

Numerische Untersuchung eines Versuchsstandes zur Erzeugung langperiodischer Wellen

Simulation als zweidimensionales Zweiphasen-Strömungsproblem mithilfe der OpenFOAM-Software

Verena Krebs, Theide Wöffler, Klemens Uliczka und Holger Schüttrumpf

Zusammenfassung

Die im Zuge der Globalisierung immer stärkere Vernetzung der Weltwirtschaft führt zu einem stetig anwachsenden Gütertransport. Auf die Schifffahrt als bedeutendstes Transportmittel von Gütern hat dies besonders starke Auswirkungen. Damit gehen veränderte Anforderungen – nicht nur an die Schifffahrt – sondern auch an deren Verkehrswege, die Schifffahrtsstraßen, einher. Auch auf den deutschen Seeschifffahrtsstraßen an Nord- und Ostsee sowie dem Nord-Ostsee-Kanal lassen sich ein deutlich gesteigertes Verkehrsaufkommen sowie größer werdende Schiffsabmessungen beobachten. Dies verursachte laut Untersuchungen der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in den vergangenen Jahren ein verstärktes Auftreten von Schäden an den Strombauwerken der deutschen Seeschifffahrtsstraßen, wofür vor allem die gestiegene Belastung infolge der langperiodischen Anteile schiffserzeugter Wellen verantwortlich gemacht wird. Ein schiffsinduziertes Wellensystem setzt sich aus kurz- und langperiodischen Wellenanteilen zusammen. Während sich in der Literatur Ansätze zur Bemessung von Strombauwerken für kurzperiodische Wellen finden, hat die Untersuchung langperiodischer Wellen in Seeschifffahrtsstraßen sowie deren Auswirkung auf Bauwerke bislang nicht stattgefunden. Das FuE-Projekt „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschifffahrtsstraßen“ der BAW soll diese Wissenslücke schließen. Die vier Projektpartner, die sich aus der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), dem Leichtweiß-Institut (LWI) der technischen Universität Braunschweig, der Hamburg Port Authority (HPA) und dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen (RWTH Aachen University) zusammensetzen, sollen fachlich abgesicherte und nachhaltig entwickelte Ansätze zur Bemessung von Bauwerken an Seeschifffahrtsstraßen auf langperiodische Schiffswellen entwickeln.

1 Einleitung

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen fanden im Rahmen einer Masterarbeit am IWW parallel zum FuE-Projekt „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschifffahrtsstraßen“ der

BAW statt. Ein Arbeitspaket des Projekts befasst sich in kleinmaßstäblichen Laborversuchen mit der Untersuchung maßgeblicher Prozesse am Strombauwerk sowie der hydraulischen Stabilität seiner Deckschicht. Während in den ersten beiden bereits abgeschlossenen Modellphasen stationäre und kurzperiodische Wellenbelastungen untersucht wurden, widmet sich die aktuelle Modellphase der kleinmaßstäblichen Untersuchung langperiodischer Wellenanteile. Die physikalischen Modellversuche hierzu erfolgen in der Großen Kipprinne der Versuchshalle des IWWs. Gegenstand der vorliegenden Veröffentlichung ist der Aufbau eines numerischen Modells zur Abbildung dieses Versuchsstandes sowie die Durchführung von physikalischen Vorversuchen. Das numerische Modell soll sowohl die Machbarkeit eines solchen Versuchsstandes untersuchen als auch dessen Optimierung dienen. Die Simulation erfolgt mittels des Softwarepakets OpenFOAM. Hierbei werden die zur Wellenerzeugung benötigten, bewegten Elemente nicht direkt abgebildet, sondern über sogenannte *groovy Boundary Conditions* hinterlegt, wodurch das Modell vereinfacht und die Rechenzeit verkürzt wird.

Nach einer kurzen Darstellung des charakteristischen Schiffswellensystems werden im Folgenden in der Kipprinne des IWWs durchgeführte Vorversuche beschrieben. Diese Vorversuche dienen unter anderem der Validierung des numerischen Modells, dessen Aufbau im darauffolgenden Abschnitt erläutert wird. Ausgewählte Diagramme stellen eine kleine Auswahl an Ergebnissen aus der Numerik dar, welche im Anschluss hinsichtlich ihrer Bedeutung für die physikalischen Modellversuche diskutiert werden.

2 Schiffswellen

Bei der Passierfahrt eines Schiffes entsteht infolge der durch die Schiffsbewegung ausgelösten Störung der Wasseroberfläche ein dreidimensionales, hochgradig komplexes und nicht künstlich reproduzierbares Wellensystem. An Bug und Heck bilden sich Druckmaxima, die einen Wasserspiegelanstieg (Bug- und Heckstau) zur Folge haben. An der Schiffslängsseite kommt es zu einem Druckminimum, welches mit einer Wasserspiegelabsenkung (Absunk) einhergeht. Die Rückströmung entsteht infolge des eingeschnürten Querschnitts an der Schiffslängsseite (BERNOULLI-Strömung). Ihre Größe wird maßgeblich von der Schiffsgeschwindigkeit und dem Tiefgang des Schiffes beeinflusst (LEWIS (1988)). Die Heckquerwelle – verursacht infolge der Störung am Heck – verläuft parallel zur Fahrtrichtung des Schiffes. Überschreitet die Welle ihre Grenzsteilheit, was durch ufernahe Fahrt und kritische Schiffsgeschwindigkeiten (hohe FROUDE-Zahlen) begünstigt wird, so bildet sich ein Rollbrecher aus, der uferparallel mit dem Schiff mitläuft. Hierbei entstehen große örtliche Strömungsgeschwindigkeiten und Druckgradienten, die Schäden an Uferbefestigungen und Querbauwerken auslösen können (BAW (2012)).

Zum Ausgleich der Abflusszustände und zur Auffüllung der Absunkmulde bildet sich eine – bei Kanalfahrt uferparallele – Schwellströmung aus. Signifikant wird diese bei

hohen Heckquerwellen oder ufernaher Fahrt; maximal wird sie, wenn es zum Brechen der Heckquerwelle kommt. Im Extremfall kann auch sie als sich fortpflanzender Rollbrecher am Ufer beobachtet werden. Für hohe FROUDE-Zahlen liegen die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten am Ufer im Bereich der Schiffsgeschwindigkeit und stellen damit eine kritische Größe in der Bemessung von Uferbauwerken dar (BAW (2012)).

Diese Auslenkung der Wasserspiegeloberfläche lässt sich charakteristisch bei allen Schiffen beobachten und wird als Primärwellensystem bezeichnet. Durch die Druckmaxima an Bug und Heck werden darüber hinaus weitere Wellenfelder, sogenannte Sekundärwellen, verursacht, welche sich durch deutlich kleinere Wellenlängen charakterisieren. Abbildung 1 zeigt schematisch die soeben beschriebene Wasserspiegeländerung infolge einer Schiffspassage in Kanalmitte.

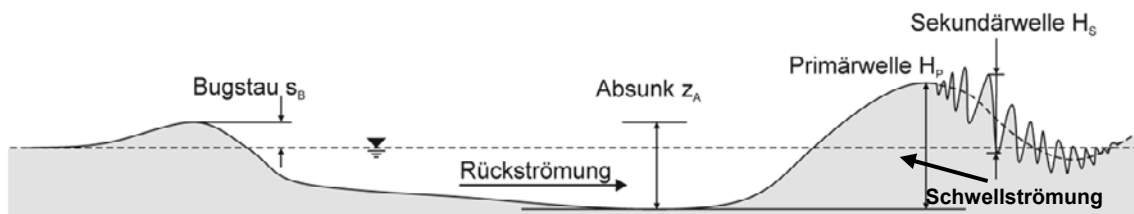


Abb. 1: Wasserspiegeländerung am Ufer bei Passage eines Schiffes in Kanalmitte, Schiff fährt von rechts nach links; stark überhöhte, schematische Darstellung (nach BAW (2015))

Bei den Primärwellen handelt es sich um langperiodische, schiffsgebundene Wellen, deren Wellenlänge in etwa einer Schiffslänge entspricht und die sich mit der Schiffsrichtung ausbreiten. Sie fallen in den Bereich der Infrarotwellen und befinden sich damit außerhalb des normalerweise im Küsteningenieurwesen relevanten Frequenzbereichs. Darüber hinaus sind sie aufgrund ihrer Langperiodizität in der Regel als Flachwasserwellen einzustufen. Bei den Sekundärwellen wiederum handelt es sich um freie Oberflächenwellen, die in der Regel keine Sohlberührung aufweisen, sich ähnlich wie Windwellen verhalten und deren Analyse nach vorhandenen Windwellenparametern möglich ist (MATHEJA & SCHWETER (2007)).

Die Ausbreitung eines schiffsinduzierten Wellensystems erfolgt im KELVIN'SCHEN Wellenfeld. Dieses Schrägwellensystem kann sich in seiner „Reinform“ jedoch nur im Tiefwasser und bei unbegrenzten Seitenverhältnissen einstellen. In diesem Fall überwiegen die Sekundärwellen betragsmäßig die Primärwellen. Wird jedoch die Schiffspassage in einer Wasserstraße betrachtet, so sind diese Bedingungen nicht erfüllt. Liegt seitlich und tiefenmäßig begrenztes Fahrwasser vor, werden insbesondere die Primärwellenanteile des Wellensystems und der KELVIN'SCHE Winkel durch Flachwassereffekte und die seitliche Eingrenzung maßgeblich verändert. In diesem Fall stellt die Belastung infolge Primärwellen die charakteristische Einwirkung dar (FÜHRBÖTER ET AL. (1984), BAW (2004)).

3 Konzeption der Modellversuche

Ziel der Modellversuche der aktuellen Modellphase (MP 3) ist die Untersuchung der langperiodischen Wellenanteile an einem typischen Strombauwerk (Buhne und Leitdamm). Die zu untersuchenden Wellenparameter wurden in WÖFFLER ET AL. (2014) in Form von Wellenperiode und -höhe bereits so festgelegt, dass eine Vergleichbarkeit mit den Modellphasen 1 und 2 besteht (vgl. Tabelle 1). Die Freibordhöhe beschreibt den Abstand zwischen der Oberkante des Modellkörpers und dem Ruhewasserspiegel.

Tab. 1: Für Modellphase 3 festgelegte Wellenparameterbereiche

Wellenhöhe H_p	Wellenperiode T_p	Freibordhöhe R_c
0,02–0.33 m	10–100 sec	0, 7, 13 cm

Unklar bleibt bislang jedoch, auf welche Wellenform sich die Parameter beziehen und welche Teile der Primärwelle abgebildet werden sollen. Die Primärwelle eines Schiffes lässt sich nicht mit Wellenhöhe und -periode allein beschreiben. Um dies dennoch zu erreichen, muss das Primärwellensystem weiter simplifiziert und auf wenige Bestandteile reduziert werden. Hierzu wurde festgelegt:

- Es erfolgt nur eine Abbildung des Wellenbergs in Form der Schwellströmung, da diese nach derzeitigen Erkenntnissen die schädlichsten Einflüsse auf Strombauwerke hat.
- Sowohl der vorauslaufende Bugstau als auch der Absunk werden nicht abgebildet.
- Die Wellenperiode beschreibt die Dauer der simulierten Schwellströmung. Da der Absunk nicht abgebildet wird, und dadurch streng genommen nur die halbe Welle erzeugt wird, werden die maximalen Wellenperioden halbiert.
- Die Wellenhöhe bezieht sich auf die Differenz zwischen Absunk und Schwellströmung.
- Nachfolgende Sekundärwellen werden vernachlässigt.

Abbildung 2 zeigt den charakteristischen Verlauf einer Primärwelle und die angenommenen Vereinfachungen für die Versuche. Darüber hinaus stellt sich die Frage, welche Wellenform erzeugt werden soll, denn je nach Wasserstand und Entfernung von der Fahrrinne stellen sich unterschiedliche Formen der Schwellströmung ein.

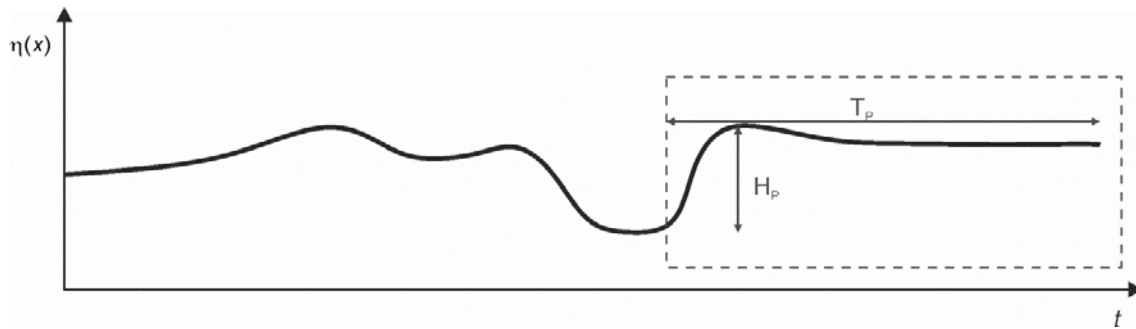


Abb. 2: Vereinfachte Darstellung einer möglichen Primärwellenform – das gestrichelte Fenster kennzeichnet den Bereich, der in den Versuchen abgebildet wird.

Deshalb wird sowohl in den modellphysikalischen als auch in den numerischen Voruntersuchungen die Einsteuerung von zwei verschiedenen Wellenformen getestet. Eine Wellenform weist einen etwas flacheren Anstieg und einen schmalen Wellenberg auf und wird nachfolgend – auch wenn sie definitiv keiner Sinuswelle entspricht – als „sinusförmige Welle“ bezeichnet. Die zweite Welle verfügt über eine steile Wellenfront, auf sie wird von nun an als „Schwallwelle“ Bezug genommen. Abbildung 3 skizziert die zwei unterschiedlichen Wellenformen.

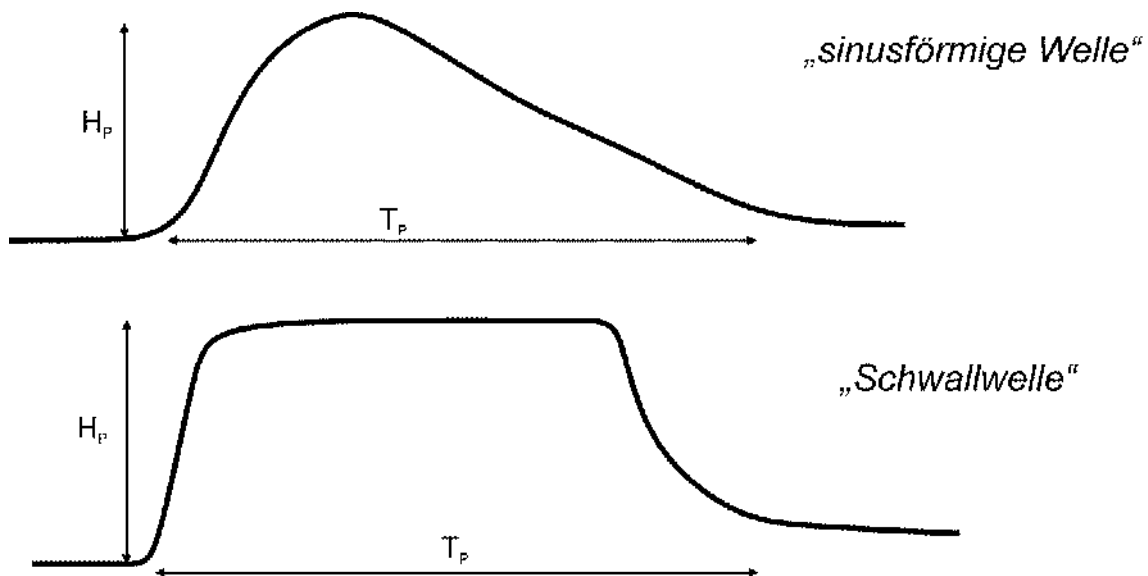


Abb. 3: Skizze der erzeugten Wellenarten und der charakterisierenden Parameter (oben: „sinusförmige Welle“ unten: „Schwallwelle“)

Berechnungen ergaben, dass die Kipprinne und das ihr angeschlossene Pumpensystem in der Versuchshalle des IWWs generell zur Erzeugung der zu untersuchenden Wellen geeignet sind. Die nutzbare Länge der Kipprinne beträgt 25,5 m bei einer Höhe und Breite von jeweils 1 m. Das Pumpensystem besteht aus zwei parallel geschalteten Pumpen mit einer maximalen Förderleistung von 450 l/s. Der Zufluss in die Kipprinne

wird über einen Schieber gesteuert, der den Pumpen nachgeschaltet ist. Die Pumpen können nur ein- und ausgeschaltet werden, eine Steuerung der Pumpenleistung ist derzeit nicht möglich und befindet sich in Entwicklung. Über die Änderung des Zuflusses (Öffnen und Schließen der Schieber) kann eine langperiodische Welle erzeugt werden. Die Schieber werden über einen elektrischen Motor bewegt.

Um das numerische Modell zu validieren, wurden Vorversuche in der Kipprinne des IWWs durchgeführt. Hierzu wurde ein Modellkörper der Variante 1 (glatt und undurchlässig, vgl. WÖFFLER ET AL. (2014)) in die Kipprinne eingebaut. Außerdem wurden fünf Ultraschallsonden (WSP1 bis WSP5) zur Aufnahme des Wasserspiegels installiert. Mit einem kurz hinter der Ultraschallsonde WSP 1 installierten ADV (Akustischen Doppler Geschwindigkeitsmessgerät) konnten Fließgeschwindigkeiten für alle drei Raumrichtungen gemessen werden. Die Lage der Messsonden und die Abmessungen des eingebauten Modellkörpers können Abbildung 4 entnommen werden.

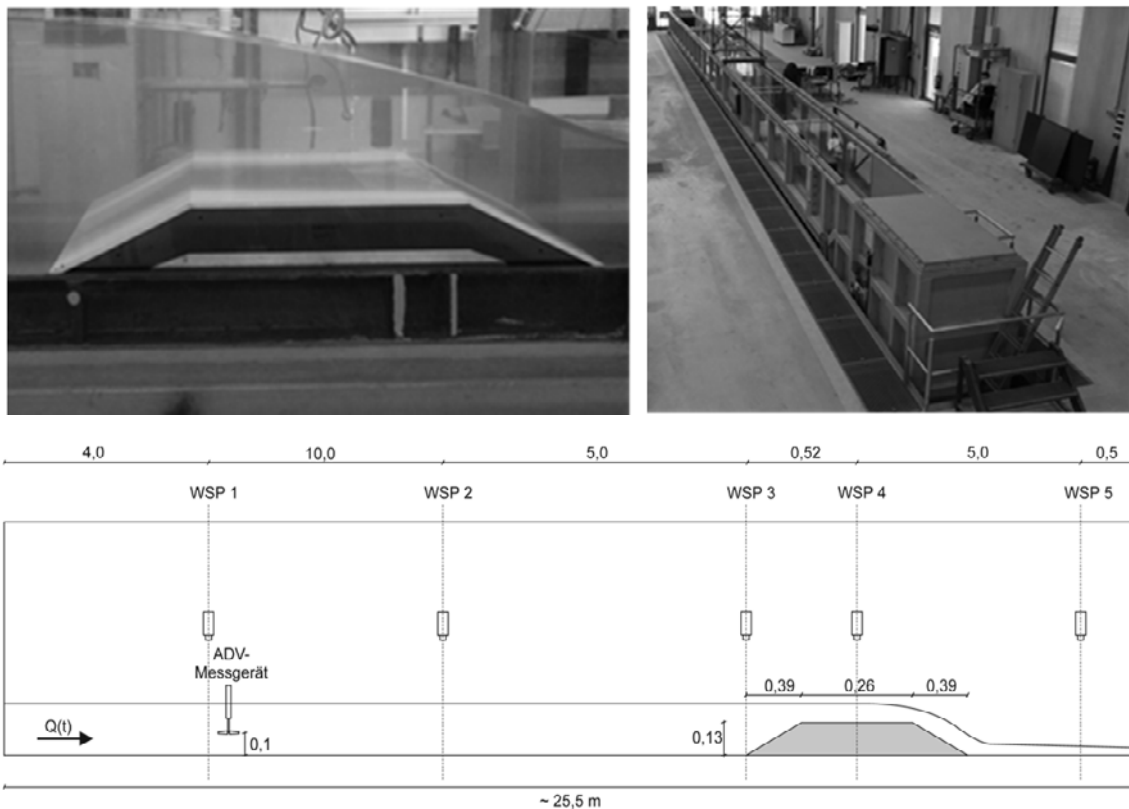


Abb. 4: Ansichten der Kipprinne; oben rechts: Blick auf die Kipprinne in der neuen Versuchshalle des IWWs, oben links der eingebaute Modellkörper; unten: Längsschnitt durch Kanalmitte mit Einbau der Ultraschallsonden, des ADVs und des Modellkörpers für die Vorversuche; nicht maßstabsgetreue Skizze, alle Längenangaben in [m]

4 Aufbau des numerischen Modells

Zur Erstellung des numerischen Modells wurde das Softwarepaket OpenFOAM v.2.2.0 verwendet. Die Abbildung des Versuchsstandes erfolgt als Zweiphasen-Strömungsproblem aus Luft (Phase α_0) und Wasser (α_1), zu dessen Lösung der Standardsolver *interFOAM* verwendet wird. Beide Phasen werden als NEWTON'sches Fluid mit linear unelastischem Fließverhalten modelliert. Für die Abbildung des Versuchsstandes sind die genauen Vorgänge an den bewegten Teilen (Schieber) von untergeordnetem Interesse. Vielmehr sollen die aus der Bewegung resultierende Durchflussänderung bzw. Wellenbewegung und deren Entwicklung über die Kanallänge untersucht werden. Deshalb wird die Bewegung der Schieber nicht direkt abgebildet, sondern über eine zeitabhängige Randbedingung eingesteuert. Dies erfolgt über die Nutzung der *groovyBC*-Funktion aus der *swak4FOAM*-Library (OPENFOAM WIKI (2014)).

Die Annahme, dass Strömungen quer zur Kanalrichtung vernachlässigbar sind, erlaubt den Aufbau eines 2D-Modells. Folglich wird in z-Richtung für alle Blöcke nur eine Zelle definiert. Für die x-Richtung werden im Bereich des Strombauwerks Zelllängen von etwa 1 cm gewählt, abseits des Strombauwerks Zelllängen von 10 cm. In y-Richtung wurden über das gesamte Modellgebiet 1 cm hohe Zellen genutzt.

Um eine numerische Simulation vornehmen zu können, müssen die Grenzen des Modellgebiets mit Randbedingungen versehen werden. Für das Modell werden jeweils Geschwindigkeit, Druck und die Verteilung der Phase α_1 definiert. Die zusammengestellten Randbedingungen können Tabelle 2 entnommen werden. Abbildung 5 zeigt die Zuordnung der Randbedingungen an die Modellgrenzen. Eine ausführliche Beschreibung der verwendeten Randbedingungen findet sich in OPEN CFD LTD. (2014). Zusätzlich muss als Anfangsbedingung ein Ausgangszustand der Strömung vorgegeben werden, in dem für den ersten Zeitschritt der Simulation alle unabhängigen Strömungsgrößen definiert werden.

Tab. 2: Hinterlegte Randbedingungen für alle Modellgrenzen

<i>patch</i> -Name	Geschwindigkeit U	Druck p_rgh	alpha1
Einlauf	groovyBC	zeroGradient	groovyBC
Sohle	fixedValue uniform (0 0 0)	uniform 0	zeroGradient
Auslauf	pressureInletOutletVelocity uniform (0 0 0)	zeroGradient	inletOutlet inlet=0
Atmosphäre	pressureInletOutletVelocity uniform (0 0 0)	totalPressure p0=0	inletOutlet inlet=0

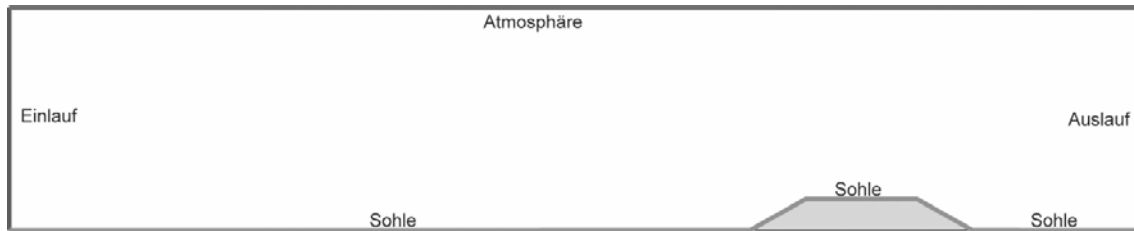


Abb. 5: Zuordnung der Randbedingungen an die Modellgrenzen

Am Einlauf kommen für die Einstellung von Geschwindigkeit und α_1 die bereits erwähnten *groovyBCs* zum Einsatz. Zur Erzeugung der unterschiedlichen Wellenformen erfolgt die Simulation von drei verschiedenen Randbedingungen (RBs). Abbildung 6 zeigt die hinterlegten Randbedingungen für die einströmende Phase und die zugehörige Fließgeschwindigkeit in x-Richtung zur Erzeugung der Schwall- (links) und der sinusförmigen Welle (rechts).

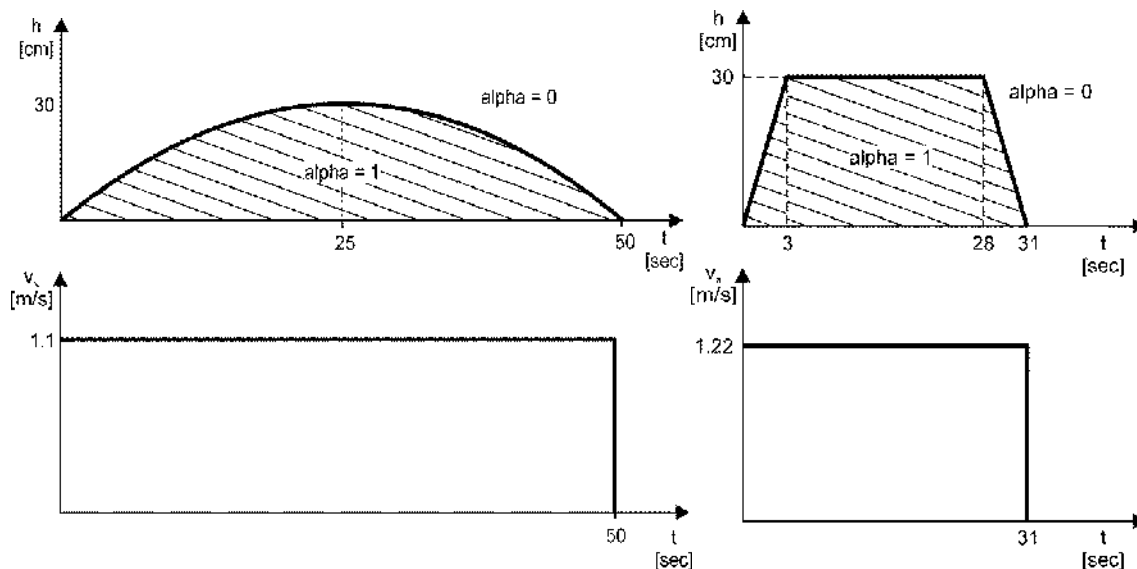


Abb. 6: Schwallwellen- und sinusförmige Randbedingung am Modelleinlauf für α_1 und U

5 Ergebnisse

Abbildung 7 zeigt den zeitlichen Verlauf des Wasserspiegels an unterschiedlichen Stellen im Kanal für die numerische Simulation mit der sinusförmigen Randbedingung. Auf der x -Achse ist die Zeit in [sec] aufgetragen, die y -Achse zeigt die Lage der Wasseroberfläche in [m] über der Sohle des Kanals. Die Lage der Wasserspiegelsonden (WSP1 bis WSP5) entspricht der aus den Modellversuchen und kann Abbildung 4 entnommen werden.

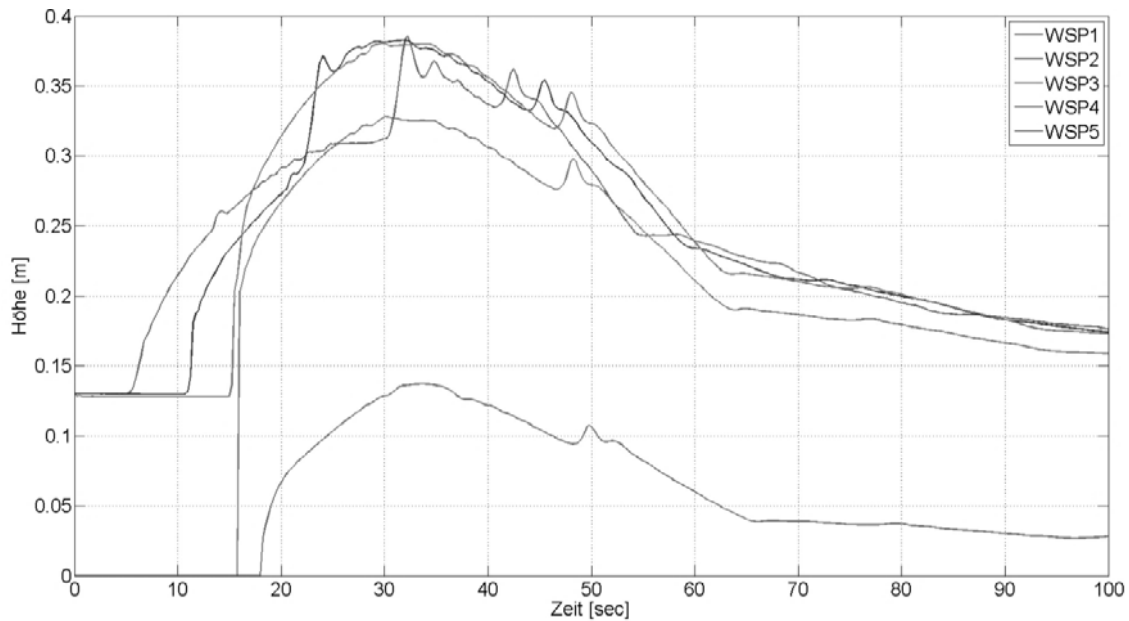


Abb. 7: Ergebnisse aus der Numerik für alle Wasserspiegelsonden mit der sinusförmigen Randbedingung

Für WSP1 bis WSP3 beträgt der Anfangswasserstand 13 cm, das Wasser steht also bis zur Oberkante des Modellkörpers. Der Modellkörper selber ist trocken (WSP4 zu Beginn bei 0 cm), hinter dem Modellkörper (WSP5) steht kein Wasser an. Nacheinander verzeichnen die Messsonden nun einen Anstieg des Wasserspiegels. Für WSP1 verläuft dieser Anstieg flacher als für WSP2. An WSP3 (Buhnenfuß) kommt es schließlich zu einem Rückstau und ein Teil der Welle wird in Richtung Einlauf reflektiert. Diese rücklaufende Wellenbewegung lässt sich an den steilen Anstiegen von WSP1 und WSP2 zu den Zeitpunkten 22 sec und 35 sec beobachten. Im vorderen Bereich des Kanals wird die rücklaufende Welle schließlich erneut in ihre ursprüngliche Richtung reflektiert und lässt sich in Form des kleinen Anstiegs bei etwa 50 sec auf dem bereits abflachenden Ast von WSP2 bis WSP5 erneut finden. Im vorderen Bereich des Kanals überlagern sich nach dem Durchgang der ersten rücklaufenden Welle viele kleine hin und her schwappende Wellenbewegungen, was sich an dem stark schwankenden Wasserspiegel für WSP1 ab etwa 35 sec erkennen lässt. Der Verlauf der Welle an WSP5 folgt weitestgehend dem an WSP4.

Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen aus der Numerik und dem Modellversuch für WSP3 zeigt Abbildung 8. Die Verläufe weisen eine gute Übereinstimmung auf, im Versuch werden lediglich geringfügig höhere Wasserstände gemessen (Abweichungen liegen im Bereich von etwa 2 cm). Diese Abweichung lässt sich dadurch erklären, dass im Versuch kein Staulement verwendet wurde. Hierdurch ließ sich die Freibordhöhe $R_c = 0$ cm im Modellversuch nicht so exakt einstellen wie im numerischen Modell und der Anfangswasserstand lag geringfügig über dem des numerischen Modells. Ferner ist die Wasserspiegellage in den Versuchen mit deutlich stärkeren Schwankungen behaftet, die sich auf die am Einlauf entstehenden Turbulenzen zurückführen lassen.

Diese Turbulenzen treten in der Numerik nicht auf, da die Pumpen und das Rohrsystem nicht abgebildet werden.

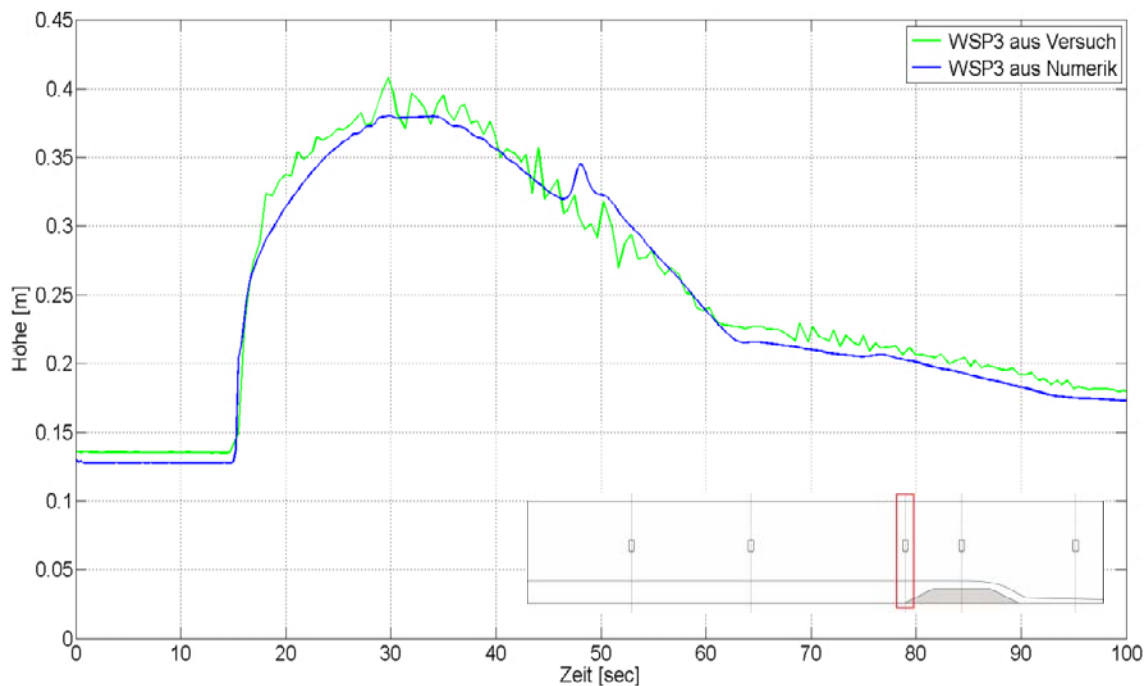


Abb. 8: Vergleich der Wasserspiegelauslenkung für Ergebnisse aus der Numerik (sinusförmige Randbedingung) und dem Versuch an WSP3

Um Transformationsprozesse der Welle über die Kanallänge zu untersuchen und um herauszufinden, ob die Kipprinne lang genug ist, eine voll ausgebildete Welle abzubilden, wurde im numerischen Modell auch ein deutlich längerer Kanal ($L = 125$ m, Strombauwerk nach 120 m) betrachtet. Abbildung 9 stellt die Auslenkung der Wasseroberfläche über die gesamte Kanallänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten dar. Auf der x-Achse ist die Kanallänge in [m] aufgetragen, die y-Achse zeigt die Wasserspiegellage in [m] über der Kanalsole. Es werden mehrere Zeitschritte in einem Diagramm überlagert, was die Betrachtung des Wellenfortschritts über die Kanallänge ermöglicht. In dieser Auswertung wird deutlich, dass die Welle infolge der sinusförmigen Randbedingung im Verlauf des längeren Kanals weiteren Transformationen unterliegt: Die Wellenfront wird steiler und wächst in ihrer Höhe an.

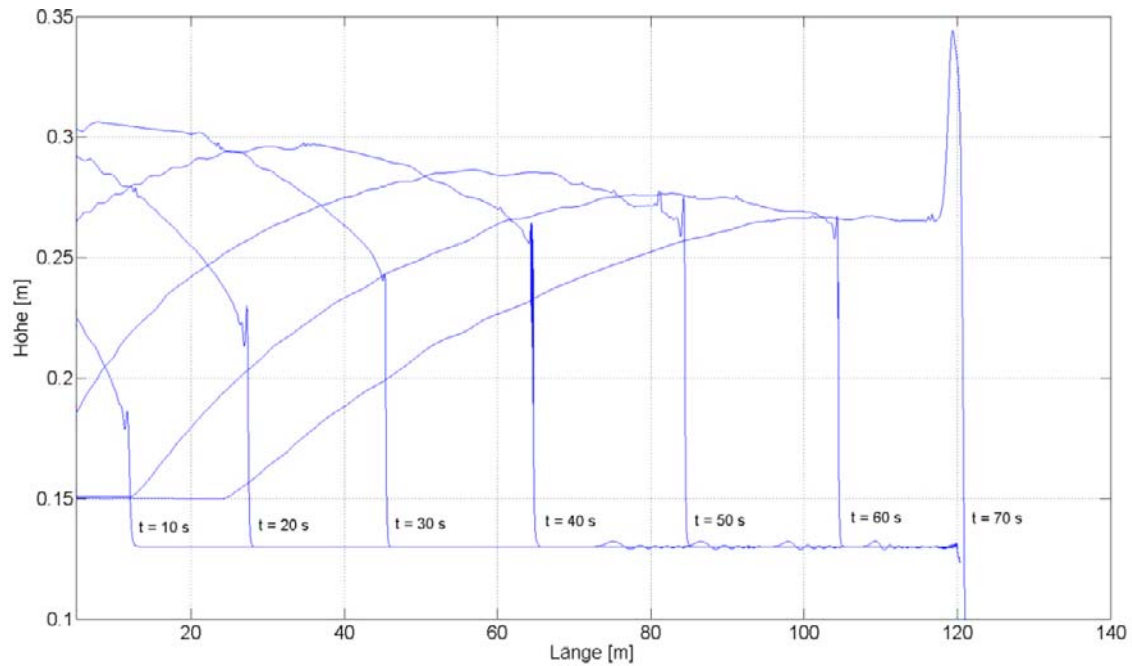


Abb. 9: Entwicklung der Welle im langen Kanal ($L = 125$ m) für die *sinusförmige* Randbedingung

Abbildung 10 zeigt die Geschwindigkeitsverteilungen in der Wellenfront kurz vor dem ersten Überströmen des Strombauwerks. Hier treten für die Schwallwelle deutlich höhere Geschwindigkeiten auf. Darüber hinaus lassen sich bei dieser Wellenform erhöhte Luftgeschwindigkeiten erkennen, die aus den turbulenten Brechvorgängen in der Wellenfront resultieren. Auch für die sinusförmige Welle stellen sich die höchsten – wenn auch betragsmäßig im Vergleich mit der Schwallwelle nur halb so großen – Geschwindigkeiten an der Wasseroberfläche ein. In der Luft nahe der Wellenfront treten ebenfalls erhöhte Geschwindigkeiten auf, allerdings ist dieser Effekt weniger stark ausgeprägt als bei der Schwallwelle und es kommt nicht zum Brechen der Welle.

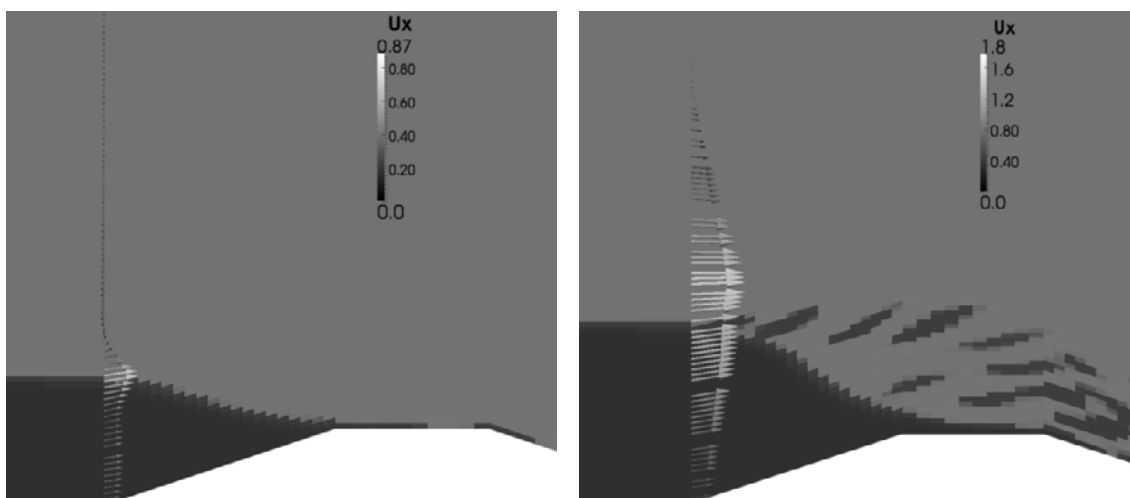


Abb. 10: Geschwindigkeitsverteilung in der Wellenfront zum Zeitpunkt des ersten Überströmens des Modellkörpers; links: sinusförmige Randbedingung, rechts: Schwallwellen-Randbedingung

6 Diskussion

Eine Validierung des numerischen Modells wurde unter Verwendung der physikalischen Modellversuche durchgeführt. Nach Berücksichtigung der oben genannten Einschränkungen lässt sich eine gute Übereinstimmung bezüglich der Auslenkung der Wasserspiegellage feststellen, woraus sich schließen lässt: Die Abbildung des Versuchsstandes als ein zweidimensionales Zweiphasenströmungsproblem ist gelungen. Die zufriedenstellende Validierung hinsichtlich der Wasserstände erlaubt aus den numerischen Untersuchungen Schlussfolgerungen für den Aufbau des physikalischen Modells zu ziehen.

Die numerischen Untersuchungen zeigen, dass im bestehenden physikalischen Modell verschiedene Wellenformen erzeugt werden können. Die Form wird hierbei maßgeblich über die Randbedingungen am Einlauf bestimmt. Entscheidenden Einfluss haben vor allem die Geschwindigkeit, mit der der Einlauf geöffnet wird, aber auch die Dauer der Öffnung und die Geschwindigkeit, mit der das Wasser in das Modell einströmt.

Deutlich wird jedoch auch, dass neben der Randbedingung am Einlauf physikalische Vorgänge, hervorgerufen durch Flachwassereffekte bzw. Sohlberührung, von großer Bedeutung sind. Bei der Betrachtung eines langen Kanals (Abbildung 9) zeigte sich, dass die physikalische Transformation der Welle über die Kanallänge der Kipprinne (25,5 m) für die sinusförmige Randbedingung noch nicht voll abgeschlossen ist. Erst ab einer Länge von etwa 65 m steigt die Höhe der Wellenfront nicht mehr an. Ferner zeigte sich im Vergleich verschiedener Randbedingungen (hier nicht dargestellt), dass die Effekte infolge der physikalischen Transformation die Effekte infolge der eingestellten Randbedingung übersteigen. Wird die Entwicklung der Welle über einen langen Kanal betrachtet, so nähert sich die Welle nach ausreichender Fortpflanzungslänge für alle Randbedingungen einer ähnlichen Form an. Für die Modellversuche sollte folglich eine Randbedingung gewählt werden, die diese Wellenform bereits auf der Länge der Kipprinne erzeugen kann. Dies ist auf Grundlage der Untersuchungen nur mit der Schwallwellen-Randbedingung möglich.

Doch noch ein weiterer Aspekt spricht für die Verwendung der Schwallwellen-Randbedingung: Als Auswertungsgrößen wurden in den vorangegangenen Modellphasen neben den Wellenüberlaufdaten die Steinbewegungen (nur für die lageinstabilen Modellkörper, Variante 3 vgl. WÖFFLER ET AL. (2014)) am Strombauwerk festgelegt. Maßgeblichen Einfluss auf die Steinbewegungen, und damit auf die Stabilität des Strombauwerks hat – neben der Wellenüberlaufhöhe – die Strömungsgeschwindigkeit auf dem Strombauwerk. Hier zeigen die Auswertungen der numerischen Simulation, dass infolge der Schwallwelle deutlich höhere Geschwindigkeiten zu erwarten sind. Bei dieser Wellenform lassen sich außerdem hoch turbulente Brechvorgänge beobachten, die ebenfalls negativen Einfluss auf die Stabilität des Strombauwerks haben. Auf Grundlage dessen lässt sich die *Schwallwelle* nach derzeitigen Erkenntnissen auch als maßgebende Einwirkung hinsichtlich der Stabilität des Bauwerks definieren.

7 Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit war der Aufbau eines numerischen Modells zur Abbildung eines Versuchsstandes zur Erzeugung langperiodischer Wellen in der Versuchshalle des IWWs. Zum Aufbau des numerischen Modells kam das Softwarepaket OpenFOAM zum Einsatz. Der Versuchsstand wurde als zweidimensionales Zweiphasen-Strömungsproblem modelliert. Die Erzeugung der bewegten Elemente erfolgte indirekt über die Hinterlegung zeitabhängiger Randbedingungen für den Wasserstand und die Strömungsgeschwindigkeit. Das Modell konnte mit den in der Kipprinne des IWWs stattgefundenen Vorversuchen erfolgreich validiert werden. Die Numerik erlaubte daraufhin die Untersuchung mehrerer Varianten: So wurden verschiedene Einlauf-Randbedingungen getestet und deren Effekte verglichen. Weitere Analysen beschäftigten sich mit der Entwicklung der Wellenform über die Kanallänge.

Die numerische Simulation ergab, dass die Kipprinne in der Versuchshalle des IWWs zur Erzeugung von langperiodischen Wellen geeignet ist, jedoch sind einige technische Anpassungen erforderlich. Hierzu konnten aufgrund der numerischen Untersuchungen Empfehlungen gegeben werden, die mittlerweile umgesetzt sind, hier jedoch nicht diskutiert werden. Der Aufbau des numerischen Modells darf aber auch deshalb als wichtiger Beitrag verstanden werden, da das Modell und die entwickelte Auswertungsmethodik für zukünftige Untersuchungen – beispielsweise während der Versuchsphase – zur Verfügung stehen.

8 Literatur

BAW (2004): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 87/2004.

BAW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP1 – Schadensanalyse. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg (unveröffentlicht).

BAW (2015): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen. Arbeitspaket 4b: Kleinmaßstäbliche 3D-Untersuchungen zu alternativen Buhnensystemen – Abschlussbericht. Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg.

Führböter, A.; Dette, H.; Jensen, J. (1984): Untersuchungen über schiffserzeugte Wellen an der Unterelbe. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Technische Universität Braunschweig.

Lewis, E. (1988): Principles of Naval Architecture – Volume II - Resistance, Propulsion and Vibration. Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), Jersey City.

Matheja, A.; Schweter, L. (2007): Naturmessungen zur Bestimmung schiffsinduzierter Belastungen im Hafen eines Tideflusses, In: Franzius-Mitteilungen – Heft-Nr. 95. Franzius-Institut für Wasserbau, Ästuar- und Küsteningenieurwesen, Leibniz Universität Hannover, S. 71–114.

Open CFD Ltd. (2014): OpenFOAM – User Guide. OpenFOAM Foundation.

OpenFoam Wiki (2014): Contrib/swak4Foam – Informationen zu Download und Installation: <https://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/swak4Foam#Downloading> (zuletzt aufgerufen am 30.11.2014).

Wöffler, T.; Gier, F.; Schüttrumpf, H. (2014): Schiffserzeugte langperiodische Belastung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – Arbeitspaket 4: Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen (unveröffentlicht).

Anschriften der Verfasser

Verena Krebs, M.Sc. RWTH
Dipl.-Geogr. Theide Wöffler
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University
Mies-van-der-Rohe-Straße 17
52056 Aachen

Klemens Uliczka
Bundesanstalt für Wasserbau
Dienststelle Hamburg
Wedeler Landstr. 157
22559 Hamburg