

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Schulze, Lydia; Thorenz, Carsten; Stamm, Jürgen

Entwicklung eines numerischen Ansatzes für die Modellierung von Lufteintrag und –transport in einem Schleusenfüllsystem

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103461>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Schulze, Lydia; Thorenz, Carsten; Stamm, Jürgen (2014): Entwicklung eines numerischen Ansatzes für die Modellierung von Lufteintrag und –transport in einem Schleusenfüllsystem. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Simulationsverfahren und Modelle für Wasserbau und Wasserwirtschaft. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 50. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 403-412.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Entwicklung eines numerischen Ansatzes für die Modellierung von Lufteintrag und -transport in einem Schleusenfüllsystem

Lydia Schulze
Carsten Thorenz
Jürgen Stamm

Zum Nachweis der Praxistauglichkeit eines neuen Füllsystems für Schleusen mit großer Fallhöhe soll eine passende Untersuchungsmethode entwickelt werden. Da im vorgeschlagenen System Lufteintrag den Schleusungsprozess signifikant stören könnte, ist die Modellierung des Wasser-Luft Gemisches im System von besonderer Bedeutung.

Stichworte: Schleusenfüllsystem, Lufteintrag, Mehrphasenmodellierung

1 Projekthintergrund

Die Planung der neuen Main-Donau-Kanal Schleusen Erlangen und Kriegensbrunn gab den Anstoß für die Entwicklung eines neuen Füll- und Entleersystems für Schleusen mit großer Fallhöhe (>10 m), welches die Bau- und Wartungskosten des bisherigen Systems deutlich reduzieren soll (*Thorenz, 2012*). Das derzeitige Füllsystem besteht aus einer Druckkammer, welche die Schleusenkammer über zylindrische Fülldüsen von unten befüllt und entleert. Bei Normalbetrieb wird ca. 60 % des Wassers aus seitlichen Sparbecken in die Kammer eingeleitet. Die übrigen 40 % fließen über zwei tiefliegende, stirnseitig an die Druckkammer angeschlossene Umlaufkanäle vom Oberwasser in die Druckkammer.

Im neuen Füllsystem werden die oberwasserseitigen Umlaufkanäle durch einen vertikalen Fallschacht ersetzt, der das Oberwasser direkt mit der Druckkammer verbindet. Als Verschluss des Schachtes dient das obere Schleusentor, welches als Drehsegmenttor ausgeführt wird. Durch das Ersetzen der Umlaufkanäle mit dem Fallschacht wird der Baukörper verkleinert (siehe Abbildung 1) und der Wartungsaufwand durch die entfallenden Schütze reduziert. Für den reibungslosen Betrieb der Schleuse muss gewährleistet werden, dass die Füllung auch bei Ausfall der Sparbecken komplett über das Oberwasser erfolgen kann. Bei einer Füllung über den Fallschacht könnten dabei große Mengen Luft eingetragen werden. Da die Auswirkungen des Lufteintrages auf den Schleusungsprozess

schwer abschätzbar sind, bedarf es einer genaueren Untersuchung, welche im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes an der Bundesanstalt für Wasserbau durchgeführt wird.

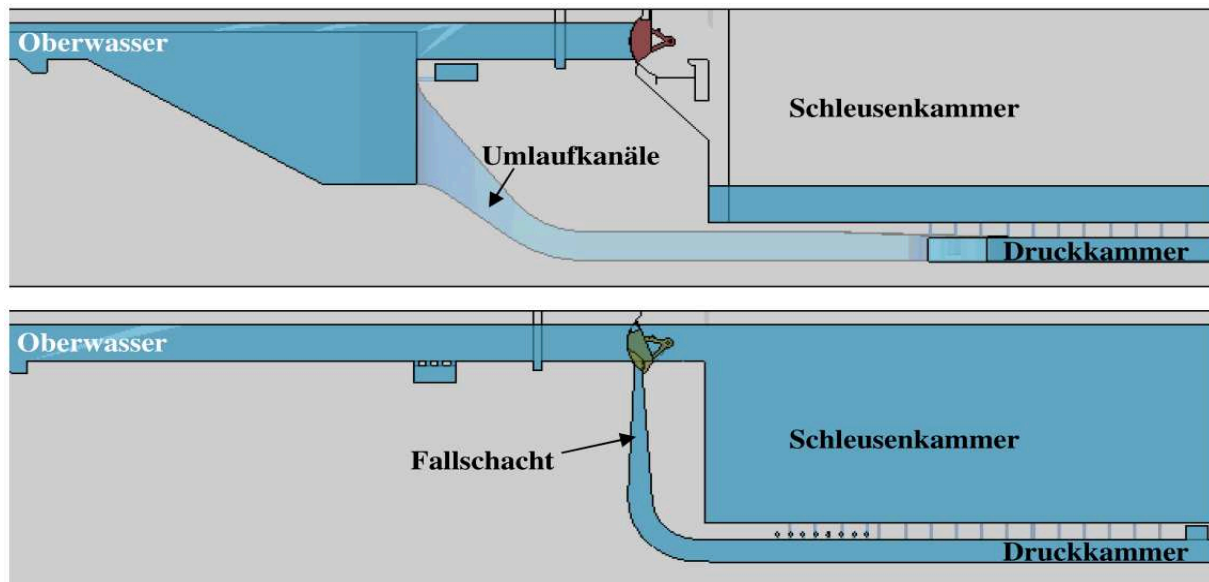


Abbildung 1: Vergleich des bisherigen Füllsystems (oben) mit tiefliegenden Einlauftrichtern und Umlaufkanälen und dem neuen Füllsystems (unten) mit Fallschacht

Im Bereich der gegenständlichen Maßstabsmodelle ergeben sich durch die Skalierung unvermeidbare Maßstabseffekte, die bei Luft-Wasser-Gemischen dazu führen, dass der tatsächliche Lufteintrag und die dabei entstehenden Effekte nicht maßstabsgetreu abgebildet werden. Dies resultiert vor allem daraus, dass an der Phasengrenzfläche die Oberflächenspannung des Wassers einen großen Einfluss hat. Selbst bei Verwendung eines Ersatzfluids mit entsprechender Oberflächenspannung kann das Verhalten der Luftblasen im Wasser nur fehlerhaft abgebildet werden (*Chanson et al., 2002*). Eine ausschließliche Untersuchung mit einem Labormodell ist daher nicht geeignet.

Mit den Mitteln der computergestützten Strömungsmodellierung können solche Maßstabseffekte vermieden werden, da die Simulation die Betrachtung im Originalmaßstab ermöglicht. Trotzdem ist die numerische Abbildung des Systems nicht trivial, da passende Ansätze für die Modellierung der relevanten physikalischen Prozesse gefunden werden müssen. Im Folgenden werden die für das System physikalisch relevanten Prozesse und die dafür verfügbaren numerischen Modellansätze vorgestellt und diskutiert.

2 Relevante physikalische Prozesse

Um ein passendes Modell entwickeln zu können, müssen die maßgeblichen physikalischen Prozesse zunächst identifiziert werden. Bei den Untersuchungen für das neue Schleusenfüllsystem sollen die Auswirkungen des Lufteintrags auf den Schleusungsprozess analysiert werden. Dabei spielen vor allem der Lufteintrag durch den fallenden Wasserstrahl im Füllschacht und der Blasen-transport im Füllsystem eine wichtige Rolle.

2.1 Strahlzerfall

Bei der Befüllung der Schleuse vom Oberwasser fließt das Wasser über einen Spalt, der durch das Drehsegment freigegeben wird, in den Fallschacht. Dort bildet sich ein breiter, frei fallender Strahl aus, welcher auf Höhe des Unterwasserstandes auf die freie Wasseroberfläche auftrifft. Durch die Reibung des Strahls an der ihn umgebenden Luft wird die Oberfläche des Strahls mit steigender Fallstecke zunehmend rauer und kann anfangen zu oszillieren. Über die Turbulenz an der Strahloberfläche wird Luft in den Strahl eingetragen. Nach einer bestimmten Fallhöhe ist der komplette Strahl bis in den Kern belüftet (*Baylar et al.*, 2008). Die Belüftung des Strahls hat Einfluss auf die Breite und Geschwindigkeit des Strahls und spielt somit eine entscheidende Rolle für den Lufteintrag in das Füllsystem. Empirische Formeln zur Belüftung eines frei fallenden zweidimensionalen Fallstrahls wurden von *Chanson* (2008) experimentell ermittelt. Mit ihnen lässt sich ausrechnen, ab welcher Fallhöhe der Strahl vollständig belüftet ist. Die Belüftung ist dabei abhängig von der Strahlbreite, der Froudezahl an der Überfallkante sowie von der Turbulenzintensität als Funktion des Durchflusses. Wenn die Befüllung der Kammer ohne die Sparbecken erfolgt, ergibt sich eine Fallhöhe von etwa 18 m. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass der fallende Strahl stark belüftet ist, wenn er auf die freie Wasseroberfläche auftrifft (*Schulze & Thorenz*, 2013).

2.2 Lufteintrag

Beim Auftreffen des Wasserstrahls auf die freie Wasseroberfläche wird Luft in Blasenform eingetragen. Ab einer gewissen Auftrittsgeschwindigkeit bilden sich an der seitlichen Grenze der Auftrittsfläche des Strahles größere Lufttaschen. Im mittleren Bereich des Strahls wird die vorher im Strahl vorhandene Luft in Form von kleineren Bläschen in das Wasser eingetragen (*Bratberg & Chanson*, 1999). Die Menge und Größe der eingetragenen Luftblasen ist dabei abhängig von der Geschwindigkeit des auftreffenden Strahls, der Auftrittsfläche und der Turbulenz an der Oberfläche des Wasserbeckens (*Bin*, 1993). Die Auftreffgeschwindigkeit und die damit zusammenhängende Belüftung des Strahls bestimmt die Eintragstiefe der Luftblasen. Beim stark belüfteten Strahl im Fallschacht ist zu

erwarten, dass ein hoher Eintrag von Blasen unterschiedlicher Größe bis in große Tiefe stattfindet. Eine Quantifizierung der Lufteintragsmenge für den Füllvorgang ist mit den empirischen Formeln aus der Literatur nicht möglich, da sich die bestehenden Formeln zumeist auf runde Fallstrahlen in kleinerem Maßstab beziehen

2.3 Blasen-transport und -zerfall

Die eingetragene Luft hat durch ihre geringere Dichte das Bestreben zur Wasseroberfläche aufzusteigen. Durch die vorhandene Strömung, die durch das Einleiten des Wassers in das Füllsystem entsteht, werden die Blasen jedoch in Richtung der Druckkammer umgelenkt und können somit nicht ungehindert aufsteigen. Auf die einzelne Blase wirken dann folgende Kräfte: Auftriebskraft, Widerstandskraft, virtuelle Massenkraft und die Strömungskraft aus der Geschwindigkeit relativ zum Wasser. Alle genannten Kräfte sind von der Größe und Form der Blase abhängig. Da sich das Strömungsfeld mehrerer Blasen gegenseitig beeinflusst, ist auch die Anzahl der vorhandenen Blasen für das Strömungsfeld von Bedeutung. Blasen-kollisionen können zur Koaleszenz und damit zur Änderung der Blasengrößen führen. Außerdem kann es zum Zerfall von größeren zu kleineren Blasen kommen, wenn die tangentialen Scherkräfte auf Luftblasen größer als die kapillaren Kräfte pro Fläche werden (*Chanson, 2008*).

2.4 Mögliche Auswirkungen des Lufteintrags auf den Schleusungsprozess

Für Binnenschleusen muss gewährleistet werden, dass die Kräfte auf die in der Schleuse liegenden Schiffe ein bestimmtes Maß nicht überschreiten. Die Kräfte auf das Schiff entstehen beim Schleusungsprozess dabei hauptsächlich aus den Wellen in Längsrichtung der Kammer (*Partensky, 1981*). Wenn im neuen Schleusenfüllsystem durch den fallenden Wasserstrahl signifikante Mengen Luft in das System eingetragen werden, muss dafür gesorgt werden, dass diese nicht in Form von großen Blasen in der Schleusen-kammer aufsteigt und damit Wellen in der Schleusen-kammer produziert. Zudem kann bei massivem Lufteintrag die mittlere Fluid-dichte soweit reduziert werden, dass der zum Schwimmen erforderliche Auftrieb nicht mehr gewährleistet ist. Für das vorgeschlagene System muss also sichergestellt werden, dass die eingetragene Luft keinen signifikanten Einfluss auf den Schleusungsprozess hat. Gegebenenfalls muss der Einlaufbereich so angepasst werden, dass dies gewährleistet werden kann.

3 Numerische Ansätze für die Modellierung von Mehrphasenströmungen

Bei der numerischen Strömungsmodellierung werden die Navier-Stokes-Gleichungen auf einem Rechengitter diskretisiert und gelöst. In den folgenden Betrachtungen wird von einer Diskretisierung mit der Finite-Volumen-Methode ausgegangen, Wasser und Luft werden dabei als inkompressibel angenommen. Da die räumliche und zeitliche Diskretisierung durch die verfügbaren Rechenressourcen beschränkt ist, können nicht alle relevanten Phänomene direkt aufgelöst werden. Es werden daher Ansätze verwendet, die Phänomene wie die Turbulenz oder die Interaktion zwischen den Phasen über Modelle abbilden.

3.1 Die Volume-of-Fluid-Methode

Für die Modellierung von Strömungen mit freier Wasseroberfläche wird im Wasserbau meistens die Volume-of-Fluid (VoF)-Methode angewandt. Bei der VoF-Methode werden eine Massenerhaltungs- und eine Impulserhaltungsgleichung für das aus Luft und Wasser bestehende Fluidgemisch in jeder Zelle gelöst. Zusätzlich wird der Volumenanteil des Wassers pro Zelle über eine Advektionsgleichung mit der Strömung transportiert:

Massenerhaltung:

$$\nabla \cdot U = 0 \tag{1}$$

Impulserhaltung:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot T + f \tag{2}$$

Transportgleichung für den volumetrischen Anteil α des Fluids 1 pro Zelle:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha U) = 0 \tag{3}$$

wobei U die Geschwindigkeit, ρ die gemittelte Dichte, p den Druck, T die viskosen Kräfte und f alle externen Kräfte auf das Fluidgemisch darstellen. Der VoF-Koeffizient α stellt den Füllgrad der Zelle dar und ist somit nur im Wertebereich zwischen 0 und 1 definiert.

Als Lösung des Gleichungssystems werden Druck und Geschwindigkeit des Fluidgemisches in jeder Zelle berechnet, unterschiedliche Phasengeschwindigkeiten sind nicht möglich. Über die VoF-Gleichung (3) wird bestimmt, zu welchen Teilen die Zelle mit Wasser bzw. Luft gefüllt ist. Da die numerische Lösung dieser Advektionsgleichung zu numerischer Diffusion führt, müssen spezielle Methoden angewendet werden, um die Phasengrenze als solche zu erhalten.

Die VoF-Methode eignet sich vor allem für die Modellierung von Strömungen mit großen, freien Oberflächen, bei denen Massen- oder Impulsaustausch zwischen den Phasen vernachlässigbar ist. Für die Abbildung von Strömungen, bei denen kleine Tropfen oder Blasen von Relevanz sind, ist die Methode weniger geeignet, da diese nur richtig abgebildet werden können, wenn sich die Akkumulation des Fluides über mehrere Rechengitterzellen erstreckt. Sind die Tropfen/Blasen kleiner als die Zellweite, kann die Phasengrenzfläche nicht richtig dargestellt werden, was zu einem nicht-physikalischen Verhalten des Fluidgemisches führt. Für die Modellierung des Füllprozesses in der Schleuse eignet sich das Verfahren nur bedingt, da auch die Modellierung kleiner Luftblasen im System von großer Bedeutung ist.

3.2 Die Euler-Euler-Methode

Bei der Euler-Euler-Methode werden die Erhaltungsgleichungen für beide Fluide separat gelöst. Über einen zusätzlichen Term in der Impulsgleichung wird der Impulsaustausch zwischen den Phasen modelliert. Die zu lösenden Gleichungen können wie folgt formuliert werden:

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_k U = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \alpha_k U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U \alpha_k) = -\alpha_k \nabla \cdot p + \nabla \cdot \alpha_k T + M_k \quad (5)$$

Wenn davon ausgegangen werden kann, dass eine Phase kontinuierlich und die andere dispers ist und dass die dispersen Partikel (Tropfen/Blasen) alle gleich groß sind, werden beide Gleichungen für jede Phase (k) einmal gelöst. Mit dem Quellterm M_k wird der Impulsaustausch zwischen den Phasen modelliert. Die Schließung des Gleichungssystems erfolgt mit Hilfe von empirisch ermittelten Ansätzen, welche nicht für jede Anwendung geeignet sind. Die Formulierung von M_k stellt daher die größte Schwierigkeit in diesem Ansatz dar.

Das physikalische Verhalten von Fluidakkumulationen, die kleiner als die finiten Volumen des Rechengitters sind, wird mit der Euler-Euler-Methode besser als mit dem VoF-Ansatz abgebildet. Nachteilig für das zu untersuchende System ist jedoch, dass die Lage der Grenzfläche zwischen den Phasen nicht explizit abgebildet werden kann und somit die Information über die genaue Lage der Wasseroberfläche nicht genau bekannt ist. Für die Untersuchung des gesamten neuen Schleusenfüllsystems ist diese Methode somit nicht geeignet. Es muss ein Ansatz verwendet werden, der sowohl die Wasseroberfläche als auch den Blasen-transport abbilden kann.

3.3 Das Algebraic-Slip-Mixture-Modell

Das „Algebraic Slip Mixture (ASM)“-Modell kann als Vereinfachung des Euler-Euler-Ansatzes oder als Erweiterung der VoF-Methode betrachtet werden. Um unterschiedliche Phasengeschwindigkeiten modellieren zu können, werden die aus der Euler-Euler Methode bekannten Erhaltungsgleichungen aufgestellt und über alle Phasen summiert. Es ergeben sich die folgenden Gleichungen:

$$\nabla \cdot U_m = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho_m U_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m U_m U_m) = -\nabla \cdot p + \nabla \cdot \alpha_k T - \nabla \cdot [\rho_m c_p (1 - c_p) U_{pq} U_{pq}] \quad (8)$$

$$\text{mit } c_p = \frac{\alpha_p \rho_k}{\rho_m}$$

Der Index m kennzeichnet dabei die dichtegewichteten, gemittelten Größen. Die Größen der ersten Phase sind mit p , die der zweiten Phase mit q bezeichnet. Für die Differenz der Geschwindigkeiten zwischen den Phasen $U_{pq} = U_p - U_q$ wird zusätzlich eine algebraische Gleichung formuliert, die den Zusammenhang zwischen den Phasengeschwindigkeiten abbilden soll:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha_q U + \nabla \cdot \nabla [\alpha_q (1 - c_p) U_{pq}] = 0 \quad (9)$$

Wenn ein lokales Gleichgewicht angenommen wird, kann die Geschwindigkeit U_{pq} laut *Damián* (2013) mit dem folgendem Stoffgesetz dargestellt werden:

$$U_{pq} = U_{rc} (1 - \alpha_p)^a \quad (10)$$

Dabei sind U_{rc} und a Modellkonstanten und müssen für den jeweiligen Anwendungsfall kalibriert werden. U_{rc} kann als Geschwindigkeit einer Einzelblase interpretiert werden. Die Ermittlung der Geschwindigkeit kann dann über Modelle erfolgen. Eine ausführliche Beschreibung der anwendbaren Modelle ist in *Maninen et al.* (1996) zu finden.

3.4 Anwendbarkeit und Einschränkungen des ASM-Modells

Gegenüber der Euler-Euler-Methode hat das ASM-Modell den Vorteil, dass für beide Fluide nur ein Satz Erhaltungsgleichungen gelöst werden muss und somit der Rechenaufwand wesentlich geringer ist. Im Gegensatz zur VoF-Methode können die Auswirkungen von kleinskaligen Phänomenen wie Blasen oder Tropfen auf die Strömung mit dem ASM Modell modelliert werden. Das Modell stellt also eine gute Voraussetzung für die geplanten Untersuchungen der mehrskaligen Mehrphasenströmung dar. Da die Formulierung der Gleichungen

zu kalibrierende Modellkonstanten enthält, ist eine Kalibrierung und Validierung des Ansatzes für den konkreten Anwendungsfall unumgänglich.

3.5 Implementierung des ASM-Modells in OpenFOAM

Für die Simulation des Schleusenfüllprozesses soll die Toolbox OpenFOAM verwendet werden. Diese frei verfügbare C++ Bibliothek zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen eignet sich hier besonders, da im Gegensatz zu den meisten kommerziellen CFD-Produkten ein Eingriff in den bestehenden Code möglich ist. So kann der bereits bestehende VoF-Löser „interFoam“ als Grundlage für die Implementierung des ASM Modells verwendet werden. In Anlehnung an *Damián* (2013) wurde das VoF-Modell mit einer Gleichung für die Geschwindigkeit zwischen den Phasen erweitert. Umfassende Tests und Optimierungen des Codes sind geplant.

4 Labormodell für die geplante Validierung des numerischen Ansatzes

Für die Validierung des numerischen Modells wird in der Bundesanstalt für Wasserbau momentan ein Labormodell im Maßstab 1: 25 errichtet. Wie in Abbildung 2 zu sehen, wird die Schleusenkommer sowie das Füllsystem aus transparentem Acrylglas gebaut, um die auftretenden Effekte auch visuell beobachten und aufzeichnen zu können. Damit eine spätere Optimierung der Geometrie möglich ist, wird der Füllschacht als austauschbares Bauteil gestaltet (siehe Abbildung 2, links).

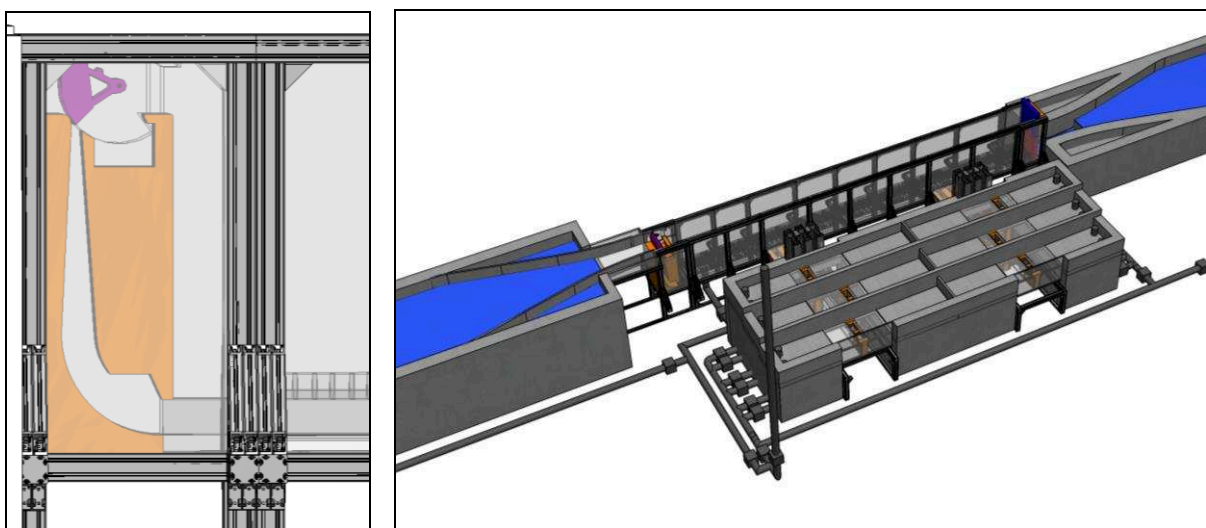


Abbildung 2: Geplantes Labormodell zur Validierung der numerischen Untersuchungen: links: Detailbild des Fallschachtes, rechts: Gesamtmodell

Für die Untersuchungen zum Lufteintrag wird das Modell mit einer speziellen Einrichtung zur radiometrischen Dichtemessung ausgestattet. Das Messsystem besteht aus einem Strahlungsemitter, welcher gezielt radioaktive Strahlung durch das Wasser schickt. Gegenüber dem Emitter misst ein Empfänger die ankommende Strahlung, wodurch die Dichte im durchstrahlten Gebiet ermittelt werden kann. Mit Hilfe dieser Messmethode lässt sich zwar nicht die einzelne Blase abbilden, aber der quantitative Luftgehalt in einem bestimmten Bereich kann ermittelt werden. Die in der Literatur (z. B. *Chanson & Manasseh* 2003, *Chanson*, 2008) häufig zur Messung des Lufteintrags verwendeten „tip conductivity probes“ erlauben nur eine sehr lokal beschränkte Ermittlung der einzelnen Luftblasen. Da für das System jedoch nicht die Information über die einzelne Blase, sondern die Auswirkungen des gesamten Lufteintrags auf den Schleusungsvorgang von Bedeutung ist, wurde hier ein anderes Messsystem gewählt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Um die Anwendbarkeit des von *Thorenz* (2012) vorgeschlagenen neuen Konzeptes für Schleusenfüllsystems zu überprüfen, soll ein numerischer Ansatz gefunden werden, mit dem Luft-Wasser-Strömungen mit Phänomenen unterschiedlicher Skalen abgebildet werden können. Das von *Damián* (2013) vorgeschlagene Extended-ASM-Modell, welches die VoF-Methode mit dem ASM-Modell kombiniert, stellt eine vielversprechende Grundlage für die zu untersuchende mehrskalige Mehrphasenströmung dar. Mit dem Modell kann theoretisch sowohl die große freie Wasseroberfläche in der Schleusenkammer, als auch der Transport der Blasen innerhalb des Füllsystems modelliert werden. Im Unterschied zur meist im Wasserbau verwendeten Volume-of-Fluid Methode ermöglicht das ASM-Modell verschiedene Phasengeschwindigkeiten.

Der Ansatz wurde in OpenFOAM implementiert und muss nun noch verbessert und für den zu untersuchenden Fall angepasst werden. Eine spätere Validierung mit Hilfe eines maßstäblichen Labormodells ist geplant.

Literatur

- Baylar, A., Hanbay, D., & Ozpolat, E. (2008): An expert system for predicting aeration performance of weirs by using ANFIS. *Expert Systems with Applications*, 35(3), 1214–1222.
- Bin, A. K. (1993): Gas entrainment by plunging liquid jets, *Chemical Engineering Science*, Vol. 48, no. 21, 3585-3630.
- Brattberg, T., & Chanson, H. (1999). Air Entrapment and Air Bubble Dispersion at Two-Dimensional Plunging Water Jets. *Chemical Engineering Science*, 53(24), 4113–4127.
- Chanson, H., Aoki, S., & Hoque, A. (2002). Similitude of air entrainment at vertical circular plunging jets. *Proceedings of ASME FEDSM'02* (pp. 1–6). Montreal, Kanada.
- Chanson, H., & Manasseh, R. (2003): Air Entrainment at a Circular Plunging Jet. Physical and Acoustic Characteristics. *Journal of Fluids Engineering*, Trans. ASME, Vol. 125.
- Chanson, H. (2008). Turbulent air–water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects. *Environmental Fluid Mechanics*, 9(2), 125–142.
- Damián, S. M. (2013): An Extended Mixture Model for the Simultaneous Treatment of Short and Long Scale Interfaces. Universidad Nacional del Litoral, Argentinien.
- Manninen, M., & Taivassalo, V. (1996). On the mixture model for multiphase flow. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus, Espoo, Finland.
- Partenscky, H.-W. (1986): *Binnenverkehrswasserbau: Schleusenanlagen*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Schulze, L. & Thorenz, C. (2013): Towards the CFD-modelling of multiscale-multiphase flow phenomena in a navigation lock. *Proceedings of SMART RIVERS 2013*, Liège, Belgien, Maastricht, Niederlande.
- Thorenz, C. (2012): Ein neuartiges Füllsystem für Sparschleusen großer Höhe. *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen: 35. Dresdner Wasserbaukolloquium 2012* „Staubauwerke – Planen, Bauen, Betreiben“.

Autoren:

Lydia Schulze
Dr.-Ing. Carsten Thorenz

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

Referat für Wasserbauwerke (W3)
Abteilung Wasserbau
Bundesanstalt für Wasserbau
Kussmaulstraße 17
76189 Karlsruhe

Institut für Wasserbau und THM
Fakultät Bauingenieurwesen
TU Dresden
01062 Dresden

Tel.: +49 721 5840
Fax: +49 721 4540
E-Mail: lydia.schulze@baw.de

Tel.: +49 351 463 34397
Fax: +49 351 463 37120
E-Mail: juergen.stamm@tu-dresden.de