

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Conference Paper, Published Version

## Heß, Max; Schneefeld, Carla Vollweiler, Tilo; Carstensen, Dirk 3d-CFD-Modelle – Werkzeuge zur Bemessung und Optimierung von Anlagen im Wasserbau

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/20.500.11970/103293>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Heß, Max; Schneefeld, Carla Vollweiler, Tilo; Carstensen, Dirk (2017): 3d-CFD-Modelle – Werkzeuge zur Bemessung und Optimierung von Anlagen im Wasserbau. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Bemessung im Wasserbau - Klimaanpassung, Untersuchungen, Regeln, Planung, Ausführung. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 58. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 383-392.

### 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.



## **3d-CFD-Modelle – Werkzeuge zur Bemessung und Optimierung von Anlagen im Wasserbau**

Max Heß  
Carla Schneefeld  
Tilo Vollweiler  
Dirk Carstensen

Die Anwendung dreidimensionaler hydrodynamisch-numerischer Simulationen im wasserbaulichen Versuchswesen rückt, durch die in den letzten Jahrzehnten rasant angestiegene Leistungsfähigkeit von Großrechneranlagen, immer mehr in den Vordergrund. Damit einhergehend können die Untersuchungsgebiete in einem numerischen Modell in sehr viel feinere Kontrollvolumina aufgelöst werden, wodurch die Genauigkeit der berechneten Lösungen deutlich zunimmt. Auch die Umsetzung großräumiger Modellgebiete, wie zum Beispiel die generelle Untersuchung von gesamten Hochwasserentlastungsanlagen, kann so mit einem einzigen Modell abgedeckt werden. Zudem kann mit Hilfe numerischer Modelle eine Vielzahl an Modell-Varianten mit relativ geringem Aufwand untersucht und so sehr effizient eine optimierte Lösung gefunden werden. Dieses Vorgehen kann bereits bei der Entwurfsplanung etwaiger Anlagen Berücksichtigung finden.

Neben dem Zugang zu einer Großrechneranlage ist tiefgreifendes Fachwissen, eine fundierte Datengrundlage und der sichere Umgang mit der jeweiligen CFD-Software Voraussetzung für realitätsnahe Berechnungsergebnisse. Wie in jedem Modell, ob physikalisch oder numerisch, gibt es Unschärfen bei den Untersuchungsergebnissen, welche unter anderem durch eventuelle Maßstabeffekte bei der Anwendung von Modellgesetzten beziehungsweise, in der Numerik, dem Einsatz bestimmter Lösungsverfahren bedingt sein können.

Anhand ausgewählter Beispiele, von der Modellierung von Fischaufstiegsanlagen bis hin zum Nachweis von Kavitation an einem unterströmten Schütz, wird die Vielseitigkeit und Flexibilität von 3d-HN-Modellen verdeutlicht. Zudem werden die derzeitigen Möglichkeiten und Grenzen dreidimensionaler numerischer Modellierung aufgezeigt.

Stichworte: CFD-Simulation, 3d-HN-Modellierung, OpenFOAM

### **1 Einleitung**

Anwendungen mehrdimensionaler hydrodynamisch-numerischer (HN) Simulationen sind im wasserbaulichen Versuchswesen in den letzten Jahrzehnten infor-

ge des rasanten Anstieges der Systemleistung von Großrechneranlagen immer häufiger anzutreffen.

Bei der Ermittlung von Überflutungsflächen von Fließgewässern im Hochwasserfall findet die tiefengemittelte, numerische Modellierung (2d-HN-Modellierung) bereits seit vielen Jahren Anwendung und beschleunigt so den Prozess der Lösungsfindung. Während bei der 2d-HN-Modellierung sehr großräumige Untersuchungsgebiete abgedeckt werden, können dabei die einzelnen Bauwerke und Anlagen i.d.R. nicht detailliert abgebildet werden. Für die Untersuchung einzelner wasserbaulicher Anlagen kann heutzutage, neben der physikalischen Modellierung, auch auf dreidimensionale hydrodynamisch-numerische Simulation zurückgegriffen werden, womit sehr effizient Lösungen im Rahmen der baulichen Gestaltung sowie die Steuerung in der praktischen Anwendung erarbeitet werden können.

Bei der gegenständlichen bzw. physikalischen oder numerischen Modellierung treten in den Untersuchungsergebnissen Unschärfen auf. Diese sind u.a. auf eventuelle Maßstabeffekte bei der Anwendung von Modellgesetzten beziehungsweise, in der Numerik, dem Einsatz bestimmter Lösungsverfahren zurückzuführen. Durch die richtige Anwendung numerischer Verfahren können diese Unschärfen für die jeweiligen Untersuchungsgebiete auf ein Minimum reduziert und so aussagekräftige Berechnungsergebnisse erzeugt werden. Im Nachgang ist es vom hydraulischen Fachwissen sowie den Kenntnissen der Bearbeiterin/des Bearbeiters im Postprocessing abhängig, Darstellungen zu erstellen, die eine richtige Deutung der Ergebnisse zulassen.

## **2 Grundlagen der 3d-CFD-Numerik**

Neben den kommerziell verfügbaren CFD-Software-Paketen, wie StarCCM+ oder ANSYS Fluent, gibt es auch kostenfreie Open Source Software, beispielsweise OpenFOAM. Unabhängig von der programmiertechnischen Umsetzung dieser Programme, basieren die Lösungsverfahren in der Regel auf den Navier-Stokes-Gleichungen, welche die Bewegung von newtonschen Fluiden vollständig beschreiben. Die numerischen Modellgebiete für derartige Untersuchungen werden grundsätzlich für die Anwendung der Finite-Volumen-Methode in eine definierte Anzahl an Kontrollvolumina unterteilt. Für jedes dieser Kontrollvolumen werden die Erhaltungsgleichungen gelöst und so die Bewegung des Fluids durch den Raum ermittelt. Mit der Anzahl der Kontrollvolumina in einem Modellgebiet steigt auch die Genauigkeit der ermittelten Lösung. Durch die jedoch begrenzte Anzahl an möglichen Kontrollvolumina, bedingt durch die endlichen Rechnerressourcen, treten in der Anwendung Probleme auf, welche

grundsätzlich mittels zusätzlicher mathematischer Ansätze gelöst werden können.

## 2.1 Numerische Lösungsmethoden

Die gängigen CFD-Bibliotheken bieten eine Auswahl von variierenden Lösern an, welche anhand ihres mathematischen sowie numerischen Konzepts i.d.R. für einen bestimmten Anwendungsfall optimiert sind. Für wasserbauliche Anwendungsfälle bietet OpenFOAM Löser für Ein- oder Zwei-Phasen-Strömungsmodelle sowie Lösungsverfahren mit integriertem Phasen-Wechsel an.

Bei Zwei-Phasen-Strömungsmodellen muss im wasserbaulichen Versuchswesen grundsätzlich auf die Abbildung der Phasengrenze, also der Wasserspiegeloberfläche, Rücksicht genommen werden. Für Anwendungsfälle mit freier Oberfläche ohne Durchmischung löst das Volume of Fluid Verfahren (VOF) einen zusätzlichen Term für die Phasenkonzentration, um die Phasengrenze abbilden zu können. Dabei werden Luftblasen bzw. Wassertropfen, deren Größe die Abmessungen der anstehenden Zelle unterschreitet, nicht erfasst. Sollen Durchmischungen, beispielsweise kleine Luftblasen im Wasser, berechnet werden, stehen andere Methoden nach Euler oder Euler-Lagrange zur Verfügung. In diesem Zusammenhang ist beim Aufsetzen einer Simulation die richtige Wahl des Lösungsverfahrens von entscheidender Wichtigkeit.

## 2.2 Turbulenz in der 3d-Numerik

Bedingt durch die diskrete Aufteilung des Untersuchungsgebietes in Kontrollvolumina können turbulente Strömungen nur begrenzt abgebildet werden und müssen grundsätzlich über mathematische Ansätze formuliert werden. Man unterscheidet dabei in Reynolds-Averaged Stress (RAS) Modelle und Large-Eddy Simulation (LES) Modelle. Während bei den RAS-Modellen die komplette turbulente Strömung eine zeitliche Mittelung erfährt, werden mit der LES-Modellierung die turbulenten Wirbel, soweit die Gitterauflösung es erlaubt, direkt numerisch gelöst. Eine Kombination beider Verfahren bietet die Detached-Eddy Simulation (DES). Dabei werden nur die für das Berechnungsgitter zu feinen Wirbel über die RAS-Modellierung abgebildet.

Der Rechenaufwand erhöht sich durch die Anwendung von LES bzw. DES gegenüber der reinen RAS-Modellierung, jedoch spielt die Ausbildung des instationären, wirbelbehafteten Fließzustands, welcher die Turbulenz charakterisiert, bei Untersuchungen an wasserbaulichen Anlagen meist eine nicht zu vernachlässigende Rolle. Demnach ist die Nutzung eines LES bzw. DES-Verfahrens in der 3d-HN-Modellierung für wasserbauliche Anwendungen sehr zu empfehlen.

### 3 3d-HN-Modellierung mit OpenFOAM

Nachfolgend werden die Anwendbarkeit und die Grenzen der dreidimensionalen, hydrodynamisch-numerischen Modellierung mit OpenFOAM anhand von ausgewählten Beispielen dargelegt.

#### 3.1 Untersuchungen zu Wellenauflauf und Wellenumlenkung

Die Bedeutung von Talsperren (TS) und Pumpspeicherkraftwerken (PSW) als effiziente und nachhaltige Wasser- und Energiespeicher ist im Zeitalter der Klimaänderung und der Energiewende in Deutschland als unstrittig anzusehen. Die Versorgungssicherheit mit Trink- und Brauchwasser, die Gewährleistung der Hochwassersicherheit für Unterlieger sowie der Ertrag an elektrischer Energie einer solchen Anlage hängen wesentlich vom speicherbaren Wasservolumen ab. Aus den genannten Gründen stellen gegenwärtig für die meisten TS und PSW die Erweiterung der Becken bzw. eine Freibordoptimierung zur Vergrößerung der Speicherlamelle anzustrebende Maßnahmen dar.

Ausgehend von den Bemessungsregeln gemäß DIN 19700 stellen der Windstau und der Sicherheitszuschlag eher marginale bzw. fixe Parameter in der Bestimmung des Freibords dar. Demnach muss dem Wellenauflauf im Zusammenhang mit den geschilderten Fragestellungen und Problemen ein besonderes Augenmerk geschenkt werden.

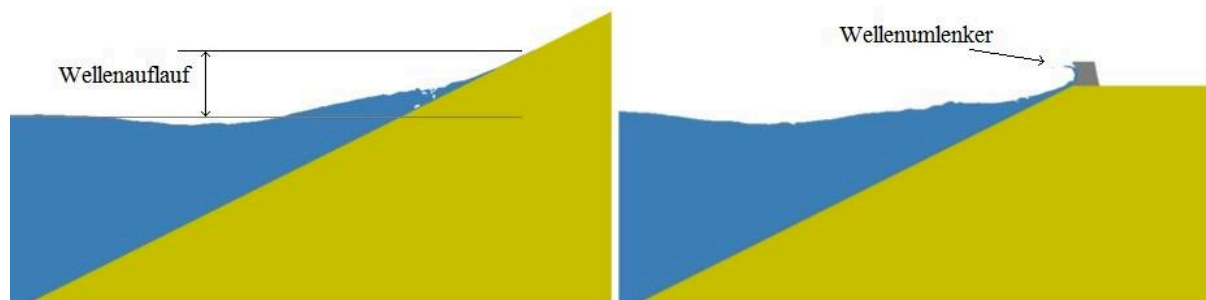


Abbildung 1 links: Ermittlung des Wellenauflaufs an einer „unendlichen“ Böschung, rechts: Funktionsuntersuchung eines Wellenumlenkers

Mit Hilfe der CFD-Bibliothek OpenFOAM können die Wellenauflaufhöhen für beliebige Szenarien an einer Böschung jedweder geometrischer Ausbildung simuliert werden. Zusätzlich zur Bestimmung des Wellenauflaufs können sehr effizient Wellenumlenker auf ihre Funktionalität überprüft werden sowie die, durch die Umlenkung, auftretenden Kräfte auf das Umlenkbauteil numerisch erfasst werden. Über spezielle Randbedingungen, welche für die Generierung regulärer Wellen sowie irregulärer Wellenspektren konzipiert sind, wird die Wasserspiegelauslenkung im Einlassbereich gesteuert. Mit der Erfassung der maximalen Wasserspiegellagen im Bereich der Böschung kann über den simu-

lierten Zeitraum der Wellenauflauf für jede Welle ermittelt werden. Wird im Ergebnis der Berechnungen der Freibord nicht eingehalten, kann über konstruktive Maßnahmen, wie das Anbringen eines Wellenumlenkers, eine optimierte Lösung für den jeweiligen Standort gefunden werden.

### 3.2 Modellierung von Hochwasserentlastungsanlagen

Mit den heutzutage zur Verfügung stehenden Rechnerkapazitäten in Form von Großrechneranlagen mit leistungsstarken Prozessoren und großen Arbeitsspeichern besteht die Möglichkeit, die Modellbereiche von 3d-HN-Simulationen deutlich zu vergrößern. So können beispielsweise komplette Hochwasserentlastungsanlagen mit nur einem Modell abgedeckt werden. Dabei ist eine sehr genaue und dennoch effiziente Diskretisierung des Modellgebiets von Nöten, um im Ergebnis die Strömungssituation in den einzelnen Teilbereichen einer solchen Anlage realitätsnah abbilden zu können. Die Anzahl der Kontrollvolumina innerhalb eines Modells kann durchaus zweistellige Millionenwerte erreichen. Bei derart umfänglichen Simulationen sollten mehrere hundert Rechenkerne zur Verfügung stehen, um die Rechenzeiten auf wenige Tage drosseln zu können.

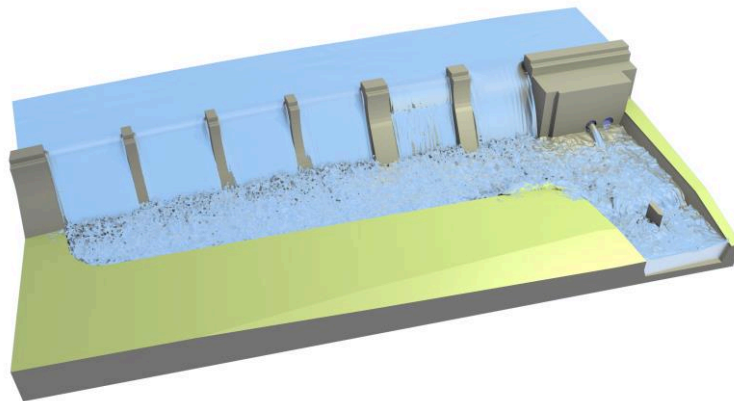


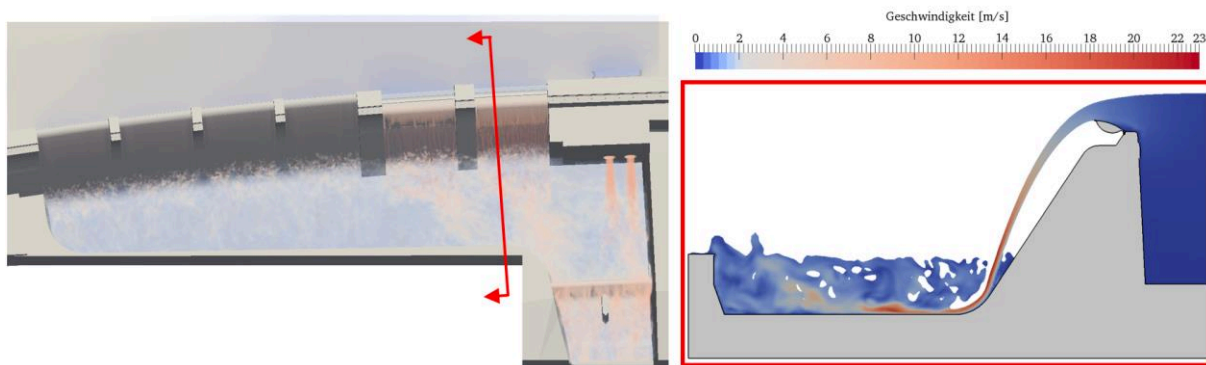
Abbildung 2 Hochwasserentlastungsanlage der TS Pirk mit Wasserspiegellage im Belastungsfall

Die Talsperre (TS) Pirk erlitt, bedingt durch das Hochwasserereignis im Juni 2013, Schäden an der Tosbeckenrandmauer sowie massive Kolkbildung an deren Rückseite. Im Auftrag der Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen wurde die Anlage vollständig mit OpenFOAM modelliert (vgl. Abbildung 2).

Das aus vier festen Wehrüberfällen, zwei Fischbauchklappen, zwei Grundabläsen sowie dem Tosbecken und der Überleitung in den Flusslauf der Weißen Elster bestehende Modell wurde bei der Diskretisierung in ca. 13 Mio. Gitterzellen unterteilt. Dabei variierte die Zellgröße von 1 m je Raumrichtung im Bereich des Luftkörpers bis hin zu 2 cm an den Überfallkanten. Die Gittererstellung stellt grundsätzlich die zeitintensivste Arbeitsphase beim Aufsetzen einer nume-

rischen Simulation dar und sollte sehr bedacht durchgeführt werden. Dabei spielt die, auf Grundlage ausreichenden Fachwissens, vorzunehmende Abschätzung der zu erwartenden Strömungssituation eine entscheidende Rolle, um effiziente, ortsabhängige Gitterverfeinerungen zu generieren.

Reibungseffekte, bedingt durch Bauwerksoberflächen, können in der numerischen Simulation durch spezielle Wandfunktionen modelliert werden. Dies wird in OpenFOAM über ein rein mathematisches Vorgehen umgesetzt und erhöht so den Rechenaufwand. Liegt das Interesse im Hinblick auf die Berechnungsergebnisse eher im wandfernen Bereich oder ist die Diskretisierung in Wandnähe sehr fein gewählt, können an Bauwerks- oder Sohloberflächen allein durch die Erzeugung sehr flacher Zellen, sogenannte Layer, die Wandreibungseffekte ausreichend genau abgebildet werden.



**Abbildung 3** links: Volumenrendering der Fließgeschwindigkeitsverteilung im Modell der Talsperre Pirk; rechts: Schnitt durch Damm und Tosbecken am sechsten Wehrfeld, Geschwindigkeitsverteilung farblich dargestellt

Bis zum Erreichen eines quasi-stationären Fließzustands bei der Simulation eines Hochwasserlastfalls der TS Pirk (siehe Abbildung 3) war eine Simulationszeit von 70 Sekunden nötig. Die dafür benötigte reale Rechenzeit auf 120 Prozessoren betrug etwa 144 Stunden.

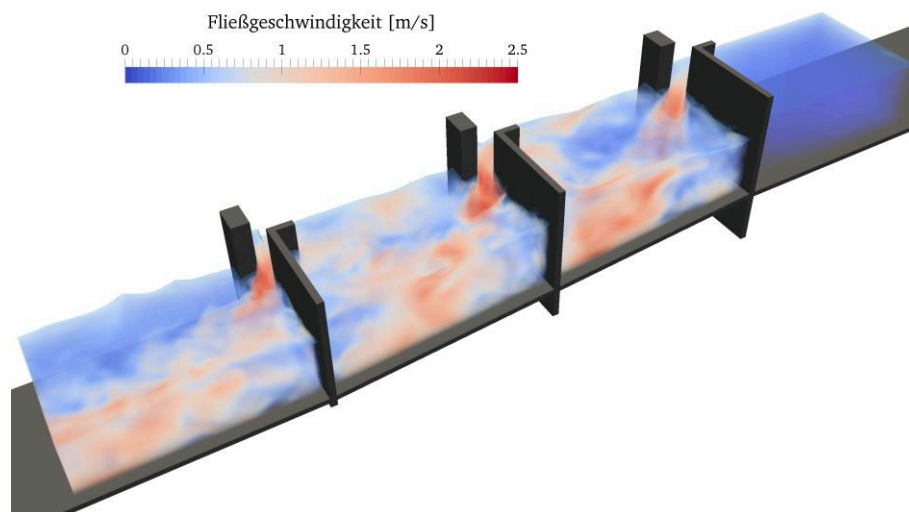
Mit Hilfe des 3d-HN-Modells konnten u.a. mehrere Varianten mit variierenden Öffnungsgraden der Regelorgane durchgeführt werden und so eine Empfehlung für eine optimierte Steuerung der gesamten Anlage formuliert werden.

### 3.3 Hydraulische Optimierung von Fischaufstiegsanlagen

Zur Optimierung von Fischaufstiegsanlagen können numerische Simulationen mit Hilfe von Zwei-Phasen-Strömungsmodellen ein wertvolles Tool darstellen. Bedingt durch die Strömungsverhältnisse in einer solchen Anlage ist kein großräumiger Lufteintrag in den Wasserkörper zu erwarten, wodurch sich zur Abbildung der Phasenübergänge das VOF-Verfahren anbietet. Zusätzlich empfiehlt sich, die turbulenten Strömungen mittels eines LES- oder DES-Modells zu be-

rücksichtigen. Bauliche Variationen der Becken können ebenso wie Randbedingungen, beispielsweise für Wasserstände, mit geringem Aufwand variiert werden.

In Abhängigkeit von den potenziell aufsteigenden Fischarten darf eine kritische Anströmgeschwindigkeit sowie eine gewisse Länge der zu überwindenden Strecke nicht überschritten werden, da sonst die Gefahr besteht, dass die Fische erschöpfen bevor sie das Oberwasser erreicht haben. In der Literatur werden Grenzwerte für maximale Fließgeschwindigkeiten in den Durchlässen von beckenartigen Fischaufstiegsanlagen angegeben. Diese variieren in Abhängigkeit von den Fischarten und dem Gesamthöhenunterschied der Wasserstände von Ober- und Unterwasser zwischen 1,4 und 2,2 m/s.



**Abbildung 4** 3d-HN-Untersuchungen an einer Fischaufstiegsanlage (Schlitzpass) – farbliche Darstellung der Fließgeschwindigkeiten im Wasserkörper

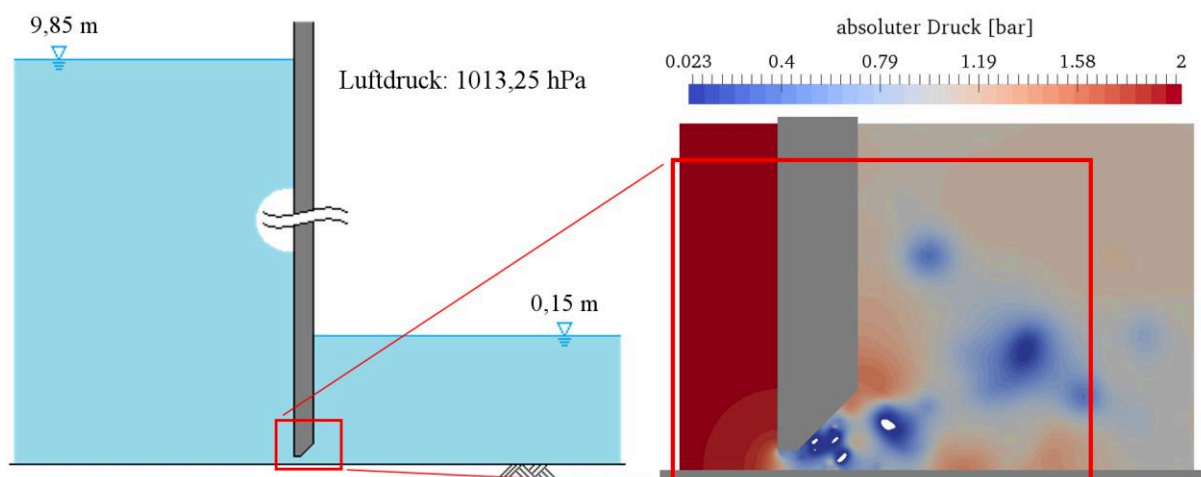
Im Ergebnis einer 3d-HN-Modellierung für einen Schlitzpass ergaben sich für ein Szenario (vgl. Abbildung 4), bedingt durch eine Differenz der Wasserspiegellagen von ca. 20 cm zwischen den einzelnen Becken, zeitlich gemittelte Fließgeschwindigkeiten von 1,77 m/s an den Schlitzpässen. Weiterhin konnten maximale Fließgeschwindigkeiten von ca. 2,5 m/s, verursacht durch das turbulente Strömungsverhalten beim Einströmen des Wassers durch den Schlitz in ein Becken, nachgewiesen werden. Diese waren jedoch örtlich sehr begrenzt und traten nur punktuell über einen sehr kurzen Zeitraum auf.

Mit Hilfe ausreichender Rechnerleistung können Berechnungen, vor allem für kleinräumige Modelle, sehr effizient parallel ausgeführt werden. So besteht die Möglichkeit, eine Vielzahl an Modellvarianten innerhalb kurzer Zeit und mit geringem Aufwand zu untersuchen.



### 3.4 Nachweis von Kavitation mittels eines numerischen Phasenwechsel-Lösungsverfahrens

Bei der Steuerung von Regelorganen an wasserbaulichen Anlagen, wie zum Beispiel den Grundablässen einer Hochwasserentlastungsanlage, kann bei unzureichender Belüftung in Verbindung mit großen Druckhöhen Kavitation auftreten. Bedingt durch sehr hohe Fließgeschwindigkeiten in einer turbulenten Strömung entstehen Bereiche mit sehr geringem Druck. Sinkt dieser Druck unter den Dampfdruck des Wassers, bilden sich Dampfblasen, welche bedingt durch den Wechsel des Aggregatzustandes mehr Raum benötigen. Sofern der Wasserdruck wieder ansteigt fallen die Dampfblasen zusammen. Der zuvor eingenommene Raum wird schlagartig kleiner und das umliegende Wasser strömt implosionsartig zurück. Dabei entstehen enorme Druckstöße, welche im Nahfeld von Bauteilen Schäden an diesen verursachen können.



**Abbildung 1:** links: Skizze Modellaufbau, rechts: Nachweis von Kavitation durch 3d-HN-Modellierung - Druckfeld incl. Dampfblasen

In physikalischen Modellversuchen, bei denen ein Modellmaßstab zur Verkleinerung der realen Größen unter Anwendung der Modellgesetze nach Froude oder Euler gewählt wurde, kann Kavitation grundsätzlich nicht realitätsgetreu nachgewiesen werden. Um die Verzerrungen, die bedingt durch den gewählten Modellmaßstab auftreten, zu umgehen, müssten hierfür physikalische Modelle im Maßstab 1 : 1 umgesetzt werden. Beim Nachweis von Kavitation mittels 3d-HN-Modellierung gibt es keine Verfälschung durch Maßstabeffekte, da das Modell ohne Mehraufwand im Naturmaßstab abgebildet werden kann.

Bei einer Untersuchung eines unterströmten Schützes wurde der Dampfdruck des Wassers mit 23 hPa festgelegt und mittels OpenFOAM der Nachweis von Kavitation geführt. Durch die enorme Druckhöhe zusammen mit dem geringen Öffnungsgrad des Schützes von 5 mm wurden Fließgeschwindigkeiten bis

22 m/s berechnet. Mit Hilfe einer zeitlich sehr präzisen Erfassung (im Tausendstel-Sekunden Bereich) der Strömungssituation konnten selbst die durch die Implosion entstehenden Druckstöße modelliert werden.

Bedingt durch den Phasenwechsel, welcher mathematisch in den zu lösenden Gleichungssystemen integriert ist, werden die numerischen Berechnungen aufwendiger, wodurch sich längere Rechenzeiten ergeben. Um die Rechenzeiten solcher Untersuchungen auf akzeptierbare Zeiträume zu reduzieren, sollten die Modelle in ihrer räumlichen Abmessung reduziert werden. So sollte der Kavitationsnachweis nicht im großräumigen Modell einer Gesamtanlage untersucht werden, sondern lediglich der Modellausschnitt, in welchem die Kavitationseffekte zu erwarten sind, modelltechnisch umgesetzt werden. Bei bestimmten Anwendungsfällen bietet es sich an, das Untersuchungsgebiet als quasi-zweidimensionales Modell, z.B. als eine Scheibe mit geringer Breite, aufzusetzen.

Während bei Simulationen ohne Phasenwechsel grundsätzlich nur die Druckdifferenzen innerhalb des Modellgebiets entscheidend sind, müssen beim Aufsetzen von Kavitationsuntersuchungen die tatsächlichen Druckverhältnisse sehr genau eingehalten werden. Dies muss über die Randbedingungen des Modellgebiets umgesetzt werden und ist maßgeblich für den Erfolg der Berechnung verantwortlich. Werden dort falsche Druckverhältnisse definiert, können diese im Ergebnis der Simulation meist nicht aufgedeckt werden, weshalb es zur Entstehung von falschen, aber für die gesetzten Randbedingungen durchaus realistischen Berechnungsergebnissen kommen kann.

## 4 Fazit

Mit dem Zuwachs an Rechenleistung können die Untersuchungsgebiete in einem mehrdimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modell in sehr viel feinere Kontrollvolumina aufgelöst werden als dies noch vor einigen Jahren möglich war. Dadurch kann auch die Genauigkeit der berechneten Lösungen deutlich gesteigert werden. Auch großräumige Modellgebiete sowie eine Vielzahl an Modell-Varianten können mit relativ geringem Aufwand untersucht und somit sehr effizient optimierte Lösungen gefunden werden. Dieses Vorgehen kann bereits bei der Entwurfsplanung etwaiger Anlagen Berücksichtigung finden. Im Hinblick auf kommende bauliche und/oder hydraulische Veränderungen können numerische Modelle problemlos archiviert werden und stehen so für mögliche zukünftige Untersuchungen zur Verfügung.

3d-HN-Modellierung im wasserbaulichen Versuchswesen bezieht sich derzeit hauptsächlich auf Lösungsmethoden für Zwei-Phasen-Strömungen in einem

Modellgebiet. Mit diesen Verfahren lässt sich ein großes Spektrum an hydrodynamischen Untersuchungen abdecken. Für weitere Anwendungsfälle stehen, abhängig von der verwendeten Software, zusätzliche Lösungsmethoden zur Verfügung. Zum Nachweis von Kavitationseffekten an hydraulischen Armaturen können Löser mit integriertem Phasenwechsel zukünftig vermehrt zum Einsatz kommen.

Zur Produktion möglichst wahrheitsgetreuer Simulationen ist der Diskretisierung eines Modellgebiets besonderes Augenmerk zu schenken, da die Berechnungsgitter entscheidenden Einfluss auf das berechnete Strömungsbild haben. Generell sind zur Beurteilung der berechneten Lösungen hinsichtlich der realitätsnahen Abbildung eines Strömungszustandes Validierungen unter Verwendung von Ergebnissen aus Natur- oder physikalischen Modellversuchen sowie archivierten Aufzeichnungen für definierte Abflussszenarien zu empfehlen.

## 5 Literatur

- Chung, T. J. (2002): Computational Fluid Dynamics. Cambridge University Press, New York 2002
- Carstensen, D., Heß, M. & Schneefeld, C. (2014): Ermittlung der hydraulischen Verhältnisse in der Hochwasserentlastungsanlage der Talsperre Pirk. Forschungsbericht 2014-06, TH Nürnberg, 2014
- Deshpande, S. S., Anumolu, L. & Trujillo, M. F. (2012): Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam. Computational Science and Discovery, 2012
- DWA (2014): Merkblatt DWA-M 509 – Fischaufstiegsanlagen und fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfälle e.V., Hennef 2014

### Autoren:

M.Eng. Max Heß

Technische Hochschule Nürnberg  
Georg-Simon-Ohm  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Keßlerplatz 12  
90489 Nürnberg

Tel.: +49 911 5880 1218  
Fax: +49 911 5880 5164  
E-Mail: max.hess@th-nuernberg.de

M.Eng. Carla Schneefeld

Dipl.-Ing. (FH) Tilo Vollweiler  
Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Carstensen

Technische Hochschule Nürnberg Georg-Simon-Ohm  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Keßlerplatz 12  
90489 Nürnberg

E-Mail: carla.schneefeld@th-nuernberg.de  
tilo.vollweiler@th-nuernberg.de  
dirk.carstensen@th-nuernberg.de