

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

## **Schulze, Lydia; Belzner, Fabian; Hartung, Torsten; Thorenz, Carsten Hydraulische Kriterien für die Dimensionierung von Schleusen: Neue Entwicklungen und künftige Herausforderungen**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104375>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schulze, Lydia; Belzner, Fabian; Hartung, Torsten; Thorenz, Carsten (2017): Hydraulische Kriterien für die Dimensionierung von Schleusen: Neue Entwicklungen und künftige Herausforderungen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Wasserbauliche Herausforderungen an den Binnenschiffahrtsstraßen. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 11-16.

### **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.



## **Hydraulische Kriterien für die Dimensionierung von Schleusen: Neue Entwicklungen und künftige Herausforderungen**

Lydia Schulze M. Eng., Bundesanstalt für Wasserbau

Fabian Belzner M. Eng., Bundesanstalt für Wasserbau

Torsten Hartung M. Sc., Bundesanstalt für Wasserbau

Dr.-Ing. Carsten Thorenz, Bundesanstalt für Wasserbau

### **Einleitung**

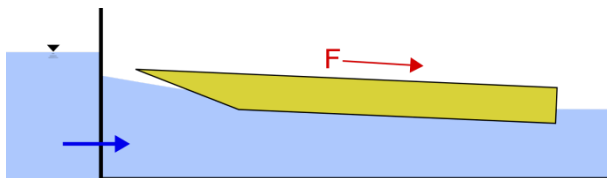
Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) betreibt etwa 400 Schiffsschleusenammern an den Bundeswasserstraßen, von denen etwa 47 % die durchschnittliche Nutzungsdauer von 80 Jahren bereits überschritten haben. Diese ungünstige Altersstruktur sowie veränderte Anforderungen an die Schleusenanlagen erfordern eine große Anzahl von Sanierungs- und Neubaumaßnahmen in den nächsten Jahrzehnten (vgl. BMVI 2016). Für eine wirtschaftliche und zukunftsorientierte Planung und Umsetzung der vielen zu erwartenden Neubau und Instandsetzungsprojekte der nächsten Jahre sollen dafür neueste wissenschaftliche Methoden eingesetzt und weiterentwickelt werden. An der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) werden derzeit in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sowohl die Kriterien für die Dimensionierung von Schleusen hinterfragt als auch die Methodik zur numerischen Simulation von Schleusungsprozessen weiterentwickelt. Ziel ist es, den Schleusungsvorgang mit gegenständlichen und numerischen Methoden verschiedener Dimensionen und Skalen oder einer Mischung verschiedener Methoden (hybride Modellierung) als Ganzes und im Detail beurteilen zu können. Die Herausforderung ist dabei, dass die Ergebnisse der verschiedenen Methoden vergleichbar und valide sein müssen. Weiterhin werden die Bemessungskriterien für Schleusen von Grund auf überarbeitet, so dass moderne semiprobabilistische Bemessungskonzepte angewendet werden können.

### **Dimensionierung von Schleusenfüllsystemen**

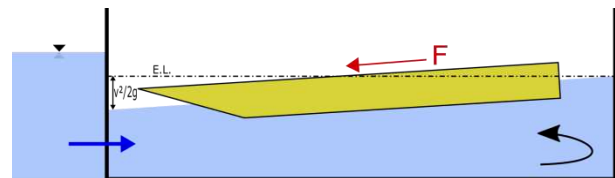
Bei der Planung und Optimierung von Schleusenfüllsystemen müssen im Wesentlichen drei Kriterien beachtet werden: Die Füllzeit sollte möglichst kurz sein, die Bau- und Betriebskosten sollten möglichst gering gehalten werden und zugleich muss die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu jeder Zeit gewährleistet sein. Die Sicherheit der zu schleusenden und in den Vorhäfen wartenden Schiffe ist dabei u.a. von den Kräften abhängig, die auf die Trossen der festgemachten Schiffe wirken. Beim schlagartigen Versagen einer solchen Trosse besteht Lebensgefahr für die Besatzung. Die wesentliche Schiffs kraft resultiert aus den unterschiedlichen Wasserständen entlang des Schiffes und kann als Hangabtriebskraft über das Wasserspiegelgefälle abgeschätzt werden. Durch zeitliche Veränderungen des Volumenstroms können Schwall- oder Sunkwellen in der Kammer entstehen, welche oszillierende Kräfte auf das Schiff in der Kammer verursachen. In den meisten Vorkopffüllsystemen erzeugt der erste Anstieg des Volumenstroms die maßgebliche Schiffs kraft während des Füllprozesses (vgl. Bild 1). Die wirkende Schiffs längskraft verhält sich dabei proportional zum zeitlichen Gradienten des Zuflussvolumenstroms. Anschließend ergibt sich durch die Abnahme der Fließgeschwindigkeit in der Kammer von Oberhaupt nach Unterhaupt ein Wasserspiegelgefälle in Richtung Oberhaupt, welches als statische Hangabtriebskraft in Richtung Oberhaupt auf das Schiff wirkt (vgl. Bild 2). Bei ungünstigen Vorkopffüllsystemen können Füllstrahlen, die direkt auf das in der Kammer liegende Schiff treffen, über den auftretenden Staudruck zusätzliche Kräfte auf das Schiff erzeugen.

Typischerweise steigen die wirkenden Schiffskräfte mit der Füllgeschwindigkeit und damit mit sinkender Füllzeit der Schleuse an. Die Kräfte können sowohl durch eine Optimierung des Füllsystems als auch der Füllstrategie verringert werden. Oft können dadurch die auf das Schiff wirkenden Längskräfte bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit deutlich reduziert werden oder im Umkehrschluss kann bei gleichbleibenden Schiffskräften die Füllzeit verringert werden.

Bei der hydraulischen Bemessung der Schleusenfüllsysteme existieren in Deutschland keine verbindlich festgelegten Grenzwerte für die auf ein Binnenschiff wirkenden Kräfte während der Schleusung. An der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) werden für die Bemessung derzeit Grenzwerte für die Trossenkräfte verwendet, die sich an den Überlegungen von Partensky (1986) orientieren. Bei Schleusungsvorgängen wird die Trossenkraft auf 1/600 des Bruttoschiffgewichtes beschränkt (Partensky 1986). Daraus können zulässige Schiffskräfte abgeleitet werden: Für ein Gütermotorschiff (GMS) ergibt sich mit dieser Annahme beispielsweise eine maximal zulässige Längskraft von 23 kN, für ein überlanges Gütermotorschiff (üGMS) kann eine zulässige Längskraft von 30 kN extrapoliert werden.



*Bild 1: Wasserspiegelgefälle und resultierende Schiffskraft in Richtung Unterhaupt durch den ersten Anstieg des Volumenstroms.*



*Bild 2: Umkehrung des Wasserspiegelgefälles und der resultierenden durch die Abnahme der Fließgeschwindigkeit vom Oberhaupt zum Unterhaupt.*

Trotz grenzüberschreitender Flotten unterscheiden sich die in Deutschland in der Regel verwendeten Dimensionierungskriterien von denen der angrenzenden Staaten. So werden beispielsweise in den Niederlanden die maximal zulässigen Schiffskräfte verbindlich anhand der Schiffsgröße gemäß „Classification of European Inland Waterways“ (CEMT) bestimmt. Dabei wird in Abhängigkeit der Gewichtskraft des Schiffs zwischen verschiedenen Schiffsklassen unterschieden (PIANC 2015). Die maximal zulässige Längskraft bei Schleusen mit Nischenpollern beträgt für ein üGMS 0,85 ‰ der Gewichtskraft (hier: 29 kN) und bei Schleusen mit Schwimmpollern 1,15 ‰ der Gewichtskraft (hier: 39 kN). Mit der höheren zulässigen Schiffskraft in Schleusen mit Schwimmpollern wird die konstante Vorspannung der Trossen berücksichtigt. Von dieser kann ausgegangen werden, da hier das Nachfieren der Trossen während der Schleusung entfällt.

### **Aktualisierung der Dimensionierungskriterien**

Im Rahmen eines neuen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens (FuE Vorhaben) an der BAW werden die bestehenden Kriterien für die Dimensionierung von Schleusen derzeit hinterfragt und überarbeitet. Ziel ist es, eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die zukünftige Dimensionierung von Schleusen zu schaffen. Dafür soll eine Optimierungsstrategie in Anlehnung an moderne Sicherheitskonzepte entwickelt werden, um die Möglichkeiten für eine sichere und effiziente Schleusenfüllung aufzuzeigen.

Zunächst wurden vorhandene Daten zu bestehenden Schleusen analysiert, um einen Überblick über die Varianz der maßgebenden Eigenschaften bei den heute vorhandenen Bauwerken zu erhalten. Dieser Analyse wurden Daten aus der Wasserbaudatenbank „WaDaBa“ zugrunde gelegt.

Mit vergleichsweise geringem Bau- und Wartungsaufwand eignen sich für geringe Fallhöhen (<10 m) die sogenannten Vorkopf-Füllsysteme, welche die Schleusenammer vom Oberhaupt über Füllorgane befüllen. Für größere Fallhöhen werden üblicherweise komplexere Füllsysteme wie Seiten- oder Grundlaufsysteme eingesetzt, die durch die Vergleichmäßigung des einströmenden Wassers über die gesamte Kammerlänge größere Volumenströme als Vorkopffüllsysteme erlauben. Eine erste Analyse zeigt, dass der Großteil der Schleusen Fallhöhen <10 m aufweist und über ein Vorkopffüllsystem befüllt wird. Lediglich 27 % der Schleusen des Datensatzes verwenden eine komplexere Füllstrategie (Bild 3). Die Füllzeit der meisten Schleusen mit weniger als 10 m Hubhöhe beträgt zwischen 8 und 15 Minuten. Um diese zu erreichen werden die Schleusen mit einem mittleren Volumenstrom bis maximal 50 m<sup>3</sup>/s befüllt. Betrachtet man lediglich den mittleren Füllvolumenstrom der Vorkopffüllsysteme, so ergibt sich in Abhängigkeit von der Fallhöhe der in (Bild 4) gezeigte Zusammenhang.

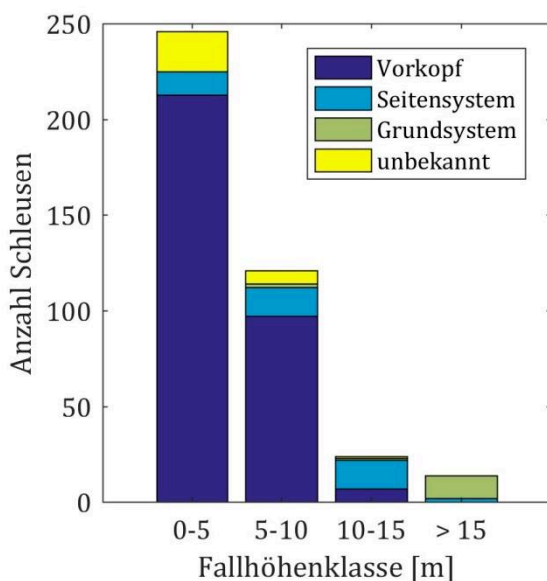


Bild 3: Verteilung der Füllsysteme in Abhängigkeit der Fallhöhe.

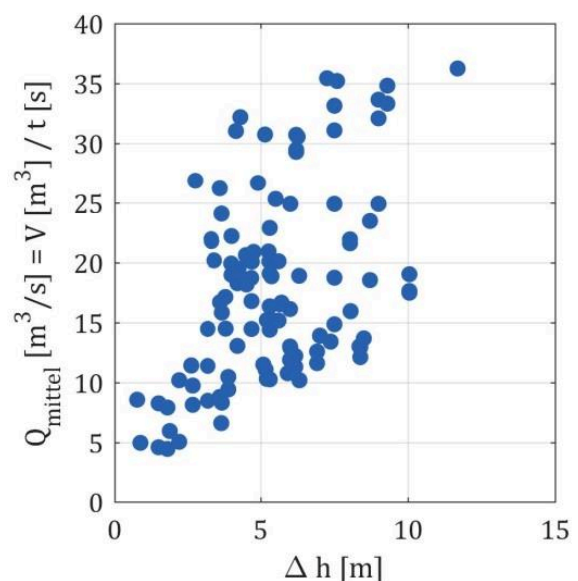


Bild 4: Mittlere Durchflussmenge in Abhängigkeit der Fallhöhe bei Vorkopffüllsystemen.

Obwohl die Schleusen mit gleichem Füllsystem ausgestattet sind, sind große Unterschiede in der mittleren Durchflussmenge bei gleichen Fallhöhen sichtbar. Diese große Varianz lässt sich mit den vorhandenen Informationen über die Schleusen nicht explizit begründen. Im Rahmen des FuE Vorhabens werden die Unterschiede und sich daraus ergebendes Optimierungspotential untersucht. Um die verwendeten Daten zu plausibilisieren und weiteres Detailwissen über bestehende Schleusenbauwerke und deren Betrieb zu sammeln, sind Befragungen von WSV-Mitarbeitern geplant. Die anonymisierten Daten sollen anschließend einer übergeordneten Optimierungsstrategie zugeführt werden. Des Weiteren können die gesammelten Daten auch für detaillierte Untersuchungen der hydrodynamischen Prozesse des Füllvorgangs in den verschiedenen Schleusenbauwerken genutzt werden, um bestehende Unterschiede und mögliches Optimierungspotential herauszuarbeiten.

Zur Untersuchung der hydrodynamischen Prozesse während einer Schleusung können analytische Ansätze, numerische Simulationen oder gegenständliche Modellversuche eingesetzt werden. Auch wenn gegenständliche Modelle zukünftig weiterhin eine wichtige Rolle bei der Optimierung des Füllsystems und der Füllstrategie spielen werden, ist die Verwendung numerischer Untersuchungsmethoden im Wasserbau essenziell.

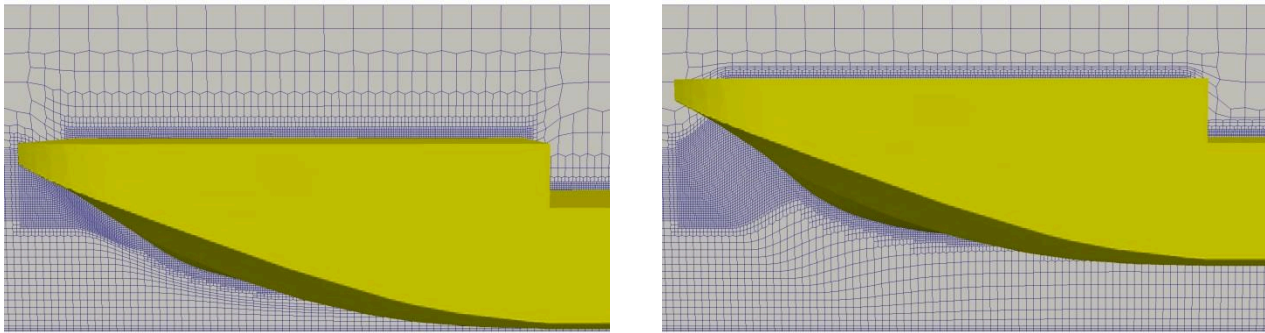
### 3D-numerische Modellierung von Schleusungsprozessen

Numerische Methoden, insbesondere dreidimensionale Verfahren, ermöglichen einen tiefgehenden Einblick in das vorhandene Strömungsfeld und die strömungsmechanischen Wechselwirkungen. Das Erreichen einer vergleichbaren Detailschärfe ist, wenn überhaupt möglich, bei gegenständlichen Modellen mit großem Messaufwand verbunden. Aus diesem Grund unterstützt die BAW Forschungsanstrengungen, die es ermöglichen sollen, Schleusungsprozesse mit dem in der BAW verwendeten Open-Source-Verfahren OpenFOAM® numerisch zu simulieren.

Eine Schiffsschleusung ist ein instationärer Prozess, der u. a. durch die Querschnittsfreigabe an den Füllorganen, einer Wasserspiegeländerung in der Schleusenammer und der Ausbreitung von Wellen und Füllstrahlen charakterisiert wird. Das zu schleusende Schiff ist dabei diesen Strömungsphänomenen ausgesetzt und erfährt entsprechende hydraulische Krafteinwirkungen, die eine primäre Zielgröße der Simulation darstellen. Die größte Herausforderung des Modellierungsprozesses besteht allerdings in der Berücksichtigung der bewegten Objekte (Schütze und Schiff). Die Spanne der zu überwindenden Wasserspiegeldifferenzen liegt zwischen wenigen Metern an den deutschen Seeschleusen des Nord-Ostsee-Kanals und annähernd 38 Metern an der geplanten Schleuse Lüneburg. Dieser große vertikale Bewegungsumfang des Schiffes während der Schleusung bei gleichzeitig sehr geringer Distanz zwischen Schiffsrumpf und Kammerwand/-sohle macht individuelle Modellierungskonzepte notwendig. Die verschiedenen Methoden zur Berücksichtigung der Schiffsbewegung weisen spezifische Vor- und Nachteile auf. Die Unterschiede kommen einerseits in der Komplexität der Verfahren, andererseits in der Realisierbarkeit des tatsächlichen Bewegungsumfangs zum Ausdruck. Eine wesentliche Anforderung an alle Konzepte ist ein hohes Maß an Massenkonservativität, so dass der Zufluss in die Schleusenammer allein durch die Öffnung der Füllorgane bestimmt wird. Dies ergibt sich aus dem eng begrenzten Volumen der Schleusenammer und der Sensitivität der Schiffskräfte gegenüber Wasserspiegeldifferenzen entlang des Schiffsrumpfes. Derzeit werden an der BAW drei Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Aussagegenauigkeit getestet. Es handelt sich jeweils um Löser für die Simulation von Strömungen mit großflächiger freier Oberfläche, die auf den Volume-of-Fluid-Ansatz zurückgreifen. Alle Löser sind für einen massiv parallelen Betrieb auf Hochleistungsrechnern geeignet und können aufgrund der Open-Source-Umgebung an die individuellen Anforderungen des Anwenders angepasst werden.

Das Schiff wird bei der Modellierung als starrer Körper behandelt, dessen Freiheitsgrade in Anlehnung an ein vertäutes Schiff bzw. gemäß der Schiffskraftmessenanlage gegenständlicher Modelle eingeschränkt sind. Die Lösung der inkompressiblen mehrphasigen Navier-Stokes-Gleichungen liefert bei integraler Betrachtung der Druckwerte einen resultierenden Kraft- bzw. Drehmomentvektor für das Schiff. Unter Berücksichtigung der Schiffsmasse und des Trägheitsmomentes liegen nun alle Eingangsgrößen vor, um aus den Bewegungsgleichungen eine Translations- und Winkelbeschleunigung für das Schiff zu ermitteln. Die fluidinduzierte Objektbewegung ist in iterativer Weise mit der Lösung des Strömungsfeldes gekoppelt, um ein Gleichgewicht zwischen beiden Lösungsgrößen herzustellen.

Den elementarsten Ansatz unter den derzeit betrachteten numerischen Methoden zur Berücksichtigung von Starrkörperbewegungen stellt die Deforming-Mesh-Methode dar. Sie zeichnet sich durch einen überschaubaren Preprocessing-Aufwand, Robustheit und verhältnismäßig geringe Rechenzeiten aus. Der Grundgedanke dieser Methode ist es, dass Objekte durch ihre Bewegung das sie umgebende Berechnungsgitter verformen (Bild 5).



*Bild 5: Verformung des Berechnungsgitters durch die Hubbewegung des Schiffes während des Schleusungsprozesses.*

Mit zunehmendem Bewegungsumfang wächst jedoch auch der Grad der Gitterdeformation bis hin zu einem nicht funktionsfähigen Verzerrungszustand, worin der wesentliche Nachteil dieser Methode begründet ist. Weil das verformbare Gittergebiet durch den geringen Abstand zwischen Schiffsrumpf und Kammersohle im Verhältnis zum angestrebten Bewegungsumfang klein ist, bleibt der Anwendungsbereich dieser Methode auf Schleusen mit sehr geringer Hubhöhe beschränkt.

Die Gitterverzerrung ist primär auf die vertikale Hubbewegung des Schiffes zurückzuführen. Um dennoch Schleusungsprozesse mit großer Hubhöhe abbilden zu können, wurde eine Layer-Addition-Methode realisiert, die während der Laufzeit Topologieänderungen im Berechnungsgitter ermöglicht. Dabei wird das Berechnungsgitter in die Lage versetzt, ausgehend von einer horizontalen Ebene unterhalb des Schiffes durch das Einfügen ganzer Zellschichten zu wachsen. Auf diese Weise kann die maßgebende Vertikalbewegung des Schiffes realisiert werden, ohne starke Gitterverzerrungen hervorzurufen. Der wachsende Gitterbereich endet zwischen Schiffsbug und Schleusentor. Dort ist ein sogenanntes Sliding Interface definiert, das die relative Bewegung zwischen dem statischen und dem dynamischen Gitterareal ermöglicht. Der erweiterten Anwendbarkeit stehen jedoch deutlich erhöhte Preprocessing-Anforderungen, merklich gesteigerte Rechenzeiten und Stabilitätsprobleme entgegen, sodass dieser Ansatz bei der Modellierung von Schleusungsprozessen möglicherweise zugunsten fortschrittlicherer Methoden nicht weiter verfolgt werden wird.

Eine weitere Methode ist die Overset-Mesh-Methode. Sie ermöglicht es, für das bewegliche Objekt ein körperangepasstes Berechnungsgitter zu erzeugen, das anschließend mit dem gebietsbeschreibenden Hintergrundgitter überlagert werden kann. Beide Gitter können sich relativ zueinander bewegen, während die Feldgrößen über ein Interpolationsschema zwischen den Gitterregionen ausgetauscht werden. Damit ist der Bewegungsumfang des Schiffes im Rahmen des Hintergrundgitters beliebig. Allerdings ist der Aspekt der Massenkonservativität kritisch zu prüfen. Derzeit werden an der BAW alle drei beschriebenen Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Aussagegenauigkeit untersucht.

Ein weiteres, viertes Verfahren – die Immersed-Boundary-Methode – befindet sich aktuell in der Entwicklung und wird zukünftig den Bestand der zur Verfügung stehenden Methoden zur Einbindung bewegter Objekte in die 3D-numerische Modellierung von Schleusungsprozessen ergänzen.

## **Ausblick**

Sowohl die Entwicklung der Methoden der dreidimensionalen Modellierung von Schleusungsprozessen als auch die Überarbeitung der Dimensionierungskriterien soll es zukünftig ermöglichen Planungen zu optimieren und Planungsziele zu bewerten. Auch bestehende Schleusen können damit überprüft und ggf. effizienter betrieben werden. Die Weiterentwicklung der bereits bestehenden Methoden und die Entwicklung neuer Methoden ist dabei stets eng verknüpft mit der Validierung an Labormodellen oder Naturmessungen, so dass trotz neuer Simulationsmethoden der Bereich des wasserbaulichen Versuchswesens als klassische Methode bei der Beurteilung von Schleusungsvorängen weiter eine große Bedeutung hat. Neue Entwicklungen können in der Projektarbeit erst dann eingesetzt werden, wenn diese entsprechend validiert sind und seitens der Bearbeiter genügend Erfahrung besteht, so dass die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu jedem Zeitpunkt garantiert ist.

## **Literatur**

BMVI (2016): Verkehrsinfrastrukturbericht 2016 - Auszug Wasserstraßen. Online verfügbar unter <http://www.vbw-ev.de/en/service/download/documents/item/bmvi-verkehrsinfrastrukturbericht-2016-auszug-wasserstrassen.html>.

Partenscky, H.-W. (1986): Binnenverkehrswasserbau. Schleusenanlagen. Berlin Heidelberg NewYork Tokyo: Springer.

PIANC (2015): PIANC InCom WG 155. Ship Behaviour in Locks and Lock Approaches. Unter Mitarbeit von C. Thorenz, D. Bousmar, J.-P. Dubbelman, J. Li, Spitzer D., J. J. Veldman et al. Hg. v. PIANC.