Heinzelmann, Christoph; Thorenz, Carsten

Hydraulische Untersuchungen für den Neubau der Weser-Schleuse Minden

Originalveröffentlichung / Original Publication:

<https://www.springerprofessional.de/hydraulische-untersuchungen-fuer-den-neubau-der-weser-schleuse-m/34187>

Verfügbar unter / Available at:

<https://hdl.handle.net/20.500.11970/100686>

Vorgeschlagene Zitierweise / Suggested citation:

Heinzelmann, Christoph; Thorenz, Carsten (2014): Hydraulische Untersuchungen für den Neubau der Weser-Schleuse Minden. In: Wasserwirtschaft Jg. 104 (10/2014). S. 29-33.

Erstveröffentlichung in WasserWirtschaft 10 (2014), S. 29-33.

Für eine korrekte Zitierbarkeit ist die Seitennummerierung der Originalveröffentlichung für jede Seite kenntlich gemacht.

S. 29

Hydraulische Untersuchungen für den Neubau der Weser-Schleuse Minden

Christoph Heinzelmann und Carsten Thorenz

Als Ersatz für die im Jahr 1914 errichtete Schachtschleuse Minden wird am Wasserstraßenkreuz Minden derzeit eine neue Schleuse gebaut. In der Planungsphase hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) detaillierte hydraulische Untersuchungen durchgeführt. Zum Einsatz kamen ein- und mehrdimensionale numerische Modelle sowie ein aufwändiges gegenständliches Modell. Durch die Untersuchungen konnten die Planungen umfassend abgesichert und optimiert werden. Baukosten von ca. 2,5 Mio. € wurden durch die Umgestaltung des Einlaufbauwerks eingespart.

1 Einleitung

Schiffsschleusen zählen zu den klassischen Verkehrswasserbauwerken an den Wasserstraßen. Allein im Bundeswasserstraßennetz sind es 315 Anlagen mit insgesamt 450 Schleusenkammern. Kennzeichnend für diese Anlagen ist die ungünstige Altersstruktur mit einer Vielzahl alter Bauwerke. Knapp 80 % der Anlagen ist heute älter als 50 Jahre, bei ca. 30 % ist das technische Lebensalter von 100 Jahren bereits erreicht oder überschritten. Die Folge ist, dass kurz-, mittel- und langfristig umfangreiche Instandsetzungsmaßnahmen notwendig sind. Teilweise müssen die Bauwerke auch durch Neubauten ersetzt werden. Im Zuge von großen Instandsetzungen, vor allem aber beim Neubau, ist zu prüfen, ob die vorhandenen Schleusenabmessungen (Kammerlänge, -breite, Drempeltiefe) langfristig ausreichend sind oder ob sie an größere Schiffsabmessungen angepasst werden müssen.

Um den immensen Bedarf an Instandsetzungs- und Neubaumaßnahmen decken zu können, sind neue Strategien erforderlich. Ein wichtiger Grundsatz ist dabei die weitgehende Standardisierung wesentlicher Komponenten, wie z. B. Schleusentore, bis hin zur Standardisierung des gesamten Bauwerks. Ziel ist es, Planungen zu beschleunigen und Planungskosten zu sparen, die spätere Wartung zu vereinheitlichen und durch das Vorhalten von Gleichteilen die Lagerkosten zu verringern sowie die Reparaturen zu beschleunigen.

Auf Veranlassung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur wird derzeit in Expertengruppen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) unter intensiver Mitwirkung der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) der Standardisierungsprozess für Verkehrswasserbauwerke wie Schleusen und Wehre vorangetrieben. Für Schleusen bis 10 m Fallhöhe existiert bereits ein weitgehend ausgereifter Musterentwurf. Als Standardlösung für das Obertor ist ein Drucksegmentverschluss vorgesehen, der die Funktion des Schließens der Kammer mit der Füllein-

richtung kombiniert. Dieser Verschlusstyp wurde von der BAW umfassend untersucht [1] und von der WSV in der Praxis erprobt. Für das Untertor soll standardmäßig ein Stemmtor mit integrierten Schützen zur Entleerung eingesetzt werden. Ungeachtet dieses Trends zur Standardisierung im Schleusenbau wird es auch in Zukunft „Unikate“ geben, die z. B. wegen der großen Fallhöhe oder der Anordnung von Sparbecken vom allgemeinen Standard abweichen. In diesen Fällen sind auch künftig individuelle Planungen durch die WSV-Dienststellen sowie begleitende technisch-wissenschaftliche Beratungs- und Unterstützungsleistungen durch die BAW notwendig.

Ein Arbeitsschwerpunkt der BAW in der Planungsphase für einen Schleusenneubau sind detaillierte hydraulische Untersuchungen. Bis vor wenigen Jahren war dies eine klassische Domäne für wasserbauliche Modellversuche im gegenständlichen Modell. Durch die in den letzten zwei Jahrzehnten stark angestiegenen Computer-Rechenleistungen sind die Einsatzmöglichkeiten numerischer Modelle im Wasserbau stark erweitert worden. Heute werden in der BAW auch für Schleusenuntersuchungen ein- und mehrdimensionale numerische Modelle eingesetzt, um beispielsweise Voruntersuchungen oder spezielle Detailuntersuchungen durchzuführen. Bis auf Weiteres verspricht die hybride Modellierung, also die Verknüpfung gegenständlicher und numerischer Modelle, die besten Ergebnisse. Nachfolgend soll dieser Methoden-Mix am Beispiel der hydraulischen Untersuchungen für den Neubau der Weser-Schleuse Minden dargestellt werden. Über diese Untersuchungen wird auch in [2] berichtet.

2 Entwurfsplanung

Am Wasserstraßenkreuz Minden überquert der Mittelkanal die Weser in einer Höhe von ca. 13 m (Höhendifferenz zwischen Kanalwasserspiegel und Mittelwasserstand der Weser). Der Verbindungskanal Nord mit der im Jahr 1914 fertig gestellten Schachtschleuse dient dabei als direkte Verbindung der beiden Wasserstraßen für die Schifffahrt (Bild 1).

Die alte Schachtschleuse hat in absehbarer Zeit das Ende der technischen Nutzungsdauer erreicht und entspricht auch mit ihren Abmessungen (Kammerlänge: 82 m, Kammerbreite: 10 m, Bild 2) nicht mehr den Anforderungen der modernen Binnenschifffahrt. Daher wird seit dem Jahr 2010 in einem Achsabstand von

Heinzelmann, Thorenz: Hydraulische Untersuchungen für den Neubau
der Weser-Schleuse Minden
WasserWirtschaft 10 (2014), S. 29-33.

S. 30

Bild 1: Wasserstraßenkreuz Minden (Quelle: WSA Minden)

Bild 2: Querschnitt der Schachtschleuse Minden

ca. 52 m östlich der vorhandenen Schachtschleuse eine neue Sparschleuse mit den Kammerabmessungen: Länge 139 m, Breite 12,50 m, Drempeltiefe 4,00 m errichtet. Die Bauarbeiten sollen im Jahr 2015 abgeschlossen werden. Die Baukosten betragen ca. 70 Mio. €. Um die im Zuge der Entwurfsplanung zu klärenden hydraulischen Fragen zu beantworten, hat das Neubauamt Hannover die BAW beauftragt, das hydraulische System des Schleusenentwurfs zu begutachten und erforderlichenfalls zu optimieren. Nach dem Vorbild der alten Schachtschleuse wird auch die neue Schleuse Minden als Sparschleuse ausgeführt. Vorgesehen sind drei Sparbeckenebenen. Im Vergleich zu einer konventionellen Schleuse ohne Sparbecken wird hierdurch eine Wasserersparnis von 60 % erreicht. Als Vorlage für das Füllsystem der neuen Schleuse wurde das der Schleuse Uelzen II gewählt. Dabei handelt es sich um ein Grundlaufsystem mit einer unter der Schleusenammer liegen-

den Druckkammer, in der eine Homogenisierung des durch die Füllung von den Sparbecken oder aus dem Oberwasser aufgebauten Drucks stattfindet (Bild 3). Dieses System ist im PIANC-Report 106 „Innovations in

Bild 3: Draufsicht und Schnitt der neuen Schleuse Minden nach Planung des Neubauamts Hannover

navigation lock design” [3] detailliert beschrieben. Als Obertor ist ein Drehsegmenttor, als Untertor ein Stemmtor vorgesehen. Die Betriebsverschlüsse werden als Segmentschütze ausgeführt.

3 Hydraulische Untersuchungen für den Schleusenneubau

3.1 Hydraulische Fragen an die BAW

Im Zuge der Untersuchungen waren folgende hydraulische Fragen zu klären:

- Die Gestaltung des Einlaufbauwerks (Verkürzung und Vereinfachung),
- die Auswahl der Abmessungen und Anzahl der Sparbeckenkanäle,
- die Gestaltung der Sparbeckeneinbauten,
- die Dimensionierung der Höhe der Druckkammer unter der Schleusensole,
- die Optimierung der Lage, Größe und Form der Fülldüsen,
- die Ermittlung der Schützfahrpläne für Normalbetrieb und Störfälle sowie

- die Bestimmung der Drücke für Normalbetrieb und Störfälle.

Da sich diese unterschiedlichen Fragestellungen nicht optimal mit einem einzigen Modell bearbeiten lassen, kam ein Methoden-Mix zum Einsatz, der im Folgenden erläutert wird.

3.2 Hybride hydraulische Untersuchungsmethoden für Schleusen

Üblicherweise kommen bei hydraulischen Untersuchungen von Schleusen je nach Fragestellungen und Planungsstand verschiedene Methoden zum Einsatz. Während es für Vorstudien häufig ausreichend ist, mit analytischen Ansätzen aus Lehr-

Heinzelmann, Thorenz: Hydraulische Untersuchungen für den Neubau
der Weser-Schleuse Minden
WasserWirtschaft 10 (2014), S. 29-33.

S. 31

büchern zu arbeiten, können damit komplexere Fragen zur Systemdynamik nicht hinreichend geklärt werden. Für die Beurteilung des Gesamtsystems einer Schleuse werden daher oftmals numerische 1-D-Netzwerkmodelle herangezogen, die es ermöglichen, instationäre Vorgänge in einem komplexen Netzwerk von hydraulischen Elementen abzubilden. Diese Modelle benötigen eine gute Kenntnis über lokale hydraulische Verlustbeiwerte, die bei Schleusen üblicherweise nicht vollständig den mitgelieferten Bauteilbibliotheken entnommen werden können, da es sich bei den Formen um Einzelstücke handelt. Daher werden Detailuntersuchungen mit numerischen 3-D-Strömungsmodellen oder gegenständlichen Modellen durchgeführt, um die Verlustbeiwerte zu bestimmen und die Form der Bauteile zu optimieren. Wenn das Grundkonzept für die Schleuse fertiggestellt ist, wird bei Projekten hoher Komplexität oder Bedeutung für die Ausführungsplanung meist ein gegenständliches Modell gebaut, um das Zusammenwirken des Füllprozesses mit dem geschleusten Schiff beurteilen zu können. Dieses Konzept wurde beispielsweise auch für die Untersuchung der neuen Panama-Kanal-Schleusen verwendet [4], [5]. Die Kopplung verschiedener Modellierungsansätze, wie numerischer 1-D-, 3-D-Modelle miteinander oder numerischer Modelle mit gegenständlichem Modell, wird hybride Modellierung genannt. Das Ziel der Kopplung dieser unterschiedlichen Modellierungsmethoden ist z. B. die Parameterbestimmung (z. B. Verlustbeiwerte aus dem gegenständlichen Modell für ein numerisches Modell) oder die Erzeugung von Randbedingungen (z. B. der Volumenstrom aus einem großskaligen 1-D-Modell für ein 3-D-Detailmodell). Aber auch die Eingrenzung modelltypischer Fehler (z. B. Modellannahmen, Maßstabeffekte) kann eine wichtige Rolle spielen.

3.3 Numerische Modelluntersuchungen

3.3.1 Methodik

Für die hydraulischen Untersuchungen der neuen Schleuse Minden wurde ein mehrstufiges Konzept verfolgt. Für einzelne Elemente des Füllsystems (Einlauf, Druckkammer, Fülldüsen, Auslauf) wurden 3-D-Detailmodelle erstellt, mit denen die Verlustbeiwerte für die betrachteten Bauteile bestimmt wurden. Diese Untersuchungen wurden mit verschiedenen numerischen Verfahren durchgeführt (in chronologischer Reihung ihrer Einführung in der BAW: Comet, NaSt3DGPF, STARCCM+, OpenFOAM), wobei für viele Untersuchungen zwei Verfahren parallel zur gegenseitigen Validierung eingesetzt wurden. Um die Dynamik des Gesamtsystems zu berechnen, wurden 1-D-Netzwerkmodelle mit dem Verfahren „Flowmaster“ erstellt. Flowmaster basiert auf der Annahme einer instationären Druckrohrströmung [6], ist aber nicht für Freispiegelströmungen geeignet. Das Netzwerkmodell wurde mit den Ergebnissen der 3-D-Detailmodelle kalibriert und lieferte als Ergebnis das instationäre Verhalten der Schleuse, so dass für verschiedene Schützfahrpläne die Füllzeiten sowie Drücke und Volumenströme über die Zeit ermittelt werden konnten. Eine ähnliche Methode wurde im Nachgang der Untersuchungen für Minden auch für die Prognose des Systemverhaltens der zurzeit in Planung befindlichen neuen Schleusen Kriegenbrunn und Erlangen eingesetzt [7]. Die aus dem 1-D-Modell gewonnenen Ergebnisse der instationären Simulationen wurden wiederum als Randbedingungen für weitere 3-D-Modelle verwendet, bei denen die zeitliche Entwicklung wichtig ist. Dies waren beispielsweise die Anströmverhältnisse, das Schwappen des Wassers in der Kammer oder die Abströmverhältnisse.

3.3.2 Beispiel Gestaltung des Einlaufbauwerks

Im Zuge der Überprüfung der Entwurfsplanung war die Frage zu klären, ob das sehr aufwändige Einlaufbauwerk verkürzt werden kann, um Baukosten einzusparen (Bild 4 oben). Die Untersuchungen mit einem numerischen 3-D-Modell mit freier Wasseroberfläche ergaben einerseits eine große hydraulische Leistungsfähigkeit und andererseits, dass trotz der komplexen Formgebung des Einlaufbauwerks keine gleichmäßige Beaufschlagung des Zulaufes erreicht wird (Bild 5 links). Daher wurde die in Bild 4 unten dargestellte verkürzte und vereinfachte Form entwickelt. Die numerischen Untersuchungen für die Planungsvariante zeigten gute Ergebnisse: Die Beaufschlagung war gleichmäßig (Bild 5 rechts) und der hydraulische Widerstand gering. Allerdings war es zum Zeitpunkt der Simulationen noch nicht möglich, ausreichend feine Berechnungsgitter zu verwenden, um den Lufteinzug zu simulieren. Daher wurde be-

Bild 4: Drahtmodell und Anschnitt von ursprünglich geplantem (oben) und verkürztem (unten) Einlauf

Heinzelmann, Thorenz: Hydraulische Untersuchungen für den Neubau
der Weser-Schleuse Minden
WasserWirtschaft 10 (2014), S. 29-33.

S. 32

Bild 5: Simulationsergebnisse für ursprünglich geplanten (links) und verkürzten (rechts) Einlauf

schlossen, die Eignung des modifizierten Einlaufs im gegenständlichen Modell zu überprüfen.

3.3.3 Gegenständliche Modelluntersuchungen

Die geplante Schleuse Minden wurde im Maßstab 1:25 verkleinert im Labor der BAW aufgebaut. Bild 6 zeigt das Modell mit dem oberen Vorhafen im Hintergrund. In der Kammer befindet sich ein an einer Schiffskraftmessanlage befestigtes Messschiff. Die Schiffskraftmessanlage dient dazu, die während des Schleusungsvorgangs auf den Schiffskörper wirkenden Kräfte zu messen und durch Optimierung des Systems zu begrenzen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass später auch die durch das Schiff verursachten Trossenkräfte im akzeptablen Rahmen bleiben. Im Verlauf der Bearbeitung wurden Detailfragen iterativ mit numerischen Verfahren untersucht und dann im gegenständlichen Modell verifiziert. Durch dieses gestufte Vorgehen konnte die Effizienz der Untersuchungen erheblich gesteigert werden. Um zu untersuchen, ob eine ausreichende Leistungsfähigkeit der Schleuse unter Beachtung der zulässigen Schiffskräfte auch mit nur einem Sparbeckenkanal pro Sparbecken möglich ist, wurde die Kammer auf beiden Seiten mit Sparbecken bestückt: Auf der einen Kammerseite wurden drei Sparbecken mit je zwei Anschlusskanälen, auf der anderen Kammerseite drei Sparbecken mit je einem Anschlusskanal hergestellt. Für die Versuche konnte so wahlweise eine Variante mit einem oder mit zwei Anschlusskanälen gewählt werden. Für beide Varianten wurden die Schleusungszeiten sowie die auftretenden Schiffskräfte ermittelt.

Der größte Vorteil der gegenständlichen Labormodelle besteht darin, dass die Dynamik des Systems „Schleuse mit Schiff“ vollständig abgebildet wird. Die Bewegung des Schiffs ist direkt an die Hydraulik gekoppelt, die Schiffskräfte sowie Füll- und Entleerungszeiten können unmittelbar ermittelt werden. Änderungen, die am hydraulischen System vorgenommen werden, zeigen sofort ihre vollständigen Auswirkungen. So ist es z. B. möglich, Variantenstudien für Schützfahrpläne zügig durchzuführen. Ein nicht zu unterschätzender Vorteil gegenständlicher Modellversuche besteht auch darin, dass die Ergebnisse für den „hydraulischen Laien“ verständlich und nachvollziehbar sind. Jedoch gehen diese Vorteile auch mit einigen Nachteilen einher. Vor allem sind der Aufbau und die Ausrüstung des Modells mit einem hohen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden. Geometrische Änderungen am Modell, die nicht von vornherein vorgesehen waren, sind aufwändig. Zudem ist es teilweise schwierig, Messungen durchzuführen, wenn dies nicht schon beim Bau des Modells eingeplant wurde (z. B. im Inneren des Füllsystems). Die Modelluntersuchungen wurden u. a. genutzt, um die Leistungsfähigkeit der Planungsvariante des Einlaufs zu untersuchen. Die im numerischen Modell vorhergesagte hohe Leistungsfähigkeit konnte so verifiziert werden. Im Normalbetrieb der Schleuse wurden keine Wirbelbildung und kein Lufteinzug festgestellt. Im Zuge einer Worst-Case-Betrachtung wurde der Volumenstrom durch den Einlauf auf dem Niveau des höchsten zu erwartenden Volumenstroms künstlich fixiert ($Q = Q_{\max} = \text{const.}$). Dabei zeigte sich eine sporadische Wirbelbildung mit Lufteinzug, die das numerische Modell zuvor nicht prognostiziert hatte. Im Anschluss an die gegenständlichen Modelluntersuchungen wurden daher weitere numerische Untersuchungen durchgeführt. Mit einem höher aufgelösten Modell (ca. 15 Mio. Zellen) auf Basis

Bild 6: Labormodell der Schleuse Minden mit Schiffskraftmessanlage und Modellschiff

Bild 7: Simulationsergebnis des Einlaufs der Schleuse Minden mit Wirbelkern

Heinzelmann, Thorenz: Hydraulische Untersuchungen für den Neubau
der Weser-Schleuse Minden
WasserWirtschaft 10 (2014), S. 29-33.

S. 33

Bild 8: Baustelle der Schleuse Minden (Quelle: WSA Minden)

des Softwarepakets OpenFOAM [8] wurden Berechnungen mit einem Large-Eddy-Ansatz durchgeführt. Die Mehrphasenströmung Luft-Wasser wurde dabei mit der Volume-of-Fluid-Methode [9] abgebildet. Die für die Simulation nötigen Anpassungen von OpenFOAM sind in [10] beschrieben. Die gegenüber der Vorstudie deutlich höhere Gitterauflösung war vermutlich der entscheidende Schlüssel für die korrekte Abbildung des Strömungsverhaltens, denn dieses Modell war nunmehr in der Lage, eine sporadische Wirbelbildung zu zeigen (Bild 7).

3.4 Geplante Naturuntersuchungen nach Fertigstellung

Nachdem die beschriebenen hydraulischen Untersuchungen der BAW schon seit einiger Zeit abgeschlossen sind, befindet sich die Schleuse derzeit im Bau. Bild 8 zeigt den Einlaufbereich kurz vor dem Betonieren.

Christoph Heinzelmann and Carsten Thorenz

Hydraulic Investigations for the New Construction of Minden Lock, River Weser

As substitute for the existing lock of Minden, which was built in 1914, a new lock is currently constructed at the waterway crossing of the river Weser and the Midland Canal. During the planning stage the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW) performed detailed hydraulic investigations. One-dimensional and multi-dimensional models were used as well as a complex physical model. Based on these investigations the planning could be comprehensively verified and optimised. By redesigning the inlet structure, about 2.5 million € of construction costs were saved.

Кристоф Хайнцельманн и Карстен Торенц

Гидравлические исследования для строительства нового

шлюза на реке Везер (Weser) в Миндене (Minden)

В настоящее время на пересечении водных путей в Миндене (Minden) строится новый шлюз. Он послужит заменой построенному в 1914 году шахтному шлюзу «Минден». На этапе планирования Федеральное управление по гидросооружениям (BAW) провело тщательные гидравлические исследования. Были использованы одномерные и многомерные цифровые модели, а также сложная реальная модель. Благодаря проведенным исследованиям результаты планирования в значительной мере были подтверждены и частично оптимизированы. Затраты на строительство в размере примерно 2,5 млн. € были редуцированы за счет модернизации головного водозаборного сооружения.

Nach Fertigstellung der Schleuse ist geplant, dass die BAW auch deren Inbetriebnahme wissenschaftlich begleitet. Während des „Einfahrens der Schleuse“ sollen die im Modell ermittelten Schützfahrpläne an die Realität angepasst werden. Zudem ist vorgesehen, die tatsächlich erzielte hydraulische Leistungsfähigkeit mit der prognostizierten Leistungsfähigkeit zu vergleichen, um so die numerischen und gegenständlichen Modelle auf Basis der gewonnenen Naturdaten zu validieren.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Christoph Heinzelmann

Dr.-Ing. Carsten Thorenz

Bundesanstalt für Wasserbau

Kußmaulstr. 17

76187 Karlsruhe

christoph.heinzelmann@baw.de

carsten.thorenz@baw.de

Literatur

- [1] Thorenz, C.; Kemnitz, B.: Füll- und Entleersysteme von Schleusen – Aktuelle Entwicklungen und numerische Simulation. In: Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen (2006), Bd. 146.
- [2] Heinzelmann, Ch.; Thorenz, C.: Methodeneinsatz im Binnenverkehrswasserbau am Beispiel des Neubaus der Weser-Schleuse Minden. In: Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen (2014, im Druck).
- [3] PIANC (Hrsg.): Innovations in navigation lock design. PIANC Report No. 106, Brussels, 2009.
- [4] Thorenz, C.: Numerical evaluation of filling and emptying systems for the new Panama Canal locks. In: PIANC MMX, Paper 77, 2010.
- [5] Roux, S.; Roumieu, P.; De Mulder, T.; Vantorre, M.; De Regge, J.; Wong, J.: Determination of hawser forces using numerical and physical models for the third set of Panama locks studies. In: PIANC MMX, Paper 151, 2010.
- [6] Miller, D. S.: Internal Flow Systems. British Hydromechanics Research Association, 1978.
- [7] Thorenz, C.: Ein neuartiges Füllsystem für Sparschleusen großer Höhe. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen (2012), Heft 47, S. 503-512.
- [8] Weller, H. G.; Tabor G.; Jasak, H.; Furby, C.: A Tensorial Approach to CFD using Object Orientated Techniques. In: Computers in Physics 12 (1998), No. 6, S. 620–631.
- [9] Hirt, C. W.; Nichols, B. D.: Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. In: Journal of Computational Physics 39 (1981), No. 1, S. 201-225.
- [10] Thorenz, C.; Strybny, J.: On the numerical modelling of filling-emptying systems for locks. In: 10th International Conference on Hydroinformatics, Hamburg, 2012.