

Development of an Application-Oriented Approach for Two-Phase Modelling in Hydraulic Engineering

Entwicklung eines anwendungsorientierten Ansatzes für die Modellierung von Zweiphasenströmungen im Wasserbau

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden

von

Lydia Schulze M. Eng.
geboren am 16.08.1987 in Nürnberg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm
Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing Jann Strybny
Hochschule Emden/Leer

Prof. Dr.sc.techn. Peter Rutschmann
Technische Universität München

Tag der Einreichung:

6. Juni 2017

Tag der Verteidigung:

8. Januar 2018

Summary

In this thesis a numerical approach for the modelling of air transport and degassing processes within turbulent free-surface flows is developed, implemented and tested.

Aiming to find an approach to enable the investigation of the near-field flows at hydraulic structures including air-water intermixing processes, the applicability of existent mathematical approaches was analysed and evaluated. A suitable approach has to be able to reproduce multiple two-phase phenomena, which occur during simultaneous physical processes. Here the capturing of processes with various interface scales provides a challenge. The model has to reproduce the large stretched free surface accurately, the interaction between the entrained air bubbles and the surrounding water body as well as the detrainment process at the free surface. The flow under consideration is strongly influenced by turbulence. Therefore, a suitable turbulence model to be coupled with the two-phase approach has to be found. As the above mentioned requirements cannot be met by any of the existent two-phase models, a new model was developed.

This approach extends a mixture model with a new method of physically modelling the bubble rising process. Three different variants for the calculation of the bubble rising velocity were implemented into the developed model. This allows the model to capture the effect of rising bubbles, even if they are not directly resolved by the grid. Since the model is formulated for incompressible flow, the compression of the air bubbles below the water surface cannot directly be accounted for. In order to consider the influence of the bubble size to the bubble rising velocity an extension for “pseudo-compressibility” was included. With this additional feature the bubble diameter, which is used to calculate the bubble rising velocity, is adapted according to the surrounding water pressure.

At large-scale free surfaces the model operates as a volume of fluid approach. To allow a sharp representation of the interface between the phases, which is modelled by a scalar transport equation, higher order discretisation schemes can be applied. In this study various Total-Variation-Diminishing schemes were tested regarding stability and accuracy with reference to hydraulic structure flow simulations. In addition, a flux-corrected transport algorithm was introduced to ensure the boundedness of the solution. With this method, the necessity for complex geometrical reconstruction methods or methods with artificial compression at the interface can be avoided.

The formulation of the model is based on the finite volume method formulated for arbitrary structured meshes. The C++ library OpenFOAM was used as framework for the implementation of the model. Relying on the available structure of the framework the parallelization of the solver is inherent. Furthermore, the available sets of discretisation schemes and matrix solvers are directly applicable with the implemented model. The framework also enables the coupling with a variety of turbulence models. As the common Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) turbulence models are not specifically adapted for two-phase flows, the interaction between the bubbles and the velocity fluctuations of the flow field cannot be captured. As a consequence the transport capacity of the flow is reduced and the bubbles of the mixture model with RANS turbulence model rise too fast. To counteract this, the developed mixture model is extended with an additional term in the transport equation for the gaseous phase. The term produces additional diffusion in the bubbly zone dependent

on the local turbulent viscosity of the flow. As a consequence bubble rising in turbulent flow is decelerated.

Simple test cases show that the developed solver meets the defined demands concerning multiscale two-phase flow. Comparisons of analytical and experimental results demonstrate the functionality and the accuracy of the implemented model. Particularly the influence of grid resolution, discretisation schemes and bubble diameter is tested. Furthermore, the influence of the pseudo-compressibility dependent on the water depth is presented.

With two application-oriented test cases, the utilisation of the new model to real-world engineering applications is presented. On the one hand the efficiency and the performance of the solver are proven to be suitable for large parallel computations. On the other hand the examples show how the solver can be applied to answer current research questions. A comparison with measurement results from a physical model reviews the comparability with reference to the bubble transport with the flow. Moreover, results from various turbulence models are compared and evaluated. This comparison illustrates the necessity for the extension of the transport equation for the gaseous phase with the additional diffusion term when RANS turbulence models are applied.

With the means of the solver, a vast amount of information about the effect of entrained air in the nearfield flow of hydraulic structures can be gained. The output could be used for future structure design and operation optimization. Particularly in the field of lock design and optimisation the new approach enables new insights: with the model, the influence of defined air content on the forces on the ship during the filling process can be tested for a head-filling lock system.

The test cases also reveal limitations of the model applicability: the air entrainment process due to a falling water jet cannot be represented by the model. As this process is relevant for many different questions in hydraulic engineering, more research is required in this field. Additionally the modelling of turbulences is of large importance for many applications. Thus, validation test cases should test the applicability of the current implementation.

Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wurde ein numerischer Ansatz für die Modellierung von Luftetrags- und Transportprozessen für turbulente Strömungen mit freier Wasseroberfläche entwickelt, implementiert und getestet.

Mit dem Ziel das Nahfeld von Wasserbauwerken mit freien Wasseroberflächen sowie mit Luft-Wasser-Durchmischungsprozessen untersuchen zu können, wurde die Anwendbarkeit bestehender Ansätze analysiert und bewertet. Ein geeigneter Ansatz muss mehrere Zweiphasen-Prozesse abbilden können, die bei den gleichzeitig auftretenden, verschiedenen physikalischen Prozessen entstehen. Eine Herausforderung stellen dabei vor allem die unterschiedlichen Größenskalen der Grenzflächen dar. Das Modell muss sowohl die großflächige freie Wasseroberfläche mit ausreichender Genauigkeit reproduzieren, als auch die Interaktion der in Form von Blasen eingetragenen Luft mit dem umgebenden Wasser, sowie das Entgasen der Luft an der freien Wasseroberfläche berücksichtigen. Die betrachteten Strömungen werden außerdem stark von der auftretenden Turbulenz beeinflusst. Daher muss ein geeignetes Turbulenzmodell für die Kopplung mit dem Zweiphasen-Ansatz gefunden werden. Da die genannten Anforderungen von bestehenden Modellen nicht erfüllt werden, wurde ein neuer Ansatz entwickelt.

Der neue Ansatz erweitert ein Mixture-Modell mit einem neuen Ansatz für die physikalische Blasenauftiegsmodellierung. Im hier entwickelten Ansatz wurden drei verschiedene Varianten für die Berechnung der Blasenauftiegs geschwindigkeit implementiert. Das entwickelte Modell ist in der Lage auch den Effekt von aufsteigenden Luftblasen auf die Strömung zu berücksichtigen, die nicht durch das Gitter direkt abgebildet werden können. Da das Modell für inkompressible Phasen formuliert ist, kann die Kompression der Luftblasen unterhalb der Wasseroberfläche nicht direkt berücksichtigt werden. Um dennoch den Einfluss der Blasengröße auf die Aufstiegsgeschwindigkeit untersuchen zu können, wurde das Blasenauftiegsmodell mit einer „Pseudo-Kompression“ erweitert. Mit Hilfe dieser Zusatzfunktion wird der Blasendurchmesser, der für die Berechnung der Aufstiegsgeschwindigkeit der Blase verwendet wird, an den umgebenden Wasserdruck angepasst.

Im Bereich großflächiger freier Wasseroberflächen funktioniert das Modell wie ein Volume-of-Fluid Ansatz. Damit die freie Wasseroberfläche mit Hilfe der skalaren Volume-Fraction-Transportgleichung als möglichst klare Grenzfläche zwischen den zwei Phasen abgebildet wird, können Diskretisierungsschemata höherer Ordnung eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Total-Variation-Diminishing Schemata auf ihre Stabilität und Genauigkeit in Bezug auf die Anwendung bei wasserbaulichen Fragestellungen getestet und evaluiert. Zusätzlich wurde für die Lösung der skalaren Transportgleichung ein Flux-Corrected-Transport-Algorithmus eingesetzt, der eine Lösung ermöglicht, die definierte Grenzwerte nicht unter- oder überschreitet. Dadurch können komplexe geometrische Rekonstruktionsmethoden oder Methoden mit künstlicher Kompression für die Schärfung der Oberflächen vermieden werden.

Die Formulierung des Modells basiert auf der Finiten-Volumen-Methode für unstrukturierte Gitter. Die C++ Bibliothek OpenFOAM diente als Framework für die Implementierung des Löser. Dadurch konnten die inhärente Parallelisierung sowie die vorhandenen Diskretisierungsschemata und

Gleichungslöser für die Anwendungen genutzt werden. Auch die Kopplung mit einer Vielzahl an Turbulenzmodellen wird durch das Framework ermöglicht. Da die gängigen Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Turbulenzmodelle (RANS-Turbulenzmodelle) nicht speziell für die Modellierung von Zweiphasenströmungen angepasst sind, kann die Interaktion zwischen dem Blasen und den Geschwindigkeitsschwankungen der Strömung nicht abgebildet werden. Dadurch verringert sich die Transportkapazität der turbulenten Strömung und die Blasen im Mixture-Modell mit RANS-Turbulenzmodell entweichen zu schnell. Um dem entgegen zu wirken wird das Mixture-Modell mit einem zusätzlichen Term in der Transportgleichung für die Gasphase erweitert. Dieser sorgt in Abhängigkeit von der lokal berechneten turbulenten Viskosität für Eintrag von zusätzlicher Diffusion und verhindert damit den zu schnellen Aufstieg von Blasen in turbulenter Strömung.

Zwei einfache Testfälle zeigen, dass die definierten Anforderungen an den Zweiphasenlöser erfüllt werden können. Vergleiche mit analytischen und experimentellen Daten dienen der Überprüfung der Funktionalität sowie der Genauigkeit des implementierten Modells. Insbesondere wird der Einfluss von Gitterauflösung, Diskretisierungsschemata und Blasendurchmesser getestet. Außerdem wird der Einfluss der Pseudo-Kompressibilität in Abhängigkeit von der Wassertiefe dargestellt.

Die Anwendbarkeit des Löser für Untersuchungen im Nahbereich von Bauwerken wird anhand von zwei anwendungsorientierten Fallstudien untersucht. Zum einen wird die Effizienz und Leistungsstärke des Löser bei großen parallelen Rechnungen analysiert, zum anderen zeigen die Fallstudien mögliche Einsatzbereiche des Löser für die Beantwortung von aktuellen Fragestellungen. Der Vergleich mit Messwerten aus einem gegenständlichen Modell überprüft die Übereinstimmung für den Transport des Luftgehaltes mit der Strömung. Außerdem werden die Ergebnisse von verschiedenen Turbulenzmodellen verglichen und evaluiert. Dieser Vergleich verdeutlicht die Notwendigkeit der Erweiterung der Transportgleichung für die Gasphase mit dem Diffusionsterm beim Einsatz von RANS-Turbulenzmodellen.

Mit Hilfe des neuen Löser kann eine Vielzahl von Informationen über den Einfluss von eingemischter Luft auf die Strömung im Nahbereich von Wasserbauwerken gewonnen werden. Diese können für die Optimierung von bestehenden und zukünftigen Bauwerken genutzt werden könnten. Insbesondere im Bereich der Schleusenplanung und -optimierung ermöglicht der entwickelte Ansatz neue Erkenntnisse: so kann mit Hilfe des neuen Ansatzes beispielsweise getestet werden, welchen Einfluss ein definierter Luftgehalt in einem Vor-Kopf-Füllsystem auf die Schiffskräfte während der Schleusung hat.

Anhand der Fallstudien zeigen sich auch die Grenzen des Modells: der Lufteinmischungsprozess durch einen fallenden Wasserstrahl kann mit der entwickelten Methodik nicht abgebildet werden. Da dieser für die vollständige Modellierung von vielen Fragestellungen notwendig ist, besteht hier weiterer Forschungsbedarf. Außerdem ist in vielen Anwendungsfällen die Turbulenzmodellierung von großer Bedeutung. Daher sollte mit Hilfe von Validierungsfällen überprüft werden, ob die Implementierung für die Anwendung geeignet ist.