

# HYDRAULISCHE MODELLVERSUCHE ZUR BEFÜLLUNG UND ENTLEERUNG DER NEUEN KAISERSCHLEUSE IN BREMERHAVEN

von

Stefan Schimmels<sup>1</sup>  
Torsten Schlurmann<sup>2</sup>

## ABSTRACT

After more than 100 years of service the Kaiserschleuse in Bremerhaven will be rebuilt to cope with the requirements of modern commercial ship traffic. The new lock features lift-sliding gates which are built for the first time in lock construction worldwide. For the design of the gates hydraulic model tests on a 1:15 scale detail model of the gate and a 1:25 scale model of the complete lock were performed. The major outcome of the tests were filling and emptying curves, discharge coefficients, flow patterns in the lock chamber, water levels in the gate, pressures in the filling gap and resulting forces on the upper part of the gate.

## 1. EINLEITUNG

Die Kaiserschleuse in Bremerhaven wurde im Jahr 1897 in Betrieb genommen und galt damals als größtes Schleusenbauwerk der Welt. Mittlerweile hat sie allerdings einen kritischen baulichen Zustand erreicht und entspricht mit 223 m Länge, 28 m Durchfahrtsbreite und -8,95 mNN Drempeltiefe nicht mehr den aktuellen Anforderungen des modernen Seeschiffahrtverkehrs. Daher soll an gleicher Stelle eine neue Schleuse errichtet werden, die mit einer Drempeltiefe von -13,0 mNN, einer Durchfahrtsbreite von 55,0 m und einer Kammerlänge von etwa 300 m bei einer angesetzten Lebensdauer von 80 Jahren der zu erwartenden zukünftigen Entwicklung der Schifffahrt gerecht wird.

Eine Besonderheit der neuen Kaiserschleuse stellen die Schleusenhäupter dar, bei denen erstmals innovative Hubschiebetore eingesetzt werden, die die Vorteile eines Hubtores mit denen eines Schiebetores vereinen. Das Tor besteht aus einem Torunterteil und einem

---

<sup>1</sup> Dr.-Ing., Forschungszentrum Küste (FZK), Merkurstraße 11, 30419 Hannover

<sup>2</sup> Prof. Dr.-Ing. habil., Franzius-Institut (FI), Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

Toroberteil, das über Hydraulikzylinder um 70 cm angehoben werden kann. Dadurch wird ein Füllspalt freigegeben, durch den die Schleusenkommer gefüllt bzw. entleert wird. Das Toroberteil ist als Trogkonstruktion mit einem Schwimmkasten ausgebildet, wobei der Innenraum oberhalb des Schwimmkastens über einen etwa 10 cm breiten Kehrspalt mit dem Oberwasser verbunden ist. Zur Reduzierung der Sogkraft auf das Toroberteil, die bei der Durchströmung des Füllspalts entsteht, sind Füllrohre durch den Schwimmkasten vorgesehen, über die der Füllspalt mit dem Torinnenraum verbunden ist (Abbildung 1).

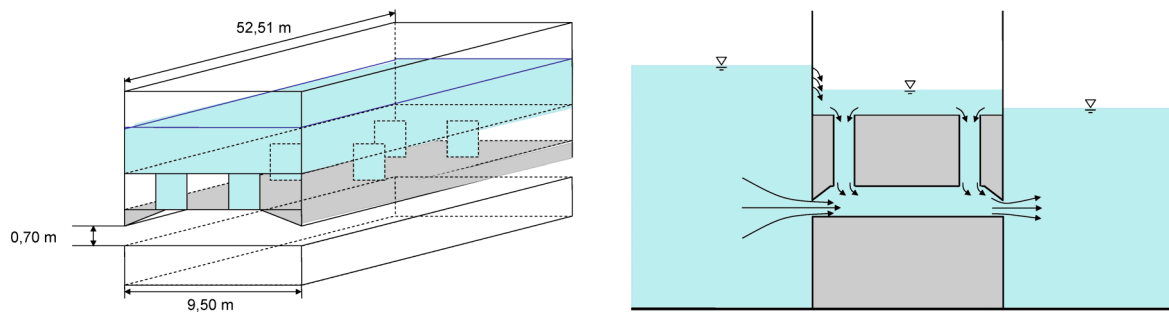


Abbildung 1: Skizze der Hub-Schiebetor Konstruktion (links) und Strömungen durch den Torkörper (rechts).

Die Komplexität dieser neuartigen Konstruktion erforderte genauere Untersuchungen der hydraulischen Eigenschaften, die anhand physikalischer Modellversuche am Franzius-Institut durchgeführt wurden. Dabei wurden zwei Modelle verwendet, ein Detailmodell im Maßstab 1:15, das einen 15 m breiten Ausschnitt des Torkörpers berücksichtigt und ein Flächenmodell im Maßstab 1:25, bei dem die gesamte Schleusenkommer und ein Teil des Vorhafens abgebildet waren. Insgesamt lieferten die Modellergebnisse Aussagen zu Füll- und Entleerungskurven, Abflussbeiwerten, Strömungen in der Schleusenkommer, Wasserständen im Torkörper, Drücken im Füllspalt und den daraus resultierenden Kräften auf das Toroberteil. Nach einer genaueren Erläuterung der einzelnen Modelle im Folgenden wird in erster Linie auf die Kräfte eingegangen, die sich nur durch Verknüpfung der Ergebnisse beider Modelle bestimmen lassen.

## 2. RANDBEDINGUNGEN UND MODELLAUFBAU

Die Randbedingungen für die Versuche ergeben sich aus den zu schleusenden Wasserständen, wobei insgesamt drei Fälle berücksichtigt wurden. Fall 1 entspricht dem Normalbetrieb bei Tideniedrigwasser ( $\Delta H = 3,02$  m), Fall 2 dem Normalbetrieb bei mittlerem Wasserstand in der Weser ( $\Delta H = 2,00$  m) und Fall 3 repräsentiert eine Extremsituation mit höchstem Hafenwassertand und niedrigstem Tideniedrigwasser ( $\Delta H = 4,71$  m). Ferner wurden verschiedene Öffnungsgeschwindigkeiten des Füllspalts untersucht, wobei eine Füllzeit von 10 min im Fall 2 nicht überschritten werden sollte.

Die Versuche am Detailmodell wurden unter stationären Randbedingungen in einer Strömungsrinne durchgeführt, wobei die Strömung durch die Füllrohre im Schwimmkasten über einen zusätzlichen konstanten Durchfluss berücksichtigt wurde. Für vorgegebene Ober- und Unterwasserstände wurden bei verschiedenen Öffnungsweiten des Füllspalts die Drücke unter dem Toroberteil gemessen. Hieraus wurden die turbulenten Druckschwankungen sowie die mittleren Drücke an verschiedenen Positionen entlang des Tores ausgewertet. Aus den so ermittelten mittleren Druckverteilungen konnte dann für jeden Fall durch Integration die

entsprechende Kraft auf das Oberteil für verschiedene Zuflüsse durch die Füllrohre in Abhängigkeit der Öffnungsweite des Füllspalts bzw. der Wasserstandsdifferenz zwischen Ober- und Unterwasser bestimmt werden.

Das Flächenmodell bildete die gesamte Schleusenammer und einen Teil des Vorhafens im Maßstab 1:25 ab. Hiermit wurde der Schleusungsvorgang maßstabsgetreu simuliert und neben den Strömungen im Nahfeld des Tores die Wasserstände in der Schleusenammer und im Torinnenraum gemessen.

### 3. ERGEBNISSE

#### 3.1 Detailmodell

Das Detailmodell diente in erster Linie der Quantifizierung der Drücke unter dem Toroberteil während der Öffnung des Füllspalts, um mögliche Resonanzen zu vermeiden. Ferner kann aus der mittleren Druckverteilung unter dem Toroberteil die resultierende Kraft durch Integration ermittelt werden. In Abbildung 2 sind auf der linken Seite die Druckschwankungen an verschiedenen Positionen entlang des Toroberteils für Fall 2 ohne Zufluss durch die Füllrohre bei voll geöffnetem Füllspalt dargestellt. Die rechte Grafik zeigt die mittlere Druckverteilung für verschiedene Öffnungsweiten bei  $13.07 \text{ m}^3/\text{s}$  Zufluss durch die Füllrohre im Fall 2.

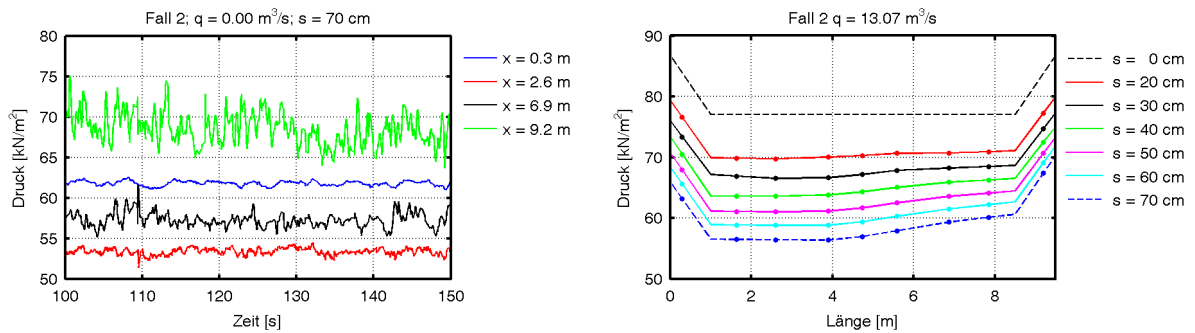


Abbildung 2: Zeitreihe der Drücke an verschiedenen Positionen unter dem Toroberteil (links) und mittlere Druckverteilung bei verschiedenen Öffnungsweiten (rechts) für Fall 2.

Aus den Druckverteilungen können schließlich die Kräfte unter dem Toroberteil bestimmt werden, die exemplarisch für den Fall 2 bei verschiedenen Zuflüssen durch die Füllrohre in Abbildung 3 dargestellt sind.

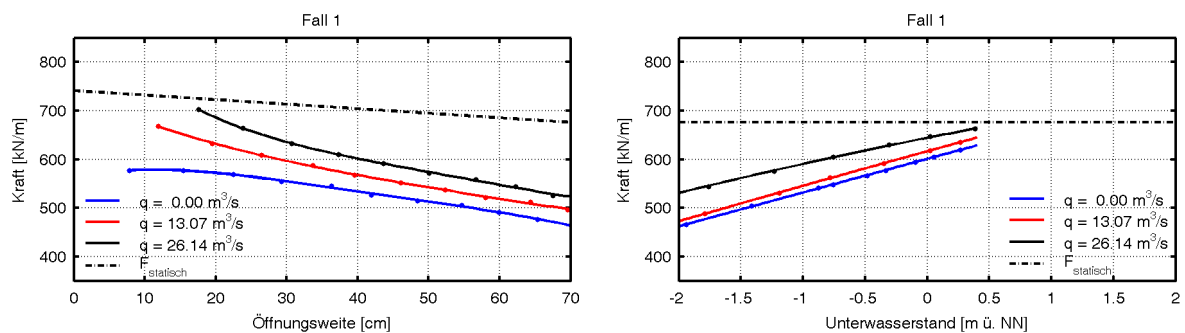


Abbildung 3: Kräfte unter dem Toroberteil in Abhängigkeit der Öffnungsweite des Füllspalts (links) und des Unterwasserstands (rechts) für verschiedene Durchflüsse durch die Füllrohre im Fall 1.

Die linke Grafik zeigt die Abhängigkeit von der Öffnungsweite des Füllspalts bei maximaler Wasserstandsdifferenz und die rechte Grafik den Einfluss steigender Unterwasserstände. Die gestrichelte Linie entspricht der hydrostatischen Kraft, aus der erkennbar wird, dass mit zunehmender Öffnungsweite des Füllspalts die Kraft unter dem Toroberteil abnimmt, und mit steigendem Unterwasserstand wieder gegen die hydrostatische Kraft strebt.

### 3.2 Flächenmodell

Am Flächenmodell wurde der gesamte Schleusungsvorgang instationär simuliert und die Strömungen im Nahfeld des Tors sowie die Wasserstände in der Schleusenammer und im Torinnenraum erfasst. Auf eine Darstellung der Strömungen, und Wasserspiegelneigungen in der Schleusenammer während der Füllung und Entleerung der Schleusenammer kann hier nicht explizit eingegangen werden. Eine ausführliche Beschreibung der Versuche und Ergebnisse ist in Schimmels & Schlurmann (2008) zu finden.

Die Wasserstände in der Schleusenammer und in der Torkammer oberhalb des Schwimmkastens für alle drei Lastfälle während des Füllvorgangs sind in Abbildung 4 dargestellt. Die vertikale gestrichelte Linie bei 1 min markiert den Zeitpunkt zu dem der Füllspalt vollständig freigegeben ist. Die anderen vertikalen Linien zeigen die markieren die Füllzeit der Schleuse, wobei zu erkennen ist, dass bei einer Öffnung des Füllspalts in 60 s die Vorgabe einer maximalen Füllzeit von 10 min im Fall 2 eingehalten werden kann.

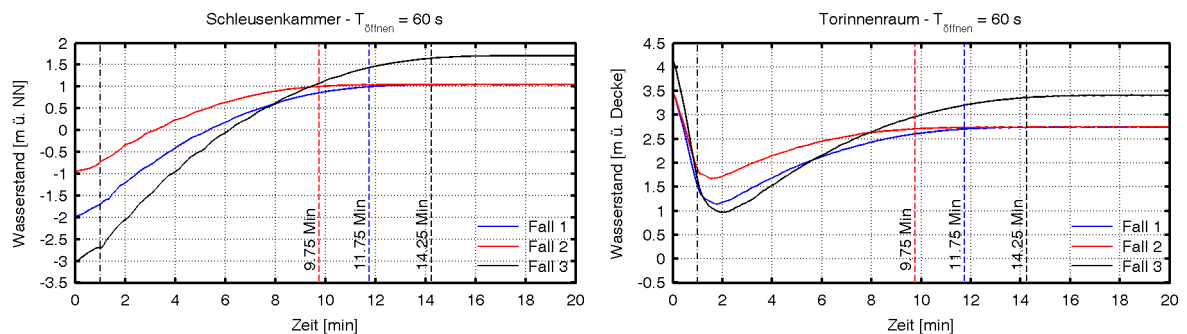


Abbildung 4: Zeitliche Entwicklung der Wasserstände in der Schleusenammer (links) und im Torinnenraum (rechts) für alle drei Lastfälle bei Füllung der Schleuse. Öffnung des Füllspalts in 60 s.

Aus der zeitlichen Ableitung des Wasserstands im Torinnenraum kann der Durchfluss durch die Füllrohre bestimmt werden, so dass mit der Öffnungsweite des Füllspalts und den Wasserständen in der Schleusenammer schließlich die Kräfte auf das Toroberteil aus den Ergebnissen des Detailmodells ermittelt werden können.

### 3.3 Kombination beider Modelle

Die Gesamtkraft auf das Toroberteil ergibt sich aus der Summe der Wasserauflast oberhalb des Schwimmkastens und der hydrodynamischen Kraft unterhalb. Durch Kombination der Ergebnisse des Detailmodells und des Flächenmodells kann somit die Gesamtkraft bestimmt werden. Abbildung 5 zeigt die entsprechenden Kraftverläufe unterhalb (links) und oberhalb (rechts) des Schwimmkastens für alle drei Fälle bei Füllung der Schleusenammer. Die Kraft aus der Wasserauflast ist negativ, da angenommen wird, dass die Resultierende nach oben wirkt. Die Gesamtkraft auf das Toroberteil ergibt sich somit aus der Summe beider Kräfte und

ist in Abbildung 6 auf der linken Seite dargestellt. Die Grafik auf der linken Seite zeigt die entsprechende Gesamtkraft bei Entleerung der Schleuse.

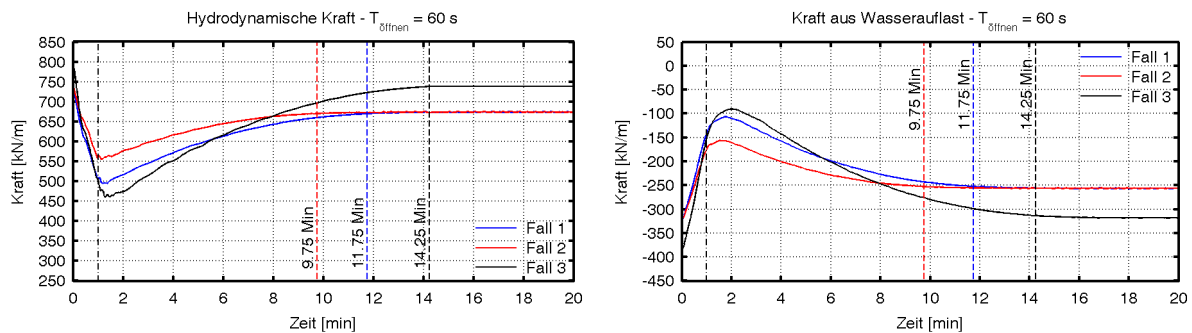


Abbildung 5: Kraftverlauf unterhalb (links) und oberhalb des Schwimmkastens (rechts) im Toroberteil für alle drei Lastfälle bei Füllung der Schleusenammer. Öffnung des Füllspalts in 60 s.

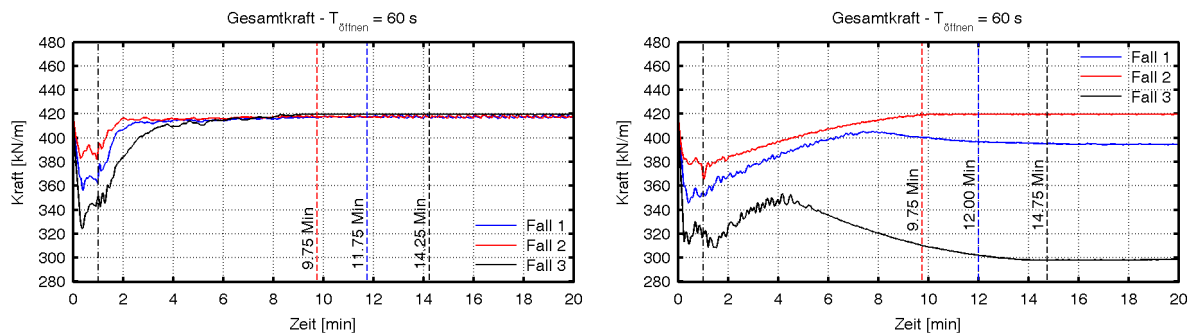


Abbildung 6: Zeitreihe der Gesamtkraft auf das Toroberteil bei Füllung (links) und Entleerung (rechts) der Schleusenammer für alle drei Lastfälle. Öffnung des Füllspalts in 60 s.

Zu Beginn der Öffnung des Füllspalts und nach der Ausspiegelung entspricht die Kraft auf das Toroberteil der hydrostatischen Auftriebskraft. Diese nimmt während der Öffnung des Füllspalts schnell ab und erreicht etwa in der Mitte des Öffnungsvorgangs ein Minimum. Hierdurch erfährt das Toroberteil während der Öffnung eine Belastung, wobei die Versuche zeigten, dass die größte Belastung tatsächlich nach Ausspiegelung im Fall 3 entsteht, wenn der Schwimmkörper nicht mehr vollständig unter Wasser steht (vgl. Abbildung 6, rechts).

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

Für die neue Kaiserschleuse in Bremerhaven werden erstmalig im Schleusenbau Hubschiebetore verwendet. Zur Untersuchung des hydraulischen Verhaltens dieser neuartigen Konstruktion wurden Modellversuche am Franzius-Institut durchgeführt. Insgesamt wurden Füll- und Entleerungskurven, Abflussbeiwerte, Strömungen in der Schleusenammer, Wasserstände im Torkörper, Drücke im Füllspalt und die daraus resultierenden Kräfte auf das Toroberteil bestimmt. Hier wurde vor allem auf die Drücke und Kräfte eingegangen.

#### 5. SCHRIFTTUM

SCHIMMELS, S. und SCHLURMANN, T.: Physikalische Modellversuche zur Hydraulik der Befüllung und Entleerung der neu geplanten Kaiserschleuse in Bremerhaven durch den Torkörper. Franzius-Institut Bericht Nr. 703, 96 pp., Hannover, 2008.