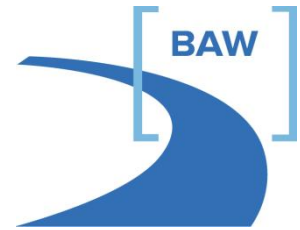




**BUNDESANSTALT
FÜR GEWÄSSERKUNDE**
Koblenz



**BUNDESANSTALT
FÜR WASSERBAU**
Karlsruhe



**Untersuchungen zu alternativen,
technisch-biologischen
Ufersicherungen an
Binnenwasserstraßen**

Info-Blatt:

**Schiffserzeugte Wellen –
Phänomen, Einflussgrößen
und Messung**

**F & E – Projekt
(BAW – BfG)**

Stand: November 2016

Inhalt

- 1 Phänomen
- 2 Einflussgrößen
 - 3.1 Wasserstraße
 - 3.2 Schiff
 - 3.3 Schiff/Wasserstraße
- 3 Wellenmessung
- 4 Ergebnisse: Hydraulische Belastungsgrößen
- 5 Literatur

1 Phänomen

Zum allgemeinen Verständnis der hydraulischen Phänomene, die mit der Fahrt eines Schiffes in einem Gewässer verbunden sind, soll in diesem ersten Kapitel der Vorgang generell erläutert werden. Fährt ein Schiff durch ein Gewässer, so entstehen durch die gegenseitige hydraulische Wechselwirkung lokale und temporäre Veränderungen der Wasseroberfläche und der Strömungen um das Schiff herum. Damit verbunden kommt es zur Bildung von Wellen und schiffsinduzierten Strömungen, die als hydraulische Belastungen auf die Ufer des Gewässers wirken.



Bild 1: Schiffserzeugte Wellen und Strömungen im Wesel-Datteln-Kanal bei einer Versuchskampagne im Oktober 2002; hier die ufernahe Fahrt der MS Main bei voller Abladung und einer Geschwindigkeit nahe der kritischen Schiffsgeschwindigkeit

Am deutlichsten wird das Phänomen der Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße in engen Kanälen. Dem fahrenden Schiff eilt eine Wasserspiegelanspannung von wenigen Zentimetern voraus, die ca. eine Schiffslänge lang ist (s. Bild 1). Das ist der Kolbeneffekt. Direkt vor dem Bug des Schiffes bildet sich ein Aufstau, der ständig voraus geschoben wird, auch **Bugwelle** genannt. Ab hier ändern sich die Abflussbedingungen stark. Der bisher ungestörte Gewässerquerschnitt wird um den Schiffsquerschnitt reduziert. In diesem verminderten Querschnitt löst das fahrende Schiff eine Verdrängungsströmung zum Heck hin aus. Im Bereich des prismatischen Schiffsrumpfes wird dieser beschleunigte Abfluss als Rückströmung bezeichnet. Sie nimmt erst in einem größeren Abstand zum Schiff signifikant ab und ist deshalb im engen Kanal eine maßgebende Belastungsgröße für die Ufer. Ab rund 1/2

Schiffslänge zu beiden Seiten des Fahrzeugs (dies entspricht einer Absunkmulde vom Durchmesser der Schiffslänge) ist dann keine signifikante Rückströmung mehr vorhanden.

Die Beschleunigung des Abflusses bedingt hydraulisch wiederum eine Absenkung des Wasserspiegels neben dem Schiff – dem **Absunk** / der **Absunkmulde**. Die physikalische Ursache des Wasserspiegelabsunks als Folge der schiffsinduzierten Strömungen liegt in der Energiebilanz. Die gesamte vorhandene Energie setzt sich aus der Lage- und der Bewegungsenergie zusammen. Die Lageenergie wird im Wesentlichen durch die Wasserspiegelhöhe bestimmt. Die Bewegungsenergie vergrößert sich im vorliegenden Fall durch die Rückströmung. Da die Gesamtenergie in erster Näherung konstant bleiben muss, folgt daraus eine Reduktion der Lageenergie, d. h. eine Wasserspiegelabsenkung. In dieser Absunkmulde sinkt das Schiff ständig ein, was als **Squat** (oder auch **fahrdynamisches Einsinken**) bezeichnet wird. In erster Näherung sind Squat und Absunk gleich.

Am Heck des Schiffes findet dann wieder ein Ausgleich der Abflussverhältnisse statt, was mit einer Wasserspiegelanhebung - der **Heckquerwelle** – und einer **Wiederauffüllungsströmung** in Form eines mitlaufenden **Rollbrechers** verbunden ist. Alle genannten schiffsinduzierten Belastungen werden umso größer, je schneller das Schiff fährt, je beschränkter die Fahrwasserverhältnisse (Breite, Tiefe) und kleiner die Uferabstände sind und je größer das Schiff bei konstantem Gewässerquerschnitt (abnehmendes n-Verhältnis) ist. Diese gesamte Abfolge aus Bugwelle, Absunkmulde und Heckwelle längsseits des Schiffes hat den Charakter einer Welle und wird als **Primärwelle** bezeichnet. Ihre Wellenlänge entspricht der Schiffslänge.

An Bug und Heck des Schiffes entstehen gleichzeitig regelmäßige, kurzperiodische Wellen – als **Sekundärwellen** bezeichnet –, die als Elementarwellen aufgrund der Konturänderungen entstehen:

- im Bugbereich, wo sich von der Bugspitze zum prismatischen, vollen Schiffsquerschnitt der Schiffsrumpf aufweitet und
- im Heckbereich, wo der prismatische, volle Schiffsquerschnitt des Schiffsrumpfs zum Heck hin wieder verjüngt.

Diese Sekundärwellen sind zum einen Schrägwellen, die sich mit einem Winkel zur Schiffsachse ausbreiten, zum anderen Querwellen, die annähernd senkrecht zur Schiffsachse orientiert sind (s. Bild 2). Die Überlagerung beider Systeme erzeugt eine Interferenzlinie, die abhängig von der Fahrgeschwindigkeit einen charakteristischen Winkel zur Schiffsachse aufweist: Bei üblichen Schiffsgeschwindigkeiten beträgt dieser Winkel $19,3^\circ$. Mit Annäherung an die kritische Geschwindigkeit erreicht er maximal 45° . Sekundärwellen können im Gegensatz zu Primärwellen auch weit vom Schiff entfernte Ufer erreichen, da sie sich wie freie Wellen verhalten, deren Höhe nur wenig mit dem zurückgelegten Weg abnimmt. Ihre Wellenhöhe steigt in erster Näherung mit der Schiffsgeschwindigkeit v_s im Quadrat an.

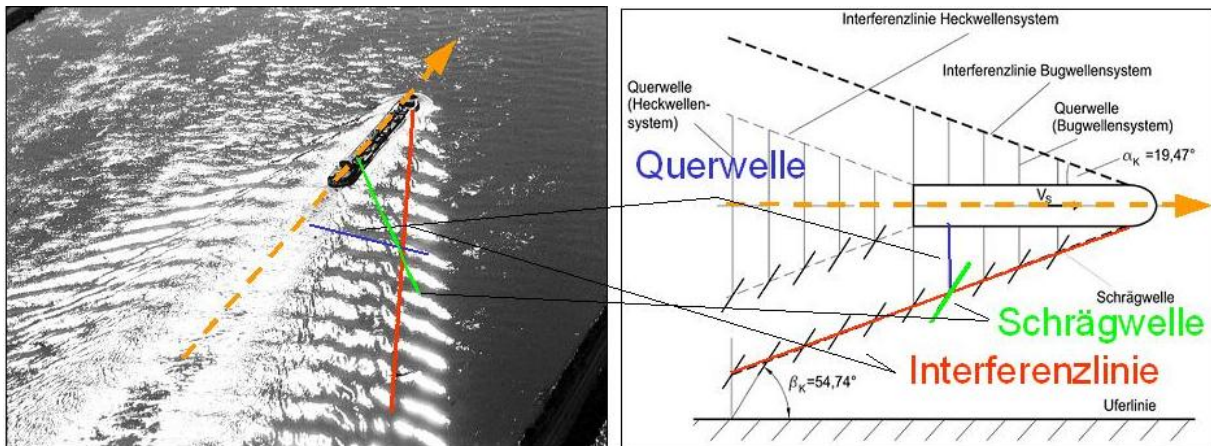


Bild 2: Luftbild des Sekundärwellenbildes eines auf dem Rhein fahrenden Binnenschiffes; außerdem ist hinter dem Heck der Schraubenstrahlbereich zu erkennen

Als letzte relevante Belastungsgröße beeinflussen die Antriebs-(Propulsions-) und Steuerorgane mit dem zugehörigen **Schraubenstrahl** zusätzlich das Wellenbild an der Gewässeroberfläche (s. Bild 2):

- am Bug das Bugstrahlruder, mit dem moderne Schiffe zunehmend ausgerüstet sind, und
- am Heck und im Nachlauf auch dahinter z. B. Propeller und Jet-Antriebe.

Der Schraubenstrahl kann aufgrund seiner hohen Geschwindigkeiten und der hohen Turbulenz beträchtliche Belastungen, insbesondere in Manöversituationen, erzeugen.

Der oben beschriebene Vorgang ist stark vereinfacht als Prinzipskizze auf Bild 3 mit der Fahrt eines Schiffes in einem Kanal mit Trapezprofil dargestellt. Das fahrende Schiff ruft einen Absenk unter den zuvor ungestörten Wasserspiegel hervor. Der so verkleinerte Querschnitt führt zu einer Rückströmung parallel zum Rumpf vom Bug zum Heck. Vom Schiff werden Wellen erzeugt, die zum Ufer wandern. Ab dem Heck des Schiffes macht sich die Propulsionsströmung bemerkbar (Bugstrahlrudereinsatz hier nicht dargestellt).

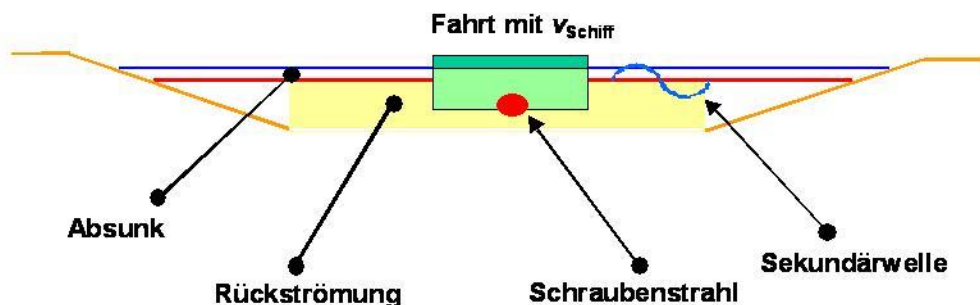


Bild 3: Stark vereinfachte Prinzipskizze zu den schiffshydrodynamischen Vorgängen um ein fahrendes Binnenschiff im trapezförmigen Gewässerquerschnitt

Als Auswirkungen dieses Vorgangs sind folgende Effekte zu nennen:

- Der Absink am Ufer führt zu Porenwasserdruckänderungen im Untergrund, die bei der geotechnischen Bemessung der Ufersicherungen zu berücksichtigen sind. Besonders der schnelle Wasserspiegelabsink am Bug kann Porenwasserüberdrücke bewirken, die - abhängig von der Durchlässigkeit des Bodens – zum Abgleiten führen können.
- Absinkinduzierte Strömung kann aus angeschlossenen Altwässern bzw. beruhigten Flachwasserzonen Stoffein- und -austrag verursachen.
- Der Absink kann – bei entsprechender Gewässertopografie – zum vorübergehenden Trockenfallen von Uferbereichen führen, was u. U. juvenile Fischfauna bedrohen kann.
- Die Wellen bewirken kurzperiodische Wasserspiegeländerungen und Belastungen am Ufer, die bei Freibordfestlegung, Wellenauflauf und hinsichtlich der Wirkung auf Fauna und Flora im Uferbereich zu beachten sind.
- Die Rückströmung ruft Sohlschubspannungen an Sohle und Ufer hervor, die bei der Erosionssicherheit von Sohlmaterial und Uferdeckwerk eine Rolle spielen.
- Auch der Propellerstrahl an der Sohle und der Bugruderstrahl an Ufer und Sohle führen zu einer temporären Sohlschubspannung und können dadurch Kolkbildung hervorrufen.

2 Einflussgrößen

Wichtige Einflussgrößen zur Beschreibung der Interaktion zwischen Schiff und Wasserstraße sind geometrische und hydraulische Größen der **Wasserstraße**, Abmessungen und Geschwindigkeit des **Schiffes** sowie Werte aus deren Kombinationen und Ergebnisse aus theoretischen Herleitungen zur Wechselwirkung **Schiff/Wasserstraße**. Als Größen sind bei den einzelnen Bereichen die Folgenden zu nennen (Näheres dazu in GBB 2004 (BAW, 2004) u/o GBB 2010 (BAW, 2011)):

2.1 Wasserstraße

Gewässerquerschnitt A , Wasserspiegelbreite b_{wsp} , Sohlbreite b_{so} , Fahrrinnenquerschnitt A_F , mittlere Wassertiefe h_m , Fließgeschwindigkeit v_{fl} , Böschungsneigung m , Sohl- und Uferrauheiten, eventuell Kurvenradius

2.2 Schiff

Schiffsbreite B , eingetauchter Schiffsquerschnitt A_M , Schiffslänge L , gefahrene Schiffsgeschwindigkeit durchs Wasser v_{sdw} , Tiefgang T , Schiffsförmigkeit, Kennwerte von Propeller und Bugstrahlruder, eventuell Driftwinkel

2.3 Schiff / Wasserstraße

Querschnittsverhältnis n ($\triangleq A_M/A$), kritische Schiffsgeschwindigkeit v_{krit} , relative Schiffsgeschwindigkeit über Grund $v_{süG}$, Restquerschnitt neben dem Schiff bei Vorbeifahrt A_{netto} , Exzentrizität zwischen Schiffskurs und Kanalachse (Außermittigkeit) y

3 Wellenmessung

Wichtige Erkenntnisse über die Interaktion Schiff/Wasserstraße sind nur durch Naturmessungen bzw. Verkehrsbeobachtungen zu erhalten, entweder mit Datenerfassung bei laufender Schifffahrt oder aber durch Messungen bei Versuchsfahrten unter definierten Bedingungen. Zum einen wird dabei das Schiff z. B. über GPS-Messverfahren kontinuierlich in seiner Lage bestimmt, wodurch Position im Gewässer, Einsinken und Geschwindigkeit bekannt sind. Ein anderer Weg ist hierfür die Verwendung von Radar, besonders wenn die Schifffahrt in ihrem natürlichen Fahrverhalten beobachtet werden soll. Zum anderen werden z.B. am Ufer die Veränderungen der Wasserspiegellage vor, während und nach der Passage registriert, womit Aussagen über Primär- und Sekundärwellen sowie Absenk und Absenkgeschwindigkeit möglich sind. Eine typische Aufzeichnung ist auf Bild 4 zu sehen. Als größte hydraulische Belastung einer Uferböschung, z. B. zur Dimensionierung der Größe der Einzelsteine einer Steinschüttung nach GBB 2010 (BAW, 2011), wird die Bemessungswellenhöhe entsprechend der Differenz zwischen dem Wellental im Heckbereich und der höchsten Wasserspiegellage kurz hinter dem Schiffsheck gesehen.

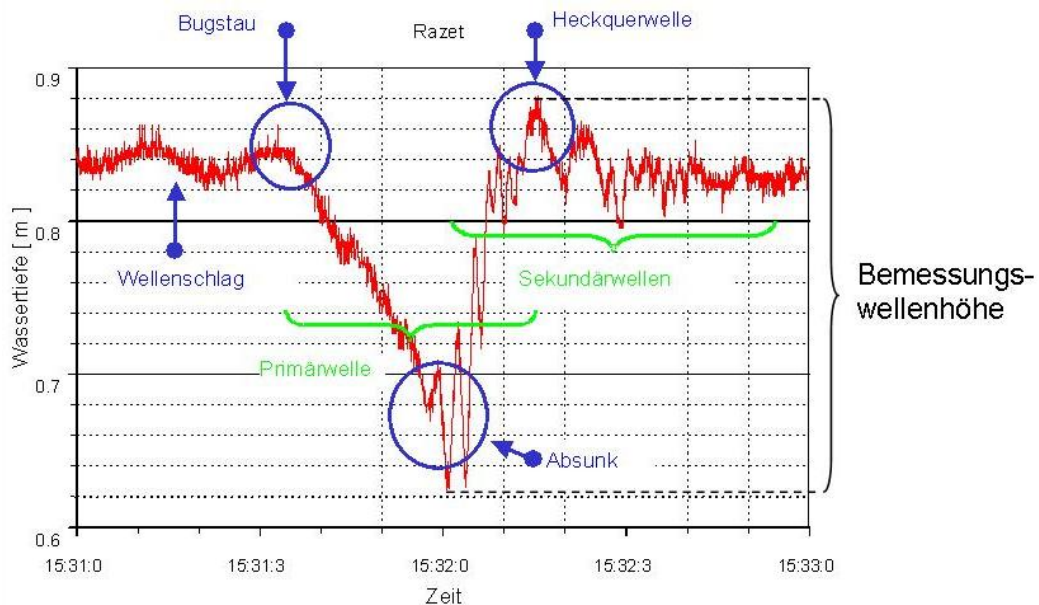


Bild 4: Fahrt des *GMS Razet* (L/B/T = 105 m/9,50 m/1,20 m \triangleq leer) am Neckar-km 78,900 mit einer Geschwindigkeit über Grund von 3,4 m/s = 12,24 km/h, nach Messungen von (Leissler, 2000)

Ausführlicheres zum Thema Wellenmessung beinhaltet das Info-Blatt „Schiffserzeugte Wellen und Schiffsumströmung – Messung und Auswertung“.

4 Ergebnisse: Hydraulische Belastungsgrößen

Als Ergebnisse der Wechselwirkung zwischen fahrendem Schiff und der Wasserstraße ergeben sich folgende hydraulische Belastungsgrößen:

mittlere max. Wasserspiegelabsenkung (im engsten Durchflussquerschnitt) Δh , mittlere max. Rückströmgeschwindigkeit $v_{\text{rück}}$, Wiederauffüllungsströmung u ; Wellenhöhe über dem Böschungsfußpunkt H_{BF} bei mittlerer Fahrt, Wasserspiegelabsenkung am Böschungsfußpunkt z_a , Wellenhöhe bei außermittiger Fahrt H_a , Sekundärwellenhöhe H_{sek}

Geotechnisch spiegelt sich die Wechselwirkung Schiff / Wasserstraße in der temporären Veränderung der Porenwasserdrücke in der Uferböschung wider.

5 Literatur

- (BAW, 2004) Bundesanstalt für Wasserbau
Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB 2004)
 BAW-Mitteilung Nr. 87
 Eigenverlag, Karlsruhe 2004
- (BAW, 2011) Bundesanstalt für Wasserbau
Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB 2010)
 BAW-Merkblatt, Ausgabe 2010
 Eigenverlag, Karlsruhe März 2011
- (Leissler, 2000) Leissler, A.
Bestimmung von Größe und Auflaufhöhe schiffserzeugter Wellen an einer Uferböschung am Neckar in der Stauhaltung Guttenbach (Neckar-km 78,9000 – 79,000)
 Diplomarbeit
 Karlsruhe 2000
unveröffentlicht