

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Thorenz, Carsten**

## **PIANC Arbeitsgruppe 155: Schiffsverhalten in Schleusen und Schleusenvorhöfen**

Deutsche Beiträge. Internationaler Schifffahrtskongress (PIANC)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:  
**PIANC Deutschland**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104918>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Thorenz, Carsten (2014): PIANC Arbeitsgruppe 155: Schiffsverhalten in Schleusen und Schleusenvorhöfen. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 33. Internationaler Schifffahrtskongress; San Francisco, USA, 01. - 05. Juni 2014. Bonn: PIANC Deutschland. S. 17-24.

### **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.



### PIANC Arbeitsgruppe 155: Schiffsverhalten in Schleusen und Schleusenvorhöfen

**Dr.-Ing. Carsten Thorenz**

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

D. Bousmar, J.-P. Dubbelman, Li Jun, D. Spitzer, J. J. Veldman, J. R. Augustijn, W. Kortlever, A. Hartley, A. Moreno, R. Salas, J. Wong, M. Vantorre, O. Weiler, P. Hunter, S. Roux, Wu Peng

#### Zusammenfassung

Ziel der PIANC Arbeitsgruppe 155 „Schiffsverhalten in Schleusen und Schleusenvorhöfen (Ausschuss für Binnenschifffahrt, InCom) ist es, Planern und Betreibern von Schleusen einen größeren Einblick in die Schwierigkeiten zu geben, die durch die Interaktion von Schiff und Schleuse auftreten können und mögliche Gegenmaßnahmen aufzuzeigen. Während des Schleusungsprozesses, aber auch während der Fahrt auf freier Strecke können Schiffe erheblich durch die von Schleusen ausgelösten Prozesse beeinflusst werden. Da die Planung und der Betrieb von Schleusen stark durch die hier ablaufenden physikalischen Prozesse beeinflusst werden, ist es wichtig ein Verständnis für die zugrunde liegende Physik zu entwickeln. In dem von der Arbeitsgruppe verfassten Abschlussbericht werden die wichtigsten Prozesse vorgestellt und anhand aktueller und abgeschlossener Schleusenprojekte erläutert. Die vorliegende Abhandlung gibt einen Einblick in die Arbeit der Gruppe und in die wichtigsten Themen des Berichts.

#### 1. Einleitung

Ein wesentliches Ziel der PIANC ist die Förderung des Wissensaustauschs zwischen Personen, die sich mit Schifffahrt und Wasserstraßen beschäftigen. Um dieses Ziel zu erreichen bringt PIANC internationale Experten für Planung, Entwicklung und Unterhaltung von Häfen, Wasserwegen und Küstengebieten zusammen. In Arbeitsgruppen werden technische Verbesserungen für standardisierte Anwendungen entwickelt.

Die vorliegende Abhandlung gibt einen Einblick in die Arbeit der PIANC Arbeitsgruppe 155. Sie wurde 2011 gegründet und umfasst momentan 14 Experten und vier „young professionals“ aus neun verschiedenen Ländern (Bild 1). Ihr Vorgänger ist die Arbeitsgruppe 29, die 2009 den Bericht Nr. 106 „Innovations in navigation lock design“ veröffentlichte (PIANC, 2009). Bei den Vorbereitungen dieses Berichts, der sich hauptsächlich auf die Planung von Schleusen konzentriert, stellte sich heraus, dass es nötig ist Planern und Betreibern von Schleusen einen größeren Einblick in die Schwierigkeiten zu geben, die bei der Interaktion von Schiff und Schleuse auftreten können und mögliche Gegenmaßnahmen aufzuzeigen.

Während des Schleusendurchgangs und der freien Fahrt können Schiffe erheblich durch die von Schleusen ausgelösten Prozesse beeinflusst werden. Da die Planung und der Betrieb von Schleusen stark durch die hierbei ablaufenden physikalischen Prozesse beeinflusst werden, ist es wichtig ein Verständnis für die zu Grunde liegende Physik zu entwickeln. Das Ziel der

Arbeitsgruppe ist es Planern und Betreibern einen tieferen Einblick in die Relevanz der Einflüsse von Schleusen auf Schiffe zu geben und diese anhand aktueller Schleusenprojekte zu erläutern.



**Bild 1:** Arbeitsgruppe 155 vor dem Wasserbaulabor der Compagnie Nationale du Rhône (CNR) während des Treffens in Lyon

#### 2. Treffen der Arbeitsgruppe

##### 2.1 Einleitung

Nach der einführenden Kick-Off Veranstaltung in New Orleans im September 2011 (verbunden mit der PIANC Smart-Rivers Conference) folgten weitere Veranstaltungen in Delft, Lyon, Panama City und Maastricht mit folgendem Ablauf: Jedes Treffen bestand aus drei Arbeitseinheiten über je einen halben Tag und zwei oder drei anschließenden technischen Besichtigungstouren. Diese Art von Treffen ist vorteilhaft, da sie den intensiven Austausch zwischen den Gruppenmitgliedern fördern.

##### 2.2 Einführungsveranstaltung in New Orleans

Die Arbeitsgruppe traf sich zum ersten Mal am 12. September 2011 in New Orleans zu einer eintägigen Veranstaltung. Ein wichtiger Teil des Treffens waren Präsentationen der einzelnen Mitglieder zu ihrem fachlichen Hintergrund, wie zum Beispiel relevante Punkte des Lebenslaufs, Arbeitgeber und wichtige Projekte an denen sie gearbeitet haben. Die Gruppe erarbeitete und analysierte die Zielvorgaben für einen späteren Bericht. Diese eigneten sich aber nicht direkt als Leitfaden für die Strukturierung des Berichts. Es wurden deshalb zwei Möglichkeiten erarbeitet den Bericht zu gliedern.

Der erste Ansatz orientierte sich an dem Blickwinkel eines Nutzers der Infrastruktur. Er basiert auf einer Chronologie von Ereignissen, die für ein Schiff bei einer Schleusung von Bedeutung sind. Daraus resultieren separate Kapitel für das Verlassen der freien Fahrt, das Warten vor dem Schleusentor, das Einfahren in die Schleuse, das Festmachen, den Schleusungsprozess, das Verlassen der Schleuse und das Zurückkehren zur freien Fahrt.

Alternativ wurde ein zweiter, wissenschaftlich orientierter Ansatz entwickelt, der auf einer Folge von Konse-

quenzen beruht. Die Kapitel sollten Methoden zur Berechnung bzw. Abschätzung der Schiffskräfte, der daraus resultierenden Reaktionen des Schiffs und der sich daraus ergebenden Handhabung des Schiffs durch die Schiffsbesatzung wie z.B. beim Anlegen etc. beschreiben. Außerdem sollte das vorliegende Maß an Sicherheit basierend auf dem Verhalten des Schiffs und dessen Ausrüstung abgeschätzt werden. Durch diese Analyse der Prozesse sollten abschließend Richtlinien entwickelt werden.

Es wurde beschlossen den ersten Ansatz weiterzuentwickeln, da er einen größeren praktischen Nutzen für den Anwender des Berichts bietet. Sich wiederholende Stellen, die die gleichen physikalischen Grundlagen in unterschiedlichen Phasen des Schleusungsprozesses beschreiben, wurden als großes Problem beider Ansätze identifiziert.

### 2.3 Treffen in Delft

Im Februar 2012 traf sich die Arbeitsgruppe in Delft, Niederlande. Der Gastgeber des Treffens war Deltares. Nach einer Führung durch die Wasserbaulabore von Deltares diskutierte die Gruppe über Präsentationen der Mitglieder mit folgenden Themen:

- Experimentelle/Numerische Methoden zur Berechnung von Schiffskräften während der Schleusung
- Erfahrungen von Schiffsführern mit Schleusungen (Ausrüstung, Probleme, etc.)
- Chinesische Richtlinien zur Berechnung von Schiffskräften
- Relevanz von Fendern
- Freizeitschiffahrt in Schleusen
- Poller (Form, Belastungsannahmen, etc.)
- Physikalischer Hintergrund von Kräften auf sich bewegende Schiffe

Als dritte mögliche Berichtstruktur wurde eine Aufteilung in zwei Themenbereiche vorgeschlagen: „Navigation“ (horizontale Bewegung des Schiffs) und „Schleusung“ (vertikale Bewegung des Schiffs). Aufgrund der Präsentationen und Diskussion der Gliederung des Berichts bei vorherigen Treffen, entschied man sich allerdings für den erstgenannten Ansatz eines chronologischen Ablaufs aus dem Blickwinkel des Nutzers. Der Aufbau der Kapitel wurde von zwei Teilnehmergruppen erarbeitet. Eine Gruppe befasste sich mit den Vorgängen „außerhalb der Schleuse“, die andere mit den Vorgängen „innerhalb der Schleuse“. Da das nächste Ziel das Füllen der Kapitelstruktur mit wissenschaftlichem Inhalt war, wurden Aufgaben zur Erarbeitung zukünftiger Beiträge an die Teilnehmer verteilt. Obwohl zu diesem Zeitpunkt bereits eine bemerkenswerte Menge an inhaltlichem Material gesammelt und in das Manuskript integriert wurde, standen immer noch wesentliche Schreibarbeiten bevor.

Die Besichtigungen der Schleusen IJmuiden und der Schleusenkomplexe Volkerak und Krammer vervollständigten das Treffen. Die Teilnehmer hatten die Möglichkeit das sehr spezielle Füllsystem der Krammer-Schleusen zu besichtigen, an der das Eindringen von Salzwasser ein besonderes Problem darstellt. An den Seeschleusen von IJmuiden gaben die Lotsen einen Einblick in ihre Erfahrungen mit dichtebedingten Strö-

mungen, die hier beobachtet werden konnten. Bild 2 zeigt wie Süßwasser oberflächennah aus der Kammer fließt während das dichtere Salzwasser darunter in die Kammer strömt. Diese Situation birgt große Gefahren, da „das was man (als Schiff) fühlt, nicht das ist was man (als Kapitän) sieht“.



**Bild 2:** Oberflächennahe Ausbreitung der Frischwasserfahne nach der Öffnung des Schleusentores bei IJmuiden, Niederlande

### 2.4 Treffen in Lyon

Im September 2012 traf sich die Arbeitsgruppe in Lyon, Frankreich (Bild 1). Der Gastgeber dieses Treffens war die Compagnie Nationale du Rhône (CNR), wodurch sich die Möglichkeit bot das physische Modell der Panamakanal-Schleusen zu besichtigen, das in den Wasserbaulaboren der CNR aufgebaut ist. Während des Treffens besprach die Gruppe kapitelweise den Status der Arbeiten am Bericht. Die zuvor festgelegte Gliederung des Berichts wurde erneut diskutiert, letztendlich aber als das geringere Übel angenommen. Das Ziel des Berichts ist eine Sammlung von Wissen über Schiffskräfte und das daraus resultierende Verhalten, die Planern und Betreibern hilft sich auf die wichtigsten Geschehnisse an einer Schleuse zu konzentrieren. Im Unterschied zu anderen Berichten hat die Gruppe eine Einleitung im erzählerischen Stil geschrieben, um einen anregenden Einstieg in das vielleicht trockene Thema zu ermöglichen. Durch einen Besuch des Rhône Navigation Centres, der Schleuse Châteauneuf und einer Tiefenmessung auf der Rhône wurde das Treffen abge-

rundet. An der Schleuse Châteauneuf konnte ein Schiff beobachtet werden, das offensichtlich Probleme hatte, gegen den Kolbeneffekt anzukämpfen, der detailliert in dem kommenden Bericht beschrieben wird. Die Ausfahrt aus der Schleuse dauerte fast 15 Minuten (Bild 3).



**Bild 3:** Schiff bei der Ausfahrt aus der Schleuse Châteauneuf

### 2.5 Treffen in Panama City

Die Panama Canal Authority (ACP) und die International Maritime Pilots Association (IMPA) waren Gastgeber des Treffens der Arbeitsgruppe im März 2013 in Panama. Während des Treffens wurde beschlossen, Teile der Arbeit in einem Workshop bei der nächsten Smart-Rivers-Conference 2013 zu präsentieren. Der Workshop wurde als kleines Symposium zur Arbeit der Gruppe und anderen interessanten Themen über Schleusen geplant. Außerdem wurde neues Material, das in der Zeitspanne zwischen dem letzten Berichtsentwurf und dem Treffen in Panama City erarbeitet wurde, der Gruppe zur Verfügung gestellt, geprüft und in den Bericht integriert. Zum Aufstellen einer Gefahrenanalyse (HAZOP) wurde das Treffen mit einem Brainstorming über mögliche Gefahren während einer Schleusendurchfahrt abgeschlossen. Die begleitenden technischen Touren gaben einen tiefgehenden Einblick in das Panama-Canal-Expansion-Program und die bestehenden Schleusen (Bild 4). Der Besuch der Baustelle der dritten Schleusen und die technische Tour zu den Baggerbereichen bei Gamboa und Culebra Cut zeigten die enorme Größe der anstehenden Arbeiten. Besichtigungen des Kontrollzentrums für marinen Schiffsverkehr (Marine-Traffic-Control-Centres) und des Schiffsführungssimulators der ACP ergänzten die technische Tour.



**Bild 4:** Arbeitsgruppe 155 und Gäste bei der Besichtigung der alten Panamakanal-Schleusen

### 2.6 Treffen und Workshop in Liege/Maastricht

Im September 2013 traf sich die Arbeitsgruppe in Maastricht, Niederlande. Während des Treffens entschied die Gruppe, dass der Bericht inzwischen einen Status innehatte, der als „fast fertig“ bezeichnet werden konnte. Für die abschließenden Arbeiten wurde die Verantwortung für die Fertigstellung der einzelnen Kapitel an einzelne Mitglieder der Arbeitsgruppe vergeben. Man entschied sich auf einige weitere Beiträge zu warten und einen Entwurf des Berichts an ein US-amerikanisches Mitglied von PIANC (da kein US-amerikanisches Mitglied aktiv in Arbeitsgruppe 155 mitarbeitete) und InCom zu senden. Aufgrund von Krankheit und anderweitiger Arbeitsbelastung mancher Mitglieder konnte der Zeitplan nicht eingehalten werden, weshalb ein größerer Entwurf des Berichts zur Korrektur versendet wurde. Momentan ist die interne Korrektur durch die Verantwortlichen der einzelnen Kapitel in Gange. Voraussichtlich ist kein weiteres Treffen von Nöten, um den Bericht abzuschließen.

Der von der Arbeitsgruppe 155 veranstaltete Schleusen Workshop auf der Smart-Rivers Conference 2013 hat erfolgreich dazu beigetragen, die Arbeit der Gruppe vorzustellen. Mit mehr als 40 Zuhörern kam es zu regen Diskussionen unter den anwesenden Experten (Bild 5).



**Bild 5:** Eindrücke des Schleusen Workshops auf der Smart-Rivers Conference 2013

### 3. Identifizierte relevante Interaktionen zwischen Schiff und Schleuse

#### 3.1 Einleitung

Die Bewegung eines Schiffes während der Annäherung an eine Schleuse und der Durchquerung derselben wird von vielfältigen Faktoren beeinflusst. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über einige der im Bericht dazu enthaltenen Themen gegeben. Natürlich können in diesem Rahmen nur kleine Ausschnitte präsentiert werden, während die vollständige Darstellung dem in Arbeit befindlichen Bericht vorbehalten ist.

#### 3.2 Während der freien Fahrt

Beim Füllen einer Schleusenkammer wird Wasser aus dem Oberwasser entnommen, wodurch eine Sunkwelle im oberen Einflussbereich der Schleuse entsteht. Entsprechendes gilt für die Entleerung einer Schleusenkammer in das Unterwasser. Hier entsteht eine Schwallwelle im unteren Einflussbereich der Schleuse. Sind die Schwall- und Sunkwellen zu groß, kann die Schifffahrt beeinträchtigt werden:

- Schiffe könnten an Brücken stoßen (Schwallwelle) oder den Grund berühren (Sunkwelle)
- Durch den zusätzlichen Volumenstrom entstehen Fließgeschwindigkeiten, die Schiffe bei der Schleuseneinfahrt oder beim Aufstoppen beeinflussen könnten
- Zusätzliche Kräfte entstehen zwischen den Leichtern eines Schubverbandes

Neben diesen für die Schiffsführung relevanten Einflüssen kann es zu weiteren Nebenerscheinungen kommen:

- Benachbarte hydraulische Anlagen können beeinflusst werden: zusätzliche Kräfte auf Schleusentore, Auswirkungen auf Kontrollsysteme von Wehren durch plötzliche Wasserspiegelschwankungen, zusätzlicher Ballast im Trog eines Schiffhebewerks

- Da die Wellenlänge von Schwall- und Sunkerscheinungen deutlich länger ist als die von schiffsgenerierten Wellen, erhöht sich die Zeit des Trockenfallens bzw. der Überflutung der Ufer, wodurch das Ökosystem des Ufers gestört werden kann.

In diesen Kapiteln des Berichts werden die relevanten physikalischen Grundlagen eines Schiffs in Fahrt und das Verhalten von schleuseninduzierten Schwall- und Sunkwellen erklärt. Die Entstehung und Ausbreitung der Wellen werden ebenso erläutert wie die Formänderung bei der Bewegung durch die Wasserstraße. Da die Amplitude der entstehenden Welle innerhalb akzeptabler Grenzen liegen muss, werden Richtlinien verschiedener Länder zu erlaubten Wellenhöhen angegeben und Beispiele beobachteter schleuseninduzierter Wellen aufgezeigt.

Des Weiteren wird der Einfluss von Querströmungen im Vorhafen aufgezeigt, die durch einen angrenzenden Fluss ausgelöst werden. Obwohl nicht Schwerpunkt des Berichts, werden außerdem Empfehlungen für die räumlichen Ausmaße des Vorhafens gegeben, um das Einfahren in die Schleuse für die Schifffahrt sicher zu gestalten.

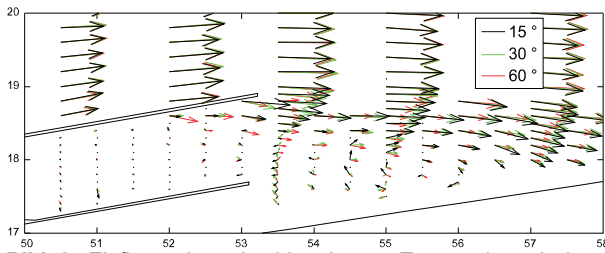
#### 3.3 Im Vorhafen

Der Vorhafen kann als Verbindung zwischen der freien Fahrt auf dem Kanal/Fluss und der Schleusenkammer gesehen werden. In diesem Bereich muss ein Schiff, das in die Schleuse einfahren möchte, die Geschwindigkeit auf ein angemessenes Maß drosseln, welches sehr viel tiefer liegt als die reguläre Schiffsgeschwindigkeit. Die Reduktion der Geschwindigkeit erfordert eine verringerte Propellerleistung und hat erhebliche Konsequenzen für die Manövrier- und Steuerbarkeit. Die Ruderkräfte sind proportional zum Quadrat der Anströmgeschwindigkeit. Diese wiederum hängt von der Relativgeschwindigkeit des Schiffs im Wasser und der momentanen Leistung des Propellers ab. Beide werden bei der Einfahrt in den Vorhafen reduziert. Daher sind externe Kräfte aus Wind, Strömung und wechselseitiger Beeinflussung etc. bei niedrigen Geschwindigkeiten sehr viel schwieriger zu kompensieren. Unter diesen Bedingungen ist es teilweise nötig zu anderen Mitteln der Schiffssteuerung zu greifen, wie Heck- und Bugstrahlruder oder externe Hilfsmittel wie Schlepper oder Verholleinen.

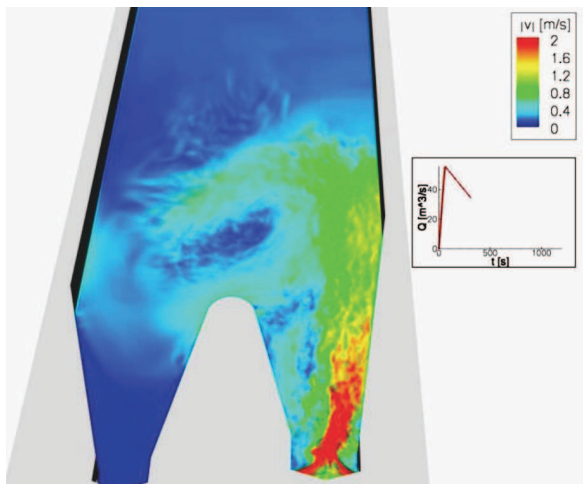
Neben der Funktion als Verbindungsglied zwischen Schleuse und Kanal wird der Vorhafen auch als Wartebereich genutzt, in dem Schiffe bis zum Freiwerden der Schleuse oder der Schifffahrtsstraße liegen können. Beide Funktionen und die zugehörigen Probleme werden in diesem Kapitel diskutiert. Die Präsenz veräuteter Schiffe im Vorhafen ist besonders in der Binnenschifffahrt, aber auch in der Nähe von Schleusen der Hochseeschifffahrt, nicht ungewöhnlich. Schiffe brauchen einen sicheren Liegeplatz, falls eine Weiterfahrt nicht möglich ist, insbesondere dann, wenn auf die Freigabe zur Schleusung gewartet werden muss oder priorisierte Schiffe anwesend sind.

Strömungen im Vorhafen können für langsam fahrende Schiffe, die zum Beispiel in die Schleuse einfahren, störend oder sogar gefährlich werden. Bild 6 zeigt den Einfluss einer durchbrochenen Trennmole, die das

Strömungsfeld im Vorhafen signifikant beeinflussen kann. In Bild 7 ist das numerische Strömungsfeld einer Schleusenkamerernteuerung dargestellt. Der entstehende Volumenstrom hat einen negativen Einfluss auf Schiffe, die in die Nachbarkammer einfahren. Zusätzlich werden weitere Ursachen externer Kräfte erklärt und relevante Richtwerte angegeben, wie zum Beispiel für den Durchfluss von Wasserkraftwerken (Bild 8). Da die Wassertiefe im Vorhafen mit der wichtigste Faktor für die Manövrierbarkeit von Schiffen ist, werden Richtwerte aus verschiedenen Ländern angegeben.



**Bild 6:** Einfluss einer durchbrochenen Trennmole zwischen Vorhafen und Fluss



**Bild 7:** Wirbelbildung im Vorhafen einer Doppelschleuse

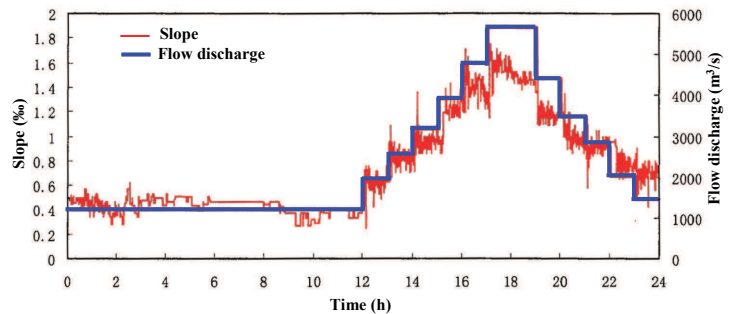
Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Wechselwirkung des schiffsinduzierten Strömungsfelds mit den umgebenden Strukturen. Bei ufernaher Fahrt werden durch den sogenannten „Bank-Effekt“ Kräfte und Impulse übertragen, die das Schiff an das Ufer ziehen. Dieser Effekt wird detailliert mit Beispielen erklärt und mögliche Vermeidungsstrategien gegeben.

Um ein Schiff im Vorhafen zu stoppen ist ein gewisses Maß an Raum nötig. Das Stoppen kleiner und mittlerer Schiffe stellt in der Regel kein größeres Problem dar, da die meisten dieser Schiffe aus eigener Kraft zum Halten kommen. Leider ist es gängige Praxis, dass kleinere Binnenschiffe unter Verwendung ihrer Festmacherleinen stoppen. Dieses Verfahren birgt große Gefahren, da die Lasten auf die Festmacherleinen sehr groß werden können. Größere Schiffe drosseln ihre Geschwindigkeit selbstständig (auf ungefähr 5 bis 6 Knoten) bis ein Festmachen von Schleppern gefahrlos möglich ist. Es werden Beispiele zur Handhabung von großen Schiffen durch Schlepper gegeben.

Vertäute Schiffe können auf verschieden Weisen durch schiffs- oder schleuseninduzierte Wellen gefährdet werden:

- Grundberührung durch sehr große vertikale Bewegungen
- Berührung der Anlegestelle oder Dalbe, hauptsächlich durch Rollen
- Reißen der Leinen durch horizontale Bewegungen

Die erlaubten Grenzen der Schiffsbewegung zur Sicherstellung eines gefahrlosen Zustands hängen immer von dem Schiff sowie dem verwendeten Stoßschutz und Festmachersystem ab. Im Vorhafen von Binnenschleusen vorbeifahrende Schiffe stellen auf Grund ihrer gedrosselten Geschwindigkeit meist keine Gefahr dar. Die größten Kräfte werden dort durch schleuseninduzierte Wasserspiegelgefälle und daraus resultierende Fließgeschwindigkeiten erzeugt. Im Bericht werden Gleichungen zur Berechnung von Kräften durch Wellen angegeben und die Anforderungen verschiedener Länder an die Festmacherausrüstung genannt.



**Bild 8:** Gemessener Kraftwerksdurchfluss und resultierende Wasser-spiegelneigung

### 3.3 Einfahrt in die Schleuse

Mehrere Faktoren bestimmen die Sicherheit bei der Einfahrt in die Schleuse. Zum Beispiel kann der Einfluss dichtebedingter Strömungen bei der Einfahrt signifikant sein. Besonders bei tiefen Seeschleusen am Übergang von Salz- zu Süßwasser können Dichteunterschiede bedeutende Strömungen herbeiführen (vgl. Bild 2). Typisch für eine Dichteströmung ist eine Süßwasserströmung an der Oberfläche und eine entgegengesetzt gerichtete Salzwasserströmung am Boden. Die Dichteströmungen, deren Stärke von der Salzgehaltsdifferenz zwischen Ober- und Unterwasser und der Öffnungsgeschwindigkeit des Schleusentores abhängt, können große Kräfte auf das manövrierende Schiff und seine assistierenden Schlepper bei der Schleusenand- und -einfahrt ausüben.

Des Weiteren sind die Auswirkungen der Schiffsgeschwindigkeit auf das Einfahrmanöver von Bedeutung, weshalb diese aus Sicherheitsgründen in einem angemessenen Rahmen liegen sollte. Zumeist ist die Einfahrtsgeschwindigkeit an Schleusen mit großer Breite und für entladene Schiffe höher. Die Einfahrtsgeschwindigkeit des Schiffs wird durch den großen Widerstand des beengten Profils begrenzt. Alle Wasserbewegungen, die durch das Schiff ausgelöst werden, hängen stark von der Schiffsgeschwindigkeit, dem Verhältnis von Schiffs- zu Schleusenquerschnitt und dem Verhältnis von Tiefgang zu Wassertiefe ab. Als Folge der hohen Fließgeschwindigkeit des Wassers, das dem Schiff bei der Einfahrt entgegenströmt, sinkt der Wasserspiegel entlang des Schiffs. Als Resultat dieser Absenkung kann das Schiff weiter einsinken (Squat), mit der Gefahr

den Dremmel zu berühren. Es werden verschiedene Ansätze zur Bewertung dieser Effekte vorgestellt.

### 3.4 In der Schleuse - bei geöffneten Toren

Wellen aus dem Vorhafen können in die Schleusenkammer laufen und die dort vertäuten Schiffe in Bewegung bringen. Hierbei beeinflusst die Form der Schleuseneinfahrt die Veränderung der Wellenhöhen. Eine Trichterform kann kurze Wellen deutlich verstärken und so zu größeren Unruhe in der Kammer führen als ein plötzlicher Übergang.

Wenn ein Schiff in eine Schleuse einfährt, erzeugt es Flachwasserwellen, die am gegenüberliegenden geschlossenen Schleusentor reflektiert werden. Ein bereits in der Kammer liegendes Schiff kann durch diese Bugwelle in Bewegung gesetzt und auf das gegenüberliegende Haupt geschoben werden. Wenn die Schließung des Tores und der Festmachprozess starten, bevor die eingetragenen Wellen abflachen, können große Kräfte in den Festmacherleinen entstehen.

Eine weitere Ursache von Wellen ist die Bewegung des Tores. Aufgrund des großen Vorhafenquerschnitts spielt der Einfluss der erzeugten Wellen hier normalerweise keine Rolle, kann in der Kammer selbst aber zu Störungen des Schleusenbetriebs führen. Es gibt viele verschiedene Arten von Schleusentoren, die detailliert in den PIANC-Berichten über Schleusen beschrieben sind (PIANC 1986 und PIANC 2009). Manche der Schleusentore bewegen nur eine sehr kleine Menge an Wasser während des Betriebs (Sektoren, Hubtore), wohingegen Stemmtore deutlich größere Wassermengen bewegen. Der Betrieb von Stemmtoren hat einen plötzlichen Fluss an Wasser zur Folge, der allerdings nur für eine kurze Zeit anhält. Durch die sehr kurze Wellenlänge dieser Wellen werden größere Schiffe nicht beeinflusst. Im Gegensatz dazu können kleine Schiffe, die einen großen Teil des Kammerquerschnitts blockieren, unerwartet in Bewegung gesetzt werden.

Da Schiffe typischerweise bei geöffnetem Schleusentor festgemacht werden, beinhaltet das Kapitel „In der Schleuse - bei geöffneten Toren“ auch die Richtlinien für Pollerabstand und -bemessung. Außerdem wird auf die Wahl zwischen festen und beweglichen Pollern und Erfahrungen aus der Festmachpraxis eingegangen (Bild 9).



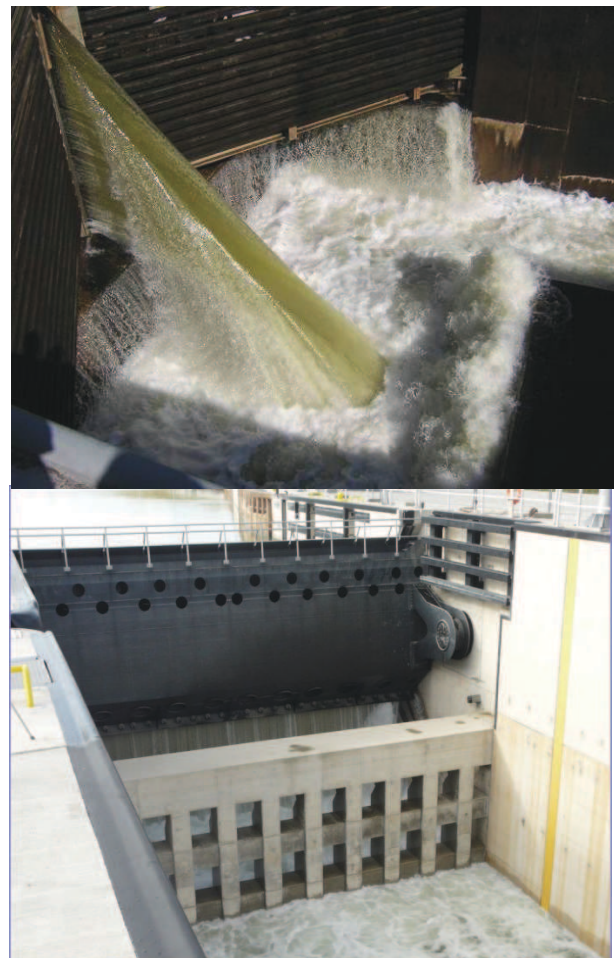
**Bild 9:** Synthetische Taue an Binnenschiffen

Im Bericht werden die Hauptursachen der in der Kammer auftretenden Wellen erläutert und Formeln zur Abschätzung der Schiffskräfte angegeben. Auch wenn die Amplituden der in der Kammer auftretenden Wellen oft klein sind, können die Auswirkungen auf Schiffe groß werden.

### 3.5 Schleusung

Der Schleusungsprozess selbst ist die kritischste Interaktion von Schleuse und Schiff. Daher werden alle relevanten Prozesse detailliert in diesem Teil des Berichts beschrieben.

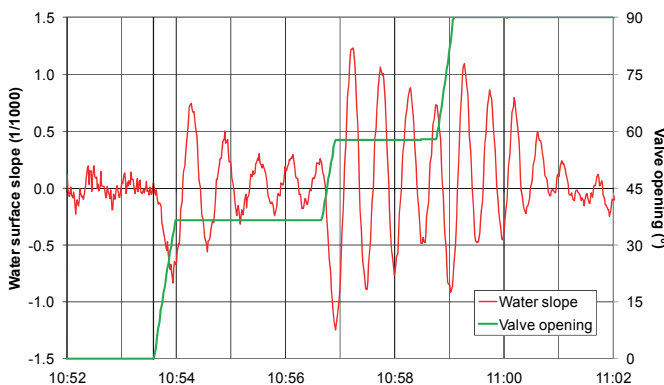
Nachdem das Schiff in der Kammer festgemacht hat und die Tore geschlossen sind, kann der Schleusungsprozess beginnen. Die Schleusenkammer wird entweder über ein Vorkopfsystem (Bild 10) oder ein komplexes System aus Kanälen und Absperrorganen, angetrieben durch die Gravitation, gefüllt oder geleert. Da der Zu- bzw. Abfluss aus der Kammer Wellen und Schiffskräfte hervorruft, sind Füll- und Entleersystem sorgfältig auszuwählen und der Volumenstrom auf angemessene Werte zu begrenzen. Die resultierenden Kräfte müssen klein genug sein, um einen sicheren und komfortablen Betrieb zu gewährleisten.



**Bild 10:** Sehr einfaches und hochentwickeltes Vorkopffüllsystem

Im Bericht wird ein Überblick über die am häufigsten verwendeten Füllsysteme gegeben. Außerdem werden die verschiedenen Ursachen von Kräften die während der Schleusung auftreten, zusammen mit Bewertungsmerkmalen für einen sicheren und komfortablen Betrieb aufgeführt. Danach werden die einzelnen Komponenten der Kräfte und damit verbundene physikalische Prozesse analysiert. Da Schützfahrpläne oft zu Problemen beim Schleusenbetrieb führen, werden deren Einflüsse erläutert. Bild 11 zeigt die Wasserspiegelneigung für ein schrittweise gezogenes Schütz, das aufgrund von Superpositionseffekten zu großen Wellen führt.

Abschließend werden die Vor- und Nachteile der möglichen Untersuchungsmethoden (numerische und physische Modelle, Feldmessungen) für den Schleusenfüllungs- und entleerungsprozess zusammengefasst. Zusammen mit den Richtlinien verschiedener Länder wird damit ein Überblick über die Schiffskräfte während der Schleusung und Möglichkeiten zur Beurteilung der Sicherheit gegeben.



**Bild 11:** Auswirkung eines un stetigen Schützfahrplans auf die Wasserspiegelneigung

**3.6 Verlassen der Schleuse**

Nach dem Erreichen des Zielwasserspiegels wird das Schleusentor geöffnet. In der Regel beginnt die Öffnung des Tores, wenn Sensoren eine bestimmte Minimaldifferenz der Wasserspiegel innerhalb und außerhalb der Kammer messen. Da die Wasserspiegeldifferenz nie Null ist, wird beim Öffnen immer eine Welle erzeugt. Dieser Effekt ist weniger ausgeprägt, wenn das Tor langsam geöffnet wird. Neben der Erklärung dieses Prozesses wird in dem Bericht eine Faustregel zur Abschätzung einer akzeptablen Minimaldifferenz erläutert.

Beim Füllen der Schleuse kann es zum Über- oder Unterschwingen des Wasserspiegels kommen, besonders dann, wenn das Füllsystem aus langen Kanälen besteht. In diesem Fall hat das Wasser in den Kanälen einen so großen Impuls, dass der Wasserspiegel in der Kammer über den Oberwasserspiegel steigt bzw. unter den Unterwasserspiegel sinkt. Um ein Überschwingen zu verhindern, ist der Schützfahrplan sorgfältig anzupassen. Dies kann erreicht werden, indem das Schütz geschlossen wird, bevor der Füll- bzw. Entleervorgang abgeschlossen ist. Andernfalls kann das Ausspiegeln sehr viel länger dauern (bis die Wellen abgeflacht sind) oder die Schiffskräfte groß werden (wenn das Tor im

falschen Moment geöffnet wird, zum Beispiel beim Auftreten des Maximums des Überschwingers).

Aufgrund des großen Widerstands des beengten Kammerquerschnitts beschleunigt ein die Schleusenammer verlassendes Schiff langsam und sinkt dabei ein (Entwicklung eines Squats). Das vom Bug verdrängte Wasser fließt sehr leicht aus dem geöffneten Schleusentor, allerdings nur mit Widerstand durch den sehr viel kleineren Querschnitt in Richtung Heck. Während des Ausfahrens aus der Schleusenammer kann es zu Grundberührung kommen. Im Bericht werden Erfahrungswerte angegeben, um abschätzen zu können bis zu welcher Geschwindigkeit Schiffe gefahrlos aus der Kammer ausfahren können (vgl. Bild 3).

Die „hydraulische Assistenz“ dient dazu Schiffen das Ausfahren aus der Kammer ins Unterwasser zu erleichtern: Die Schütze am Oberator werden leicht geöffnet, so dass das Schiff aus der Schleuse gedrückt wird. Dieses Verfahren wird für Hochseeschiffe mit einem sehr hohen Blockadeverhältnis am Panamakanal angewandt. Es wurde ebenfalls an deutschen Binnenschleusen untersucht, kommt momentan aber nicht zur Anwendung. Die Vor- und Nachteile werden in dem Bericht der Arbeitsgruppe 155 erläutert.

**3.7 Weitere Aspekte**

In diesem Kapitel werden Punkte aufgeführt, keinem der anderen Kapitel eindeutig zuzuordnen sind. Themen sind Sicherheitsaspekte (eine HAZOP Analyse für Schleusendurchfahrten), die Verwendung von Fendern und die Frage nach dem Umgang mit der Freizeitschifffahrt.

**4. Fazit**

Die Arbeit von Arbeitsgruppe 155 war bereits von erheblichem indirektem Nutzen, da die unterschiedlichen Ansichten der Experten in Bezug auf bestimmte Themen den Horizont aller Teilnehmer erweiterten. Zusätzlich wurde die Öffentlichkeit durch den organisierten Workshop auf der Smart-Rivers Conference 2013 integriert. Der Workshop zeigte die Bandbreite an Themen, die von der Arbeitsgruppe abgedeckt wurde und gab der Öffentlichkeit die Möglichkeit mit der Arbeitsgruppe zu interagieren.

Während den Arbeitstreffen der Gruppe (und in der Zwischenzeit) war es möglich eine passende Struktur des Berichts zu entwickeln und ihn mit wesentlichem Inhalt zu füllen. Es wurde deutlich, dass eine perfekte Struktur kein lohnenswertes Ziel darstellt, Aufbau und Inhalt sollen aber für den Leser verständlich sein. Ziele des Berichts sind das Aufzeigen von Schwierigkeiten bei der Interaktion von Schiff und Schleuse und die Vorstellung von Lösungswegen. Der Bericht soll Schleusenplanern und -betreibern einen größeren Einblick in die relevanten physikalischen Prozesse geben und Erfahrungswerte zur Vermeidung von Schwierigkeiten vorstellen.

Derzeit umfasst der Bericht 120 Seiten und wird voraussichtlich 2014 abgeschlossen.



### Literatur

PIANC (2009): Innovations in navigation lock design, *Report no. 106 - 2009*, PIANC Secretariat General, ISBN 978-2-87223-175-1, Brussels.

PIANC (1986): Final Report of the International Commission for the Study of Locks, PIANC, Brussels.

### Verfasser

**Dr.-Ing. Carsten Thorenz**

Bundesanstalt für Wasserbau

Kussmaulstraße 17

76187 Karlsruhe

Tel.: 0721/9726-3560

E-Mail: [carsten.thorenz@baw.de](mailto:carsten.thorenz@baw.de)