

4.6 Panama-Kanal

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

Dr.-Ing. Carsten Thorenz

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Kurzfassung

Die "Autoridad del Canal de Panama" (ACP) plant die Erweiterung des Panamakanals, um dem wachsenden Bedarf entlang der weltweiten Handelswege gerecht zu werden. Während der Bieterphase der Ausschreibung zu diesem Projekt waren zahlreiche Bieter beteiligt. In einem der teilnehmenden Konsortien, dem "Consortio Atlantico-Pacífico de Panama" (CAPP), arbeitete die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) als wissenschaftlicher Berater für die Bilfinger Berger AG. Die BAW hatte hierbei u.a. die Aufgabe, die Leistungsfähigkeit des für die Schleusen vorgeschlagenen Füll- und Entleersystems zu validieren. Die dazu durchgeführten Arbeiten und Teile der Resultate werden hier vorgestellt.

1. Einleitung

1.1 Gesamtüberblick

Die dritte Schleusenlinie soll es den Panamakanal befahrenden Schiffen ermöglichen, vom Niveau des Atlantischen oder Pazifischen Ozeans auf das Niveau des Gatun-Sees gehoben zu werden bzw. von diesem auf Meereshöhe abgesenkt zu werden. Dies soll über eine Schleusentreppe erfolgen, die aus drei Stufen besteht. Das Gesamtdesign sollte so gewählt werden, dass sowohl der Sicherheit als auch der Geschwindigkeit genüge getan wird. Die Hauptzielgrößen für das Füll- und Entleersystem waren

- 1) die Minimierung der Füll- und Entleerzeiten um den Durchsatz an Schiffen zu maximieren,
- 2) die Minimierung der Trossenkräfte und der Schiffsbewegung in der Kammer und
- 3) die Minimierung des Frischwasserverbrauchs.

Um diese Ziele zu erreichen, hat ACP ein initiales Design erarbeitet und den Bietern vorgelegt.

Während der Startphase des Projekts (Dezember 2007/ Januar 2008) war vorgesehen worden, dass die BAW eine Validierung der von der Compagnie Nationale du Rhone (CNR, als Auftragnehmer von ACP) durchgeführten physikalischen Modellversuche durchführt. CNR hatte zu diesem Zeitpunkt bereits ein physikalisches Modell der Schleusen in Betrieb und die Endergebnisse der Untersuchungen wurden in naher Zukunft erwartet. Es wurde geplant, dass die BAW nach Ende dieser Untersuchungen eigene Tests an diesem Modell zu Validierungszwecken vornimmt. Während dieser Arbeiten sollten mit eigenem Messinstrumentarium die hydraulische Leistungsfähigkeit und die Schiffskräfte überprüft werden. Parallel dazu sollten numerische Modelle aufgesetzt und mit den Ergebnissen des physikalischen Modells kalibriert werden.

Die Ergebnisse der CNR-Studien wurden ursprünglich für Ende des Jahres 2007 erwartet, verzögerten sich dann aber auf zunächst Ende Februar, um dann schließlich im April 2008 als vorläufiger und im Oktober 2008 als endgültiger Bericht vorgelegt zu werden. Im März 2008 gab es zudem die Möglichkeit das physikalische Modell der CNR zu besichtigen, wobei jedoch keine Fragen zu den Modelluntersuchungen gestellt oder eigene Messungen vorgenommen werden durften. Es war unklar, ob das physikalische Modell den von ACP zur Verfügung gestellten Entwurfszeichnungen entsprach oder ob Änderungen an der Geometrie vorgenommen wurden. Daher wurde davon abgesehen, die Daten aus dem vorläufigen Bericht zur Kalibrierung der numerischen Modelle zu verwenden.

Aus dem Mangel an Kalibrierungsdaten ergab sich die Notwendigkeit, den Rahmen der numerischen Untersuchungen erheblich zu erweitern. Der Großteil dieser Arbeiten wurde in der kurzen Zeitspanne von Februar bis Juni 2008 durchgeführt. Die Methoden und Resultate werden im Folgenden vorgestellt.

2. Numerische Untersuchungen

2.1 Vorgehen

Die hydraulischen Eigenschaften des Füll- und Entleersystems („F-E-System“) wurden in Bezug auf die Füllzeiten und die erwarteten Wasserspiegelgefälle mit numerischen Modellen untersucht. Folgendes Vorgehen wurde gewählt:

Das globale Verhalten des Füllsystems wurde mit dem kommerziellen Modell „Flowmaster“ für Strömungen in Netzwerken ermittelt. Dieses Programm löst die eindimensionalen Impulsgleichungen für Strömungen von Fluiden in Netzwerken. Es verfügt über eine große interne Datenbank mit den hydraulischen Verlustbeiwerten vieler Standardkomponenten wie Krümmern, Abzweigen etc.. Jedoch reicht diese Datenbasis für einen Schleusenentwurf nicht aus, da hier speziell geformte Teile zum Einsatz kommen, deren Verlustbeiwerte unbekannt sind. Für diese mussten die Verlustbeiwerte erst bestimmt werden. Dazu wurden dreidimensionale numerische Lokalmodele aufgestellt. Als Rechenverfahren kamen zwei dreidimensionale Navier-Stokes-Löser zum Einsatz: Comet [1] und Nast3DGPF [2], [3], [4]. Die wesentlichen Charakteristika dieser Programme sind:

„Nast3DGPF“:

- Entwickelt an der Universität Bonn in Kooperation mit der BAW
- Mehrphasige Navier-Stokes-Gleichungen mit Large-Eddy Turbulenzmodell (Smagorinsky LES)
- Strukturierte, gradierte Finite-Differenzen
- Optimiert für den Einsatz auf massiv parallelen Rechner (Cluster)

„Comet“:

- Entwickelt an der Universität Hamburg-Harburg, heute liegen die Rechte bei der CD-Adapco-Gruppe (Star-CD, StarCCM+)
- Mehrphasige Navier-Stokes-Gleichungen mit RANS Turbulenzmodell (k - ϵ , RNG- k - ϵ , k - ω , MSST, ...)

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

- Unstrukturiertes Finite-Volume Gitter
- Einsetzbar auf Parallelrechnern, limitiert über die Anzahl verfügbarer Lizenzen

Nachdem mit diesen Verfahren die lokalen Verlustbeiwerte bestimmt worden sind, wurde das globale Verhalten der Schleusen (Füll- und Entleerzeiten, Volumenströme etc.) mit Flowmaster ermittelt.

Um das Bewegungsverhalten des Wassers in der Kammer während des Schleusungsvorgangs nachzubilden, wurden die aus Flowmaster ermittelten Volumenströme für die Fülldüsen abgegriffen und als Randbedingungen für ein dreidimensionales Strömungsmodell des Wassers in der Kammer verwendet.

2.2 Überprüfung des vorgeschlagenen Füll- und Entleersystems

ACP hat den Bietern ein initiales Design für das Füllsystem der Schleusen zur Verfügung gestellt. Dieses wurde durch externe Consultants für ACP numerisch überprüft und bildete die Grundlage für das physikalische Modell bei der CNR, welches während der hier beschriebenen numerischen Studien noch untersucht wurde.

Die Grundkonzeption ist in Bild 1 dargestellt. Es handelt sich um eine dreistufige Schleusentreppe, bei der jede Kammer an den Enden mit doppelten Schiebetoren ausgestattet ist. Jede Kammer ist mit drei Sparbecken verbunden, die wiederum in je vier einzelne Bereiche geteilt sind. Damit verfügt das Gesamtsystem über 36 Sparbecken. Das Füllsystem besteht aus einem durchgehenden Hauptlängskanal der alle drei Kammern mit dem Unter- und Oberwasser verbindet. Für jede Kammer ist beidseitig ein innerer Längskanal vorgesehen, der mit dem äußeren Längskanal über einen zentralen Verteiler (im Folgenden wegen seiner Form „Brezel“ genannt) verbunden ist (s. Bild 2). Das Füll- und Entleersystem soll die gestellten Anforderungen an das Füllen und die Wasserbewegung in der Kammer erfüllen.

2.2.1 Numerische Modellierung des Füll- und Entleersystems

Um die hydraulische Leistungsfähigkeit des Systems zu überprüfen, ist es notwendig besonders kritische Stellen zu identifizieren, an denen hohe hydraulische Verluste zu erwarten sind. Für die Überprüfung mit einem dreidimensionalen numerischen Strömungsmodell wurden folgende Punkte ausgewählt:

1. Einlässe der Sparbecken
2. Verbindungspunkt der Sparbeckenkanäle
3. Verbindungspunkt zwischen Sparbeckenkanal und Hauptlängskanal
4. Verbindungspunkt zwischen Hauptlängskanal und innerem Längskanal („Brezel“)
5. Fülldüsen zwischen innerem Längskanal und Kammer

In der in Bild 2 gezeigten Skizze sind diese Punkte in grün markiert worden.

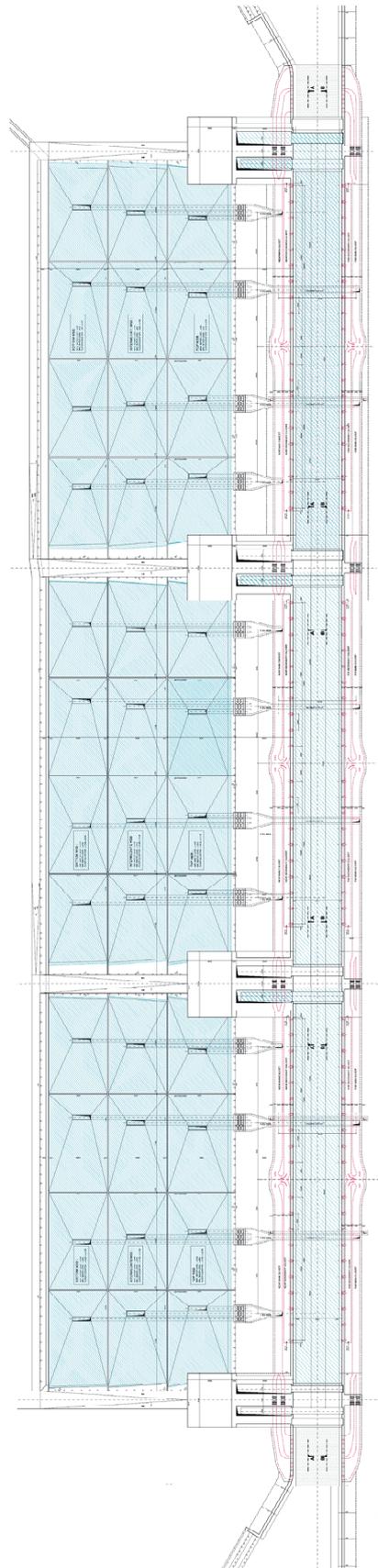


Bild 1: Skizze der von ACP entwickelten Konfiguration der dreistufigen Schleusentreppe mit seitlich angeordneten Sparbecken

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

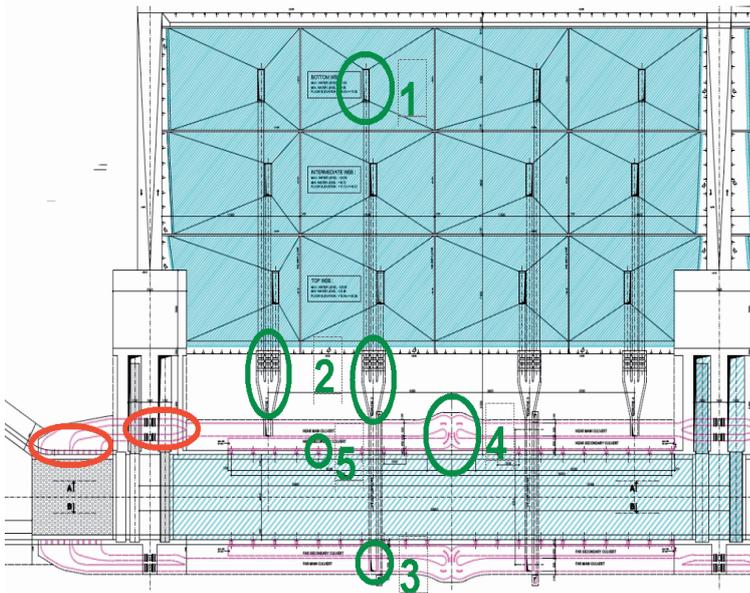


Bild 2: Skizze der oberen Kammer (von ACP) mit Markierungen für hydraulisch relevante Punkte

Einigen Punkten wurde eine geringere Relevanz zugeordnet (rote Markierungen in Bild 2). Für diese wurde aufgrund der Erfahrungen der BAW angenommen, dass die hydraulischen Verlustbeiwerte oder die internen Werte von Flowmaster hinreichend genau sind.

2.2.2 Genereller Ablauf

Für alle betrachteten Punkte wurde angenommen, dass die Zeitspanne bis zum Erreichen eines lokal stationären Strömungsfeldes klein ist im Vergleich zu der zur Füllung benötigten Zeit. Daher konnte für die Bestimmung der Verlustbeiwerte von zeitlich unveränderlichen Randbedingungen ausgegangen werden.

Die Verlustbeiwerte wurden auf der Basis der Bernoulligleichung bestimmt, wobei die Gravitation und die geodätische Höhe vernachlässigt werden konnten, da es sich um ein geschlossenes Rohrnetzwerk ohne freien Wasserspiegel handelt. Um Geschwindigkeiten und Drücke zu bestimmen, wurden virtuelle Messsonden an mehreren Stellen der jeweiligen Modellgebiete angebracht. Hierbei wurden Punkte ausgewählt, an denen der Einfluss der Randbedingungen nicht mehr erkennbar war.

Die Berechnungen wurden zur Absicherung sowohl mit NaSt3DGPF als auch mit Comet durchgeführt. Generell zeigte sich, dass NaSt3DGPF auf groben Berechnungsgittern die Tendenz hat, die Verlustbeiwerte zu überschätzen und damit bezüglich der Füll- und Entleerzeiten auf der sicheren Seite zu liegen. Das mit unstrukturierten Gittern arbeitende Comet zeigte genau das entgegengesetzte Verhalten, die Verlustbeiwerte wurden auf groben Gittern tendenziell unterschätzt. Das bedeutet, dass der Qualität (und Auflösung) der Berechnungsgitter besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss.

So war es für das in Abschnitt 2.2.6 gezeigte Beispiel nötig, Berechnungselemente zu wählen, die orthogonal zur Wand eine Dicke von 3 mm haben um die Wandeffekte (und damit eventuelle Ablösungen) sauber numerisch abbilden zu können.

2.2.3. Einlässe der Sparbecken

Für diese Untersuchung wurde als „worst case“ eines der am weitesten von der Kammer entfernten Sparbecken gewählt, da hier der stärkste Knick am Übergang zum Sparbeckenkanal vorhanden war. Die Ergebnisse von Comet und NaSt3DGPF unterschieden sich nur geringfügig, daher werden hier nur die Ergebnisse von NaSt3DGPF präsentiert.

Bild 3 zeigt das Strömungsbild beim Füllen der Kammer. Die Absolutwerte der Geschwindigkeiten wurden hier (und in den folgenden Abbildungen) normiert, da der Zahlenwert hier nicht von Belang ist. Das System wurde durch einen festen Volumenstrom am Sparbeckenkanal und einen fixen Druck an der Wasseroberfläche angetrieben.

Die Lage des Wasserspiegels wurde als fix angenommen. Hierbei wurde eine tiefe Wasserspiegellage im Sparbecken angesetzt, bei der trotzdem noch große Volumenströme zu erwarten sind. Bei der Analyse der Ergebnisse wurde klar, dass diese Wahl nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse hat, sondern das System durch die Position und Formgebung der Leitelemente bestimmt wird.

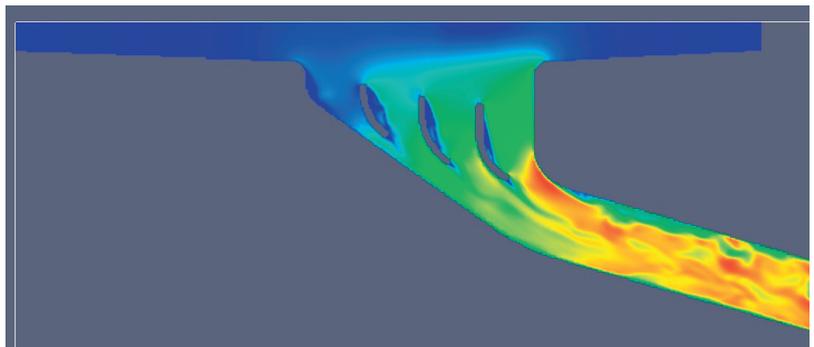


Bild 3: Vertikaler Schnitt durch Sparbecken und Sparbeckenkanal. Die Farben repräsentieren normierte Geschwindigkeiten.

Aus der in Bild 3 gezeigten Geschwindigkeitsverteilung wird deutlich, dass der Auslass nicht homogen beaufschlagt wird. Außerdem treten Ablösungen an den Leitelementen auf, die einen erhöhten Widerstand auslösen. Trotzdem muss betont werden, dass die Verluste dieses Knotenpunktes als eher gering anzusehen sind.

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

2.2.4 Verbindungspunkt der Sparbeckenkanäle

Die Verbindungskanäle der verschiedenen Sparbecken wurden für alle Richtungskombinationen untersucht. Dies wurde mit der bereits oben beschriebenen Methode ausgewertet, wobei diesmal ein fester Volumenstrom am Einlassrand und ein fester Druck am Auslass vorgegeben wurden. Zusätzlich wurden einlassseitig einige Hindernisse platziert, um eine ausreichende Anfangsturbulenz in der Strömung zu erzeugen.

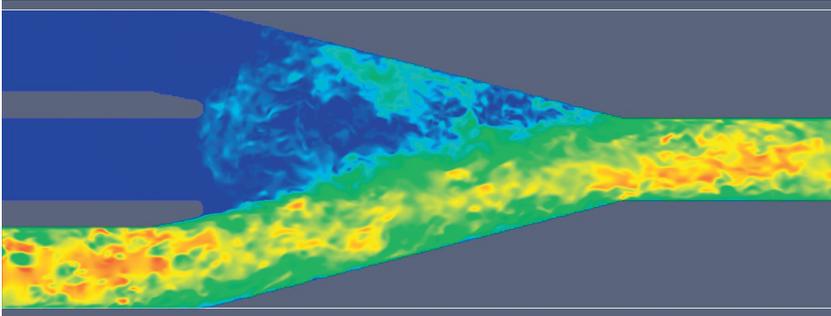


Bild 4: Horizontaler Querschnitt durch den Verbindungspunkt der Sparbeckenkanäle. Die Farben repräsentieren normierte Geschwindigkeiten.

Für alle betrachteten Fälle ergaben sich niedrige Verlustbeiwerte, die für die betrachteten Durchströmungsrichtungen nur geringfügig variierten (Bild 4 zeigt die Füllung der Kammer von einem der Sparbecken). Aus Effizienzgründen wurde daraus ein für alle Fälle einheitlicher Verlustbeiwert gewählt.

2.2.5 Verbindungspunkt zwischen Sparbeckenkanal und Hauptlängskanal

Dieser Verbindungskanal erzwingt einen doppelten Richtungswechsel des Fluids. Wenn die Kammer gefüllt wird, muss das Fluid zunächst aus dem Sparbeckenkanal nach oben umgelenkt werden. In der Einmündung erfolgt dann eine zweite Umlenkung in die Richtung des Hauptlängskanals.

Bild 5 links zeigt im Vertikalschnitt (Strömung von rechts nach links) die Umlenkung nach oben, Bild 5 rechts zeigt im Horizontalschnitt die zweite Umlenkung. Als Resultat ergibt sich eine Spiralströmung, die zu hohen Energieverlusten führt.

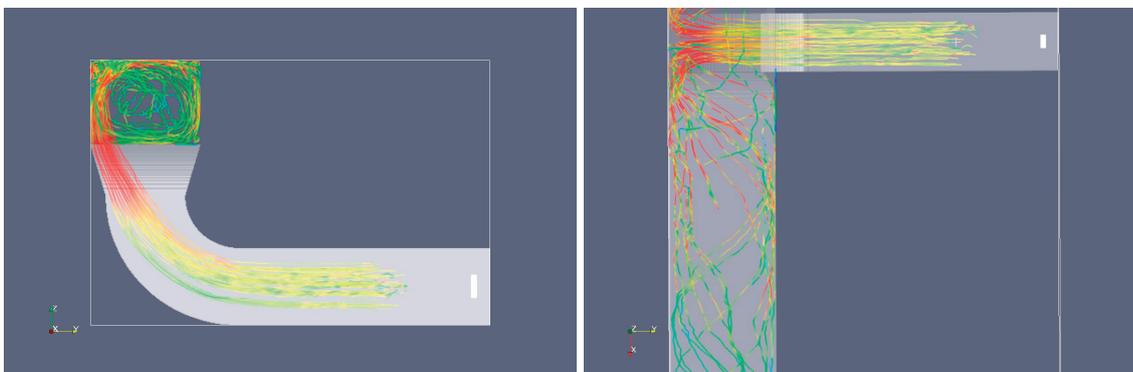


Bild 5: Vertikaler (links) und horizontaler (rechts) Schnitt durch den Verbindungspunkt zwischen Sparbeckenkanal und Hauptlängskanal. Die Stromlinien sind entsprechend der normierten Geschwindigkeiten eingefärbt worden.

Um diese Umlenkungsverluste zu reduzieren wurden, verschiedene Varianten dieser Umlenkung getestet. Es zeigte sich, dass es am günstigsten ist, den Querschnitt des Sparbeckenkanals vor der Umlenkung langsam aufzuweiten um so das Geschwindigkeitsniveau zu reduzieren. Dadurch wird die kinetische Energie des Fluids in potentielle Energie gewandelt und die resultierenden Umlenkungsverluste werden erheblich kleiner. Durch eine Vergrößerung auf den 1,41-fachen Querschnitt können die Umlenkungsverluste halbiert werden.

Hierbei ist zu beachten, dass die Aufweitung langsam erfolgen muss, um keine zusätzlichen Verluste an der Aufweitung zu erzeugen.

Für diesen Punkt wurde sowohl die Füllung als auch die Entleerung der Kammer betrachtet. Es zeigte sich, dass die Entleerung der Kammer wesentlich unkritischer ist, da der Hauptlängskanal einen deutlich größeren Querschnitt aufweist.

2.2.6 Verbindungspunkt zwischen Hauptlängskanal und innerem Längskanal

Der Verbindungspunkt zwischen Hauptlängskanal und innerem Längskanal („Brezel“) wurde für vier verschiedene Szenarien betrachtet:

1. Füllung der Kammer aus den Sparbecken (Brezel: Zweiseitiger Zufluss und zweiseitiger Abfluss)
2. Entleerung der Kammer in die Sparbecken (Brezel: Zweiseitiger Abfluss und zweiseitiger Zufluss)
3. Füllung der Kammer vom Oberwasser (Einseitiger Zufluss und zweiseitiger Abfluss)
4. Entleerung der Kammer in das Unterwasser (Einseitiger Abfluss und zweiseitiger Zufluss)

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

Für jeden dieser Fälle wurde der hydraulische Widerstand ermittelt. Die Randbedingungen wurden entsprechend denen der zuvor beschriebenen Fälle gesetzt. Wieder wurden zuflussseitig Hindernisse eingebaut, um eine adäquate Anfangsturbulenz zu erzeugen. Der Abfluss durch die nah an der Brezel liegenden Fülldüsen wurde vernachlässigt, da sie die Bestimmung der lokalen Drücke und damit des Fließwiderstands der Brezel beeinflusst hätten.

Die Ergebnisse für die Kammerfüllung zeigten eine Ablösung an den Leitelementen der Brezel im Hauptlängskanal (s. Bild 6). Dies könnte durch eine weitere Formoptimierung der Brezel verbessert werden. Des Weiteren sind auch Ablösungen an der Innenseite der Einmündung in den inneren Längskanal erkennbar. Dies ergibt sich aus dem relativ kleinen Krümmungsradius und der plötzlichen Querschnittserweiterung hinter der Einengung. Hier würde eine Vergrößerung der Brezel Abhilfe schaffen

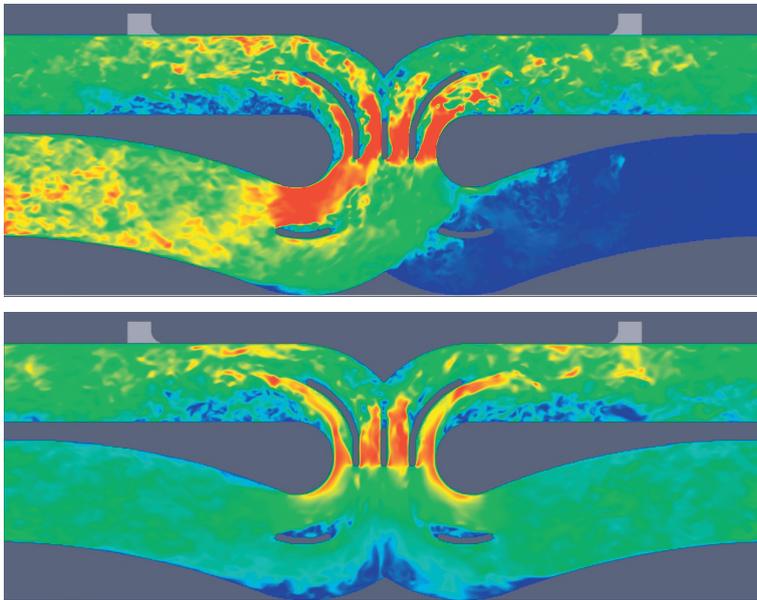


Bild 6: Strömungsfeld in der Brezel bei Füllung der Kammer vom Oberwasser (oben) und bei Füllung von den Sparbecken (unten). Die Farben repräsentieren normierte Geschwindigkeiten.

Diese Modellkonfiguration weist ein Manko auf, wenn die Beaufschlagung des Hauptlängskanals einseitig erfolgt. In dieser Situation ist das System asymmetrisch und es ist nicht klar, ob sich der Durchfluss an der Brezel 50/50 in die Arme des inneren Längskanals aufspaltet. Daher wurde mit einem iterativen Ansatz für diese Fälle das Druckniveau in den beiden Armen bestimmt, daraus der Abfluss durch die Fülldüsen abgeschätzt und die Summe dieser Abflüsse wieder als Randbedingung an den Enden der Arme des inneren Längskanals angesetzt. Dies wurde fortgesetzt bis eine konvergente Lösung erzielt wurde. Hierbei zeigte sich, dass sowohl bei der Füllung als auch bei der Entleerung der unterwasserseitige Arm des inneren Längskanals eine größere Beaufschlagung erfährt. Der Unterschied beträgt etwa 10%. Dieser Effekt muss bei der finalen Anordnung des Füllsystems beachtet werden. Insgesamt zeigte die „Brezel“ moderate Verlustbeiwerte, wenn-

gleich noch Potential für Verbesserungen vorhanden ist.

2.2.7. Fülldüsen zwischen innerem Längskanal und Kammer

Für eine Schleuse dieser Bauart sollten die Fülldüsen einen möglichst großen Anteil am Widerstand des Füllsystems haben. Ein Problem in der Ermittlung des hydraulischen Widerstands der Fülldüsen ergibt sich aus der Fließgeschwindigkeit im inneren Längskanal, da sich diese entlang der Länge des Kanals von ihrem Maximum an der Brezel hin zu Null am Ende verringert. Dies beeinflusst das Anströmfeld der Fülldüsen und damit ihren Widerstand. Daher wurden für die Fülldüsen sechs Fälle betrachtet, um diesen Effekt quantifizieren zu können:

1. Kammerfüllung, 10% Abfluss durch die Fülldüse, 90% entlang des inneren Längskanals (erste Fülldüse hinter der Brezel)
2. Kammerfüllung, 20% Abfluss durch die Fülldüse, 80% entlang des inneren Längskanals (Fülldüse in der Mitte des Längskanals)
3. Kammerfüllung, 100% Abfluss durch die Fülldüse, 0% entlang des inneren Längskanals (Fülldüse am Ende des Längskanals)
4. Kammerentleerung, 100% Zufluss aus der Fülldüse, 0% Zufluss aus dem inneren Längskanal (Fülldüse am Ende des Längskanals)
5. Kammerentleerung, 20% Zufluss aus der Fülldüse, 80% Zufluss aus dem inneren Längskanal (Fülldüse in der Mitte des Längskanals)
6. Kammerentleerung, 10% Zufluss aus der Fülldüse, 90% Zufluss aus dem inneren Längskanal (erste Fülldüse hinter der Brezel)

Während dieser Untersuchung zeigte sich, dass die Form der Fülldüsen gut gewählt war. Selbst für die stark einseitige Anströmung (s. Bild 7 links) ist die rechtsseitige Ablösung sehr klein. Für die Situation am Ende des Füllkanals (s. Bild 7 rechts) kann wiederum eine kleine Ablösung an der linken Wand der Fülldüse erkannt werden. Hier ist der Verlustbeiwert etwas geringer, jedoch ist die Varianz der Werte für die unterschiedlichen Zustände nicht signifikant. Bedingt durch den Zeitdruck im Ablauf des Projekts wurde beschlossen für alle Zustände einen einheitlichen Verlustbeiwert zu wählen.

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

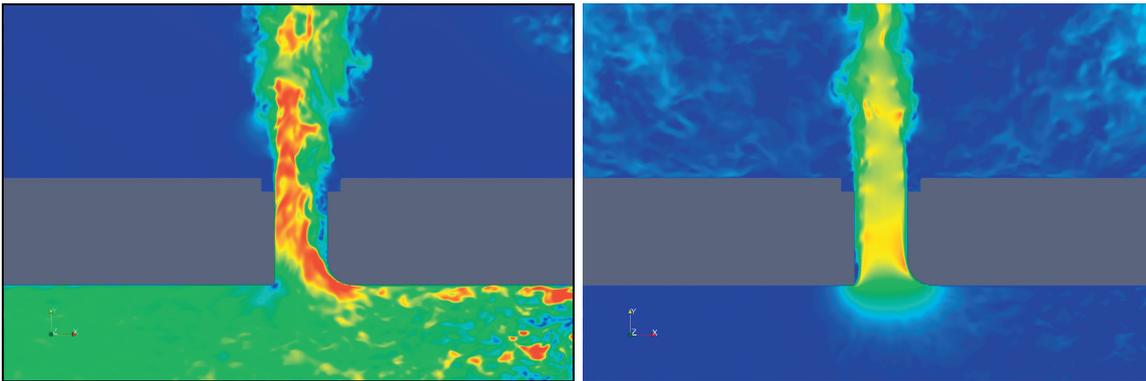


Bild 7: Strömung durch die Fülldüsen in die Kammer. Fülldüse am Anfang (links) und Ende (rechts) des inneren Längskanals. Die Farben repräsentieren normierte Geschwindigkeiten

2.2.8 Zusammenfassung der Verlustbeiwertberechnungen

Die ermittelten Verlustbeiwerte wurden zusammengefasst und verglichen, um den Einfluss der verschiedenen numerischen Verfahren vergleichen zu können. Es zeigte sich, dass der auf strukturierten Gittern arbeitende Löser NaSt3DGPF die Tendenz hat, die Verlustbeiwerte zu überschätzen, während der auf unstrukturierten Gittern arbeitende Löser Comet eine Tendenz zum Unterschätzen aufweist. Diese Unterschiede sind nur dann bedeutsam, wenn kleine Verlustbeiwerte zu bestimmen sind. Wenn der Verlustbeiwert groß ist (bspw. an der Verbindung von Hauptlängskanal und Sparbeckenkanal), haben die Verfahren ein einheitliches Verhalten gezeigt.

2.2.9 Ermittlung der Gesamtleistungsfähigkeit des von ACP vorgeschlagenen Systems

Basierend auf den mit dreidimensionalen numerischen Modellen ermittelten Verlustbeiwerten wurde ein eindimensionales Netzwerkmodell der Schleusen aufgestellt. Aus Zeitgründen wurde hierbei nur die oberste Kammer der Schleusentreppe betrachtet, da nur hier die Verluste an den Einläufen eine Rolle spielen und daher hier die schlechtesten Füllzeiten zu erwarten waren.

Dieses Netzwerkmodell wurde in Flowmaster aufgestellt. Bild 8 zeigt das erstellte Netzwerk für die oberste Kammer. Auf der linken Seite befinden sich die Einläufe aus dem Gatun-See in das System, die Sparbecken wurden aus Übersichtlichkeitsgründen beidseitig der Kammer angeordnet, wobei die Kanallängen der einseitigen Anordnung entsprechend gewählt wurden.

Ausgehend von den inneren Längskanälen wurden 40 Düsen angeordnet, die die Verbindung zur Kammer darstellen.

Die Verlustbeiwerte wurden entweder aus den Vorgaben von Flowmaster übernommen oder entsprechend der dreidimensionalen Ergebnisse gesetzt. Die Wandrauhigkeiten wurden zwischen 0,1 mm (aus den ACP Voruntersuchungen) und 20 mm (worst-case Annahme für alte Betonoberflächen) variiert und schließlich auf 10 mm gesetzt.

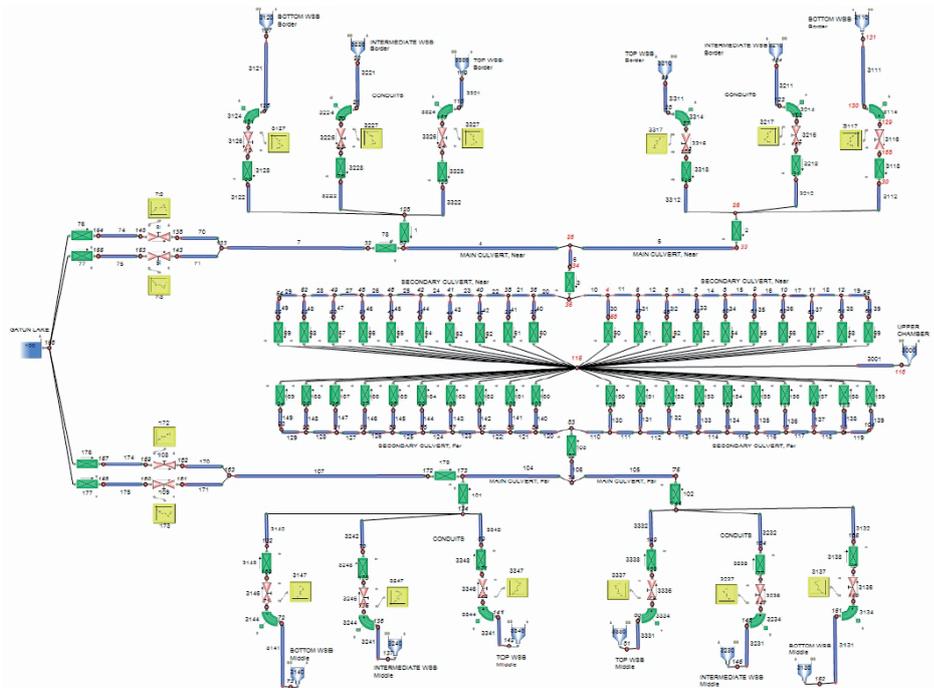


Bild 8: Netzwerkmodell der oberen Kammer

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

Pac_UppLock_ChambFill_maxH_WSB+Gatun - water level, total flow rate and valve schedule

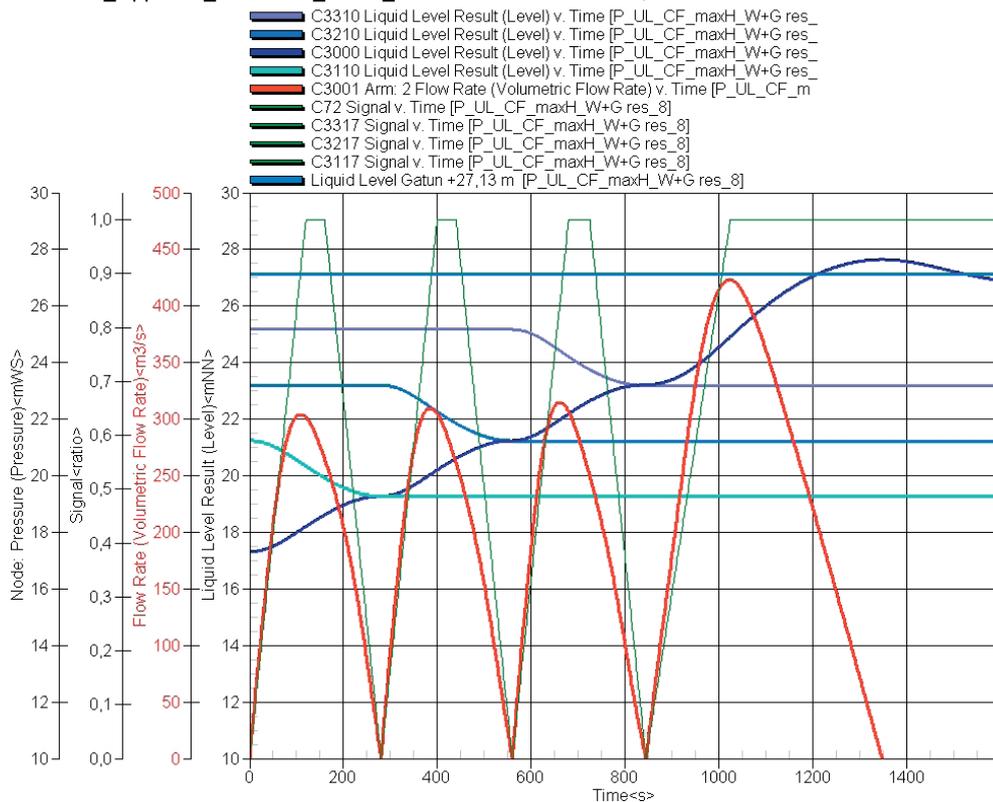


Bild 9: Ermittelte Füllung der oberen Kammer

Die Schützfahrpläne wurden zunächst entsprechend der ACP-Vorgaben gewählt. Dies waren 120 s für das Öffnen und Schließen der Sparbeckenschütze und 180 s für das Öffnen des oberwasserseitigen Schützes. Für diese Bedingungen ergab sich das in Bild 9 dargestellte Füllverhalten. In dieser Abbildung zeigt die grüne Linie das Öffnen der Schütze, die rote Linie die sich einstellenden Volumenströme und die blauen Linien die Wasserstände in Sparbecken, Kammer und Oberwasser. Für diese Konfiguration wurde eine Zeit bis zum Angleichen von Kammerwasserstand und Oberwasser von 1200 s ermittelt. Dies liegt deutlich über der vom Auftraggeber geforderten Zeit von 17 Minuten (1020 s). Zudem wurden in dieser Simulation (entsprechend den bei CNR durchgeführten physikalischen Modellversuchen) die oberwasserseitigen Schütze nicht geschlossen, so dass es durch die Trägheit des Wassers in den Längskanälen zu einem deutlichen Überschwingen des Kammerwasserstandes kommt (ca. 0,5 m). Um dies zu verhindern, müssten die Längskanalschütze rechtzeitig geschlossen werden, was zu einer weiteren Verlängerung der Füllzeit führen würde.

Um den Einfluss der Unsicherheiten aus den Verlustbeiwerten besser einschätzen zu können, wurden Berechnungen mit den minimalen ermittelten Beiwerten durchgeführt. Hierdurch reduzierte sich die Füllzeit um eine Minute, lag jedoch noch immer deutlich über der Sollzeit.

Um das Systemverhalten besser zu verstehen, wurde für den Maximaldurchfluss die Energielinie von Sparbeckeneinlauf bis in die Kammer ermittelt. Dies wurde sowohl für die mit NaSt3DGPf als auch für die mit Comet (s. Bild 10) ermittelten Verlustbeiwerte durchgeführt. Beide Ergebnisse zeigen in guter Übereinstimmung, dass die größten Verluste an der Verbindung zwischen Sparbeckenkanal und Längskanal („CCC“) auftreten.

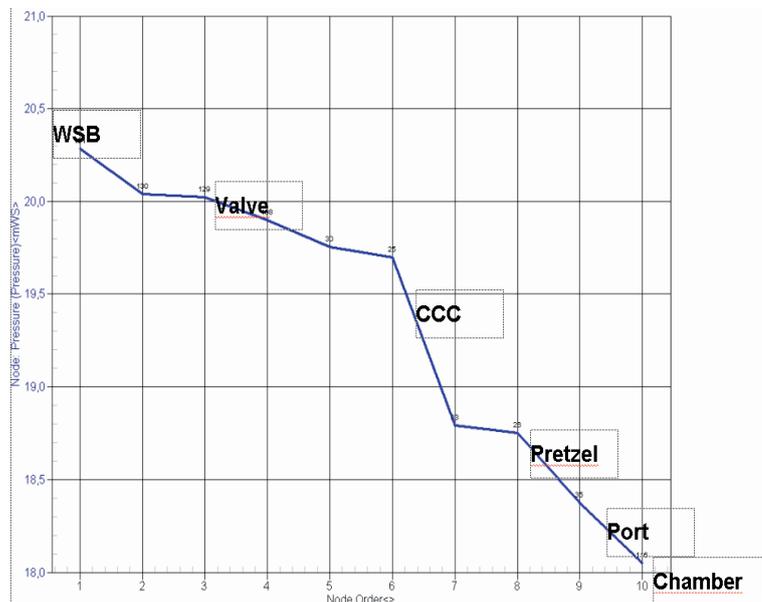


Bild 10: Energielinie bei Qmax während der Füllung aus den Sparbecken (WSB)

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden weitere Optimierungen des Füllsystems untersucht. Dies waren:

- Formoptimierungen der Verbindung zwischen Sparbeckenkanal und Längskanal
- Größe der Brezel

Durch diese Verbesserungen konnten die Verluste signifikant verringert werden. Die Füllzeit konnte dadurch auf etwa 18~19 Minuten verringert werden. Es war offensichtlich, dass das System jetzt durch die Schützfahrpläne limitiert war. Weitere Verkürzungen der Füllzeit waren also nur durch Veränderungen der Schützfahrpläne zu erreichen.

Mit diesen Verbesserungen konnte die geforderte Füll-

P_UL_CF_maxH_W+G - newA-01+newZeta-01+Valve-open/close Time = 90 and 120 s

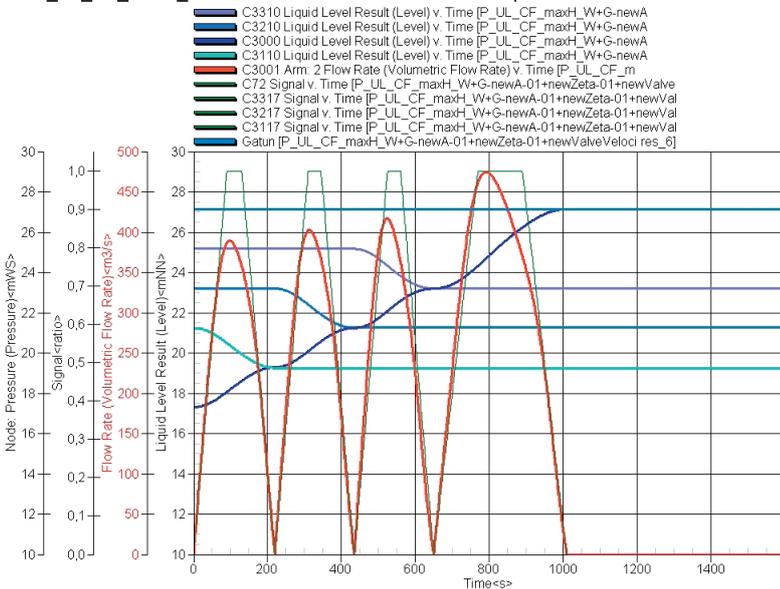


Bild 11: Ermittelte Füllung der oberen Kammer bei optimierter Form des Füllsystems und beschleunigten Schützfahrplänen

zeit exakt eingehalten werden (s. Bild 11). Zum Zeitpunkt dieser Arbeiten lagen noch keine Versuchsergebnisse von CNR vor, so dass diese nicht zur Kalibrierung herangezogen werden konnten. Insbesondere war unklar, ob die zulässigen Schiffskräfte eingehalten werden können. An diesem Punkt wurden die weiteren Arbeiten an diesem Füllsystem (zunächst) gestoppt; in der Hoffnung, dass die physikalischen Versuchsergebnisse noch rechtzeitig zur Verfügung stehen würden.

2.2.10 Schlussfolgerungen

Da die Ergebnisse der physikalischen Modellversuche nicht rechtzeitig zur Verfügung standen, musste der geplante Projektlauf mehrfach neu angepasst werden. Insbesondere wurde es erforderlich, alle Arbeiten ausschließlich numerisch durchzuführen, ohne Kalibrierungsdaten zur Verfügung zu haben. Aus den Untersuchungen konnten folgende Schlüsse gezogen werden:

- Dreidimensionale Simulationsrechnungen mit ausreichender Genauigkeit sind für ein Bauwerk dieser Komplexität eine Herausforderung.
- Die mit den Simulationsrechnungen ermittelten Verlustbeiwerte haben eine gewisse Schwankungsbreite, die jedoch nicht übermäßig kritisch für das Gesamtverhalten ist.
- Für das von ACP vorgeschlagene System kann die geforderte Füllzeit von 10 min für die Füllung vom Oberwasser knapp erreicht werden.
- Für das von ACP vorgeschlagene System kann die geforderte Füllzeit von 17 min für den Betrieb mit Sparbecken voraussichtlich erreicht werden, wenn weitere Verbesserungen am System vorgenommen werden.

- Für eine Beurteilung der auftretenden Schiffskräfte wären die Versuchsergebnisse des physikalischen Modells erforderlich gewesen. Da diese in der Bearbeitungszeitspanne nicht vorlagen, blieb unklar, ob das verbesserte System mit den beschleunigten Schützfahrplänen die zulässigen Schiffskräfte noch einhalten würde.

2.3 Überprüfung eines alternativen Füllsystems

2.3.1 Initiales Neudesign

Aufgrund einiger bautechnischer Nachteile des Ausgangsdesigns hatte eines der CAPP-Mitglieder zwischenzeitlich einen Alternativvorschlag entwickelt. Dieser war auch aus hydraulischer Sicht interessant, da er einige der Nachteile des Ursprungsdesigns nicht aufwies: Keine asymmetrische

Sparbeckenanordnung, keine langen Sparbeckenkanäle, keine „Brezel“. Die Systemskizze ist in Bild 12 zu sehen.

Das neue System ist vollständig symmetrisch zur Kammerachse. Die Sparbecken sind in vier Ebenen angeordnet. Ein ähnliches System könnte auch mit drei Sparbeckenebenen konzipiert werden, was zu einer höheren Leistungsfähigkeit führen würde. Jedoch erlaubten die von ACP vorgegebenen Baufelder eine derartige Konfiguration nicht.

Für das neue Design wurde eine ähnliche Studie wie zuvor beschrieben durchgeführt. Durch die sehr starke zeitliche Beschränkung musste die Untersuchung hydraulisch relevanter Punkte auf das absolute Minimum beschränkt werden. Die mit 3D-Modellen betrachteten Punkte sind in Bild 12 grün markiert.

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

Als "kritisch für die Leistungsfähigkeit" wurden folgende Punkte angesehen:

- Anbindung der Sparbecken an den Hauptlängskanal
- Abzweig vom Hauptlängskanal
- Abzweig vom inneren Längskanal

Die Verlustbeiwerte der Fülldüsen wurden aus der vorhergehenden Untersuchung übernommen. Für die anderen Punkte wurde die weiter vorne beschriebene Untersuchungsmethodik angewandt. Aus Zeitgründen wurde die Untersuchung nur mit dem Modellverfahren „Comet“ durchgeführt. Aus Platzgründen werden die Ergebnisse hier nicht im Detail vorgestellt.

2.3.2 Ermittlung der Gesamtleistungsfähigkeit des neu entwickelten Systems

Die Ergebnisse der dreidimensionalen Modellierung zeigten, dass die lokalen Verluste dieses Systems deutlich geringer ausfallen als die des Ausgangssystems. Daher wurde erneut ein Flowmaster-Netzwerk aufgestellt (Bild 13), um das Gesamtsystem beurteilen zu können.

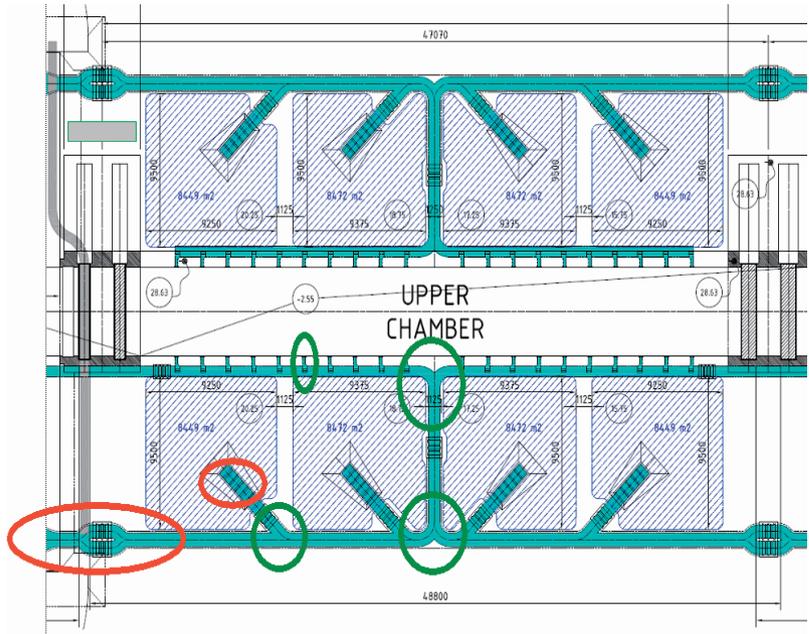


Bild 12: Skizze des neuentworfenen Füllsystems mit vier Sparbeckenebenen
Grüne Markierungen: Verlust wurden mit 3D-Modell ermittelt; Rote Markierungen: Verlustbeiwerte aus Lehrbüchern, Flowmaster-Standardwerten, ...

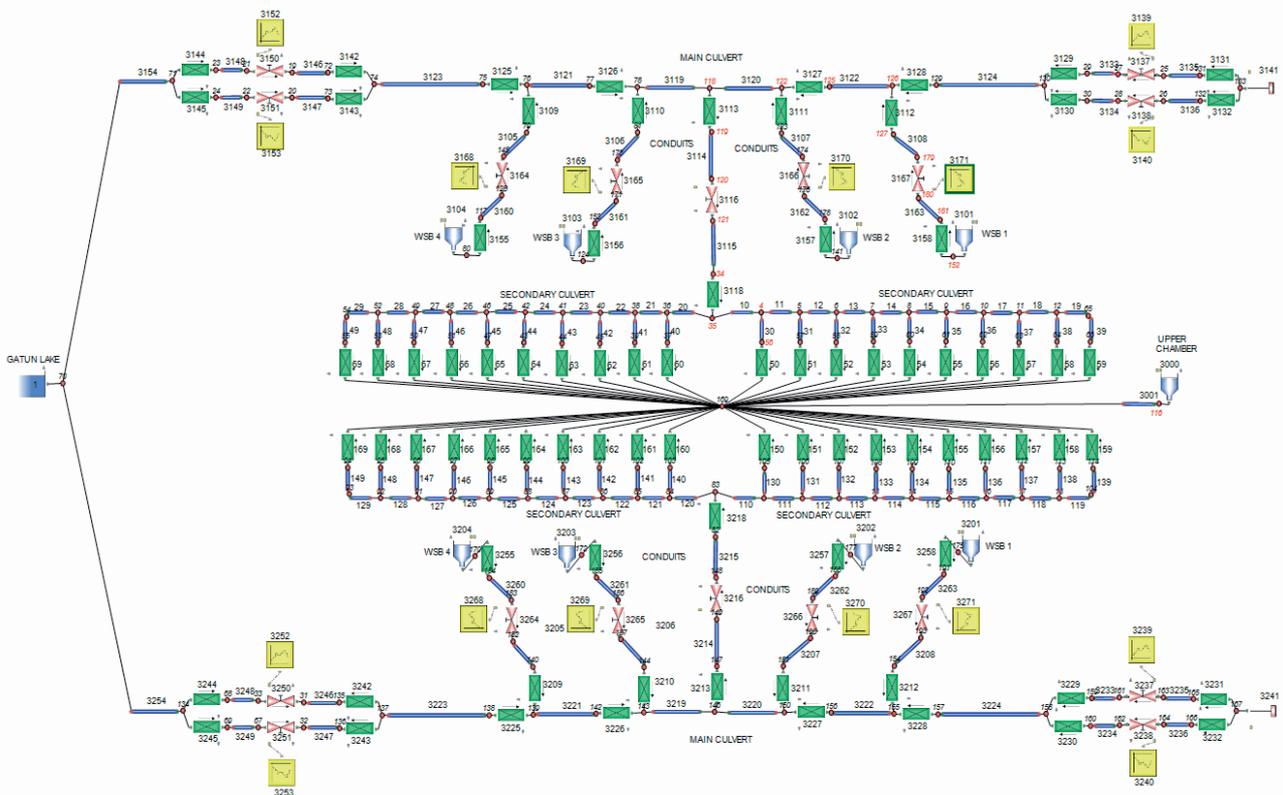


Bild 13: Netzwerkmodell des neuen Systems

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

Die anfänglichen Tests wurden mit einer Schützgeschwindigkeit von 0,05 m/s durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass nach Einstellung der Fahrpläne die Sparbeckenschütze nicht mehr voll geöffnet werden müssen. Dies ergibt sich aus den geringen hydraulischen Verlusten und der Tatsache, dass nun vier statt drei Sparbeckenschütze bewegt werden müssen. Offensichtlich könnte das System durch schnellere Schützfahrpläne beschleunigt werden. Tatsächlich konnte dadurch eine Füllzeit von unter 17 Minuten erreicht werden (s. Bild 14). Nun musste überprüft werden, ob die Schiffskräfte (oder zumindest das Wasserspiegelgefälle in der Kammer) noch im zulässigen Rahmen liegen.

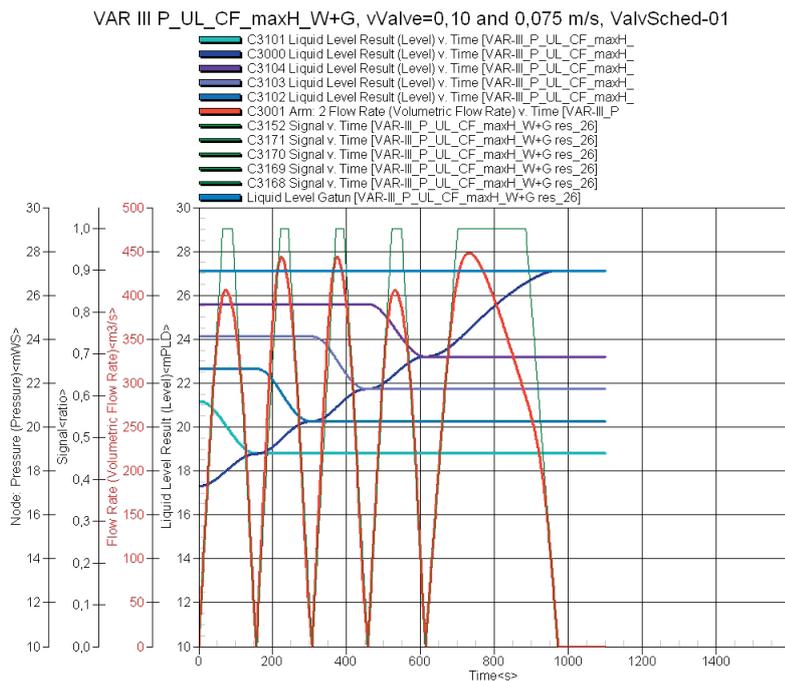


Bild 14: Füllung der Kammer für das neue System mit schnelleren Schützfahrplänen

2.3.3 Beurteilung der Schiffskräfte und des Wasserspiegelgefälles

Zu diesem Zeitpunkt im Projektablauf wurde noch angenommen, dass die physikalischen Modellversuche rechtzeitig aussagekräftige Daten über die Kräfte auf Schiffe in der Kammer während eines die Kriterien für die Füllzeit einhaltenden Füllvorgang liefern würden. Aufgrund der Verzögerungen der physikalischen Modellversuche waren jedoch nur Vorabergebnisse verfügbar. Diese zeigten, dass für eine Hubhöhe von 8,36 m (statt der knapp 10 m die als Extremum anzusetzen sind) eine Füllzeit von 19 Minuten erreicht wurde. Das ist in guter Übereinstimmung mit der numerisch ermittelten Füllzeit von ~20 Minuten für eine Hubhöhe von 9,82 m. Hierbei muss aber beachtet werden, dass die Schützfahrpläne zwar ähnlich, aber nicht gleich gewählt wurden und es unklar war, ob im physikalischen Modell die gleiche Geometrie verwendet wurde.

Trotzdem konnten die vorläufigen physikalischen Modellversuchsergebnisse wertvolle Hinweise auf das Verhalten des Schiffes in der Kammer geben. Für das neu gewählte Design wurden Kammer, Fülldüsen und innerer Längskanal vom Ursprungsdesign übernom-

men, damit der Zusammenhang zwischen Volumenströmen in den Längskanälen und Schiffskräften vergleichbar bleibt. Ein wesentlicher Faktor für die Schiffskräfte ist die Anstiegsgeschwindigkeit des Volumensstroms beim Füllen. Aus den physikalischen Modellversuchen ergab sich, dass bei 5.7 m³/s/s die zulässigen Kräfte noch deutlich unterschritten wurden. Daraus konnte abgeleitet werden, dass für das neue System eine Volumenstromanstiegsgeschwindigkeit von etwa 7.0 m³/s/s noch knapp zulässig sein müsste. Mit dieser konnte jedoch keine ausreichende Füllzeit erzielt werden, da das neue System durch die vierte Sparbeckenebene zu stark beeinträchtigt wird. Zwar konnte ohne weiteres eine schnellere Füllung erreicht werden,

jedoch nur bei einer deutlichen Überschreitung der kritischen Volumenstromanstiegsgeschwindigkeit von 7.0 m³/s/s. Daher war es nötig das Grunddesign von Kammer, Fülldüsen und innerem Längskanal zu ändern, um trotzdem die zulässigen Schiffskräfte einzuhalten. Da die physikalischen Modellversuche dann nicht mehr als Referenz dienen konnten, mussten numerische Methoden zur Beurteilung entwickelt werden. Diese werden im Folgenden vorgestellt.

2.3.4. Numerische Modellierung der Strömung in der Kammer

Zu diesem Zeitpunkt im Projektablauf wurde beschlossen, nicht länger auf die endgültigen Ergebnisse der physikalischen Modellversuche zu warten. Daher wurde auf Basis des 3D-Verfahrens Comet ein numerisches Modell der Schleusenammer aufgebaut. Unter den gegebenen Bedingungen wurde darauf verzichtet, ein Schiff in der Schleusenammer zu modellieren, da der Aufwand hierfür erheblich gewesen wäre. Stattdessen wurde

aufgrund der Erfahrung der BAW mit vergleichbaren Problemstellungen die Bewegung des Wassers in der Kammer als Maß für die auftretenden Schiffskräfte verwendet.

Für dieses Modell wurden die mit Flowmaster ermittelten zeitlich veränderlichen Volumenströme durch die Fülldüsen als Randbedingungen für das dreidimensionale Modell angesetzt. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass die beschriebene ungleichförmige Beaufschlagung der Brezel nicht reproduziert werden kann.

Die ermittelten Wasserspiegeldifferenzen von Ende-zu-Ende der Schleuse lagen mit etwa 14 cm deutlich über dem Grenzwert von ~6 cm. Der anfängliche Ausschlag (erstes Sparbecken wird in die Kammer entleert) lag zwar noch innerhalb des Limits, die nachfolgenden lagen jedoch deutlich darüber. Da die Sparbecken alle in etwa die gleichen Volumenströme abgeben, muss eine Überlagerung der entstehenden Beckenschwimmungen stattgefunden haben.

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

2.4 Überprüfung verschiedener Strategien zur Verminderung des Wasserspiegelgefälles

Es wurden verschiedene Strategien verfolgt, um das Wasserspiegelgefälle zu vermindern. Zunächst wurden alle Fülldüsen in Richtung Unterstrom verschoben, um die Balance des Systems für die Füllung zu verbessern. Bild 15 zeigt das (typische) Verhalten das sich während der Füllung ergibt.

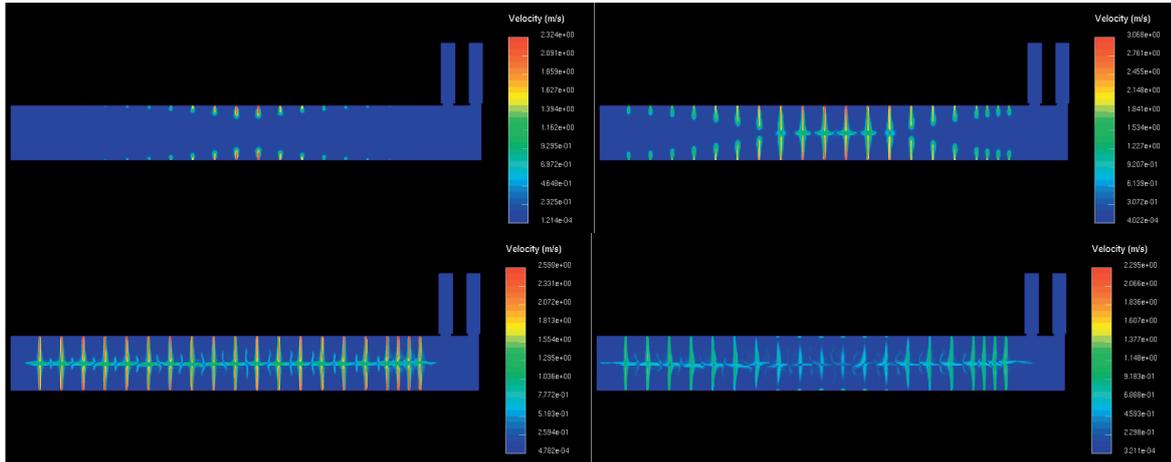


Bild 15: Zufluss zur Kammer bei nach Unterstrom verschobenen Fülldüsen

Der Füllprozess beginnt an den Fülldüsen nahe der Kammermitte und breitet sich dann zu ihren Enden aus. Zum Ende der Füllung schlägt die Verteilung um und vor allem die am Ende der Kammer liegenden Fülldüsen bestimmen den Füllprozess. Dieses wechselnde Verhalten regt eine Schwingung in der Kammer an, nämlich die erste Oberschwingung der Kammeroszillation. Desweiteren ist erkennbar, dass die Kammergeometrie trotz der Verschiebung der Fülldüsen noch nicht zur Lage der Düsen passt. Offensichtlich steht auf der unterstromigen Seite (rechts in Bild 15) mehr Fläche zur Verfügung. Insbesondere die doppelten Schiebetornischen tragen zu dieser Asymmetrie bei. Diese Asymmetrie führt zusätzlich zu einer Grundschwingung des Wassers in der Kammer, die sich mit der Oberschwingung überlagert. Die in Bild 16 gezeigte Entwicklung der Wasserspiegeldifferenzen zeigt dieses Verhalten deutlich. Die Grenzwerte für die zulässige Wasserspiegeldifferenz wurden nur geringfügig überschritten, so dass dieses Ergebnis als vielversprechend für die weitere Optimierung angesehen wurde.

Zusätzlich zu den Ende-zu-Ende-Wasserspiegeldifferenzen wurden auch die Mitte-zu-Enden-Wasserspiegeldifferenzen ermittelt. Für diesen Fall betragen die Differenzen ~ 10 cm, was ein deutlich größeres Wasserspiegelgefälle bedeuten würde. Da aber aus den Ausschreibungsunterlagen nicht klar hervorging, ob das maximale Wasserspiegelgefälle auch für die Mitte-zu-Enden-Wasserspiegeldifferenzen eingehalten werden muss, wurde dies nur als nachteilig vermerkt.

Um die Situation weiter zu verbessern, wurden folgende Möglichkeiten untersucht:

- Weitere Verbesserung der Symmetrie
- Kurze Unterbrechungen im Füllprozess um die Schwingungsüberlagerung zu verhindern
- Steuerbare Fülldüsen (z.B. mit Schmetterlingsventilen) um Oszillationen gezielt entgegen zu wirken
- Hydraulische Entkopplung der Tornischen von der Kammer

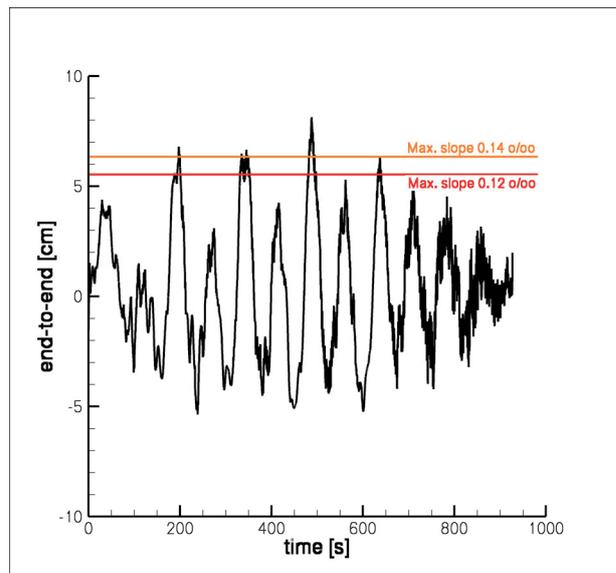


Bild 16: Berechnete Ende-zu-Ende-Wasserspiegeldifferenzen

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

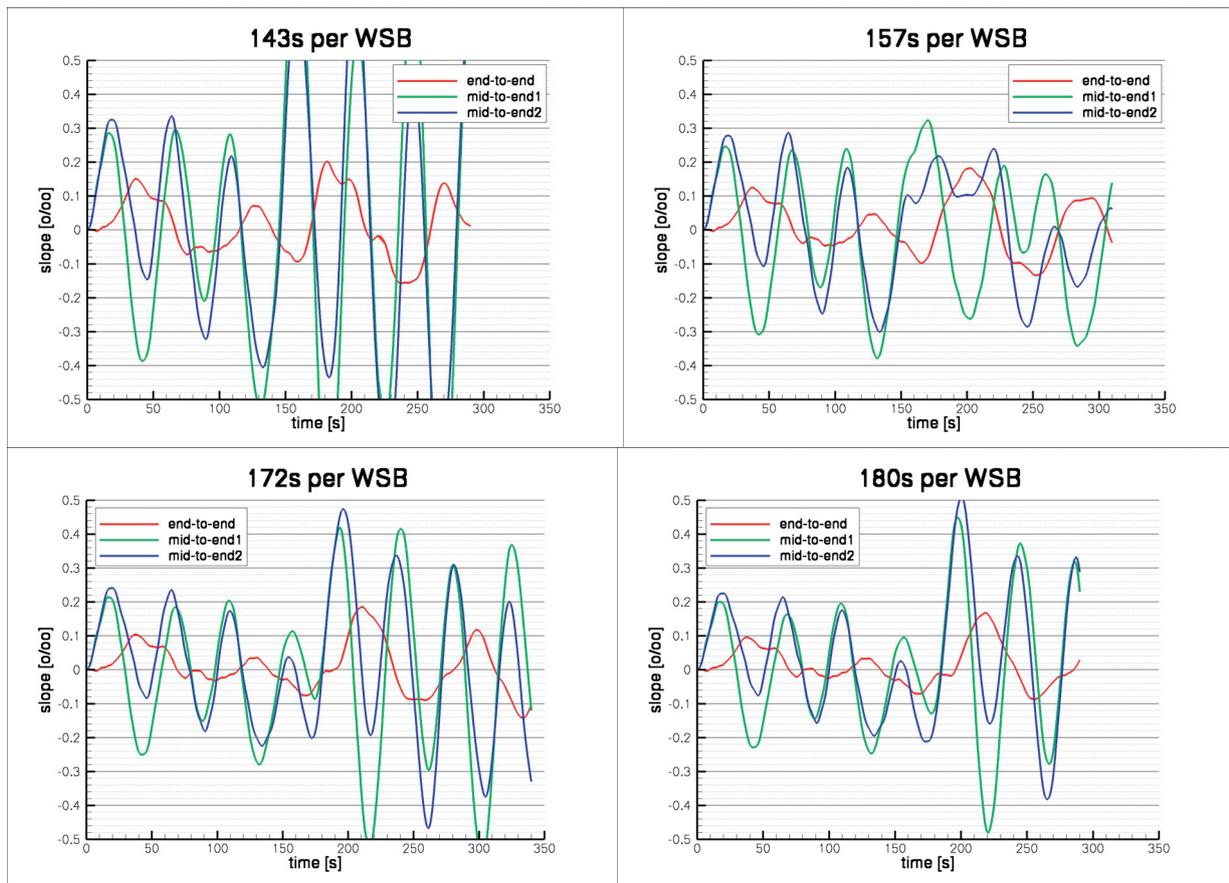


Bild 17: Einfluss der Schützfahrpläne auf die Wasserspiegeloszillationen in der Kammer

2.4.1 Einfluss der Schützsteuerung auf die Schwingungsüberlagerung

Um den Einfluss der Schützsteuerung während des Füllens von den Sparbecken festzustellen, wurden Testfälle generiert bei denen vorgegebene Füllzeiten aus den Sparbecken erreicht wurden. Hierdurch wurde es möglich, die Schwingungsüberlagerung klar zu identifizieren. Bild 17 zeigt die ermittelten Wasserspiegelgefälle. Die rote Linie zeigt das Ende-zu-Ende-Gefälle, die blauen bzw. grünen Linien die beiden Mitte-zu-Ende-Gefälle.

Es ist offensichtlich, dass das erste Maximum des Ende-zu-Ende-Gefälles (rote Linie nach ~40 s) sowie das erste Maximum des Mitte-zu-Ende-Gefälles (grüne bzw. blaue Linie nach ~20 s) direkt mit der Öffnungsgeschwindigkeit der Schütze korrelieren. Ein langsames Öffnen der Schütze zeigt sich in gleichem Maße in der Verringerung des Gefälles. Interessant ist das spätere Verhalten der Oberschwingung (rote bzw. grüne Linie). Bei dem im ersten Bild gezeigten Fall führt das nach 143 s beginnende Füllen vom zweiten Sparbecken zu einer Überlagerung mit den bereits vorhandenen Kammer-schwingungen und damit zu einer erheblichen Vergrößerung der Amplitude.

Beim zweiten Fall führt das nach 157 s beginnende Füllen vom zweiten Sparbecken stattdessen zu einer Schwingungsauslöschung, da ein ausreichender Phasenversatz zwischen bereits vorhandener Kammer-schwingung und neuer Anregung vorhanden war. Dieser Effekt ist hier vermutlich besonders ausgeprägt festzustellen, da sich kein Schiff in der Kammer befindet. Große Schiffe würden, da sie praktisch die ganze Kammer belegen, diese Schwingungen stark dämpfen, so dass die Überlagerung ohne Belang wäre. Für mehrere hintereinander liegende kleinere Schiffe kann diese Überlagerung jedoch relevant sein.

2.4.2 Veränderung der Geometrie zur Schwingungsverminderung

Um die Oberschwingung (Mitte-zu-Ende) zu reduzieren, wurde die Positionierung der Fülldüsen verändert. Die Fülldüsen wurden aus der Mitte der Kammer herausgeschoben und dafür an den Enden stärker konzentriert. Dadurch wird die anfängliche Konzentration der Zu-strömung in der Mitte reduziert und etwas zu den Enden verschoben (vergleiche Bild 15 und Bild 18).

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

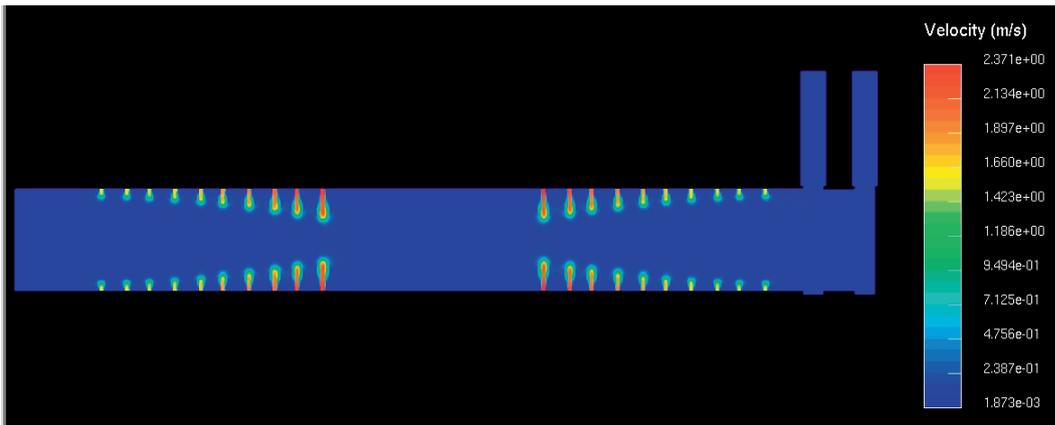


Bild 18: Zufluss zur Kammer bei gruppierten Fülldüsen

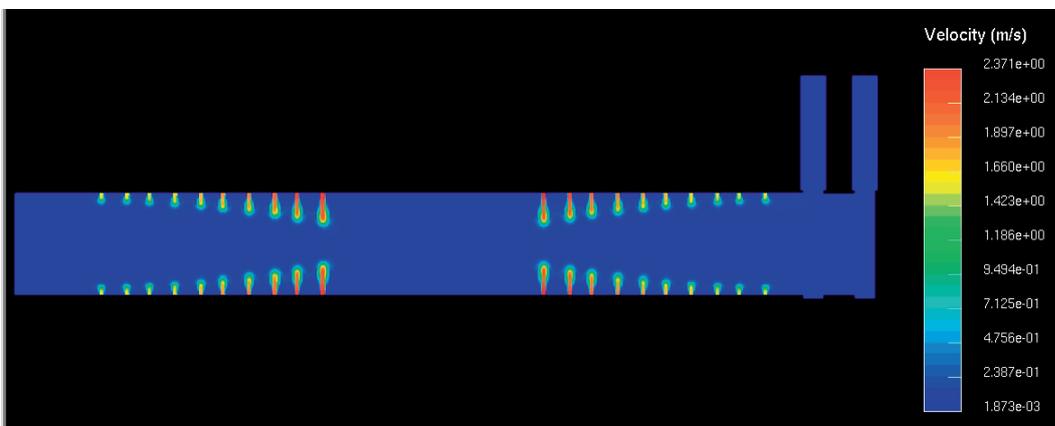


Bild 19: Zufluss zur Kammer bei gruppierten, 20 m verschobenen Fülldüsen

Dieser Ansatz reduzierte die Oberschwingungen beträchtlich. Trotzdem waren sowohl Grund- als auch Oberschwingung noch zu groß. Daher wurden weitere Varianten getestet. Eine Verschiebung der Fülldüsen um 20 m in Richtung Unterstrom wurde getestet, um die Grundschwingung zu reduzieren (Bild 19).

Wie zu erwarten war, reduzierte dies die Grundschwingung deutlich, so dass das zulässige Wasser Spiegelgefälle eingehalten werden konnte. Dieses vorläufige Ergebnis hätte nun noch im physikalischen Modell getestet werden müssen, da eine Vielzahl vereinfachender Annahmen getroffen wurden (vergl. Abschnitt 2.2.6). In einem weiteren Optimierungsschritt wurden die Größe der Fülldüsen leicht verringert und die Schützfahrpläne im Ausgleich leicht beschleunigt. Dadurch ließ sich die Oberschwingung reduzieren, da die Verteilung des Abflusses über die Länge des Längskanals verbessert wurde.

2.4.3 Simulation einer kompletten Schleusung

Basierend auf den beschriebenen Verbesserungen wurde nun versucht, das Verhalten des Wassers in der Kammer für einen kompletten Füllvorgang zu simulieren. Es wurde die Fülldüsenkonfiguration mit gruppierten, 20 m verschobenen Fülldüsen gewählt und eine Füllzeit von 160 s für jedes Sparbecken angesetzt. Daraus resultierte eine Gesamtfüllzeit von 980 s, die die Anforderungen erfüllt. Hierbei wurden die Schützfahrpläne so erstellt, dass am Ende der Füllung

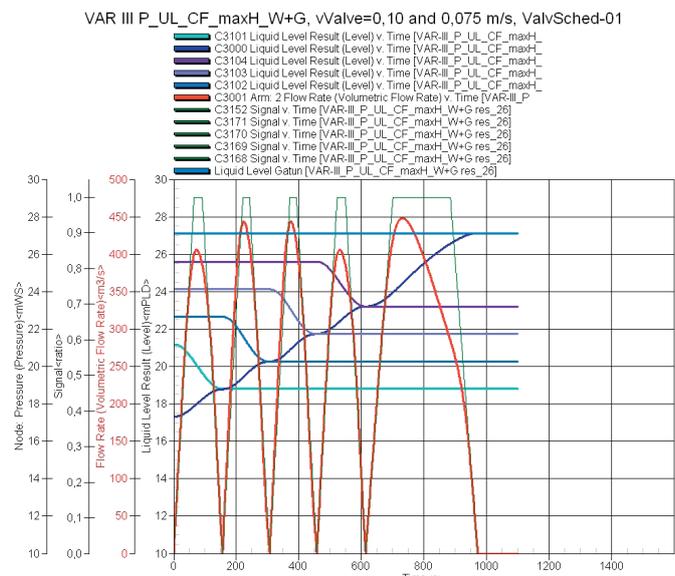


Bild 20: Füllkurve für das überarbeitete System

alle Schütze geschlossen und die Wasser Spiegel von Kammer und Oberwasser ausgeglichen sind (Bild 20). Es kommt also zu keinem Überspringen des Wasser Spiegel in der Kammer.

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

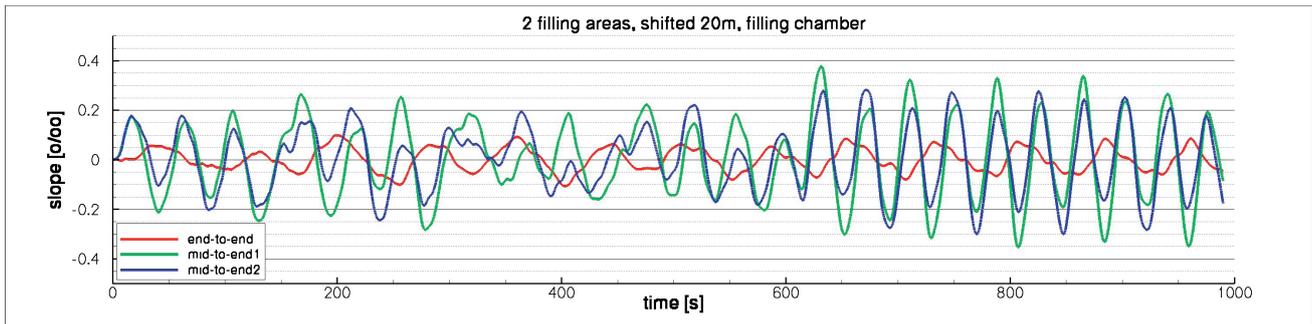


Bild 21: Wasserspiegelgefälle für den vollständigen Füllprozess

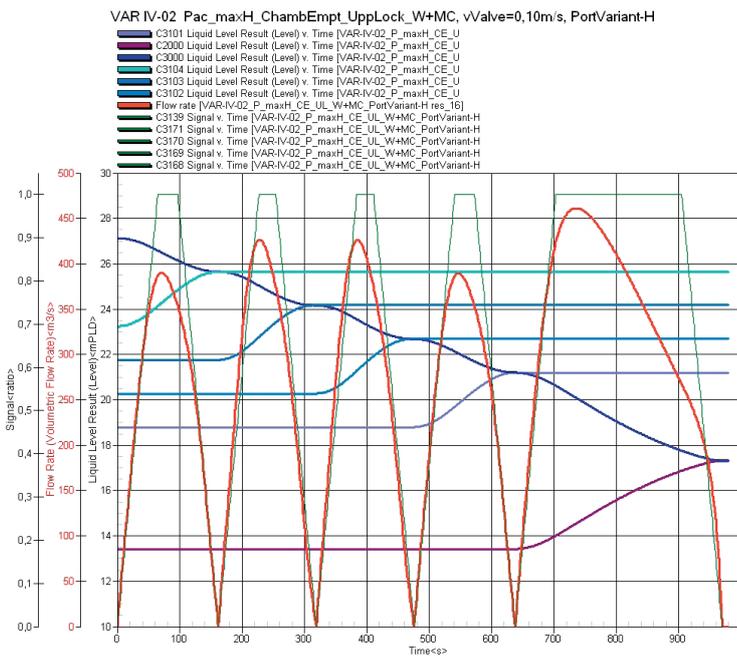


Bild 22: Entleercurve für das überarbeitete System

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde wiederum das Schwappen des Wassers in der Kammer untersucht. Diesmal wurde der gesamte Füllvorgang der Kammer mit dem dreidimensionalen Modell simuliert. Das Ergebnis für die Wasserspiegelgefälle (Bild 21) zeigt, dass das Ende-zu-Ende-Gefälle (rote Linie) deutlich unter den vorgegeben Maxima von 0,14 ‰ (mit

Schiff) bzw. 0,12 ‰ (von CNR vorgeschlagen für den Fall ohne Schiff) liegt. Die Mitte-zu-Ende-Gefälle (blaue bzw. grüne Linie) waren deutlich höher und zeigten eine variierende Tendenz. Offenbar kam es zu Schwingungsüberlagerungen, was in der Periode von ~300 s - ~600 s zu einer Verminderung der Schwingungen, zwischen ~600 s und ~1000 s zu einer Verstärkung der Schwingungen führte. Die auftretenden Spitzenwerte von 0,39 ‰ betreffen jedoch nur kleinere Schiffe, die durch ihre geringere Masse auch geringere Haltekräfte benötigen. Daher wurde beschlossen, mit dieser Konfiguration fortzufahren.

Anschließend wurde auch der Entleerungsprozess simuliert. Wieder wurde die Füllzeit pro Sparbecken auf 160 s festgesetzt, was zu einer Gesamtentleerzeit von 970 s führte (s. Bild 22)

Bedingt durch die vom Austraggeber geforderte Betriebsweise der Tore ergibt sich ein generelles Problem. Es wurde gefordert, dass immer die beiden sich vor dem Schiff befindenden Schiebetore geschlossen sind, während das erste Tor hinter dem Schiff offen sein soll und nur das zweite geschlossen wird. Bild 23 zeigt die sich daraus ergebende, an der Entleerung teilhabende Kammerwasserfläche. Im Vergleich zur aktiven Wasserfläche während der Füllung (Bild 19) ergibt sich eine deutliche Verschiebung und damit eine Verschlechterung der Systembalancierung.



Bild 23: Aktive Kammerwasserfläche und Position der Fülldüsen beim Entleeren

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

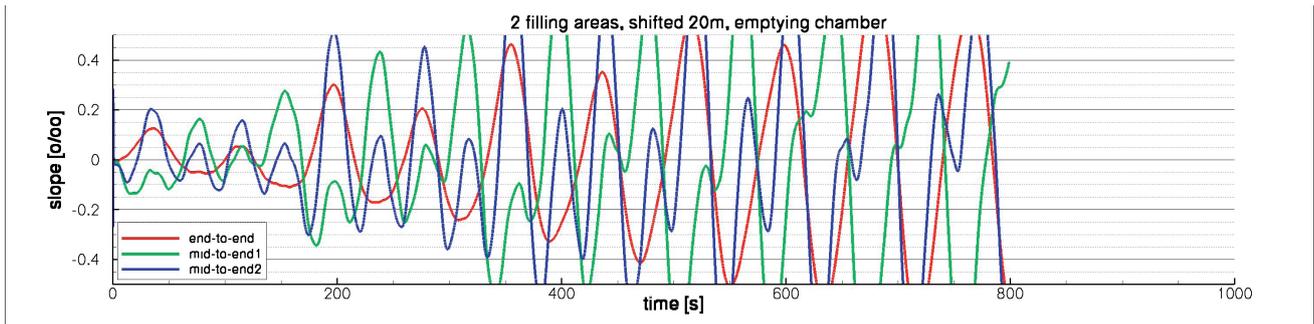


Bild 24: Wasserspiegelgefälle für den Entleerungsprozess

Für diesen Fall wurde wiederum die Bewegung des Wassers in der Kammer berechnet. Es wurde ein ähnliches Verhalten wie bei der Füllung erwartet, eventuell etwas verschlechtert durch die schlechtere Symmetrie des Systems. Tatsächlich kann das Ergebnis nur als katastrophal eingeordnet werden. Bild 24 zeigt, dass es durch wiederholte Überlagerung der Schwingungsanregungen zu einer fortschreitenden Anfachung der Kammer-schwingung kommt. Offensichtlich passte der Schützfahrplan der Sparbecken in diesem Fall perfekt zur Eigenschwingungsperiode der Kammer.

Um dieses Phänomen besser einstudieren zu können, wurden verschiedene Läufe des dreidimensionalen Modells bei unterschiedlichen Kammerwasserständen mit einer erzwungenen Anfangsoszillation durchgeführt. Dadurch konnten die Eigenschwingungsperioden identifiziert werden. Es zeigte sich, dass diese Berechnungen eine sehr hohe Qualität der numerischen Methode erfordern. Schon kleine Verringerungen der Iterationszahl des Verfahrens schlugen sich in Veränderungen der ermittelten Frequenz nieder. Das zeigt, dass die Schwingungseffekte in ihrem zeitlichen Ablauf quantitativ schwer zu erfassen sind. Die Ergebnisse geben aber phänomenologisch wichtige Hinweise auf zu erwartende Probleme. Auch festzuhalten ist, dass der Einfluss eines Schiffes auf Schwingungsperiode und -dämpfung nicht untersucht werden konnte.

Während der Kammerfüllung aus den Sparbecken steigt der Kammerwasserspiegel von etwa 18 m auf 24 m. Während der Kammerentleerung in die Sparbecken sinkt er jedoch von 28 m auf 22 m. Während der Entleerung ergibt sich daraus eine längere Eigenschwingungsperiode, was offenbar zum gewählten Schützfahrplan passte.

In weiteren Tests wurde geprüft, inwieweit durch gezielte Steuerung der Sparbecken eine Schwingungsüberlagerung verhindert werden kann. Hierbei konnte durch Trimmen der Sparbeckenschützsteuerung eine „neutrale“ Überlagerung gefunden werden, die allerdings zu einer leichten Verlängerung der Schleusungszeit auf 1060 s führte.

Aufbauend auf diesem Ergebnis wurde eine Vielzahl von Schützfahrplänen auf ihre Tauglichkeit getestet. Am Ende zeigte sich für dieses Füllsystem ein gutes Ergebnis, wenn folgende Punkte eingehalten wurden:

- Langsames Öffnen der Schütze am Anfang der jeweiligen Füllphase, später dann schneller
- Füllzeit für jedes Sparbecken muss exakt so eingestellt werden, dass keine Schwingungsüberlagerung mit der vorhergehenden Teilfüllung auftritt

Während dieser Optimierungen wurde eine Serie von Grafiken aufgezeichnet, die beispielhaft die Anpassung für die letzte Sparbeckenebene zeigt (Bild 25). Für diese Ebene wurde ausgehend von einer anfänglichen Schätzung die Füllzeit um 15 s variiert. In der obersten Grafik ist eine Verstärkung der Oszillationen klar erkennbar, während eine Verlängerung der Füllzeit dies deutlich verbessert. Die unterste Grafik zeigt, dass durch sorgfältige Anpassung der Schützfahrpläne eine Verstärkung der Oszillationen vermieden werden kann.

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

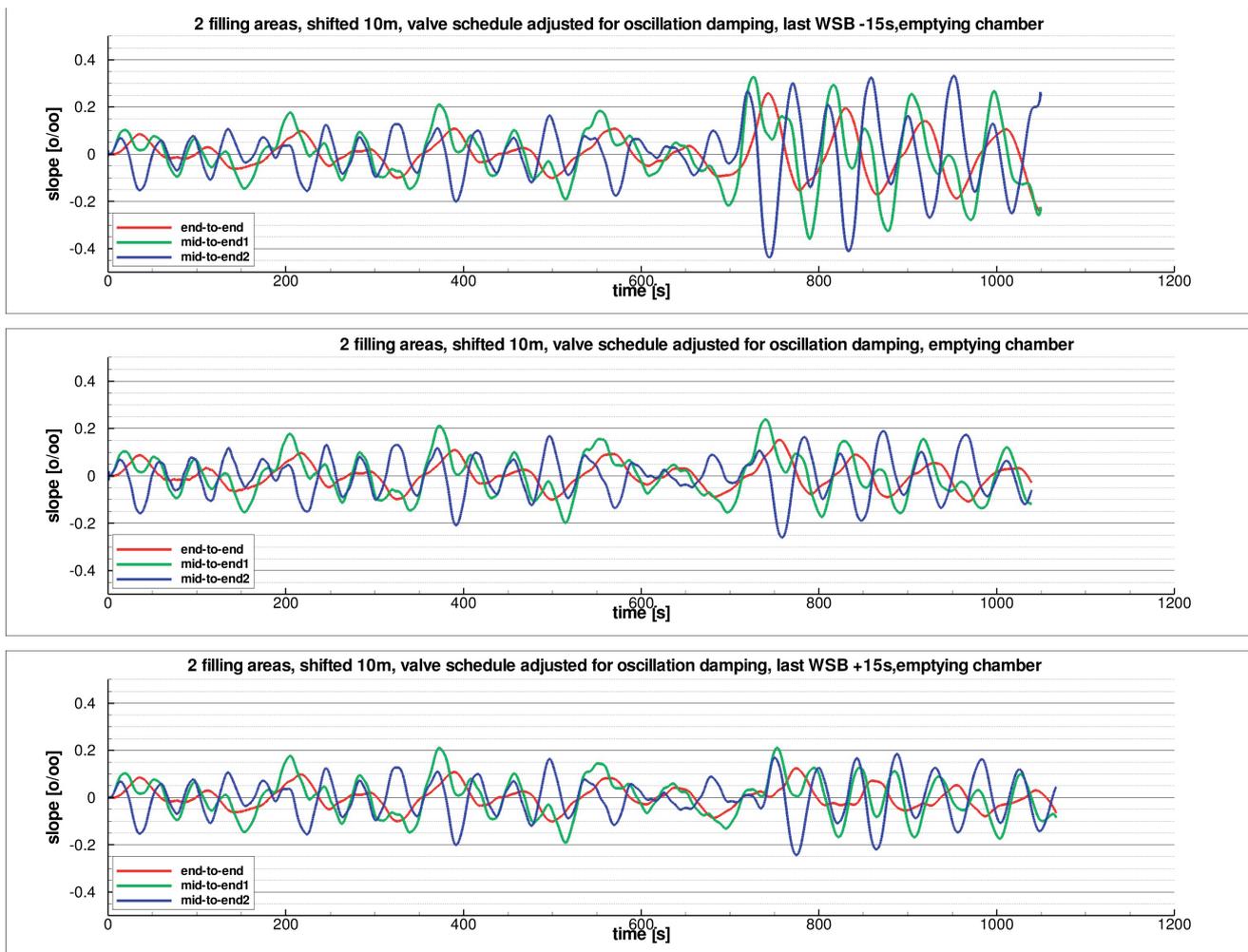


Bild 25: Einfluss der Fahrpläne für Sparbecken 4 auf die Kammerwasseroszillationen

An diesem Punkt wurden alle weiteren Untersuchungen gestoppt, da das Konsortium beschlossen hatte, sich aus dem Projekt zurückzuziehen.

2.4.4 Schlussfolgerungen für das untersuchte neue Füllsystem

Mit der vorgeschlagenen Konfiguration kann vermutlich ein Ende-zu-Ende-Gefälle von 0.14 ‰ eingehalten werden, wenngleich auch ein deutlich höheres Mitte-zu-Ende-Gefälle zu erwarten ist.

Für das Verhalten des Systems stellt die mögliche Resonanz zwischen Kammerschwingung und Betrieb der Sparbecken ein nicht zu unterschätzendes Problem dar. Bedingt durch Zwänge im Zeitablauf der Ausschreibung konnten hier nur vereinfachende Studien vorgenommen werden, die über die exakten zeitlichen Abläufe keine Aussagen zulassen.

Für das untersuchte System wäre ein komplexes Steuerungssystem nötig, das die Füll- und Entleervorgänge so kontrolliert, dass keine sich verstärkende Schwingungsüberlagerung stattfindet. Beispielsweise könnten an der fertig gestellten Konstruktion die Schwingzeiten ermittelt und dann ein von den Wasserständen unabhängig ablaufendes Schleusungsprogramm festgelegt werden.

3. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLÜßFOLGERUNGEN

In der initialen Phase des Projekts wurde als Ziel definiert, dass die physikalischen Modelluntersuchungen der CNR (als Auftragnehmer von ACP) zu validieren seien. Da diese Ergebnisse dann aber nicht wie geplant verfügbar waren, wurde beschlossen, zunächst rein numerisch zu beginnen und dann auf die physikalischen Modellergebnisse nach Vorliegen zu reagieren.

Die numerischen Untersuchungen wurden zunächst auf der Basis einer von ACP gelieferten Geometrie durchgeführt. Da zu diesem Zeitpunkt keine physikalischen Modellergebnisse vorlagen, konnte auch keine Kalibrierung durchgeführt werden. Stattdessen wurde eine Strategie entwickelt, wie mit einer rein numerischen Werkzeugkette die Schleusen beurteilt werden könnten. Diese Kette bestand aus dreidimensionalen Modellen zur Bestimmung lokaler Verlustbeiwerte, eindimensionalen Netzwerkmodellen für den Schleusenkomplex und dreidimensionalen Modellen für die Schleusenkammer. Die Ergebnisse zeigten, dass das vorgeschlagene System die gestellten Anforderungen voraussichtlich nicht oder bestenfalls sehr knapp erfüllen wird. Daraufhin wurde versucht, das System zu optimieren. Durch verschiedene Veränderungen konnte schließlich

4. Infrastrukturprojekte

Numerische Simulation des Füll- und Entleersystems der neuen Panamakanalschleusen

die geforderte Füllzeit knapp erreicht werden. Jedoch blieb unklar, inwieweit die Schiffskräfte für dieses System noch im zulässigen Rahmen liegen würden, da die vorgesehene Überprüfung die Verfügbarkeit der physikalischen Modelldaten voraussetzte.

Parallel dazu hatte eine andere Gruppe des Bieterkonsortiums ein neues Design entwickelt, das vom Ursprungsdesign von ACP deutlich abwich. Es wurde beschlossen, dieses System weiter zu untersuchen, da es hydraulisch einige Vorzüge aufwies. Die numerischen Tests wurden für dieses System wiederholt, wobei zusätzlich ein Versuch unternommen wurde, die Wasserbewegung in der Kammer zu ermitteln.

Als schließlich die finalen Ergebnisse des physikalischen Modells verfügbar waren, war weiter unklar, ob die Ergebnisse nutzbar sind, da ACP keine Auskunft darüber erteilte, ob die Geometrie des physikalischen Modells den ursprünglich von ACP ausgehändigten Zeichnungen entsprach. Bei einer kurzen Besichtigung des Modells war erkennbar, dass die Geometrie soweit sichtbar nur leichte Veränderungen aufwies, so dass diese Geometrie vermutlich am ehesten mit dem hier numerisch betrachteten „verbesserten Ausgangszustand“ vergleichbar ist. Die später verfügbaren Ergebnisse des physikalischen Modells zeigten dann auch eine gute Übereinstimmung mit den hier gezeigten numerischen Untersuchungen.

Die numerischen Untersuchungen des neu entwickelten Designs, welches acht Sparbecken in vier Ebenen mit symmetrischer Anordnung vorsah, zeigte eine gute hydraulische Leistungsfähigkeit. Aber Detailstudien zeigten auch, dass der Nachteil durch die vierte Sparbeckenebene zu gravierend ist. Zwar konnten die geforderten Füllzeiten erreicht werden, jedoch nur wenn gleichzeitig eine aufwändige Steuerung vorgenommen wird, um Kammerschwingungen zu vermeiden. Es wäre auch möglich gewesen, dieses Design mit drei Sparbeckenebenen zu verwenden. Damit hätten sich erhebliche Vorteile gegenüber dem Ursprungsentwurf ergeben. Dieser Vorschlag wurde jedoch von ACP wegen des dafür benötigten Platzes nicht zugelassen.

Ein generelles Problem beider Entwürfe war das von ACP geforderte System mit doppelten Schiebetoren. Bedingt durch die Forderung, dass immer beide Tore vor dem Schiff und nur das entfernte Tor hinter dem Schiff geschlossen sein sollten, ergab sich für die unterschiedlichen Durchfahrtsrichtungen eine veränderte Kammergeometrie. Dadurch war es nur schwer möglich, dass Füllsystem zur Kammer auszurichten.

Die durchgeführten Untersuchungen mussten wiederholt auf eine veränderte Ausrichtung angepasst werden. Dies führte zusammen mit dem hohen Zeitdruck dazu, dass einige Punkte nicht in der wünschenswerten Tiefe beleuchtet werden konnten. Parallel zu den Untersuchungen fanden Verhandlungen zwischen ACP und den Bietern statt. Als das Konsortium CAPP sich dann zurückzog, wurden alle Arbeiten der BAW gestoppt. Auch aus diesem Grunde haben einige der angesprochenen Punkte ein „offenes Ende“.

Literatur

- [1] Comet, Manual version 2.00, Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH, 2001;
- [2] Griebel, M., Dornseifer, T., Neunhoeffer, T., Numerische Simulation in der Strömungsmechanik, Vieweg Verlag, 1995;
- [3] Croce, R., Griebel, M., Schweitzer, M. A., A parallel level set approach for two-phase flow problems with surface tension in three space dimensions, Preprint 157, SFB 611, Institute for Applied Mathematics University Bonn, 2004;
- [4] Croce, R., Diploma thesis, Institute for Applied Mathematics University Bonn, 2002;
- [5] Miller, D.S., Internal Flow Systems, BHR Group limited, 1996;
- [6] FLOWMASTER, Manual, 2002;

Verfasser

Dr.-Ing. Carsten Thorenz
Bundesanstalt für Wasserbau
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Telefon: 0721/9726-3560
E-Mail: carsten.thorenz@baw.de