

Möglichkeiten und Grenzen der wasserbaulichen Modellierung

Dr.-Ing. Carsten Thorenz, Bundesanstalt für Wasserbau

Einleitung

Im Planungsprozess von Wasserbauwerken stellt das hydraulische Verhalten die zentrale Größe für die Konzeption des Bauwerks dar, da ein Wasserbauwerk als Funktionsbauwerk auf der Basis der ihm zugedachten Aufgaben entwickelt wird. Während in der Vorplanung oft noch Lehrbuchansätze ausreichend sind, erfordert die später wachsende Planungstiefe wesentlich detailliertere und auch zahlenmäßig genauere Aussagen zum strömungsmechanischen Verhalten. Diese werden typischerweise mit gegenständlichen und numerischen Modellen erarbeitet. Hierbei ist es wichtig, dass aus der ingenieurlichen Planungsaufgabe zunächst die passende hydromechanische Fragestellung entwickelt wird, da jedes später erstellte Modell eine für die jeweilige Fragestellung angepasste vereinfachte Darstellung der Natur ist. Die Möglichkeiten und Grenzen der derzeit verfügbaren Methoden werden im Folgenden aufgezeigt. Besonderer Wert wird dabei darauf gelegt aufzuzeigen, wie sich die Methoden ergänzen (s. Bild 1) oder voneinander abgrenzen.

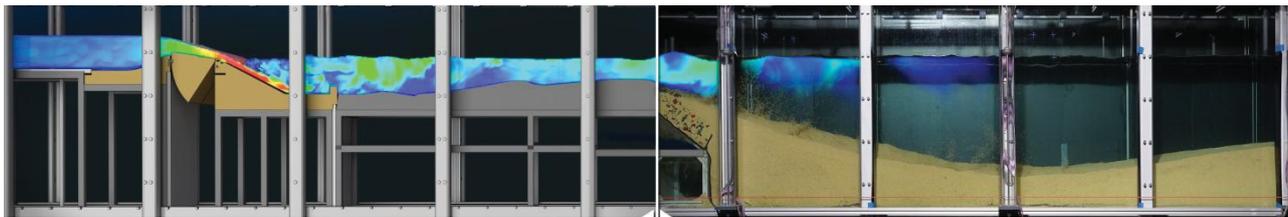


Bild 1: Gegenständliches Modell der Kolkuntersuchungen an der Wehranlage Geesthacht mit eingebundenen numerischen Ergebnissen.

Einbettung in den Planungsprozess und erwartbare Aussagen

Die für die Vorplanung oftmals verwendeten formelmäßigen Beschreibungen der Fließvorgänge, bspw. für die Abflüsse über oder unter einem Wehr, die nötige Tosbeckenlänge und -tiefe oder die erzielbare Füllgeschwindigkeit einer Schleuse basieren meist auf hydrodynamischen Grundgleichungen, die mit diversen Koeffizienten an die jeweilige Fragestellung angepasst werden. Ein musterhaftes Beispiel sei hier die Ermittlung des Abflusses über ein Wehr nach der Poleni-Formel (angelehnt an Aigner, 2008):

$$Q = \frac{2}{3} \prod_{i=1}^6 \sigma_i \cdot \mu \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad \text{Formel 1}$$

Hierin sind Q der sich einstellende Abfluss, μ der Überfallbeiwert, g die Erdbeschleunigung, b die Wehrbreite und h die Stauhöhe über der Wehrkrone. Des Weiteren sind eine Reihe von Beiwerten σ_i multiplikativ zu berücksichtigen, die die Zuflussgeschwindigkeit vor dem Wehr, die Schräganströmung, den Rückstau des Unterwassers, den Pfeilereinfluss etc. parametrisieren. Es ist offensichtlich, dass diese Art von Ansätzen in ihrer Aussagegenauigkeit limitiert ist, zumal die Unabhängigkeit der Vorfaktoren voneinander nicht in jeder Kombination gesichert ist. Jedoch ist das so erzielte Genauigkeitsniveau für die ersten Planungsschritte meist ausreichend.

Schwieriger wird es, wenn komplexere Geometrien betrachtet werden, für die keine Standardberechnungsansätze vorliegen (s. Bild 2). Hier können hydraulische Grundlagenformeln zwar einen Hinweis für bspw. den Pfeilerstau geben, den Einfluss der Gesamtanlage auf die Hochwasserabfuhr kann man so jedoch nicht ausreichend genau bestimmen. Wenn nun im weiteren Planungsprozess genaue Aussagen über die Wasserspiegellagen bei Hochwasserabfuhr erforderlich sind, erfordert dies ein detailliertes Modell der Wehranlage. Da die damit erzielten Aussagen durch spätere Geometrieänderungen zunichte gemacht werden, wird man dies erst in Angriff nehmen, wenn die Planung weit fortgeschritten ist.

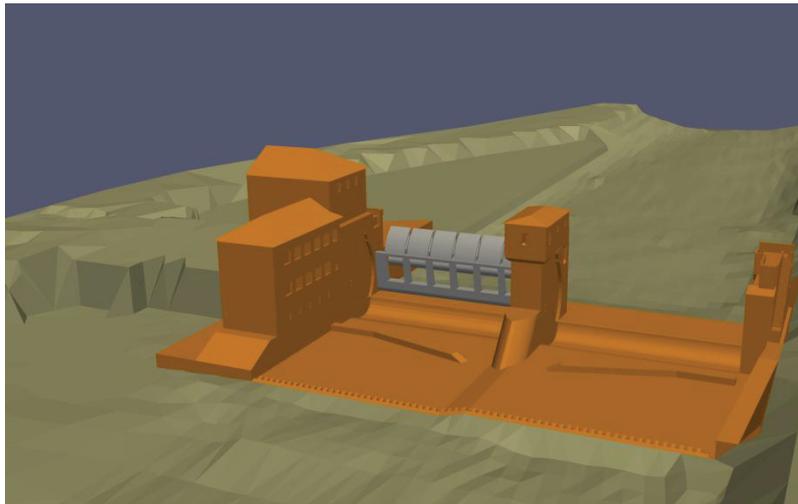


Bild 2: Modellgeometrie Wehranlage Viereth mit geöffnetem Revisionsverschluss.

Absolute und relative Aussagen

Im Planungsprozess wünscht man sich zu jedem Zeitpunkt möglichst exakte Daten aus den hydraulischen Modellen. Jedoch wird die Genauigkeit dieser Informationen nicht nur durch die Qualität der Modelle bestimmt, sondern insbesondere auch durch die Qualität der Eingangsdaten. Wenn die Geschwindigkeit des Planungsprozesses „schnelle“ Ergebnisse erfordert, ist dies oft nur bei Herabsetzung der Untersuchungstiefe und -qualität möglich.

Eine wesentliche Maßnahme für die Erhöhung der Aussagequalität ist oftmals der Verzicht auf absolute Zahlenangaben in den Ergebnissen. Wenn stattdessen die Differenz zu einem Ist-Zustand ermittelt wird, eliminieren sich viele unvermeidliche Fehler, da sie in Ist- und Planungszustand gleichermaßen auftreten werden. Ein Beispiel sei hier der Einfluss der Sohlpeilungsdaten auf die Wasserstände: Die zu einem beliebigen Zeitpunkt erhobenen Peildaten werden für den noch unbekanntem Zeitpunkt, für den die Hochwassersituation beurteilt werden soll (bspw. das Eintreten eines HQ100), eine Unsicherheit von etlichen Dezimetern aufweisen. Dies wirkt sich direkt auf die im Modell ermittelten absoluten Wasserstände aus, die daraus resultierend große Abweichungen zu den später festgestellten Realwerten aufweisen können. Erst durch die Differenzbildung der prognostizierten Wasserstände für Ist- und Planungszustand kann eine akzeptable Aussagequalität im Zentimeterbereich für die Wirkung der Maßnahme erreicht werden.

Gegenständliche versus numerische Modellierung?

Jede Form von Modellen bietet Möglichkeiten und erfordert Einschränkungen, die für das jeweilige Modell spezifisch sind. Während noch vor etwa zwanzig Jahren erwartet wurde, dass die numerischen Modelle die gegenständlichen Modelle zügig überflüssig machen würden, zeigt sich nun, dass sich aus der kooperativen Nutzung beider Modelltypen („hybride Modellierung“) große Vorteile ergeben (Thorenz, 2009). Die Bearbeitung mit beiden Methoden ermöglicht es, die jeweiligen Stärken auszunutzen und so bei höherer Effizienz ein qualitativ besseres Ergebnis zu erzielen. So können beispielsweise vereinfachte numerische Modelle die Vorauswahl von Geometrievarianten für ein zu bauendes gegenständliches Modell oder für die weitere Planung stark beschleunigen. Da in dieser Phase die Genauigkeitsansprüche noch nicht so hoch sind, können auch mit stark vereinfachten Modellen wichtige Auswahlkriterien erarbeitet werden. Wenn auf dieser Basis ein gegenständliches Modell erstellt wird, kann mit dessen Hilfe nach Fertigstellung sehr schnell eine große Anzahl hydraulischer Szenarien untersucht werden kann. Parallel können dann wiederum hochspezialisierte numerische Modelle verwendet werden, um das gegenständliche Modell bspw. auf Skalierungseffekte zu überprüfen.

Reibungs- und impulsdominierte Strömungsprozesse

Bei der Umströmung von Wasserbauwerken sind die Strömungsprozesse im Fernfeld des Bauwerks meist reibungsdominiert (bspw. im Flussschlauch oder auf den Vorländern), während am Bauwerk selbst die Umwandlung von potentieller in kinetische Energie im Vordergrund steht. Bei reibungsdominierten Strömungen ist eine korrekte Abbildung nur möglich, wenn der Reibungseinfluss physikalisch richtig abgebildet wird und zudem eine Kalibrierung des Reibungseinflusses vorgenommen wird. Beide Anforderungen werden deutlich entschärft, wenn bei Fragen der Bauwerksuntersuchung lediglich vergleichende Betrachtungen durchgeführt werden. Bei dreidimensionalen numerischen Modellen kann es zu Problemen kommen, wenn die zu betrachtenden Rauheiten groß sind. In diesem Fall ist es erforderlich, die Gittergröße an die Rauheitshöhe anzupassen. Dies kann zu einem Zielkonflikt mit der am Bauwerk gewünschten, deutlich kleineren Gittergröße führen, die für eine gute Abbildung der Strömung erforderlich ist. Ein Beispiel wäre hierfür die Überströmung einer Schüttsteinlage am Bauwerk bei geringen Wassertiefen. Die naheliegende Lösung wäre das direkte Abbilden der Geometrie der Schüttsteine im numerischen Modell. Dies ist jedoch aus Aufwandsgründen meist nicht möglich.

Die Umwandlung der potentiellen Energie des Strömungsfeldes in kinetische Energie, wie sie beispielsweise bei der Überströmung eines Wehrverschlusses (Bild 3) oder der Durchströmung einer Wehranlage im (n-1)-Fall (Bild 2) auftritt, stellt heute einen gut beherrschbaren Fall dar. Im gegenständlichen Modell ist dies das Musterbeispiel für die Anwendbarkeit der Froude'schen Ähnlichkeitsansätze und seit über 100 Jahren geübte Praxis. Auch in den dreidimensionalen numerischen Verfahren ist diese Fragestellung so gutmütig, dass die Qualität der Ergebnisse meist sehr gut ist. Einschränkungen der Qualität ergeben sich lediglich, wenn aus Effizienzgründen unzureichende Gitterauflösungen gewählt wurden oder die Fachkenntnis des Modellierers nicht ausreicht.

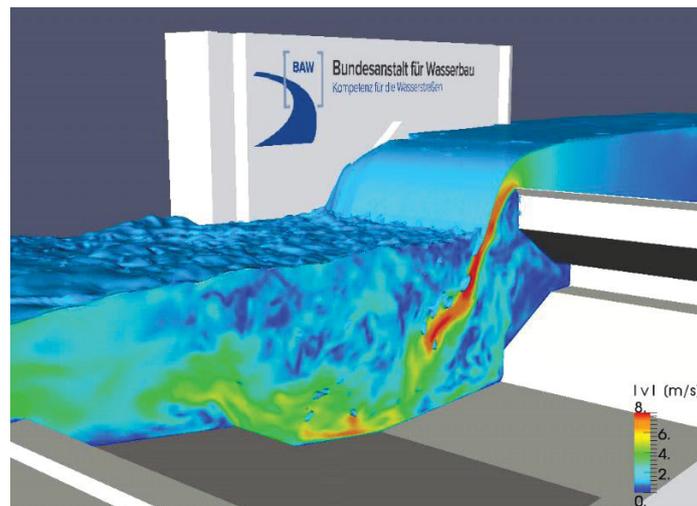


Bild 3: Large-Eddy-Simulation der Strömungsgeschwindigkeiten im Tosbecken einer Wehranlage (Strömungslöser: OpenFOAM®).

Im Nahfeld des Bauwerkes spielt die Reibung meist keine maßgebliche Rolle. Hier reicht es aus, die Reibungseinflüsse nur grob zu approximieren. Dabei ist jedoch immer darauf zu achten, dass die gewählten Rauheitsgrößen in einem physikalisch sinnvollen Rahmen bleiben. Teilweise versuchen Modellierer die Unzulänglichkeiten der erstellten Modelle durch unphysikalische Rauheiten zu kompensieren. Dies ist grob falsch und verdeckt lediglich die grundlegenden Mängel der Modelle. Dies gilt ebenso für das Variieren anderer Parameter, die keine physikalisch begründete Bandbreite aufweisen, aber dennoch zum Anpassen der Ergebnisse an Referenzdaten verwendet werden.

Einfluss der Turbulenz

Während die Erzeugung schnellfließender Strömungsbereiche aus dem angestauten Wasser meist gut approximiert werden kann, stellt die Umwandlung dieser Energie in Wärme eine erhebliche Herausforderung dar. In gegenständlichen Modellen erfordert dies einen hinreichend großen Modellmaßstab, um das Zerfallen der Strömung in zunächst große und dann immer kleinere Wirbel zumindest auf den größten Skalen korrekt abzubilden. Dies kann sichergestellt werden, wenn die Reynoldszahlen in diesem Bereich groß genug sind. Aus hydraulischer Sicht ist diese Frage sehr wichtig bei der Beurteilung der Größe von Rückströmungszonen oder der Ausbildung einer Wirbelstraße. Wenn diese Effekte in numerischen Modellen korrekt abgebildet werden sollen, ist besondere Fachkenntnis in Bezug auf die Turbulenzmodellierung erforderlich. Als Königsweg bietet sich dabei die „Large-Eddy-Simulation“ (LES) an, die ähnlich wie bei der gegenständlichen Modellierung die größten Wirbel direkt abbildet und so mögliche Modellierungsfehler der Turbulenzmodelle verringert (s. Bild 3). Leider erfordern LES-Ansätze erheblich feinere Gitterauflösungen und genauere numerische Schemata als herkömmliche Turbulenzmodelle, so dass der Aufwand sorgfältig abzuwägen ist.

Bewegte Objekte mit und ohne Fluid-Struktur-Kopplung

Eine besondere Herausforderung stellen in der Modellbildung gekoppelte Betrachtungen für das strömende Fluid und sich darin bewegende Objekte dar. Obwohl die Bewegung starrer Körper im Fluid seit etwa einhundert Jahren in gegenständlichen Modellen untersucht wird, ist dieses Problemfeld nach wie vor methodisch anspruchsvoll.

Um bspw. die Sicherheit während des Schleusungsvorgangs beurteilen zu können, werden typischerweise die auf das Schiff wirkenden Kräfte im Modell gemessen. Diese Messung der Schiffskräfte ist im gegenständlichen Modell schwierig, da sich das Schiff einerseits möglichst ungehindert bewegen soll (Verschiebung in z-Richtung, krängen und trimmen sind frei), aber andererseits möglichst steif an die Messapparatur gekoppelt sein soll (Verschiebung in x-y-Richtung sowie drehen um die z-Achse sind minimal). Auch im numerischen Modell stellt dies eine erhebliche Herausforderung dar, die noch nicht ausreichend gelöst ist (Thorenz et al. 2017).

Wenn die Strömung mit in sich starren, aber beweglichen Körpern interagiert, kann dies beispielsweise bei Wehrverschlüssen zu Schwingungen führen. Diese Starrkörperschwingungen lassen sich sowohl mit gegenständlichen als auch mit numerischen Modellen (Göbel et al., 2018) beurteilen. Jedoch muss dafür zunächst eine Prognose des maßgeblichen Schwingungsphänomens vorliegen, für das dann das passende Modell aufgebaut wird und die Beurteilung erfolgt. Eine allgemeine Aussage „ob Schwingungen auftreten“, kann daher nicht erfolgen, da nur Schwingungen beurteilt werden können, deren mögliche Existenz gezielt untersucht wird. Eine Beurteilung der Schwingungsmuster, die sich aus der Verformung der Körper in Interaktion mit der Strömung ergeben ist bis heute äußerst schwierig und nur in Sonderfällen möglich. Im gegenständlichen Modell müssen die Massenkräfte und die Schwingfrequenzen maßstäblich zur Strömungsphysik passen und im numerischen Modell miteinander gekoppelte dynamische Festkörper- und Strömungsmodelle aufgebaut werden. Dies ist wegen der Komplexität nur in Sonderfällen möglich und sinnvoll. Die Erfahrung der letzten Jahre zeigt, dass dem Problem der Strömungs-Struktur-Interaktion zuletzt nicht genug Aufmerksamkeit geschenkt wurde und dies zu Schwingungsproblemen im Betrieb führen kann. Eine nachträgliche Anpassung der schwingenden Bauteile ist dann oftmals nicht, oder nur mit viel Aufwand, möglich.

Mehrphasige und mehrkomponentige Strömungsregimes

Eine besondere Schwierigkeit stellt die Durchmischung verschiedener Fluide miteinander oder mit Feststoffen, wie Sedimente, Treibgut oder Eis, dar. Ein Beispiel ist die Einmischung von Luft in den Wasserkörper. Dies kann ein wesentlicher Prozess sein, wenn sich dadurch die Lasten auf die Konstruktion (Belüftung eines Verschlusses, s. Bild 4) oder auf Schiffe in der Schleusenammer maßgeblich ändern. Diese Effekte können im gegenständlichen Modell nur eingeschränkt abgebildet werden, da die Blasenbildung und der Blasenauftieg nicht maßstäblich skalieren. Zwar lassen sich trotzdem qualitative Aussagen generieren, das Erzielen quantitativer Aussagen erfordert jedoch ein ausgeprägtes Expertenwissen. In numerischen Modellen existieren erste Ansätze für die Berücksichtigung dieser Effekte, die jedoch ebenfalls Einschränkungen aufweisen und zudem sehr große Rechenressourcen benötigen (Schulze, 2018).

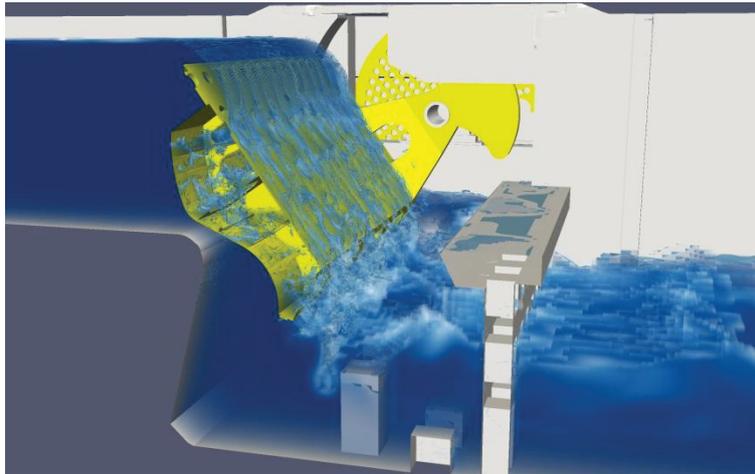


Bild 4: Simulation der Unter-,Über- und Durchströmung eines Drucksegments bei Hochwasserabfuhr mit intensiver Luft-Wasser-Durchmischung.

Die Vermischung von Salz- und Süßwasser kann zu großen Problemen in Schleusen führen, da die Dichteunterschiede zu starken Strömungsprozessen führen. Im gegenständlichen Modell können diese Dichteströmungen gut abgebildet werden, da die Dichteeffekte in den Froude'schen Modellansätzen korrekt abgebildet werden. Der Umgang mit Salzlösungen ist in der Versuchstechnik jedoch äußerst anspruchsvoll, da das Salz zu verstärkter Korrosion führt, sich Salzablagerungen bilden und auch die Entsorgung der Salzlösungen problematisch ist. Für die Seeschleusen Ijmuiden und Terneuzen wurden kürzlich umfangreiche Untersuchungen dieser Art durchgeführt (v. d. Hout et al., 2018). Im numerischen Modell können die Salztransportvorgänge in Modelle für den Schleusungsvorgang eingefügt werden, wobei die turbulente Durchmischung eine besondere Rolle spielt. Die üblicherweise verwendeten Turbulenzmodelle setzen eine isotrope Ausrichtung der Turbulenz voraus. Durch die Dichteschichtung kommt es aber zu stabilisierenden Effekten, die die Turbulenz anisotrop werden lässt. Dies kann im numerischen Modell nur mit speziell angepassten Turbulenzmodellen abgebildet werden. Eine Alternative stellt das Konzept dar, die großskalige, anisotrope Turbulenz und die resultierende Salzdurchmischung direkt abzubilden („Large-Eddy-Simulation“) und die kleinskalige Turbulenz und die zugehörige Durchmischung mit einem isotropen Turbulenzmodell abzubilden (Bild 5). Dieser Ansatz wurde bspw. erfolgreich angewendet, um die Dichteströmungseffekte an den Nord-Ostsee-Kanal-Schleusen zu beurteilen (Thorenz, 2018).

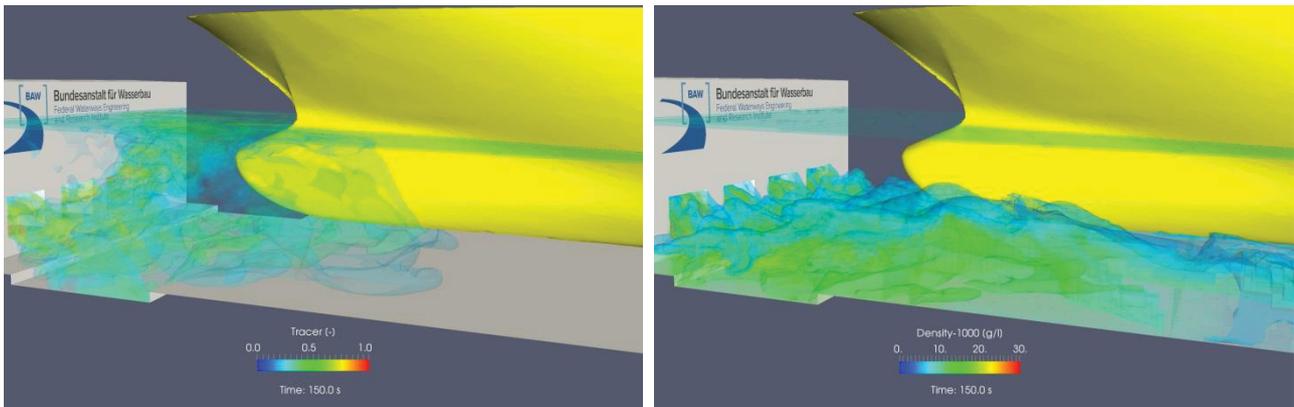


Bild 5: Simulation eines Schleusenfüllvorgangs bei Füllung mit Frischwasser (links) und mit Salzwasser (rechts).

Die Bewegung von Sedimenten im Nahfeld von Wasserbauwerken hat einen potentiell bauwerksgefährdenden Charakter. Durch Auskolkungen kann die Standsicherheit des Bauwerks gefährdet werden oder durch Anlandungen die Funktion eingeschränkt werden (Herbst et al., 2018). Insbesondere bei Bauwerken die auf Lockergestein gegründet sind, sind Untersuchungen zur Lagestabilität der Sohle und der Sohlbefestigung erforderlich. Die Bewegung nicht-kohäsiver Sedimente kann in gegenständlichen Modellen gut qualitativ abgebildet werden. Hierbei kann bei sehr großen Korngrößen (Wasserbausteine) das Material direkt mit den Modellgesetzen skaliert werden, da die Strömung um das Einzelkorn noch voll turbulent ist. Für kleinere Korngrößen (Sand o.ä.) muss jedoch ein Ersatzmaterial verwendet werden. Dieses wird so gewählt, dass durch eine geringere Dichte bei größerem Korndurchmesser ein ähnliches Bewegungsverhalten wie in der Natur erzielt wird (s. Bild 1). Eine exakte Abbildung ist hiermit nicht gegeben, jedoch kann das Systemverhalten verschiedener Konfigurationen verglichen und so optimiert werden. In kleinräumigen numerischen Modellen wurde schon wiederholt beispielsweise das Auskolkungsverhalten um Brückenpfeiler untersucht. Jedoch haben diese Ansätze wegen ihrer Parameterabhängigkeit und Komplexität noch nicht den Weg zu einer regelmäßigen Anwendung in der Ingenieurpraxis gefunden.

Zusammenfassung und Ausblick

Um die Funktion eines Wasserbauwerks beurteilen zu können, sind detaillierte Kenntnisse über das zu erwartende hydraulische Verhalten erforderlich. Dafür sind in den verschiedenen Planungsstufen Untersuchungen unterschiedlicher Tiefe und Detaillierung durchzuführen. Während in der Vergangenheit sehr weitgehende Planungen auf der Basis ingenieurlicher Abschätzungen durchgeführt wurden, werden heute komplexere Untersuchungsmethoden immer früher im Planungsprozess verwendet. Dies ist möglich, da sowohl im numerischen als auch im gegenständlichen Modell die Erstellungsgeschwindigkeit stark erhöht werden konnte. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die so in einem frühen Planungsstadium mit großem Aufwand erzielten Aussagen durch spätere Veränderungen leicht wieder zunichte gemacht werden können. Hier gilt es, die nötige Untersuchungstiefe so anzupassen, dass sie der jeweiligen Planungsreife entspricht.

Inhaltlich ist der Trend erkennbar, höhere Aussagegenauigkeiten zu erwarten und auch eine steigende Zahl von hydraulischen Varianten zu betrachten. Dies führt zu einer deutlichen Erhöhung des Untersuchungsaufwandes. Eine Verbesserung der Aussagequalität wird zukünftig auch dadurch erreicht werden, dass physikalische Prozesse, die in der Vergangenheit noch nicht (oder teilweise auch nicht mehr) betrachtet wurden, genauer untersucht werden. Dies ist beispielsweise die Schwingungsanfälligkeit von Bauteilen oder die Beurteilung der Auswirkungen der Luft-Wasser-Vermischung. Diese Fragen werden zukünftige Untersuchungsschwerpunkte darstellen.

Literatur

- Aigner, D. (2008): Überfälle. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Aktuelle Forschungen im Wasserbau 1993 - 2008. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 36. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 182-200.
- Göbel, G., Gebhardt, M., Deutscher, M., Metz, W., Thorenz, C. (2018): Description of Some Seal Vibration Problems at Hydraulic Gates on German Waterways. Daniel Bung, Blake Tullis, 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Aachen, Germany, 15-18 May. doi: 10.15142/T34D2G (978-0-692-13277-7).
- Herbst, J., Gebhardt, M., Merkel, J., Belzner, F., Thorenz, C. (2018): Sediment Transport Over Labyrinth Weirs. Daniel Bung, Blake Tullis, 7th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Aachen, Germany, 15-18 May. doi: 10.15142/T3XP91 (978-0-692-13277-7).
- v. d. Hout, A. J., Nogueira, H. I. S., Kortlever, W. C. D., Schotman, A. D. (2018): Scale model research and field measurements for two new large sea locks in the Netherlands, In: Preceedings des PIANC World Congress, Panama City, Panama.
- Schulze, L. (2018): Development of an Application-Oriented Approach for Two-Phase Modelling in Hydraulic Engineering, Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, (61).
- Thorenz, C. (2009): Integrierte numerische und physikalische Vorstudien zur Planung der Schleuse Minden – Ein scheinbarer Konflikt. In: HTG Kongress 2009, Musik- und Kongresshalle Lübeck, 09.-12. September 2009, Seiten 89-90.
- Thorenz, C.; Belzner, F.; Hartung, T.; Schulze (2017): Numerische Methoden zur Simulation von Schleusenfüllprozessen. In: BAW Mitteilungen Nr. 100, Kompetenz für die Wasserstraßen – Heute und in Zukunft Forschungs- und Entwicklungsprojekte der BAW, BAW, Karlsruhe.
- Thorenz, C. (2018): Can better turbulent mixing reduce density induced ship forces during lockage? Vortrag und "extended abstract", PIANC World Congress, Panama City, Panama.