

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

**Belzner, Fabian; Simons, Franz; Thorenz, Carsten**

## **Ein anwendungsorientiertes Modell für Schleusenfüllprozesse**

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/20.500.11970/107216>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Belzner, Fabian; Simons, Franz; Thorenz, Carsten (2018): Ein anwendungsorientiertes Modell für Schleusenfüllprozesse. In: PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 34. Internationaler Schifffahrtskongress; Panama City, Panama, 07. - 11. Mai 2018. Bonn: PIANC Deutschland. S. 5-21.

### **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.



## Ein anwendungsorientiertes Modell für Schleusenfüllprozesse

von Fabian Belzner<sup>1</sup>, Franz Simons<sup>1</sup> und Carsten Thorenz<sup>1</sup>

### 1. Einleitung

Mit einer Gesamtlänge von 7.300 km sind die deutschen Binnenwasserstraßen das größte Wasserstraßennetz Westeuropas. Die auf diesen Wasserwegen transportierten Gütermengen beliefen sich 2016 auf etwa 221 Millionen Tonnen bzw. 8 % des gesamten Güteraufkommens in Deutschland. Rund 400 Schleusen sind Teil des Wasserstraßennetzes und von zentraler Bedeutung für die Wasserstraßeninfrastruktur, da sie es der Schifffahrt ermöglichen, lokale Höhenunterschiede zu überwinden. Die Schleusen befinden sich an staugeregelten Flüssen, zwischen Kanalstrecken oder an Verbindungspunkten. Ihr sicherer und effizienter Betrieb ist eine Grundvoraussetzung für die Beförderung von Gütern auf den Wasserstraßen. Eine der Hauptaufgaben der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) besteht in der Unterstützung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes beim Entwurf und Bau solcher Schleusen. Idealerweise werden bei einem Minimum an Bau- und Unterhaltungsaufwand die Anforderungen einer kurzen Schleusungszeit und der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gewährleistet.

Am Anfang der Planung steht der hydraulische Entwurf, bei dem Anforderungen hinsichtlich Bauwerksstruktur, Betrieb und Sicherheit zu berücksichtigen sind. Unter hydraulischen Gesichtspunkten muss ein Füllsystem gefunden werden, bei dem möglichst geringe Kräfte auf das Schiff wirken und gleichzeitig eine möglichst kurze Füllzeit gewährleistet ist. Veränderungen am Füllsystem oder an der Schützöffnungsgeschwindigkeit können die auf das Schiff wirkenden Kräfte stark beeinflussen und zum Reißen der Trossen führen. Ein Überblick über die hydraulischen und konstruktiven Anforderungen an Schiffsschleusen findet sich in Partensky (1986) oder PIANC (2015).

Die auf ein Schiff wirkenden Kräfte können heute mit Hilfe von Naturmessungen, gegenständlichen oder numerischen Modellen ermittelt werden. Naturmessungen sind schwierig durchzuführen, da ein Schleusenprototyp und ein reales Schiff benötigt werden. Die Messtechnik muss hohen Kräften und Drücken, Strömungsgeschwindigkeiten und in einigen Fällen sehr niedrigen Temperaturen widerstehen. Außerdem muss während der Messung

die Sicherheit von Schiff und Besatzung garantiert werden. Faktoren wie Verkehrsaufkommen oder Wetterbedingungen bestimmen oft die Länge der Messperiode. Häufig sind nur wenige Versuche möglich und die Messungen erfordern eine sorgfältige Planung, da sich die Messmethode während der Versuche nicht mehr ändern lässt. In ihren Ausführungen weisen Bousmar et al. (2017) auf die Bedeutung von Naturmessungen für die Diagnose bei bestehenden Schleusen hin, erwähnen aber auch die Schwierigkeiten, die mit solchen Messungen unter ungünstigen Bedingungen verbunden sind.

Beim Entwurf neuer Schleusen sind Messungen vor Ort nicht möglich, da in der Regel noch keine Prototypen existieren. Der klassische Ansatz zur Untersuchung und Optimierung in Planung befindlicher Schleusen besteht in der Durchführung von Versuchen an einem maßstäblichen gegenständlichen Modell. Eine Beschreibung solcher Versuche findet sich beispielsweise bei Thorenz und Anke (2013) oder Van der Ven et al. (2015). Maßstabsmodelle haben den Vorteil, dass sie in einer trockenen und beheizten Laborumgebung errichtet werden können und die Durchführung einer großen Anzahl Versuche innerhalb kurzer Zeit ermöglichen. Für den Bau der Modelle sind jedoch auch mindestens einige Monate zu veranschlagen; bei komplexen Schleusen kann die Dauer sogar mehr als ein Jahr betragen. Die Ergebnisse können durch Maßstabs- effekte oder unerwünschte Interaktionen zwischen Modellphysik und Messtechnik beeinflusst werden. Darüber hinaus lassen sich nicht alle relevanten Effekte in einem maßstabgetreuen Modell reproduzieren. Das elastische Verhalten der Trossen wird zum Beispiel in gegenständlichen Modellen nicht reproduziert, da die Handhabung der Taue unter realen Bedingungen häufig unbekannt und schwer vorherzusagen ist. Dennoch sind gegenständliche Maßstabsmodelle aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit und des umfassenden Erfahrungsschatzes die gängigste Methode, um die auf das Schiff wirkenden Kräfte zu bestimmen.

Mit der Zunahme der Rechenleistung in den vergangenen Jahren kam es auch bei der Entwicklung multidimensionaler numerischer Verfahren zu erheblichen Fortschritten (Thorenz 2009). Es ist heute möglich, hochauflösende dreidimensionale Simulationen von instationären hydromechanischen Phänomenen wie etwa der Füllung einer Schleuse durchzuführen. Zur Simulation des schwimmenden Schiffs stehen eine Vielzahl an Verfahren zur Verfügung, die jedoch ein hohes Maß an Knowhow und beträchtliche Rechenleistung erfordern. Für einen Schleusenfüllprozess mit schwimmendem Schiff, beweglichen Schützen etc. werden selbst mit einem Hochleistungscluster mehrere Tage Rechen-

---

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Wasserbau, fabian.belzner@baw.de

zeit für die Simulation benötigt. Der Ansatz ist daher noch nicht für die Simulation einer großen Zahl von Fällen geeignet. Eine numerische Auswertung des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen findet sich bei Thorenz (2010), einen Überblick über die numerischen Methoden zur Simulation des Schleusenfüllprozesses mit OpenFOAM® geben Thorenz et al. (2017).

Für die frühe Planungsphase, aber auch für die Bewertung kleinerer baulicher Änderungen in der endgültigen Planung sind beide Verfahren nicht geeignet. Der Zeitaufwand für gegenständliche oder numerische Modellversuche ist häufig zu groß. Aus diesem Grund sind vereinfachte Modelle von Interesse, in denen die wichtigsten hydraulischen Phänomene berücksichtigt werden und die eine logische Schätzung und kurzfristige Prognose der zu erwartenden Kräfte auf den Schiffskörper zusammen mit den Füllzeiten ermöglichen. Für die grundlegenden Phänomene stehen analytische Gleichungen zur Verfügung. Um eine bessere Approximation zu erreichen, sind komplexere Analysetools erforderlich. Die Füllung und Entleerung einer Schleusenkammer über ein Vorkopffüllsystem kann mit LOCKFILL analysiert werden (De Loor 2016). LOCKFILL basiert auf der Überlagerung der Lösungen für verschiedene Gleichungen, die das Strömungsfeld in der Schleusenkammer beschreiben und aus analytischen Überlegungen abgeleitet wurden.

Bisherige Erfahrungen haben gezeigt, dass die Wellenausbreitung in der Schleusenkammer einen wesentlichen Einfluss auf die Schiffskräfte hat. Es wird ein Analysetool auf Basis der eindimensionalen Saint-Venant-Gleichungen vorgestellt, welches es erlaubt, Schleusenfüllungen zu simulieren und damit Aussagen über die auf das Schiff wirkenden Kräfte aufgrund unterschiedlicher hydraulischer Bedingungen zu treffen. In diesem Beitrag werden zunächst die wichtigsten Aspekte der hydrodynamischen Prozesse bei der Schleusenfüllung erläutert. Im Anschluss folgt eine Beschreibung des numerischen Ansatzes des neuen eindimensionalen Schleusenmodells. Es werden auf Basis von Daten aus gegenständlichen Modellversuchen Ergebnisse einer Kalibrierung vorgestellt und Anwendungsgrenzen des Modells aufgezeigt. Den Abschluss bilden die Zusammenfassung und Schlussfolgerungen. Alle in diesem Beitrag verwendeten Symbole sind in Kapitel 7 aufgeführt und erläutert.

## 2. Hydrodynamische Prozesse bei der Schleusenfüllung

Während der Füllung einer Schleusenkammer mit Vorkopffüllsystem können unterschiedliche Prozesse beobachtet werden, die miteinander in Wechsel-

wirkung stehen. Zu den wichtigsten Phänomenen, die Schiffslängskräfte verursachen, zählen:

- eine, durch die anfängliche Schützöffnung ausgelöste Schwallwelle,
- die Ausbreitung des Füllstrahls,
- ein Wasserspiegelgefälle aufgrund der Null-Geschwindigkeit-Randbedingung am Unterhaupt der Kammer,
- dynamische Effekte wie die Wellenausbreitung in der Kammer sowie
- Energiehöhenverluste infolge von Wandreibung oder Kontraktions-/Expansionsverlusten.

Alle Auswirkungen dieser Phänomene müssen bei der Einschätzung der beim Schleusenfüllprozess auf das Schiff wirkenden Kräfte berücksichtigt werden. Die auf das Schiff wirkenden Längskräfte sind auf zwei vorherrschende Mechanismen zurückzuführen: Die Schiffslängskraft infolge des Wasserspiegelgefälles und die aus dem Auftreffen des Füllstrahls auf das Schiff resultierende Kraft. Letzteres Phänomen sollte grundsätzlich vermieden werden. Eine weitere Beschreibung des Sachverhalts findet sich zum Beispiel in Vrijburcht (1991).

Der Zufluss in die Schleusenkammer  $Q$  [m<sup>3</sup>/s] zu einem beliebigen Zeitpunkt lässt sich als Funktion der Druckhöhe  $\Delta h$  [m], des Öffnungsquerschnitts  $A_{\text{Schütz}}$  [m<sup>2</sup>] und eines zeitunabhängigen Zuflussbeiwerts  $\mu$  [-], welcher die Geometrie des Kontrollquerschnitts berücksichtigt, ausdrücken. Der Zuflussbeiwert kann aus Fachliteratur, mit gegenständlichen Modellversuchen oder mit numerischen Modellen ermittelt werden. Für Tafelschütze liegt er typischerweise zwischen 0,6 und 1,0. Anmerkung:  $\Delta h$  ist die maximale Druckhöhe, das heißt bei einem eingestauten Füllsystem entspricht dies der Wasserspiegeldifferenz zwischen Oberwasser- und Kammerwasserstand. Bei nicht eingestauten Systemen reduziert sie sich auf die maximale Druckhöhe über dem Kontrollquerschnitt. Der Zufluss in die Schleusenkammer berechnet sich wie folgt:

$$Q = \mu \cdot A_{\text{Schütz}} \cdot \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad (1)$$

Die Berechnung des Wasserspiegels für eine bekannte Kammerbruttofläche  $A_{\text{Kammer}}$  [m<sup>2</sup>] erfolgt auf Basis von:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{Q}{A_{\text{Kammer}}} \quad (2)$$

Zu Beginn des Schleusenfüllprozesses wird durch den Gradienten des Zuflussvolumenstroms eine erste Schwallwelle ausgelöst, die zu einem abwärts gerichteten Wasserspiegelgefälle führt. Das durch diesen ersten Schwall  $I_{\text{Schwall}}$  [-] verursachte Gefälle

## Ein anwendungsorientiertes Modell für Schleusenfüllprozesse

ist dabei proportional zum Gradienten des Zuflussvolumenstroms:

$$I_{\text{Schwall}} = - \frac{dQ}{dt \cdot (W_{\text{Kammer}} \cdot h - A_{\text{Schiff}})} \quad (3)$$

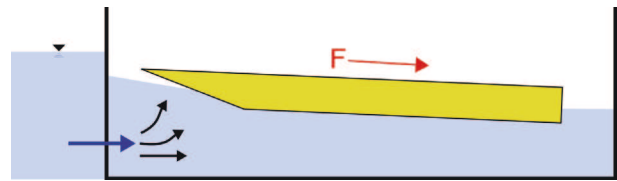
wobei  $W_{\text{Kammer}}$  [m] die Kammerbreite und  $A_{\text{Schiff}}$  [m<sup>2</sup>] die Schiffsquerschnittsfläche ist. Gemäß Gleichung (1) skaliert der Zufluss in die Schleusenammer nahezu linear mit der Schützöffnungs-geschwindigkeit. Dies bewirkt, dass das aus dem ersten Schwall resultierende Wasserspiegelgefälle ebenfalls linear mit der Schützöffnungsgeschwindigkeit skaliert. Bei Schleusen mit großen Hubhöhen und starker Energiedissipation am Oberhaupt kann die Kraft aus dieser Schwallwelle dominieren. Wird die anfängliche Schützöffnungsgeschwindigkeit zu Beginn des Füllprozesses für eine bestimmte Zeit verringert, kann diese Initialkraft minimiert werden. Da der Zufluss zu Beginn ohnehin gering ist, verlängert diese Reduktion der Schützöffnungsgeschwindigkeit zu diesem Zeitpunkt die Füllzeit kaum. Bild 1 (a) zeigt dieses Gefälle und die daraus resultierende zum Unterhaupt gerichtete Schiffslängskraft. Nach dem ersten Schwall entwickelt sich eine Geschwindigkeitsverteilung vom Oberhaupt zum Unterhaupt.

Bei „idealer“ Energiedissipation am Schleusenoberhaupt entspricht die mittlere Geschwindigkeit  $u_{\text{mittel}}$  [m/s] hinter dem Einlauf am Oberhaupt dem Zuflussvolumenstrom dividiert durch die zur Verfügung stehende Querschnittsfläche der Kammer:

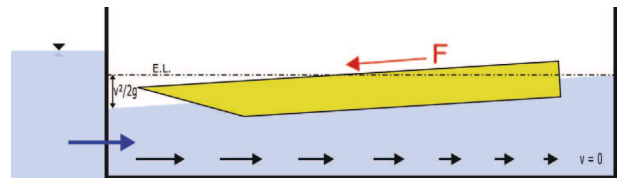
$$u_{\text{mittel}} = \frac{Q}{W_{\text{Kammer}} \cdot h - A_{\text{Schiff}}} \quad (4)$$

Das Untertor der Schleusenammer ist während des Füllprozesses geschlossen. Die Fließgeschwindigkeit am Kammerende beträgt daher Null. Unter Annahme einer konstanten Energiehöhe in der Kammer sowie einer vom Oberhaupt zum Unterhaupt linear abnehmenden Geschwindigkeitshöhe, wie in Bild 1 (b) illustriert, stellt sich ein zum Oberhaupt gerichtetes stationäres Wasserspiegelgefälle  $I_{\text{stat}}$  [-] zum Ausgleich der abnehmenden Geschwindigkeitshöhe ein. Dieses Gefälle ist somit von der mittleren Zuflussgeschwindigkeit  $u_{\text{mittel}}$  und der Länge der Schleusenammer  $L_{\text{Kammer}}$  [m] abhängig und kann mittels Gleichung (5) errechnet werden.

$$I_{\text{stat}} = \frac{u_{\text{mittel}}^2}{2 \cdot g \cdot L_{\text{Kammer}}} \quad (5)$$



(a) Zum Unterhaupt gerichtetes Wasserspiegelgefälle aufgrund des ersten Schwalls



(b) Zum Oberhaupt gerichtetes Wasserspiegelgefälle aufgrund abnehmender Geschwindigkeit

Bild 1: Zeitliche Progression der Schiffskräfte während des Schleusenfüllprozesses

Bei einer Betrachtung der Längskräfte als Hangabtriebskräfte und unter Vernachlässigung des Füllstrahls in Schiffsnähe sowie anderer dynamischer Phänomene lassen sich die Schiffskräfte ausgehend vom Wasserspiegelgefälle um das Schiff grob abschätzen, indem die einzelnen Gefälle addiert und mit der Masse des Schiffes  $m_{\text{Schiff}}$  [kg] multipliziert werden:

$$F = (I_{\text{Schwall}}^n + I_{\text{stat}}^m) \cdot m_{\text{Schiff}} \quad (6)$$

Die Schwallwellen breiten sich in der Kammer aus und werden an beiden Enden reflektiert, sodass ein Schwappeneffekt entsteht. Die Berechnung der Schleusungszeit  $T$  [s] erfolgt mittels der Gleichung für die Wellenfortschrittsgeschwindigkeit im Flachwasser und der Geometrie von Kammer und Schiff:

$$T = 2 \cdot \left( \frac{L_{\text{Kammer}} - L_{\text{Schiff}}}{\sqrt{g \cdot h}} + \frac{L_{\text{Schiff}}}{\sqrt{g \cdot \left( h - \frac{A_{\text{Schiff}}}{W_{\text{Kammer}}} \right)}} \right) \quad (7)$$

Eine erste Näherung für die während des Schleusenfüllprozesses auf das Schiff wirkenden Kräfte ist ohne größeren Aufwand mittels Gleichung (6) möglich. Wesentliche dynamische Effekte wie die Wellenausbreitung, der Einfluss des Füllstrahls, Reibungsverluste oder die zeitliche Entwicklung der Schiffskräfte werden in diesem vereinfachten Ansatz vernachlässigt. Dennoch ermöglicht er unter Zuhilfenahme eines Taschenrechners eine grobe Abschätzung der wirkenden Schiffslängskräfte innerhalb weniger Minuten. Es sei an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass die hier vernachlässigten dynamischen Effekte einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben können. Ein vertiefter Ansatz ist daher wünschenswert.

## 3. Eindimensionales Schleusenmodell

### 3.1 Einleitung

Aufgrund der Defizite der vereinfachten analytischen Ansätze wurde für den Schleusenfüllprozess ein eindimensionales Modell implementiert. Dabei wurde von der Annahme ausgegangen, dass dieser Ansatz zielführender ist als die Anpassung der analytischen Approximationen an komplexere Situationen und die Superposition mehrerer Einflüsse. Das eindimensionale Modell bietet zudem Erweiterungsmöglichkeiten, z. B. die Kopplung an eindimensionale Rohrleitungsnetzmodelle, um komplexere Füllsysteme zu simulieren.

### 3.2 Grundlegende Gleichungen

Bei Füllung vom Oberhaupt her ist die Strömung in Kammerlängsrichtung die dominierende Größe und Geschwindigkeitsgradienten senkrecht dazu können vernachlässigt werden. Weitere Annahmen sind eine horizontale Wasseroberfläche, eine hydrostatische Druckverteilung sowie ein geringes Energieliniengefälle. Unter Vernachlässigung von Phänomenen, die zu lateralen Wasserspiegelneigungen und Kräften führen könnten, kann die Strömung in der Schleusenammer mit den eindimensionalen (1D) Saint-Venant-Gleichungen beschrieben werden. Diese ermöglichen die Berechnung der Wassertiefe und einer mittleren Fließgeschwindigkeit an diskreten Querprofilen in der Kammer. Die 1D-Saint-Venant-Gleichungen sind ein System von zwei partiellen Differentialgleichungen zur Beschreibung der Masse- und Impulserhaltung in einem Gerinne. Die Herleitung und mehrere numerische Lösungsansätze dieser Gleichungen werden von Cunge et al. (1980) beschrieben. In einer konservativen Formulierung der 1D-Saint-Venant-Gleichungen werden die beiden Hauptvariablen  $Q$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] und  $A$  [ $\text{m}^2$ ] verwendet (Jirka und Lang 2009):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \beta \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (I_0 - I_e - I_R) \quad (9)$$

$I_0$ ,  $I_e$  und  $I_R$  in Gleichung (9) stehen für das Sohlgefälle sowie die durch örtliche Kontraktions-/Expansionsverluste und Reibung bedingten Gefälle. Die Schiffslängskräfte lassen sich aus dem Wasserspiegelgefälle ableiten.

### 3.3 Betrachtung des Füllstrahls

Eine Voraussetzung für die Verwendung der 1D-Saint-Venant-Gleichungen ist die Annahme einer

homogenen Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Querprofile. Tatsächlich kann sich aus Richtung des Obertors ein Füllstrahl ausbreiten, der aufgrund der hohen Geschwindigkeit innerhalb des Strahls und geringer Geschwindigkeiten in der angrenzenden Umgebung zu einer stark heterogenen Geschwindigkeitsverteilung führt (vgl. Bild 9). Die Proportionalität des lokalen Impulsflusses zum Quadrat der lokalen Geschwindigkeit bedeutet, dass die mittlere Fließgeschwindigkeit nicht mehr zur Berechnung der konvektiven Beschleunigung in Gleichung (9) verwendet werden kann. Dieses Problem wird in der Regel durch den Boussinesq-Koeffizienten  $\beta$  [-] korrigiert, welcher das Verhältnis von mittlerer Fließgeschwindigkeit  $\bar{u}$  [ $\text{m/s}$ ] zur Summe der lokalen Fließgeschwindigkeiten im Strahl betrachtet. Im vorliegenden Beitrag wird eine diskretisierte Version betrachtet, wobei  $A$  [ $\text{m}^2$ ] für die gesamte Querschnittsfläche steht, die sich in  $K$  Flächen  $A_k$  [ $\text{m}^2$ ] mit den Geschwindigkeiten  $u_k$  [ $\text{m/s}$ ] unterteilen lässt:

$$\beta = \frac{\sum_0^K u_k^2 \cdot A_k}{\bar{u}^2 \cdot A} \quad (10)$$

Unter Annahme von nur zwei Querschnittsflächen  $A$  (die gesamte Querschnittsfläche) und  $A_{\text{Strahl}}$  [ $\text{m}^2$ ] (die den Füllstrahl enthaltende Teilfläche von  $A$ ), kann Gleichung (10) wie folgt vereinfacht werden:

$$\beta = \frac{A}{A_{\text{Strahl}}} \quad (11)$$

Das Gleichgewicht zwischen konvektiver Beschleunigung und dem Gradienten von  $h$  in Gleichung (9) für konstante Volumenströme führt zu einer Wasserspiegelabsenkung in Folge hoher, aus einem ausgeprägten Füllstrahl resultierender,  $\beta$ -Werte. Dieser Effekt ist auch in Laborversuchen bei Schleusen mit geringer Energiedissipation am Oberhaupt zu beobachten.

### 3.4 Betrachtung des Schiffs

Die Modellierung eines schwimmenden Schiffs in einem eindimensionalen hydrodynamischen Modell ist schwierig und erfordert eine komplizierte Lösung. Aus diesem Grund wurde hier ein vereinfachter Ansatz gewählt. Das in der Kammer schwimmende Schiff wird im Modell näherungsweise durch Reduktion der Querschnittsfläche im Bereich des Schiffs um die Schiffsquerschnittsfläche  $A_{\text{Schiff}}$  [ $\text{m}^2$ ] berücksichtigt. Dieser Schritt erfolgt zunächst für jedes Querprofil mittels Berechnung der benetzten Querschnittsfläche der Schleuse zu:

$$A = h \cdot W_{\text{Kammer}} - A_{\text{Schiff}} \quad (12)$$

Während der Modellierung werden die Wasserspiegelgradienten anhand der Querschnittsflächen berechnet. Da die Querschnittsfläche der Schleuse am Schiffsbug abnimmt und am Heck größer wird ohne dabei ein Wasserspiegelgefälle zu bewirken, ist eine Anpassung der Berechnung des räumlichen Gefälles von  $h$  gemäß Gleichung (9) um die Schiffsfläche erforderlich:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial(A + A_{\text{Schiff}})}{\partial x \cdot W_{\text{Kammer}}} \quad (13)$$

### 3.5 Diskretisierung

Da keine analytische Lösung für die 1D-Saint-Venant-Gleichungen existiert, wurde ein Finite-Differenzen-Ansatz für die räumliche und zeitliche Diskretisierung gewählt. Im Folgenden bezeichnet der Index  $i$  den jeweiligen Punkt im Raum,  $i-1$  und  $i+1$  sind die Gitterpunkte vor und hinter dem Punkt  $i$  (Bild 2). Mit dem Index  $n$  wird der aktuelle Zeitschritt bezeichnet, mit  $n+1$  der nächste und mit  $n-1$  der vorangegangene Zeitschritt.  $\Delta t$  ist die Länge eines Zeitschrittes und  $\Delta x$  ist der Abstand zwischen zwei Querprofilen. Für die räumliche Diskretisierung wurde ein versetztes Gitter gewählt. Die Berechnung der Querschnittsfläche  $A_{i+1/2}$  erfolgt zwischen den beiden Querprofilen  $i$  und  $i+1$ , in denen die Zuflüsse  $Q_i$  und  $Q_{i+1}$  berechnet werden. Diese Vorgehensweise hat Vorteile in Bezug auf die Stabilität und ist mit der Finite-Volumen-Methode vergleichbar, bei der der Fluss an den Flächen jeder Zelle berechnet wird.

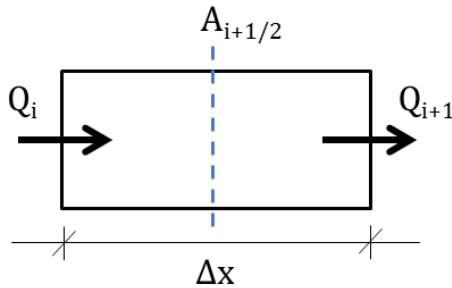


Bild 2: Ort der Berechnung von  $A$  und  $Q$

Für die zeitliche Diskretisierung kommt das Crank-Nicolson-Verfahren zur Anwendung, um Genauigkeit 2. Ordnung in der Zeit zu erhalten. Die Gradienten zwischen zwei Querprofilen können mit einem halben Zeitschritt berechnet werden oder um den Crank-Nicolson-Faktor  $\theta$  [-] verschoben werden, wie in Gleichung (14) für die Querschnittsfläche und in Gleichung (15) für den Zufluss dargestellt:

$$A^{n+\theta} = (1 - \theta) \cdot A^{n+1} - \theta \cdot A^n \quad (14)$$

$$Q^{n+\theta} = (1 - \theta) \cdot Q^{n+1} - \theta \cdot Q^n \quad (15)$$

Für  $\theta = 0$  werden die Gradienten explizit aus dem bekannten Zeitschritt berechnet, für  $\theta = 1$  werden die Gradienten implizit am zukünftigen Zeitschritt berechnet und für  $\theta = 0,5$  wird eine Genauigkeit 2. Ordnung in der Zeit erreicht. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens findet sich in Crank et al. (1947).

Die Ableitungen aus der Kontinuitätsgleichung (8) wurden auf folgende Weise diskretisiert:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{A_{i+1/2}^{n+1} - A_{i+1/2}^n}{\Delta t} \quad (16)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i+1}^{n+\theta} - Q_i^{n+\theta}}{\Delta x} \quad (17)$$

Eine Diskretisierung der Gleichung (8) mit den Gleichungen (16) und (17) und ihre Lösung für die gewünschte Variable  $A_{i+1/2}^{n+1}$  für den zukünftigen Zeitschritt  $n+1$  führt zu (18):

$$A_{i+1/2}^{n+1} = A_{i+1/2}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot (Q_{i+1}^{n+\theta} - Q_i^{n+\theta}) + \Delta t \cdot q_i \quad (18)$$

Die Diskretisierung der Teile der Impulsgleichung (9) ist aufgrund der nichtlinearen Terme komplexer:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_i^{n+1} - Q_i^n}{\Delta t} \quad (19)$$

$$\beta \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{Q^2}{A} \right) = \left( \beta_i \cdot \frac{Q_{i+1/2}^{n+\theta} \cdot Q_{i+1/2}^{n+\theta}}{A_{i+1/2}^{n+\theta}} - \beta_{i-1} \cdot \frac{Q_{i-1/2}^{n+\theta} \cdot Q_{i-1/2}^{n+\theta}}{A_{i-1/2}^{n+\theta}} \right) \cdot \frac{1}{\Delta x} \quad (20)$$

$$g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot \frac{1}{2} \cdot (A_{i+1/2}^{n+\theta} - A_{i-1/2}^{n+\theta}) \cdot \frac{(A + A_{\text{Schiff}})_{i+1/2}^{n+1} - (A + A_{\text{Schiff}})_{i-1/2}^{n+1}}{\Delta x \cdot W_{\text{Kammer}}} \quad (21)$$

$$g \cdot A \cdot (I_o - I_e - I_R) = g \cdot \frac{1}{2} \cdot (A_{i+1/2}^{n+\theta} - A_{i-1/2}^{n+\theta}) \cdot (I_o - I_e - I_R) \quad (22)$$

Eine Diskretisierung der Gleichung (9) mit den Gleichungen (19), (20), (21) und (22) und ihre Lösung für die gewünschte Variable  $Q_i^{n+1}$  für den zukünftigen Zeitschritt  $n + 1$  führt zu Gleichung (23):

$$Q_i^{n+1} = Q_i^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \beta_i \cdot \frac{Q_{i+1/2}^{n+\theta} \cdot Q_{i+1/2}^{n+\theta}}{A_{i+1/2}^{n+\theta}} + \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot \beta_{i-1} \cdot \frac{Q_{i-1/2}^{n+\theta} \cdot Q_{i-1/2}^{n+\theta}}{A_{i-1/2}^{n+\theta}} - \Delta t \cdot g \cdot \frac{1}{2} \cdot (A_{i+1/2}^{n+\theta} - A_{i-1/2}^{n+\theta}) \cdot \frac{(A + A_{\text{Schiff}})_{i+1/2}^{n+1} - (A + A_{\text{Schiff}})_{i-1/2}^{n+1}}{\Delta x \cdot W_{\text{Kammer}}} + \Delta t \cdot g \cdot \frac{1}{2} \cdot (A_{i+1/2}^{n+\theta} - A_{i-1/2}^{n+\theta}) \cdot (I_e + I_R) \quad (23)$$

### 3.6 Randbedingungen

Als Randbedingung am Unterhaupt der Schleusen- kammer wurde der Zufluss gleich Null gesetzt. Der Rechenkern erlaubt laterale Zuflüsse an jeder Stelle in der Schleusen- kammer und auch den mit dem Zufluss transportierten Impuls zu spezifizieren. Die Zuflüsse wurden als Quellterme in der Kontinuitäts- gleichung und der Impulsgleichung implementiert. Nachfolgend wird ein vereinfachtes Beispiel eines Vorkopffüllsystems betrachtet. In diesem Fall findet der Zufluss am ersten Knoten des Gitters statt. Der Zufluss wird nach Gleichung (1) berechnet, abhängig von der Wasserspiegeldifferenz  $\Delta h$  zwischen Oberwasser- und Kammerwasserstand, dem effektiven Öffnungsquerschnitt  $A_{\text{Schütz}}$  und einem Zufluss- beiwert  $\mu$ . Die Wasserspiegeldifferenz kann anhand des bekannten Wasserstands im Oberwasser und des Kammerwasserstands des vorhergehenden Zeitschritts berechnet werden. Der Schützöffnungs- querschnitt  $A_{\text{Schütz}}$  ist als vorgegebene Funktion der Zeit ebenfalls bekannt. Mit dem Zuflussbeiwert  $\mu$  wird die Leistung des Schützes abhängig von der Schützöffnung beschrieben. Sie kann im Vorfeld durch gegenständliche Modelle oder numerische Simulationen bestimmt werden oder es können

Werte aus früheren Projekten mit ähnlicher Geome- trie herangezogen werden, was allerdings die Un- sicherheiten erhöht. Sofern Naturmessungen oder ein gegenständliches Modell einer Schleuse mit identischer Schützgeometrie zur Verfügung stehen, ist eine Bestimmung der Zuflussbeiwerte durch Ver- gleich der Wasserstände im zeitlichen Verlauf mög- lich.

### 3.7 Lösungsverfahren

Die Gleichungen (18) und (23) erlauben die Be- rechnung der Querschnittsfläche  $A$  und des Zuflus- ses  $Q$  für jedes Querprofil für den Zeitschritt  $n + 1$ . Allerdings werden hierfür die Werte  $A$  und  $Q$  im Crank-Nicolson-Zeitschritt  $n + \theta$  benötigt, was zu einem impliziten Lösungsalgorithmus führen wür- de. Zur Vermeidung der Lösung eines nichtlinearen Gleichungssystems kam ein Prädiktor-Korrektor- Verfahren zum Einsatz. Am Anfang der ersten Prä- diktor-Korrektor-Schleife werden die Werte für den zukünftigen Zeitschritt  $n + 1/2$  durch das explizite Mehrschrittverfahren nach Adams-Bashforth vor- hergesagt, wie in den folgenden Gleichungen (24) und (25) dargestellt:

$$Q^{n+1/2} = Q^n + \frac{Q^n - Q^{n-1}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{2} \cdot \Delta t = 1,5 \cdot Q^n - 0,5 \cdot Q^{n-1} \quad (24)$$

$$A^{n+1/2} = A^n + \frac{A^n - A^{n-1}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{2} \cdot \Delta t = 1,5 \cdot A^n - 0,5 \cdot A^{n-1} \quad (25)$$

Ausgehend von einem konstanten Gradienten wird mit dem Adam-Bashforth-Prädiktor der Wert eines zukünftigen Zeitschritts von dem bekannten Zeit- schritt sowie dem Gradienten zwischen aktuellem und vorhergehendem Zeitschritt abgeleitet (Zhao und Zhang 2011). Als Ergebnis der Extrapolation auf  $n + 1/2$  wird ein Crank-Nicolson-Faktor von  $\theta = 0,5$  für die erste Prognose verwendet. Mit  $Q^{n+1/2}$  aus Gleichung (24) wird die diskretisierte Kontinuitäts- gleichung (18) zum ersten Mal gelöst. Das Ergebnis  $A^{n+1}$  wird mit der Crank-Nicolson-Gleichung (14) gewichtet. Die Ergebnisse  $A^{n+\theta}$  aus Gleichung (14)

und  $Q^{n+1/2}$  aus Gleichung (24) werden verwendet, um die Impulsgleichung (23) für  $Q^{n+1}$  zu lösen, die mit Gleichung (15) gewichtet wird. Nach Ende der ersten Prädiktor-Schleife existieren  $A^{n+\theta}$  und  $Q^{n+\theta}$  und die Gleichungen (18) und (23) werden wieder gelöst, um  $A^{n+1}$  und  $Q^{n+1}$  in einer ersten Korrektur- schleife zu korrigieren. Auf Grundlage der Ergeb- nisse kann mit den Gleichungen (14) und (15) ein besserer Wert für  $A^{n+\theta}$  und  $Q^{n+\theta}$  berechnet werden, was zu besseren Ergebnissen für  $A^{n+1}$  und  $Q^{n+1}$  in zusätzlichen Korrekturschleifen führt. Die Gleichun- gen (18) und (23) werden vollständig gelöst: explizit

# Ein anwendungsorientiertes Modell für Schleusenfüllprozesse

für  $\theta = 0$ , implizit für  $\theta = 1$ . Für  $\theta = 0,5$  wird eine Genauigkeit 2. Ordnung in der Zeit erreicht. Dieser implizite Ansatz liefert nach einigen Iterationen eine Lösung, ohne dass ein lineares Gleichungssystem gelöst werden muss. Der Algorithmus ist in Bild 3 zur Verdeutlichung schematisch dargestellt.

### 3.8 Softwareimplementierung

Auf Grundlage der vorgestellten numerischen Algorithmen wurde das Tool LoMo (Kurzform für „BAW Lock Model“) implementiert, das die Anwendung vereinfacht und die Ergebnisse grafisch aufbereitet. LoMo wird in der objektorientierten Programmiersprache Java entwickelt. Da Java Bytecode plattformunabhängig ist, können die Releases auf allen wichtigen Betriebssystemen ausgeführt werden.

Der Rechenkern von LoMo ist gemäß dem Entwurfsmuster Model-View-Control (Modell-Präsentation-Steuerung) strikt von der Benutzungsoberfläche getrennt (Gamma 2011). Die Benutzungsoberfläche (Bild 4) basiert auf der JavaFX-Bibliothek und kann mithilfe des Konzepts des Java Resource-Bundle internationalisiert werden (Oracle 2018a). Derzeit stehen Internationalisierungen in Englisch und Deutsch zur Verfügung. Case-Setups können mithilfe der JAXB-Bibliothek (Java Architecture for XML Binding) in XML-Dateien gespeichert und aus diesen ausgelesen werden (Oracle 2018b). Das Software-Design soll die Erweiterung um neue Füllmethoden vereinfachen.

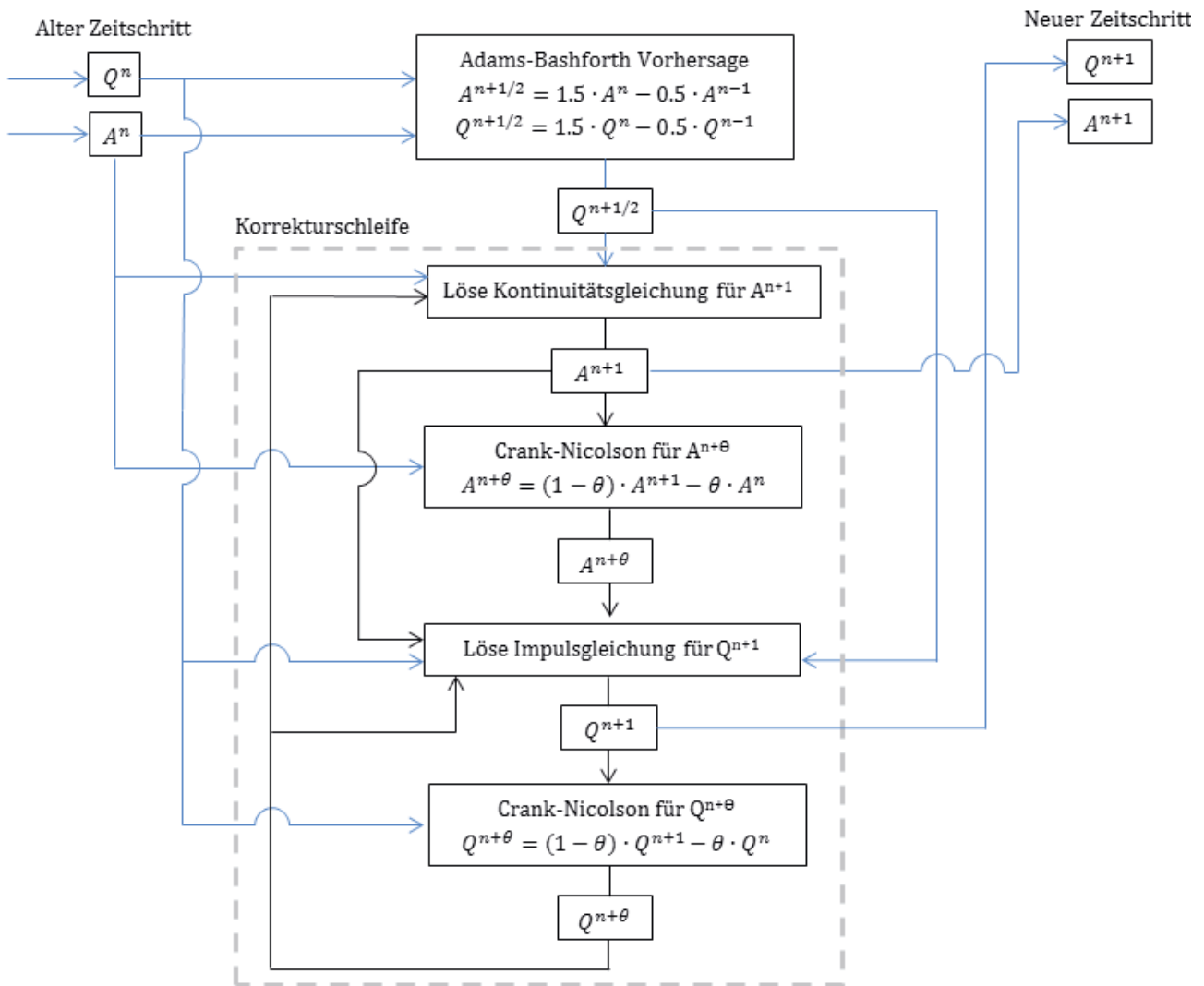


Bild 3: Prädiktor-Korrektor-Lösungsansatz



# Ein anwendungsorientiertes Modell für Schleusenfüllprozesse

Die Open Access-Politik der Bundesregierung wird von der Bundesanstalt für Wasserbau aktiv unterstützt: Die BAW unterzeichnete 2016 die „Berliner Erklärung über den offenen Zugang zu wissenschaftlichem Wissen“ (Max-Planck-Gesellschaft 2003) und gab eine eigene Open Access-Leitlinie heraus. Im Geiste dieser Leitlinie ist die Software frei verfügbar und unter der GNU General Public License 3 veröffentlicht (Free Software Foundation 2007). Der Quellcode und die Releases werden über GitHub zur Verfügung gestellt (<https://github.com/baw-de/lomo>). Interessierte sind eingeladen, die Software zu testen, sich an ihrer Entwicklung zu beteiligen und auf GitHub ihr Feedback zu geben. Es kann jedoch keine Gewährleistung für die Richtigkeit und Aussagekraft der Ergebnisse gegeben werden.

### 3.9. Modellaufbau und Kalibrierungsparameter

Der Modellaufbau erfolgt auf Basis der Abmessungen der Schleusenammer und des Schiffs in der

Kammer. Des Weiteren sind die Eigenschaften der Schütze und des Füllsystems zu wählen und eine Schützöffnungskurve muss definiert werden. Die Kalibrierung des Modells kann über den Vergleich der Ergebnisse mit Laborergebnissen, Ergebnissen aus dreidimensionalen numerischen Modellen oder von Naturversuchen erfolgen. Nachfolgend sind die beiden wichtigsten Kalibrierungsparameter genannt:

- die Leistungsfähigkeit des Füllsystems, welches sich auf die Füllzeit auswirkt. Hier erfolgt die Kalibrierung über den Zuflussbeiwert als Funktion der Schützöffnung.
- die Ausbreitung des Füllstrahls, der zur Folge hat, dass der Wasserstand im Bereich des Strahls sinkt und sich ein zum Oberhaupt gerichtetes Wasserspiegelgefälle einstellt.

Beide Parameter haben einen starken Einfluss auf die Schiffslängskräfte und müssen anhand von bekannten Ergebnissen kalibriert werden.

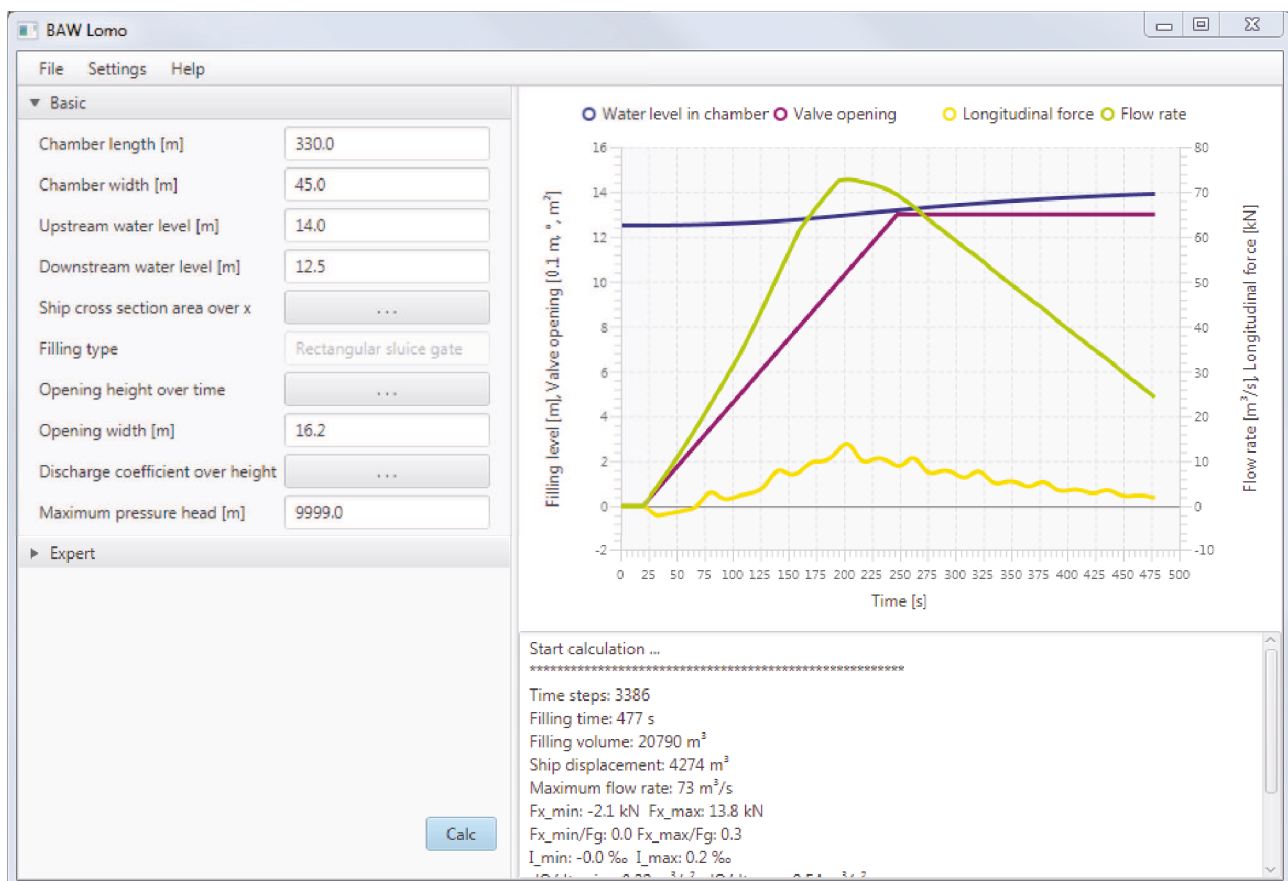


Bild 4: Benutzungsoberfläche

## 4. Vergleich mit Ergebnissen gegenständlicher Modelle

### 4.1 Einleitung

Zu Zwecken der Kalibrierung und Validierung wurden Ergebnisse von verschiedenen gegenständlichen Modellen der BAW verwendet. Im Folgenden wird ein ursprünglich für die Validierung von dreidimensionalen numerischen Verfahren erstelltes Modell vorgestellt. Das gegenständliche Modell wurde als stark vereinfachte Schleuse mit einem Tafelschütz und durchgehender Sohle zwischen dem oberen Vorhafen und der Schleusenkammer erstellt. Als Schiff wurde ein maßstäblich verkleinerter Schubleichter mit einer Länge von 3,01 m und einer Breite von 0,46 m genutzt. Die hydraulische Länge der Schleusenkammer betrug 6,32 m und ihre Breite 0,48 m. Als Fallhöhe waren 0,08 m vorgegeben. Die weiteren Abmessungen sind Bild 6 zu

entnehmen. Der Wasserstand im Oberwasser wurde mithilfe eines Labyrinthwehrs konstant auf einer Höhe gehalten (Belzner et al. 2017). Zur Validierung und Kalibrierung des eindimensionalen Modells wurden verschiedene Versuche mit unterschiedlichen Schützöffnungsgeschwindigkeiten gefahren. Die während des Schleusenfüllprozesses auf das Schiff wirkenden Kräfte wurden durch Messung der Positionsänderung einer linearen Feder ermittelt. Zusätzlich wurden Schwimmpegel zur Messung des Wasserspiegels genutzt. Der Zuflussvolumenstrom wurde auf Basis der zeitlichen Variation des Wasserstands in der Schleusenkammer ermittelt. In Bild 5 ist eine Detailansicht des oberen Teils der Schleusenkammer mit dem Tor (links), dem Schiff und den Schwimmpegeln dargestellt. Eine weitere Beschreibung der Ermittlung der auf ein Schiff wirkenden Kräfte mit gegenständlichen Modellen findet sich in Thorenz und Anke (2013).

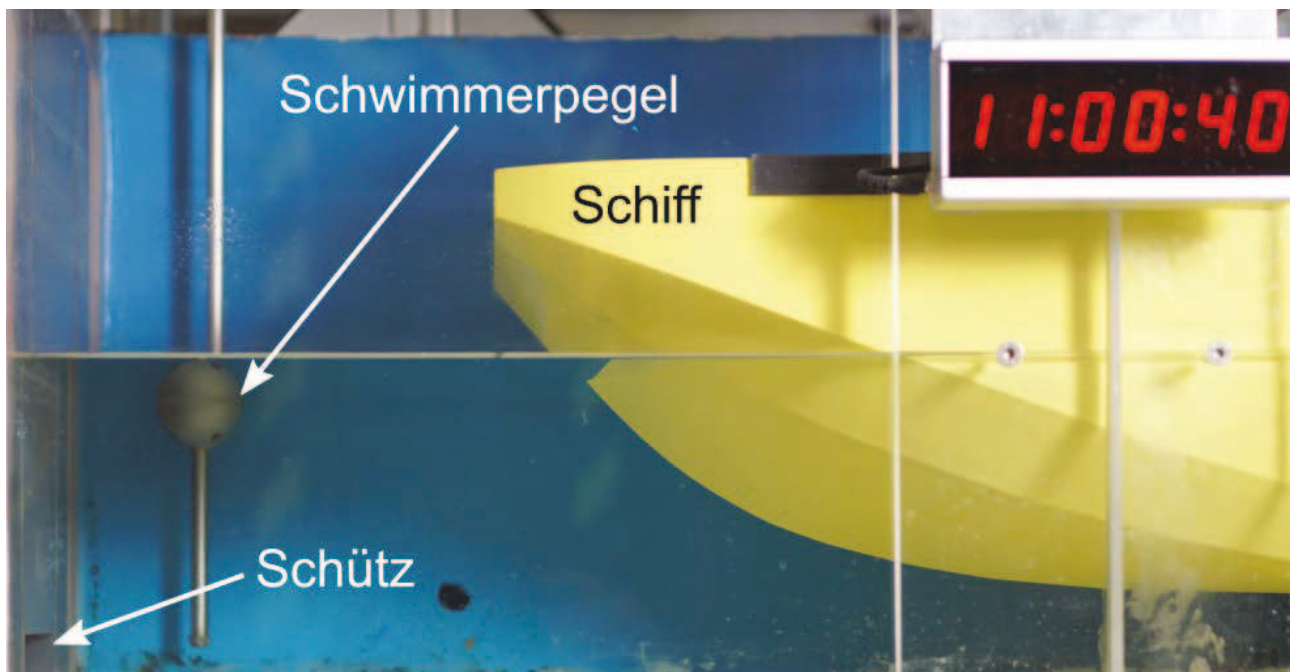


Bild 5: Foto des Oberhauptbereichs im gegenständlichen Modell

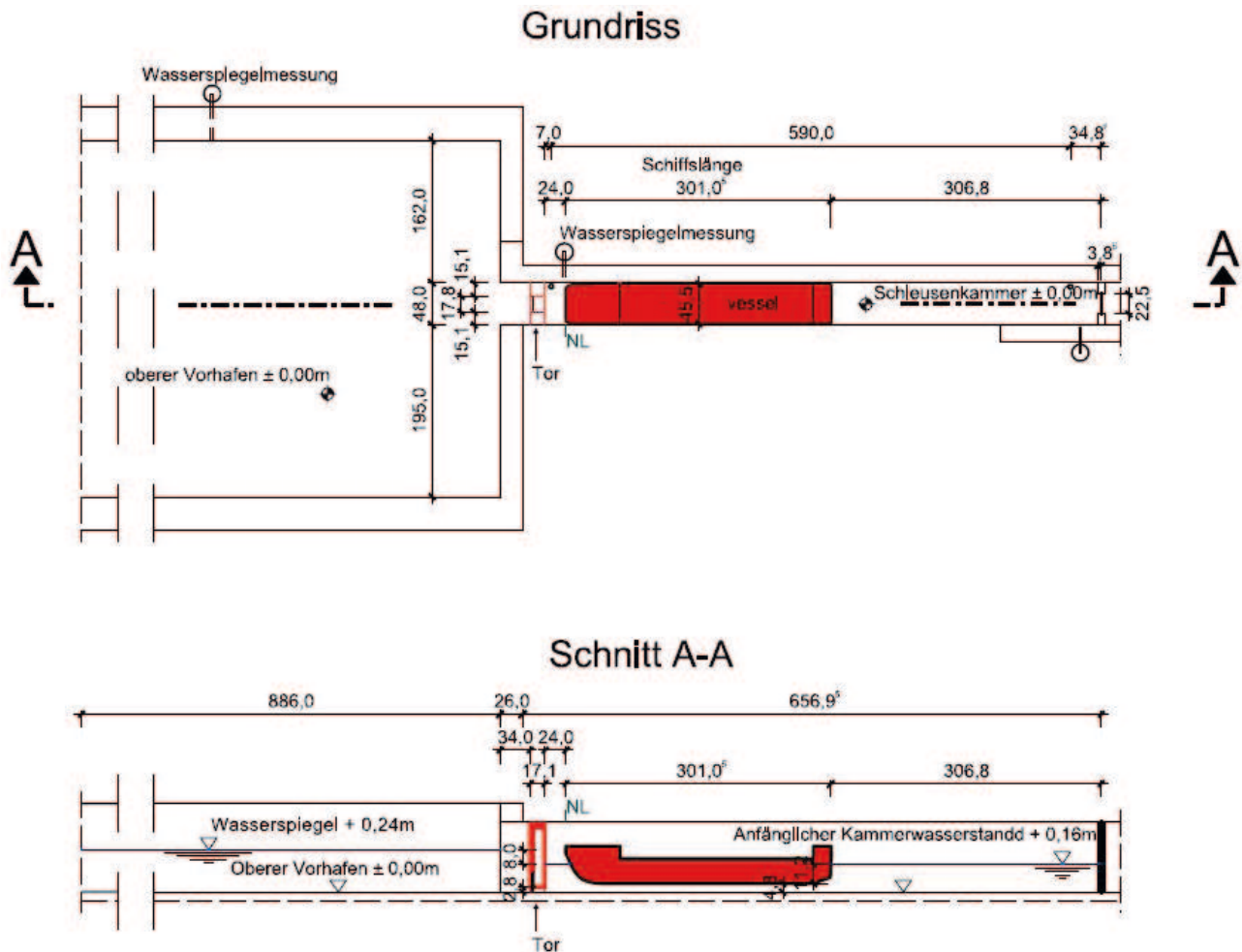


Bild 6: Plan des gegenständlichen Modells

## 4.2. Kalibrierung der hydraulischen Parameter des Füllsystems

Nachdem dem Programm die bekannten geometrischen Eigenschaften vorgegeben wurden, müssen die unbekannt hydraulischen Parameter kalibriert werden. Dies sind in erster Linie der Zuflussbeiwert in Abhängigkeit von der Öffnungsweite des Schützes und die Füllstrahl-Koeffizienten. In Bild 7 ist der Zuflussbeiwert abhängig von der Öffnungsweite eines typischen Tafelschützes dargestellt. Zur Bestimmung des Zuflussbeiwerts wurde der anhand der Ergebnisse eines gegenständlichen Modells berechnete Zufluss mit dem auf Basis des eindimensionalen Modells berechneten Zufluss verglichen. Dabei wurden dieselben geometrischen Randbedingungen sowie dieselbe Schützgeometrie und Öffnungsgeschwindigkeit zugrunde gelegt.

Bild 8 zeigt einen Fall, der zur Kalibrierung des Zuflussbeiwerts durch Vergleich der Ergebnisse des gegenständlichen Modells mit den im 1D-Modell berechneten Ergebnissen verwendet wurde. Die

violette Kurve stellt die Öffnung des Schützes dar. Die Dauer des Schützöffnungsprozesses beträgt 390 s. Die rote und dunkelblaue Kurve zeigen die im Labormodell gemessenen beziehungsweise im eindimensionalen Modell berechneten Wasserstände. Für die Kalibrierung wurden die hellblaue und die grüne Kurve berücksichtigt, welche den Zufluss im gegenständlichen und im eindimensionalen Modell darstellen. Der von der Öffnungsposition des Schützes abhängige Zuflussbeiwert wurde solange variiert, bis eine gute Übereinstimmung zwischen der hellblauen und der grünen Kurve für den Zufluss erreicht wurde.

Es ist zu beachten, dass Diskontinuitäten im Zuflussbeiwert oder in der Schützöffnungsgeschwindigkeit Wellenbewegungen in der Kammer auslösen können und daher vermieden werden müssen. Die auf das Schiff wirkenden Kräfte sind Hangabtriebskräfte, die auf Wellen reagieren. Diskontinuitäten im Zuflussbeiwert wirken sich somit unmittelbar auf die Schiffslängskräfte aus.

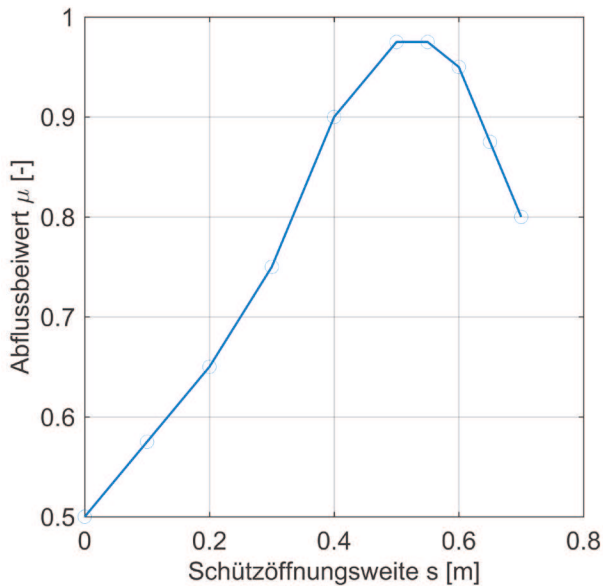


Bild 7: Zuflussbeiwert in Abhängigkeit von der Schützöffnung

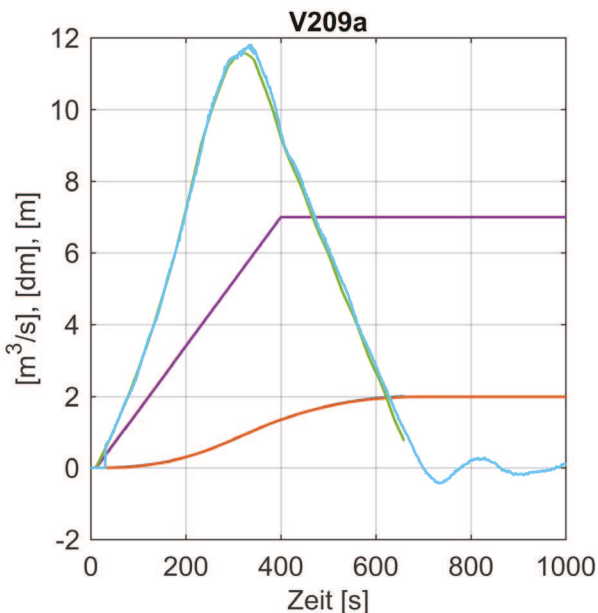


Bild 8: Kalibrierungsfall für Zuflussbeiwert des Schützes bei Schützöffnungsgeschwindigkeit von 1,8 mm/s

### 4.3 Ausbreitung des Füllstrahls

Gemäß Gleichung (11) ist der Wert  $\beta$  umgekehrt proportional zur Fläche des Füllstrahls in jedem Querprofil, was eine Beschreibung der Strahlausbreitung in Zeit und Raum erforderlich macht. Bild 9 zeigt das Obertor einer Schleuse mit Vorkopffüllsystem und eine mögliche Strahlausbreitung innerhalb der Schleusenkammer. Dieser Strahl resultiert aus einem im Verhältnis zur Kammerquerschnittsfläche kleinen Öffnungsquerschnitt des Schützes. Die Querschnittsfläche des Strahls ist mindestens so groß wie der Schützöffnungsquerschnitt, wächst mit zunehmender Entfernung vom Oberhaupt und kann nicht größer sein als die Querschnittsfläche

der Kammer. Innerhalb dieser Grenzen muss die Ausbildung des Füllstrahls durch eine Funktion von Zeit und Raum beschrieben werden. Der Schützöffnungsquerschnitt und somit der anfängliche Strahlquerschnitt verändern sich mit der Zeit, da der Schützöffnungsprozess eine vorgegebene Funktion der Zeit ist. Die Querschnittsfläche des Strahls in der Kammer ist die Summe aus dem anfänglichen Strahlquerschnitt und dem Zuwachs abhängig von der Entfernung zum Schleusentor. Dieser Zuwachs lässt sich mit einem Linearkoeffizienten und einem Exponenten parametrisieren.

Die Ausbreitungsrate des Strahls wird in Gleichung (26) mit einem Linearkoeffizienten  $c_2$  und einem Exponenten  $c_3$  beschrieben. Der Gleichung liegt die Annahme zugrunde, dass der anfängliche Strahlquerschnitt am Oberhaupt abhängig vom momentanen Schützöffnungsquerschnitt  $A_{\text{Schütz}}$  [m<sup>2</sup>] und den Koeffizienten  $c_0$  und  $c_1$  ist.

$$A_{\text{Strahl}} = c_0 + c_1 \cdot A_{\text{Schütz}}(t) + c_2 \cdot x^{c_3} \quad (26)$$

Bei linearer Strahlausbreitung hat der Koeffizient  $c_3$  einen Wert von Eins, bei quadratischer Ausbreitung hat  $c_3$  einen Wert von Zwei. Für einen flach und bodennah verlaufenden Füllstrahl kann ein linearer Anstieg des Strahlquerschnitts über die Kammerlänge angenommen werden. Für einen freien runden Strahl kann von einem quadratischen Zuwachs ausgegangen werden. Die Beschreibung des Füllstrahls ist komplex und wird möglicherweise sich mit der Weiterentwicklung von LoMo weiter verbessert.

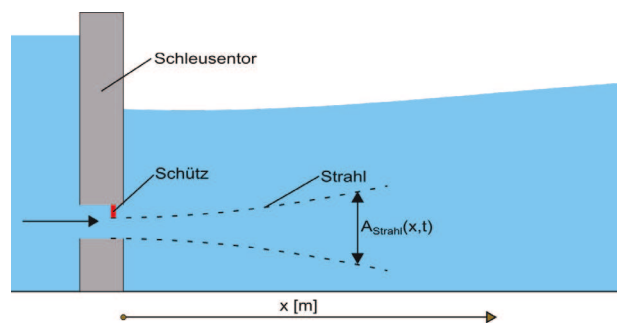
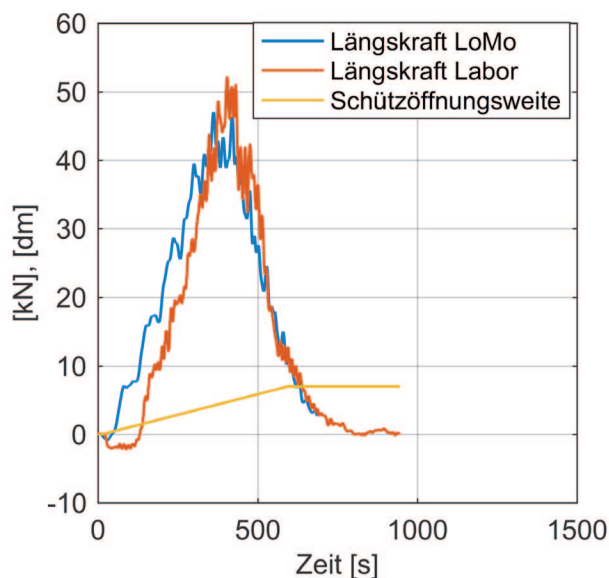


Bild 9: Ausbreitung des Füllstrahls, Definitionsskizze

Aufgrund der großen Abhängigkeit der auf das Schiff wirkenden Kräfte vom Verhältnis von Strahlquerschnitt zu Kammerquerschnitt ist eine gute Parametrisierung der Strahlausbreitung die Voraussetzung für richtige Ergebnisse. Voraussetzung für die Parametrisierung ist ein Vergleich der Kräfte, die an Prototypen oder bei Versuchen mit gegenständlichen Modellen beobachtet werden, mit den im eindimensionalen Modell ermittelten Kräften. Je dünner der Strahl ist, desto stärker ist das Wasserspiegelgefälle zum Oberhaupt hin und damit auch die zum Oberhaupt hin gerichteten Kräfte. Für die

# Ein anwendungsorientiertes Modell für Schleusenfüllprozesse

Beschreibung des anfänglichen Strahlquerschnitts können die Koeffizienten  $c_0$  und  $c_1$  herangezogen werden. Entspricht dieser Querschnitt dem Schützöffnungsquerschnitt, kann für  $c_0$  ein Wert von  $c_0 = 0$  angenommen werden und für  $c_1$  ein Wert von  $c_1 = 1$ . Für eine Beschreibung der Strahlausbreitung über die gesamte Strecke müssen die Koeffizienten  $c_2$  und  $c_3$  parametrisiert werden. Es sind folglich für die Kalibrierung mindestens zwei Versuche erforderlich: Ein Versuch, bei dem das Schiff nahe dem Oberhaupt liegt und ein zweiter mit größerem Abstand zum Oberhaupt. Die anhand des eindimensionalen Modells berechneten Kräfte müssen eine möglichst gute Übereinstimmung zu beiden Versuchen aufweisen. Bild 10 zeigt einen Vergleich der berechneten Kräfte mit den im Rahmen von Laborversuchen ermittelten Werten. In der linken Abbildung ist der Vergleich mit einem Versuch dargestellt, bei dem sich das Schiff nahe des Oberaupts befand, die rechte Abbildung illustriert den Vergleich mit einem Versuch, bei dem das Schiff in der Mitte der Schleusenkammer lag.



## 4.4 Validierung mit Ergebnissen gegenständlicher Modelle

Nach Kalibrierung der hydraulischen Parameter für den Zufluss und die Strahlausbreitung wurde das Verhalten des Modells mittels zusätzlicher Modellläufe validiert. Für die Validierung wurde der Versuch mit den zuvor ermittelten Werten für den Zuflussbeiwert, aber mit einer geringeren Schützöffnungsgewindigkeit wiederholt. Hierbei wurde das Schütz in mehr als 800 s geöffnet. Die Ergebnisse sind in Bild 11 dargestellt. Sowohl für den steigenden als auch für den fallenden Ast der Zuflusskurve lässt sich eine sehr gute Übereinstimmung erkennen.

Zur weiteren Validierung wurden die auf das Schiff wirkenden Kräfte bestimmt. Die Ergebnisse der Validierungsversuche sind in Bild 12 dargestellt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der berechneten Kräfte mit den im gegenständlichen Modell gemessenen Kräften. In der linken Abbildung ist der Vergleich mit einem Versuch dargestellt, bei dem sich das Schiff nahe des Oberaupts befand, die rechte Abbildung zeigt den Vergleich mit einem Versuch, bei dem das Schiff in der Mitte der Schleusenkammer lag.

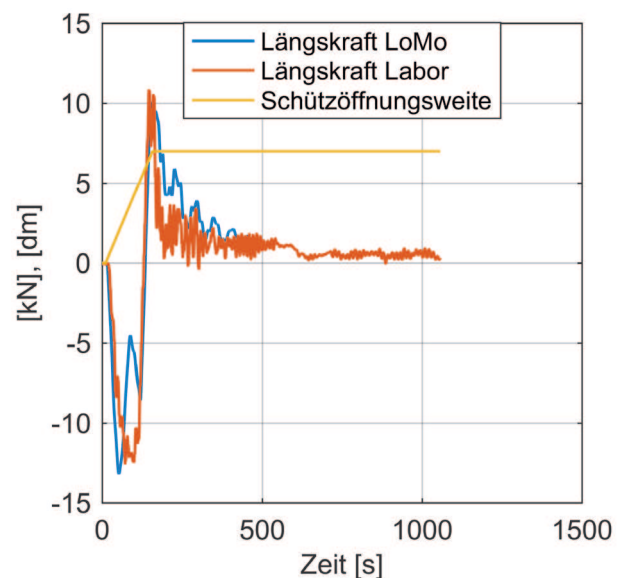


Bild 10: Kalibrierungsfall: Vergleich der gemessenen und simulierten Schiffskräfte für unterschiedliche Schiffspositionen und Schützöffnungsgeschwindigkeiten. Links: Position des Schiffes nahe Oberhaupt; rechts: Position des Schiffes in der Mitte der Kammer.

In Bild 12 (rechts) ist zu erkennen, dass die im numerischen Modell berechneten Kräfte oszillieren, während solche Oszillationen im gegenständlichen Modell nicht beobachtet werden. Dies könnte auf fehlende Dämpfungseffekte im numerischen Modell zurückzuführen sein. Darüber hinaus ist eine Lücke von wenigen Sekunden im ansteigenden Ast der Schiffskräfte Bild 12 (links) erkennbar, die auch in Bild 10 (links) zu sehen ist, wo die numerisch berechneten Kräfte früher eintreten als die in den gegenständlichen Modellversuchen ermittelten

Kräfte, was aber zu vergleichbaren Maximalwerten führt. Eine Erklärung für das Auftreten dieser Lücke steht noch aus. Möglicherweise ist sie das Ergebnis einer nicht exakten anfänglichen Schützöffnung im gegenständlichen Modell. Allerdings zeigen die im eindimensionalen Modell berechneten Kräfte (siehe Bild 12) eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen des gegenständlichen Modellversuchs, insbesondere bei den Maximalwerten der Kräfte, welche für die spätere Bemessung relevant sind.

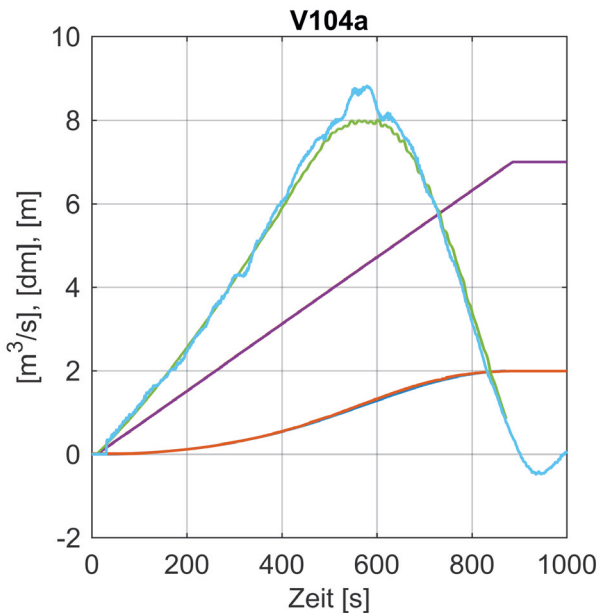


Bild 11: Validierungsfall für den Zuflussbeiwert des Schützes bei Schützöffnungsgeschwindigkeit von 0,8 mm/s

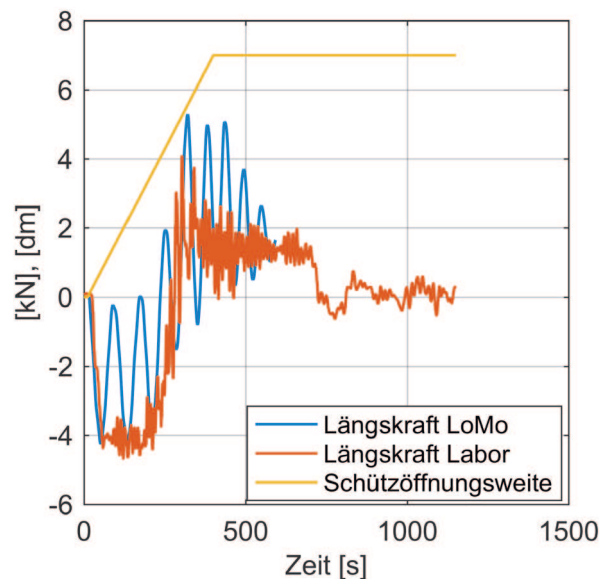
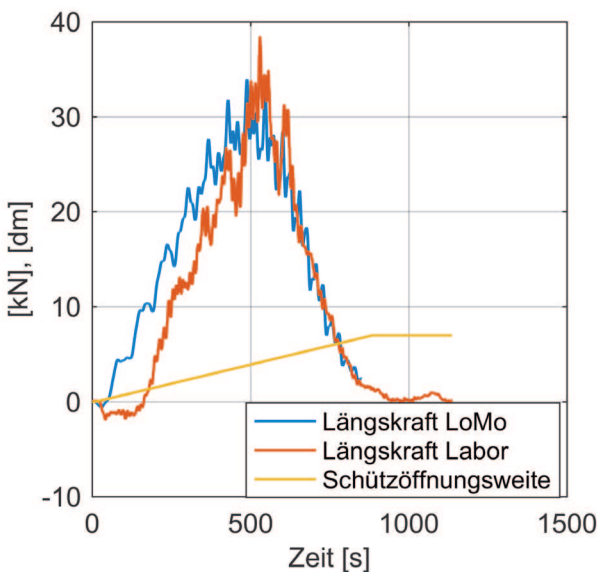


Bild 12: Validierungsfall: Vergleich der gemessenen und simulierten Schiffskräfte für unterschiedliche Schiffspositionen und Schützöffnungsgeschwindigkeiten. Links: Position des Schiffes nahe Oberhaupt; rechts: Position des Schiffes in der Mitte der Kammer.

## 4.5 Vorhersage der Schiffskräfte auf Grundlage von Erfahrungswerten

Für die weitere Validierung wurde das entwickelte Modell genutzt, um die auf ein Schiff wirkenden Kräfte für den Fall einer anderen Schleuse mit einem unterschiedlichen Füllsystem, anderen Abmessungen und einem anderen Schiff vorherzusagen. Ausgehend von den Erfahrungen aus früheren Versuchen erfolgte eine bestmögliche Schätzung der Kalibrierungsparameter ohne Berücksichtigung der Erkenntnisse aus den Laborversuchen für diese Schleuse. Im Anschluss wurden die prognostizierten

Zufluss im Zeitverlauf und die auf das Schiff wirkenden Kräfte mit den Ergebnissen aus den gegenständlichen Modellversuchen verglichen.

Die Genauigkeit der Vorhersage wurde anhand der Schleuse Bolzum geprüft. Die Schleuse verfügt über ein Vorkopffüllsystem. Als Füllorgan wird ein Drucksegmentobertor anstatt eines Tafelschützes verwendet. Die Breite der Schleuse beträgt 12,5 m, ihre hydraulische Länge 164 m. Das Schiff hat eine Länge von 105 m und einen Tiefgang von 2,80 m. Die Schleuse verfügt am Oberhaupt über eine Gitterwand zur Energiedissipation, sodass der Ein-

# Ein anwendungsorientiertes Modell für Schleusenfüllprozesse

fluss des Füllstrahls vernachlässigbar ist. Die Berechnung des Zuflusses erfolgte mit der Gleichung (1), die Leistung des Segmenttors wird jedoch mit dem Term  $A \cdot \mu$  [m<sup>2</sup>] ausgedrückt, abhängig vom Öffnungswinkel des Segments (Bild 13, links). Der Grund für diese Vorgehensweise ist, dass der Öffnungsquerschnitt eines Drehsegmenttors aufgrund seiner Form schwierig zu berechnen ist. Anstatt der Hubhöhe wird ein Segmentöffnungswinkel über die Zeit vorgegeben.

Die Abmessungen der Kammer und des Schiffs sowie die Wasserstände zu Beginn des Füllprozesses können als bekannt vorausgesetzt werden. Für die Leistungsfähigkeit des Obertors wurde die Korrelation zwischen Öffnungswinkel und  $A \cdot \mu$  aus Bild 13 (links) übernommen. Der Wert wurde anhand eines dreidimensionalen numerischen Modells aus einem anderen Projekt mit geringfügig abweichender Geometrie des Segmenttors ermittelt. In der Simulation wurde das Segments innerhalb von 800 s von 0° auf 20° geöffnet. Der berechnete Zufluss und die auf das Schiff wirkenden Kräfte im Vergleich zu den im gegenständlichen Modellversuch ermittelten Ergebnissen sind Bild 13 (rechts) dargestellt. Der berechnete Zufluss zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Zuflusswerten des gegenständlichen Modells. Beim maximalen Zufluss ergibt sich eine Abweichung von etwa 5 %. Der Gradient des ansteigenden Zuflusses ist jedoch im gegenständlichen Modell etwas steiler, was auf eine Unterschätzung der Leistung des Drucksegmentobertors im Bereich der geringen Öffnungswinkel hinweist. Im Vergleich der Schiffskräfte besteht eine qualitative Übereinstimmung zwischen beiden Kurven. Der Anfangsschwall zu Beginn der Füllung ist im ge-

genständlichen Modell deutlicher ausgeprägt, möglicherweise aufgrund einer plötzlichen Öffnung des Segmentverschlusses mit kleinen Öffnungswinkeln. In diesem Bereich ist das gegenständliche Modell nicht vollständig anwendbar. Dennoch konnte eine gute Übereinstimmung zwischen der Berechnung im eindimensionalen Modell und den Laborversuchen nachgewiesen werden.

Hinweis: Im untersuchten Fall erfolgte die Vorhersage für eine vergleichbare Schleusen- und Schiffsgröße. Versuche, die Schiffskräfte für eine weitaus größere Seeschleuse vorherzusagen schlugen fehl. Hier empfiehlt sich eine Basiskalibrierung mit einer anderen Seeschleuse mit vergleichbaren Abmessungen.

## 5. Anwendungsgrenzen des entwickelten Modells

Das eindimensionale Schleusenmodell basiert auf den 1D-Saint-Venant-Gleichungen. Eine der fundamentalen Voraussetzungen für die Anwendbarkeit dieser Gleichungen besteht in einer hauptsächlich eindimensionalen Strömung. Strömungen orthogonal zur Hauptfließrichtung werden in den Gleichungen vernachlässigt. Eine Strömung in lateraler Richtung kann Querkräfte auf das Schiff auslösen, die sich im eindimensionalen Modell nicht bestimmen lassen. Die im Modell ermittelten Schiffslängskräfte hängen von den folgenden vier Einflussgrößen ab:

- Geometrie
- Schützöffnungsgeschwindigkeit
- Zuflussbeiwert des Schützes
- Strahlausbreitung

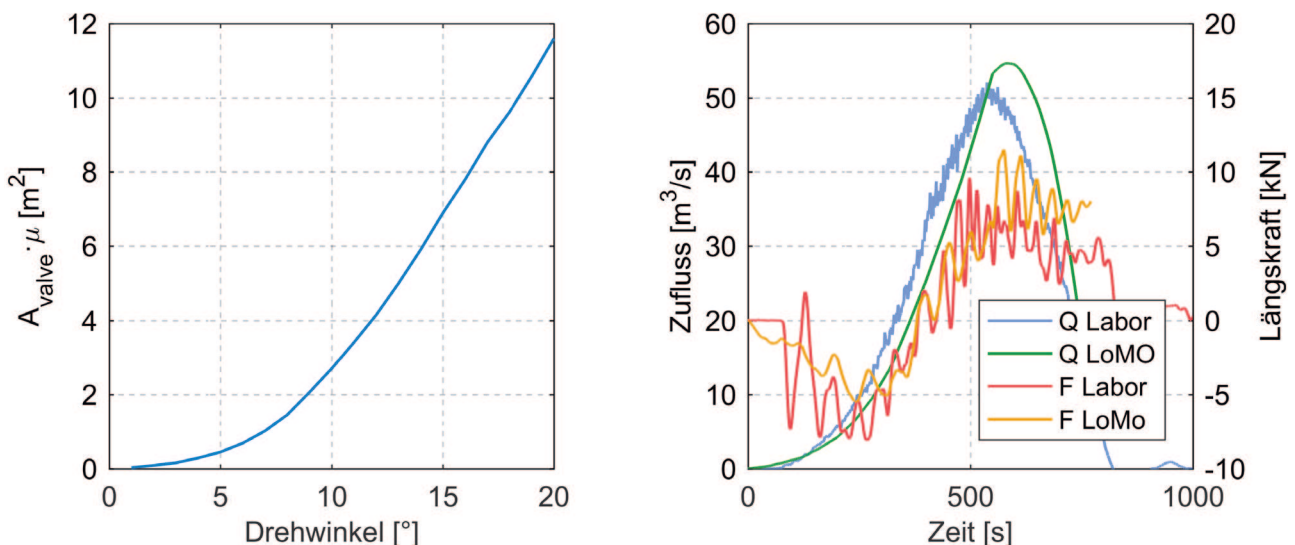


Bild 13: Links: Leistung des Segmenttors in Abhängigkeit vom Segmentöffnungswinkel; rechts: Vergleich des vorhergesagten Zuflussvolumenstroms und der Schiffslängskräfte aus dem eindimensionalen Modell mit den Ergebnissen des gegenständlichen Modells

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Geometrie der Schleuse und des Schiffs sowie die Schützöffnungsgeschwindigkeit bekannte Größen sind und dass diese korrekt in die Software eingegeben werden. Der Zuflussbeiwert des Schützes ist a priori nicht bekannt und muss in Versuchen ermittelt oder der einschlägigen Fachliteratur entnommen werden, woraus sich eine Unsicherheit bei Verwendung des Modells ergibt. Es kann nicht mit Sicherheit gesagt werden, dass sich diese Effizienz auf den Prototyp übertragen lässt, da kleinere Anpassungen der baulichen Ausführung zu einem anderen hydraulischen Verhalten des Systems führen können. Eine weitere Unsicherheit bei der Verwendung des Modells ergibt sich aus der Parametrisierung der Strahlausbreitung, welche großen Einfluss auf die Schiffskräfte hat. Die Ausbreitung des Füllstrahls kann mit gegenständlichen oder numerischen Modellen bestimmt werden. Dafür ist jedoch ein zusätzlicher Aufwand erforderlich. So sollten ein maßstabgetreues Modell oder Naturmessungen mit unterschiedlichen Schiffen oder Schiffpositionen zum Einsatz kommen, um eine geeignete Parametrisierung sicherzustellen. Da die Strahlausbreitung abhängig von der Größe, Ausbildung und Position des Schützes, Kanals und Tors ist, lassen sich bei fehlenden Informationen über vergleichbare Schleusen die geeigneten Strahlparameter nur schwer vorhersagen.

## 6. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Während des Schleusenfüllprozesses ist das Schiff in der Schleusenammer Kräften ausgesetzt. Für die Bemessung des Füllsystems und die Spezifizierung der Schützöffnungsgeschwindigkeit ist es von größter Bedeutung, diese Kräfte richtig zu beurteilen. In diesem Beitrag werden die maßgeblichen hydraulischen Prozesse, welche diese Kräfte verursachen, am Beispiel eines Vorkopffüllsystems erläutert. Die vorhandenen Methoden zur Bestimmung der auf das Schiff wirkenden Kräfte werden diskutiert. Es wird ein eindimensionales Modell zur kurzfristigen Vorhersage der Längskräfte eingeführt und die Kalibrierungsparameter und ihre Auswirkungen werden behandelt. Die BAW verfolgt eine Open Data-Politik, die entwickelte Software einschließlich Quellcode ist somit als Open Source verfügbar.

Das Modell ermöglicht es dem Anwender, die während des Schleusenfüllprozesses auf das Schiff wirkenden Kräfte unter unterschiedlichen hydraulischen Randbedingungen in sehr kurzer Zeit zu berechnen. Steht ein gegenständliches Modell zur Durchführung von Kalibrierversuchen zur Verfügung, können die bei unterschiedlichen Schütz-

öffnungsgeschwindigkeiten oder Schiffpositionen entstehenden Kräfte mit hoher Sicherheit vorhergesagt werden. Dies erlaubt Berechnungen auf der Basis von Daten eines gegenständlichen Modells, sogar wenn das Modell selbst nicht mehr existiert.

Die Extrapolation auf Schleusen mit anderen Geometrien und Füllsystemen ist mit deutlich größerer Unsicherheit behaftet, da die Kalibrierungsparameter geschätzt werden müssen. Hier ist die Erfahrung des Nutzers gefordert, denn eine schlechte Kalibrierung kann zur Unterschätzung der berechneten Kräfte führen. Eine funktionierende Energiedissipation am Oberhaupt verringert die auf das Schiff wirkenden Kräfte, da durch sie der Einfluss des Füllstrahls abnimmt. Darüber hinaus reduzieren sich dadurch auch die Unsicherheiten infolge einer schlechten Kalibrierung der Strahlausbreitung.

## 7. Nomenklatur

$\Delta h$	[m]	Wasserspiegeldifferenz zwischen Oberwasser- und Kammerwasserstand
$\mu$	[-]	Zuflussbeiwert
$Q$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	Volumenstrom
$g$	[m·s <sup>-2</sup> ]	Gravitationskonstante ( $g=9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ )
$h$	[m]	Wasserstand
$A_{\text{Kammer}}$	[m <sup>2</sup> ]	Bruttofläche der Schleusenammer
$A_{\text{Schiff}}$	[m <sup>2</sup> ]	Schiffsquerschnittsfläche
$W_{\text{Kammer}}$	[m]	Kammerbreite
$m_{\text{Schiff}}$	[kg]	Masse des Schiffes
$F$	[N]	auf das Schiff wirkende Längskraft
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Gesamtquerschnittsfläche
$\beta$	[-]	Boussinesq-Koeffizient
$q$	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	spezifischer Zufluss
$L_{\text{Schiff}}$	[m]	Schiffslänge
$T$	[s]	Wellenlaufzeit
$n$	[-]	Zeitschrittindex
$A_{\text{Schütz}}$	[m <sup>2</sup> ]	Öffnungsquerschnitt
$u$	[m·s <sup>-1</sup> ]	Geschwindigkeit
$L_{\text{Kammer}}$	[m]	Kammerlänge
$I$	[-]	Gefälle
$A_{\text{Strahl}}$	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche des Füllstrahls
$\Delta t$	[s]	Zeitschrittlänge
$\Delta x$	[m]	Abstand zwischen zwei Querprofilen
$\theta$	[-]	Crank-Nicolson-Faktor
$B_{\text{Schiff}}$	[m]	Schiffsbreite
$i$	[-]	Gitterindex
$c_0, c_1, c_2, c_3$	[-]	Parameter zur Beschreibung der Ausbreitung des Füllstrahls



### 8. Literaturverzeichnis

- Belzner, F.; Merkel, J.; Gebhardt, M.; Thorenz, C. (2017): Piano Key and LabyrinthWeirs at German waterways: Recent and future research of the BAW. In: Sébastien Erpicum, Frédéric Laugier, Michael Pfister, Michel Piroton, Guy-Michel Cicero und Anton J. Schleiss (Hg.): Labyrinth and Piano Key Weirs III: CRC Press/Balkema, S. 167–174.
- Bousmar, Didier; Savary, Celine; Swartenbroekx, Catherine; Zorzon, Gil (2017): Feedback From 10 Years Of Field Measurement On Navigation Locks. In: Hydrolink Magazine, 1/2017, S. 10–13.
- Crank, J.; Nicolson, P.; Hartree, D. R. (1947): A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type. In: Math. Proc. Camb. Phil. Soc. 43 (01), S. 50. DOI: 10.1017/S0305004100023197.
- Cunge, Jean A.; Holly, Forrest M.; Verwey, Adri (1980): Practical aspects of computational river hydraulics. Boston u.a.: Pitman (Monographs and surveys in water resources engineering, 3).
- De Loor, Alexander (2016): LOCKFILL. User & Technical Manual. Deltares. Delft. Online verfügbar unter <http://oss.deltares.nl/documents/645319/645571/Lockfill+Manual>, zuletzt geprüft am 07.03.2018.
- Free Software Foundation (2007): GNU General Public License 3. Online verfügbar unter <https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0>, zuletzt geprüft am 09.03.2018.
- Gamma, Erich (2011): Design patterns. Elements of reusable object-oriented software. 39. printing. Boston: Addison-Wesley (Addison-Wesley professional computing series).
- Jirka, Gerhard H.; Lang, Cornelia (2009): Einführung in die Gerinnehydraulik.
- Max-Planck-Gesellschaft (2003): Berlin Declaration on Open Access to Knowledge in the Sciences and Humanities. Unter Mitarbeit von Prof. Dr. Martin Stratmann. Hg. v. Max-Planck-Gesellschaft. München. Online verfügbar unter [https://openaccess.mpg.de/67605/berlin\\_declaration\\_engl.pdf](https://openaccess.mpg.de/67605/berlin_declaration_engl.pdf), zuletzt aktualisiert am 15.02.2018.
- Oracle (2018a): Class ResourceBundle. Hg. v. Oracle. Online verfügbar unter <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/java/util/ResourceBundle.html>, zuletzt geprüft am 07.03.2018.
- Oracle (2018b): JAXB. Java Architecture for XML Binding. Hg. v. GitHub. Online verfügbar unter <https://javaee.github.io/jaxb-v2/>, zuletzt geprüft am 09.03.2018.
- Partensky, 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 Carsten Thorenz, Jeremy R. Augustin, Didier Bousmar, Jean-Pierre Dubbelman, Arcelio Hartley, Peter Hunter et al. Hg. v. PIANC.
- Thorenz, Carsten (2009): Computational Fluid Dynamics in lock design. State of the art. PIANC INTERNATIONAL WORKSHOP "Innovation in Navigation Lock Design". PIANC. Brussels, Belgium, 2009.
- Thorenz, Carsten (2010): Numerical evaluation of filling and emptying systems for the new Panama Canal locks. In: 32nd PIANC International Navigation Congress 2010. Liverpool, United Kingdom, 10 - 14 May 2010. Red Hook, NY: Curran.
- Thorenz, Carsten; Anke, Jens (2013): Evaluation of ship forces for a through-the-gate filling system. Smart Rivers 2013. PIANC. Liege (BE), Maastricht (NL), 2013.
- Thorenz, Carsten; Belzner, Fabian; Hartung, Torsten; Schulze, Lydia (2017): Numerische Methoden zur Simulation von Schleusenfüllprozessen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAW Mitteilungen 100. Kompetenz für die Wasserstraßen - Heute und in Zukunft. Forschungs- und Entwicklungsprojekte der BAW. Online verfügbar unter [http://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/102493/1/mb\\_100\\_07\\_Thorenz\\_Numerische.pdf](http://henry.baw.de/bitstream/20.500.11970/102493/1/mb_100_07_Thorenz_Numerische.pdf).
- Van der Ven, P.; Van Velzen, G.; O'Mahoney, T.; De Loor, A. (2015): Comparison of Scale Model Measurements and 3D CFD Simulations of Loss Coefficients and Flow Patterns for Lock Levelling Systems. In: PIANC (Hg.): 7th International PIANC-SMART Rivers Conference. Unter Mitarbeit von Lucía Torija. Buenos Aires, Argentina.
- Vrijburcht, A. (1991): Forces on ships in a navigation lock induced by stratified flows, Stellingen.
- Zhao, Bin; Zhang, Bo (2011): Comparison of different order Adams-Bashforth methods in an atmospheric general circulation model. In: Acta Meteorologica Sinica 25 (6), S. 754–764. DOI: 10.1007/s13351-011-0606-6.

## Verfasser

**Fabian Belzner M.Eng., Dipl.-Ing. Franz Simons,  
Dr.-Ing. Carsten Thorenz**  
Bundesanstalt für Wasserbau  
Kussmaulstr. 17  
76187 Karlsruhe  
[fabian.belzner@baw.de](mailto:fabian.belzner@baw.de)  
Tel.: 0721 9726-2220