rahmen eines Kolloquiums auf der Basis von Messungen auf der Unterelbe eine stark vereinfachte Form der Gleichung von TUCK (1966) für kritische Tiefen-FROUDE-Zahlen von $F_{nd} \approx 0.7$ ($F_{nd} = v_s / (g \cdot d)^{0.5}$) vor. Diese vereinfachte Gleichung $S = t / 3 \cdot (F_{nd})^3$ wurde zusammen mit 2-D-Squat-Berechnungen (WAKE2D; NRC, 1997) und Meßdaten aus dem hydraulischen Modell der BAW-AK aufgetragen (Abbildung 2). Ab einer Schiffsgeschwindigkeit von $v_s > 12$ Knoten ($F_{nd} > 0,4$) liegt die vereinfachte Formel von SCHMIECHEN zwischen den Ergebnissen der 2D-Berechnungen und den Messungen der BAW-AK und kann als Tiefen-FROUDE-Zahlen von $F_{nh} > 0,4$ durchaus als „Faustformel“ für das Elbeästuar zu ersten Abschätzungen des Squats großer Containerschiffe eingesetzt werden. Traditio-

nelle Squatformeln ergeben im wesentlichen höhere Werte als im hydraulischen Modell ermittelt. Zusätzliche 2D-Berechnungen für Bedingungen von großen Frachtfähren auf der Trave ($n < 5$) im Auftrag der BAW-AK (zwei Geschwindigkeiten; $F_{nd} \approx 0,26 - 0,31$; $d/t = 1,27$) verdeutlichen den Einfluß des Querschnittsverhältnisses n auf den Squat (siehe auch Abbildung 2; NRC, 1997).

Ein Vergleich verschiedener traditioneller Squat-Formeln mit Ergebnissen der 2D-Berechnung und ersten Messungen der BAW-AK im hydraulischen Modell führte zu der Entscheidung, für die Randbedingungen des Elbe-Ästuars stromab von Hamburg systematische Squat-Untersuchungen mit variierendem Tiefgang von PANMAX-Containerschiffen durchzuführen.

Eine gesicherte, quantitative Prognose des Squats in natürlichen Wasserstraßen für den gesamten Bereich der Fahrgeschwindigkeit scheint derzeit - wie für schiffserzeugte Belastungen - nur auf der Basis von exakt steuerbaren Randbedingungen, wie sie in hydraulischen Modellversuchen in einem fachwissenschaftlich abgesicherten Modellmaßstab gegeben sind, möglich zu sein.

Hydraulisches Ausschnittsmodell der Unterelbe

Ein Ausschnitt der Unterelbe bei Lühe von etwa 1,5 km x 1,2 km wurde im Maßstab 1:40 modelliert. Das Untersuchungsgebiet ist u.a. geprägt durch ein steiles

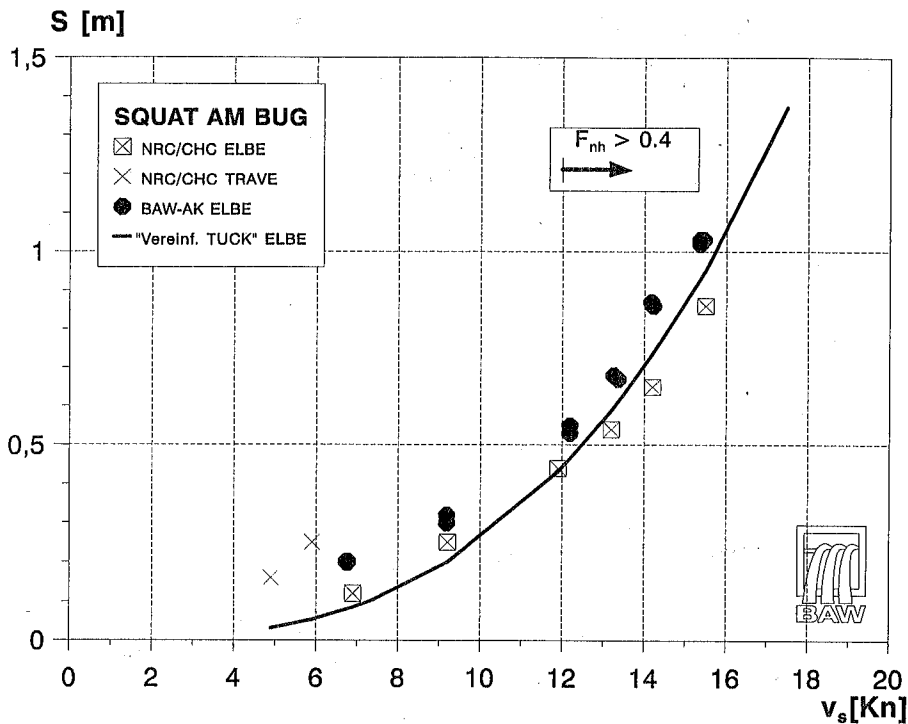


Abbildung 2: Vergleich von berechneten (NRC, 1997) und gemessenen Daten aus dem hydraulischen Modell der BAW sowie der von SCHMIECHEN (1997) vereinfachten Gleichung von TUCK (PANMAX Containerschiff im Unterelbe-Querschnitt Lühe sowie Rechnung für Großfähre auf der Trave).

südlicher Ufer und flache nördliche Süßwasserwatten. Der Passierabstand der Aufkommer und Abgänger betrug jeweils nur eine Schiffsbreite vom Fahrrinnenrand. Zur Erfassung der Daten waren 21 Wellenpegel und 11 2D-Strömungs sonden im Meßquerschnitt installiert. Die 3D-Strömung wurde auf dem Aufkommerkurs etwa 2 m über der Sohle registriert. An der Sohle war ebenfalls eine Drucksonde angeordnet. Schiffsgeschwindigkeit und Squat wurden nach der von ERYUZLU (1994) veröffentlichten Methode

mittels Laserstrahl und recht- sowie dreieckiger Tafeln, die am Schiff befestigt waren, gemessen.

Schiffserzeugte Belastungen in der Unterelbe

Der schiffserzeugte Absenk z_A sowie die Rückstromgeschwindigkeit v_R im Meßquerschnitt der Unterelbe sind für einen PANMAX-Aufkommer für verschiedene Schiffsgeschwindigkeiten in Abbildung 3 aufgetragen. Die „under keel clearance“ (UKC) ohne Fahrt bei einem Tiefgang von $t = 13,8$ m betrug 4,7 m.

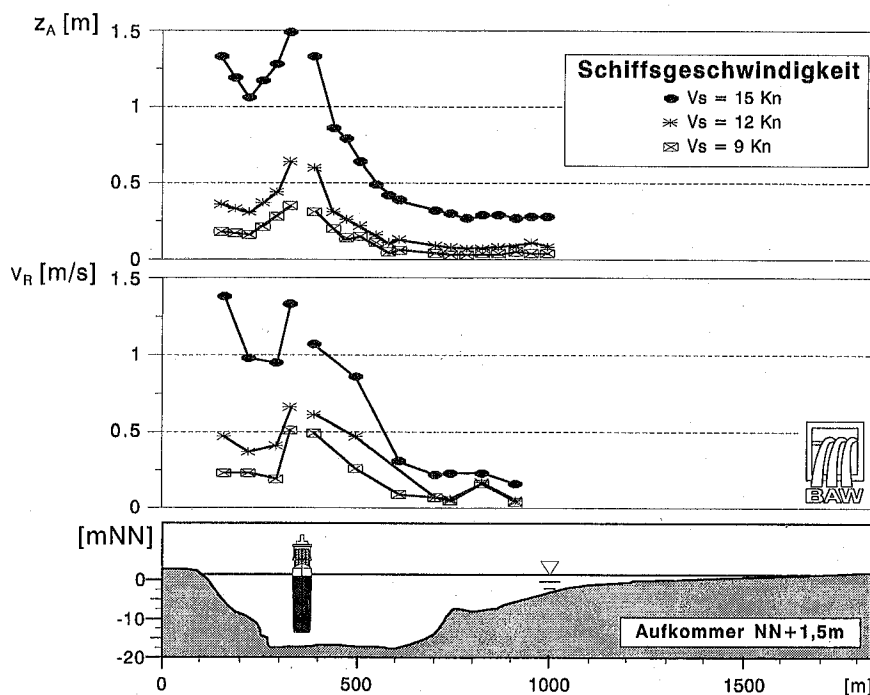


Abbildung 3: Schiffserzeugte Belastungen (Wellen und Rückströmung) eines großen Containerschiffes (PANMAX, $t = 13,8$ m; rd. Thw) aus dem hydraulischen Abschnittsmodell der Unterelbe

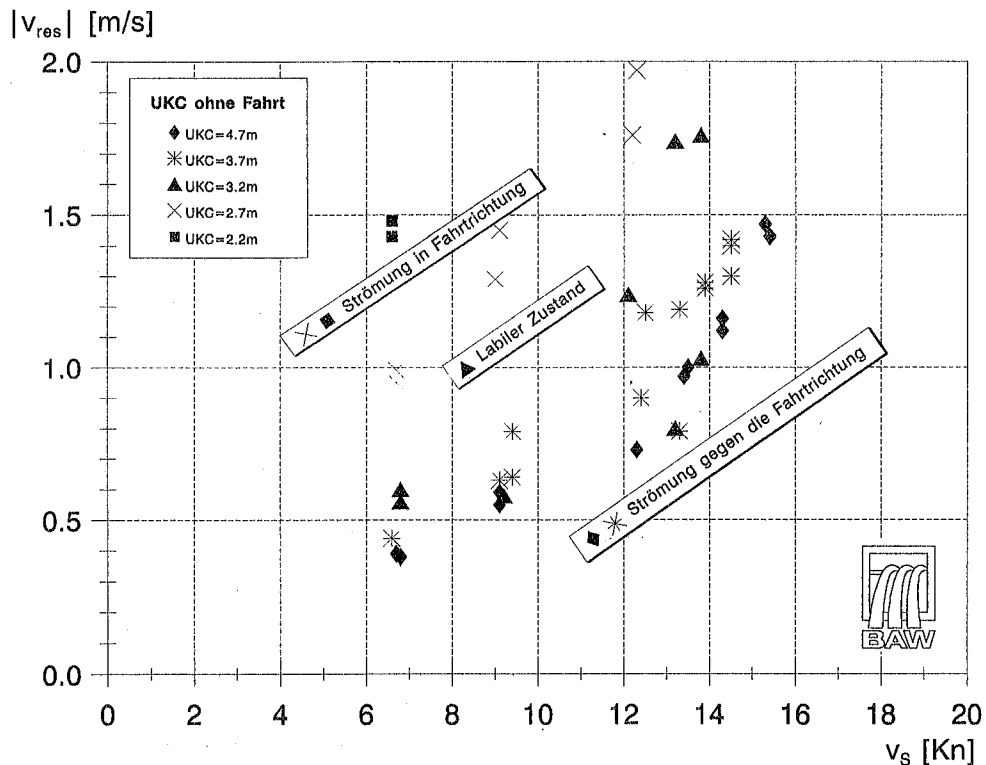


Abbildung 4: Betrag der schiffserzeugten Strömung zwischen Schiff und Sohle etwa 2 m über der Sohle bei Fahrten mit verschiedenen Tiefgängen und Schiffsgeschwindigkeiten (UKC ohne Fahrt)

Die hohen schiffserzeugten Belastungen am steilen Ufer ergeben sich in Abhängigkeit des asymmetrischen Teilquerschnitts bei Aufkommen und der Schiffsgeschwindigkeit. Bei Schiffsgeschwindigkeiten über $v_s = 12$ Knoten steigen die schiffserzeugten Belastungen und entsprechend das Risiko von Schäden an den Uferbiotopen und Deckwerken sehr stark an.

Dreidimensionale Strömung zwischen Schiff und Sohle

Bei den Versuchen mit Schiffstiefgängen von $t = 11,8$ m; $12,3$ m; $12,8$ m; $13,3$ m und $13,8$ m wurden die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten zwischen Schiff und Sohle in Abhängigkeit der UKC (4,7 m bis 2,2 m ohne Fahrt) gemessen (Abbildung 4).

Da die Messung immer im Abstand von 2 m über der Sohle erfolgte, wurde hier nur der Strömungsbetrag ohne detaillierte Richtungsinformation aufgetragen. Bei Zunahme des Tiefgangs und ansteigendem Squat verschob sich der Meßpunkt demzufolge näher zum Schiff ($z = 2 / UKC$). Bei großen Tiefgängen und hoher Schiffsgeschwindigkeit wurden unter dem Schiff labile Zustände und letztlich eine Strömungsrichtungsänderung gemessen. Bei einer UKC von nahezu 2 m wurden die Strömungsgeschwindigkeiten in der Grenzschicht am Schiffsboden erfaßt.

Desweiteren deuten erste Auswertungen der Querkomponente auf eine Abhängigkeit dieser Teilampli-

tude vom Passierabstand zum Ufer hin. Um die gesamte, synoptische Strömungsverteilung zwischen Schiff und Sohle zu erfassen, sind weitere Untersuchungen mit Profilsonden für 1997/98 vorgesehen.

Systematische Squat-Messungen im hydraulischen Modell

Die systematischen Untersuchungen zum Squat im hydraulischen Modell der Unterelbe wurden als Ergänzung zu den in der Natur vorgenommenen Messungen durchgeführt. Der Squat wurde gleichzeitig mit der 3D-Strömung und den Druckverhältnissen unter dem fahrenden Schiff in Abhängigkeit der UKC erfaßt.

Die Meßergebnisse von Squat und Druckänderung wurden in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit aufgetragen, wobei zur Übersichtlichkeit in Abbildung 5 nur die Werte bei UKC = 4,7 m und 2,2 m (ohne Fahrt) dargestellt sind.

Die im Verhältnis zur Squat-Zunahme stärkere Druckabnahme deutet auf den Einfluß der Auftriebskräfte in Abhängigkeit der Tiefgangs (Abnahme der UKC) hin. Erste Auswertungen des Verhältnisses von Squat und Druckdifferenz für das PANMAX-Containerschiff ($c_B = 0,695$) ergaben einen funktionalen Zusammenhang von $S \approx 3,2 (1 - e^{-0,3 \Delta p})$ unabhängig von Tiefgang und Schiffsgeschwindigkeit (Standardabweichung 0,04; Korrelationskoeffizient 0,9950). Untersuchungen mit anderen Schiffseinheiten sind vorgesehen.

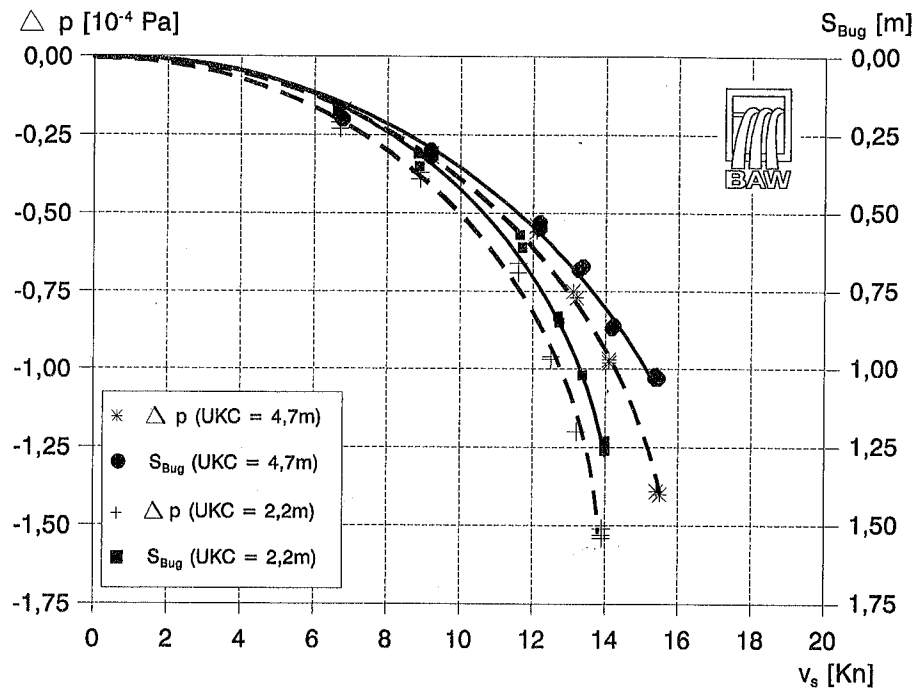


Abbildung 5: Squat und Druckabnahme unter dem Schiff in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit aus Messungen im hydraulischen Modell der Unterelbe (Maßstab 1:40; PANMAX-Containerschiff)

Die geplante synoptische Erfassung des Strömungsprofils zwischen Schiff und Sohle sowie der Druckverhältnisse an und in der Sohle sollen Zusammenhänge aufzeigen und Hinweise auf den quantitative Einordnung des schiffserzeugten Sedimenttransports in Seewasserstraßen geben.

Zusammenfassung

Eine gesicherte quantitative Prognose der Wechselwirkung von Seeschiff und Seewasserstraße, wie örtliche schiffserzeugte Belastungen und örtlicher Squat, ist derzeit nur auf Basis von hydraulischen Modellversuchen in einem fachwissenschaftlich abgesicherten Maßstab möglich. Die physikalischen Prozesse zwischen Schiff und Sohle in inhomogenen Querschnitten sollen durch weitere Untersuchungen erfaßt werden.

Zur Abschätzung des Risikos von Schäden an Uferbiotopen und Deckwerken bei der Überplanung von Seewasserstraßen hinsichtlich Schiffsgröße und Schiffsgeschwindigkeit wird eine exakte Ermittlung der örtlichen Wechselwirkung von Seeschiff und Seewasserstraße für notwendig erachtet.

Literatur

- | | |
|--|---|
| Eryuzlu, P.
Cao, Y.L.
D'Agnolo, F. | Underkeel Requirements for Large Vessels in Shallow Waterways,
28 th Int. Navigation Congress of PIANC, Section II-2, Seville, Canada, 1994 |
| NRC | Ship Wave Simulation with WAKE2D, National Research Council, Canadian Hydraulic Centre, Ottawa, Canada, 1996 |
| NRC | Ship Wave Simulation with WAKE2D, National Research Council, Canadian Hydraulic Centre, Ottawa, Canada, 1997 |
| Schmiechen, M. | Squat-formulae: Comparisons with measurements at container ships on the Elbe River, Presentation 18. Duisburger Kolloquium „The ship in restricted waters“, June 1997 |
| Tuck, E.O. | Shallow-water flows past slender bodies, J. Fluid Mech. (1966), Vol. 26, Part 1, Great Britain, 1966 |