

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Söhngen, Bernhard

Fachwissenschaftliche Grundlagen der Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102303>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Söhngen, Bernhard (2015): Fachwissenschaftliche Grundlagen der Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße mit Auswirkungen auf Nautik und schiffsinduzierte Belastungen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 9-26.

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.



Fachwissenschaftliche Grundlagen der Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Söhngen, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Einleitung

Da das Themenfeld Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße (präziser Binnenschiff/Binnenwasserstraße), das grob gegliedert die Aspekte „Fahrtechnik“ (nautische Sicht) und „Einwirkungen des Schiffes auf Sohle und Ufer“ (Wasserstraßen-bezogene Sicht) umfasst und in *Bild 1* in ihrem Wirkungsgeflecht verschiedener Aspekte verdeutlicht ist, sowohl äußerst komplex als auch interdisziplinär ist, u.a. weil Belange des Schiffbaus und Verkehrswasserbaus zu beachten sind, erscheint es angesichts meines Ausscheidens aus dem aktiven Dienst angemessen zu sein, das Themenfeld an Beispielen aus meiner 27jährigen Tätigkeit mit Schwerpunkt auf aktuellen Projekten zu erläutern. Mit Verweis auf die Folien meines Vortrages, in denen die Projekte im Detail und viele weitere Beispiele angesprochen und visualisiert werden, sollen im Folgenden wenige mir wichtige Projekte herausgegriffen und mit Hinweisen auf den Stand des Wissens und der Modelltechnik sowie ggf. erforderliche künftige Wissenserweiterungen angesprochen werden.

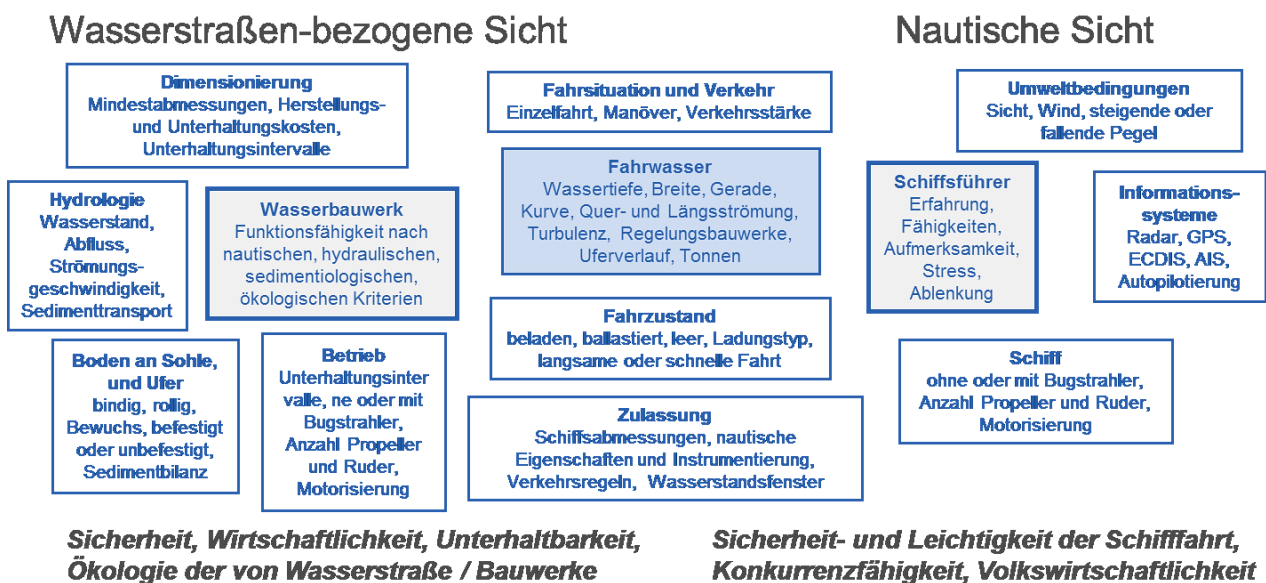


Bild 1: Wirkungsgeflecht verschiedener Aspekte der Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße aus Wasserstraßen-bezogener und nautischer Sicht am Beispiel der Fahrwasserbedingungen in Kanälen und Flüssen Binnenwasserstraßen

Fahrdynamische Naturversuche am DEK (1987) und Folgeprojekte für den Donauausbau

Die Untersuchungen am DEK im 42 m breiten Rechteckprofil dienten dem Ziel, die Befahrbarkeit der im Grunde für das Europaschiff dimensionierten Querschnitte des westdeutschen Kanalsystems und des Main-Donau-Kanals für die am Markt inzwischen etablierten, viel größeren Großmotorgüterschiffe und zugehörige Schubverbände (CEMT-Klassen Va und Vb) im Begegnungsverkehr zu überprüfen (Krause et al. 1991). Sie führten, zusammen mit darauf folgenden Modellversuchen am DST in Duisburg (damals noch VBD genannt) u.a. zur Zulassung dieser Fahrzeuge und zur entsprechenden Überarbeitung der Richtlinien für Regelquerschnitte von Schifffahrtskanälen (Söhngen et al. 1992, 1994). Weitere Modelluntersuchungen zu den Kräften auf das Unterwasserschiff beim Driften und dem Windeinfluss am DST sowie zugehörige theoretische Betrachtungen der BAW zu den daraus folgenden Zusatzbreiten, führten in der Folge u.a. zur Dimensionierung des Trogquerschnittes für die MLK-Elbequerung bei Magdeburg und die Abmessungen von Doppeltrogkanalbrücken für den DEK (Söhngen et al 1991, Söhngen 1995).

Aus persönlicher Sicht ergab sich daraus eine fruchtbare Zusammenarbeit mit dem DST, insbesondere mit Herrn Zöllner, die zu einer Vielzahl von Einsichten im Grenzbereich Binnenverkehrswasserbau und Schiffbau führten und vor allem die Dimensionierung von Wasserstraßenquerschnitten nach erforderlicher Tiefe und Breite sowie die Entwicklung entsprechender Berechnungsverfahren befruchtete. So wurde schon im damals entwickelten Berechnungsverfahren VSIMPU (Schiffsgeschwindigkeit „ v_s “ nach dem Impulssatz) und im darauf aufbauenden, die Vertrimmung berücksichtigenden Verfahren BSQUAT (Squat via Bernoulli), der Einfluss der Sohlreibung auf den rückströmungsbedingten zusätzlichen Schiffswiderstand erfasst (Söhngen et al. 1999, Söhngen 1999, Söhngen et al. 2000), der ganz erheblich sein kann und trotzdem in vielen auch modernen Schiffsführungssimulatoren nicht berücksichtigt ist, genauso wenig wie das Erreichen der kritischen Schiffsgeschwindigkeit mit dem zugehörigen starken Widerstandsanstieg.

Beispielsweise zeigten die entsprechenden Modelluntersuchungen am DST zu einer von Prof. Ogris (Wien) vorgeschlagenen verschärften Flussregelung mit Deckwerksohle (DST-Bericht 1506, 1999) im Rahmen der „Vertieften Untersuchungen zum Donauausbau Straubing-Vilshofen“ bzw. im darauf aufbauende Raumordnungsverfahren (kurz „ROV“), dass der Schiffswiderstand, der vom durch die Rückströmung stark vergrößerten Gefällewiderstand dominiert wird, sich für Donautypische Randbedingungen bei Wasserständen zwischen MW und HNN gegenüber einer „glatten“ Sohle nahezu verdoppelt, siehe *Bild 2*. Große Sohlrauheiten können aber auch natürlich vorkommen, z.B. in Strecken mit Felssohle (Söhngen, 1995). Zusammen mit späteren Untersuchungen zur Sohlenunebenheit bei Deckwerksohle aus Schraubenstrahl an Wartepätzen (Naturversuche in der Donau bei Aicha) und dem erforderlichen Mindestflottwasser zur Vermeidung des Ansaugens von Steinen in Schiffspropeller von ca. 0,6 – 0,8 m, konnte dadurch gezeigt werden, dass die „Ogris-Variante“ nicht zielführend ist (Söhngen et al. 2000a, Söhngen 2001 & 2002, Söhngen et al. 2004).

Der Rauheitseinfluss wird u.a. von Pompee (2015) in einem erweiterten Ansatz zum Schiffswiderstand, der Elemente aus wasserbaulicher und schiffbaulicher Sicht enthält und den gesamten Bereich vom extrem allseits eingeschränkten Fahrwasser bis zum Tiefwasser sowie vom Sportboot bis zum Schubverband abdeckt, genutzt. Ich empfehle, diese Erkenntnisse in die Simulationsverfahren von DST und BAW einzubringen. In den von der BAW z.T. mit externer Hilfe selbst entwickelten Schiffssimulationsverfahren PeTra2D und neu FARAO (Kolarov 2006, Maaß 2011, Linke et al. 2015, Linke 2015) sind die aus VSIMPU und BSQUAT entwickelten Formeln zur Schiffswiderstand bereits enthalten. Der Ansatz vom Pompee wird sicherlich noch eine Verbesserung bringen.

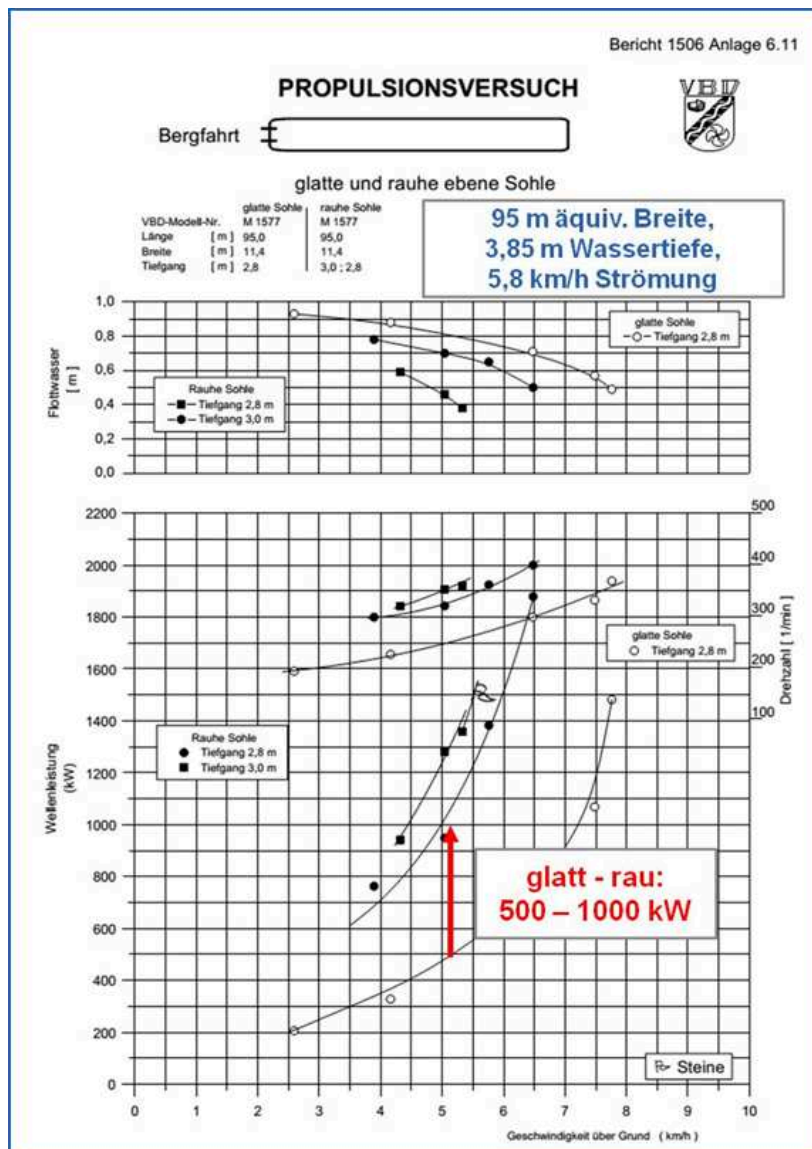


Bild 2: Propulsionsversuche (Flotwasser und Wellenleistung als Funktion der Schiffsgeschwindigkeit über Grund) am DST zur Bergfahrt von GMS in einem Querschnitt, wie er an der Donau in einem Ausbauzustand gemäß der ROV-Variante B (verschärfte Flussregelung, Sohle mit Deckwerken gesichert) bei einem Abflusszustand zwischen MW und HNN aufträte („rau“), im Vergleich zu einer Kiessohle („glatt“)

Es sei abschließend darauf hingewiesen, dass die o.g. Schraubstrahleinwirkung auf eine befestigte Gewässersohle Ziel zahlreicher Untersuchungen der BAW war und immer noch ist (Söhngen 1994, PIANC 2008, Aberle et al. 2008, Spitzer et al. 2012, VBW 2013), denn die Kolkbildung bei stark instationären Vorgängen, wie beim Anfahren von Schiffen, in extrem grobkörnigem Sohlmaterial, hat sich als äußerst schwieriges Themenfeld herausgestellt, bei dem alle gängigen, aus dem Sedimenttransport abgeleiteten Ansätze oder solche aus der Kolkbildung an Brückenpfeilern, nicht befriedigten. Bedauerlicherweise hat gerade dieses Themenfeld, u.a. bei der Bemessung von Sohlsicherungen in Kanälen, eine große Bedeutung für die WSV. Aktuell werden dazu im Auftrag der BAW Modellversuche am LWI in Braunschweig vervollständigt und im Sinne einer Bemessungsformel ausgewertet. Für die laufenden Planungen zum Ausbau der Donau zwischen Straubing und Vilshofen mit flussregelnden Maßnahmen, z.B. für eine Sohlsicherung des Fahrwassers an der Isarmündung, wird man vorerst auf die Ergebnisse der oben erwähnten Naturuntersuchungen an der Donau zurückgreifen, wonach ein großes Flottwasser von etwa 0,8 m angezeigt ist.

Einfluss der Schifffahrt auf die Sohlenerosion des Rheins (1999) mit Schlussfolgerungen

Inspiziert durch die AG „Rheinsohlenerosion“, in der Dr. Witte und ich die BAW vertraten, die 1997 ihre umfangreichen Ausarbeitungen abschloss und mit denen die Grundlagen für die bis heute aktuelle Geschiebemanagement des Rheins gelegt wurden, und wegen der beginnenden starken Veränderung der Rheinflotte mit einem größeren Flottenanteil von 135 m langen Schiffen, wurden im Jahre 1999 im Auftrag der WSD-West Untersuchungen zum Einfluss der Schifffahrt auf die Sohlenerosion des Rheins durchgeführt. Sie basierten auf den Erkenntnissen der v.g. Modellversuche am DST mit rauer Sohle (DST-Berichte 2019, 1506), dem Berechnungsverfahren VSIMPU der BAW sowie Einschätzungen zum Beitrag der Belastungskomponenten Rückströmung, Propellerstrahl und Nachlauf in Berg- und Talfahrt sowie der Belastungskennwerte Intensität, Einwirkdauer und Einwirkbreite auf den Geschiebetransport (Söhngen et al. 2000b). Im Ergebnis kam man zur Einschätzung, dass insbesondere wegen der großen Einwirkdauer und –Breite der Einfluss der Rückströmung in der Bergfahrt den größten Beitrag am schiffsinduzierten Geschiebetransport leistet.

Hierfür wurden für die gesamte damalige und künftig erwartete Flotte Modellrechnungen mit VSIMPU zur Rückströmung und mit bekannten Schubspannungs-basierten Ansätzen aus der Literatur vergleichende Transportberechnungen für den Geschiebetransport mit und ohne Schifffahrt durchgeführt, wovon ein Ergebnis im *Bild 3* dargestellt ist. Danach ist der Anteil aus der Schifffahrt insgesamt gesehen um eine Zehnerpotenz kleiner als der aus der ungestörten Strömung. Zusammen mit darauf folgenden Naturuntersuchungen am WDK im Jahre 2001, in dessen Rahmen der Geschiebetransport durch Geschiebefallen an der Kanalsohle gemessen wurde und sich die Berechnungsverfahren im Grundsatz bestätigten, konnte „Entwarnung“ hinsichtlich des rückströmungsbedingten Geschiebetransportes gegeben werden.

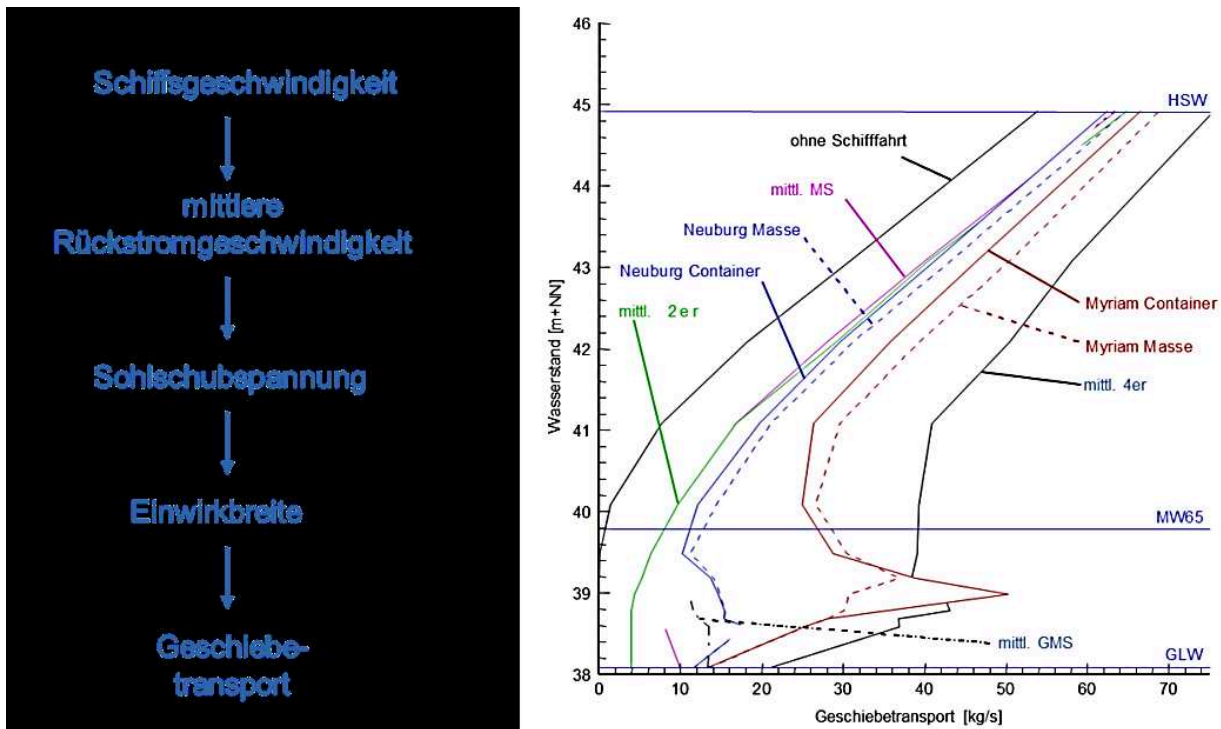


Bild 3: Wirkkette (links im Bild) zur Ermittlung des rückströmungsbedingten Geschiebetransportes mit zugehörigen Berechnungsergebnissen für einen repräsentativen Querschnitt des Niederrhein als Funktion des Wasserstandes

Was ich aus den damaligen Untersuchungen als Kernbotschaft weitergeben möchte ist, dass wir konsequent eine vergleichende Betrachtung vorgenommen haben, d.h. der von der Schifffahrt ungestörte und der schiffsinduzierte Geschiebetransport wurden mit denselben Methoden berechnet und nur in Relation zueinander für die Fachaussage verwendet. Dieses Prinzip der vergleichenden Variantenanalyse mit objektiverer, d.h. quantitativ nachvollziehbarer Bewertung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt, wird nun auch im Vorschlag der PIANC INCOM WG 141 zu „Design Guidelines for Inland Waterways“ für die Anwendung von Schiffsführungssimulatoren umgesetzt (Deplaix et al. 2013, Söhngen et al. 2013a, Söhngen et al. 2014a, Iribarren 2015, Rettemeier et al. 2015, Söhngen 2015, Söhngen et al. 2015, Rettemeier 2015). Es soll nach Vorstellungen der Arbeitsgruppe Basis für die Untersuchung von Wasserstraßen-Infrastrukturprojekten werden.

Ich möchte noch darauf hinweisen, dass der Einfluss des Nachlaufes hinter dem Schiff, also des vom Schiff mitgeschleppten Wassers, der in der Talfahrt bedeutsam ist, bisher nicht untersucht wurde. Wegen der großen Beanspruchungsstärke könnte er den Einfluss der Rückströmung erreichen oder sogar überschreiten. Beispielsweise zeigen Messungen am DST für Donau-Verhältnisse an tief abgeladenen zweispurig-eingliedrigem Koppelverbänden (Bericht 1506), dass sohlennahe Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 5 m/s (Fließgeschwindigkeit in einem Gebirgsbach bei Hochwasser) auftreten können! Deshalb ist dieser Einfluss, zusammen mit dem schiffsinduzierten Schwebstofftransport und der zugehörigen Trübung ein Themenfeld für die Zukunft, denn Fragen der Sohlstabilität sind an Wasserstraßen stets aktuell und werden, insbesondere vor dem Hinter-

grund der durch den Klimawandel verstärkten Abflussextrême, zusammen mit umweltrelevanten Themen, an Bedeutung gewinnen. Beispielsweise musste eine ggf. vergrößerte schiffsinduzierte Trübung beim Neckarausbau für 135 m lange Schiffe betrachtet werden, wobei wir auf vereinfachte Berechnungen in der PIANC-Schrift „Considerations to reduce environmental impacts of vessels“ aus dem Jahre 2008 zurückgriffen (Söhngen et al. 2006, Söhngen et al. 2007, Wolter et al. 2008, PIANC 2008), in der ich Gelegenheit hatte, viele umweltbezogene Fragestellungen aus verkehrswasserbaulicher Sicht aufzugreifen und überwiegend qualitativ zu bewerten. Ein entsprechendes Diagramm zum Einfluss des Rückströmungsfeldes aus dieser Publikation zeigt *Bild 4* (PIANC 2008). Eine durch Messdaten belegte und damit belastbarere quantitative Bewertung z.B. zur Trübung oder zur Frage der Schädigung von Fischen durch Schiffspropeller, steht aber bis heute aus.

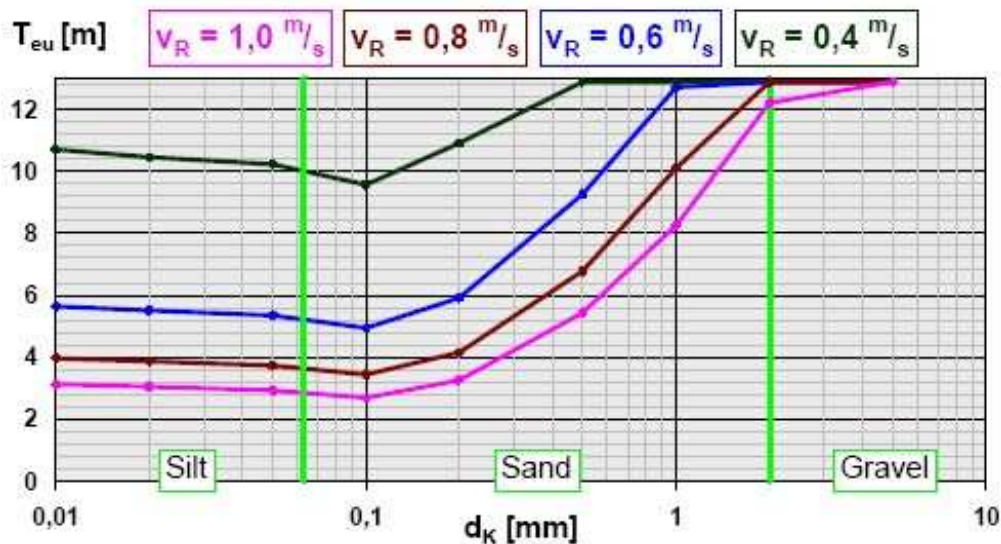


Bild 4: Mit ausgewählten Literaturansätzen zur schiffsinduzierten sohnahen Schubspannung und zugehörigem Erosionspotential im PIANC Report No. 99 errechnete euphotische Tiefe (Lichttiefe), die sich aufgrund der Trübung durch aufgewirbelte Sohlsedimente aus der mittleren Rückströmungsgeschwindigkeit von Schiffen errechnet, dargestellt als Funktion des Korndurchmessers der Sedimente bei Annahme unendlich langer Einwirkdauer

Entwicklung von GBBSOft und GBBSOft+

Als ich nach Leitung der Projektgruppe Donau im Anschluss an die Untersuchungen zum Raumordnungsverfahren im Jahre 2001 von meinem Amtsvorgänger Jurisch das Referat Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4) übernahm und die damals in einer BAW-internen Arbeitsgruppe zusammengestellten Berechnungsverfahren zu schiffsinduzierten Wellen sah, wobei überwiegend auf bekannte Ansätze aus der Literatur zurückgegriffen wurde, trafen zwei Erkenntnisebenen aufeinander, die auf den ersten Blick nicht kompatibel waren: Zum einen meine Erfahrungen von den DEK-Versuchen (Söhngen et al. 1992), den darauf aufbauenden Modellversuchen am DST, Naturversuchen am MDK, von denen das Wellenbild einer Fahrt unten dargestellt ist und die Erkenntnisse aus den Untersuchungen für den Donauausbau, zum anderen die überwiegend aus Modellversuchen abgeleiteten Ergebnisse von Führer und Römisch aus der ehemaligen FAS in Berlin. Letztere ergaben deutlich geringere Wellenhöhen und damit schiffsinduzierte Belastungen für dieselbe relative, d.h. auf die kritische Schiffsgeschwindigkeit bezogene Fahrgeschwindigkeit. Dies lag u.a. an einer unterschiedlichen Definition der kritischen Schiffsgeschwindigkeit: Bei mir der Wert, der in der Kanalfahrt rückströmungs- und wassertiefenbedingt grundsätzlich nicht überschritten werden kann (hydraulische Definition) und bei Führer und Römisch der Beginn eines nautisch kritischen Fahrzustandes mit starker Wellenbildung (nautische Definition).



Bild 5: Fahrt des Haniel Kurier 61 mit kritischer Schiffsgeschwindigkeit im Main-Donau-Kanal im Rahmen der von BAW und DST fachlich begleiteten Versuche vor Eröffnung des Kanals zur fahrdynamischen Gleichwertigkeit von Rechteck- und Trapezprofil

Die dazu im Spätherbst 2002 durchgeführten fahrdynamischen Naturversuche auf dem Wesel-Datteln-Kanal bestätigten die großen Wellenhöhen der „hydraulischen Sicht“ mit Werten von bis zu 1,5 m bei einem Schlepper, der in einem solchen Abstand vom Ufer fuhr, dass sich Bug- und Heckwellensystem überlagerten (Söhngen et al. 2005 & 2010). Diese Ergebnisse führten zu einer Überarbeitung der bisherigen Ansätze und zur Publikation der neuinterpretierten Formeln im GBB („Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen“) im Jahre 2004. Daraus wurde, da insbesondere die geotechnische Bemessung von Deckwerken wegen der variierenden Bodeneigenschaften eine Standardisierung von Berechnungsergebnissen erschwerten, die zusammen mit der Fa. SWIFT im Auftrag der BAW entwickelte Software GBBSOFT, mit der Deckwerkbemessungen nunmehr mit wenigen „Mouseclicks“ durchgeführt werden können.

Diese Software hat u.a. die Parameteruntersuchungen zu Standardbauweisen im „Merkblatt zur Anwendung von Regelbauweisen“ erleichtert und ist inzwischen für viele Projekte in und außerhalb der BAW eingesetzt worden. Die neueste Erweiterung betrifft einen sogenannten Variantengenerator, mit dem man verschiedene Wasserstände, Schiffspositionen, Schiffstypen, Abladetiefen etc. durchspielen und die Ergebnisse filtern kann (Kauppert, 2015). Dies vor allem für die Bemessung technisch-biologischer Ufersicherungen nach dem neuen Merkblatt M-519, das nach Angaben des DWA im Frühjahr 2016 endgültig erscheinen soll, nachdem nunmehr alle Hürden in den Fachausschüssen, dem Hauptausschuss genommen wurden und ich im vergangenen Jahr auch die Abstimmung mit der WSV erreichen konnte (Fleischer, 2015). Diese Erweiterungen sind im Softwarenamen mit einem „+“ gekennzeichnet (GBBSOFT+) und werden den Schulungsbedarf, insbesondere für Ingenieurbüros, die mit der Planung von Ufersicherungen betraut sind, stark vergrößern.

Derzeit weist GBBSOFT noch Lücken insbesondere hinsichtlich propulsionsbedingter Belastungen auf wie zur erwähnten Kolkbildung aus Schraubenstrahl. Die im vergangenen Jahr am DST diesbezüglich durchgeführten Modellversuche zur Uferbelastung aus Bugstrahlruder und Haupttrudern mit maßstäblich verkleinerten Deckwerksteinen dienten dem primären Ziel, die Entscheidungsfindung hinsichtlich der Zulassung von großen Schiffen in Wasserstraßen mit geringem Verkehrsaufkommen (Zuarbeit für eine vom BMVI eingerichtete Arbeitsgruppe) zu erleichtern. Entsprechende Auswertungen insbesondere für Begegnungen in extrem engen Kanalquerschnitten werden derzeit im Referat W4 vorgenommen. Die Modelluntersuchungen werden aber ergänzend im Rahmen eines BAW-F&E-Vorhabens fachwissenschaftlich analysiert und sollen die Berechnungsverfahren im GBB weiter ertüchtigen.

Die wenige Jahre zuvor durchgeführten Modelluntersuchungen am DST zur Erosionswirkung brechender Wellen, die u.a. zu verbesserten Berechnungsverfahren zur Strömung in brechenden Heckwellen, der Wiederauffüllungsströmung und zu Sportboot-bedingten Wellen führten (Söhngen et al. 2010) und die inzwischen in GBBSOft integriert sind, wurden aber bisher noch nicht zur Gänze hinsichtlich des Erosionspotenzials ausgewertet, d.h. der Beziehung zwischen Uferbelastung und der Anzahl erodierter Steine. Dies wäre aber für eine nicht mehr allein auf Grenzwerten der Belastung basierenden Bemessung wie bisher in GBBSOft vorgesehen erforderlich, sondern für eine die Schadensakkumulation berücksichtigende Dimensionierung.

Letztere ist insbesondere für Wasserstraßen mit geringem Verkehrsaufkommen wie die der Netzkategorie C angezeigt, denn Grenzbelastungen treten in diesen Wasserstraßen seltener auf als in viel befahrene Wasserstraßen und würden deshalb zu einer Überschätzung des Schadenspotenzials führen. Erste Ansätze zur Erosionsmenge zur Schadensakkumulation liegen vor, siehe *Bild 6*. Sie haben noch den ggf. unvermeidbaren Makel, dass die extrem streuenden Daten nur grob angenähert erfasst werden konnten. Dies mag daran liegen, dass es sich um einen stochastischen Prozess handelt, sodass schon die Erosionsformel entsprechend formuliert werden sollte. In erster Näherung kann aber schon mit der unten angegebenen Formel gearbeitet werden, wenn eine vergleichende Betrachtung vorgenommen wird. Es wird empfohlen, diese Untersuchungen fortzuführen. Das weitere für eine probabilistische Bemessung erforderliche „Rüstzeug“, d.h. insbesondere Statistiken über Schiffsgeschwindigkeiten und Uferabstände, liegt aber u.a. aus den vielen Naturmesskampagnen für Kanäle vor und die große Zahl von Berechnungsvarianten kann im Grundsatz mit dem neuen Variantengenerator in GBBSOft+ mit begrenztem Aufwand erzeugt werden.

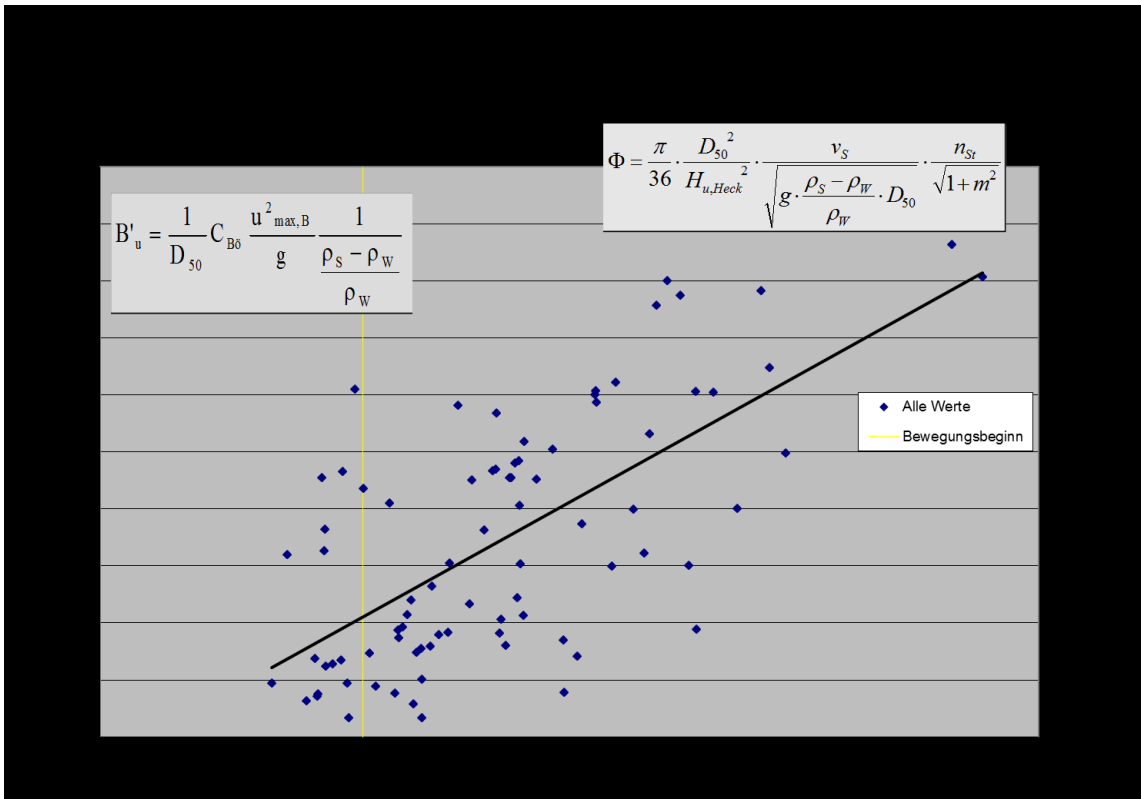


Bild 6: Ansatz zur Erosionsmenge aus der Wiederauffüllungsströmung hinter brechenden Heckwellen

Vergleichende Variantenanalyse bei der Anwendung von Schiffssimulationsverfahren

Bei vielen Fragestellungen zum Ausbau von Wasserstraßen, bei denen sich der Bemessungszustand z.B. hinsichtlich des Strömungsfeldes weit vom Ist-Zustand unterscheidet, kommt man nicht umhin, fahrdynamische Simulationsverfahren einzusetzen, wobei die bisher an das Referat W4 herangetragenen Fragestellungen zumeist den Verkehrsflächenbedarf und die daraus resultierenden Anforderungen an die erforderliche Breite des Fahrwassers betrafen. Diese Anforderungen sind grundsätzlich anders geartet als beim üblichen Einsatz z.B. von Schiffsführungssimulatoren, die vornehmlich der Ausbildung von Schiffsführern dienen. In letzterem Fall reicht es aus, dass das Verhalten der Schiffe im Simulationsverfahren qualitativ ähnlich ist. Für Dimensionierungszwecke, z.B. zur Ermittlung der Vorhafenbreite einer Flussschleuse, bei der jeder Meter mehr Breite viel Geld kostet und den Nachweis der Hochwasserneutralität wegen der Einschnürung des Flusses erschwert, um nur zwei Aspekte zu nennen, müssen Simulatoren auch quantitativ möglichst nahe an der Realität liegen.

Da dies auch heute noch nicht immer befriedigend gelingt, insbesondere in Grenzbereichen der Befahrbarkeit, die aber häufig Gegenstand von Untersuchungen gerade in der BAW sind, weil man seitens der Planer zurecht Konstruktionskosten und Eingriffe begrenzen will und was u.a. daran liegt, dass das vom Schiff selbst erzeugte Strömungsfeld nur grob angenähert und im Grunde nur für Sonderfälle wie einen schiffsparallelen Böschungsverlauf modelliert werden kann, muss man mit modellbedingten Ungenauigkeiten „leben“. Wie bei allen Simulationen kann man solche Ungenauigkeiten durch eine konsequente vergleichende Variantenanalyse begrenzen, indem also mit exakt denselben Modellansätzen zwei Varianten simuliert und quantitativ miteinander verglichen werden, wobei nur die Differenzen der Ergebnisse dieser Varianten, z.B. der notwendigen Verkehrsflächen oder eines Indexes für den erreichten Sicherheits- und Leichtigkeitsstandard, miteinander verglichen werden, denn bei der Differenzenbildung heben sich modellbedingte Fehler z.T. auf (Söhngen et al. 2013a & 2013b, Söhngen et al. 2014a, Söhngen et al. 2015, Söhngen 2015).

Diese für verkehrswasserbauliche Fragestellungen übliche Vorgehensweise, z.B. zum Wasserpiegelanstieg beim Bau von Buhnen gegenüber dem Ist-Zustand, ist bei der professionellen Anwendung von Schiffsführungssimulatoren kein gängiger Standard. Vielmehr werden die Ergebnisse häufig direkt, also ohne Vergleich mit einem Referenzzustand verwendet und z.T. auch nur qualitativ, indem z.B. in einem „Expert-Rating“ Informationen der Schiffsführer am Simulator zur Einschätzung der erreichten Standards verwendet werden. Ein quantitativer Vergleich oder eine statistische Auswertung der Ergebnisse verschiedener Fahrten mit denselben Randbedingungen fehlen oft. Dies ist vor allem wichtig, wenn reale Schiffsführer den Simulator bedienen und die Ergebnisse somit vom Humanfaktor überprägt sind.

Um die vergleichende Variantenbewertung zu unterstützen und insbesondere den wichtigen gesetzlich vorgegebenen Begriff der „Sicherheit und Leichtigkeit“ der Schifffahrt quantifizierbar zu machen, wurde in der oben erwähnten PIANC INCOM WG 141 ein Schema zur Anwendung und Auswertung von Simulatorfahrten entwickelt. Dieses ist nachfolgend grob vereinfacht skizziert und in *Bild 7* visualisiert.

Es fordert zunächst, dass der Betreiber z.B. eines Schiffsführungssimulators den Nachweis erbringt, dass der Simulator in der Lage ist, das den relevanten Designfall zu modellieren. Hierzu gehört, wie auf *Bild 7* zu sehen, die Simulation eines „Verifikations-Referenzfalls“ und der zugehörige Vergleich mit Messwerten oder zu Simulationen aus einem früheren Projekt, das verifiziert wurde. Dieser Referenzfall sollte möglichst die Randbedingungen des Designfalls umfassen.

In einem nächsten Schritt ist der erforderliche Leichtigkeits- und Sicherheitsstandard zu wählen und zu bewerten. Hierfür wird ein Fragenkatalog vorgeschlagen, der zu einem Bewertungsindex oder Englisch „score“ führt, der wieder mit einem Leichtigkeitsstandard zwischen „Leicht und sicher“ (Standard A) bis „stark eingeschränkt leicht, aber gerade noch sicher“ (Standard C) verknüpft wird (Söhngen et al. 2015, Söhngen 2015).

Nun wird das gleiche Bewertungsschema auf einen bekannten Fahrzustand, den „Leichtigkeits-Referenzfall“, angewendet, der z.B. der IST-Zustand sein kann, und der möglichst denselben Leichtigkeits-score wie der angestrebte Wert des Designfalls aufweisen soll.

Beide Zustände, der „Leichtigkeits-Referenzfall“ und der „Designfall“ werden nun simuliert und mit einem detaillierten Verfahren quantitativ miteinander verglichen, wobei verschiedene, möglichst dimensionslose und damit besser vergleichbare Kenngrößen aus den Simulationen verwendet und in einem gewichteten Mittel miteinander verknüpft werden. Beispielsweise kann der kleinste Uferabstand in Relation zur Schiffsbreite verwendet werden oder der größte Ruderwinkel in Relation zu demjenigen Ruderwinkel, bei dem die größte Ruderquerkraft auftritt oder es kann die Anzahl der Ruderimpulse pro Minute in Relation zu einer als akzeptabel angesehenen Anzahl von z.B. 6 Impulsen pro Minute herangezogen werden.

Die daraus gebildeten gewichteten Kennwerte, die auf *Bild 7* dargestellt sind, quantifizieren die Sicherheit und Leichtigkeit und dienen dem Vergleich des Designfalls mit dem zugehörigen Leichtigkeits-Referenzfall, wodurch das Prinzip der vergleichenden Variantenanalyse auch für den schwierig zu fassenden Leichtigkeits- und Sicherheitsstandard eingehalten wird. Wenn der Designfall einen schlechteren score erreicht, sollte das Design nachgebessert werden.

Dieses Prinzip funktioniert auch und besonders gut bei der Anwendung von „Fast-Time-Simulatoren“ wie das in der BAW in Entwicklung befindliche Modellverfahren FARAO, denn eine statistische Auswertung verschiedener Simulationsergebnisse entfällt, wenn das Schiff von einem Autopiloten gesteuert wird. Es muss nur dafür gesorgt werden, dass der Autopilot für alle Varianten gleich und gleich gut funktioniert, z.B. durch die Anwendung von Optimierungsalgorithmen zur Steuerung des Schiffes entlang eines angestrebten Kurses wie bei FARAO (Maaß, 2011, Linke et al. 2015, Linke 2015). Der Einfluss des Humanfaktors und der z.B. in FARAO nicht berücksichtigten Interaktionskräfte zwischen Schiffen und zum Ufer kann näherungsweise über geeignete Wahl des Leichtigkeits-Referenzfalls und der gewichteten Kennwerte zur Quantifizierung von Sicherheit und Leichtigkeit berücksichtigt werden. Besser und ergänzend können z.B. semiempirische Methoden zur Quantifizierung von Sicherheitsabständen oder zur Zusatzbreite aus dem Humanfaktor verwendet werden, wie sie für die Auswertung und Interpretation von Naturdaten zur Fahrrinnenbemessung verwendet werden (Söhngen et al. 2014b, Fischer et al. 2014, Feierfeil 2015).

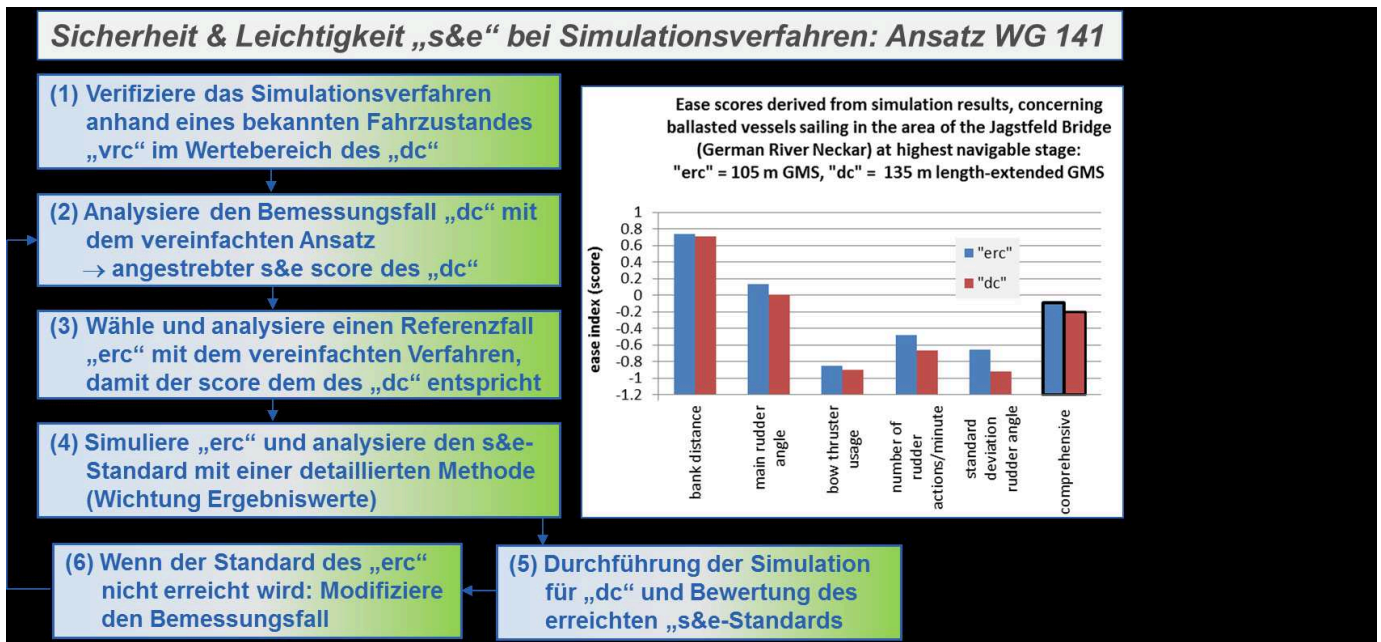


Bild 7: Grob vereinfachtes Prinzip zur Überprüfung des im Designfall erreichten Sicherheits- und Leichtigkeitsstandards bei der Anwendung von Schiffssimulationsverfahren - Vorschlag der PIANC INCOM WG 141, Stand Smart Rivers Conference 2015

Für viele fahrdynamische Fragestellungen reicht es jedoch aus, direkt auf Naturdaten zurückzugreifen wie zur Überprüfung der Befahrbarkeit des Neckar mit 135 m langen Schiffen, wenn die Randbedingungen im Ausbauzustand gegenüber dem Ist-Zustand nahezu unverändert sind (Söhngen et al. 2011, Söhngen et al. 2014b). Ein Nachteil von Naturdaten ist, dass die Bemessungsrandbedingungen oft nicht beobachtet werden können, z.B. weil Fahrversuche verlässlich zu planen und damit zu terminieren sind, um den Organisationsaufwand zu minimieren und deshalb die Fahrwasserverhältnisse z.B. bei HSW nicht beobachtet werden können. Deshalb sind die Ergebnisse der Naturversuche auf bemessungsrelevante Fahrzustände „hochzurechnen“, was sehr gut mit entsprechenden semiempirischen Ansätzen gelingt, die u.a. im Modellverfahren EMP zum Fahrrinnenbreitenbedarf verwendet werden (Söhngen et al. 2014b, Feierfeil 2015).

Naturdaten sind vor allem dann anzuwenden, wenn der Humanfaktor das Ergebnis der Untersuchungen überprägt und dessen Berücksichtigung im Simulator einen nicht mehr vertretbaren Aufwand erzeugen würde. So konnte aus einwöchigen Schleusenbeobachtungen einer Vielzahl von Schleusenanlagen mit unterschiedlichen Ein- und Ausfahrtgestaltungen gezeigt werden, dass in Flussschleusen sogenannte Schubmolen sogar zu tendenziell geringeren Ein- und Ausfahrzeiten beitragen als Einfahrttrichter, die wegen der größeren Abstände des Schiffes von festen Fahrwasserrändern und damit geringerer Bankkräfte eigentlich zu kürzeren Ein- und Ausfahrzeiten beitragen sollten. Offenbar ist die Sicherheit, die die Schifffahrt durch die Fahrt bei Bedarf mit Kontakt an der Schubmole entlang höher zu bewerten als die Bereitstellung eines breiteren Fahrwassers unmittelbar vor der Schleuse.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Was insbesondere aus dem Einfluss der vom Schiff erzeugten Strömungen und Wellen auf die Fahrdynamik des Schiffes, z.B. die Interaktionskräfte zwischen begegnenden Schiffen, unmittelbar folgt, ist, dass schiffsinduzierte Belastungen und Nautik des Schiffes nicht trennbar sind und künftig zusammen simuliert werden sollten. Dies deshalb, weil das nautische Verhalten von Schiffen, insbesondere hinsichtlich des im Verkehrswasserbau so wichtigen Verkehrsflächenbedarfs, der die lateralen Abmessungen unserer Wasserwege und der zugehörige Bauwerke bestimmt und das fahrdynamische Einsinken der Schiffe in Fahrt, das, zusammen mit dem akzeptierten Mindestflottwasser u.a. die gewählten Abladetiefen und damit die Wirtschaftlichkeit unserer Verkehrswege beeinflussen, von hydraulischen Effekten des Schiffsumströmungsfeldes abhängen wie dem Wasserspiegelabsenk und den schiffsinduzierten Wellen, die wieder Uferbelastungen bestimmen. Dass eine solche Modellierung, eingedenk des damit verbundenen Aufwandes, sicherlich noch ein Fernziel künftiger Aktivitäten des Referates W4 bleiben wird, ist unbestritten, aber den Weg dahin sollte man zügig bestreiten.

Hierzu wünsche ich meinem Amtsnachfolger Dr. Schöder und natürlich meinen Kollegen im Referat W4 viel Geschick und Glück, die notwendige Unterstützung durch die Abteilungsleitung, insbesondere was die zeitweise Freistellung von Mitarbeitern für Entwicklungsaufgaben anbelangt und vor allem die Unterstützung durch unsere Auftraggeber aus der WSV und der „Ressourcengeber“ im Ministerium, damit die vom Referat und mir geleistete Arbeit weitergeführt werden kann. Einen kleinen Teil kann ich sicherlich auch nach meinem Ausscheiden aus dem aktiven Dienst dazu noch beitragen, indem ich fachwissenschaftliche Grundlagen weiter dokumentiere, zu denen ich in den letzten Jahren nicht mehr gekommen bin.

Literatur

- Krause, Söhngen 1991: Grenzen der Nutzung vorhandener Querschnitte von Binnenwasserstraßen; IVSK, HTG, BAW, Karlsruhe, Mai 1991
- Söhngen, Frank 1991: Dimensionierung der Fahrrinnenquerschnitte für eine Kanalbrücke über die Elbe bei Magdeburg am Beispiel einer Variante mit Richtungsverkehr ohne Zwangsführung oder windabweisende Bauwerke; Elbe-Aussprachetage, BAW, Berlin, Dezember 1991
- Söhngen, B., Zöllner J. 1992: Schifffahrtsversuche auf dem Dortmund-Ems-Kanal, Teil I: Absunk und Rückstrom bei Einzelfahrten; Binnenschifffahrt ZfB, Nr. 8, April und Nr. 9, Mai 1992 und HTG-Jahrbuch, 47. Band, 1992; Teil II: Strömungsfeld bei Begegnungen und Porenwasserdruck; Binnenschifffahrt ZfB, Nr. 8, April und Nr. 9, Mai 1992 und HTG-Jahrbuch, 47. Band, 1992
- Söhngen B. 1994: Dimensionierung von Fahrrinnenquerschnitten im Rahmen der Planung von Staustufen; 13. Duisburger Kolloquium für Schiffs- und Meerestechnik, Mai 1992
- Söhngen B. 1994: Some topics concerning hydraulic and geotechnical design of waterways; Schoolnotes der 21st WEGEMT Graduate School, London 1994
- Söhngen B. 1995: Naturmessungen zur Systemrauheit in Flüssen mit Deckschichtbildung; ÖWAV-Seminar "Natürliche Sohlstabilisierung in Fließgewässern", Innsbruck, Oktober 1995, Schriftenreihe des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, Heft 105
- Söhngen, B. 1995: The effect of wind on the design of canals; Bulletin No 88-80, PIANC, Oktober 1995
- Söhngen B., H.-H. Witte 1999: Flussbau und Fahrwasserbedingungen am Beispiel des Donauausbaus Straubing-Vilshofen; HTG-Kongreß, Magdeburg, Sept. 1999
- Söhngen B. 1999: Fahrdynamische Modelluntersuchungen; Mitteilungen Nr. 80 der BAW, Dezember 1999
- Söhngen, B., Möhling M. 2000a: Prognose von flussmorphologisch bedingten Unebenheiten in kiesführenden Flüssen im Hinblick auf mögliche Fahrrinnenquerschnitte; 22. IHP-UNESCO-Conference of Danube Countries, Bratislava, September 2000
- Söhngen B., Heer M. 2000b: Einfluss des mittleren Rückstromfeldes auf den Geschiebetransport am Beispiel des Rheines bei Westhoven, BAW-Kolloquium "Interaktion Schiff-Wasserstraße", Berlin, Juni 1999, Mitteilungen Nr. 82 der BAW, Dezember 2000
- Söhngen B. 2001: Three aspects of ship waterway interaction in gravel bed rivers: bed unevenness and fairway cross sections, keel clearance for coarse sediments and ship induced bed load; 166è seccion du COMITE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE de la Société Hydrotechnique de France; Gestion des sédiments: de la source à la mer; Lyon, März 2001 und "La Houille Blanche" 8-2001

- Söhngen B. 2002: Geschiebe und Schifffahrt; Nürnberger Wasserwirtschaftstag des ATV-DVWK, Landesverband Bayern, Juni 2002
- Söhngen B., Witte H.-H. 2004: "Interaktion Schiff-Wasserstraße, Schnittstelle zwischen Schiffbau und Verkehrswasserbau", 25 Jahre Kolloquium Schiffstechnik / Meerestechnik, Universität Duisburg, Juni 2004
- GBB: "Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherung an Binnenwasserstraßen", Söhngen als Mitautor der Bemessungsgrundlagen betreffend das Primär- und Sekundärwellenfeld von Schiffen sowie aus Schraubenstrahlbelastung, BAW-Mitteilungen 87: Mai 2004
- Söhngen, B.; Kayser, J. 2005: Neue Bemessungsgrundlagen für erforderliche Steingrößen und Deckwerkdicken zum Schutz vor Wellen- und Strömungsbelastungen von Binnenschiffen, Vortrag auf dem HTG-Kongress in Bremen am 15. September 2005, Veröffentlichung im Tagungsband
- Kolarov, P. 2006. "Simulation von Schiffsbewegungen im Fließgewässer, Dissertation, Uni Rostock, 2006
- Söhngen, B.; Koop, J. 2006: Considerations) to reduce environmental impacts of vessels. Results of PIANC INCOM Working Group 27., 31. PIANC Weltkongress, Estoril, Portugal, Mai 2006
- Söhngen, B., Wolter C. 2007: Ergebnisse der PIANC INCOM WG 27: Technische und ökologische Auswirkungen aus dem Schifffahrtsbetrieb in Binnenwasserstraßen, HTG-Kongress, Dresden, 14. September 2007
- PIANC 2008: Considerations to reduce environmental impacts of vessels, Report No. 99
- Aberle, J.; Söhngen, B. 2008: Analysis of propeller jet induced scours. International Conference on Fluvial Hydraulics, „River Flow 2008“, Izmir, Türkei, September 2008
- Wolter, C.; Söhngen, B. 2008: Considerations to reduce environmental impacts of vessels. 6th European Conference on Ecological Restoration, Gent, Belgien, September 2008
- Söhngen, B.; Pohl, M.; Gesing, C. 2010: Bemessung von losen Schüttsteinen gegen schiffsinduzierte Strömungen und Wellen. Dresdner Wasserbaukolloquium, Dresden, März 2010
- Söhngen, B.; Kayser, J. 2010: Design of bank and bottom protection – new design principles for the necessary riprap stone sizes and revetment thicknesses for protection against wave and current attack caused by inland vessels. PIANC Magazine „On Course“, No. 140, August 2010
- Stowasser, A.; Söhngen, B. 2010: DWA- und PIANC-Aktivitäten zu alternativen Ufersicherungen. Vortrag: BAW-Kolloquium „Alternative technisch-biologische Ufersicherungen – Wirkungsweise, Belastbarkeit, Anwendungsmöglichkeiten“, Hannover, Oktober 2010
- Söhngen, B.; Qaqunda, R. 2011: Untersuchungen zur Befahrbarkeit des Neckar mit 135 m langen Schiffen in der Streckenfahrt. Wasserwirtschaft, Heft 6/2011

- Maaß, D. 2011. Entwicklung einer Evolutionsstrategie zur optimalen Steuerung von Binnenschiffen, Thesis Bachelor of Science, Dual University, Karlsruhe
- Spitzer D., Söhngen B., Aberle J., Geisenhainer P. 2012; Belastung der Gewässersohle durch Propulsion, Teil 1: Untersuchungen bis zum 2. Weltkrieg, KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft, 4/2012 und Teil 2: Untersuchungen nach dem 2. Weltkrieg, KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft, 6/2012
- Deplaix, J.-M., Söhngen, B. 2013. Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Safety and Ease Standards (PIANC-INCOM WG 141), Smart Rivers Conference, Maastricht
- Söhngen, B., Rettemeier K. 2013a. Design Guidelines for Inland Waterways (PIANC INCOM WG 141), Smart Rivers Conference, Liege
- Söhngen, B., Rettemeier, K. 2013b. Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Concept Design Method (PIANC-INCOM WG 141), Smart Rivers Conference 2013, Maastricht
- VBW 2013. Fahrdynamik von Binnenschiffen, Fachausschuss Binnenwasserstraßen und Häfen (VBW/HTG) und Fachausschuss für Binnenschiffe (VBW/STG), Germany
- Fischer N., Treiber M., Söhngen B. (2014). Modeling and Simulating Traffic Flow on Inland Waterways, PIANC World Congress, San Francisco 2014
- Söhngen, B., Elout K. 2014a. Update PIANC INCOM WG 141 Design Guidelines for Inland Waterways, PIANC World Congress, San Francisco
- Söhngen, B., Feierfeil, T., Paprocki, M. 2014b. Semiempirische Untersuchungen zur Mindestbreite der Fahrrinne am Rhein, Duisburger Kolloquium für Schiffs- und Meerestechnik, Duisburg, May
- Fischer, N., Treiber M., Söhngen B. 2014. Modelling and Simulating Traffic Flow on Inland Waterways, PIANC Congress, San Francisco
- Iribarren, J. 2015. Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Examples for comparative variant analysis in using ship handling simulators with special respect to assess ease quality and human factor, Smart Rivers Conference 2015, Buenos Aires
- Linke, T., Rauscher, D., Söhngen, B. 2015. Recent developments in the application of shallow water ship hydrodynamics in inland waterway design, Smart Rivers Conference 2015, Buenos Aires
- Pompee, P.-J. 2015. Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Channel types with special respect to speed, power used and ease quality, Smart Rivers Conference 2015, Buenos Aires
- Rettemeier, K., Söhngen B. 2015. Workshop Design Guidelines for Inland Waterways - Applying Concept Design Method – Practice Approach – Case by Case Design, Smart Rivers Conference 2015, Buenos Aires

- Söhngen, B., Butterer, R. 2015: Workshop Design Guidelines for Inland Waterways, Application of WG 141 approach including elaboration of field data and fast time simulation for Class V-vessel passing narrow Jagstfeld bridge in the German Neckar River, Smart Rivers Conference 2015, Buenos Aires
- Söhngen, B. 2015b: Workshop on Design Guidelines for Inland Waterways, Introduction to WG 141 Approach and Findings, Smart Rivers Conference 2015, Buenos Aires
- Feierfeil, T 2015.: Ermittlung erforderlicher Fahrrinnenbreiten auf Basis von Naturmessungen, BAW-Kolloquium, 26. & 27.11.2015, Karlsruhe
- Fischer, N. 2015: Microsimulation des Schiffsverkehrs am Beispiel des Rheins, BAW-Kolloquium, 26. & 27.11.2015, Karlsruhe
- Fleischer P. 2015: DWA-Merkblatt M 519 – Planung technisch-biologischer Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen, BAW-Kolloquium, 26. & 27.11.2015, Karlsruhe
- Kaupfert, K. 2015: Bemessung von Ufersicherungen mit GBBSOFT+, BAW-Kolloquium, 26. & 27.11.2015, Karlsruhe
- Linke, T. 2015: Entwicklung des Fast Time Simulationsprogramms FaRAO, BAW-Kolloquium, 26. & 27.11.2015, Karlsruhe
- Rettemeier K. , Chancen und Anwendungsgrenzen der künftigen PIANC „Design Guidelines for Inland Waterways“, BAW-Kolloquium, 26. & 27.11.2015, Karlsruhe