

# Inhaltsverzeichnis

## Offshore-Windenergie

Forschungsvorhaben und Erkenntnisse an Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen – Belastungen und Kolkphänomene.....	2
Open Ocean Multi-Use (OOMU) - Integrative Nutzung von Offshore-Tragstrukturen und Aquakulturen.....	15

## Institutsneuigkeiten

Studienexkursionen am Franzius-Institut .....	18
---	----

## Integrierte Küstenforschung

COSYNA - Coastal Observation System for Northern and Arctic Seas: Background, Methods and Instruments .....	21
Ermittlung mittlerer Überlaufmengen an Sturmflutschutzwänden auf Deichen und auf ebener Sohle aus Seegang .....	23
Numerical simulation of breaking waves using hybrid coupling of FNPF (FEM) and NS (IMLPG_R) solver with practical applications .....	29
Aufbau und Betrieb eines Tideelbemodells für morphodynamische Simulationen mittels SELFE im Rahmen von KLIWAS 3.03.....	34

## Wasserbau und Küsteningenieurwesen

Wasserbau Interdisziplinär! .....	38
Experimental investigation of flow-induced vibrations of the radial gate of the Subansiri dam .....	42
Feldmessungen und hydronumerische Untersuchung zur Verschlickungsproblematik des Hafens Juist .....	48
Anwendungen des SELFE-Weserästuarmodells auf Fragestellungen des Hochwasserschutzes in Bremen .....	51

# Forschungsvorhaben und Erkenntnisse an Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen – Belastungen und Kolkphänomene

## Einleitung

Offshore-Bereiche werden bereits seit Jahrzehnten im Zuge der Ölgewinnung mithilfe fest verankerter oder schwimmender Plattformen erschlossen und genutzt. Aufgrund der erhöhten Nachfrage und Forderungen nach umweltfreundlichen, erneuerbaren Energien werden derzeit zunehmend auch vergleichsweise flache Offshore-Bereiche mit Wassertiefen bis zu 40 m für die Gründung von Offshore-Windenergieanlagen interessant. Aufgrund der Wassertiefe werden hier große Anforderungen an die Strukturen gestellt, die damit ebenso große Herausforderungen für die Ingenieure darstellen.

Die Bestrebungen nach einem möglichst effektiven Design für die Serienfertigung unterschiedlicher Gründungskonzepte erfordern u. a. die Behandlung aktueller Fragestellungen in Bezug auf Wellenbelastungen und Kolkgenerierung. Im Rahmen mehrerer Industrieprojekte und Forschungsvorhaben werden am Franzius-Institut und am Großen Wellenkanal (GWK) der Leibniz Universität Hannover daher verschiedene Aspekte untersucht:

- Strukturbelastungen durch nicht-brechende Wellen
- Impulsive Belastungen durch brechende Wellen
- Wahrscheinlichkeiten von Seegangsbelastungen
- Kolkentwicklung an unterschiedlichen Gründungsstrukturen
- Maßnahmen und Effektivität von Kolkschutzsystemen

Je nach Fragestellung werden für die Untersuchungen klein- oder großmaßstäbliche physikalische Modellversuche durchgeführt, die mithilfe spezieller Messtechnik eine relativ naturgetreue Analyse der untersuchten Fragestellungen ermöglichen.

Weiterhin werden diese Messdaten aus den Modellversuchen, teils in Kombination mit entsprechenden Naturmessdaten, für die Kalibrierung numerischer Modelle verwendet, die fortlaufend am Institut weiterentwickelt werden.

Mithilfe der numerischen Modelle können sowohl verschiedene Strukturvarianten, als auch messtechnisch schwer zugängliche Bereiche im Hinblick auf Strömungen, Druckverteilungen oder eine Kolkbildung untersucht werden.

## **GIGAWIND alpha ventus – Teilprojekt 1 „Wave loads derived from test field data and CFD simulation of breaking wave loads in combination with physical model tests“**

*Dipl.-Ing. Arndt Hildebrandt, M. Sc. Tri Cao Mai, Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann*

### Introduction

In 2010, wind energy increased the most in the field of renewable energy, followed by hydropower and photovoltaic (Global Status Report - REN21, 2011). This underlines the global request for wind energy and the currently growing demand for offshore wind solutions. Thousands of Offshore Wind Energy Converters (OWEC) are projected and also partly installed in the North Sea, and thus designs are optimized constantly for batch production. The above-named aspects provide the motivation to further increase knowledge about the hydrodynamics of the flow field, pressure characteristics, and total forces due to impacting waves on offshore foundation structures, since extreme waves are generally a major design concern. Furthermore, non-breaking wave loads need to be calculated for fatigue analysis. The hydrodynamics around offshore structures for the determination of the wave forces are generally taken into account by coefficients used in combination with the Morison equation (Morison et al. 1950). However, published

drag- and inertia coefficients scatter quite significantly in literature, which is one reason among others for the measurements and investigations in the alpha ventus test field.

### Breaking wave loads

The basic problem is to predict extreme wave forces on structures due to the rapid and highly variable pressures in the slamming area. The complex transient flow field of breaking waves depends on several aspects like wave steepness, wave asymmetry, and front shape of the breaker. Therefore, large scale (1:12) physical model tests and CFD simulations (Figure 1) were performed on a tripod support structure for the investigation of loads and fluid kinematics in the near and far field of the structure due to breaking waves. The model tests were conducted with breaking wave heights of 1.5 m and periods of 4.96 s in the large wave flume of the “ForschungsZentrum Küste” (FZK, Hanover) in spring 2010.

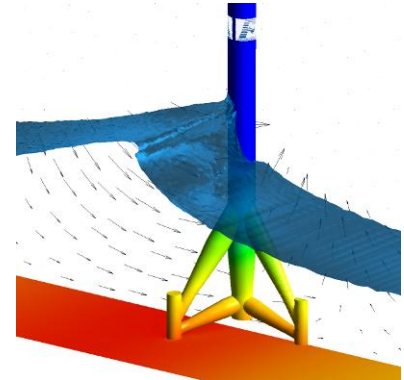


Figure 1: Physical modeling (1:12) of the tripod structure in the large wave flume (left) and in the CFD model (right).

Time series of wave gauges, pressure sensors, current meters and strain gauges were recorded with sampling rates up to 10 kHz. The numerical model was calibrated by 30 pressure sensors distributed inside and outside of the impact area as well as by wave gauges ahead and next to the tripod in the large wave flume.

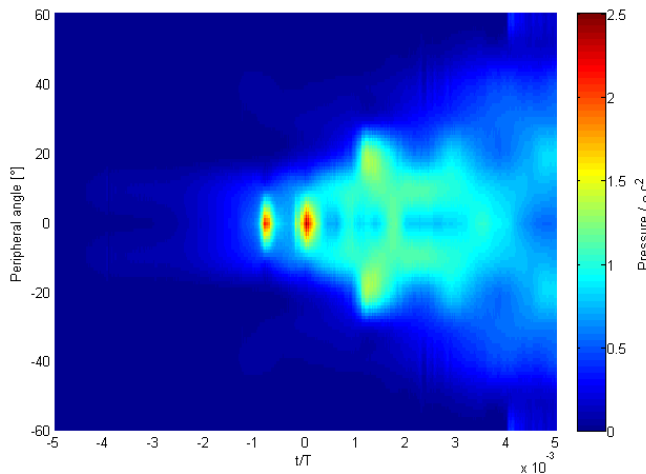


Figure 2: Dynamic pressure due to wave slamming referenced to stagnation pressure on a level with the wave crest

Figure 1 illustrates the load case characterized by a partly vertical water front with intensive pressures at high elevations and maximum local forces. Wave impacts including water tongue formation are affected by highly complex velocity distributions and double peak loads with the frequency depending on the wave celerity and shape, which is also reported by Chan et al. (1995) and will be shown in the full presentation (e.g. Figure 2). Furthermore, the breaking wave loads with variation in time will be presented for three different states during the process of breaking. The measured impact areas with space and time resolved pressures will be compared to the CFD simulations and line forces will be derived.

The estimated time depending total impact loads as well as the points of acting above the bottom will be given.

### Non-breaking wave loads

Figure 3 shows exemplarily  $C_M$  force coefficients estimated from a 30 minutes data set of the water pressure sensors around the main column of the tripod M7 at the alpha-ventus test field. This measurement

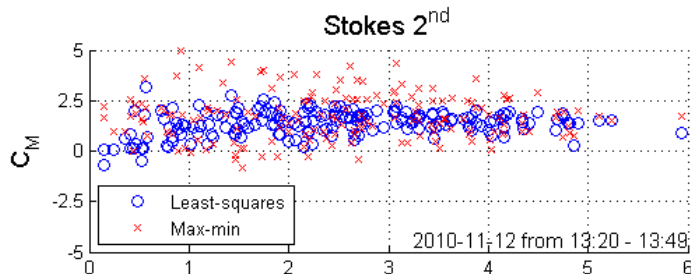


Figure 3:  $C_M$  coefficients derived from storm conditions with  $H_{sig} = 7.2$  m at the alpha ventus test field

was recorded on the 12th of November 2010 during a severe sea state condition with a significant wave height of 7.19 meter and a peak wave period of 11.31 seconds. Various wave theories (Airy, Stockes 2nd and 5th order) are used to estimate the corresponding wave kinematics. The comparison of the least-squares method (wave-by-wave fitting) and the max-min method reveals less scattering for the first mentioned method. Although the

results are still dominated by scattering, characteristics of the coefficients derived from the test field data will be presented.

### Acknowledgement

The support of the research project "Holistic design concept for OEWK support structures on the base of measurements at the offshore test field alpha ventus" (Contract No 0325032) by the German "Federal Ministry for the Environment, Nature Conversation and Nuclear Safety" is gratefully acknowledged.

### References

- REN21, 2011: Renewables 2011 Global Status Report, Paris, REN21 Secretariat  
 MORISON, J.R., O'BRIEN, M.P., JOHNSON, J.W., SCHAAF, S.A.: The force exerted by surface waves on piles. Petroleum Transactions, AIME, Vol. 189, 1950  
 Chan E.S., Cheong H.F., Tan B.C., (1995): Laboratory study of plunging wave impacts on vertical cylinders, Coastal Engineering, Vol. 25, Issue 1-2, pp 87-107

## **GIGAWIND alpha ventus – Teilprojekt 1 „Dynamic Pressures upon a Large Mono-pile under Multi-directional Non-breaking waves“**

*M. Sc. Tri Cao Mai, Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann*

### Introduction

Wave pressures upon offshore structures have been investigated in the last decades. Most investigations take analysis of wave pressures on vertical cylinder structures in uni-directional wave conditions into consideration. It has been seen that previous studies show remarkable results in both experimental and numerical configurations regarding unidirectional waves (Kriebel, 1990; MacCamy&Fuchs, 1954; Skourup, 1994). Yet, there are still few studies on the wave pressures upon offshore structures under multi-directional waves (Skourup, 1994; Zhu, 1993). This study investigates wave pressure distribution on the circumference of an offshore wind energy structure, i.e. a mono-pile structure and the main column of a tripod structure due to multi-directional waves in a newly constructed wave basin with a state-of-the-art multi-directional wave making facility. A multi-directional diffraction wave theory will continuously be developed and applied.

In addition, field data of dynamic wave pressures upon the circumference of an offshore tripod structure have been collected since 2010 in the test field alpha-ventus in the North Sea (Hildebrandt et al., 2009; Mai et al., 2011). Additionally, a small scale physical model is experimented in a 3D wave basin to make a

comparison with the field measurements and the theory development. The measurements have been analysed and compared with the uni-directional wave theory. The preliminary results show that there is well agreement between the physical model experiment and the theory developed by MacCamy&Fuchs (1954) and Skourup (1994).

### Experiments

A small scale physical model was constructed in the new wave basin in Hanover, Germany to examine different multi-directional waves attacking on a mono-pile structure. The waves vary from regular waves to multi-chromatic waves and with varied diffraction parameter,  $ka$ , in which  $k$  is the wave number and  $a$  is the radius of the mono-pile (see Table 1). The tests were performed with a water depth of 0.6 meters. The pressures upon the surface of the mono-pile were measured by using pressure sensors mounted at various levels ( $|z/h| = 0.07$  to  $0.77$ ;  $z$  is the submergence of pressure sensor,  $h$  is the water depth in the basin) on the surface of the structure (see Figure 1). Water elevations are measured synchronously next to the structure.

Table 1. Experimented waves

TYPE	H or H <sub>s</sub> (m)	ka (-)	γ (-)	s (-)	θ <sub>max</sub> (deg.)	NUMBER OF DIRECTIONS
REGULAR	0.02 – 0.05	0.62 – 2.4				1
2-D JONSWAP	0.02 – 0.05	1.0 – 2.0	3.3			1
SHORT-CRESTED WAVES	0.05	1.0	3.3	1	20 - 60	Multi
MULTI-CHROMATIC	0.02 – 0.03	1.0 – 2.0			10 - 60	2 - 7

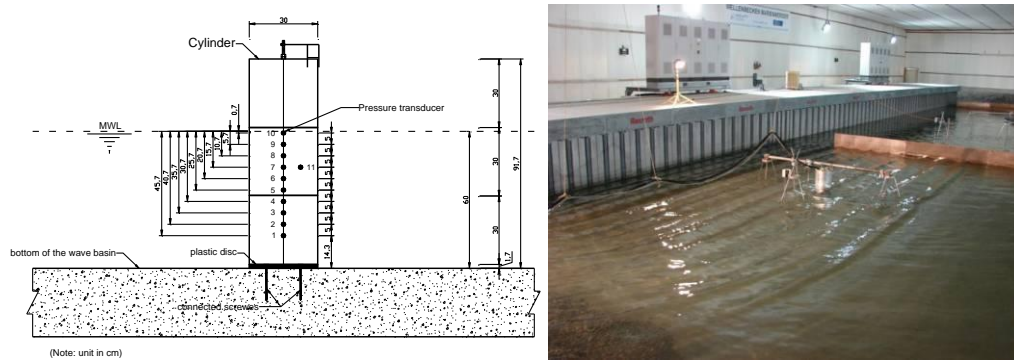


Figure 1. Configuration of physical model in the 3D wave basin

### Theoretical aspects

In diffraction regime, i.e. the diameter of the mono-pile is large compare to the wave length ( $D/L > 0.2$ ), from the linear diffraction feature of potential flow, the total potential function ( $\phi$ ) can be written as the sum of two potential functions:

$$\phi = \phi_i + \phi_s \quad (1)$$

In which,  $\phi_i$  is the potential function of the undisturbed incident wave and  $\phi_s$  is the potential function of the scattered (reflected and diffracted) wave. Therefore, according to MacCamy & Fuchs (1954) the dynamic pressure exerts on the surface of the cylinder can be expressed as:

$$p(t) = \frac{\rho g H \cosh(k(z+h))}{\pi k r_0 \cosh(kh)} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{\varepsilon_p i^p}{H_p^{(1)}(k r_0)} \cos(p\theta) \cdot e^{-i\omega t} \quad (2)$$

In which,  $\rho$  is the water density,  $g$  is the gravity acceleration,  $H$  is the wave height,  $k$  is the wave number,  $h$  is the water depth,  $z$  is the depth of pressure sensor's submergence which is measured positive upward from still water level,  $r_0$  is the radius of the cylinder and  $\theta$  is the angle of orientation of the pressure sensor with respect to the incident wave direction.  $H_p^{(1)}(k r_0)$  is the derivation of the first kind of Hankel functions.

Additionally, the wave height enhancement factors in the vicinity of a large mono-pile were found by Skourup (1994).

### Summary of the results

Preliminary results of experimental data in the wave basin are depicted in Figure 3. In this figure the wave height enhancement factors of wave gauge wp2 and wp3 are presented. The results show that the measurement data are mostly fitted to the theory estimation lines for different diffraction parameter  $ka$  ( $ka = 0.61$  to  $2.4$ ), in which  $k$  is the wave number and  $a$  is the radius of the mono-pile. The wave gauge wp2 and wp3 are at position of  $x/a = -2$  and  $-4$ , respectively.

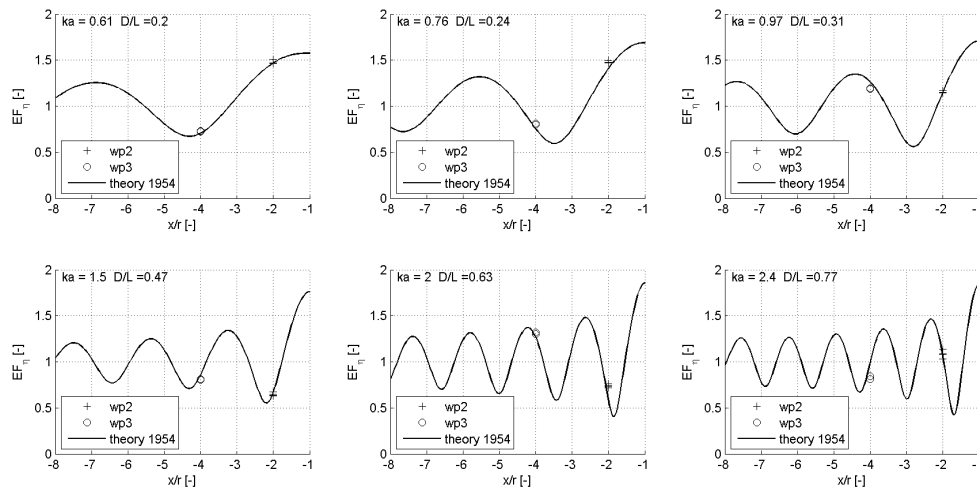


Figure 3. Wave height enhancement factors along negative x-axis line

### Conclusion and outlook

Preliminary results of the experimental data show that the wave height enhancement factors agree well with the theory developed by MacCamy&Fuchs (1954) and Skourup (1994).

As the objective of this study is to investigate pressures upon the surface of a large mono-pile under multi-directional waves in regimes of diffraction in the field and laboratory, further theory development and investigation are needed and will be implemented in the final paper. One of the most important developments is the combination of waves coming from different directions and then we need to know how the combination of these waves is diffracted around the mono-pile.

### References

- Hildebrandt, A., Stahlmann, A. and Schlurmann, T., "Field data derived from Offshore Wind Energy Converters – Assessment and correlation of dynamic wave loads". Proc. of the 33rd IAHR, Vancouver, pp. 2035-2045 (2009).
- Kriebel, D.L., "Nonlinear wave interaction with a vertical circular cylinder. Part 1: Diffraction theory". Ocean Engineering, Vol. 17, No. 4, pp 345-377 (1990).
- MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A., "Wave forces on piles: a diffraction theory". U.S. Army Corps of Engineering, Beach Erosion Board, Washington, D.C., Tech. Mem. No. 69 (1954).
- Mai, T.C., Hildebrandt, A. and Schlurmann, T., "In-line force on a tripod foundation structure". 8. FZK-Kolloquium - Maritimer Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Forschungszentrum Küste, Hannover (2011)
- Skourup, J., "Diffraction of 2-D and 3-D irregular seas around a vertical circular cylinder". OMAE, Volume I, Offshore Technology, ASME, 293-300 (1994).
- Zhu, S., "Diffraction of short-crested waves around a circular cylinder". Ocean Engineering, Vol. 20, No. 4, pp 389-407 (1993).



## **GIGAWIND alpha ventus – Teilprojekt 5 „Physical and Numerical Modeling of Scour Development at Tripod OWT Foundations“**

*Dipl.-Ing. Arne Stahlmann, Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann*

### Introduction, Objective & Methodology

Regarding foundation structures for offshore wind turbines (OWT) in deep water it is well known that in most cases scouring phenomena occur around the foundations. In the first German offshore wind test site *alpha ventus* in the North Sea, six converters have been founded on tripod structures in water depths of 30m in 2009. Due to the complexity of this foundation type, significant knowledge gaps in scour development and its probable effects on the stability of the structure are given, leading to lacking practical design guidelines.

Within a sound research initiative, investigations on scour around complex structures like the tripod have been carried out. It consists of a combination of local scour monitoring in the test site, undertaken by the German Federal Maritime and Hydrographic Agency as a long-term measuring campaign, as well as physical and numerical modeling of the scour processes. Therefore, physical modeling was carried out by means of 1:40 laboratory tests and 1:12 large-scale model tests (Figure) in wave flumes, whereas numerical simulations on scouring processes and sensitivity analyses have been conducted using CFD code. By this approach, the influences of sea state and tidal-induced flow conditions as well as physical processes in general and in detail could be investigated and structural parameter leading to scour could be identified.

### Physical Modeling

From the investigations carried out so far it can generally be concluded that scour does not only occur directly at the foundation piles but also around and below the structure as a combination of local and global scour, which in this form could not be expected when using common practice design rules and approaches, e.g. given in Sumer & Fredsøe (2002) or Zanke et al. (2011), but which has to be considered when regarding the stability of the soil and the dynamics of the structure. Results of the laboratory and large-scale physical model tests in wave flumes can e.g. be found in Stahlmann & Schlurmann (2010). Certain differences in local scour depths depending on the model scale and an overall dependency on the load conditions could be found. A comparison of scour depths from the physical model and in-situ data shows at least a qualitatively, overall good agreement between model results and nature, so that local and global scour developments with erosion and accumulation areas could be reproduced in sufficient quality.

Due to limitations in the laboratory facilities that have been used for the tests, only unidirectional wave loads without the presence of a tide-induced current could be modeled so far, presumably leading especially to the observed differences in scour depths between large-scale tests and in-situ data.



Figure 1: Tripod model structure and scour pattern in the GWK wave flume

### Numerical Modeling

To circumvent this constraint, numerical simulations have additionally been carried out using CFD methods. For the tests, the open-source CFD package OpenFOAM® (released by OpenCFD®) has been used. A multiphase solver has been chosen, using RANS equations and a k-Omega-SST turbulence model. In addition to investigations on a fixed bed, a moving mesh approach simulating the scour development on a moving bed has been implemented (Figure 2c). The scour model including bed load and

suspended load is solving the Exner equation for sediment continuity and is similar to the idea given in Roulund et. al. (2005). Using this setup, simulations on flow pattern and scour development around a tripod foundation on different model scales and with combined effects of wave loads and currents are performed. Furthermore, parameter studies on structural variations leading to enhanced or reduced erosion and therefore scour formation are carried out. Out of this, insights on the physical processes of scouring around the foundations are gained, which can lead to optimized design guide lines for this complex foundation type.

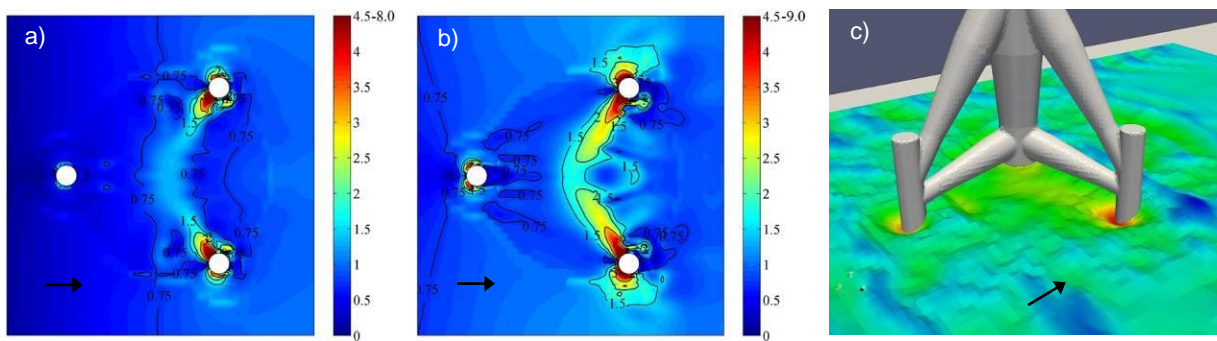


Figure 2: Bed shear stress amplification factors for typical 1:40 tripod model scenarios with a) wave load, b) wave load + current, under the wave crest in OpenFOAM. c) Scour simulation in the developing scour stage (waves + current)

## Conclusions

Investigations on scouring around tripod foundation structures have been and are further carried out using a combination of physical modeling, in-situ measurements and numerical CFD simulations. Using the latter, further experience on the complex characteristics of the scour development under combined wave and tide-induced current loads can be gained, in order to fill gaps in knowledge of scour progression and its probable effects on the stability of complex tripod structures.

## References

- Roulund, A., Sumer, B.M., Fredsøe, J. (2005): Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics*, 534, 351-401
- Stahlmann, A., Schlurmann, T. (2010): Physical Modeling of Scour around Tripod Foundation Structures for Offshore Wind Energy Converters, *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering*, No. 32 (2010), Shanghai, China, Paper 280
- Sumer, B.M.; Fredsøe, J. (2002): *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Zanke, U.C.E.; Hsu, T.-W.; Roland, A.; Link, O.; Diab, R. (2011): Equilibrium scour depths around piles in noncohesive sediments under currents and waves. *Coastal Engineering*, Vol. 58, 986-991

## Hydrodynamic of an adjoined circular disc to a cylinder exposed to regular waves and its effects against wave scouring process

*M. Sc. Farhad Nazarpour, Linda Ippers, Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann*

## Synopsis

Influence of an adjoined disc in a cylinder exposed to waves is investigated using particle image velocimetry (PIV) technique. PIV results are verified with numerical models applying to potential theory at undisturbed flow condition. Experiments were conducted for a single cylinder and cylinder with an adjoined disc having various diameters. PIV investigations were made for upstream and downstream of the cylinder varying in three parallel layers on each side. Field of exposure was specifically focused on the connection



spot between cylinder and the bed. Therefore; the acquired data was used for calculation of shear stress and turbulence parameters in these areas intending to identify the disc effect on shear stress values. The flow characteristics primarily are based on the Karpenter Keulegan ( $Kc$ ) number varying from 5 to 8.5. As research is focused on the role of disc against scouring process, different computational methods are used for vortex detection, among which circulation integration around each vector cell has performed better quality.

### Experimental set-up

Experiments were conducted in the wave flume of Franzius institute of the University of Hannover. The flume is about 110 m long, 2.2 m wide and 2 m deep and equipped with a piston-type generator. It is constructed with concrete, and lateral walls are partly made of glass appropriate for visual investigation. Experiments were conducted at the window section located about 28.42 m far from the wave paddle. Additional to PIV system five wave gauges and one EMS probe measured the water level and undisturbed orbital velocity respectively. The diameter of the selected cylinder was 17 cm, and the disc sizes varied from 25 to 45cm. The cylinder surface was colored to black and the discs had from Plexiglas made to avoid any reflections and laser sheet misalignment within the experiments. As the flume surface was slightly reflective, a black thin metal plate in the acquisition area. The cylinder was firmly fixed from the top, and camera housing and laser arms were also fixed from the bottom to avoid any vibrations during the measurements. The applied PIV system is specifically an underwater PIV system that is equipped with two 5 MP cameras and a YAG double plus Laser having 200 mJ energy with a maximum frequency of 15 Hz. The combination of cameras and laser within double frame imaging performs the maximum frequency of 7.2 Hz. In the experiments only one camera with a 28 mm f/1.8 ultraviolet canon lens for 2D measurements was used. The field of view after calibration was about 200 to 250 mm that was cut and masked due to less particle concentration on the top of exposures. At the end some dye visualization using PIV was carried out. Figure 1 shows a schematic set-up of the experiments and the positioning of the laser sheet and viewing angle of the camera.

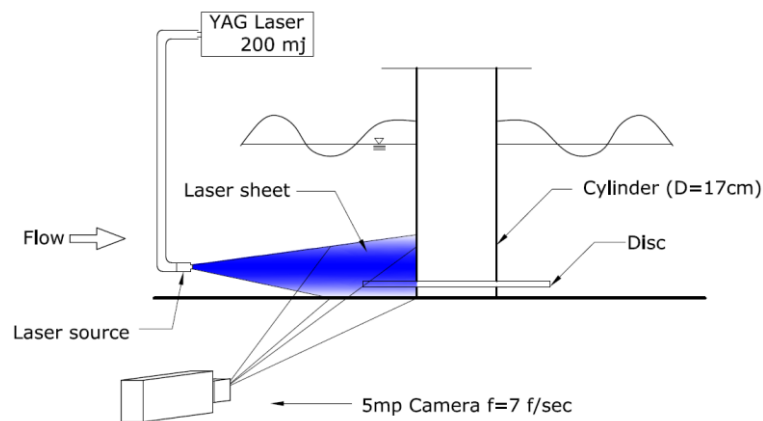


Figure 1: Schematic experimental set-up with under water PIV system

### Data processing

High turbulent activity around the object, especially at high  $Kc$  numbers is attributed to development of boundary layers and thus; flow separations. Consequently development of horse shoe vortices is an additional reason of perturbing flow around the object. Therefore; specific PIV data processing techniques are taken into account. In this study images were entirely pre-processed using subtract-offset method. Vector calculation was done using sequential cross-correlation and interrogation windows were all deemed 64x64 pixels including 75 % overlap. Wrong vectors were filtered or removed by using Q-factor filtering, Median filter and vector range filtering methods. At the end vectors were applied to a slight smoothing function. The primary checking method was associated with particle size and density, and secondary checks were

done on correlation maps. Figure 2 shows an example of good quality for correlation map underneath the disc at near wall area.

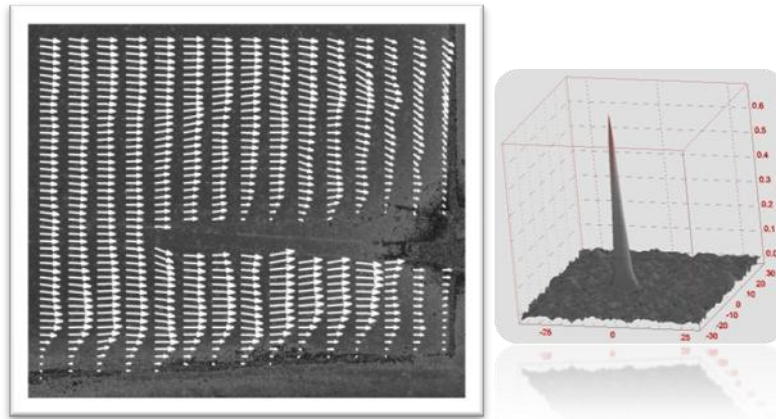


Figure 2. Left: Vector field around the adjoined disc near the bottom, Right: correlation map of one interrogation window underneath the disc (diameter=35cm)

### Data Analyses

Data analyses were focused on flow characteristics at the cylinder bed in various cases and disc arrangements. As mentioned, the primary difference between the cases is from KC number. Therefore; looking into main causes of scouring process, it is of high importance to compute shear stress and turbulent parameters around the cylinder in different conditions. Having good quality of vector fields and well distributed correlation maps around the walls, the velocity gradients are readily computed, hence; bottom shear stress is obtained as

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (1)$$

where  $\mu$  is the dynamic viscosity. Average velocity is calculated using the following equation, where the velocity value on each phase and case are respectively calculated.

$$\langle u_i \rangle = \sum_{j=1}^N u_i(t + jT) \quad (2)$$

which means the average velocity of  $i$ th phase of a case having the wave period of  $T$  sec starting on  $t$ .  $N$  represents the number of waves. In this study a certain number of waves were needed to decrease uncertainties.

By having the above methods for average velocity calculation, turbulent properties are obtained. Turbulent intensity, turbulent production and dissipation were the parameters which were respectively computed as well.

Secondary analyses were also done for calculation of pressure gradient on the floor. In this study a method is employed to use Poisson equation (eq. 3) or equation 4 suggested by Van Oudheusden et al. (2007) to obtain pressure fields and pressure gradients.

$$\nabla^2 p = -\rho \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U}) \quad (3)$$

$$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} = \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \rho \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} - \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4)$$

As horse shoe vortices play an important role within scouring process, special attention is paid to vortex detection methods. In general vortices are created due to conservation of angular momentum and are not necessarily detectible as a circular shape especially when several vortices are interact with each other. A vortex can be characterized with several factors such as location, circulation, core radius, drift velocity, peak vorticity, and maximum circumferential velocity. Comparing several vortex calculation methods an

alternative differentiation scheme is used. Basically this method is to apply path integration around every interrogation window to obtain the average vorticity. It is defined as follows (M. Raffel et al. 2007):

$$\overline{(wz)}_{i,j} = \frac{1}{A} \Gamma_{i,j} = \frac{1}{A} \oint_{\Gamma_{i,j}(x;Y)} (\mathbf{U}, \mathbf{V}) \cdot d\mathbf{l} \quad (5)$$

### Conclusion

Flow hydrodynamic around a cylinder with and without an adjoined circular disc is studied. The study especially focuses on shear stress fluctuations in different cases and disc arrangements. PIV technique as the experimental method has performed well, even though much attention must be paid to uncertainty factors and analyses. Deep down PIV data can be easily distorted and appear unrealistic. Therefore; data verification with other instruments or numerical investigation is highly recommended. Adjoining the disc to the cylinder seems to work as an obstacle against back flow effect on the bottom and development of vortices. Basically the vortices are generated when flow direction entirely changes. This effect occurs at the time when high shear stresses are detected.

### References

- RAFFEL M., C. WILLERT, S. WERELEY, J. KOMPENHAUS, 2007: Particle Image Velocimetry, a practical guide, 2nd edition, Springer
- VOLLMERS H., 2001: Detection of vortices and quantitative evaluation of their main parameters from experimental velocity data, Journal Measurement Science and Technology 12, pp. 1199-1207.
- FUJUSAWA N., S. TANAHASHI, K. SRINIVAS, 2005: Evaluation of pressure field and fluid forces on a circular cylinder with and without rotational oscillation using velocity data from PIV measurement, Journal of Measurement Science and Technology. 16, pp. 986-996.
- PHILIP L.-F. LIU, KALED A. AI-BANAA, EDWIN A. COWEN, 2004: Water wave induced boundary layer flows above a ripple bed, PIV and water waves volume 9, world scientific, pp. 81-117.

## **STRABAG-Schwerkrafftament – Kolkbildung und Kolkchutz**

*Dipl.-Ing. Mayumi Wilms, Dipl.-Ing. Arne Stahlmann, Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann*

### Motivation

Für die Geometrie des neu entwickelten STRABAG-Schwerkrafftaments lagen keine ausreichenden Erkenntnisse hinsichtlich der Gefahr einer Kolkbildung um das Fundament vor. Um die Strömungsverhältnisse, die Formen und Tiefen der Kolke sowie die Wirksamkeit und damit Gebrauchstauglichkeit eines gewählten Kolkchutzes bestehend aus geotextilen Sandcontainern zu untersuchen und beurteilen zu können, wurden vom Franzius-Institut zunächst kleinmaßstäbliche, grundlegende Laborversuche im Wellenkanal in der Wasserbauhalle des Franzius-Instituts (WKS) als Parameterstudie im Maßstab 1:50 durchgeführt, die in Abstimmung bzw. Rückkopplung mit den hydronumerischen Berechnungen der Fa. FlowConcept durchgeführt wurden und im Anschluss durch ausgewählte Versuchsreihen im großskaligen Maßstab (1:17) im Großen Wellenkanal (GWK) des Forschungszentrum Küste (FZK) validiert wurden. Die Messungen im GWK umfassten außerdem Untersuchungen zum Nachweis eines Gesamtkolkchutzesystems für das Schwerkrafftament sowie den Einzelnachweisen der Lagestabilität verschiedener geotextiler Sandcontainer im Maßstab 1:10.

### Physikalische Modellversuche

Das Untersuchungsprogramm sah vor, die Umströmung des Bauwerks sowie Kolkprozesse anhand von Laborversuchen unter Berücksichtigung abgestimmter Lastparameter wie Wasserstände, Wellenhöhen und Wellenperioden sowie der Ausrichtung des Fundaments und der Lage über dem Meeresboden im Wellenkanal zu untersuchen. Es wurde sowohl im WKS als auch im GWK ein feingestufte Feinsand mit

einer mittleren Korngröße von 0,15 mm verwendet und als künstliches Sandbett mit Anrampungen davor und danach eingebaut. In den Untersuchungen der Kolkgenese mit und ohne Kolkchutzsystem wurde das Fundament mit 5000 Einzelwellen des 50-jährlichen Extremereignisses belastet. Dieses entspricht einem ca. 17-stündigen Sturmereignis und stellt somit ein „worst case“ Szenario dar. Es wurden sowohl regelmäßige als auch irreguläre Wellen (JONSWAP Spektrum) erzeugt. Die relevanten Daten wie Umströmungsgeschwindigkeiten und Kolkiefen wurden in regelmäßigen Abständen gemessen. Zur Ermittlung eines geeigneten Sandcontainertyps (insbesondere hinsichtlich Abmessungen und Gewicht) für die Kolkchutzmaßnahme wurden fünf verschiedene Typen geotextiler Sandcontainer auf der horizontalen Sandbettfläche in Einzel- und Gruppenanordnung sowohl längs als auch quer zur Wellenangriffsrichtung verlegt, s. Abbildung 1 Die Sandcontainertypen unterschieden sich in Material, Zuschnittabmessungen, Befüllungsgrad und Gewicht.



Abbildung 1: Versuchsaufbau der Untersuchung zur Lagestabilität der geotextilen Sandcontainer im GWK im Maßstab 1:10

Für den Nachweis des Gesamtkolkchutzsystems wurden Versuchsreihen mit beweglicher Sohle, einer Wellenangriffsrichtung von  $45^\circ$  (bezogen auf die horizontale Fundamentausrichtung) und einem Seegangsspektrum (50-jährliches Extremereignis) entsprechend den hydraulischen natürlichen Randbedingungen durchgeführt. Eine Versuchsreihe ohne Kolkchutz diente dabei als Referenzmessung. Es wurden drei Varianten von Kolkchutzmaßnahmen untersucht. In allen drei Varianten kam ein Sandcontainer mit  $2,05 \times 2,05$  m Abmessung,  $1,5 \text{ m}^3$  Füllvolumen und 2,7 t Gewicht (Naturmaßstab) als geotextiler Sandcontainer zum Einsatz. Dieser wurde zweilagig und zufällig im vorgegebenen Kolkchutzkreis mit dem Durchmesser 52,50 m (Naturmaßstab) eingebaut. Das Fundament war im Sandbett eingebunden ( $d_E = 3$  m in Natur). Weitere Informationen zum Versuchsaufbau und -programm sind in Wahrmond et al. (2011) und Wilms et al. (2011) zu finden.

### Ergebnisse

Die Strömungsuntersuchungen ergeben, dass die kolkgefährdeten Gebiete an den hinteren, quer zum Wellenangriff befindlichen Aufstandsflächen auftreten, besonders bei einer Wellenangriffsrichtung von  $45^\circ$ , und Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 4,5 m/s (Naturmaßstab) aufweisen. Außerdem lässt sich beobachten, dass das Fundament bei einem Ruhewasserspiegel von 37,5 m (Naturmaßstab) die Strömung bis ca. 15 m über Boden beeinflusst. In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung im WKS exemplarisch für eine Höhe über Boden und für eine Parameterkombination dargestellt.



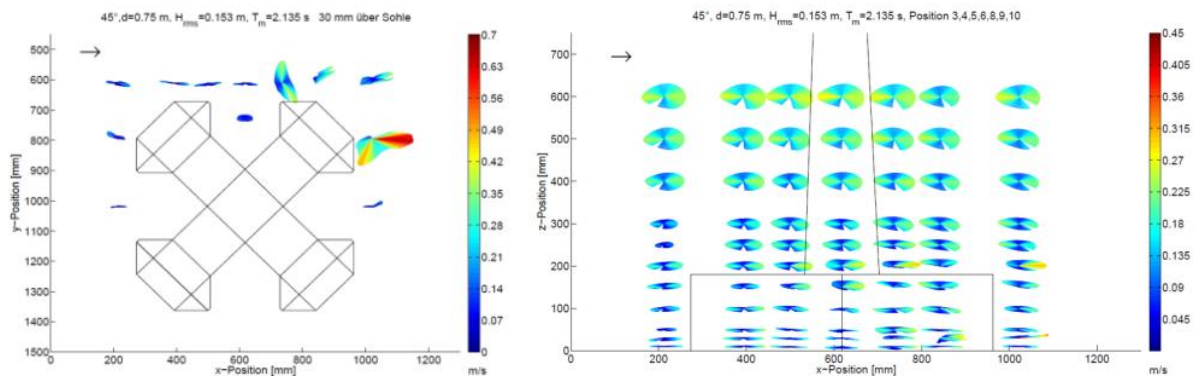


Abbildung 2: Ergebnisse der punktuellen Geschwindigkeitsmessung ermittelt über einen Wellendurchgang im WKS im Maßstab 1:50 (links: Draufsicht, rechts: Seitenansicht, Wellenangriffsrichtung 45°)

Die Kolkuntersuchung im WKS bestätigt die Ergebnisse der Strömungsuntersuchung, denn der größte, wellen-induzierte Kolk entwickelt sich an den quer zum Wellenangriff befindlichen Aufstandsflächen, s. Abbildung 3.

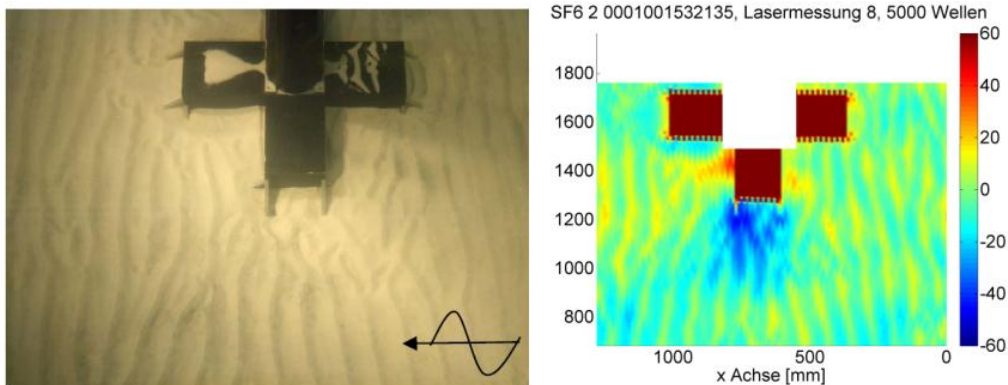


Abbildung 3: Zustand der Kolkentwicklung nach der Belastung mit 5000 Wellen im WKS im Maßstab 1:50 (links: Foto, rechts: Auswertung der Lasermessung, Wellenangriffsrichtung 0°)

Die umfangreiche Studie im GWK bestätigt die Ergebnisse der kleinmaßstäblichen Untersuchungen im WKS. Die Untersuchung zur Lagestabilität geotextiler Sandcontainer ergibt, dass der für den Prototyp geplante Sandcontainertyp lagestabil ist und die Mindestgröße darstellt, die den gegebenen hydraulischen Randbedingungen widerstehen soll.

Die Untersuchung zur Wirksamkeit der Kolk Schutzmaßnahme ergibt, dass es bei der für den Prototyp geplanten Kolk Schutzmaßnahme nach der Belastung mit 5000 Einzelwellen des 50-jährlichen Extremereignisses zu keiner signifikanten Kolkbildung kommt, s. Abbildung 4 Die Wirksamkeit der Kolk Schutzmaßnahme ist unter den gegebenen Randbedingungen im Modell nachgewiesen und die geplante Kolk Schutzkreisfläche somit als ausreichend anzusehen.



Abbildung 4: Zustand der Kolkentwicklung vor (links) und hinter (Mitte) dem Schaft, Ergebnisplot des Fächerecholots (rechts) nach 5000 Wellen im GWK im Maßstab 1:17 (Wellenangriffsrichtung 45°)

---

## Referenzen

- WAHRMUND, H., WILMS, M., STAHLMANN, A., HEITZ, C., SCHLURMANN, T. (2011): Kolkbildung und Dimensionierung des Kolkschutzes eines OWEA-Schwerkraftfundaments, 8. FZK-Kolloquium - Maritimer Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Forschungszentrum Küste, S. 93-104, 10. März 2011, Hannover
- WILMS, M., WAHRMUND, H., STAHLMANN, A., HEITZ, C., SCHLURMANN, T. (2011): Kolkbildung und Dimensionierung des Kolkschutzsystems eines OWEA Schwerkraftfundaments, HTG-Kongress 2011, 07.-10.09.2011, Würzburg, Veröffentlicht in: Tagungsband HTG-Kongress 2011, Herausgeber: Hafentechnische Gesellschaft e.V., Hamburg



## Open Ocean Multi-Use (OOMU) – Integrative Nutzung von Offshore- Tragstrukturen und Aquakulturen

M.Sc. Benjamin Franz, Dr.-Ing. Nils Goseberg, Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann

### Einleitung

Daten der Welternährungsorganisation FAO zeigen einen Anstieg des Bedarfes an Lebensmitteln der Fisch- und Algenindustrie in den letzten Jahrzehnten, der sich auch in einem steigenden Trend zur Fisch- und Algenaufzucht in Aquakulturen widerspiegelt. In dem multidisziplinären Forschungsprojekt Open Ocean Multi-Use soll daher neben anderen Fragestellungen die Realisierbarkeit einer Integration von Fischkäfigen im Bereich der Gründungsstrukturen von Offshore-Windanlagen untersucht werden.

Hierzu wurden am Franzius-Institut physikalische Modellversuche durchgeführt, deren Ziel die Untersuchung (i) der durch Fischkäfige verursachten Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten, (ii) der an den Befestigungspunkten verursachten Kräfte in der Gründungsstruktur und (iii) der Veränderung in Bezug auf die Kolkbildung war. Die Versuche wurden zum einen mit einem zylinder- und zum anderen mit einem kugelförmigen Fischkäfig durchgeführt. Weiterhin wurde der Einfluss mehrlagiger Netze betrachtet.

### Versuchsaufbau und Messtechnik

Die Modellversuche wurden im Wellenkanal Schneiderberg durchgeführt. Dieser ist 110,0 m lang, 2,20 m breit, 2,0 m tief und kann mit Wasserständen von bis zu 1,10 m betrieben werden. In 42 m Entfernung zum Wellenblatt wurde ein 0,25 m tiefes und 4,50 m langes, künstliches Sandbett aus fein gestuftem Sand ( $d_{50} = 0,148$  mm) aufgebaut, in welches das TriPile-Fundament (Maßstab 1:40) im Rahmen der Untersuchungen zu Geschwindigkeits-, Kraft- und Kolkuntersuchungen im lokalen Umfeld installiert wurde. Der Wasserstand während der Versuchsdurchführungen betrug 1,00 m über der Sohle. Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 1 zu erkennen.

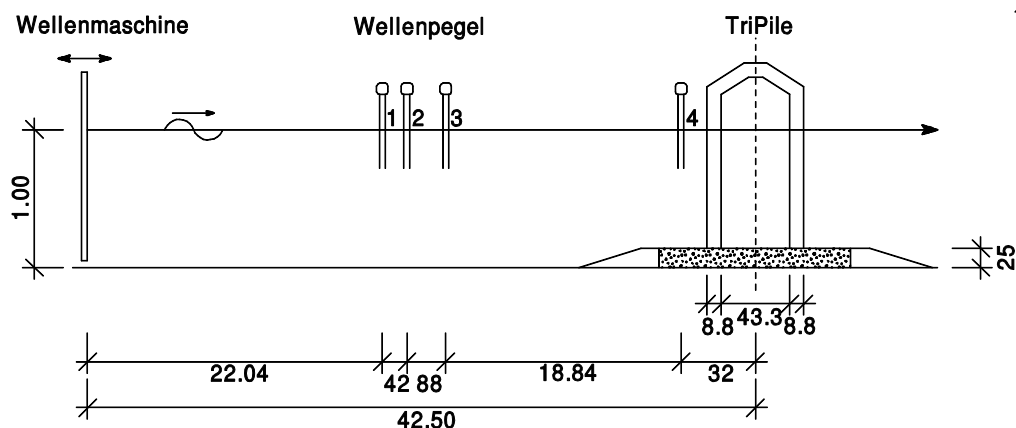


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Querschnitts des Wellenkanals mit Anordnung des TriPiles und der einzelnen Wellenpegel bezüglich der Wellenmaschine

Zur Ermittlung der Wellenhöhen und ihrer Perioden wurden konventionelle Wellenpegel genutzt, welche auf der Funktionsweise des Widerstandmessprinzips beruhen. Die Wellenpegel unterteilen sich in eine Pegelharfe und Einzelpegel. Die Pegelharfe besteht aus drei in definierten Abständen positionierten Wellenpegel und wird zur Reflexionsanalyse der einlaufenden, reflektierten und transmittierten Wellenzüge verwendet. Weitere Einzelwellenpegel befinden sich auf der Höhe des TriPile-Fundaments, um in unmittelbarer Nähe des Fundaments die Oberflächenauslenkung der Welle messen zu können.

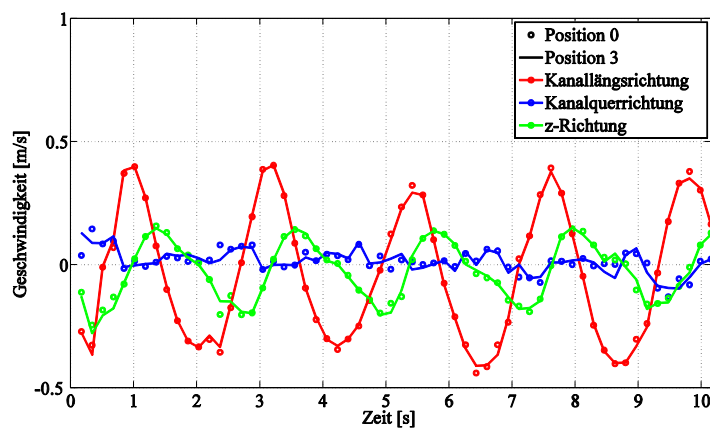
Zur Erfassung der Geschwindigkeiten kommen in Abhängigkeit von der jeweiligen Messposition zwei Systeme zum Einsatz. Die Messungen der dreidimensionalen Strömungsfelder wurden durch ein „Particle Image Velocimeter (PIV)“ der Firma LAVISION durchgeführt. Für die Geschwindigkeitsmessungen in schwer zugänglichen Bereichen innerhalb des TriPiles wurde ein „Acoustic Doppler Velocimeter“ (ADV) zur Erfassung von Geschwindigkeiten in drei Raumrichtungen in einem Punkt mit hoher Frequenz verwendet.

Die Erfassung der Kolkflächenentwicklung basiert auf einem optischen Verfahren mittels Unterwasserkameras. Es kommen drei Kameras des Typs Eyseo Ecoline der Firma Abus zum Einsatz. Eine Kamerarichtung ist orthogonal zur Kanalwand in der Mittelachse des Käfigs angeordnet. Die weiteren Kameras sind hinsichtlich ihrer Ausrichtung so platziert, dass das gesamte TriPile-Modell mittels des Blickwinkels der Kameras (78°) zu überblicken ist. Neben der reinen Dokumentation der Kolkflächenentwicklung erfolgt die quantitative Erfassung der Kolkflächen mittels Maßstäbchen.

### Ergebnisse

Mit Blick auf die Veränderung von Strömungsgeschwindigkeiten ergeben sich die folgenden Sachverhalte: Ohne Beeinflussung durch die TriPile-Struktur oder den Aquakulturrücklauf (AKK) liegen die Geschwindigkeiten der maximalen Welle bei der Versuchsdurchführung bei bis zu 0,4 m/s. Dies entspricht im Naturmaßstab einer Geschwindigkeit von rd. 2,53 m/s. Bei der häufigen Welle liegen die maximalen Geschwindigkeiten bei 0,03 m/s, mit einer Entsprechung in der Natur von 0,2 m/s. Die gemessenen Geschwindigkeiten decken sich mit den aus Wellentheorien theoretisch berechneten Geschwindigkeiten, sodass die Ergebnisse der Messungen als plausibel angenommen werden können.

Bei Beeinflussung durch eine TriPile-Struktur verändern sich nicht nur die Strömungsrichtungen, sondern auch die Strömungsgeschwindigkeiten. Ausgehend von den Messungen beträgt die maximale lokale Geschwindigkeit der maximalen Welle > 0,6 m/s an der Struktur mit einer Entsprechung in der Natur von 3,8



m/s. Bei der Planung ist ein Geschwindigkeitsanstieg von 30 % durch den Einbau des TriPiles zu beachten.

Abbildung 1: Vergleich der Komponenten der Strömungsgeschwindigkeiten einer maximalen Welle mit Beeinflussung des TriPiles (Pos. 0, geometrische Mitte des Messfeldes) und hinter dem TriPile (Pos. 3, geometrische Mitte des Messfeldes) für die Längs-, Quer- und z- Kanalrichtung der Geschwindigkeit

Durch den Einbau des Fischkäfigs erhöhen sich die Geschwindigkeiten im Zeitraum des Wellentals um rd. 40 %. In der Natur führt dieses zu Geschwindigkeiten bis zu 3,2 m/s. Weiterhin zieht der Einbau eines AKK signifikante Auswirkungen auf die Geschwindigkeit in Kanalquerrichtung mit sich. Das Gesamtgeschwindigkeitsfeld wird inhomogener und zeitvarianter. Die Quergeschwindigkeiten betragen bis zu 0,3 m/s, mit einer Entsprechung in der Natur von 1,9 m/s. Innerhalb des Käfigs verringert sich durch den Käfig die Geschwindigkeit um 6 % auf 0,5 m/s gegenüber dem ungestörten Fall. Dies entspricht im Naturmaßstab 3,2 m/s. Weitere Messungen in Folgeprojekten können das Gesamtverständnis der inneren Geschwindigkeiten und der Dynamik im AKK-Inneren ausbauen.

Die gemessenen Kräfte zwischen Zylinder- und Kugelkäfing sowie der Gründungsstruktur der Offshore-Windenergieanlage betragen im Modell maximal rd. 20 N und minimal rd. -30 N für den Zylinderkäfing pro Lasteinleitungsstelle mit einer Entsprechung in der Natur von rd. 1,28 MN bzw. -1,92 MN. Für die Variante des Kugelkäfings ergeben sich unter einer abweichenden Lasteinleitung gegenüber dem Zylinder maximale Kräfte von 18 N bzw. minimal -12 N pro Lasteinleitungsstelle. Dies entspricht Kräften in der Natur von 1,15 MN bzw. -0,77 MN. Eine Bewertung der Kraftmessungen erfolgt über die Ergebnisse des Instituts für Stahlbau der LUH, die weitere Untersuchungen zu statischen Erfordernissen der AKK und zu Lasten auf das Gesamtsystem durchführen.

Die gemessenen Kolkentwicklungen im Nahfeld der TriPile-Struktur ergeben, dass keine signifikanten Kolke zu erwarten sind. Weiterhin zeigt sich, dass die Kolkentwicklung positiv durch das Vorhandensein von AKK beeinflusst wird, wenngleich dieser Effekt nicht gänzlich verhindert, dass ein Kolkprozess einsetzt. Bei den vorliegenden Ergebnissen ist zu beachten, dass eine Kolkbeeinflussung durch Strömung nicht berücksichtigt wurde.

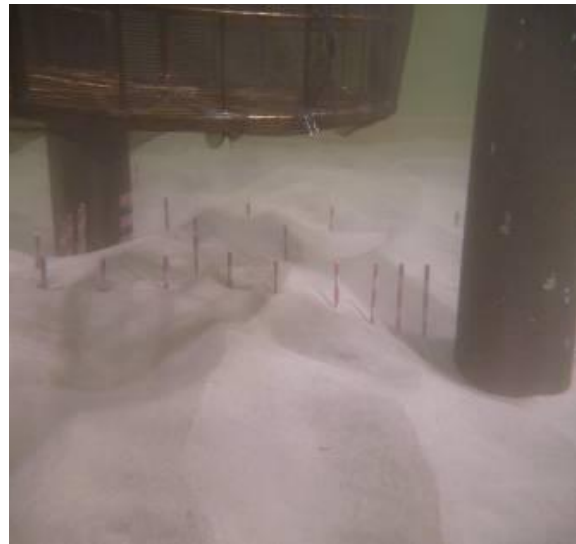


Abbildung 2: Einbau des Zylinderförmigen AKK im Tripile-Fundament (links), Kolkuntersuchungen mittels Messstäbchen unterhalb des AKK (rechts)

### Ausblick

Mit Blick auf die Entwicklung eines marktreifen AKK-Prototypen sind aus offshore-technischer Sicht und zur Minimierung von Unsicherheiten von Wellenlasten für die Bemessung weitere Untersuchungen zwingend notwendig. Die im Rahmen der Studien gewonnenen Erkenntnisse beruhen auf physikalischen Modellversuchen mit einem Längenmaßstab von 1:40 und unterliegen daher zu einem gewissen Grad Labor- und Skalierungseffekten. Bei der Planung zur Entwicklung eines funktionsfähigen Prototyps muss die Minimierung von Planungsunsicherheiten sichergestellt werden. Dazu müssen weitere großskalige Modellversuche z.B. im Großen Wellenkanal, Forschungszentrum Küste, durchgeführt werden. Jedoch ist nicht nur eine generelle statische Eignung der Aquakulturkäfinge nachzuweisen sondern auch die funktionelle Eignung im Offshore- Einsatz (z.B. Einsetzen/Entnahme von Aquakulturlebewesen, Unterhaltungsmaßnahmen, Einbringung/Montage, Absenken auf Wassertiefe). Eine Untersuchung solcher Bau- und Montagezustände sowie Situationen während des Betriebs müssen zwangsläufig vor einen finalen Test unter Naturbedingungen überprüft werden. Für solche Tests eignen sich ebenfalls großskalige Versuche.

## Studienexkursionen am Franzius-Institut

### Internationale Wasserbauexkursion nach Taiwan

*M. Sc. Dominic Spinnreker*

Im März 2010 fand die internationale Wasserbauexkursion des FRANZIUS-INSTITUTS nach Taiwan statt. Die langjährige und freundschaftliche Partnerschaft zwischen der NATIONAL CHENG KUNG UNIVERSITY (NCKU) und dem FRANZIUS-INSTITUT sollte hierbei ein wichtiger Bestandteil und die Grundlage der Reise sein. Für zehn Studenten des Vertiefenstudiums wurde es so ermöglicht, fern ab von der eigenen Heimat das Land, die Menschen und die Kultur Taiwans kennenzulernen, um so eine neue Perspektive zu gewinnen. Die Reise führte die Exkursionsteilnehmer in die Städte Tainan, Kenting, Hualien, Keelung und in die Hauptstadt Taipei, damit sie einen Überblick über den allgegenwärtigen Küstenschutz, die Hafenanlagen und die Forschung im Wasser- und Küsteningenieurwesen bekommen. Die Reise durch das Land ermöglichte es den Studenten zudem, die beeindruckenden landschaftlichen Besonderheiten und die vielfältige Kultur kennenzulernen.

Die erste Station der Reise führte in den Süden nach Tainan, hierzu wurde die Hochgeschwindigkeitsverbindung zwischen Taipei und Tainan genutzt. Dort angekommen konnten die Studenten das COASTAL OCEAN MONITORING CENTER besuchen. Während dieses Besuches wurden die Technik und das System zur Überwachung der Küstengewässer vorgestellt und ein Einblick in die technische Einrichtungen gegeben. Im Anschluss erfolgte der Besuch in der NCKU, um in einer sogenannten Students Conference die eigenen studentischen Arbeiten vorzustellen. Dabei wurde den Studierenden die Möglichkeit gegeben, über den Tellerrand hinauszuschauen und sich zu informieren, wie in anderen Ländern als Student studiert und geforscht wird. Nach dem Aufenthalt in Tainan ging es weiter nach Kenting, welches an der südlichen Spitze Taiwans liegt. Während der Fahrt wurde noch ein kurzer Zwischenstopp an der SUN-YAT UNIVERSITY eingelegt, dort nahm sich Prof. Hsu die Zeit, der Reisegruppe die aktuellen Maßnahmen der Strandbefestigung vor Ort zu erklären. Danach ging die Reise weiter nach Kenting. Dies ist eines der großen nationalen Erholungsgebiete in Taiwan, was im Anbetracht der schönen Strände und der malerischen Landschaft gut nachzuvollziehen ist. Die Exkursionsgruppe besuchte die massiven und beeindruckenden Küstenschutzanlagen, welche zum Schutz des dort befindlichen AKW Maanshan errichtet wurden. Dabei macht sich die Gruppe unter anderem ein Bild von der Kühlwassereinleitung (Abbildung 1) des Kraftwerks.



Abbildung 1: Kühlwassereinleitung in Kenting

Nach den bisher eher ingenieurmäßigen Aspekten der Fahrt führte die weitere Reise nach Hualien, um dort neben der städtischen Kultur und dem örtlichen Küstenschutz auch den Taroko-Nationalpark zu besuchen, welcher durch tiefe Schluchten und steile Gebirgswände gekennzeichnet ist. Dort besuchte die Gruppe den Himmelstempel und wanderte durch einen kleinen Teil des Nationalparks, um so die Besonderheiten in Augenschein zu nehmen. Hualien selbst ist eine der grüneren Städte Taiwans mit vielen kleinen Parks und Grünflächen. In der Stadt gab es die Baustelle eines Seawall zu besichtigen, dabei waren die Dimension der Anlage sehr beeindruckend, die im Rahmen des Küstenschutzes errichtet wurde. An



der Ostküste Taiwans sind die Taifunschäden der vergangenen Saison überall an der Küste zu sehen gewesen. Von Hualien aus führte die Reise weiter nach Keelung, dort stand der Aufenthalt im Zeichen einer weiteren Students Conference an der NATIONAL TAIWAN OCEAN UNIVERSITY (NTOU). Es folgte ein Rundgang auf dem Campusgelände, bei dem die Laboratorien und Vorlesungsräume der Universität besucht wurden. Unter anderem erhielten die Exkursionsteilnehmer die Möglichkeit, ein 3D-Wellenbecken und ein PIV-System vor Ort in Augenschein zu nehmen. Der Rundgang endete im Hafen, um dort die einheimische Küche zu genießen und danach die Küstenschutzbefestigungen zu besichtigen. Dabei wurde noch einmal deutlich, wie wichtig der Schutz der Küsten in Taiwan ist. Nach einem tollen Aufenthalt in Keelung ging es weiter Richtung Hauptstadt Taipei. Hier gab es für die gesamte Gruppe genügend Zeit, um die Stadt kennenzulernen und sich u.a. das Taipei Financial Center (Taipei 101) näher anzuschauen. Die letzte ingenieurmäßige Station war der PORT OF TAIPEI (Abbildung 2) der neue Containerhafen ist ein Megaprojekt im maritimen asiatischen Raum. Den Studenten wurde ein Blick in den Ablauf der Baustelle gewährt sowie eine Rundfahrt auf dem gesamten Areal des Hafens ermöglicht. Bis zum Jahr 2012 sollen insgesamt 4,65 Mrd. Euro investiert werden. Dies macht deutlich, wie entscheidend der Anschluss an die maritimen und internationalen Handelswege ist.



Abbildung 2: Gruppenfoto im Port of Teipei

Zum Abschluss dieses kurzen Berichtes möchten sich alle teilnehmenden Studenten nochmals bei den Förderern und dem Institut bedanken. Ohne diese wäre es für die 10 Studenten des FRANZIUS-INSTITUT nicht möglich gewesen, die Reise nach Taiwan anzutreten und einen Blick ins bis dato unbekannte Taiwan zu werfen. Unser herzlicher Dank geht an:

Gesellschaft der Förderer des Franzius-Instituts e.V., Hafentechnische Gesellschaft e.V., Heinrich Hirdes GmbH, Hülskens Wasserbau GmbH & Co.KG, Naue GmbH & Co. KG und Peute Baustoff GmbH.

## Große Wasserbau-Exkursion Emsland 2010

Dipl.-Ing. Nina Manig<sup>1</sup>, Marie Paehr

Die Pfingstexkursion für Studierende hat eine langjährige Tradition am Franzius-Institut. Die mehrtägige technische Exkursion ermöglicht es Studierenden, Einblicke in die wasserbauliche Praxis zu erlangen und insbesondere die Vielfalt von Wasserbau- und Küstenschutzmaßnahmen vor Ort kennenzulernen, wodurch ihr Studium zusätzlich bereichert wird. Im Rahmen der Pfingstexkursion 2010 fuhren 15 Studierende des Fach- und Vertiefungsstudiums vom 25.-27. Mai zur technischen Besichtigung von verschiedenen Baumaßnahmen in den Bereichen Hafenbau, Schiffbau, Hochwasser- und Sturmflutschutz sowie Küstenschutz nach Duisburg, Papenburg, Emden und Norderney.

In Duisburg wurde der größte Binnenhafen der Welt per Schiff besichtigt, so dass den Studierenden ein guter Überblick über das Hafengelände, aktuelle Baumaßnahmen sowie den Hafenbetrieb und die Hafenlogistik vermittelt wurde. In Papenburg wurden die MEYER WERFT und das sich im Bau befindliche Kreuzfahrtschiff DISNEY DREAM besichtigt. Im Anschluss konnten sich die Studierenden einen Eindruck von dem Emssperrwerk in Gandersum machen, das insbesondere für den Sturmflutschutz und die Ems-Überführung der großen Kreuzfahrtschiffe der MEYER WERFT eine wichtige Rolle spielt.

Eine weitere Station der Pfingstexkursion 2010 war die technische Besichtigung des Emdener Hafens. Die aktuelle Hafenentwicklung sowie Unterhaltungsmaßnahmen des Hafens wurden den Studierenden durch das WSA Emden während der Besichtigung aufgezeigt.

Die Insel Norderney und insbesondere der Küstenschutz dieser ostfriesischen Insel bildeten den Abschluss der diesjährigen Pfingstexkursion. Mit dem Fahrrad und mit fachlichen Informationen durch das NLWKN wurden die Inselschutzanlagen und aktuelle Baumaßnahmen besichtigt.



Abbildung 1: links: Emssperrwerk; rechts: Schwall- und Kronenmauern auf Norderney (Quelle: NLWKN)

Insgesamt haben die Studierenden auf der Pfingstexkursion 2010 des Franzius-Instituts interessante Einblicke in spätere Arbeitsbereiche von Wasserbau- und Küsteningenieuren bekommen und darüber hinaus wurde neben den zahlreichen fachlichen Eindrücken auch der studentische Zusammenhalt gefördert.

<sup>1</sup> Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik



## **COSYNA - Coastal Observation System for Northern and Arctic Seas:**

### **Background, Methods and Instruments**

*J. Schulz-Stellenfleth, E.V. Stanev, J. Staneva, S. Grayek, J. Seemann, W. Petersen<sup>2</sup>*

A coastal observing system for Northern and Arctic Seas (COSYNA) aims at construction of a long-term observatory for the German part of the North Sea, elements of which will be deployed as prototype modules in Arctic coastal waters. COSYNA is a recent activity in Germany recognising the need as well as the challenge to set up an operational, integrated observational system for the German shelf. This activity requires national and international cooperation, and provides an important infrastructure enabling the German contribution to International programmes such as COASTAL GOOS, GEOSS, GEOHAB and GMES.

At present a coastal prediction system deployed in the area of the German Bight integrates near real-time measurements with numerical models in a pre-operational way and provides continuously state estimates and forecasts of coastal ocean state. The measurement suite contributing to the pre-operational set up includes in situ time series from fixed stations, a High-Frequency (HF) radar system measuring surface currents, a FerryBox system and remote sensing data from satellites. The forecasting suite includes nested 3-D hydrodynamic models running in a data assimilation mode, which are forced with up-to-date meteorological forecast data. This presentation reviews the present status of the system and its recent upgrades focusing on developments in the field of coastal data assimilation. Model supported data analysis and state estimates are illustrated using HF radar and FerryBox observations as examples. Illustration of the use of some newly available data from High-Frequency (HF)-radar and FerryBox to improve quality of coastal ocean state estimates is the first objective of the presented work. It is well known that differences between surface current velocities from HF-radars and other observation platforms exist due to: (1) measurement errors, (2) limitation in vertical, (3) averaging etc. The question about consistency of HF radar data with other available observations needs also to be clarified. Similar is the situation with the FerryBox data: conventional satellites measure the skin temperature while a flow-through FerryBox system samples water 4 to 6m below the surface. To put the above issue in the context of validation and data assimilation is the second objective of the presented study.

A new method combining radial surface current measurements from a single HF radar with a priori information from a hydrodynamic model is presented, which optimally relates tidal ellipses parameters of the 2-D current field and the M2 phase and magnitude of the radials. The method presents a robust and helpful first step towards the implementation of a more sophisticated assimilation system and demonstrates that even using only radials from one station can substantially benefit state estimates for surface currents. The method is then extended for the use of three antenna stations using a spatio temporal optimal interpolation method. This technique is currently applied to generate analysed surface current fields for the German Bight in the framework of the pre-operational COSYNA system. Comparisons with independent in situ measurements are presented. Furthermore it is shown that the method can be extended for the computation of short term forecasts.

Assimilation of Ferry-Box data based on an optimal interpolation approach using a Kalman filter with a stationary background covariance matrix derived from a preliminary model run which was validated against remote sensing and in situ data demonstrated the capabilities of the pre-operational system. Data assimilation significantly improved the performance of the model with respect to both SST and SSS and demonstrated a good skill not only in the vicinity of the Ferry track, but also over larger model areas. The examples provided in this study are considered as initial steps in establishing new coastal ocean products enhanced by the integrated COSYNA-observations and numerical model.

---

<sup>2</sup> Helmholtz-Zentrum Geesthacht (HZG), Institut für Küstenforschung

---

An outlook will be given on the next steps, where additional observations will be considered in the analysis, which provide new information on the vertical structure of the water column, as e.g. provided by SCANFISH or glider systems.

## Ermittlung mittlerer Überlaufmengen an Sturmflutschutzwänden auf Deichen und auf ebener Sohle aus Seegang

*Dipl.-Ing. Nils B. Kerpen, Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann*

### Einleitung

Die Thematik des Wellenüberlaufs an Deichen und senkrechten Wänden wird seit etwa 40 Jahren mit unregelmäßigen Wellen in hydraulischen Modellen untersucht. In neuerer Zeit werden auch zunehmend hydronumerische Modelle eingesetzt, um grundlegende Prozesszusammenhänge zu verstehen und Analysen zu quantifizieren, wobei das gegebene natürliche System durch vereinfachte und z.T. sogar idealisierte Randbedingungen oftmals nur bedingte Rückschlüsse auf die eigentlichen physikalischen Prozesse erlauben.

Für Standardformen von Bauwerken wurden daher, aufbauend meist auf Modellversuchsergebnissen, empirische Bemessungsformeln ermittelt, die die Berechnung von mittleren Überlaufmengen in Abhängigkeit von Seegangsparametern, Freibord und Bauwerksform und ggf. -rauigkeit erlauben. Der aktuelle Stand von Bemessungsverfahren auf Europäischer Ebene ist im „EurOtop - Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual“ ([www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com), s.a. Die Küste, Heft 73, 2007)“ zusammengestellt und veröffentlicht. Aus der Sichtung der Datengrundlagen und den auch im EurOtop Manual aufgezeigten Streuungen der den Bemessungsverfahren zugrunde liegenden Messdaten wird deutlich, dass dennoch weiterhin eine große Unsicherheit hinsichtlich des einzelnen Bemessungsbeispiels besteht. Für die endgültige Ausführungsplanung werden nach wie vor hydraulische Modellversuche mit den Bemessungswellenbedingungen und der genauen Bauwerksgeometrie empfohlen.

Vor diesem aufgeführten Hintergrund wird gemeinsam mit der Forschungsstelle Küste (FSK) des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) eine grundlegende wissenschaftliche Studie zur Unterstützung der Ausführungsplanung von Sturmflutschutzwänden auf Deichen und Sturmflutschutzwänden mit ebenem Vorland für mögliche Bauformen unter bemessungstypischen Seegangsbedingungen im hydraulischen Modell angestellt, um daraus praxisrelevante Parameter und Erkenntnisse für ausgeweitete Bemessungsgrundlagen abzuleiten.

Die analytische Berechnung des Wellenüberlaufs  $Q$  ist normalerweise Ergebnis empirischer Gleichungen, die Messergebnisse aus hydraulischen Modellversuchen interpolieren. In entsprechender Literatur wird Gleichung (1) zur Beschreibung des dimensionslosen Wellenüberlaufs aufgeführt.

$$Q = a \cdot \exp(-b \cdot R) \tag{1}$$

$R$  stellt den dimensionslosen Freibord dar und die Koeffizienten  $a$  und  $b$  sind das Ergebnis einer Regression durch Datensätze, die mit hydraulischen Modellversuchen generiert wurden. Durch das Auftragen vieler unterschiedlicher Messergebnisse definiert TAW (2002) und KFKI (2007) den deterministischen Zusammenhang

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = \frac{0.067}{\sqrt{\tan \alpha}} \cdot \gamma_b \cdot \xi_{m-1,0} \cdot \exp\left(-4.3 \frac{R}{\xi_{m-1,0} \cdot H_{m0} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta \cdot \gamma_v}\right) \tag{2}$$

mit:  $q$  = dimensionsloser Freibord  
 $\alpha$  = Neigungswinkel des Bauwerks  
 $\xi_{m-1,0}$  = Brecher Parameter (<5)

$\gamma_b$  = Korrekturfaktor für eine Berme

$\gamma_f$  = Korrekturfaktor für Durchlässigkeit und Rauheit des Bauwerks

$\gamma_\beta$  = Korrekturfaktor für schrägen Wellenangriff

$\gamma_v$  = Korrekturfaktor für eine senkrechte Wand auf dem Bauwerk

welcher zur Bestimmung des dimensionslosen Wellenüberlaufvolumens von nicht brechenden Wellen verwendet werden kann. Das Wellenüberlaufverhalten an den in dieser Studie untersuchten Bauwerksgeometrien ist ähnlich dem bei einer reinen senkrechten Wand. Aus diesem Grund wird der Ansatz für Wellenüberlauf an reinen senkrechten Wänden

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.04 \cdot \exp\left(-2.6 \frac{R}{H_{m0} \cdot \gamma_b}\right) \quad (3)$$

mit den Messergebnissen aus dieser Studie verglichen. Der Einfluss von schrägem Wellenanlauf wird nach KFKI (2007) durch den Korrekturfaktor

$$\gamma_\beta = \frac{q_{\beta>0}}{q_{\beta=0}} = 1 - 0.0062|\beta| \quad \text{for: } 0^\circ < \beta < 45^\circ$$

$$\gamma_\beta = 0.72 \quad \text{for: } \beta \geq 45^\circ \quad (4)$$

beschrieben, wobei  $\beta$  die Wellenangriffsrichtung in Grad relative zum senkrechten Wellenangriff darstellt.

### Modellversuche

Die Studie soll an zwei grundlegenden Bauwerksgeometrien durchgeführt werden, die in Abbildung 1 dargestellt sind. Geometrie a) stellt eine senkrechte Hochwasserschutzwand dar, der eine getauchte Stufe vorgelagert ist. Die Geometrie b) stellt einen Deich (Neigung 1:4) mit vorgelagerter Stufe und aufgesetzter Hochwasserschutzwand dar.

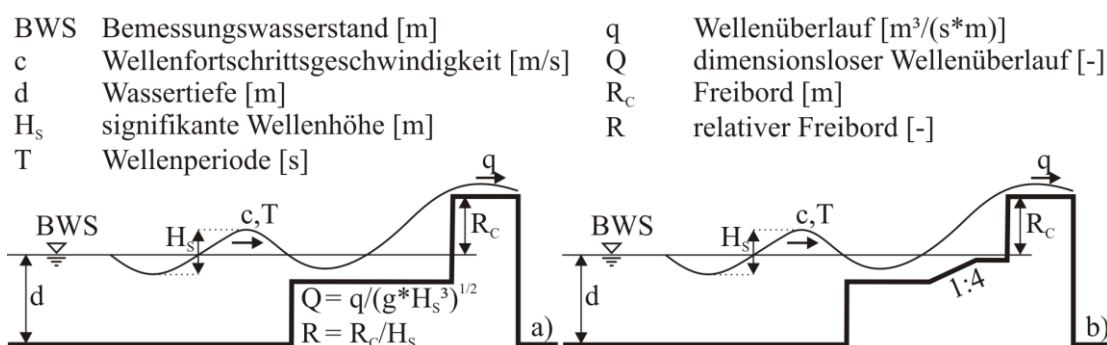
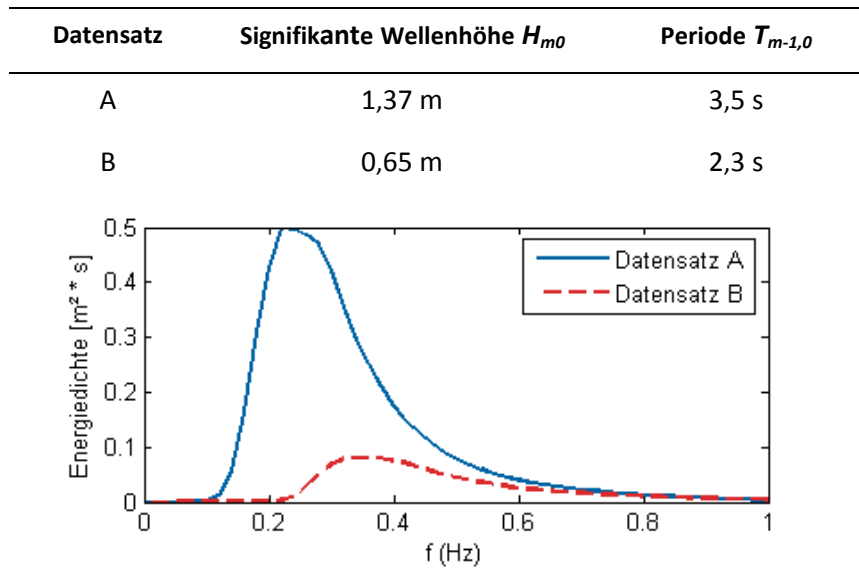


Abbildung 1: Bauwerksgeometrien für die Untersuchungen des Wellenüberlaufs

Seitens des NLWKN wurden zwei zu analysierende Wellenspektren vorgegeben. Die zugehörigen signifikanten Wellenhöhen, mittleren Wellenperioden und Energiedichteverteilungen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle1: Analyisierte Wellenspektren



Die Modellversuche wurden im Wellenbecken des Franzius-Instituts mit multidirektionaler Wellenmaschine für lang- und kurzkämmigen Seegang wie auch schrägen Wellenanlauf durchgeführt. Durch die aktive Absorption der Wellenmaschine kann eine Re-Reflexionen von Wellenenergie an der Maschine vermieden werden. Im Modellmaßstab 1:10 hat das physikalische Modell eine Länge von 23,35 m. Es wurde in der Mitte des Wellenbeckens errichtet und um 30° zur Ausrichtung der Wellenmaschine gedreht, um den Messbereich für schrägen Wellenanlauf zu vergrößern (Abbildung 2). Das Modell ist in sieben Bereiche von je 1,9 m Länge unterteilt. Der mittlere Wellenüberlauf wird an den fünf zentralen Kammern bestimmt. Die zwei äußeren Abschnitte des Modells sind errichtet worden, um ein homogenes Wellenfeld vor den Messkammern zu gewährleisten und Randeffekten vorzubeugen (Abbildung 3).



Abbildung 2: Geometrie a) mit Messtechnik



Abbildung 3: Modellaufbau im Wellenbecken

Freibordhöhen werden indirekt durch die Variation des Wasserspiegels im System verändert. Ziel dieser Variation ist die Bestimmung der niedrigsten Freibordhöhe, bei der die Wellenüberlaufmengen ein vordefiniertes Volumen von 0,5 bis 5,0 l/sm nicht überschreiten. Wellen laufen von 0° (senkrecht auf das Bauwerk) und unter einem Winkel von 10°, 20°, 30°, 40°, 50° und 60° auf das Bauwerk. Alle Testläufe werden 3-6x wiederholt, um die Qualität der gemessenen Daten zu gewährleisten. Zudem kann durch das Auffangen des Überlaufvolumens in fünf parallel angeordneten Kammern eine Aussage über Unterschiede im Wellenüberlauf entlang einer Hochwasserschutzwand getroffen werden.

Das Spektrum im Nahfeld des Bauwerks wird durch Wellenpegel aufgezeichnet. Entlang des Fußes des Bauwerks werden drei Wellenpegel montiert, drei weitere mittig über der horizontalen Berme und vor jedem der fünf Überlaufkammern ein weiterer Pegel, um Informationen zu Schichtdicken der überlaufenden

Welle zu erhalten. Zusätzlich werden Orbitalgeschwindigkeiten durch Geschwindigkeitssonden gemessen. Die mittleren Überlaufmengen werden in den fünf Kammern indirekt durch die Wasserstandsänderungen über die Zeit erfasst. Die Wasserstandsänderungen werden durch einen Präzisions-Wasserstandsfolger (WAFO  $\pm 0,5\text{mm}$ ) aufgenommen. Das ermittelte Überlaufvolumen wird über alle fünf Kammern gemittelt und als übergelaufenes Wasservolumen pro Meter Deichlänge und Sekunde ausgegeben.

## Ergebnisse

Der Fokus dieses Beitrags liegt auf den Geometrieinflüssen sowie auf dem Einfluss von schrägem Wellenanlauf auf den Wellenüberlauf. Insgesamt werden 336 Testläufe ausgewertet. Jeder dieser Testläufe umfasst mindestens 1.000 Einzelwellen und wurde mindestens 3-mal wiederholt.

Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen zum Wellenüberlauf in Abhängigkeit der Freibordhöhe aus den hydraulischen Modellversuchen und dem analytischen Ansatz nach Gleichung (2) und (3) zeigt, dass die hier untersuchte Geometrie eine vergleichbare Überlaufcharakteristik aufweist, wie eine senkrechte Wand (Abbildung 5). Die dimensionslose Überlaufmenge ist halblogarithmisch über dem dimensionslosen Freibord aufgetragen. Generell kann beobachtet werden, dass die Überlaufmengen mit höher werdendem Freibord abnehmen. Interessant ist an dieser Stelle, dass das Wellenspektrum von Datensatz B – mit einer kleineren Wellenhöhe im Vergleich zu Datensatz A – größere Überlaufmengen bei gleichem dimensionslosem Freibord aufweist. Dies ist nach ersten Erkenntnissen darauf zurückzuführen, dass für diesen Datensatz die Wassertiefe unmittelbar vor der vertikalen Wand größer ist und somit die Interaktion zwischen Welle und Bauwerk weniger dominant ausgeprägt ist. Folglich dissipiert weniger Energie über der getauchten Stufe und steht somit für den Wellenüberlaufvorgang zur Verfügung. Es kann also festgehalten werden, dass das Überlaufverhalten mit der relativen Wassertiefe unmittelbar vor der senkrechten Wand verknüpft ist.

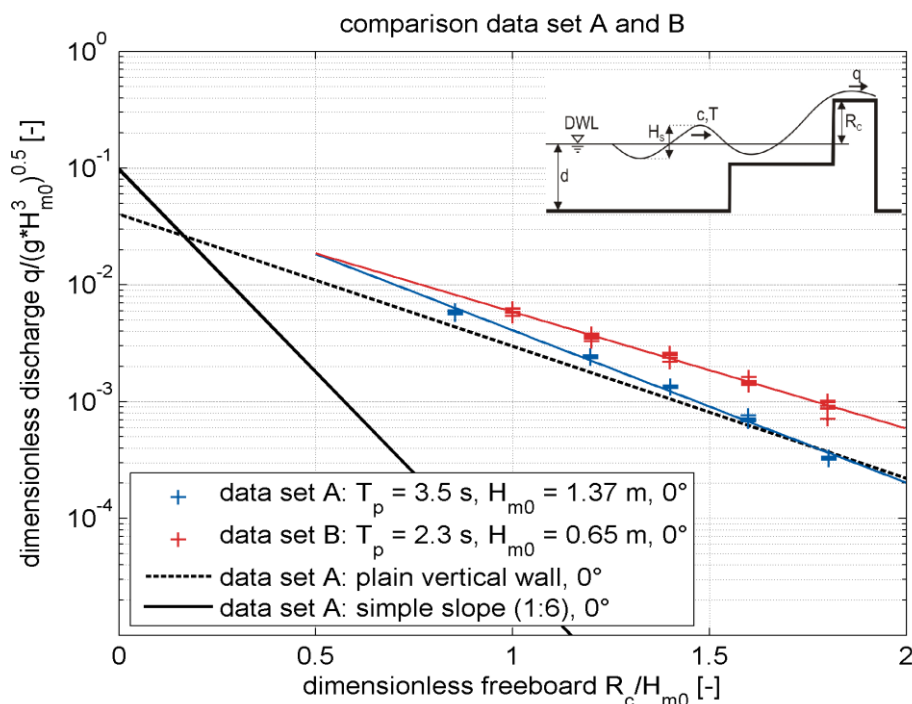


Abbildung 5: Vergleich zwischen analytischen Ergebnissen und Messungen zu Überlaufmengen bei verschiedenen Freibordhöhen

Der Einfluss von schrägem Wellenanlauf auf Wellenüberlaufmengen ist für Datensatz A in Abbildung 6 und für Datensatz B in Abbildung 7 dargestellt. Die größten Überlaufmengen sind für senkrechten Wellenangriff zu verzeichnen. Es ist für beide Datensätze ersichtlich, dass das mittlere Überlaufvolumen mit spitzer werdendem Angriffswinkel für gleiche Freiborde reduziert wird. Die Energiedissipation der Wellen über der



getauchten Stufe wird demzufolge größer, je länger der Weg der Welle über dieser Stufe ist. Diese Energiedissipation ist bei Datensatz A stärker als bei Datensatz B. Der Grund hierfür liegt wieder in der größeren Wassertiefe über der getauchten Stufe für gleiche dimensionslose Freiborde. Die Reduzierung der Überlaufmengen ist also stark von den Interaktionen zwischen Welle und Bauwerk abhängig.

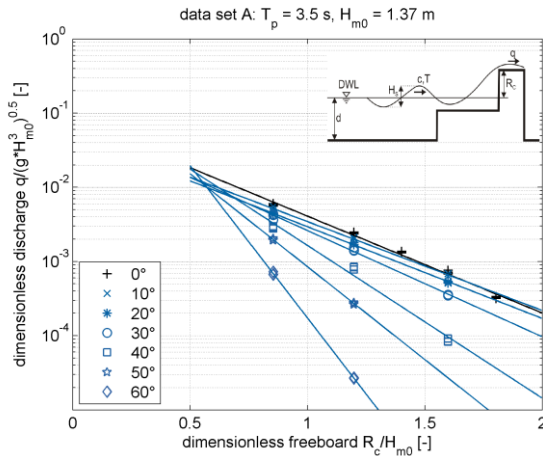


Abbildung 6: Dimensionsloser Wellenüberlauf für Datensatz A

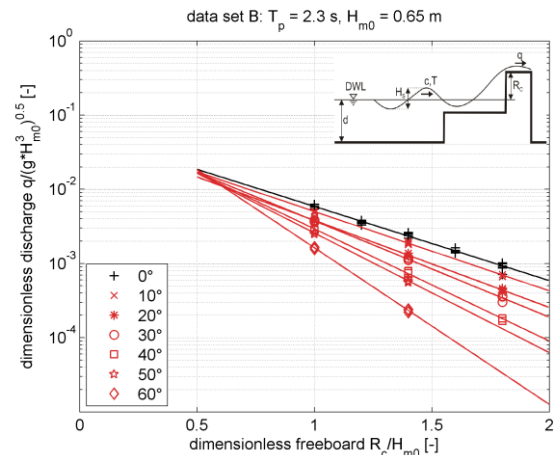


Abbildung 7: Dimensionsloser Wellenüberlauf für Datensatz B

## Ausblick

In diesem Paper sind die Ergebnisse zum Überlaufverhalten von langkämmigen Seegang an Geometrie a) dargestellt. Geometrie b) wird in Folgeuntersuchungen mit den gleichen Wellenspektren belastet, um das Systemverhalten der beiden Geometrien untereinander vergleichen zu können. In weiteren Untersuchungen sollen Unterschiede im Wellenüberlauf entlang einer Hochwasserschutzwand analysiert werden. Eine Analyse des Überlaufverhaltens von kurzkämmigem Seegang wird angestrebt. Außerdem sollen 2D-Untersuchungen zu gezielten Fragestellungen zur Validierung eines numerischen Modells herangezogen werden.

## Support

Das Projekt wird mit der Forschungsstelle Küste (FSK) des Niedersächsischen Landesbetriebs für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Am Sportplatz 23, D-26506 Norden, Germany umgesetzt.

## Literatur

- Daemrich, K.-F., Schüttrumpf, H., Möller, J., Ohle, N., Oumeraci, H., Zimmermann, C. 2004. 'Combined Influence of Berms and wave direction on wave run-up and wave overtopping', 29th Int. Conference on Coastal Engineering, Lissabon.
- Daemrich K.-F. et al 2006. 'Irregular Wave Overtopping Based on Regular Wave Tests', Third Chinese-German Joint Symposium on Coastal and Ocean Engineering, Tainan.
- Franco L. et al 1995. 'Wave Overtopping on Vertical and Composite Breakwaters', Proceedings of the Coastal Engineering Conference 1, pp. 1030-1044.
- KFKI 2007. 'European Overtopping Manual', Eds Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schüttrumpf, H. & van der Meer, J.W., [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com).
- Kerpen N.B., Schlurmann T. 2012. 'Wave Overtopping at Vertical Walls and Dykes With Topped Vertical Walls', Proceedings of the Eight International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Department of Ocean Engineering, IIT Madras, Chennai, pp. 1542-1549.

- 
- Kerpen N.B., Schlurmann T. 2012. 'Wave Overtopping at Vertical Walls and Dykes With Topped Vertical Walls – Influence Of Oblique Wave Attack', International Conference on Coastal Engineering, Santander, (submitted).
- Napp, N., Pearson, J., Bruce, T., Allsop, W. 2003. 'Violent overtopping of vertical seawalls under oblique wave conditions', Coastal Structures 2003 - Proceedings of the Conference, pp. 528-541.
- Owen, M.W. 1980. 'Design of seawalls allowing for wave overtopping', Report No. EX 924, HR Wallingford.
- Tautenhain E. 1981. 'Der Wellenüberlauf an Seedeichen unter Berücksichtigung des Wellenaufbaus', Mitteilungen des Franzius-Instituts. H. 53 (1981), pp. 1–245.
- Van der Meer J.W. and Janssen J.P.F.M. 1995. 'Wave run-up and wave overtopping at dikes', In: Z. Demirebilek, Editor, Published in: Wave Forces on Inclined and Vertical Structures, ASCE, pp. 1–27.

## Numerical simulation of breaking waves using hybrid coupling of FNPF (FEM) and NS (IMLPG\_R) solver with practical applications

*Dr.-Ing. Sriram Venkatachalam<sup>3</sup>*

### Synopsis

At present, computational modelling of the wave-structure interactions are increasingly predominant in the research groups around the world. One needs to solve the Navier Stokes (NS) equations in order to handle numerically the 3D violent wave structure interactions. However, it requires tremendous computational cost and leads to energy loss in modelling the whole computational domain using 3D –NS. Hence, a novel hybrid model to couple the fully nonlinear potential flow theory (Finite Element Method) with NS solver (Meshless Local Petrov Galerkin – a particle method) will be developed to overcome the above problem, thus extending our research efforts to the next stage. The applications of the developed model for solitary wave overtopping and shallow water freak waves breaking are presented.

### Introduction

The available numerical models for the simulation of nonlinear wave and structure interactions are currently based on solving either the fully nonlinear potential flow theory (FNPF) or using the Navier Stokes (NS) equations. The test cases reported in the literatures using these models showed a good agreement with the experimental measurements. However, the application of these numerical models to the more general purpose cases are limited, for example deriving the waves from offshore to coastal zone, to reproduce large scale test cases like one of the Europe Largest wave channel in Hannover (GWK tank). The reason is one need to capture both non-breaking and breaking process accurately as close as possible, so the applicability of the either of these two models are limited due to the physical assumptions involved in the model. Wherein, using FNPF one can simulate highly stable and long time simulations with longer computational domain, but holds good only till the waves overturns. Whereas, in NS solver one can model the small scale phenomenon like viscous effects, turbulence, however it require finer mesh/nodes and will have energy loss for long distance propagations/simulations in the computational domain. Thus, neither one of the two types of wave models is suitable for large scale wave propagation incorporating both the non-breaking and breaking processes in the simulations. Based on our experience, the numerical water wave model should meet two criteria: firstly, both the non-breaking and breaking processes and its interaction with the structure must be take care in the simulation satisfactorily, and secondly, the simulation must be computationally efficiently.

Hence to meet the above criteria, either a new model which has both capabilities should be developed or a method should be developed to couple the two individual numerical models. The second option is attempted in this paper, by coupling the FNPF models with the NS models. The big challenge for coupling the models is that both models are different in theory/physics: i.e. non-viscous and viscous, and further, it employs different numerical treatments/algorithms.

As to the coupling of these two types of models, we found very few references. Fujima et al. (2002) developed the 2-D/3-D hybrid model intended for numerical tsunami simulation around structures. Comparison with the laboratory experiment showed that the hybrid model was able to reproduce the 3-D characteristics of flow around structure, and comparison with similar simulation using full 3-D model proved that the hybrid model could reduce the computational time significantly. Lachaume *et al.* (2003), Grilli *et al.* (2004), and Biausser *et al.* (2004), discussed the coupling of the fully nonlinear potential flow model based on a

---

<sup>3</sup> AvH-Stipendiat, Franzius-Institut

Boundary Element Method (BEM) and VOF/NS model for the simulation of solitary wave breaking over the slopes. Two methods of coupling were proposed: weak and strong coupling. In the first method, the solution of the BEM model is used as an initialization of the VOF/N-S solver, with no feedback. In the second method, both models are exchanging information at every time steps. Sitanggang (2008) developed a hybrid coupling between Boussinesq model and RANSE model. In coupling, mesh based methods with meshless methods, sueyoshi *et al.* (2007) used BEM and MPS (Meshless local petrov galerking method) for the two way coupled algorithm, taking the considerations of water wave kinematics the first half of the domain (free surface) was modeled using MPS and the second half of the domain (bottom part) is modeled using BEM. Narayanaswamy *et al.* (2010) and Kassiotis *et al.* (2011) used one way coupling between boussinesq model and SPH for solitary wave simulations.

### Coupling procedure

There are two ways of coupling, one is weak coupling and other is strong coupling as detailed in Grilli *et al.* (2004). In weak coupling/one way coupling, one can run the two solvers separately and the information will be feed to the other solver at the point of interest alone. This approach holds good for solitary wave propagation over slope or freak wave breakings. However, when one needs to carry out the simulations for long time wave-structure interactions, like in experimental wave tank. Then, one needs to resort to a strong coupling procedure. In which, the information from both the solver will need to be used in every time steps. In this work, we will describe only the strong coupling procedure. We will device a procedure to couple the two solver FNPF and NS based on FEM (Sriram *et al.*, 2010) and IMLPG\_R (Sriram and Ma, 2011) respectively. In general, for strong coupling one need to consider an efficient procedure both in space and time. The algorithm is shown in Fig. 1.

### Typical application of the model

#### Solitary wave propagation and overtopping

The application of the model to wave overtopping due to solitary wave propagation is simulated in this section. The length of the tank is 15, in which FEM zone and IMLPG\_R zone corresponds to 5 and 10 respectively. The wave steepness generated using the solitary wave paddle motion is  $(H/d)$  is 0.35. In the IMLPG\_R zone, a small step of 0.5 with a vertical wall height of 0.25 from the still water is assumed, so that the wave will overtop. The simulation results are reproduced in Fig. 2, showing the overtopping of the waves.

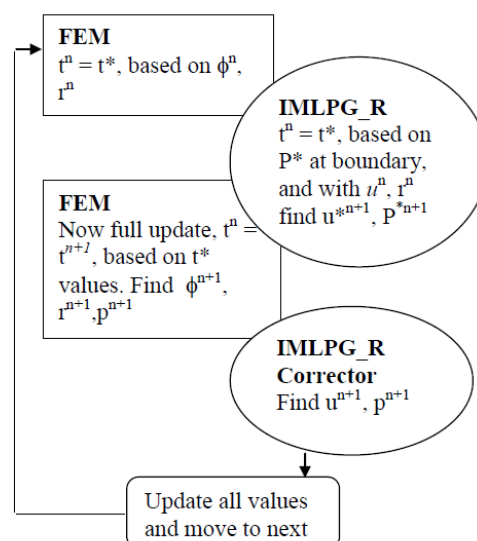


Fig.1 Strong coupling procedure adopted in time using Runge-kutta second order coupled with Predictor-corrector scheme.

### Shallow water freak waves

Ever since the occurrence of “New Year Wave” in the North Sea on 1995, numerous ground breaking theories, experiments and theories are carried out assuming that these freak waves will occur only in deep water. However, Chien et al. (2002) first reported the freak wave occurrence in Shallow waters. More recently, statistics concerning the occurrences of rogue waves in the world are reported in Nikolkina and Didenkulova (2011). The report revealed an interesting fact that the occurrence of freak waves in shallow water and at coast is more when compared to deep water causing more damages during 2006 to 2010. One of our main goals is to develop a model to reproduce the large scale experiments at GWK (Hannover) carried out for the alpha ventus wind farm structure situated in the shallow waters of the North Sea. (We mean shallow water if the structure located is less than 50m water depth). Thus, in this section we will produce a typical scenario of freak waves breaking in shallow water. Further showing the importance of the developed model for these cases, as one need to focus at a long distance, wherein, the hybrid model will be much useful. In this test case, the Length of the FEM sub-domain is 25, whereas the IMLPG\_R has a length of 15, in which a slope is introduced at 3 from the start of the IMLPG\_R domain, the depth of water in the slope region is 0.6. The transient wave packets is used to focused at the start of the slope (i.e. in IMLPG\_R) sub-domain. So, when the wave enters the new water depth, the dispersive wave will become unstable and slight breaking will occur (more of a spilling type). It should be noted that, the simulation of spilling type waves need higher resolution (both in number of particles and time stepping) to capture the phenomenon, unlike plunging breaking breakers. The snapshots of the simulations for the above test cases are shown in Fig.3. The first two figures depict the propagation of the transient wave packets from FEM subdomain to the focusing of transient wave packets at the beginning of the slope in IMLPG\_R domain. At the focusing location the wave corresponds to a wave height of 0.425 and wave-length of 6.3. The last two figures show the snapshot of the spilling effects on the slope.

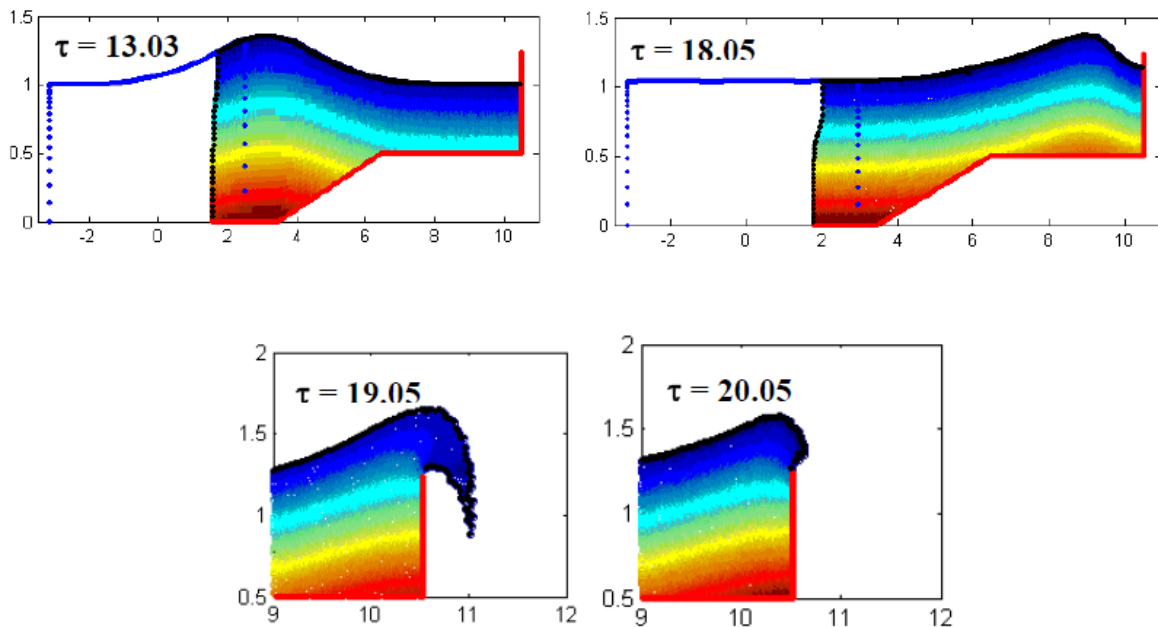


Fig.2. Simulation of solitary wave propagation and overtopping for  $(H/d) = 0.35$  (●● FEM subdomain, ●● IMLPG\_R subdomain). The colormap on the IMLPG\_R zone corresponds to the total pressure.

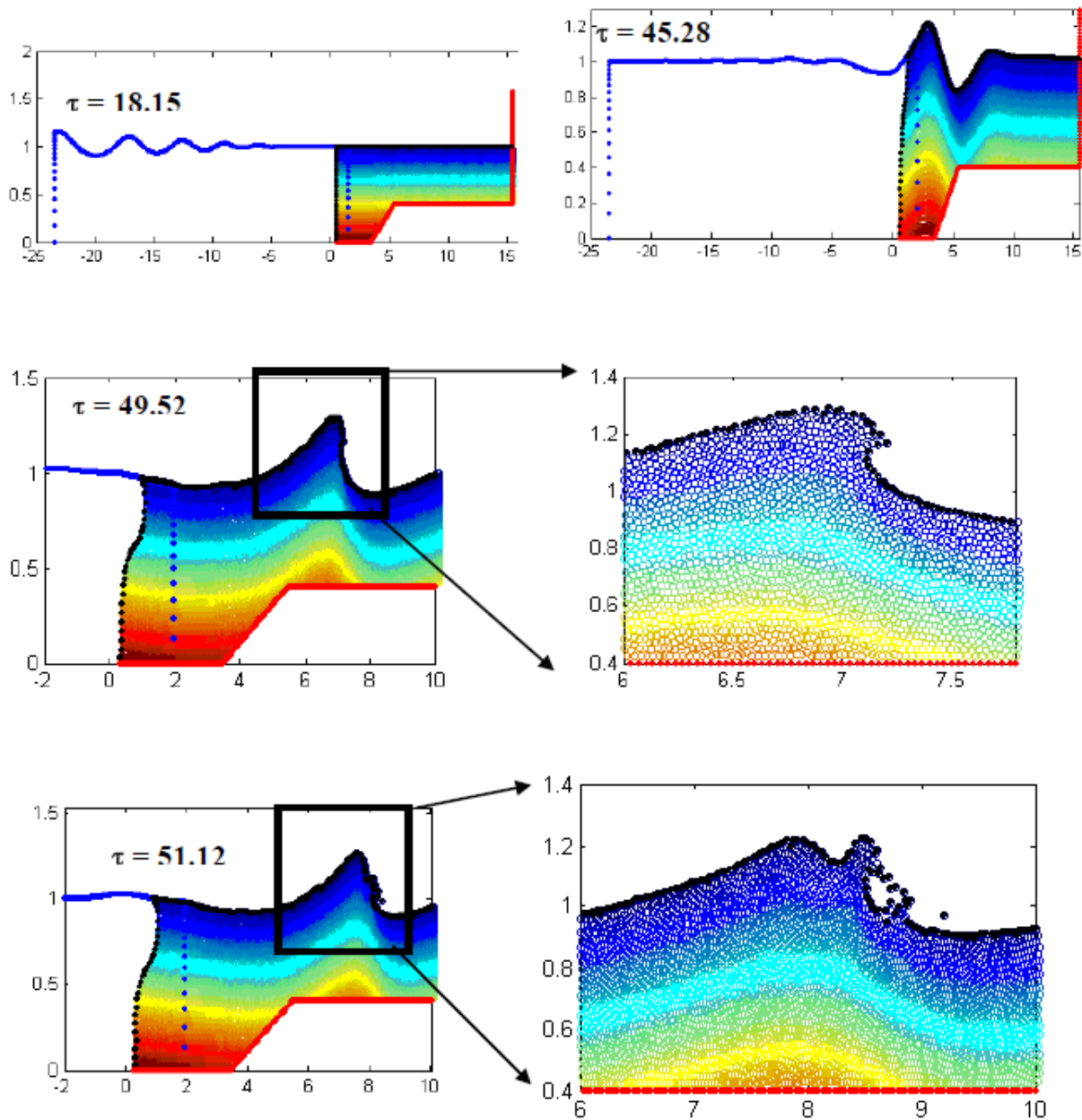


Fig.3. Simulation of the freak waves breaking (●●● FEM subdomain, ●●● IMLPG\_R subdomain). The colormap on the IMLPG\_R zone corresponds to the total pressure.

### Summary and future research

The application of the novel coupling algorithm has been reported, in which the hybrid model is used to capture the non-breaking and breaking process in the computational domain effectively. From the results, one could also clearly see the advantage of the very smooth spatial pressure profile variation in IMLPG\_R results unlike other particle methods available in the field. Our future studies will be to use this coupling concept in our 3D code to compare it with the large scale experiments carried out in GWK tank for the Alpha Ventus Wind Farm that was recently installed in the Germany's North Sea.

## Acknowledgements

The author would like to acknowledge the ALEXANDER – VON- HUMBOLDT Foundations, Germany as well as NEWTON FELLOWSHIP (funded by the Royal Society, Royal Academy of Engineers and British Academia), United Kingdom.

## References

- Chien H., Kao C.-C., Chuang L.Z.H. (2002) On the characteristics of observed coastal freak waves, *Coastal Engineering J.*, 44(4), 301-319.
- Fujima, K., Masamura, K., and Goto, C. (2002). "Development of the 2D/3D hybrid model for tsunami numerical simulation." *Coastal Engineering Journal*, 44(4), 373–397.
- Grilli, S. T., Gilbert, R. W., Lubin, P., Vincent, S., Astruc, D., Legendre, D., Duval, M., Kimmoun, O., Branger, H., Devrard, D., Fraunie, P., and Stéphane, A. (2004). "Numerical modeling and experiments for solitary wave shoaling and breaking over a sloping beach." *Proc., 14th Int. Offshore Polar Eng. Conf., Toulon, France.* 306–312.
- Kassiotis C., Ferrand M., Violeau D., Rogers B.D. (2011) "Coupling SPH with a 1-D Boussinesq-type wave model", 6th International SPHERIC Workshop, Hamburg, Germany.
- Lachaume, C., Biausser, B., Grilli, S. T., Fraunie, P., and Guignard, S. (2003). "Modeling of breaking and post-breaking waves on slopes by coupling of BEM and VOF methods." *Proc., 13th Int. Offshore Polar Eng. Conf., Honolulu, HI.* 1698–1704.
- Narayanaswamy M, Crespo AJC, Gomez-Gesteira M., and Dalrymple R.A. (2010) SPHyiscs-FUNWAVE hybrid model for coastal wave propagation, *J. of Hydraulic Research*, vol 48. Extra Issue, 85-93.
- Nikolkina I., and Didenkulova I., (2011) "Rogue Waves in 2006-2010", *Nat. Hazards Earth Sys. Sci.*, 11, 2913-2924.
- Sriram V., and Ma Q.W, (2011) Improved MLPG\_R method for simulating 2D interactions between violent waves and elastic structures., *J. computational Physics*, submitted
- Sitanggang K.I (2008) Boussinesq-Equation and RANS hybrid wave model, ph.d thesis, Texas A&M university, USA.
- Sriram V, Sannasiraj S.A., Sundar V, Schlenkhoff A, and Schlurmann T, Quantification of phase shift in the simulation of shallow water waves, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 62 (12) (2010) 1381-1410.
- Sueyoshi M., Kihara H., and Kashiwagi M. (2007) " A hybrid technique using particle and boundary-element methods for wave-body interaction problems", 9th International conference on numerical ship hydrodynamics, Ann Arbor, Michigan.



## **Aufbau und Betrieb eines Tideelbmodells für morphodynamische Simulationen mittels SELFE im Rahmen von KLIWAS 3.03**

*Dipl.-Ing. Knut Krämer, Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann*

### **Einleitung**

Das Ressortforschungsprogramms KLIWAS des Bundesministeriums Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland. In Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wird am Franzius-Institut (FI) im Rahmen des KLIWAS-Projektes 3.03 der Einfluss von klimabedingten Änderungen auf den Sedimenthaushalt der Nordsee-Ästuar untersucht. Ziel der Untersuchungen ist es zunächst, das Systemverständnis der Sedimenttransportprozesse in den Ästuaren zu verbessern und auf dieser Grundlage klimasensitive Einflussfaktoren auf die Sedimentdynamik zu identifizieren. Im Referat M3 der BfG werden hierzu langjährige Zeitreihen von Naturmessdaten aus den Ästuaren analysiert, um bereits vorhandene morphodynamische Trends zu beschreiben. Parallel werden am FI auf Grundlage der Naturmessdaten hydrodynamisch-numerische Modelle der Ästuar aufgebaut und kalibriert, um den gegenwärtigen Zustand der Sedimenttransportprozesse in den Ästuaren in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung abbilden zu können. Im zweiten Schritt sollen die numerischen Modelle zur Analyse der Auswirkungen durch den Klimawandel veränderter Randbedingungen auf die ästuarine Sedimentdynamik verwendet werden. Im Fokus dieses Beitrags steht das Modell der Tideelbe.

### **Methoden**

#### Modellsystem SELFE

Für die morphodynamischen Simulationen wird das dreidimensionale barokline Zirkulationsmodell SELFE (Zhang und Baptista, 2008) verwendet. Das quelloffene Modellsystem wurde am Center for Coastal Margin Observation and Prediction (CMOP) in den USA zur Simulation von skalenübergreifenden Prozessen in Fluss-Ästuar-Schelf-Systemen entwickelt. Der hydrodynamische Kern wird durch eine Reihe von Modulen erweitert, welche die gekoppelte Berechnung von Sedimenttransport, Ökologie und Wasserqualität oder Strömungs-Wellen-Interaktion ermöglichen. SELFE löst die 3D-Flachwassergleichungen mittels Boussinesq-Approximation und hydrostatischer Druckapproximation, wobei im Nachgang eine nicht-hydrostatische Druckkorrektur verwendet werden kann. Weiterhin werden Transportgleichungen für Salz, Temperatur und Tracer gelöst. Die Turbulenzschließung erfolgt nach dem Generic Length Scale Verfahren (Umlauf und Burchard, 2003). Die numerische Formulierung von SELFE kombiniert Finite-Elemente- und Finite-Volumen-Ansätze. Zur Steigerung der Effizienz erfolgt eine implizite Behandlung des barotropen Druckgradienten, der vertikalen Viskosität in der Impulsgleichung sowie des Divergenztermes in der Kontinuitätsgleichung. Diese Terme stellen bei expliziter Behandlung die größten Einschränkungen hinsichtlich der möglichen Netzauflösung und des verwendeten Zeitschrittes dar (Zhang und Baptista, 2008). Alle verbleibenden Terme werden explizit behandelt.

Die horizontale Diskretisierung in SELFE erfolgt mittels unstrukturierter Dreieckselemente. Die daraus entstehenden Rechenetze zeichnen sich durch eine hohe Flexibilität bei der Abbildung komplexer Geometrien mit örtlich stark variierenden Anforderungen an die räumliche Auflösung aus. Außerdem entfällt das Orthogonalitätskriterium strukturierter Gitter. Die vertikale Diskretisierung erfolgt mittels hybrider SZ-Koordinaten. Bis zu einer benutzerdefinierten Grenztiefe werden geländefolgende S-Level verwendet, um eine detailgetreue Abbildung der Bathymetrie zu gewährleisten. Unterhalb dieser Tiefe werden Z-Level mit festen Tiefenbezügen verwendet. Eine lokale Verfeinerung der vertikalen

Diskretisierung an der Wasseroberfläche und/oder Sohle durch zusammenziehen der Level ermöglicht eine Erhöhung der Auflösung im Bereich großer Gradienten der berechneten Parameter.

Die Berechnung des Sedimenttransports erfolgt nach der Berechnung der hydrodynamischen Größen mit einem Sedimentmodul, welches an das in ROMS verwendete Sedimentmodul angelehnt ist (Warner et al., 2008). Es werden anwenderdefinierte Sedimentklassen verwendet, die durch Dichte, mittleren Korndurchmesser, Sinkgeschwindigkeit sowie kritische Schubspannung und Erodierbarkeitskonstante definiert werden. Der Suspensionstransport wird durch Lösen der Advektions-Diffusions-Gleichung für Tracer berechnet, der Geschiebetransport kann beispielsweise nach Meyer-Peter und Müller (1948) oder nach van Rijn (1984) erfolgen.

### Modellaufbau Tideelbe

Grundlage für den Aufbau der Modellgeometrie des Tideelbmodells im Zustand 2006 bildet ein digitales Geländemodell aus dem Verantwortungsbereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), das den Bereich der Tideelbe abdeckt, sowie vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) erhobene Tiefendaten aus der deutschen Buch. Weiterhin werden im Bereich des Hamburger Hafens von der Hamburg Port Authority (HPA) zur Verfügung gestellte Tiefendaten verwendet, die einen mittleren Unterhaltungszustand des Hafens abbilden. Diese Datensätze wurde zu einer konsistenten Bathymetrie kombiniert, welche die Grundlage für die Netzgenerierung darstellt. Die Erzeugung des horizontalen Rechennetzes erfolgt mithilfe der MATLAB-basierten Programmpaketes BATTRI (Bilgili et al., 2006), welches das Paket Triangle (Shewchuck, 1996) zur Triangulation verwendet. Als landseitige Berandung wurde die Deichlinie gewählt. Den binnenseitigen Rand stellt das Wehr in Geesthacht dar, der seeseitige Rand verläuft von Cuxhaven in einem Bogen über Helgoland bis nach St. Peter-Ording. Die Modellbathymetrie ist in Abbildung 1 dargestellt.

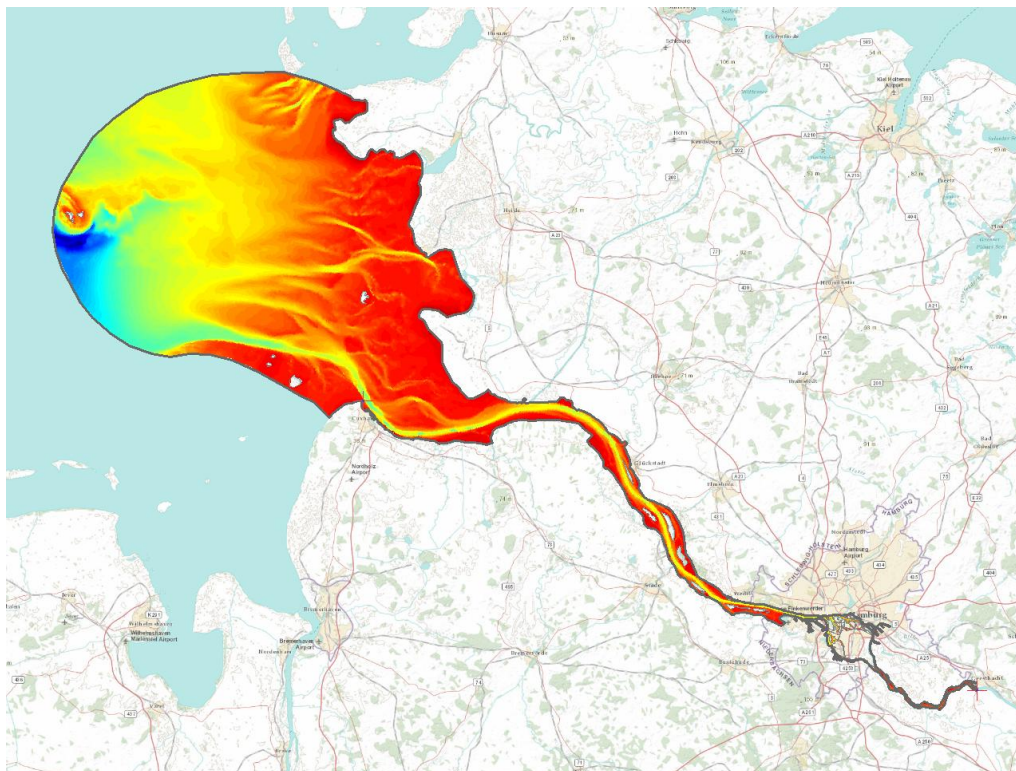


Abbildung 1: Bathymetrie des Tideelbmodells

Die Wahl dieses weit in die deutsche Bucht hineinreichenden Randes ermöglicht eine weitgehende Unabhängigkeit von ästuarinen Salzgehalten und dadurch hervorgerufenen Schichtungseffekten und erlaubt

eine Vorgabe eines zeitlich wie räumlich konstanten Nordsee-Salzgehalts ohne die Notwendigkeit einer Steuerung dieser Größe.

Die Steuerung des Elbmodells erfolgt über die Vorgabe des Durchflusses, gemessen am Pegel Neu Darchau am binnenseitigen Rand und die Vorgabe des Wasserstandes am seeseitigen Rand. Zur Steuerung des Wasserstandes am seeseitigen Rand wurde einer Übertragungsfunktion für Phase und Amplitude der in die Elbmündung einlaufenden Tidewelle entwickelt, basierend auf dem Wasserstand am Pegel Helgoland Südhafen. Hierzu wurden langfristige Zeitreihen des Wasserstandes an einer Reihe von Pegelstandorten an der inneren deutschen Bucht analysiert.

Zur Kalibrierung des Tideelbmodells wurden Randbedingungen aus gemessenen Zeitreihen des Wasserstandes am Pegel Helgoland Südhafen und Zeitreihen des Abflusses am Pegel Neu Darchau erstellt. Über eine Simulationslaufzeit von 30 Tagen wurden Zeitreihen des Wasserstandes, der Strömungsgeschwindigkeit und des Salzgehaltes aus Messungen an einer Reihe von Messstationen entlang der Tideelbe mit den Simulationsergebnissen verglichen. Der Kalibrierzeitraum bildet im Hinblick auf die Randbedingungen mittlere Verhältnisse ab. Für die anschließende Validierung wurden Zeiträume mit besonders hohen bzw. niedrigen binnenseitigen Abflüssen gewählt, um die Fähigkeit des Modells zur korrekten Abbildung von Extremereignissen zu überprüfen.

#### Morphodynamische Simulationen

Die morphodynamischen Langfristsimulationen dienen der Abschätzung der Reaktion der ästuarinen Sedimentdynamik auf veränderte klimatische Randbedingungen. Hierbei müssen die Auswirkungen einzelner Extremereignisse wie Sturmfluten oder Perioden besonders hoher oder niedriger binnenseitiger Abflüsse einerseits sowie langfristige Trends wie der Meeresspiegelanstieg andererseits auf die Sedimentdynamik bewertet werden. Die Fähigkeit zur naturgetreuen Abbildung morphodynamischer Prozesse des Modells soll mithilfe von mehrjährigen Simulationen erfolgen. Ausgehend von der Modellbathymetrie des Jahres 2006 kann so nach einem vierjährigen Simulationslauf überprüft werden, in welchem Maß das Modell in der Lage ist, die reale Bathymetrie des Jahres 2010 großflächig übereinstimmend wiederzugeben. Eine Herausforderung stellt hierbei die fehlende Möglichkeit der Abbildung anthropogener Eingriffe dar. Es gilt daher, die Auswirkungen von Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen gegenüber der natürlichen Variabilität und klimabedingten Änderungen im Sinne einer Sensitivitätsanalyse abzuschätzen.

Für die Prognose der Entwicklung der ästuarinen Sedimenthaushalte unter geänderten klimatischen Randbedingungen sind Simulationsläufe in der Größenordnung von Jahrzehnten nötig. Unter der Voraussetzung geeigneter Randbedingungen für binnenseitigen Abfluss und seeseitigen Wasserstand besteht eine weitere Herausforderung in der Durchführung von Langfristsimulationen hinsichtlich der verfügbaren Rechenkapazität. Es ist davon auszugehen, dass in Anbetracht notwendigen zeitlichen Auflösung lediglich ein Zeitraum von einem Jahr berechnet werden kann. Das Konzept der morphodynamischen Beschleunigung (Latteux 1995, Lesser et al. 2004) kann hierbei verwendet werden, um aus der Berechnung eines kurzen hydrodynamischen Zeitraumes Aussagen über die Entwicklung innerhalb eines längeren morphodynamischen Zeitraumes zu ermöglichen. In jedem hydrodynamischen Berechnungszeitschritt werden der Sedimenttransport und die hieraus resultierende Sohländerung ermittelt. Diese wird mit einem morphodynamischen Beschleunigungsfaktor multipliziert, bevor sie als Feedback in den nächsten Berechnungszeitschritt der Hydrodynamik eingeht. Auf diese Weise ist es möglich auf der Grundlage der Hydrodynamik eines Jahres Aussagen über morphologische Tendenzen zu erlangen, die sich über einige Jahre bis Jahrzehnte erstrecken.

Neben den morphodynamischen Simulationen zur Untersuchung der Entwicklung der Bathymetrie sind auch Simulationen geplant, die den Verbleib von an binnen- und seeseitigem Rand eingetragenen Tracern abbilden. Ziel ist es, den Weg ins Ästuar eingebrachter an suspendierte Sedimente gebundener Schadstoffe zu verfolgen, Verweilzeiten zu ermitteln und eventuelle Akkumulationsräume zu identifizieren. Darüber hinaus können diese Untersuchungen zur Abschätzung der Vermischung mariner und fluvialer Sedimente dienen.

---

## Literatur

- BILGILI, A., SMITH, K. W., & LYNCH, D. R. (2006). BatTri: A two-dimensional bathymetry-based unstructured triangular grid generator for finite element circulation modeling. *Computers and Geosciences*, 32(5), 632-642.
- LATTEUX, B. (1995): Techniques for long-term morphological simulation under tidal action. *Marine Geology*, 126 (1-4), 129 - 141.
- LESSER, G., J. A. ROELVINK, T. M. VAN KESTER, G. S. STELLING (2004): Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51: 883 – 915.
- MEYER-PETER, E., R. MÜLLER (1948): Formulas for Bed-Load Transport, *International Association for Hydraulic Structures Research, Second Meeting, Stockholm 7-9. VI. 1948*
- SHEWCHUK, J.R. (1996): Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator, *Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering, Lecture Notes in Computer Science*, 1148, 203-222, Springer-Verlag, Berlin.
- SONG, Y., D. HAIDVOGEL (1994): A Semi-implicit Ocean Circulation Model Using a Generalized Topography-Following Coordinate System, *Journal of Computational Physics*, 115 (1), 228 – 244.
- UMLAUF, L., H. BURCHARD (2003): A generic length-scale equation for geophysical turbulence models, *Journal of Marine Research*, 61 (2), 235-265
- WARNER, J. C., C. R. SHERWOOD, R. P. SIGNELL, C. K. HARRIS, H. G. ARANGO (2008): Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model, *Computers and Geoscience*, 34 (10), 1284 – 1306.
- VAN RIJN, L.C. (1984), Sediment Transport, Part I: Bed load transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.
- ZHANG, Y.-L. AND A. M. BAPTISTA (2008): SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation, *Ocean Modelling*, 21 (3-4), 71 - 96.

## **Wasserbau Interdisziplinär!**

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Holger Schüttrumpf<sup>4</sup>, Dipl.-Ing. Catrina Cofalla, Dr. Roy Frings,  
Dipl.-Ing. Sebastian Henkel*

### **Einführung**

Der Wasserbauingenieur steht heutzutage im Spannungsfeld unterschiedlicher Nutzungen des Fluss- und Küstenraums zunehmend komplexeren, weil interdisziplinären und skalenübergreifenden Fragestellungen gegenüber. Aufgrund der abnehmenden natürlichen Ressourcen, des dramatisch zunehmenden wirtschaftlichen Nutzungsdrucks auf den Flussraum und einer zunehmenden Besiedlungsdichte der Flussniederungen und der Küstengebiete unter veränderten natürlichen Randbedingungen (Klimawandel) bei reduzierten finanziellen Mitteln sind nachhaltige Konzepte für die langfristige Nutzung, den Schutz und das Management der Flussgebiete und des Küstenraums erforderlich.

Dies erfordert von der Forschung die Bereitstellung von Methoden und Modellen, die insbesondere den Aspekten der Langfristigkeit, der Großräumigkeit und der Dynamik der Systeme Fluss und Küste Rechnung tragen, um damit die Forderung nach Nachhaltigkeit einer Maßnahme zu erfüllen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Betrachtung der vielfältigen interdisziplinären Prozesse von Bedeutung. Jede Maßnahme am Gewässer hat nicht nur Auswirkungen auf die Gewässerdynamik, die Gewässergüte und die Gewässerstruktur, sondern auch auf vielfältige biologische, chemische, sozioökonomische und andere Prozesse und Faktoren.

Dies erfordert neben der Weiterentwicklung von Einzelmodellen mit dem Ziel eines besseren Verständnisses der physikalischen Prozesse die Entwicklung neuer Modellsysteme und Methoden, um fachübergreifend auch die diversen komplexen und nicht-linearen Wechselwirkungen und Prozesse zu beschreiben. Diesen Aspekt hat auch das BMBF mit der aktuellen Bekanntmachung "Küstenmeerforschung in Nord- und Ostsee" aufgegriffen.

Interdisziplinäre Forschung erfordert aber auch die Ausbildung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die gleichermaßen wasserbauliche, biologische und / oder chemische Fragestellungen bearbeiten können und in der Lage sind, die Denk- und Vorgehensweise der jeweils anderen Disziplin zu verstehen und zu berücksichtigen.

Der vorliegende Beitrag stellt beispielhaft drei ausgewählte interdisziplinäre Forschungsvorhaben am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen vor.

### **Drei Beispiele für interdisziplinäre Forschung**

#### (a) Sediment gebundene Schadstoffe und aquatische Organismen

Sediment gebundene Schadstoffe stellen in vielen Gewässern eine ernst zu nehmende Gefahr für aquatische Organismen dar. Insbesondere kohäsive Altsedimente können mit anorganischen Schadstoffen kontaminiert sein. Werden diese Altsedimente aufgrund von Baggertätigkeiten oder Hochwässern erodiert, so werden die Schadstoffe u.U. bioverfügbar und schädigen die aquatische Umwelt. Verfügbare Untersuchungen zu diesem Thema gibt es im Labormaßstab auf Molekül-, Zell-, oder Embryoebene oder auf der Grundlage von Beobachtungen in der Natur. Die Möglichkeit der vergleichenden, systematischen Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Hydrodynamik, Sedimentdynamik, Schadstoffdynamik und aquatischem Organismus fehlt.

<sup>4</sup> Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University, Mies-van-der-Rohe-Str. 1, 52056 Aachen, Tel.: 0241-8025262, Fax.: 0241-8022348, E-Mail: schuettrumpf@iwth.rwth-aachen.de



Um diese Lücke zu schließen, wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie mit der Ökotoxikologie untersucht, ob das Kreisgerinne in der Klimakammer des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen grundsätzlich für entsprechende interdisziplinäre Untersuchungen geeignet ist (Abb. 1). Hierfür wurde zum einen ein multifraktionelles künstliches Sediment und zum anderen kohäsives Natursediment aus dem Rhein im Kreisgerinne eingebaut und durch dessen Rotation erodiert. In den unterschiedlichen Szenarien kamen ausgesuchte Schadstoffe (PAKs) und Regenbogenforellen (*Oncorhynchus mykiss*) zum Einsatz, um langfristig die Risiken, die durch die Resuspension von kontaminierten Sedimenten ausgeht, abzuschätzen. Durch die Wahl verschiedener Versuchsreihen konnte die Auswirkung von Sediment, Schadstoff und Strömung auf die Forellen unter konstanten Umweltbedingungen systematisch analysiert werden. Eine Batterie verschiedener Biomarker wurde untersucht, um die Hypothese zu verifizieren, dass die Resuspension kontaminierter Sedimente zu Effekten in aquatischen Organismen führen kann. Die Messung von Gallenmetaboliten konnte als ein geeigneter Marker für die erhebliche Aufnahme und metabolische Transformation von PAKs während des simulierten Hochwassers identifiziert werden.

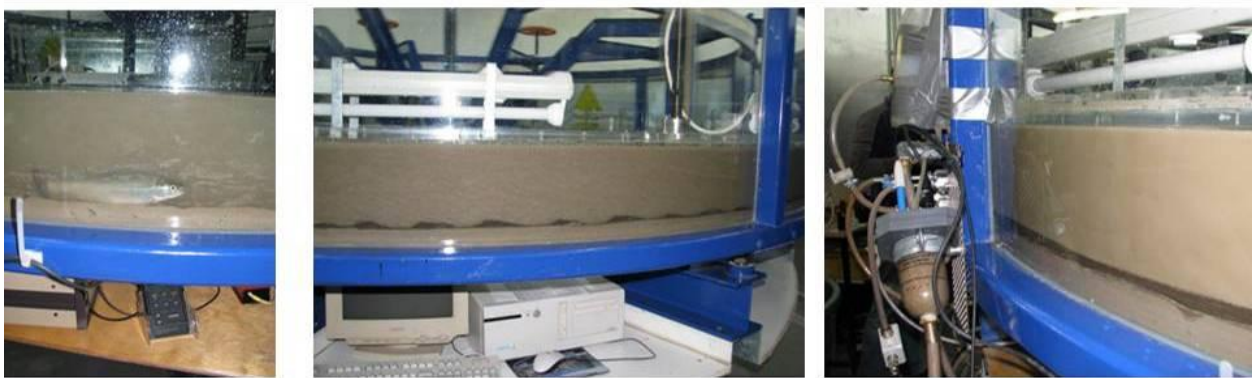


Abb. 1: Hydrotoxische Untersuchungen zur Bioverfügbarkeit sedimentgebundener Schadstoffe

Damit wurde eine neue experimentelle Methode entwickelt, die für die Bewertung der Bioverfügbarkeit Sediment gebundener Schadstoffe geeignet ist und die maßgebenden Prozesse und Wechselwirkungen berücksichtigt.

#### (b) Invasive Species – der amerikanische Flusskrebs

Bis vor einem Jahrhundert gab es in Nordrhein-Westfalen große Bestände des Edelkrebses (*Astacus Astacus*). Heutzutage ist er vom Aussterben bedroht. Neben menschlichem Konsum, Gewässerverschmutzung und dem Gewässerausbau hat vor allem die Einführung amerikanischer Flusskrebsarten den erschreckenden Rückgang der Edelkrebsbestände verursacht. Die amerikanischen Krebse verdrängen nicht nur den Edelkrebs aus seinem Lebensraum, sondern übertragen auch eine für den Edelkrebs tödliche Pilzerkrankung, die sogenannte „Krebspest“.

Um die Ausbreitung des amerikanischen Flusskrebses zu stoppen, war die Entwicklung einer Flusskrebsperre zusammen mit Ökologen Aufgabe eines interdisziplinären Forschungsvorhabens. Dazu wurde die große Kippbinne des IWW in zwei Testbereiche unterteilt. In jedem Bereich wurde eine Sperre installiert, mit Ködern auf der einen und amerikanischen Flusskrebsen auf der anderen Seite (Abb. 2). Achtundvierzig Stunden lang wurde das Bewegungsverhalten der Krebse mit Infrarotkameras bei variablen Strömungsbedingungen überwacht. Aus den Versuchen mit verschiedenen Geometrien und Oberflächenrauheiten ist deutlich geworden, dass Krebse ohne große Mühe senkrechte Wände hochklettern können, aber Probleme haben, gegen die Strömung einen glatten Hang hoch zu wandern. Die entwickelte Fischsperre soll im nächsten Schritt in Bächen oder in bestehende Fischtreppe integriert werden, um die Machbarkeit in der Natur nachzuweisen.



Abb. 2: Amerikanische Flusskrebse im wasserbaulichen Modellversuch

Den krönenden Abschluss des Projektes stellt im Übrigen das große Krebs-Essen in der Versuchshalle des IWW mit mehr als 130 beteiligten Flusskrebsen dar.

#### (c) Verockerung von Brunnen

Zur Entwässerung der grundwasserführenden Bodenschichten in den Tagebauen und Randbereichen des niederrheinischen Braunkohlereviere betreibt die RWE Power AG eine Vielzahl von Sumpfungsbrunnen. Diese Sumpfungsbrunnen, welche hauptsächlich als Vertikalfilterbrunnen ausgeführt sind, senken den Grundwasserstand großräumig ab, um eine Trockenförderung der Braunkohle zu ermöglichen. Die Leistungsfähigkeit dieser Anlagen hängt neben den Durchlässigkeitseigenschaften des Bodens bzw. Filtermaterials auch von den Durchlässigkeitseigenschaften des Brunnenfilterrohrs selbst sowie dessen Interaktion mit der radialen Anströmung des Brunnens ab. Die Alterung von Brunnen, z.B. aufgrund von Verockerung, ist eine der Hauptursachen für einen Verlust der Leistungsfähigkeit. Die Verockerung entsteht durch die Oxidation und die Ausfällung von im Grundwasser gelöstem Fe(II) zu schwerlöslichen, partikulären Fe(III)-Mineralen in Filterrohr und Filterkies.

Um den Prozess der Verockerung, dessen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von Brunnen sowie mögliche Gegenmaßnahmen zu untersuchen, war die Erstellung eines kombinierten strömungsphysikalischen und hydrochemischen Modellprototyps und die Durchführung eines Pilotversuchs unter gegebenen Randbedingungen inklusive dessen Auswertung und Dokumentation in Zusammenarbeit mit der Hydrogeologie erforderlich, um einen quantifizierbaren und nachvollziehbaren Effekt auf die Druckverhältnisse im Brunnen zu erreichen. In der Natur erreicht die Verockerung der Brunnen häufig erst nach Jahren des Betriebs ein Niveau, das sich deutlich negativ auf die Druckverhältnisse auswirkt. Im Rahmen der Versuche sind die ablaufenden Prozesse und Reaktionen daher kontrolliert zu beschleunigen, so dass die Versuche in einem akzeptablen Zeitrahmen durchgeführt und reproduziert werden können.

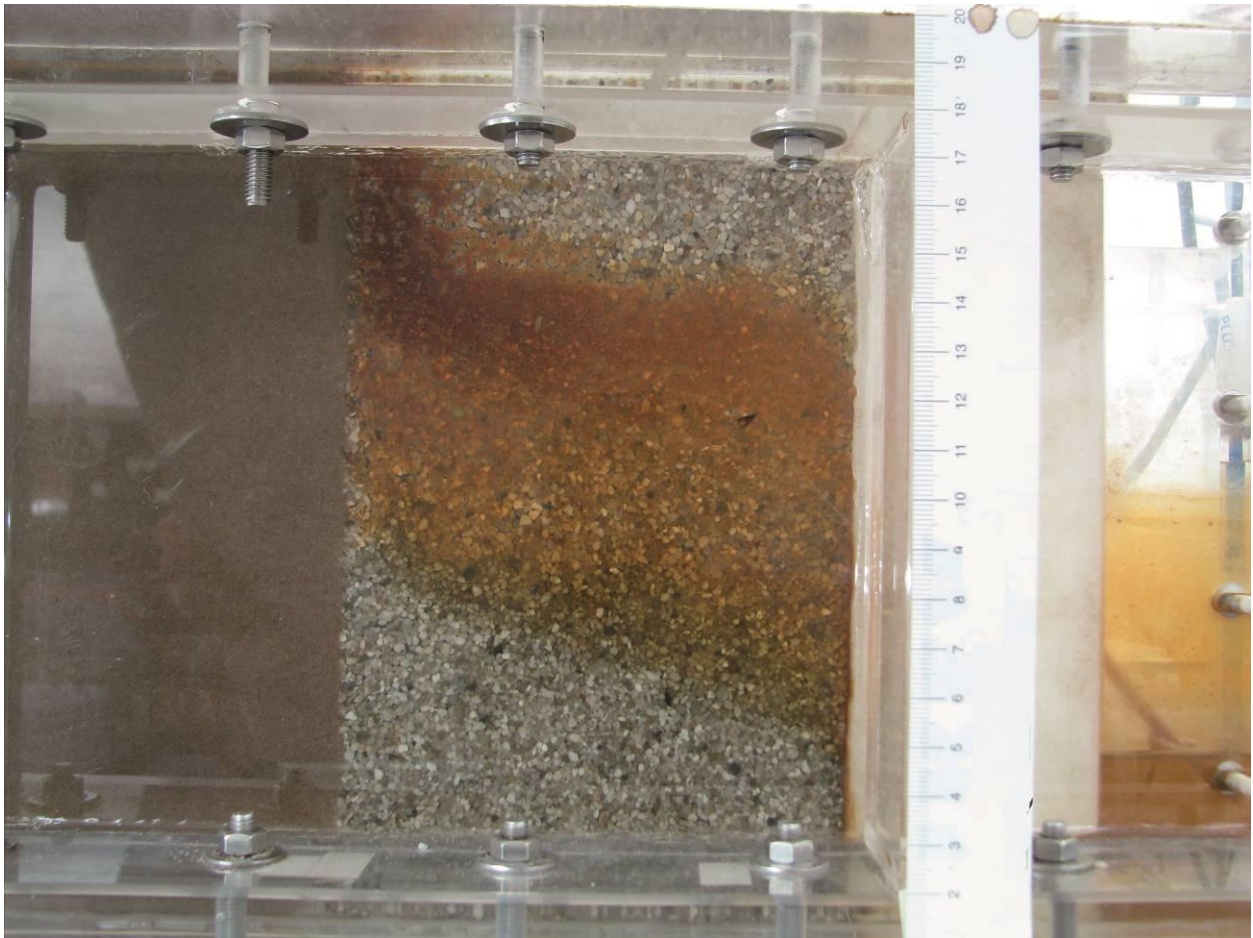


Abb. 3: Verockerung im Brunnenmodell

Es konnte mit dem Versuchsstand in vier Dauertests nachgewiesen werden, dass eine reproduzierbare und quantifizierbare Verockerung möglich ist. Dabei konnte die Verockerung im Modell gezielt in der Filterkiesschüttung des Brunnausschnitts erzeugt werden (Abb. 3). Eine signifikante Änderung des Druckabbaus infolge der Verockerung konnte ebenfalls identifiziert werden.

## Experimental investigation of flow-induced vibrations of the radial gate of the Subansiri dam

Dipl.-Ing. Franziska Verworn, Prof. Dr.-Ing. Daniel B. Bung,  
Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann

### Objectives

The National Hydro Power Corporation Limited (NHPC Ltd.) is presently constructing a new reservoir mainly for hydro power purposes in India. The construction site of the Lower Subansiri HE Project is located near North Lakhimpur on the border of Assam and Arunachal Pradesh in the Dhemaji district of Assam in the north east of India (see Figure 1). The project will be India's biggest run of river power plant with 2000 MW. For this purpose the Subansiri River, which is tributary of the Brahmaputra, will be retained as a run of river scheme.

As one of the main components of the project, the concrete gravity dam is 116 m high in reference to the river bed level and the height above the lowest foundations amounts to 130 m. The main section of the dam is shown in Figure 1. The reservoir volume is designed for a gross storage capacity of 1,370,000,000 m<sup>3</sup> [CWC, 2009]. The spillway is designed for a maximum spillway capacity of 38,500 m<sup>3</sup>/s. The dam will be equipped with a spillway controlled by 9 identical radial gates subjected to a maximum water head of 61 m in the reservoir. The dimension of each gate is 11.50 m in width and 14.00 m in height.

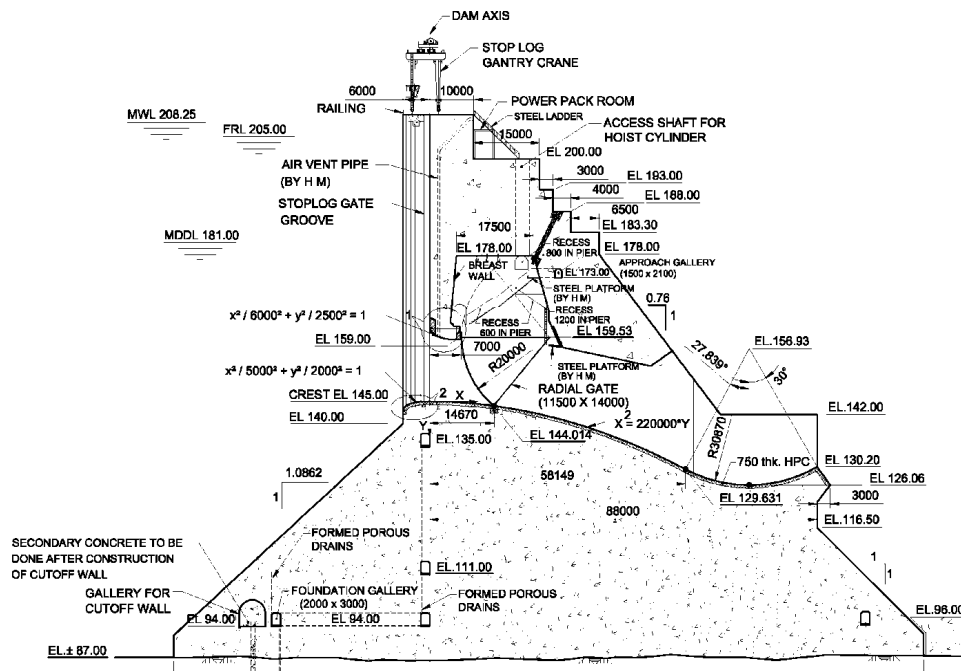


Figure 1: Constructional drawing of the concrete gravity dam (section view) provided by NHPC

For ensuring the suitable functioning of the facility hydraulic model studies on gate vibrations are required. The FRANZIUS-INSTITUTE FOR HYDRAULIC, WATERWAYS AND COASTAL ENGINEERING was assigned by NHPC Ltd. to perform radial gate vibration testing on a full width rigid model of one single gate scaled 1:35. As a rigid model is used for the investigation, scaling of the structure's stiffness and mass is not required. Instead, possible dominant frequencies of hydrodynamic pressure fluctuations will be correlated with a ma-



thematically derived modal analysis to determine major natural frequencies of the prototype gate relevant for probable resonance excitations.

## Methods

In general, hydraulic structures submerged in a uniform flow are exposed to forces induced by the incident flow or flow past the structure. The hydrodynamic force acting on a structure is a function of time and can be subdivided into an averaged part and a fluctuating part. The fluctuating components of the hydrodynamic force can be induced by different excitation mechanisms and may lead to potential vibrations. The experimental determination of hydrodynamic forces may be carried out directly by force measurement and indirectly using pressure transducers (Naudascher, 1980).

In the present experimental investigation, pressure fluctuations on the skin plate of the gate as well as upstream and downstream of the gate were measured for different partial opening and different water levels of the reservoir. Thus, the investigation includes a set of parameter combinations (see Table 1). Since primarily for small partial gate openings vibration amplifications occur (ICOLD, 1996), the focus of the model tests was on small partial gate openings.

Table 1: Set of configurations for the structure-specific model test

Reservoir Water level [m]	Water level above dam crest		Model tests					
	prototype [m]	model [mm]	Partial Gate openings [mm]					
			29	57	86	143	200	286
160	15.00	429	Test 01	Test 05	Test 09	Test 13	Test 17	Test 21
176	31.00	886	Test 02	Test 06	Test 10	Test 14	Test 18	Test 22
190	45.00	1286	Test 03	Test 07	Test 11	Test 15	Test 19	Test 23
206	61.00	1743	Test 04	Test 08	Test 12	Test 16	Test 20	Test 24

Installed in the experimental hall Schneiderberg the test stand for the experimental investigations consisted of the following: the reservoir including the water supply, the inlet channel and the construction of the dam as shown in Figure 2. The dam itself is made of acrylic glass in order to have a visual impression of the flow conditions around the gate. For the installation of the various measuring instruments (pressure transducers and load cells) it was necessary to design an appropriate support construction. Therefore, certain parts of the dam construction, which will not influence the flow around the gate, had to be removed changing the side view of the general arrangement of the dam in comparison to the original constructional drawings.

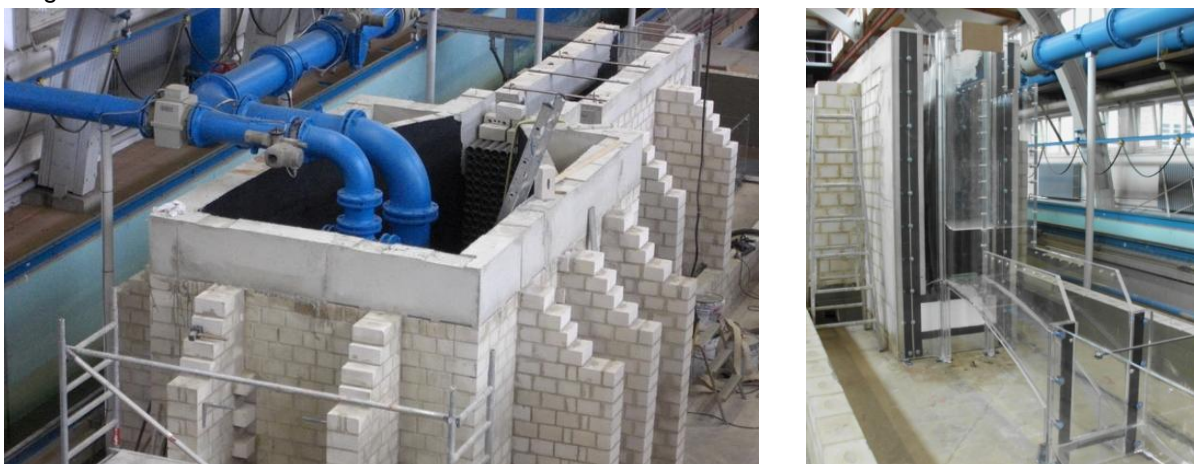


Figure 2: Reservoir and inlet channel (left) and dam construction made of acrylic glass (right)



The test stand and the model of the gate were constructed according to Froude model law with a length scale factor of  $L_r = 35$ . The complete model of the radial gate was made of aluminum. Figure 3 pictures the radial gate and the corresponding lifting apparatus during installation of the measuring tools. In order to measure the temporal variation of pressure, eight pressure transducers in total were installed at selected points upstream and downstream of the skin plate and on the skin plate itself, particularly on the bottom edge.

In general, flow-induced pressure fluctuations will not act in the same fashion from one spot of a structure to another. Therefore any number of pressure measurements will yield only limited information on the exciting force without additional correlation measurements (see Kobus, 1980). In order to fill this gap, direct force measurements complete the setup. The forces acting on the gate are measured using force and load cells respectively. In order to capture all components of the resulting force acting on the trunnion and gate, respectively, seven force transducers are installed to ensure a three-point-measurement in the horizontal and vertical direction.

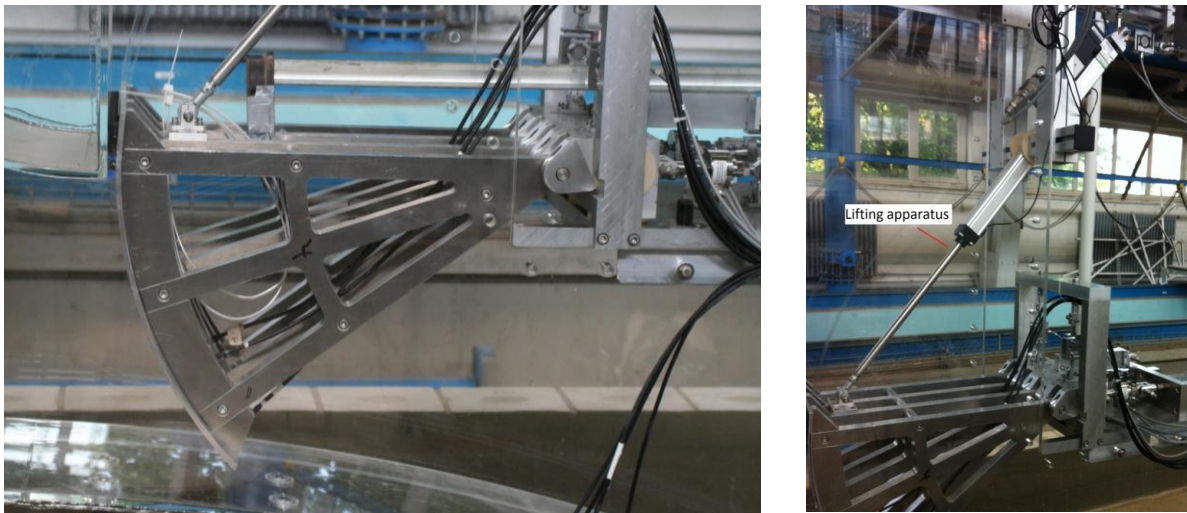


Figure 3: Model of the radial gate (left) and lifting apparatus adjusting the position of the gate (right)

The temporal sequences of the pressures and forces were acquired using the QuantumX data acquisition system of the company HBM. Thereby, the data sets were recorded continuously for a time period of 5 min using a highly resolved sampling rate of 600 Hz. By the use of the Fast Fourier Transform (FFT) algorithm the pressure signal was converted into a set of points in the frequency-domain. The pressure fluctuations from the experiments are analyzed to obtain the amplitude spectra of the fluctuation data in order to determine whether the frequency content of a signal contains certain frequencies. These possible dominant frequencies of the hydrodynamic pressure fluctuations were then correlated with a structural analysis where the major natural frequencies of the prototype gate are determined and which are relevant for probable resonance excitations. The Finite Element Method (FEM) is used to calculate the natural frequencies and therefore to analyze the vibrations characteristics of the gate.

## Results

During the different tests photographs were taken to give a visual impression of the flow conditions (see Figure 4). Regarding the different partial opening the graphs of amplitude spectra were studied for different water levels. As a result the pressure fluctuations on the gate are not large under the discharge of the different gate openings and no dominant frequencies are seen from the amplitude spectra so.

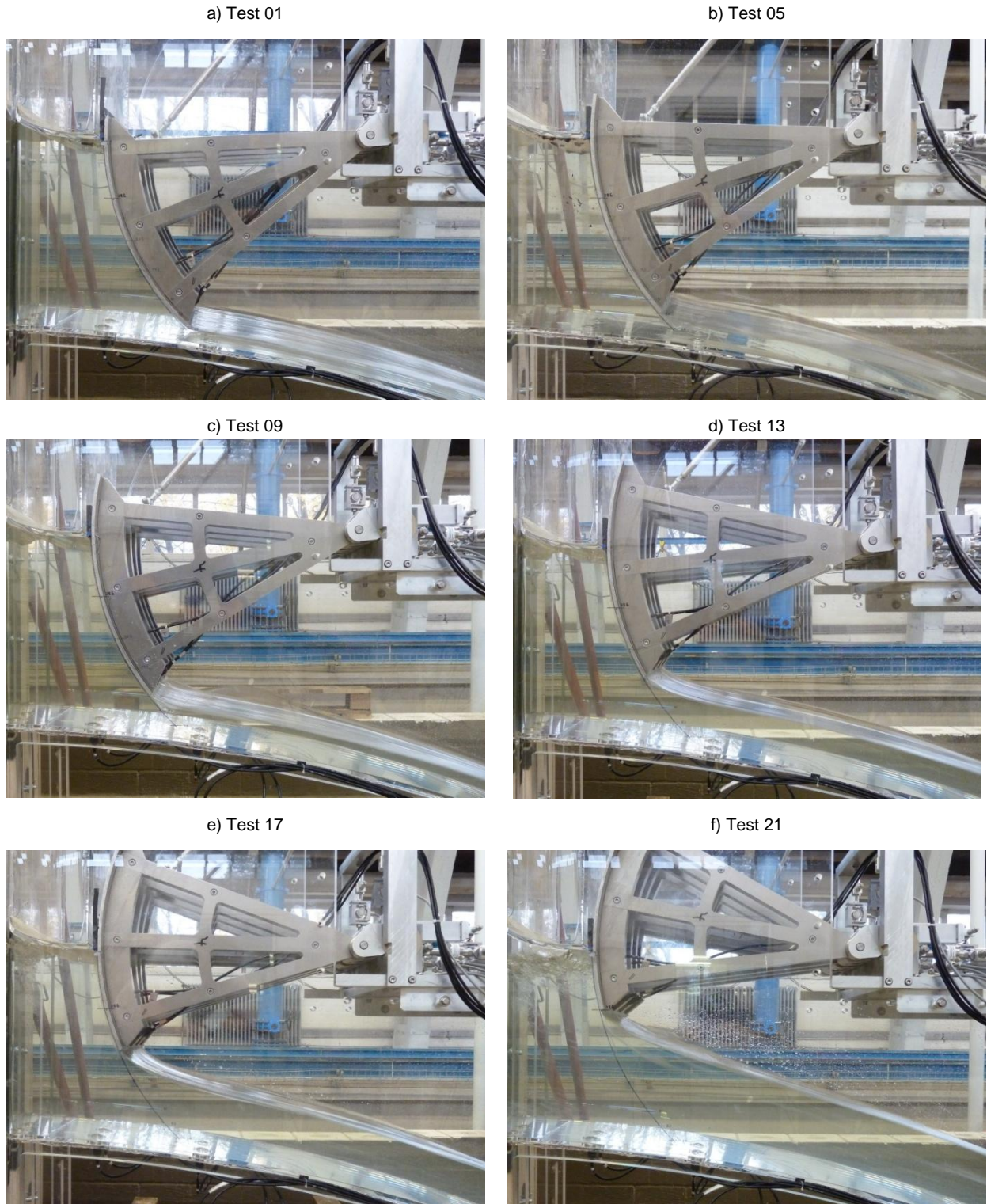


Figure 4: Side view of the hydraulic model during different tests

Regarding the determination of the natural frequencies, nine major modes up to 50 Hz with global deflection are considered for all combinations of partial openings and water levels. As the model results are scaled to prototype scale and compared with the natural frequencies, no significant vibration excitation source could therefore be detected. By a way of example, for a partial gate opening  $a = 1$  m the time-domain representation of all pressure measurements and the resulting frequency spectra (Test 01,  $H = 160$  mNN) for the pressure transducers on the skin plate are shown below.



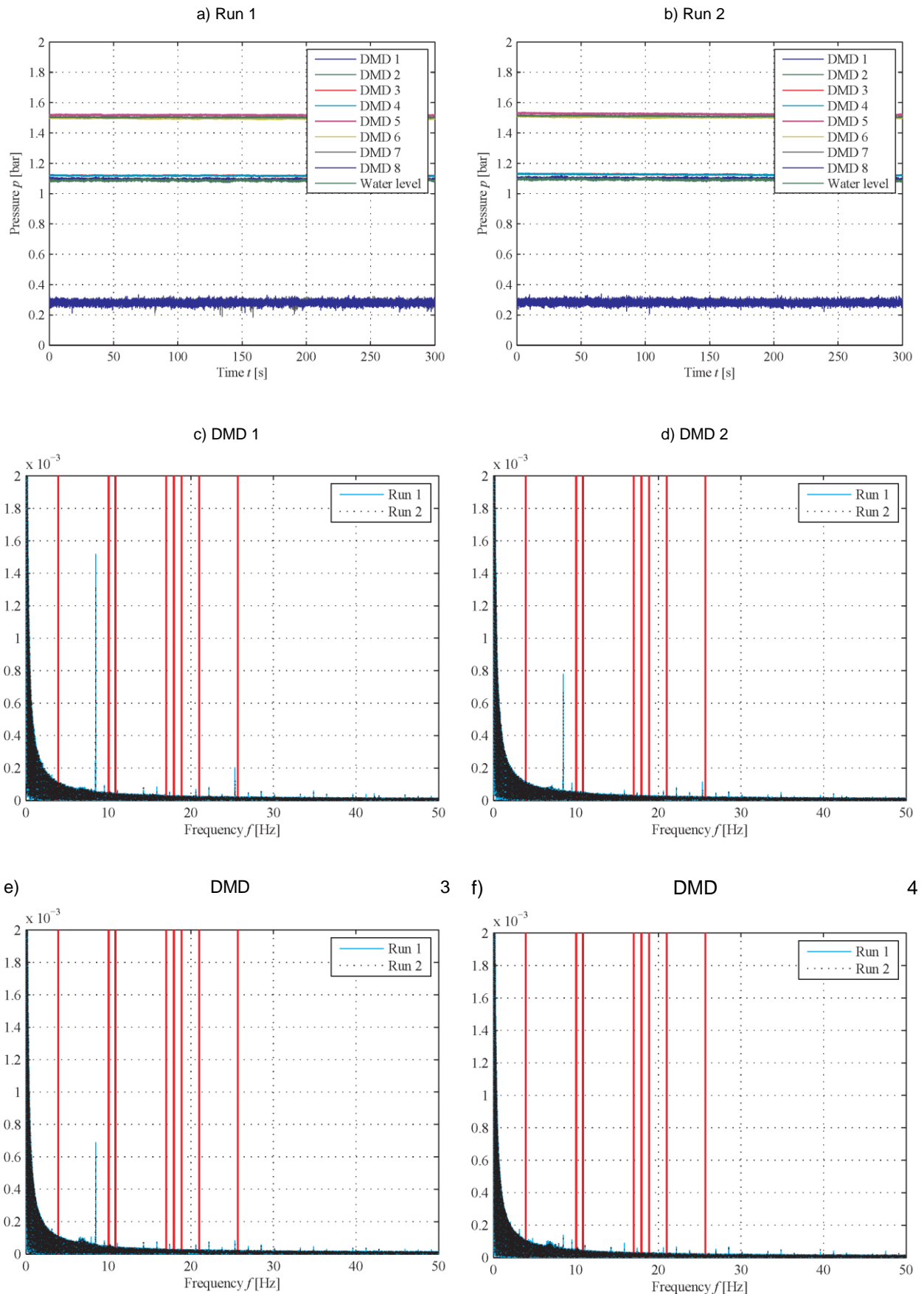


Figure 5: Pressure measurements and resulting frequency spectra for Test 01 (DMD 1 till DMD 4) supplemented by the natural frequencies (depicted as red colored lines)

The red-colored lines indicate the values of the natural frequencies. Note that the resulting frequency spectra for both runs are almost identical. It must be noted that single peaks coming along with a frequency of 8.5 Hz (prototype scale) are due to the power frequency of 50 Hz (model scale) in experiments.

To validate the experimental results, measurements of bearing forces were carried out and subjected to a frequency analysis. In correspondence with the pressure signals, the signals of the force transducer do not include any significant frequencies for all water levels. This applies to all conducted model tests.

## Summary

On behalf of NHPC Ltd. extensive hydraulic model tests were carried to investigate possible vibration excitation on radial gates planned to be constructed at Subansiri Lower Project. For this purpose, the physical model of a single gate was built at the hydraulic laboratory facility Schneiderberg. The model was set up as a full width rigid model scaled 1:35. Pressure and force transducers were installed in order to compare hydrodynamic fluctuations and resulting excitation frequencies with natural frequencies of the structure. Therefore, a structural analysis was conducted in prototype scale. The Finite Element Method (FEM) is used to calculate the natural frequencies and therefore to analyze the vibrations characteristics of the gate.

The focus of the hydraulic model tests were on small partial gate openings. As agreed with NHPC measurements were conducted for a total six partial gate openings (i.e. 1 m, 2 m, 3 m, 5 m, 7 m and 10 m) and four reservoir water levels (i.e. 160 mNN, 176 mNN, 190 mNN and 206 mNN). Thus, the investigation included a set of 24 configurations. The pressure fluctuations from the experiments were analyzed to obtain the amplitude spectra of the fluctuation data in order to determine whether the frequency content of a signal contains certain frequencies. The resulting pressure fluctuations on the gate are not large under the discharge of the different gate openings and no dominant frequencies are seen from the amplitude spectra. As the model results are scaled to prototype scale and compared with the natural frequencies, no significant vibration excitation sources could be detected. Measurements of bearing forces were carried out in order to validate the experimental results obtained by the pressure transducers only.

## References

- Naudascher, E (1980) Models of hydraulic structures: Flow-induced forces, vibrations and cavitation, in: Hydraulic modeling, Kobus, H. (Editor), Bulletin 7, German Association for Water Resources and Land Improvement, Verlag Paul Parey, Hamburg, 1980
- ICOLD (1996) Vibrations of hydraulic equipment for dams: review and recommendations, Bulletin 102, Commission International des Grands Barrages / Committee on hydraulics for dams, Paris, 1996
- Kobus H. (1980) Hydraulic modeling, Bulletin (German Association for Water Resources and Land Improvement); No. 7, Verlag Paul Parey, Hamburg, 1980
- CWC (2009) National Register of Large Dams, Central Water Commission, New Delhi, [www.cwc.nic.in](http://www.cwc.nic.in) (Abruf Februar 2012)

## Feldmessungen und hydronumerische Untersuchung zur Verschlickungsproblematik des Hafens Juist

*M. Sc. Jan Saalbach, Dipl.-Ing. Anna Zorndt, Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann*

### Motivation

Die Insel Juist kann aufgrund der Tideverhältnisse im ostfriesischen Wattenmeer und der besonderen Lage des Hafens nur gezeitenabhängig von Fähren und Sportschiffen angefahren werden. Vor wenigen Jahren wurde an den bestehenden Gemeindehafen der Insel ein neuer Sportboothafen angeschlossen, der ca. 150 Liegeplätze für Sportschiffer bereit hält (s. Abb. 1). Während der ersten Betriebsjahre des Sportboothafens zeigte sich, dass die Versandung des Hafens deutlich stärker ausfällt als erwartet. Die Analyse der Tidecharakteristik und der Eintragsmechanismen der hohen Sedimentablagerungen im Sportboothafengebiet wurden im Rahmen einer vom Niedersächsischen Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr geförderten ersten Phase einer wissenschaftlichen Begleitstudie am Franzius-Institut untersucht. In einer weiteren Phase der wissenschaftlichen Begleitstudie wurden mittels hydronumerischer Simulationsrechnungen die Auswirkungen baulicher Umgestaltungen des Sportboothafens auf den Sedimenteintrag in diesen untersucht. Die in der ersten Phase erhobenen Daten dienen als Eingangs- und Validierungsdaten für das numerische Modell. Anhand der numerischen Ergebnisse konnte die Wirkung einer umgestalteten Hafengeometrie hinsichtlich des Sedimenteintrags in den Sportboothafen bewertet werden.

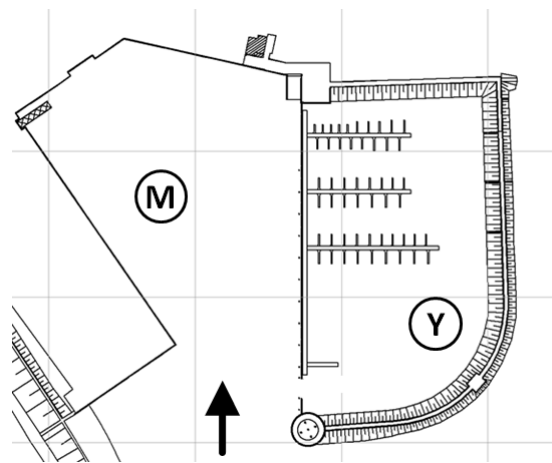


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Hafens Juist bestehend aus Gemeindeflotten (M) und Sportboothafen (Y). Der gemeinsame Hafeneingang befindet sich am unteren Rand der Darstellung. Der Pfeil beschreibt die Richtung einer einlaufenden Tide.

### Methodik

Die wissenschaftliche Begleitstudie der ersten Projektphase ist methodisch auf einem umfangreichen, zweistufigen Naturmessprogramm begründet. In der ersten Stufe wurde in der Zufahrt zum Yachthafen eine Dauermessstation eingerichtet, welche die Wasserspiegelauslenkung, Strömungsgeschwindigkeiten und Sedimentkonzentrationen auf zwei Messhöhen aufzeichnete. In einer zweiten Untersuchungsstufe wurden boots- und schwimmergestützte Messungen der großräumigen Strömungsmuster im Hafen durchgeführt. Für eine detaillierte Darstellung der Methodik wird auf Krämer et al. 2011 verwiesen.

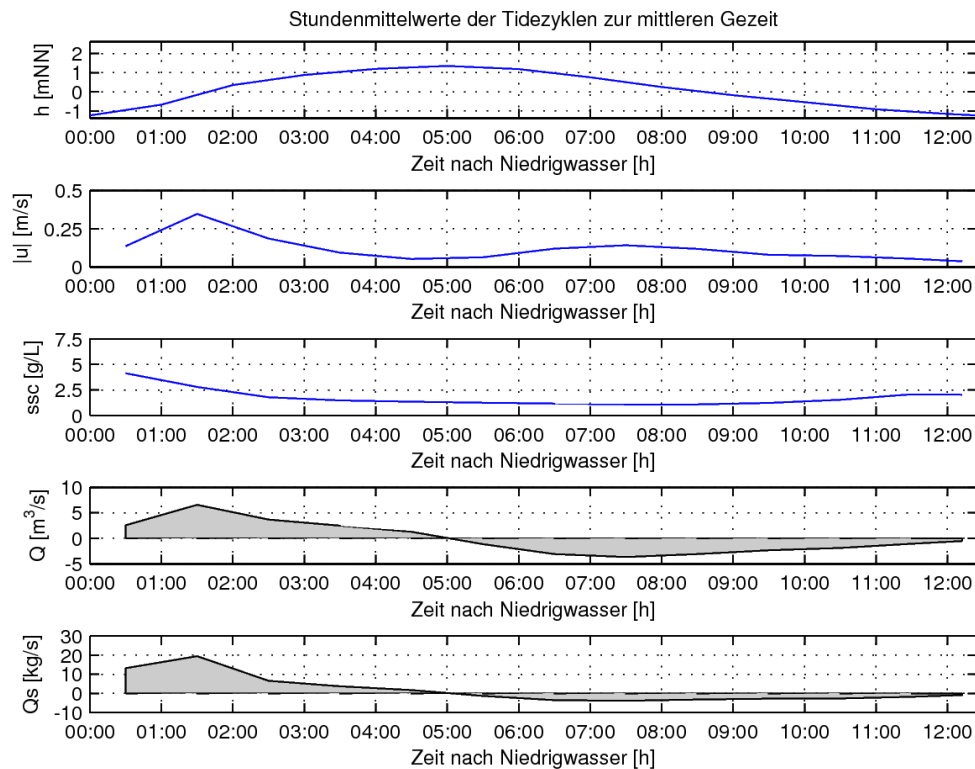


Abbildung 2: Synthetischer Tidezyklus einer mittleren Gezeit. Die dargestellten Werte von oben nach unten sind Wasserspiegelauslenkung, Geschwindigkeitsbetrag, Sedimentkonzentration, Einstromvolumen und Sedimentfracht.

Die numerischen Simulationsrechnungen wurden mit dem am Center for Coastal Margin Observation & Prediction (CMOP, Oregon USA) entwickelten Programmcode SELFE (semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model) durchgeführt. Mit Hilfe dieses Simulationstools, beschrieben bei Zhang und Baptista (2008), wurden 3-dimensionale, hydronumerisch, morphologische Simulationsstudien zur Analyse der Strömungs- und Sedimentbewegungsmuster im Hafengebiete durchgeführt. Grundlage des Modells bilden die 3-dimensionalen Navier-Stokes-Gleichungen in Reynolds-gemittelter Form. Unter Anwendung der Boussinesq-Approximation und der Flachwasser Annahme ergeben sich die im Modell implementierten Erhaltungsgleichungen. Das Sedimentmodell ist ein auf der Advektions-Diffusions-Gleichung aufsetzendes Modul im Programmpaket und ermöglicht die Berechnung von Sedimenttransport für eine beliebige Anzahl an Kornklassen und berücksichtigt Sohlveränderungen infolge der Sedimentbewegung. Für die Berechnung wird der Gesamttransport in Geschiebe- und Suspensionstransport unterteilt. Modellgrundlage bilden die Veröffentlichungen von van Rijn (2007) für den Geschiebetransport und van Rijn (1984) für den Suspensionstransport. Die Sedimentparameter wurden auf Grundlage von Körnungslinien ermittelt, welche aus Bodenproben gewonnen wurden.

## Zusammenfassung und Ergebnisse

Durch die Feldmessungen konnten die vor Ort herrschenden Tideverhältnisse und die dadurch bedingten Eintragsmechanismen des Sediments in den Sportboothafen analysiert und identifiziert werden (s. Abb. 2). Der Sedimenteintrag zu Spring- und Nipptide unterscheidet sich erheblich, die mittlere Gezeit verhält sich ähnlich der Springgezeit. Die zur Springtide hin zunehmende Asymmetrie der Tidekurve hat einen überproportional hohen Eintrag von Sedimenten im ersten Drittel der Flutphase zur Folge. Die sandigen Sedimente werden durch die Ebbströmung nicht remobilisiert und daher nicht wieder ausgetragen. Die im Rahmen der Studie durchgeführten Messungen mit Dauermessstation, ADCP- und Schwimmermessungen der räumlichen und zeitlichen Strömungsmuster und Strömungsgeschwindigkeiten erlauben eine Kalibrierung hydronumerischer Simulationsläufe.



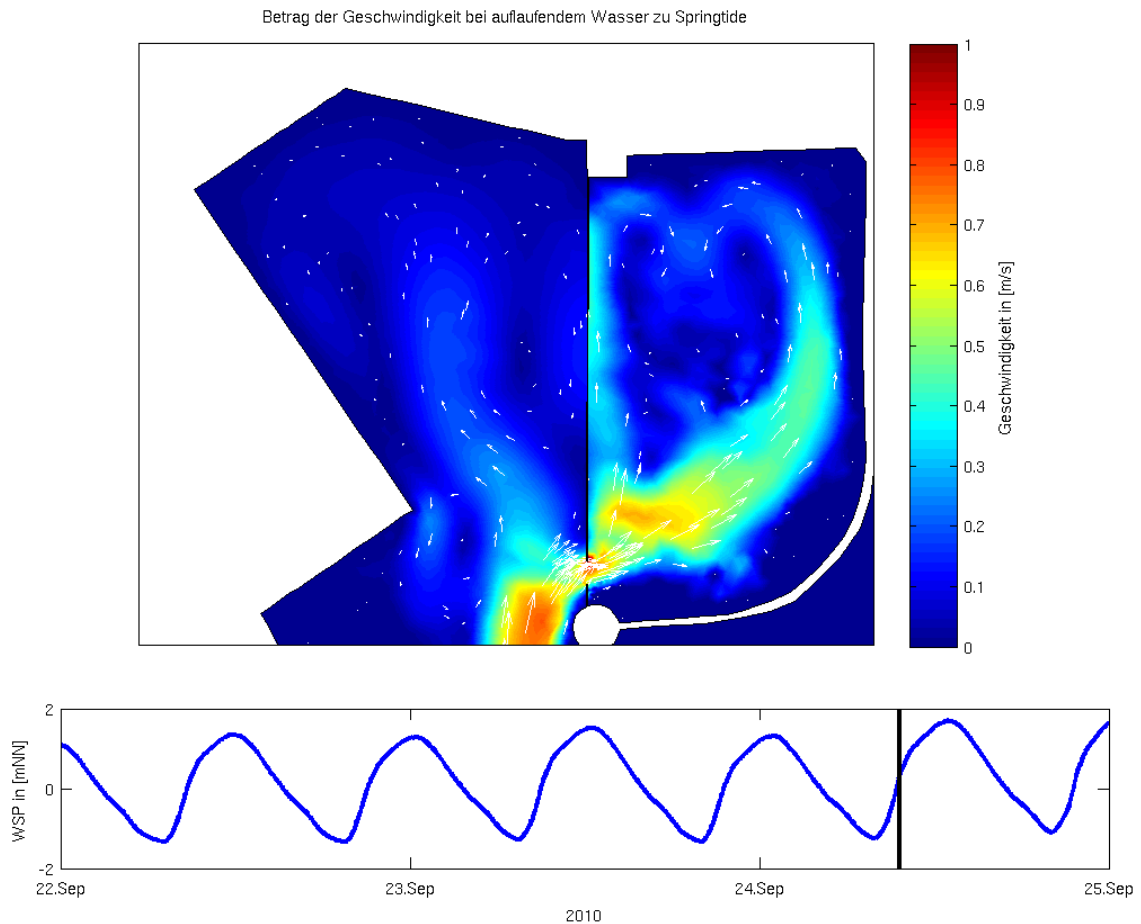


Abbildung 3: Strömungsverhältnisse im Hafenbereich im Ist-Zustand bei auflaufendem Wasser zu Springtide aus der numerischen Simulation. Strömungsvektoren verdeutlichen die Richtung, die unterlegten Farben den Betrag der Strömungsgeschwindigkeit. Der untere Teil der Abbildung gibt durch einen schwarzen senkrechten Balken den Zeitpunkt in der Tidekurve an.

Im numerischen Teil der Studie wurde zuerst eine Validierung des numerischen Modells anhand der vor Ort aufgezeichneten Messdaten durchgeführt. Hierbei konnte eine gute Übereinstimmung zwischen numerisch ermittelten Werten für den Wasserstand und Geschwindigkeiten in der Sportboothafeneinfahrt mit Messwerten erzielt werden (s. Abb. 3). Mit dem validierten Modell wurde eine alternative Beckengeometrie des Sportboothafens numerisch untersucht und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Sedimenteintrag in den Sportboothafen analysiert.

## Literatur

- Krämer K.F.D, Zorndt A.C., Wurpts A., Schlurmann T.: Strömungsmessungen zur Bestimmung der Sedimentdynamik im Juister Hafen, 8. FZK-Kolloquium - Maritimer Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Forschungszentrum Küste, Hannover, 2011.
- van Rijn, L.C., Sediment Transport, Part II: Suspended Load Transport, 1984.
- van Rijn, L.C., Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness, and Bed-Load Transport, 2007.
- Zhang, Y., Baptista, A.M., SELFE: A semi-implicit Eulerian–Lagrangian finite-element model, *Ocean Modelling*. doi:10.1016/j.ocemod.2007.11.005, 2008.

## **Anwendungen des SELFE-Weserästuarmodells auf Fragestellungen des Hochwasserschutzes in Bremen**

*Dipl.-Ing. Anna Zorndt, M. Sc. Jan Saalbach, Dr.-Ing. Nils Goseberg,*

*Prof. Dr.-Ing. habil. Torsten Schlurmann*

### **Einleitung**

Das Land Bremen verfügt über ein komplexes Hochwasserschutzsystem, welches aus Erddeichen, Hochwasserschutzwänden, Sperwerken und Hochwasserabflussgerinnen besteht und eine Gesamtlänge von 155 km aufweist. Trotz dieses relativ hohen Maßes an Sicherheit ist es für die Politik eine Selbstverständlichkeit, dass „auch weiterhin intensiv Vorsorge gegen die Gefahr durch Sturmfluthochwasser und Binnenhochwasser zu treffen ist“ (Wischer, 2003). Werden Strombau- oder Hochwasserschutzmaßnahmen nötig, können diese sich in komplexer Weise auf die Wasserstände oder Strömungsgeschwindigkeiten an anderer Stelle des Systems auswirken. So führen beispielsweise Erhöhungen von Sommerdeichen dazu, dass die durch sie geschützten Retentionsflächen einer weniger hohen Überflutungswahrscheinlichkeit ausgesetzt sind. Gleichzeitig kann es allerdings zur Erhöhung der Überflutungswahrscheinlichkeit anderer Bereiche mit niedrigerem Schutzniveau kommen. Geplante Änderungen im Hochwasserschutzsystem sollten daher umfassend geprüft werden. Ästuarie wie die Unterweser weisen jedoch aufgrund des Zusammentreffens von Tidehub und Oberwasserabfluss ein hoch komplexes Strömungsgeschehen auf, so dass die Folgen der oben genannten Veränderungen auf Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten oft nur mit Hilfe numerischer Modellierung erfasst werden können.

So wurde das Franzius-Institut erstmals 2011 vom Land Bremen, vertreten durch den Senator für Wirtschaft, Arbeit und Häfen, mit der Untersuchung der möglichen Folgen einer Strombaumaßnahme im Bremer Stadtgebiet beauftragt. Als mögliche Alternative zur Sicherung einer Uferspundwand wurde hier der Einbau einer Vorschüttung geprüft. Ein solcher Einbau führt zu einer Verringerung des zur Verfügung stehenden Fließquerschnitts, wodurch es zu erhöhten Fließgeschwindigkeiten damit zu verstärkten Kolkbildungen kommen kann. Ziel der Studie war die Untersuchung der durch die Baumaßnahme veränderten maximalen Fließgeschwindigkeiten sowie Wasserstände im Bereich der geplanten Vorschüttung.

### **Methodik**

Um die Folgen einer Strombau- oder Hochwasserschutzmaßnahmen untersuchen zu können, muss zunächst ein geeignetes Untersuchungsgebiet definiert werden. Während sich beispielsweise die Überflutung der beiden Weserinseln durch das große aktivierte Retentionsvolumen auf den Scheitelwasserstand eines Sturmereignisses bis nach Bremen auswirkt, ist die Wirkung anderer Retentionsräume lokal begrenzt und die Auswirkungen von Änderungen solcher Retentionsräume oder der schützenden Sommerdeiche sind weniger großräumig zu untersuchen. Dies gilt ebenso für die Auswirkungen von Strombaumaßnahmen, die sich wie Fahrrinnenanpassungen im ganzen Ästuar oder ausschließlich lokal auswirken können, wie beispielsweise bei der untersuchten Vorschüttung. In diesem Fall wurde ein Untersuchungsgebiet gewählt, welches vom Wehr bis zum Pegel Oslebshausen reicht. Es erfolgte die Generierung von zwei Untersuchungsmodellen, die sich bei identischer Vernetzung nur durch die Bathymetrie unterscheiden, die im Modell des IST-Zustandes dem Zustand 2009 entspricht. Für das Modell des SOLL-Zustandes wurden die Tiefen künstlich auf die Ausformung der geplanten Vorschüttung angepasst.

Für die Beurteilung der Auswirkungen von Strombau- oder Hochwasserschutzmaßnahmen ist die Generierung sinnvoller Randbedingungen entscheidend. Bei der hier vorgestellten Untersuchung der Vorschüttung war das Ziel eine Beurteilung der Änderungen der maximalen Fließgeschwindigkeiten und Wasserspiegelauslenkungen. Vom Auftraggeber wurde daher gefordert, als Randbedingungen das mittlere sowie

das 20- und 100-jährige Abflussereignis zu untersuchen, da bei hohen Abflüssen im Stadtbereich Bremen die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Während die Zufluss-Randbedingung am Wehr somit gegeben war, erfolgte die Generierung der Randbedingung am Pegel Oslebshausen mit Hilfe eines Weserästuarmodells.

Das verwendete Ästuarmodell wurde im Rahmen des Klimafolgenforschungsverbundes KLIFF<sup>5</sup> im Forschungsthema 7 Teilprojekt 5.2 fertig gestellt. Es dient der Untersuchung von Klimafolgen auf die Hydrodynamik und insbesondere Salzgehalte in der Weser. Eine erste Version des Ästuarmodells und die Grundlage der Datenbasis wurde bereits in Zorndt et al. (2011) beschrieben, die aktuelle Version des Modells enthält jedoch einige Veränderungen, um auch extreme Ereignisse realitätsgenau modellieren zu können. Hierzu gehören die Repräsentation von Überschwemmungsflächen und insbesondere der sie umgebenden Deiche, da diese den Sturmflutseitel im stromauf gelegenen Ästuar signifikant beeinflussen können (siehe Abbildung 1). Das Modell wurde anhand mehrerer Binnenhochwasser- und Sturmflutereignisse kalibriert.

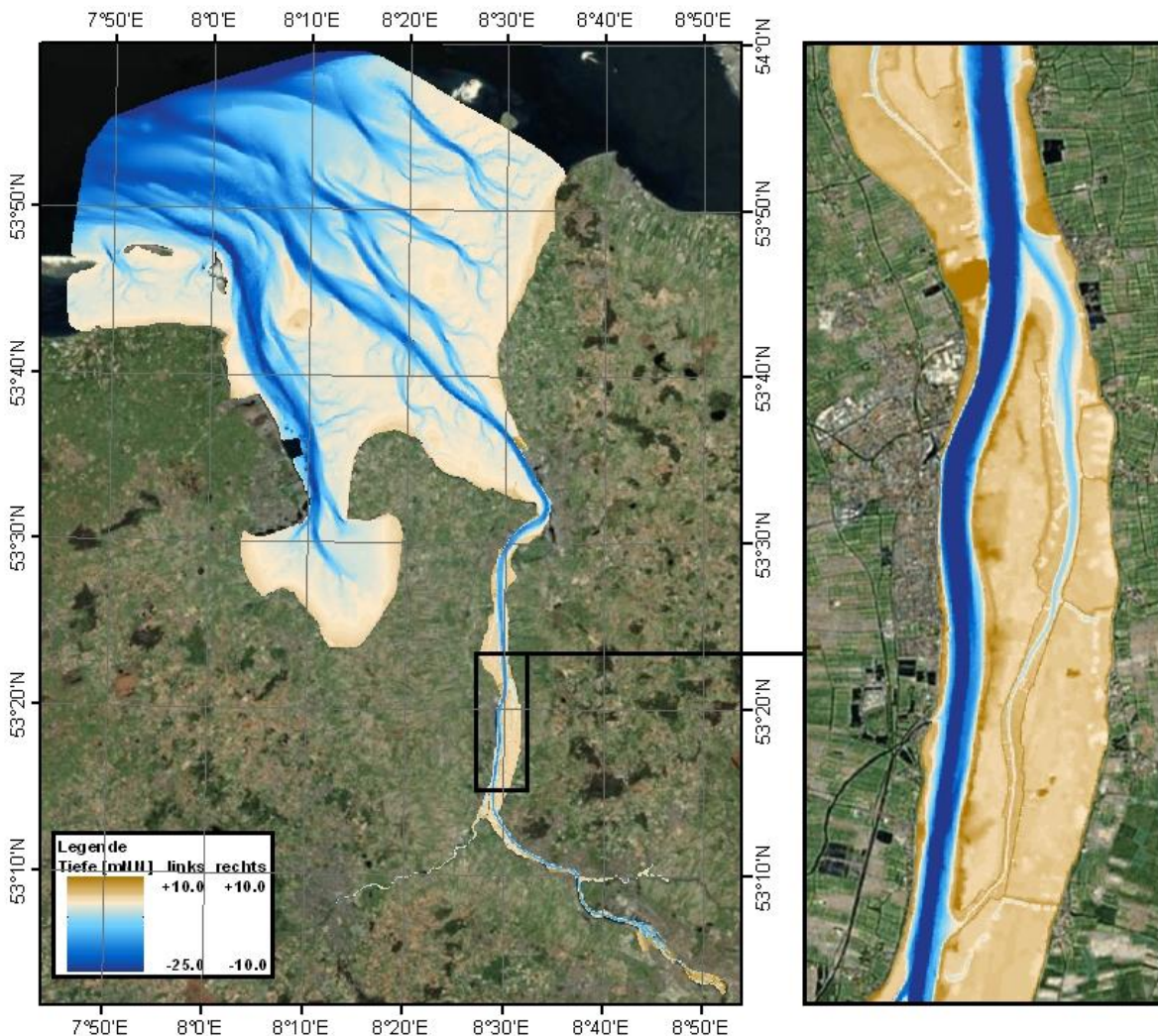


Abbildung 1: Weserästuarmodell mit Tiefenverteilung (links), Detail der Weserinseln (rechts).

Es wurden drei Modellläufe durchgeführt, für die an der offenen Grenze des Ästuars zur Nordsee jeweils ein Wasserstand vorgegeben wurde, der einem normalen Spring-Nipp Tidezyklus entspricht. An der offenen Grenze zum Wehr wurden die drei Abflussszenarien  $Q_m = 325 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{20} = 2.170 \text{ m}^3/\text{s}$  und  $Q_{100} = 2.170 \text{ m}^3/\text{s}$  vorgegeben. Aus den Ergebnissen des Ästuarmodells wurden die Randbedingungen für

<sup>5</sup> Gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur, [www.kliff-niedersachsen.de](http://www.kliff-niedersachsen.de)

das Untersuchungsmodell extrahiert, welches somit im IST- und SOLL-Zustand mit drei Szenarien insgesamt sechs Mal betrieben wurde. Die Simulationen in der Modellkette Ästuarmodell-Untersuchungsmodell wurden mit dem quelloffenen, frei erhältlichen Simulationswerkzeug SELFE (semi-implicit Eulerian-Lagrangian Finite-Element Model), entwickelt von Zhang & Baptista (2008) durchgeführt. Durch das unstrukturierte Netz, das semi-implizite Berechnungsschema und die Parallelisierung ist es gut für die effiziente Simulation von skalenübergreifenden Problemen geeignet.

## Ergebnisse und Ausblick

Im Fall der untersuchten Vorschüttung zeigten die Vergleiche zwischen IST- und SOLL-Zustand für den mittleren Abfluss keine signifikanten Wasserstandsänderungen. Die berechneten maximalen tiefengemittelten Strömungsgeschwindigkeiten bei Ebbe erhöhten sich um ca. 7 %, wie qualitativ in Abbildung 2 ersichtlich wird. Bei höheren Abflüssen fielen die Erhöhungen der Strömungsgeschwindigkeiten erwartungskonform niedriger aus. Eine Auswertung der räumlichen Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten um die geplante Vorschüttung kam zu dem Ergebnis, dass der nordwestliche Kopf der Vorschüttung durch deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten einem höheren Kolkrisiko ausgesetzt wäre.

Andere mögliche Untersuchungsgegenstände für die beschriebene Modellkette aus Ästuar- und Untersuchungsmodell sind der Einfluss von Retentionsräumen sowie Sperrwerksbetrieb. Eine Anpassung des Modells zur Berücksichtigung wasserstandsabhängiger Regelung von Überlaufbauwerken ist in Planung.

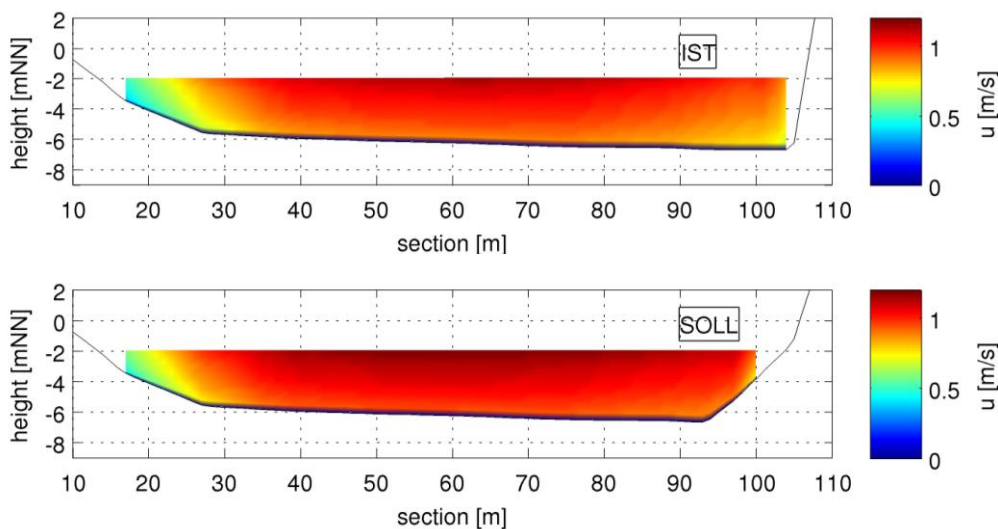


Abbildung 2: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeitsbeträge im Flussquerschnitt vor der geplanten Vorschüttung im IST- (oben) und SOLL-Zustand (unten).

## Literatur

- Freie Hansestadt Bremen, Senator für Bau und Umwelt (Hrsg.) (2003): Hochwasserschutz im Land Bremen, Bericht des Senats der Freien Hansestadt Bremen zur Hochwasserschutzsituation.
- Yinglong Zhang, Antonio M. Baptista. SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. *Ocean Modelling*, Volume 21, Issues 3-4, 2008, 71-96.
- Zorndt, A., Wurpts, A., Schlurmann, T. (2011): Aufbau und Kalibrierung eines 3D-hydrodynamischen Ästuarmodells zur Abbildung der Salzintrusion in tidebeeinflussten Gewässern unter Berücksichtigung von Klimaszenarien, 8. FZK-Kolloquium - Maritimer Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Forschungszentrum Küste, Hannover, 10. März 2011.