

## **Schleusen, Wehre, Schiffshebewerke (1.3)**

### **Naturuntersuchungen und numerische Modell- rechnungen zur Ein- und Ausfahrt moderner Schiffe in das Schiffshebewerk Lüneburg**

**Prof. Dr.-Ing. Bernhard Söhngen**

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

**Dipl.-Ing. Detlef Spitzer**

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

**Dipl.-Ing. Norbert Stuntz**

Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., Duisburg

#### **1. Einleitung**

Das Ein- und Ausfahrverhalten von Schiffen und die damit einhergehenden hydrodynamischen Probleme an Abstiegsbauwerken stellen innerhalb des Fachgebietes Verkehrswasserbau sicher ein Sondergebiet dar. Die Problemstellung rückte in der Vergangenheit immer dann in den Blickwinkel des fachlichen Interesses, wenn vorhandene ältere Schleusen den Anforderungen der größer werdenden Schiffsgefäße nicht mehr gerecht wurden und gab dann Anlass zur Durchführung von Modell- bzw. Naturuntersuchungen, um die Möglichkeiten und Grenzen für den Verkehr der Schifffahrt bzw. den Betrieb der bestehenden Anlage aufzuzeigen. Die Untersuchungen zielten dabei auf die quantitative Bestimmung der nachstehenden Kenngrößen ab:

1. Schiffssquat bei der Ein- und Ausfahrt in Schleusen
2. Ein- und Ausfahrzeiten und -geschwindigkeiten
3. Wasserspiegelbewegungen in der Kammer
4. Rückströmgeschwindigkeiten
5. Schiffswiderstand

Entsprechend der einleitend angeführten Vorgehensweise zu den Untersuchungen der BAW für das Schiffshebewerk erfolgte in der ersten Phase der Bearbeitung zunächst eine Auswertung früherer Fahrversuche an Schleusen und Hebewerken im Modell und in der Natur. Dabei wurden Arbeiten nachstehender Forschungseinrichtungen berücksichtigt:

1. VWS, FAS und BAW (Amtsberg, 1936; Kiehnel, 1936; FAS, 1964 und 1966; Felkel&Steinweller, 1977; BAW, 1973, 1989 und 2004a)
2. Versuchsanstalt für Binnenschiffbau Duisburg (VBD, 1981, 1993 und 2003a; Broß, 1994)
3. Franzius-Institut der Technischen Universität Hannover (Franzius-Institut, 1969)
4. Rijkswaterstaat (Kooman, 1973)
5. British Transport Docks Board (BTDB, 1980 und Cooper et al., 1978)
6. Russische Institute MIVT, LIVT, VNIIG und SO RAN (Kiriakov, 1972; Kiriakov et al., 1975; Roma-

*nov&Yanenko, 1974 und 1975; Atavin, 1977; Yanenko, 1994; Pochabov, 1997 und Klementiev, 2002)*

7. U.S. Army Corps of Engineers (Maynard, 1987) und Naval Surface Warfare Center (Fisher et al., 1978)

Das Hauptaugenmerk der Literaturrecherche wurde auf erzielte Ergebnisse zu den ersten drei der zuvor aufgeführten Untersuchungsschwerpunkte gelegt. Die Aufarbeitung von Ergebnissen zu den Rückströmgeschwindigkeiten erfolgte nicht, da diese Untersuchungen ältere Schleusen mit unbefestigter bzw. unzureichend befestigter Sohle betraf, in denen zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten eine Erosionsgefahr für die Sohle hervorriefen. Auf eine Aufarbeitung von Ergebnissen zum Schiffswiderstand wurde weitgehend verzichtet, da dieser Gesichtspunkt ebenfalls in der Vergangenheit von Bedeutung war und die Ermittlung der erforderlichen Antriebskraft zum Ein- und Ausschleppen von Schiffen an Schleusen bzw. des Leistungsbedarfs von Schiffen beinhaltete.

Die Aufarbeitung der früheren überwiegend im Modell durchgeführten Untersuchungen zur Beurteilung der hydrodynamischen Verhältnisse beim Ein- und Ausfahren von Schiffen in Schleusen und Hebewerke machte deutlich, dass eine hinreichend sichere Übertragung von physikalischen Modellversuchen infolge der Schwierigkeiten bei der Nachbildung der insgesamt komplexen hydrodynamischen Vorgänge bei der Ein- und Ausfahrt von Schiffen in Schleusen und Hebewerken, insbesondere der Simulation der Bewegung des Schiffes bei Einfahrten, aufwendig bzw. problematisch ist. Um zuverlässige Ergebnisse für die im SHW Lüneburg bei der Ein- und Ausfahrt großer Schiffe konkret gegebenen Randbedingungen zu erhalten und vorliegende Ergebnisse aus früheren Modell- und Naturuntersuchungen für Prognoserechnungen bei veränderlichen Randbedingungen absichern und verallgemeinern zu können, wurden Naturuntersuchungen als erforderlich angesehen und geplant.

Neben den Schwierigkeiten der genauen Simulation der Schleuseneinfahrt im physikalischen Modell wurden im Rahmen der Voruntersuchungen auch die Grenzen der theoretischen Erfassung des hoch instationären Vorganges durch einfache analytische Ansätze bei einer stationären Betrachtung offenkundig. Die theoretische Lösung der den physikalischen Vorgang der Schleuseneinfahrt und -ausfahrt beschreibenden Differentialgleichungen, der Gleichungen für die Bewegung des Wassers (SV-Gleichungen) und der damit gekoppelten Bewegungsgleichungen für das Schiff, ist für den allgemeinen Fall auf analytischer Grundlage nicht möglich. Nur stark vereinfachende Annahmen können zum Auffinden von Näherungslösungen für spezielle Problemstellungen führen. Die Beschreibung des komplexen Vorganges erfordert die mathematische Simulation mit einem numerischen Modell. Für diese Aufgabe konnte im Rahmen der Untersuchungen der BAW auf ein vorhandenes eindimensionales numerisches Verfahren der VBD (Chen et al., 2001) zurückgegriffen werden. Für die Modellkalibrierung durch die VBD und die Verifizierung der Simulationsergebnisse bildeten ebenfalls die Naturversuchsergebnisse am SHW Lüneburg eine unverzichtbare Grundlage.

## Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Naturuntersuchungen und numerische Modellrechnungen zur Ein- und Ausfahrt moderner Schiffe  
in das Schiffshebewerk Lüneburg

### 2. Durchführung der Naturuntersuchungen am SHW Lüneburg, Versuchsauswertung und Ergebnisse

#### Versuchsprogramm

Die Durchführung der Fahrversuche erfolgte im Ostrog des Doppelschiffshebewerks. Zur Beantwortung der aus technischer, nautischer und hydraulischer Sicht gestellten Fragen waren am Schiffshebewerk Lüneburg sowohl Einfahr- als auch Ausfahrversuche durchzuführen. Darüber hinaus war bei der Planung und Durchführung der Versuche zu berücksichtigen, dass am Schiffshebewerk unterschiedliche Verhältnisse bei der Berg- und Talfahrt vorliegen. Bei einer im Mittel vorhandenen nominellen Trogwassertiefe von  $h = 3,38$  m am Schiffshebewerk erfolgt in der Praxis die Ausspiegelung im Unterwasser bei einer Trogwassertiefe von 3,34 m und im Oberwasser bei einer Trogwassertiefe 3,42 m. Zudem war zu erwarten, dass die Verlängerung des 107,8 m langen Trogs durch die Kanalbrücke im OW mit einer gegenüber dem Trog um 0,5 m tiefer liegenden Sohle Einfluss auf die Bewegung des Schiffes und des Wasserspiegels nimmt. Das Versuchsprogramm beinhaltete daher Ein- und Ausfahrten sowohl im Ober- als auch im Unterwasser.

An zwei Versuchstagen wurden insgesamt 14 Versuchsfahrten mit der gleichmäßig auf 2,80 m abgeladenen MS "Loetschental", davon 5 Einfahrten im Oberwasser (EOW), 3 Einfahrten im Unterwasser (EUW), 4 Ausfahrten im Unterwasser (AUW) und 2 Ausfahrten im Oberwasser (AOW), durchgeführt. Als maßgebender Versuchsparameter für die Einfahrten war die Anfahrts- geschwindigkeit zum Schiffshebewerk zu variieren, um den in der Praxis üblichen Bereich zu erfassen. Realisiert wurden Anfahrts- geschwindigkeiten  $v_{an}$  im Bereich  $2,0 \text{ km/h} \leq v_{an} \leq 8,0 \text{ km/h}$ . Die Ausfahrts- geschwindigkeit wurde durch das vorliegende Querschnittsverhältnis, d.h. die kritische Schiffsgeschwindigkeit, limitiert. Die Randbedingungen und die Bezeichnung der Ein- und Ausfahrversuche enthalten die nachstehenden Tabellen.

	Einfahrten im Oberwasser					Einfahrten im Unterwasser		
Versuchs- bezeichnung	EOW-1	EOW-2	EOW-3	EOW-4	EOW-5	EUW-1	EUW-2	EUW-3
Anfahrts- geschwin- digkeit [km/h]	2,0	3,1	3,7	5,8	8,0	2,8	3,8	5,5

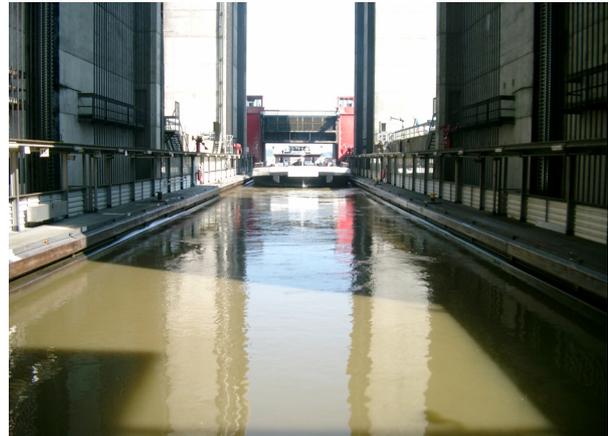
Randbedingungen und Bezeichnung der Einfahrversuche im Ober- und Unterwasser

	Ausfahrten im UW				Ausfahrten i. OW	
Versuchs- bezeichnung	AUW-1	AUW-2	AUW-3	AUW-4	AOW-1	AOW-3
mittlere Fahr- geschwin- digkeit im Trog [km/h]	0,86	0,94	0,87	0,89	0,77	0,82

Randbedingungen und Bezeichnung der Ausfahrversuche im Ober- und Unterwasser

Zur Erfassung von Wasserspiegelschwankungen wurden im Oberwasser des Schiffshebewerkes neben den Fahrversuchen Schwallversuche geplant und durchgeführt. Diese Messungen dienten der Erfassung des Einflusses der Restentleerung der Sparschleuse Uelzen auf die dynamischen Stauspiegelschwankungen am

Schiffshebewerk, welche bei Belastungsannahmen zu berücksichtigen sind.



**Bild 1:** Einfahrversuch mit der MS "Loetschental" im UW des Schiffshebewerks



**Bild 2:** Schraubenwasser zu Beginn eines Ausfahrversuchs im Oberwasser

#### Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Auswertung der Versuche stützte sich im Wesentlichen auf durchgeführte Wasserspiegellagemessungen und Tachymetermessungen. Zur Erfassung der Wasserspiegelbewegungen wurden im Hebewerkstrog und den Einfahrtsbereichen eine Vielzahl von Druckdosen installiert. Damit war es möglich, die Wellenbewegungen in der Kammer - die aus dem "Kolbeneffekt" resultierende Anhebung des Kammerwasserspiegels bei der Einfahrt und die Spiegelabsenkung bei der Ausfahrt - und auch die sich aus der Eigenfrequenz des "halboffenen Systems" ausbildenden stehenden Wellen sichtbar zu machen. Die Registrierung des maximalen Anstiegs des Wasserspiegels erfolgte am geschlossenen Trogende zusätzlich auf videometrischer Grundlage und mit Hilfe von Wellensonden. Bei Anfahrts- geschwindigkeiten zum Trog im Bereich von 2,0 - 8,0 km/h ergab sich dabei die größte Spiegelanhebung bei der Anfahrts- geschwindigkeit von 8 km/h zu ca. 1,0 m.

Zur Erfassung von Wasserspiegelschwankungen wurden im Oberwasser des Schiffshebewerkes neben den Fahrversuchen Schwallversuche durchgeführt. Diese dienten der Erfassung von Schwall- und Sunkerscheitungen am Schiffshebewerk aus dem Betrieb der Schleuse Uelzen I. Aus den aufgezeichneten Pegel-

## Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Naturuntersuchungen und numerische Modellrechnungen zur Ein- und Ausfahrt moderner Schiffe  
in das Schiffshebewerk Lüneburg

ganglinien wurde ermittelt, das der Entleerswall der Schleuse Uelzen derzeit zu Spiegelschwankungen am Hebewerk von 20 cm führt. Diese Spiegelschwankungen waren bei den Belastungsannahmen zu berücksichtigen

Auf der Grundlage von Tachymetermessungen am Bug und Heck des Schiffes konnten die relevanten Schiffsbewegungen bei den Ein- und Ausfahrten in das Schiffshebewerk erfasst werden. Die Versuchsauswertung beinhaltete hier die Ermittlung folgender Kenngrößen:

- Schiffsgeschwindigkeit,
- Vertrimmung des Schiffes,
- Schiffstauchung,
- Schiffsabsenkung am Heck und
- Schiffssquat am Bug.

Die dem gemäß Darstellung erfolgt in der Anlage für den Fall einer Einfahrt in Bild 3 und für eine Ausfahrt in Bild 4.

### Ergebnisse

Nachfolgend sollen einige wesentliche Ergebnisse aus der Versuchsauswertung wiedergegeben werden. Diese beziehen sich auf die Problemstellungen

- maximale Wasserspiegelanhebung im Trog bei den Einfahrten,
- Einhaltung der zulässigen Troghaltekräfte und
- maximaler Squat bei den Ausfahrten.

Bezüglich der zu ermittelnden Größe der Wasserspiegelanhebung bei der Trogeinfahrt zeigte ein Vergleich der in Lüneburg ermittelten Maximalwerte mit einer Formel aus den bekannten Untersuchungen von Kooman (1973), welche auf der Grundlage von Messungen im Modell erhalten wurde, dass für das untersuchte kleine Querschnittsverhältnis insbesondere bei großen Froudeschen Tiefenzahlen wesentlich zu große Spiegelanhebungen erhalten werden. Zum Auffinden eines geeigneten Ansatzes für die Prognose der maximalen Wasserspiegelanhebung wurden die Naturuntersuchungen am SHW Lüneburg (BAW, 2005) unter Einbeziehung früherer Ergebnisse der BAW an der Schleuse Friedrichsfeld (BAW, 2004a) und aus den Naturmessungen von Kooman (1973) ausgewertet und aus einer Regressionsanalyse ein neuer Ansatz für die maximale Anhebung des Wasserspiegels an einem Trog- bzw. Schleusentor bei der Einfahrt eines Schiffes aus dem Unterwasser ermittelt, welcher die vorgefundenen Verhältnisse besser wiedergibt. Verschiedene multiple Regressionen mit den dimensionslosen abhängigen Größen als Potenzprodukt dargestellt führte auf die Beziehung

$$\frac{\Delta h_{\max}}{h} = 1,64 \left(\frac{b}{B}\right)^{-0,75} \left(\frac{h}{T}\right)^{-1,46} C_B^{0,45} \left(\frac{v_{an}}{\sqrt{g h}}\right)^{1,46}$$

mit dem höchsten Grad des Zusammenhangs. Die relative Spiegelanhebung  $\Delta h_{\max}/h$  kann hiernach in guter Näherung als Funktion des Breitenverhältnisses  $b/B$ , des Tiefgangsverhältnisse  $h/T$ , dem Völligkeitsgrades  $C_B$  und der Froudeschen Tiefenzahl  $Fr_h$  als die

maßgebende Kenngröße dargestellt werden. Der Zusammenhang ist grafisch zur Abschätzung des Einflusses von veränderten Randbedingungen auf die Größe der maximale Wasserspiegelanhebung in Bild 5 der Anlage dargestellt.

Im Umkehrschluss ist es möglich, die Beziehung nach der Anfahrtschwindigkeit auszuwerten, damit eine vorgegebene Höhe der Spiegelanhebung nicht überschritten wird. Eine dem gemäß Auswertung des Ansatzes nach der zulässigen Anfahrtschwindigkeit an die Tröge des Schiffshebewerkes zur Vermeidung des Anspringens der Entlastungsöffnungen im Trogtor erfolgt tabellarisch für die vorgegebenen, veränderlich angenommenen Randbedingungen in Lüneburg bezüglich der Trogwassertiefen, Schiffsbreiten und -tiefgänge.

Danach ergibt sich die zulässige Anfahrtschwindigkeiten bei dem vorhandenen Freibord im Trogtor für das größte der hier untersuchten Schiffe mit einer Breite von 11,65 m und einem Tiefgang von 2,80 m zu 5,2 km/h im Ist-Zustand, wenn eine Trogwassertiefe von 3,35 m zugrunde gelegt wird. Eine Anhebung der Trogwassertiefe auf 3,50 m würde für das Bemessungsschiff eine Herabsetzung der zulässigen Anfahrtschwindigkeit um 1 km/h auf 4,2 km/h bedingen.

Die Troghaltekräfte, d.h. die Kräfte in den Antriebsspendeln des Troges, resultieren unmittelbar aus der Belastung durch die Wasserspiegelanhebung im Trog und dürfen im Schiffshebewerk Lüneburg 135 t nicht übersteigen. Zur Berechnung der maximalen Troghaltekräfte wurden die zeitlichen Spiegelverläufe der 8 Einfahrversuche jeweils zur Ermittlung der ungünstigsten Belastungsfunktion ausgewertet. Die Berechnung erfolgte aus dem Kräfte- und Momentengleichgewicht für das vorhandene statische System, wobei die Belastungsfunktion vereinfacht als Trapezlast approximiert wurde.

Eine Abschätzung der maximalen Anfahrtschwindigkeit für die Einhaltung des Grenzwertes für die Troghaltekraft für die vorgegebenen variablen Randbedingungen in Lüneburg war auf Grundlage eines Berechnungsansatzes möglich, der durch die Ausführung der nachfolgenden 5 Schritte erhalten wurde:

- Normierung der im Naturversuch bestimmten Troghaltekräfte
- Ermittlung des Übertragungsmaßstabes mittels Regression
- Einführung der Gleichung für die maximale Spiegelanhebung
- Bestimmung der Lastannahmen für den ungünstigsten Lastfall
- Ermittlung der zulässigen Anfahrtschwindigkeit durch Substitution und Umstellung

Die Prognoserechnung für das Schiffshebewerk ergab hier, dass für das betrachtete Bemessungsschiff und der Trogwassertiefe von 3,35 m die zulässigen Anfahrtschwindigkeiten zur Einhaltung der zulässigen Troghaltekraft 3,4 km/h beträgt. Ein Anstieg der Trogwassertiefe auf 3,50 m erhöht die zulässige Anfahrtschwindigkeit nur geringfügig. Sie beträgt in diesem Fall 3,5 km/h.

Bezüglich der Problematik des Squat weist der diesbezügliche Stand des Wissens aus, dass die Gefahr einer

Grundberührungen bei Schleusenausfahrten größer als bei Einfahrten ist. Zur Berechnung der Schiffstauchung und des Squat in Schleusen und Kanälen enthält die Fachliteratur eine Reihe von Verfahren. Die existierenden Näherungen zur Abschätzung des Squat unterliegen allerdings insgesamt erheblichen Schwankungen und unterliegen einem streng zu beachtenden Gültigkeitsbereich.

Um einen zuverlässigen Ansatz zur Prognose des Squat für veränderliche Randbedingungen in Schleusen herauszufinden, konnte auf systematische Modelluntersuchungen von Blau und Fuehrer an der FAS Berlin (FAS, 1966) zurückgegriffen werden. Die Regressionsanalyse mit mehreren mit mehreren Ansatzfunktionen führte für den Squat am Heck auf den Zusammenhang

$$\frac{\Delta T_{\max}}{h} = 2,03 (n - 1)^{-1,15} C_B^{-0,31} \left( \frac{v}{\sqrt{g h}} \right)^{1,63}$$

mit der besten Korrelation, und weist aus, dass die maximale relative Einsinktiefen  $\Delta T_{\max}/h$  des ausfahrenden Schiffes vom Hecksquat bestimmt wird, welcher in Beziehung zum n-Verhältnis, dem Blockkoeffizienten  $C_B$  und der Froudeschen Tiefenzahl  $Fr_h$  steht. Das Ergebnis hierzu weist Bild 6 der Anlage aus.

Zur Verifizierung der neuen Squatformel für die Schleusenausfahrt wurde das Rechenergebnis mit Squatmessungen der BAW am SHW Lüneburg und früheren Naturuntersuchungen der BAW an der Neckarschleuse Marbach verglichen. Die Gegenüberstellung in der Tabelle beinhaltet auch das Berechnungsergebnis anderer gebräuchlicher Verfahren. Es zeigt sich, dass der neue empirische Ansatz das Ergebnis der Messungen sehr gut wiedergibt. Von den untersuchten theoretischen und semiempirischen Verfahren erwies sich hier die bekannte Formel von Bouwmeester zur Abschätzung des maximalen Squat am geeignetsten.

Die neue Squatformel für Schleusenausfahrten kann grafisch als Kurvenschar ausgewertet werden, indem der auf die Wassertiefe bezogene Squat über die Froudesche Tiefenzahl aufgetragen wird, wobei das Querschnittsverhältnis als Parameter erscheint. Eine entsprechende Darstellung zeigt Bild 7 der Anlage. Als zusätzlicher Parameter wurde darin das Verhältnis der gefahrenen Schiffsgeschwindigkeit zur kritischen Schiffsgeschwindigkeit aufgenommen. Mit der kritischen Schiffsgeschwindigkeit als obere Grenze ergibt sich aus der Auftragung für jedes n-Verhältnis ein relativer Squat, der nicht überschritten werden kann. Das absolute Maximum für den relativen Squat ist nach der Darstellung bei einem n-Verhältnis von 2,4 zu verzeichnen und beträgt ca. 16 % der Wassertiefe. Die Grafik gilt für einen theoretischen Blockkoeffizienten von  $C_B = 1,0$ . Der Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des realen Blockkoeffizienten kann der ausgewiesenen Nebengrafik entnommen werden.

Die Anwendung der Squatformel auf die Verhältnisse in Lüneburg erfolgte für die ungünstigsten Belastungsannahmen. Diese beinhalten:

1. Das Schiff fährt mit der kritischen Schiffsgeschwindigkeit aus.
2. Die Schleusung vollzieht sich voll unter dem Einfluss der dynamischen Stauspiegelabsenkung.

Die unter diesen Annahmen ermittelten Flottwassertiefen belegen, dass bei einer Trogwassertiefe von 3,35 m und einem Schiffstiefgang von 2,8 m bei allen untersuchten Schiffen eine gewünschte Flottwassertiefe von 0,20 m nicht eingehalten werden kann und das schmalste der 4 untersuchten Schiffe den Grund berührt. Die Anhebung der Trogwassertiefe um nur 15 cm führt zu einer deutlichen Entschärfung der Verhältnisse, worauf sich die Empfehlung gründet, die Trogwassertiefe im Schiffshebewerk auf 3,50 m anzuheben.

### 3. Numerische Modelluntersuchungen

Eindimensionale Verfahren für die numerische Simulation der Schleuseneinfahrt und Schleusenausfahrt wurden bisher durch Vrijer (1986), Vrijburcht (1991), Atavin et al. (1998) und Chen et al. (2001) bekannt. Für die numerische Simulation von Ein- und Ausfahrten in das SHW Lüneburg wurde das Modell von Chen verwendet. Ausgangsgleichungen sind im Modell von Chen die Saint-Venant-Gleichungen zur Beschreibung der Bewegung des Wassers:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial (uA)}{\partial x} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0$$

d. h. die Kontinuitätsgleichung und die Impulsgleichung (nicht-konservativ) und die gekoppelten Gleichungen für die Bewegung des Schiffes

$$m \frac{dU}{dt} = F_x + F_d$$

$$m \frac{dW}{dt} = F_z$$

$$J_{\dot{y}} \frac{d\omega}{dt} = M_{\dot{y}}$$

Darin sind

$$U = d\xi/dt, \quad W = -ds/dt, \quad \omega = d\theta/dt$$

und  $F_d$  der Überschub des effektiven Propellerschubs über dem Reibungswiderstand, ausgedrückt als:

$$F_d = T - R_f$$

In der Berechnung wird entweder der Schub  $T$  oder die Propellerdrehzahl konstant gehalten. Im ersten Fall kann der Schub durch den Gleichgewichtswert vor Erreichen des Trogtores ermittelt werden. Bei konstanter Drehzahl kann die quasistatische Propellerkurve  $K_T$  über  $J$  verwendet werden, um den momentanen Schub zu berechnen. Der Reibungswiderstand  $R_f$  wird permanent mit Hilfe der ITTC-1957 Formel und einer empirischen Geschwindigkeitserhöhungskorrektur ähnlich der von Emerson (1959) aktualisiert.

Die numerischen Modelluntersuchungen erfolgten durch die VBD-DST (VBD, 2004 und DST, 2005) und beinhalteten die:

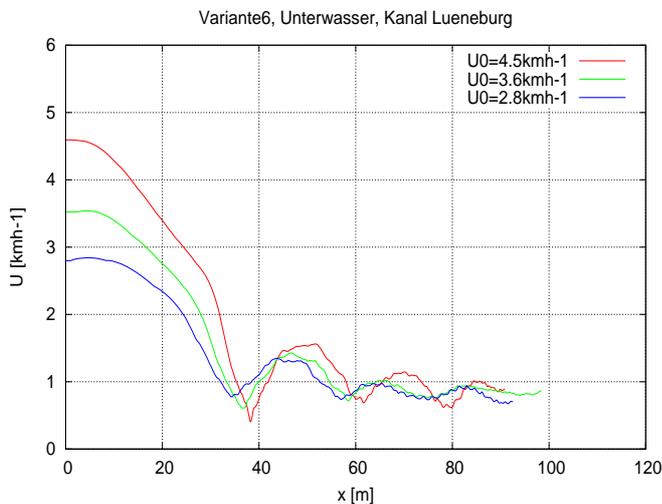
- Überarbeitung/Modifizierung des Finite-Differenzen-Verfahrens von Chen (VBD, 2004),
- Modellkalibrierung auf Grundlage der Ein- und Ausfahrten der MS „Loetschental“,
- Verifizierung des Modells durch numerischen Nachrechnungen zu den Naturversuchen und die

## Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Naturuntersuchungen und numerische Modellrechnungen zur Ein- und Ausfahrt moderner Schiffe  
in das Schiffshebewerk Lüneburg

- Durchführung von erweiterten Befahrbarkeitsanalysen für das SHW unter Berücksichtigung variabler Schiffsbreiten.

Die von Stuntz (DST, 2005) durchgeführten Nachrechnungen und Befahrbarkeitsanalysen für das SHW Lüneburg wiesen übereinstimmend mit erzielten Ergebnissen früherer numerischen Modellrechnungen allgemein nach, dass die hydrodynamischen Verhältnisse bei der Einfahrt und Ausfahrt in Schleusen und Hebewerke mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit auf Grundlage eines eindimensionalen instationären Strömungsmodells beschrieben werden können. Die Simulationsergebnisse mit dem verwendeten modifizierten Modell von Chen stimmten im Grundlegenden mit den Ergebnissen der Naturuntersuchung in Lüneburg und angestellten Prognoserechnungen für veränderte Randbedingungen anhand empirischer Ansätze aus früheren Modell- und Naturuntersuchungen überein. In Bild 8 der Anlage wurde die Schiffslängsbewegung mit der Anfahrtsgeschwindigkeit als Parameter für die geometrischen Randbedingungen des Naturversuchs nachgerechnet. Bild 9 weist eine Prognose für veränderliche Breitenverhältnisse bei der Einfahrt in das SHW aus. Deutlich zeigt sich im Geschwindigkeitsverlauf der Einfahrten die zunehmende Wirkung des „Kolbeneffektes“ bei größer werdenden Anfahrtsgeschwindigkeiten und kleiner werdenden Breitenverhältnissen, welcher sich in der zunehmenden periodischen Verzögerung und Beschleunigung des Schiffes bei der Fahrt im Trog mit der Anfahrtsgeschwindigkeit zum Trog bemerkbar macht.



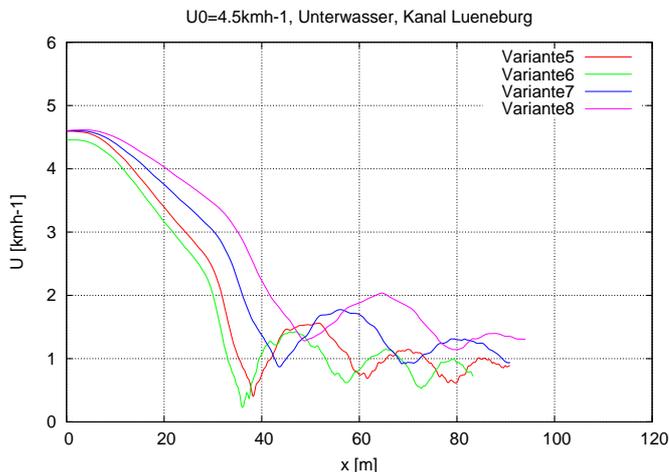
**Bild 8:** Numerische Nachrechnung der Einfahrt der MS "Loetschental" aus dem Unterwasser für unterschiedliche Anfahrtsgeschwindigkeiten

Andererseits macht der Vergleich mit anderen vorhandenen numerischen Modellen bezüglich der Formulierung und Berücksichtigung einzelner Terme in den Gleichungen für die Bewegung des Wassers (Saint-Venant-Gleichungen) und des Schiffes aufmerksam auf Potential zur weiteren Verbesserung des verwendeten numerischen Modells. Diese können gesehen werden in der

- Formulierung der Reibungsterme für das Schiff und den Kanal und der Berücksichtigung zusätzlicher lokaler Terme für den Druckwiderstand und den

Schub des Schiffes in der Bewegungsgleichung für das Wasser,

- Einbeziehung der Wirkung des Propellerschubs auf die Vertrimmung des Schiffes und
- Berücksichtigung der veränderlichen geometrischen Randgeometrie und Anströmungsverhältnisse für das Schiff auf die zusätzlichen hydrodynamischen Masse und den Propellerschub.



**Bild 9:** Numerische Simulation des Breiteninflusses auf die Schiffslängsbewegung für die Einfahrt aus dem Unterwasser des SHW Lüneburg;

Variante 5:  $B = 11,65$  m;  
Variante 7:  $B = 10,5$  m;

Variante 6:  $B = 11,36$  m;  
Variante 8:  $B = 9,6$  m

### 4. Zusammenfassung

Die Aufarbeitung des vorliegenden Erkenntnisstandes zu den hydrodynamischen Vorgängen beim Ein- und Ausfahren von Schiffen in Schleusen bzw. Hebewerke zur Klärung diesbezüglicher Problemstellungen für das Schiffshebewerk Lüneburg machte deutlich, dass mit den vorhandenen einfachen empirischen und semiempirischen Ansätzen infolge des ihnen zugrunde liegenden Problems, den komplexen instationären Vorgang der Schleuseneinfahrt mit all seinen Wechselwirkungen zu berücksichtigen, hinreichend präzise quantitative Vorhersagen schwierig und mit einer großen Unsicherheit behaftet sind. Aufbauend auf der eingehenden Analyse der früheren empirischen und semiempirischen Ansätze und den Ergebnissen der Natur und numerischen Modelluntersuchungen für das SHW Lüneburg lässt sich der vorhandene Erkenntnisstand bezüglich der untersuchten Frage des maximalen Squat, der maximalen Wasserspiegelanhebung und der Fahrzeiten und -geschwindigkeiten bei Ein- und Ausfahrten in Schleusen verallgemeinernd wie folgt zusammenfassen:

1. Die vorliegenden Arbeiten zu Problemen der Ein- und Ausfahrt in Schleusen zeigen auf, dass die physikalischen Verhältnisse bei Ein- bzw. Ausfahrten an Schleusen verschieden und daher gesondert zu untersuchen sind. Das Hauptaugenmerk wird bei diesen Untersuchungen im Allgemeinen auf die Beurteilung der Sicherheit der Schifffahrt vor Grundberührungen gelegt. Infolge der starken Absenkung des Wasserspiegelniveaus hinter dem Schiff durch den „Kolbeneffekt“ und der Wirkung der Propulsion bei der Fahrt im eingeeigten Querschnitt der



## Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Naturuntersuchungen und numerische Modellrechnungen zur Ein- und Ausfahrt moderner Schiffe  
in das Schiffshebewerk Lüneburg

fahrgeschwindigkeit zur Vermeidung des Anspringens der Entlastungsöffnungen und der THV infolge der Spiegelanhebung bei Einfahrten und dem erforderlichen Arbeitsvermögen der Stoßschutzanlage und zur erforderlichen Kieffreiheit zur Vermeidung von Grundberührungen durchgeführt und Grundlagen zur Berechnung der Leistungsfähigkeit der Anlage bereitgestellt. Die Versuche bildeten somit die Basis dafür, die den Betrieb der Anlage und die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt am Schiffshebewerk betreffenden Fragen des WSA Uelzen unter den Bedingungen des Großversuchs zu beantworten und darüber hinaus die Basis für die Kalibrierung und Verifizierung und Weiterentwicklung eines numerischen Berechnungsverfahrens, um zukünftig Fachaussagen für Schleusen und Hebewerke mit anderen Randbedingungen zu ermöglichen.

### Literatur

- AMTSBERG, H.(1936): „Modellversuche über das Einschleppen von Kanalkähnen in den Trog eines Schiffshebewerkes“, Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin, Heft 24, 1936, S. 84-111
- ATAVIN, A.A. ET AL.(1998): „The Computation of lockage and Navigation of Vessels on the System of Ship-Canals“, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference on Hydro-Science and engineering (ICHE), Technische Universität Cottbus, 31.8. – 3.9.1998
- ATAVIN, A.A.(1977): „Über die Bewegung des Wasserspiegels bei der Ausfahrt eines Schiffes aus der Kammer einer Schiffsschleuse (in Russisch)“, Dinamika sloschnoj sredy, Novosibirsk, Band 30, S.35-52
- BAW (1990): "Bericht über die Schifffahrtsversuche Marbach 1989", Bundesanstalt für Wasserbau, Bericht L-231.2/23 (unveröffentlicht), Karlsruhe, Juli 1990
- BAW (1973): "Modellversuche über das Einfahren eines Schubverbandes in eine 12 m breite Schleuse ", Bundesanstalt für Wasserbau, Auszug aus dem 1. Versuchsbericht BAW-W 357 (unveröffentlicht), Anl.1, Karlsruhe, Februar 1973
- BAW (2004A): „Naturuntersuchungen Schleuse Friedrichsfeld. Teil I: Einfahr- und Liegebedingungen an der Schleusengruppe“, Gutachten-Nr. 3.03.10042.00 (unveröffentlicht), Karlsruhe, Februar 2004
- BAW (2004B): „Untersuchungen zu den Ein- und Ausfahrbedingungen in das Schiffshebewerk Lüneburg“, Bundesanstalt für Wasserbau, Gutachten-Nr. 3.04.10044.00 (unveröffentlicht), Karlsruhe, Februar 2004
- BAW (2005): „Untersuchungen zu den Ein- und Ausfahrbedingungen in das Schiffshebewerk Lüneburg. Naturuntersuchungen und Prognoserechnungen“, Bundesanstalt für Wasserbau, Gutachten-Nr. 3.04.10044.00 (unveröffentlicht), Karlsruhe, September 2005
- BRITISH TRANSPORT DOCKS BOARD (1980): "The locking of ships with high blockage factors: a report to the National Ports Council"; British Transport Docks Board, Research Station, London: National Ports Council
- BROß, H. (1994): „Einfluss der Bugformen von Binnenfahrzeugen auf das Einfahrverhalten in Schleusen“, Binnenschifffahrt - ZfB, Nr. 13, S. 33-36
- CHEN, X-N., ZÖLLNER, J. UND SHARMA, S.D. (2001): "Ship entry into a lock", STG-Sommertagung, Danzig
- COOPER, D. H. ET AL. (1978): "Some aspects of a study of ships with high blockage factors", 7<sup>th</sup> International Harbour Congress, Antwerpen, 22.-26. May 1978, Volume 1 (papers and reports) Section 1.2, pages 2.01/1-2.01/13
- DST (2005): "Numerische Nachrechnung der Naturuntersuchungen zu den Ein- und Ausfahrten am Schiffshebewerk Lüneburg", Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V., Duisburg, Bericht 1782 (unveröffentlicht), August 2005
- FAS (1964): „Troeinfahrten der Schiffshebewerke Niederfinow und Rothensee“, Bericht 126.1; Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin
- FAS (1966): „Strömungsverhältnisse in Kanälen und Schleusenvorhäfen (Abschlußbericht zum Forschungsthema), Teil II: Fahrdynamische Verhältnisse an Schleuseneinfahrten“, Bericht 381.1, Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Berlin 1966
- FELKEL, K., STEINWELLER, H.(1977): „Naturversuche und Modellmessungen über das Einfahren eines Schubverbandes in eine 12 m breite Schleuse und über das Ausfahren“, Zeitschrift für Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, Band 104, Nr. 6, S. 294-300
- FISHER, S., JENKINS, D. UND DAY, W.(1978): "Results of model experiments to define resistance and sinkage of a large ship transiting a lock of the panama canal", David W. Taylor Naval Ship Research and Development Center, Ship Performance Department Report DTNSRDC/SPD-0881-01, December 1978
- FRANZIUS-INSTITUT (1969): "Modellversuche für die Seeschleuse Finkenwerder", Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Bericht (unveröffentlicht) Hannover, 26. Juni 1969
- KIEHNEL, H.(1936): „Über Widerstände und Fahrzeiten beim Einschleppen von Schiffen in Schleusen“, Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin, Heft 24, 1936, S. 4-81
- KIRIAKOV, S S. (1972): "Gegenwärtiger Stand der Theorie zur Berechnung des hydrodynamischen Einsinkens von Schiffen bei der Fahrt in Schleusen (in Russisch)“, Trudy Leningradskogo Instituta vodnogo Transporta, Band 132,
- KIRIAKOV, S.S.. ET AL. (1975): „Zulässige Geschwindigkeit von Schiffen in Schleusen (in Russisch)“, Recnoj Transport, 1975, No. 8, S.44-45
- KLEMENTIEV, A.N. (2002): „Die wesentlichen theoretischen Thesen und Materialien der Naturbeobachtungen des Regimes des Schiffeingangs in die Schleuse (am Beispiel der Gorodezki-Schleuse)“, Wolga Staatsakademie für Wassertransport, Nischni Novgorod
- KOOMAN, C (1973): „Navigation locks for push tows“, Rijkswaterstaat communications no. 16, The Hague
- KOOMAN, (1978): „The development and application of design rules for canals and locks suitable for push-tow units and traditional craft“, Proceedings of Symposium Aspects of navigability of constraint waterways, includ-

## Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Naturuntersuchungen und numerische Modellrechnungen zur Ein- und Ausfahrt moderner Schiffe  
in das Schiffshebwerk Lüneburg

ing harbour entrances, volume 3, paper 19, Delft, the Netherlands, April 24-27,

MAYNORD, S.T.(2000): "Effect of lock sill and chamber depth on transient time of shallow draft navigation", USACE , Engineer Research and Development Center, Technical Report ERDC/CHL TR-00-13, August 2000

MAYNORD, S.T.(1987): "Save navigation speeds and clearance at lower sill, temporary lock 52, Ohio River", Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Hydraulics Laboratory, Technical Report HL-87-3, April 1987

MILLWARD, A. (1980): "A Preliminary Design Method for the Prediction of Squat in Shallow Water", *Marine Technology*, 27(1):10-19, January 1990.

NORRBIN, N.H. (1996): "The Effects of Flow Confinement and Asymmetry on a Ship in a Fairway Passage", *Workshop on Ship Squat in Restricted Waters*, Panel H-10 (Ship Controllability), Hydrodynamics Committee, SNAME, July 1996, pages 87-93.

ROMANOV, E.M. UND YANENKO, A.P (1974): „Laboreinrichtung zur Ermittlung der hydraulischen Erscheinungen bei der Einfahrt von Schiffen mit großer Tragfähigkeit in die Kammer einer Schiffsschleuse (in Russisch)“, *Izvestija vyssich ucebnych zavedenij*, Unterreihe: stroitel'stvo i architektura, Novosibirsk, 1974, no. 9, S. 108-110

ROMANOV, E.M.; YANENKO, A.P (1975): „Über einige Resultate bei der experimentellen Ermittlung der Einfahrbedingungen von Schiffen mit großer Tragfähigkeit in die Kammer von Schiffsschleusen (in Russisch)“, *Izvestija vyssich ucebnych zavedenij*, Unterreihe: stroitel'stvo i architektura, Novosibirsk, 1975, no. 10, S. 101-104

VBD (1981): „Modellversuche über das Ein- und Ausfahrverhalten eines Schubverbandes in Main-Schleusen“, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg, Bericht Nr. 988 (unveröffentlicht), März 1981

VBD (1993): „Einfluß der Bugformen von Binnenfahrzeugen auf das Einfahrverhalten in Schleusen“, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg, Bericht Nr. 1338, Februar 1993

VBD (2003A): „Numerische, experimentelle und technisch-wirtschaftliche Untersuchungen zur Entwurfsoptimierung und Wettbewerbssteigerung von Binnenschiffen“ Teilprojekt: „Erhöhung der zulässigen Breite von Binnenschiffen beim Befahren kanalisierter Binnenwasserstraßen“, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg, Bericht 1642 (unveröffentlicht), Mai 2003

VBD (2003B): „Numerische Simulation der Schiffsbewegungen bei der Ein- und Ausfahrt in das Schiffshebwerk Lüneburg“, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg, Bericht 1703 (unveröffentlicht), September 2003

VBD (2004): „Modifizierung eines Computerprogramms zur Simulation der Schiffsdynamik bei Schleusenein- und -ausfahrt (Schiff\_Lock)“, Versuchsanstalt für Binnenschiffbau e.V., Duisburg, Bericht 1711 (unveröffentlicht), August 2004

VRIJER, A. (1986): „Calculations of wave height and ship speed when entering a lock“, 2nd Internat. Conf. on

Navigation Locks, Wroclaw, Poland, 1986, May 20-22, 18 pp.. Also: Delft Hydraulics Publication 391, 1986

VRIJBURCHT, A. (1991): „Vertical motions of ships sailing into or out of locks and the related water motions“, XXIV IAHR Congress, Madrid, Spain, September 9-13, 1991, 8 pp., zugleich: Delft Hydraulics, publication no. 461, November 1991

YANENKO, A.P. UND V.V. TARASEVICH (1994): „Zur Frage der Ermittlung der optimalen Querschnittsabmessungen für die Kammer einer Schiffsschleuse (in Russisch)“, *Izvestija vyssich ucebnych zavedenij*, Unterreihe: stroitel'stvo i architektura, Novosibirsk, 1994, no. 7/8, S. 124-129

YANENKO, A.P. (1994): „Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Ermittlung der Abmessungen von Schiffahrtsschleusen (in Russisch)“, Novosibirsker Staatliche Akademie für Wassertransport, Autorenreferat zur Dissertation B, Novosibirsk, 1994

### Verfasser

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Söhngen  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen  
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)  
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe  
Tel.: 0721 9726 – 4600  
E-Mail: [bernhard.soehngen@baw.de](mailto:bernhard.soehngen@baw.de)

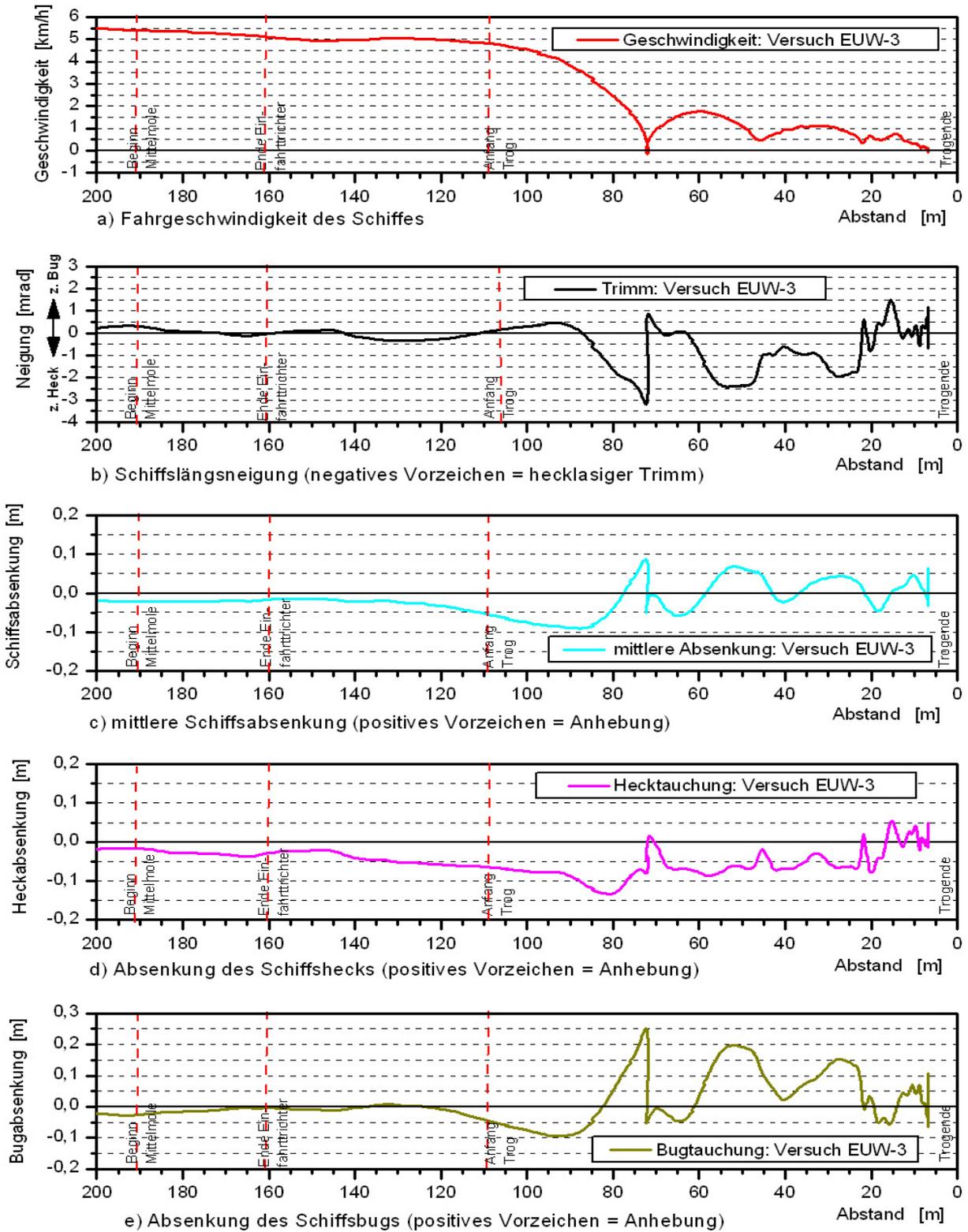
Dipl.-Ing. Detlef Spitzer  
Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen  
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)  
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe  
Tel.: 0721 9726 – 2760  
E-Mail: [detlef.spitzer@baw.de](mailto:detlef.spitzer@baw.de)

Dipl.-Ing. Norbert Stuntz  
DST - Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und  
Transportsysteme e.V.  
Oststrasse 77, 47057 Duisburg  
Tel.: 0203 99369 – 0  
E-Mail: [stuntz@dst-org.de](mailto:stuntz@dst-org.de)

## Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Naturuntersuchungen und numerische Modellrechnungen zur Ein- und Ausfahrt moderner Schiffe  
in das Schiffshebewerk Lüneburg

### Anlage



**Bild 3:** Einfahrversuch Nr. 3 des MS "Loetschental" im Unterwasser (EUW-3)

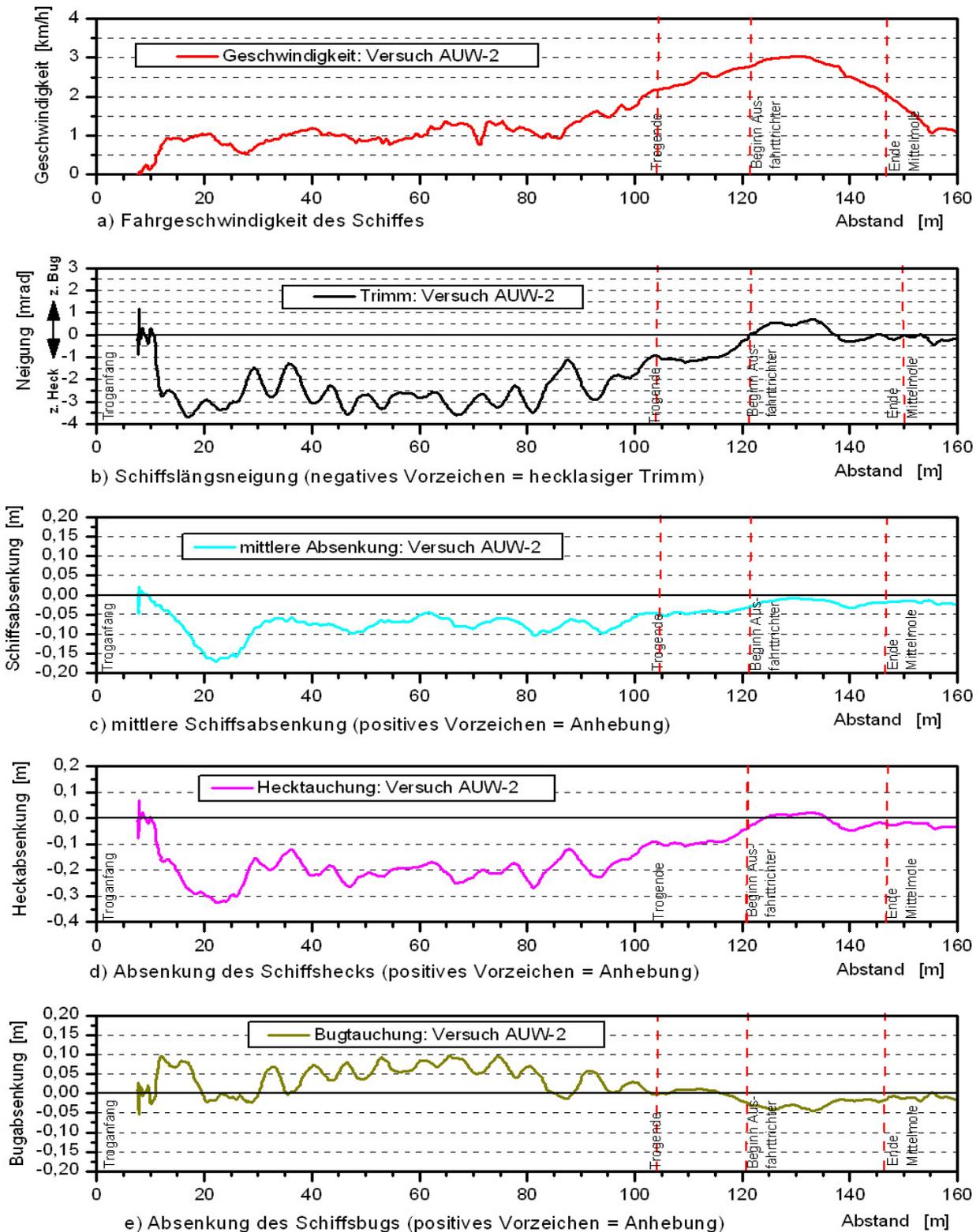
a) Einfahrtgeschwindigkeit, b) Schiffstrimm, c) hydrodynamisches Einsinken,  
d) Hecktauchung, e) Bugtauchung

in Abhängigkeit vom Abstand des Schiffsbugs von der südlichen Trogenkante

## Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Naturuntersuchungen und numerische Modellrechnungen zur Ein- und Ausfahrt moderner Schiffe  
in das Schiffshebewerk Lüneburg

### Anlage



**Bild 4:** Ausfahrversuch Nr. 2 des MS "Loetschental" im Unterwasser (AUW-2)

a) Einfahrtgeschwindigkeit , b) Schiffstrimm , c) hydrodynamisches Einsinken,  
d) Hecktauchung , e) Bugtauchung

in Abhängigkeit vom Abstand des Schiffshecks von der südlichen Troginnenkante

# Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

Naturuntersuchungen und numerische Modellrechnungen zur Ein- und Ausfahrt moderner Schiffe in das Schiffshebewerk Lüneburg

## Anlage

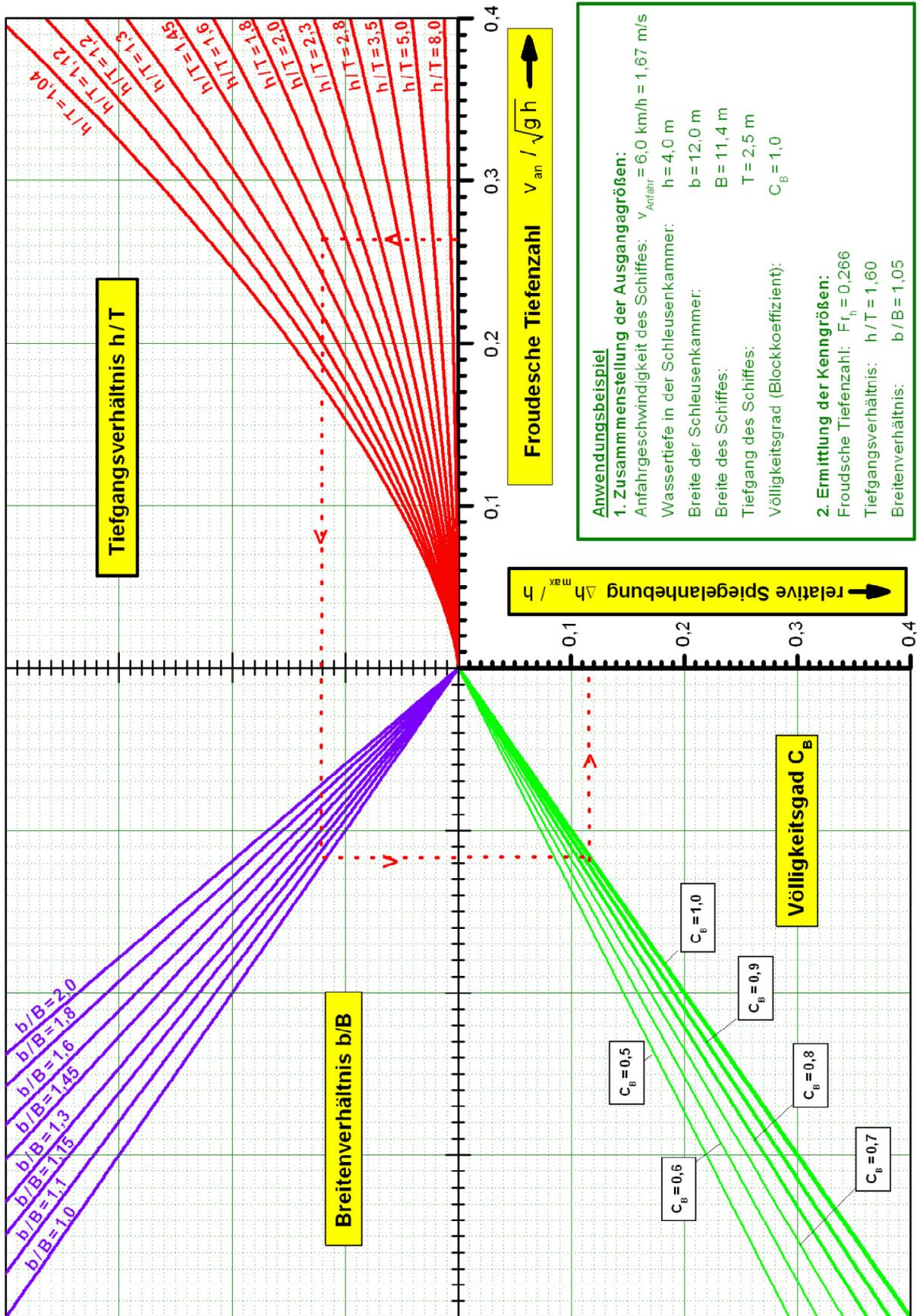
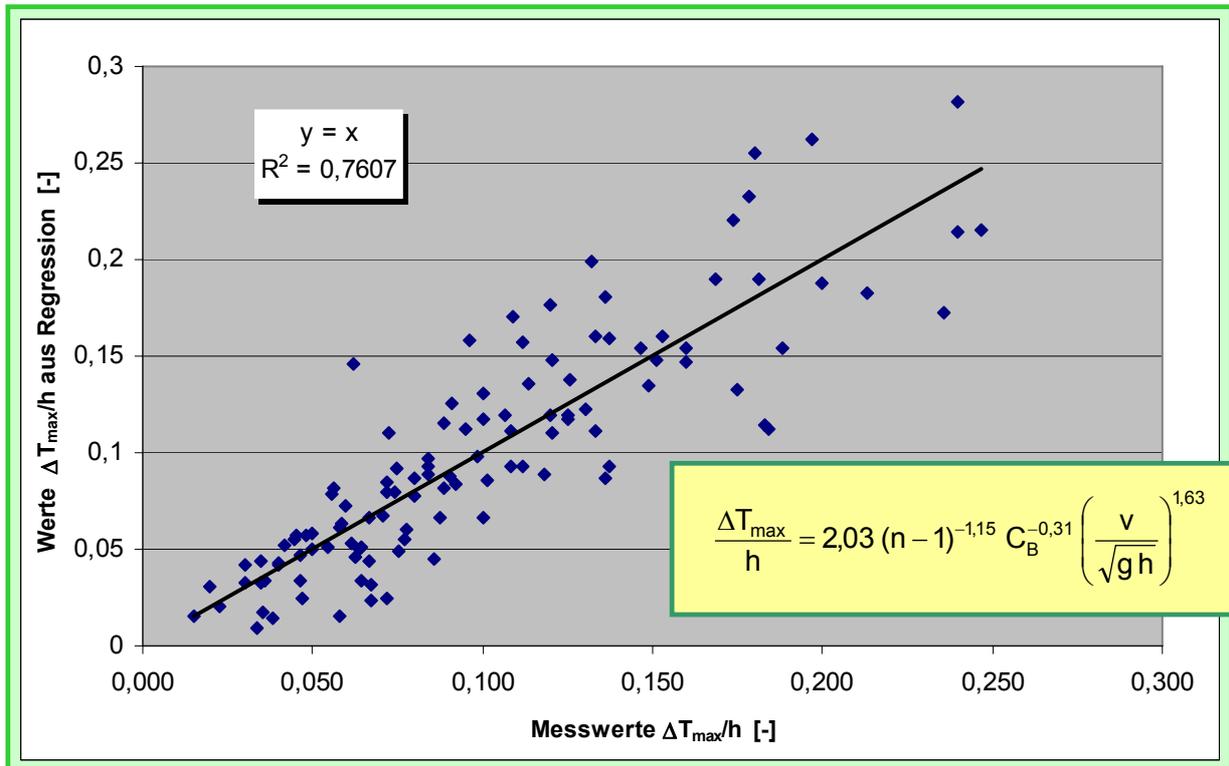


Bild 5: Maximale Wasserspiegelanhebung am geschlossenen Trog- bzw. Schleusentor bei der Einfahrt eines Schiffes

## Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (1)

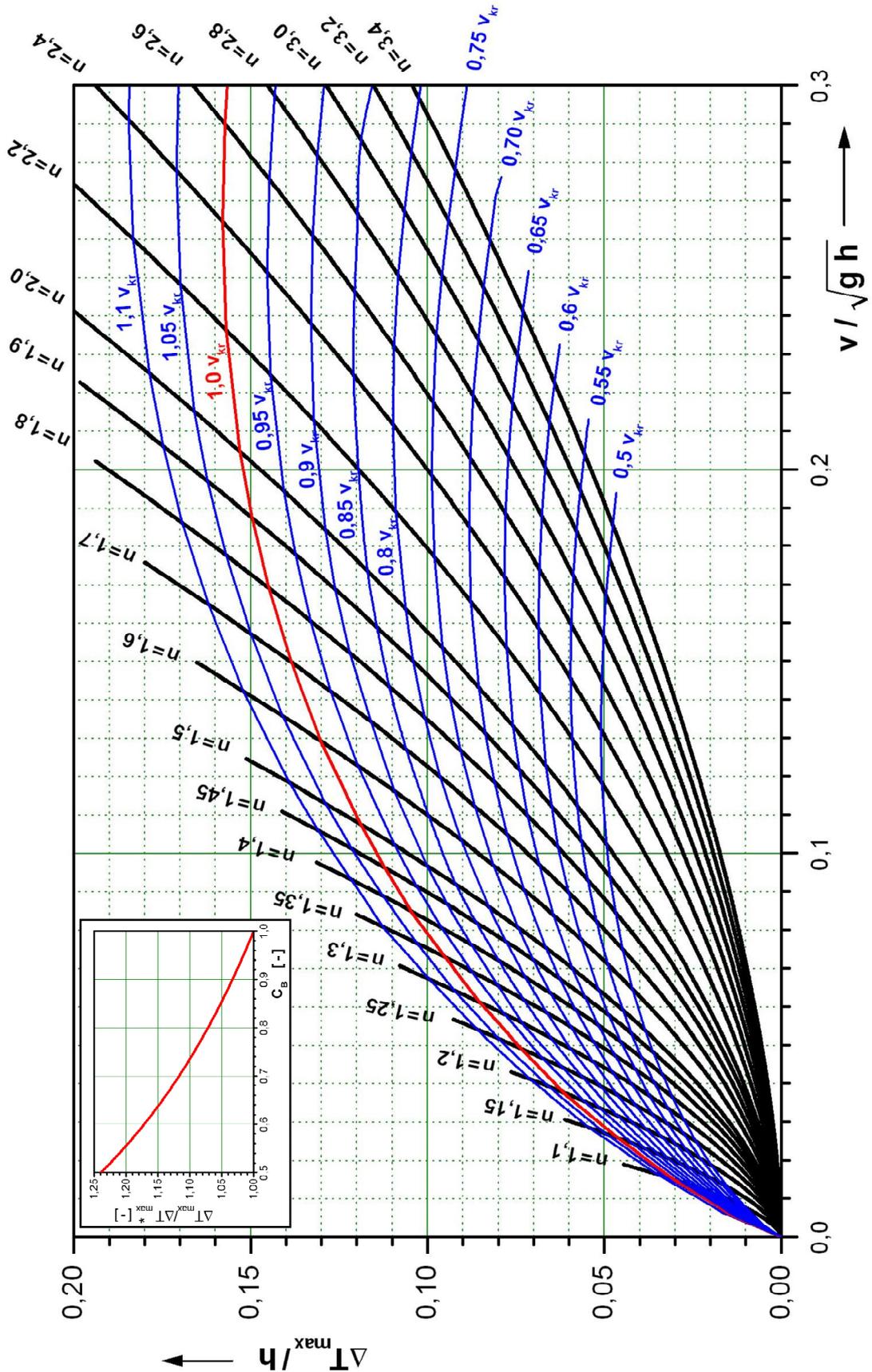
Naturuntersuchungen und numerische Modellrechnungen zur Ein- und Ausfahrt moderner Schiffe  
in das Schiffshebewerk Lüneburg

### Anlage



**Bild 6:** Ergebnis der multiplen Regression für den maximalen Squat bei der Schleusenausfahrt

Anlage



**Bild 7:** Grafik für den maximalen Squat bei der Ausfahrt eines Schiffes