

Hydraulische Untersuchungen zur neuen Schleuse Lüneburg

Fabian Belzner M. Eng., Bundesanstalt für Wasserbau

Dr.-Ing. Lydia Schulze, Bundesanstalt für Wasserbau

Dr.-Ing. Carsten Thorenz, Bundesanstalt für Wasserbau

Einleitung

Am Elbe-Seitenkanal (ESK) ist bei Lüneburg-Scharnebeck der Bau einer neuen Schleuse mit einer Hubhöhe von 38 m, einer Nutzlänge von 225 m und einer lichten Breite von 12,50 m geplant. Damit soll eine ganzjährige Befahrbarkeit des ESK für üGMS sichergestellt und die Hinterlandanbindung des Hamburger Hafens verbessert werden.

Hydraulisches Konzept

Die Schleuse ist als autarke Sparschleuse ohne Zufluss aus dem Oberwasser oder Abgabe ins Unterwasser geplant. Das für die Restfüllung benötigte Wasser soll aus Oberbecken oberhalb des Oberwasserstandes entnommen und die Restentleerung in Unterbecken unterhalb des Unterwasserstandes abgegeben werden. Über ein Pumpensystem soll das Wasser aus den Unterbecken zurück in die Oberbecken gepumpt werden. Bild 1 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

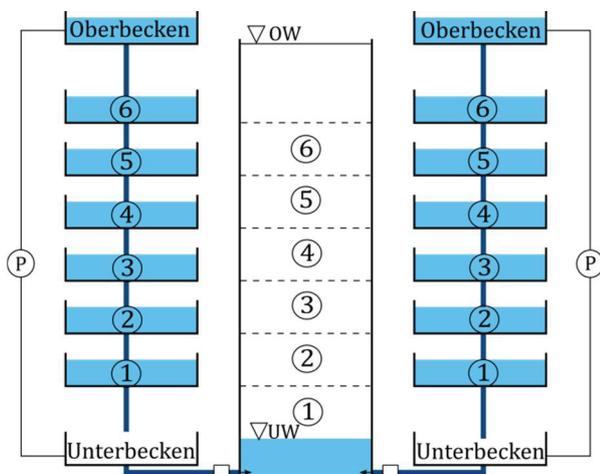


Bild 1: Grundprinzip einer autarken Sparschleuse mit Ober- und Unterbecken und Pumpensystem.

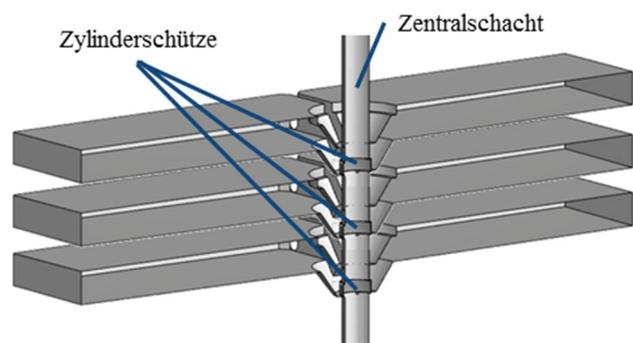


Bild 2: Isometrische Darstellung von drei in der Längsachse geschnittenen Sparbeckenebenen mit Zentralschacht und Zylinderschützen.

Füllsystem

Für die Einleitung des Wassers in die Kammer wurde in Voruntersuchungen eine Vielzahl an Systemen betrachtet (Thorenz 2011). Als zielführendes Konzept wurde ein Längskanalsystem mit vertikalen Zentralschächten für die Anbindung der Sparbecken gewählt. Jedes Sparbecken muss hydraulisch leistungsfähig an die Kammer angeschlossen werden. Die Steuerung der Sparbecken erfolgt mit Zylinderschützen.

Um die Durchdringung des Bauwerks durch eine hohe Anzahl an Schächten zu minimieren und gleichzeitig den hydraulischen Anforderungen gerecht zu werden, erfolgt der Zu- und Abfluss durch Zentralschächte, welche am unteren Ende an die Längskanäle angeschlossen sind. Die Längskanäle sind über Fülldüsen mit der Schleusenkommer verbunden. Um eine Querneigung des Wasserspiegels in der Kommer während der Füllung zu vermeiden, ergibt sich der Zwang, beide Längskanäle synchron zu beaufschlagen. Diese Gleichzeitigkeit kann nur erreicht werden, wenn auf beiden Kommerseiten Sparbecken auf gleicher Höhe vorhanden sind, welche gleichzeitig beaufschlagt werden. In Längsrichtung ist jede Sparbeckenebene momentan in fünf Kompartimente unterteilt, welche jeweils über einen eigenen Verschluss verfügen. Bei sechs vorgesehenen Sparbeckenebenen sowie den Ober- und Unterbecken werden damit insgesamt 80 Verschlussorgane benötigt.

Bild 2 zeigt exemplarisch drei übereinanderliegende Sparbecken mit Zentralschacht und Zylinderschützen. Die Zylinderschütze sind zylindrische Hülsen, welche vertikal bewegt werden können, um Öffnungen im Zentralschacht freizugeben. Mit diesem Konzept werden zur Beaufschlagung der 80 Sparbeckenanschlüsse nur 10 Schächte benötigt.

Hydraulische Untersuchungen

Anforderungen an eine Schleuse

Im Rahmen der Planung der Schleuse bestehen konkurrierende Anforderungen an Wirtschaftlichkeit, Geschwindigkeit und Sicherheit der Schleuse, die bei der Planung berücksichtigt werden müssen. Ein Überblick über die hydraulischen und konstruktiven Anforderungen an Schleusen findet sich u.a. in Partenscky (1986) oder PIANC (1986). Neuere Entwicklungen und Ergänzungen finden sich in PIANC (2009) und PIANC (2015).

Modellierung von Schleusenfüllprozessen

Mit der Zunahme der Rechenleistung in den vergangenen Jahren kam es auch bei der Entwicklung multidimensionaler numerischer Verfahren zu erheblichen Fortschritten (Thorenz 2009). Zur Simulation bewegter Schütze und des schwimmenden Schiffs steht eine Vielzahl an Verfahren zur Verfügung, die jedoch ein hohes Maß an Fähigkeiten und beträchtliche Rechenleistung erfordern. Die Ansätze sind daher noch nicht für die tägliche Simulation einer großen Zahl von Fällen geeignet. Thorenz (2010) zeigt die numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen, einen Überblick über die numerischen Methoden zur Simulation des Schleusenfüllprozesses mit OpenFOAM® geben Thorenz et al. (2017). Schulze (2018) untersuchte die Auswirkungen von Lufteintrag und -transport bei Schleusenfüllungen mit einem eigens dafür entwickelten Löser. Belzner et al. (2018) entwickelten einen eindimensionalen Ansatz, mit dem die auf das Schiff wirkenden Längskräfte für durch das Oberhaupt gefüllte Schleusen abgeschätzt werden können. Wenn der Füllvolumenstrom bekannt ist, kann die Methode auch für Schleusen mit über die Kommerlänge verteilter Füllung, wie z. B. Längskanal- oder Druckkammersysteme, genutzt werden.

Hybride Modellierung

Die geplante Schleuse Lüneburg besteht aus einer Vielzahl an Einzelbauteilen, die jeweils Einfluss auf die Füllzeit und die Sicherheit der Schließung haben. Die zu erwartende Leistungsfähigkeit des Bauwerks und die auf die Schiffe in der Kammer wirkenden Kräfte können nur mit einer ganzheitlichen Betrachtung der Schleuse beurteilt werden. Die Variation zahlreicher geometrischer und dynamischer Parameter erfordert eine hohe Anzahl an Simulationsläufen. Die ganzheitliche Betrachtung der geplanten Schleuse Lüneburg mit dreidimensionalen hydronumerischen Vollmodellen wäre selbst mit den heute zur Verfügung stehenden Rechenressourcen unwirtschaftlich und im Hinblick auf das Prä- und Postprocessing unpraktikabel. Zielführend für die Untersuchung erscheint der Weg der sogenannten „hybriden Modellierung“. Dabei werden die einzelnen Bauteile der Schleuse mit unterschiedlichen Verfahren und Methoden verschiedener Dimensionen untersucht. Die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen werden schließlich gekoppelt, sodass letztendlich eine Gesamtbetrachtung des Bauwerks erfolgen kann. Ein Beispiel für die Kopplung von hochauflösenden dreidimensionalen Bauwerksmodellen und eindimensionalen Rohrleitungsmodellen ist in Thorenz (2010) sowie in Belzner und Thorenz (2014) zu finden.

Die wesentlichen Energiehöhenverluste bei der Füllung der Schleuse Lüneburg werden an den Verschlüssen (Bild 3) und der Umlenkung von Zentralschacht in den Längskanal sowie an den Fülldüsen (Bild 4) erwartet. Im Rahmen der Untersuchung wurden hochaufgelöste dreidimensionale Modelle dieser Bauteile erstellt. Aus den Ergebnissen wurden die Energiehöhenverluste extrahiert, mit welchen entweder ein charakteristischer Abflussbeiwert für das Gesamtsystem bestimmt oder ein eindimensionales Rohrleitungsmodell der Schleuse parametrisiert werden kann. Mit dieser Methodik kann die zu erwartende Füllzeit für verschiedene Schützöffnungszeiten abgeschätzt werden.

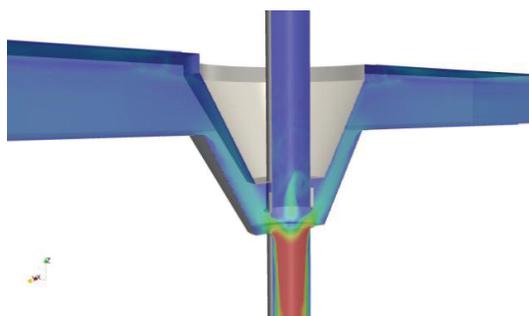


Bild 3: 3D-numerische Simulation des Zylinderschützbereichs mit Trichter und Zentralschacht.

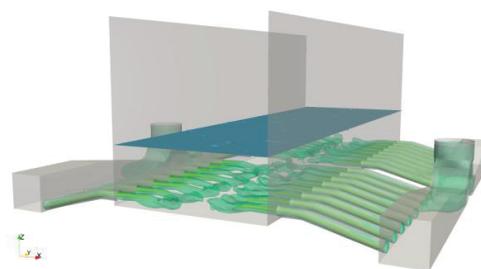


Bild 4: 3D-numerische Simulation der Längskanäle mit Fülldüsen (Ausschnittsmodell).

Bild 5 verdeutlicht die Vorgehensweise bei der hybriden Modellierung. Die Ergebnisse hochauflösender 3D-Modelle (Bild 3 und Bild 4) werden Betrachtungen anderer Skalen und Methoden zugeführt, um zu einem Gesamtergebnis zu kommen. Der Aufwand für die Abschätzung der Füllzeiten mittels eines charakteristischen Abflussbeiwerts (Bild 5, linke Seite) ist gering, es bestehen jedoch Unschärfen bezüglich der auftretenden Energiehöhenverluste bei teilweise geöffneten Schützen,

da hierbei mit nur einem charakteristischen Abflussbeiwert für das Gesamtsystem gearbeitet wird. Dieser Beiwert wird entsprechend der jeweiligen Schützöffnungen skaliert. Tatsächlich ändert sich bei Teilöffnung jedoch nur der Verlustbeiwert an den Verschlüssen. Die weiteren Verlustbeiwerte bleiben weitgehend konstant.

Die Simulation mit 1D-Rohrleitungsmodellen (Bild 5, rechte Seite) ist im Vergleich mit geringeren Unsicherheiten behaftet, da mehrere Einzelbauteile innerhalb des Rohrleitungsmodells parametrisiert werden, jedoch steigt der Aufwand für Modellerstellung und Kalibrierung. Simulationen mit parametrisierten eindimensionalen Rohrleitungsmodellen ermöglichen es, die Beaufschlagung einzelner Fülldüsen abzuschätzen. Mit den so ermittelten Einzelvolumenströmen und dem Ansatz von Belzner et al. besteht die Möglichkeit, die zu erwartenden Schiffskräfte in Längsrichtung abzuschätzen.

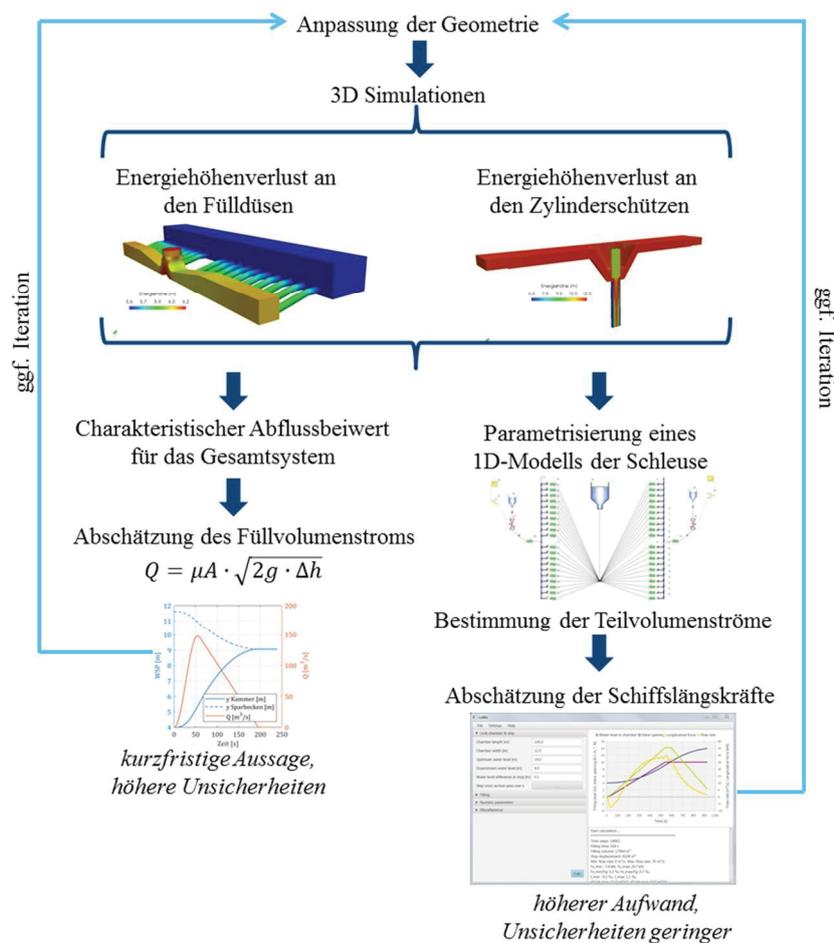


Bild 5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise bei der hybriden Modellierung einer Schleuse.

Ergebnisse

Aus den Ergebnissen der hochaufgelösten Teilmodelle wurden die Energiehöhenverluste an verschiedenen Stellen im hydraulischen System der Schleuse extrahiert. Es wurde sowohl ein Energiehöhenverlust zwischen Sparbecken und Zentralschacht, als auch zwischen Zentralschacht und Kammer ermittelt. Letzterer ist die Summe aus den Verlusten am Übergangspunkt zwischen Zentralschacht und Längskanal sowie an den Fülldüsen. Ein Vergleich zeigt, dass an den Zylinderschützen bei entsprechenden Wassertiefen nur ein geringer Anteil der bei der Kammerfüllung zur Verfügung stehenden Energiehöhe verloren geht. Umgekehrt bedeutet das, dass die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems maßgeblich von der geometrischen Ausbildung des Anschlusses des Zentralschachts an den Längskanal und dem Durchmesser der Fülldüsen bestimmt wird. Änderungen des Durchmessers der Fülldüsen im Bereich weniger Zentimeter beeinflussen die erreichbare Füllzeit damit überproportional. Der Durchmesser muss so gewählt werden, dass die Energiehöhenverluste an den Fülldüsen gering sind und gleichzeitig eine gute Längsverteilung im Kanal gewährleistet ist. Der Übergang vom Zentralschacht zum Längskanal kann weiter hydraulisch optimiert werden, um die hier auftretenden Energiehöhenverluste zu reduzieren, es wird jedoch davon ausgegangen, dass hierdurch der Schalungsaufwand sowie der Raumbedarf und damit die Baukosten steigen.

Letztendlich zeigt die Untersuchung, dass bei der Schleusenfüllung die unteren Sparbeckenschütze wahrscheinlich langsamer geöffnet werden müssen, um hohe auftretende Schiffskräfte zu vermeiden. Die oberen Sparbeckenebenen können dann schneller entleert werden. Aus rein hydraulischer Sicht könnte jede Sparbeckenebene in etwa 2,5 Minuten entleert werden, jedoch muss die Schützöffnungsgeschwindigkeit wegen der auftretenden Schiffskräfte reduziert werden. Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass die Kammer voraussichtlich in weniger als 30 Minuten gefüllt werden kann. Hohe Elbwasserstände vergrößern das Flottwasser zu Beginn der Füllung und verringern den Einfluss einzelner Füllstrahlen auf die in der Kammer liegenden Schiffe. Zukünftige Untersuchungen werden zeigen, ob die Füllstrategie in Abhängigkeit der aktuellen Randbedingungen und der Belegung der Kammer ggf. dynamisch angepasst und so eine effizientere Nutzung des Bauwerks erreicht werden kann.

Fazit

Im Rahmen der Planung einer Schleuse sind zahlreiche hydraulische Fragenstellungen bezüglich der Leistungsfähigkeit einzelner Komponenten und des Gesamtsystems, auftretender Bauwerksbelastungen aufgrund hydraulischer Beanspruchungen sowie der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt zu beantworten. Mit den heute zur Verfügung stehenden dreidimensionalen Simulationsmethoden könnten viele dieser Fragen mit hochaufgelösten Simulationen am Gesamtmodell beantwortet werden. Vor dem Hintergrund der Vielzahl der zu untersuchenden Varianten und der zu erwartenden Rechenzeiten ist eine solche Vorgehensweise insbesondere in einer frühen Planungsphase jedoch oft nicht praktikabel. Die hybride Modellierung eines solch komplexen Bauwerks erlaubt es, an spezifischen Bauwerksteilen gezielt hochauflösende 3D-Simulationen durchzuführen und die Ergebnisse einer ganzheitlichen Betrachtung zuzuführen. Durch den modularen Charakter dieser Vorgehensweise können einzelne Bauwerksteile unabhängig vom Gesamtsystem modifiziert und neu bewertet werden, ohne ressourcenintensive Betrachtungen am Gesamtsystem durchführen zu müssen. Die Betrachtung erfolgt

dabei mit einem Mix aus Methoden auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik und bewährten ingenieurwissenschaftlichen Betrachtungen.

Literatur

- Belzner, Fabian; Simons, Franz; Thorenz, Carsten (2018): An application-oriented model for lock filling processes. In: 34th PIANC-World Congress (Proceedings). Online verfügbar unter https://coms.events/pianc-panama/data/full_papers/full_paper_183.pdf, zuletzt geprüft am 25.05.2018.
- Belzner, Fabian; Thorenz, Carsten (2014): Hybrid Modelling of a Filling and Emptying System of a Navigation Lock. In: Rainer Lehfeldt und Rebekka Kopmann (Hg.): ICHE 2014. Proceedings of the 11th International Conference on Hydroscience & Engineering, Hamburg, Germany, 28 September to 2 October 2014, S. 967–974. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/99525>, zuletzt geprüft am 13.12.2018.
- Partenscky, Hans-Werner (1986): Binnenverkehrswasserbau. Schleusenanlagen. Berlin Heidelberg NewYork Tokyo: Springer.
- PIANC (Hg.) (1986): Final Report of the International Commission for the Study of Locks. Unter Mitarbeit von G. Willems, R. Kühn, W. Roehle, P. E. Lagrou, C. Rothilde, J. Seyvert et al. Bruxelles.
- PIANC (2009): InCom WG 29. Innovations in Navigation Lock Design. Unter Mitarbeit von Philippe Rigo, Jörg Bödefeld, Jan Bos, John Clarkson, Fabrice Daly, Jose Luis Fernandez et al. Hg. v. PIANC.
- 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.
- Schulze, Lydia (2018): Development of an Application-Oriented Approach for Two-Phase Modelling in Hydraulic Engineering. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden. Online verfügbar unter <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105431>, zuletzt geprüft am 04.01.2019.
- 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 (2011): A self-contained High-Lift Lock. PIANC Workshop. PIANC. New Orleans, 13.09.2011.
- 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 <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102493>.