

# Numerische Simulation von Deckwerken in Tidegebieten

*Livia Petzold, Martin Pohl, Peter Schulze und Heinz Konietzky*

## Zusammenfassung

Deckwerke dienen dem Schutz der Uferböschungen von Schifffahrtsstraßen vor auftretenden hydraulischen Belastungen aus schiffs- und windinduzierten Wellen und Strömungen, wechselnden Tidewasserständen sowie Sturmfluten. Die derzeitigen Grundlagen zur Deckwerksbemessung sind für die vielfältigen und komplexen Randbedingungen insbesondere im Tidegebiet teilweise ungenügend. Daher wird ein numerisches Modell entwickelt, mit dem die Interaktion zwischen Deckwerk und hydraulischen Belastungen simuliert werden kann. Zur ganzheitlichen Simulation werden dabei zwei verschiedene numerische Methoden verwendet.

Das Deckwerk wird mit der Diskreten Elemente Methode (DEM) modelliert. Das Verhalten der einzelnen Deckwerkssteine kann somit realistisch mit allen Freiheitsgraden abgebildet werden. Die DEM wird mit einem Programm zur numerischen Strömungssimulation (CFD) gekoppelt, um die hydraulischen Einwirkungen zu berücksichtigen. Zusätzliche Modellversuche in einer hydraulischen Rinne, Feldversuche und Messungen mit instrumentierten Deckwerkssteinen dienen zur Validierung des numerischen Modells.

## Schlagwörter

Deckwerk, Numerische Simulation, Diskrete Elemente Methode, Computational Fluid Dynamics, Modellversuche

## Summary

*Rip-rap revetments are used to protect embankments and coastal shores against erosion. They are built to resist ship and wind induced waves, tidal and ship induced currents, tidally varying water levels and storm surges. In some areas the current basis of rip-rap design is inadequate for dealing with the complexity and variety of boundary conditions, especially in tidal zones. A numerical model has therefore been developed which is capable of simulating the resistance of rip-rap to hydraulic loads. Rip-rap-water-interaction is modelled holistically using two numerical methods.*

*Rip-rap is modelled using the Discrete Element Method (DEM) in three dimensions. The DEM can be used to model rip-rap stones as autonomous objects with all degrees of freedom and realistic movement. The DEM code is coupled with a computational fluid dynamics code (CFD) to account for the influence of the hydraulic loads. Waves and currents acting on the rip-rap stones as well as tidally varying water levels can be generated realistically using time dependent boundary conditions.*

*Additional physical model tests in a laboratory flume, field tests and measurements with instrumented rip-rap stones serve as validation for the numerical model.*

## Keywords

*revetment, rip-rap, numerical simulation, discrete element method, computational fluid dynamics, model tests*

## Inhalt

1	Einleitung .....	128
2	Forschungsvorhaben .....	130
3	Bemessung von Deckwerken .....	130
4	Modellierung des Deckwerks mit der DEM-Methode .....	131
5	Modellierung hydraulischer Einflüsse mit CFD .....	134
6	Kopplung von CFD und DEM .....	135
7	Wasserbausteine mit Sensortechnologie .....	137
8	Physikalische Modellversuche .....	138
9	Feldversuche .....	139
10	Schlussfolgerungen und Ausblick .....	140
11	Schriftenverzeichnis .....	140

## 1 Einleitung

Deckwerke dienen dem Schutz der Uferböschungen von Schiffahrtsstraßen und Seeschiffahrtsstraßen vor Erosion. In den meisten Fällen werden Deckwerke aus Stein- schüttungen eingesetzt, da sie zahlreiche Vorteile bieten wie z. B. ein großes Maß an Flexibilität und Widerstandsfähigkeit gegenüber Setzungen (Abb. 1).



Abbildung 1: Deckwerke am Emsufer als Schutzschicht gegen Erosion der Uferböschung infolge hydraulischer Belastungen.

Deckwerke sind vielfältigen Einflüssen ausgesetzt. Bei der Bemessung der Deckwerke an Binnenwasserstraßen sind als wichtigste Parameter schiffsinduzierte Wellen und Strömungen sowie Wasserüberdrücke im Porenraum infolge eines schiffserzeugten Wasserspiegelabsinks zu beachten. An den Wasserstraßen im Küstenbereich spielen zudem küstenspezifische Einflussfaktoren eine bedeutende Rolle.

Folgende Richtlinien sind derzeit für die Bemessung von Deckwerken in Deutschland relevant:

- BAW-Merkblatt: „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherung an Binnenwasserstraßen“ – GBB 2010 (BAW 2010)
- BAW-Merkblatt: „Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherung an Wasserstraßen“ - MAR 2008 (BAW 2008)
- „Empfehlung für die Ausführung von Küstenschutzwerken“ – EAK 2002 (KFKI 2007)
- „Wasserbausteine im Deckwerksbau“ (HANSEN 1985)
- „The Rock Manual“ (CIRIA et al. 2007)
- „Dikes and Revetments“/„Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering“ (PILARCZYK 1998; PILARCZYK 2000)

Die oben genannten Kriterien basieren in der Regel auf Modellversuchen im kleinen Maßstab oder auf Erfahrungswerten von Binnenwasserstraßen. Das bedeutet, dass diese Richtlinien aufgrund der komplexen und vielfältigen Randbedingungen der Tidegebiete in einigen Bereichen nur begrenzt anwendbar sind. Abb. 2 zeigt einen Überblick über die unterschiedlichen Einflüsse, die für die Bemessung von Deckwerken an Wasserstraßen in Küstengebieten relevant sind. Zu den Faktoren, die sich auf die unterschiedlichen Deckwerksbemessungen für Binnen- und Seeschiffahrtsstraßen auswirken, zählen beispielsweise: größere Seeschiffe, die sich von Binnenschiffen hinsichtlich ihrer Form und zunehmenden Größe unterscheiden, unterschiedliche und unregelmäßige Wasserstraßenquerschnitte mit variierenden Böschungsneigungen anstatt eines regelmäßigen Fahrinnenquerschnittes, der Einfluss des Seegangs infolge einer größeren dem Wind ausgesetzten Wasseroberfläche, Tideströmungen, die zusätzlich zu den schiffsinduzierten Strömungen wirken sowie tidebedingt schwankende Grundwasserstände.

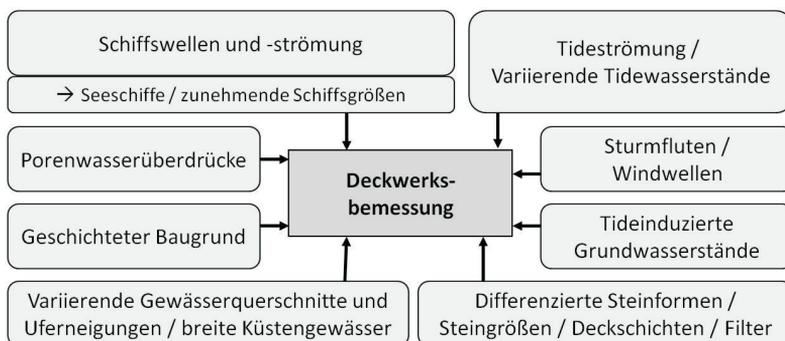


Abbildung 2: Einflussfaktoren bei der Bemessung von Deckwerken in Tidegebieten und Küstengewässern.

## 2 Forschungsvorhaben

Die verfügbaren Grundlagen für die Deckwerksbemessung sind unzureichend, besonders in Küstenregionen. Aus diesem Grund soll ein numerisches 3D Modell zur Simulation der Interaktion zwischen Deckwerk und Wasserstraße entwickelt werden. Dieses Modell berücksichtigt durch die Kopplung unterschiedlicher numerischer Methoden sowohl den hydraulischen (Wellen und Strömungen) als auch den mechanischen Teil (Deckwerk) der Interaktion und ermöglicht somit eine ganzheitliche numerische Analyse der Standsicherheit von Schüttsteindeckwerken.

Das Forschungsvorhaben umfasst verschiedene Bereiche: numerische Simulation und Modell- beziehungsweise Naturuntersuchungen. Die numerischen Modelle für den hydraulischen Teil werden mit Hilfe eines Programms zur numerischen Strömungssimulation (CFD) erzeugt. Das Deckwerk wird mit der Diskreten Elemente Methode (DEM) in 3D modelliert. Die ganzheitliche numerische Modellierung wird durch die gekoppelte Berechnung beider Codes ausgeführt. Im Anschluss erfolgt die Validierung des numerischen Modells durch Modellversuche in einer hydraulischen Rinne, Messungen mit instrumentierten Wasserbausteinen und Messungen von Wellen und Strömungen im Rahmen von Naturversuchen.

Das langfristige Ziel des Forschungsprojekts ist die Bereitstellung eines geeigneten numerischen Tools für eine sichere und wirtschaftliche Deckwerksbemessung, die an die besonderen örtlichen Bedingungen angepasst ist.

## 3 Bemessung von Deckwerken

Die Stabilität von Deckwerken gegenüber den hydraulischen Belastungen ist einerseits von der Größe und Masse der verwendeten Einzelsteine und andererseits von deren Zusammenwirken in einem Verbund abhängig. Die Interaktion der Wasserbausteine erfolgt bei einem unverklammerten Deckwerk durch die gegenseitige Verzahnung. Gemäß dem BAW-Merkblatt GBB (BAW 2010) wird die erforderliche Steingröße bei der hydraulischen Bemessung des Deckwerks in Abhängigkeit von den hydraulischen Belastungen (Wellen, Strömungen) bestimmt. Die Bestimmung des Flächengewichts (Dicke des Deckwerks) erfolgt im Rahmen der geotechnischen Bemessung und ist für die Gewährleistung der Sicherheit gegen Abgleiten, Abheben und hydrodynamische Bodenverlagerung erforderlich. Eine bestimmte Mindestdicke des Deckwerks ist erforderlich, um eine stabile Deckschicht mit der oben beschriebenen Verzahnung zwischen den Steinen zu gewährleisten. Zusätzlich zur hydraulischen und geotechnischen Bemessung wird in der Deckwerksbemessung der Nachweis der Gesamtstandsicherheit der Uferböschung einschließlich der Steinschüttung geführt (BAW 2010).

Für Deckwerke werden Steinklassen nach der europäischen Norm für Wasserbausteine (DIN EN 13383-1) verwendet. Die leichten Gewichtsklassen (LMB<sub>5/40</sub>, LMB<sub>10/60</sub>) werden hauptsächlich an Seeschiffahrtsstraßen eingesetzt, um ausreichend robuste Deckwerke zu gewährleisten.

Im numerischen Modell sollte eine realistische Darstellung des Deckwerks im Hinblick auf die jeweilige Gewichtsklasse (Größe und Masse der Einzelsteine) und die bestehende Stabilität der Steinschüttung (Verzahnung) erfolgen.

## 4 Modellierung des Deckwerks mit der DEM-Methode

Die Diskrete Elemente Methode (DEM) ist eine numerische Methode für die Simulation der Bewegungen und Interaktion von Partikeln eines diskontinuierlichen Mediums auf der Grundlage des 2. Newtonschen Gesetzes und eines Kontaktgesetzes. In einem diskontinuierlichen Medium bestehen Kontaktpunkte oder Schnittstellen zwischen den diskreten Elementen, aus denen sich das System zusammensetzt (ITASCA 2014). In einer DEM-Software ist daher ein wirksamer Algorithmus zur Kontaktdetektion erforderlich, um die Kontaktpunkte zu ermitteln, die bei der Modellberechnung entstehen oder sich auflösen, sowie die Anwendung der entsprechenden Kontaktgesetze, die bei der Wechselwirkung zwischen Partikeln zum Tragen kommen (JAKOB und KONIETZKY 2012). Ursprünglich wurde die DEM-Methode von CUNDALL und STACK (1979) entwickelt. Heute findet sie breite Anwendung in der Untersuchung technischer Fragestellungen bei granularen Materialien.

Eine Beschreibung des in der DEM-Methode durchgeführten Berechnungszyklus findet sich bei ITASCA (2014): „Die in der Diskreten Elemente Methode durchgeführten Berechnungen wechseln zwischen der Anwendung des Zweiten Newtonschen Gesetzes auf die Partikel und der Anwendung eines Kraft-Verschiebungs-Gesetzes an den Kontaktstellen. Während mit dem Zweiten Newtonschen Gesetz die Bewegung jedes Partikels aufgrund der auf ihn einwirkenden Kontakte und Volumenkräfte bestimmt wird, dient das Kraft-Verschiebungs-Gesetz der Aktualisierung der aus der relativen Bewegung an jedem Kontakt entstehenden Kontaktkräfte.“ (Abb. 3)

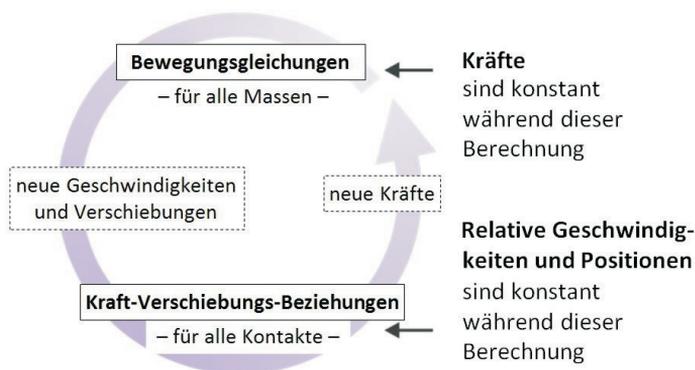


Abbildung 3: Berechnungszyklus DEM (verändert nach ITASCA 2014).

Die DEM ermöglicht die Modellierung der Deckwerkssteine als unabhängige Objekte und eine realistische Abbildung ihres Verhaltens mit sechs Freiheitsgraden (drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade). In diesem Forschungsprojekt erfolgt der DEM-bezogene Teil der Modellierung durch Anwendung des von ITASCA CONSULTING GROUP INC. entwickelten dreidimensionalen Codes PFC3D (Particle Flow Code 3D) (2008a). Dieser Code stellt eine vereinfachte Version der allgemeinen DEM dar: Durch die Verwendung kugelförmiger Partikel (Kugeln) wird die Kontaktdetektion erleichtert. Beliebige komplexe Geometrien können mittels der Verschmelzung sich überlappender Kugeln zu sogenannten „Clumps“ (Klumpen) realisiert werden. Dieser Ansatz mit einer

Vielzahl von Kugeln ermöglicht die Erzeugung steinähnlicher Partikel und gesamter Deckwerksgeometrien (Abb. 4). Jeder dieser Clumps agiert als unabhängige Einheit und kann während des Berechnungszyklus nicht zerfallen (ITASCA 2008a).

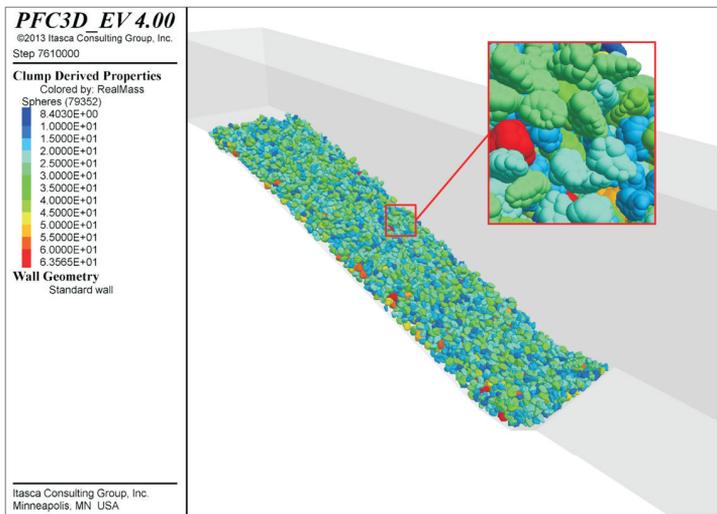


Abbildung 4: Mit PFC3D modelliertes Deckwerk.

Wie oben erwähnt sollte das numerische Deckwerk im Hinblick auf die Darstellung der Verzahnungseffekte zwischen den Steinen und in Bezug auf die jeweilige Wasserbausteinklasse realistisch sein. Aus dieser Forderung ergeben sich zwei wichtige Problemstellungen: die realistische Darstellung der Partikelform der Einzelsteine und die realistische Darstellung des gesamten Deckwerks im Hinblick auf die Größen- und Massenverteilung sämtlicher Steine im numerischen Modell.

Das Forschungsvorhaben wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau am Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt. Für eine realistische Darstellung des Deckwerks wurden die Steine verschiedenen Größen- und Formkategorien (plattig, länglich, kompakt) zugeordnet, wobei für das numerische Modell eine gemischte Gruppe mit Steinen aller Kategorien verwendet wurde (HERBST et al. 2010). Im Rahmen des Projekts wurden auch verschiedene Verfahren zur Generierung von Partikeln in unregelmäßigen Formen und zur Darstellung von Deckwerken untersucht, entwickelt und getestet (HERBST et al. 2010; YUAN 2012). Die erste Methode für die Generierung von Deckwerkssteinen ist ein Zufallsalgorithmus, der auf Grundlage des Verfahrens nach LU und MCDOWELL (2007) entwickelt wurde. Die Form der generierten Partikel wird hier durch sechs Parameter bestimmt: die Zahl der Raumrichtungen für die Generierung der Kugeln, die mit jeder Richtung verknüpfte Wahrscheinlichkeit, die Anzahl Kugeln, die in der gewählten Richtung generiert werden, sowie der für die Kugeln geltende Radien-Verringerungsgrad und Überlappungsgrad. Eine weitere Methode zur Generierung von realistisch geformten Deckwerkssteinen ist die Verwendung von Oberflächengeometrien realer Steine (verfügbar z. B. durch Fotoauswertung oder 3D-Scan). Mit Hilfe eines im DEM-Code enthaltenen Pack-Algorithmus wird das 3D-Oberflächennetz mit Kugeln ausgefüllt. In beiden Fällen ist eine realistische

Darstellung des Deckwerks bezüglich der Größe und Massenverteilung der entsprechenden Gewichtsklasse der Wasserbausteine möglich (Abb. 5).

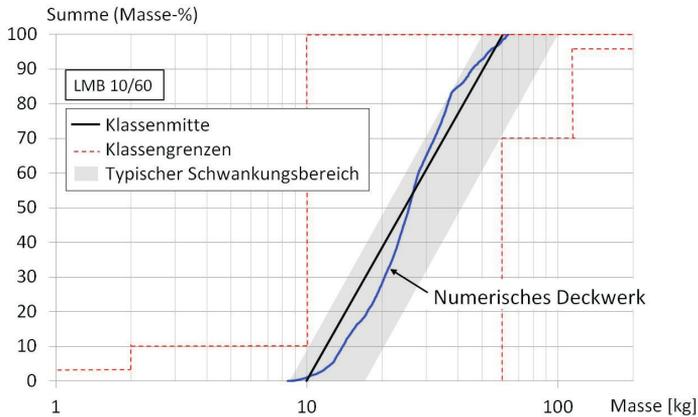


Abbildung 5: Typische Variationsbreite der Summenkurve für Wasserbausteine der Klasse  $LMB_{10/60}$  (BAW 2008), Summenkurve des dazugehörigen Deckwerks.

Die Steine lassen sich im numerischen Modell in komplexer oder vereinfachter Weise darstellen (hoch oder niedrig aufgelöste Partikelform), abhängig von der Zahl der Kugeln, die zur Bildung eines Clump verwendet werden (Abb. 6).

Je komplexer die Geometrie der Clumps ist, desto besser ist die Qualität der Darstellung der Interaktion zwischen den Steinen. Die Dauer der Deckwerksgenerierung und die Rechenzeit des Modells nehmen jedoch in der Regel mit steigender Komplexität der verwendeten Clumps exponentiell zu. Neben der Partikelform wird das Verhalten der Clumps während der Berechnung auch durch den Reibungskoeffizienten auf der Partikeloberfläche und indirekt durch die Steifigkeit der Partikel beeinflusst. In physikalischen Modellversuchen wird untersucht, inwieweit sich diese Eigenschaften auf die Genauigkeit der numerischen Modellierung auswirken und in welcher Art und Weise die Parameterauswahl für eine größtmögliche Realitätsnähe erfolgen sollte.

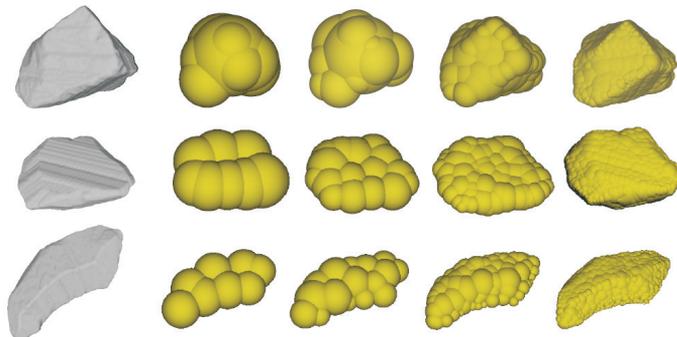


Abbildung 6: Darstellung von Wasserbausteinen als Clumps mit vereinfachter und komplexer Geometrie (YUAN 2012).

## 5 Modellierung hydraulischer Einflüsse mit CFD

Die Modellierung hydraulischer Einflüsse wie Wellen und Strömungen erfolgt mit Hilfe eines CFD-Programms zur numerischen Strömungssimulation. Die hydrodynamische Berechnung basiert auf den Navier-Stokes-Gleichungen, mit denen die Bewegung von Fluiden beschrieben wird. In Verbindung mit der Kontinuitätsgleichung ermöglichen sie die Lösung sämtlicher hydrodynamischer Problemstellungen.

In diesem Forschungsvorhaben kommt das Programm „Coupled Computational Fluid Dynamics“ (CCFD) zur Anwendung, ein Produkt von ITOCHU Techno-Solution Corporation (ITASCA 2008b). Der CCFD-Solver löst die vereinfachten inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen (ITASCA 2008b; HERBST 2011):

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla (\vec{v}) = -\nabla p + \eta \nabla^2 (\vec{v}) \quad (1)$$

und die Kontinuitätsgleichung (HERBST 2011):

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2)$$

mit der Fluidichte  $\rho$ , der Fluidgeschwindigkeit  $\vec{v}$ , dem Fluiddruck  $p$  und der Fluidviskosität  $\eta$  mit Hilfe der Finite-Volumen-Methode in einem dreidimensionalen diskretisierten Modellraum (Fluidzelle, Hexaeder). Eine Kopplung beider Programme – der mechanischen DEM-Berechnung in PFC3D und der hydraulischen Berechnung in CCFD – ist möglich (Abb. 7). Der CCFD-Solver ist in ein grafisches Modellierungsprogramm eingebettet (Pre-/Post-Prozessor), das die Modellgeometrie sowie die Start- und Randbedingungen festlegt (INTERNATIONAL CENTER FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING 2008).

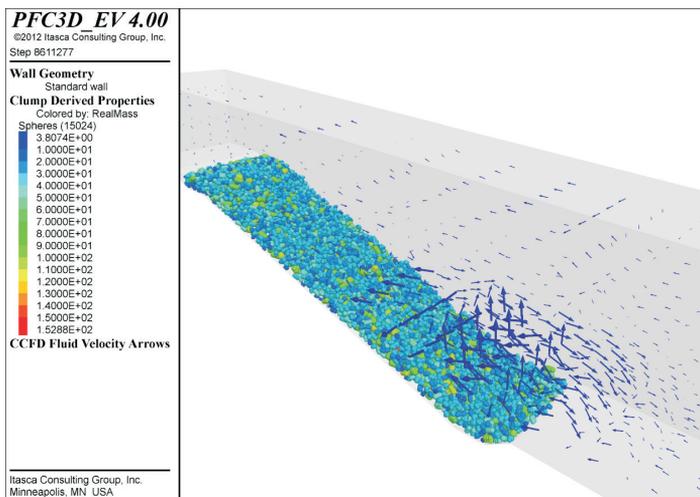


Abbildung 7: Gekoppelte Berechnung der auf das Deckwerk wirkenden Wellenbelastung.

In der numerischen Simulation können die hydraulischen Belastungen durch Anwendung zeitlich veränderlicher Randbedingungen am Modellrand erzeugt werden. Wellen und Strömungen werden in Form der Wasserspiegelauslenkung generiert, und die

horizontalen und vertikalen Geschwindigkeiten der Wasserteilchen (Orbitalgeschwindigkeit) als eine Funktion der Zeit beschrieben. Die Daten aus den Feldversuchen werden im Anschluss als Eingangsdaten für die im numerischen Modell generierten Wellen verwendet (Abb. 8).

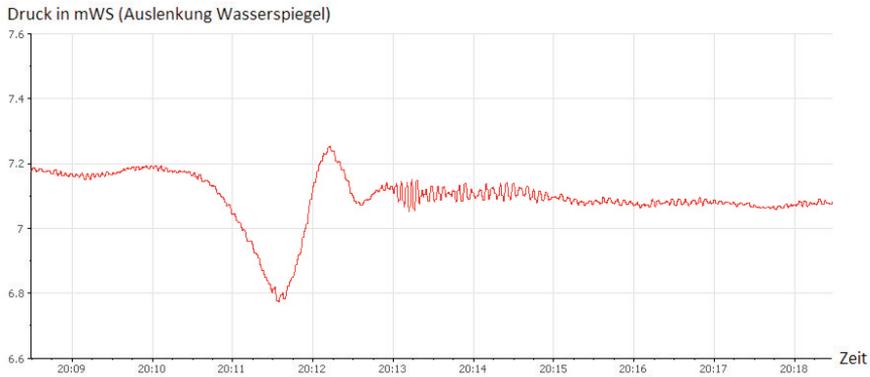


Abbildung 8: Beispielmessung einer schiffserzeugten Welle aus dem Feldversuch.

Die gemessene Wasserspiegelauslenkung (Wellenhöhen) und das daraus abgeleitete Geschwindigkeitsfeld (Entwicklung der horizontalen und vertikalen Geschwindigkeit unterhalb der Welle) werden als Zeitreihe für jeden Zeitschritt in das numerische Modell importiert. Die gemessene Welle wird somit direkt in der numerischen Simulation erzeugt.

Die Reaktionen einzelner Deckwerkssteine im DEM-Programm infolge des Wellen- und Strömungsangriffs aus der hydraulischen Berechnung in CCFD können mit Hilfe sogenannter „Histories“ im Programm PFC3D aufgezeichnet werden.

## 6 Kopplung von CFD und DEM

Die im Vorhaben verwendeten numerischen Programme ermöglichen die Verbindung der DEM-Berechnung und der hydraulischen Berechnung (siehe Beispiel in Abb. 7). Die Verlagerung und die Geschwindigkeit der Partikel werden in PFC3D und die Zustandsgrößen der Strömung in CCFD bestimmt. Während der gekoppelten Berechnung werden beide Programme nach dem oben beschriebenen Verfahren (siehe Kapitel 4 und 5) ausgeführt. Ein zusätzlicher Datenaustausch findet in zuvor definierten Zeitabständen statt. Sowohl im DEM-Code als auch im CFD-Programm sind zusätzliche Terme einbezogen, um den Fluidkräften und dem Vorhandensein von Partikeln in der Strömung Rechnung zu tragen.

Im DEM-Teil der gekoppelten Berechnung wird der neue Term  $\vec{f}_{fluid}$  hinzugefügt, welcher die Kraft des Fluids darstellt (ITASCA 2008b):

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \frac{\vec{f}_{mech} + \vec{f}_{fluid}}{m} + \vec{g} \quad (3)$$

wobei gilt:  $\vec{u}$  ist die Partikelgeschwindigkeit,  $m$  ist die Partikelmasse,  $\vec{f}_{fluid}$  ist die gesamte Kräfteinwirkung des Fluids auf das Partikel,  $\vec{f}_{mech}$  ist die Summe der zusätzlich wirkenden

Kräfte und  $\vec{g}$  ist die Erdbeschleunigung. Die Kraft  $\vec{f}_{fluid}$  setzt sich aus drei Termen zusammen: der Schleppkraft, der durch den Druckgradienten des Fluids wirkende Kraft sowie der Auftriebskraft (ITASCA 2008b):

$$\vec{f}_{fluid} = \vec{f}_{drag} + \frac{4}{3}\pi r^3 (\nabla p - \rho \vec{g}) \tag{4}$$

mit

$$\vec{f}_{drag} = \left( \frac{1}{2} C_d \rho \pi r^2 |\vec{u} - \vec{v}| (\vec{u} - \vec{v}) \right) \cdot n^{-\lambda} \tag{5}$$

wobei gilt:  $r$  ist der Partikelradius,  $C_d$  ist ein Schleppkraftkoeffizient und  $n^{-\lambda}$  ist ein empirischer Faktor zur Berücksichtigung der örtlichen Porosität. Die Fluidströmung  $\vec{v}$  und der Druckgradient des Fluids  $\nabla p$ , die für diese Berechnung benötigt werden, werden in CCFD bestimmt und bei jedem Austausch der Kopplungsinformationen an PFC3D übergeben. Die auf die Partikel einwirkende Fluidkraft wird auf jedes Partikel angewendet (ITASCA 2008b).

Im hydraulischen Teil der Berechnung werden die Gleichungen für die Fluidbewegung (1) und die Kontinuitätsgleichung (2) mit Porositätstermen und einer zusätzlichen Volumenkraft infolge der im Fluid vorhandenen Partikel formuliert (ITASCA 2008b):

$$\rho \frac{\partial \vec{n}\vec{v}}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \nabla (\vec{n}\vec{v}) = -n \nabla p + \eta \nabla^2 (\vec{n}\vec{v}) + \vec{f}_b \tag{6}$$

und

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{n}\vec{v}) = 0 \tag{7}$$

wobei gilt:  $n$  ist die Porosität und  $\vec{f}_b$  ist die Volumenkraft. Die aktuelle Porosität  $n$  in jeder Fluidzelle und die Volumenkraft  $\vec{f}_b$  werden in PFC3D bestimmt und während des Datenaustauschs an CCFD übergeben. Die aufgrund der vorhandenen Partikel auf das Fluid einwirkende Volumenkraft wird als Mittelwert über einer Fluidzelle angegeben (ITASCA 2008b).

Eine Darstellung des oben beschriebenen Berechnungszyklus ist in Abb. 9 zu sehen.



Abbildung 9: Berechnungszyklus gekoppelter DEM-CFD-Berechnungen.

Eine begrenzende Bedingung für die gekoppelte Modellierung ist die Mindestporosität von 1 % in jeder Fluidzelle, damit eine Fluidströmung berechenbar ist. Dies hat zur Folge, dass maximal 99 % des Volumens einer Fluidzelle mit Partikeln gefüllt sein kann.

Das wirkt sich auf die Netzauflösung des Fluidproblems aus und führt dazu, dass die Fluidzellen größer als die generierten Deckwerkssteine sein müssen.

## 7 Wasserbausteine mit Sensortechnologie

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird ein Messgerät entwickelt, um die translatorischen und rotatorischen Bewegungen der Wasserbausteine infolge des Wellen- und Strömungsangriffs aufzuzeichnen. Verschiedene Wasserbausteine unterschiedlicher Größe, Form und Dichte werden dazu mit Beschleunigungs- und Drehratensensoren instrumentiert (Abb. 10). Die dazugehörige Leiterplatte zur Messung der Beschleunigungs- und Rotationsgeschwindigkeit ist eine hausinterne Entwicklung. In diesem Zusammenhang bestand eine besondere Herausforderung in der beschränkten Raumkapazität insbesondere für die interne Stromversorgung sowie in der Minimierung des elektrischen Verbrauchs des Systems. Die Daten können von dem künstlichen Stein für einen Zeitraum von höchstens einem Monat erfasst und auf einer Speicherkarte gespeichert werden. Die vom Messgerät in Modell- oder Feldversuchen gemessenen Verlagerungen des Steins lassen sich mit den Verschiebungen sowie den translatorischen und Winkelgeschwindigkeiten vergleichen, die als sog. „Histories“ von den Partikeln im numerischen Modell aufgezeichnet werden. Die hydraulischen Belastungen und Kräfte, die auf das Deckwerk wirken, sollen auf Grundlage dieser Messungen bestimmt werden. Die Messungen mit den instrumentierten Wasserbausteinen erfolgen sowohl in Versuchsrinnen als auch in Feldversuchen.

Abb. 11 zeigt das Messergebnis für einen lose in einem Deckwerksabschnitt eingebetteten instrumentierten Stein in der hydraulischen Versuchsrinne. Der Stein ist permanent überströmt; die verschiedenen Messungen erfolgen bei zunehmender Strömungsgeschwindigkeit. In der Abbildung wird die Entwicklung der Winkelgeschwindigkeiten für Roll-, Nick- und Gierwinkel gezeigt. Zu Beginn der schrittweisen Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit ist keine Bewegung des Wasserbausteins zu erkennen, bei einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa 1,7 m/s bis 2,0 m/s setzt eine Schwingungsbewegung des Steins ein.



Abbildung 10: Beispiel eines Wasserbausteins mit Sensortechnologie.

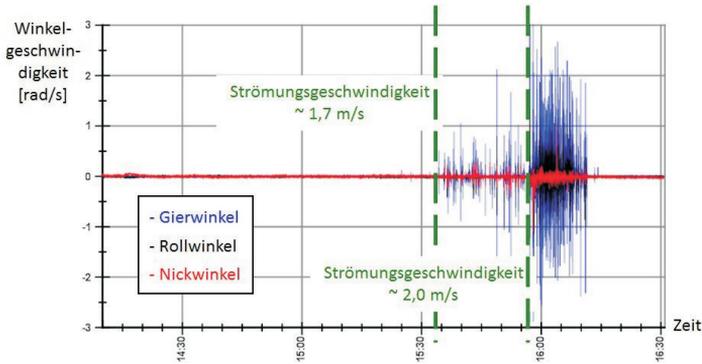


Abbildung 11: Beispiel eines Messergebnisses aus der Versuchsrinne.

## 8 Physikalische Modellversuche

Mit physikalischen Modellversuchen wird das numerische Modell validiert. Das Verhalten der numerischen Wasserbausteine wird in erster Linie von der Partikelform und dem Reibungskoeffizienten auf der Partikeloberfläche beeinflusst. Da sich die Berechnungszeit mit einer komplexen Darstellung der Steine immens erhöht, wird mittels Modellversuchen in einer hydraulischen Rinne untersucht, inwieweit sich diese Eigenschaften auf die Genauigkeit der numerischen Modellierung auswirken und wie die Parameterauswahl für eine größtmögliche Übereinstimmung mit der Realität erfolgen sollte. Die Ergebnisse der physikalischen Versuche mit bekannten Randbedingungen werden mit dem entsprechenden numerischen Modell verglichen (Abb. 12).

Für die Modellversuche steht die Strömungsrinne der Bundesanstalt für Wasserbau, Hamburg zur Verfügung, in die ein böschungsparell überströmter Deckwerksabschnitt aus Wasserbausteinen der Klasse CP<sub>90/250</sub> im Maßstab 1:1 eingebaut wird (Abb. 12). Die Messungen erfolgen in zwei unterschiedlichen Kampagnen mit Böschungseigungen von 1:1 beziehungsweise 1:3. Die Strömungsgeschwindigkeit im Deckwerksabschnitt wird innerhalb einer Messkampagne in mehreren Versuchen in vier Schritten von rund 1 m/s auf 2 m/s erhöht. Die Verlagerung der Steine infolge der Überströmung wird durch Laserscans und eine farblich markierte Oberfläche des Deckwerksabschnitts dokumentiert.

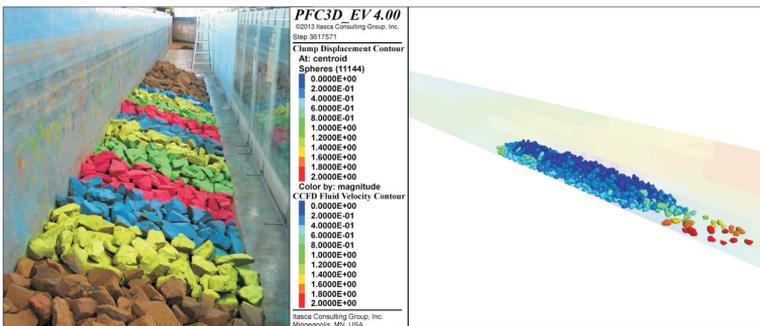


Abbildung 12: Deckwerksabschnitt in hydraulischer Versuchsrinne und numerische Simulation der physikalischen Modellversuche.

## 9 Feldversuche

Neben den physikalischen Modellversuchen werden die im Rahmen eines Projekts durchgeführten Feldversuche zur Validierung des numerischen Modells herangezogen. Es werden Wellenhöhen, Strömungsgeschwindigkeiten und zu einem bestimmten Grad auch Porenwasserdrücke im Untergrund im Feldversuch auf der Insel Lühesand in der Unterelbe gemessen. Diese Messungen erfolgen an zwei Messstationen in exponierter Lage mit variierender Böschungsneigung und variierender Distanz zur Fahrrinne (Abb. 13). Neben stationären Messsystemen werden zwei flexible, autarke Strömungs sonden eingesetzt. Diese Messgeräte werden an verschiedenen Positionen über die gesamte Uferböschung hinweg platziert und messen die hydraulischen Belastungen direkt oberhalb der Böschungsoberfläche. Zusammen mit der Messung der hydraulischen Belastungen erfolgen auch Messungen mit instrumentierten Wasserbausteinen.

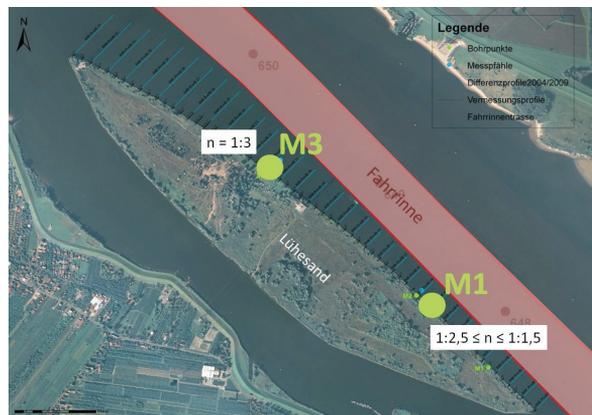


Abbildung 13: Messstationen M1 und M3 auf der Insel Lühesand, Elbe.

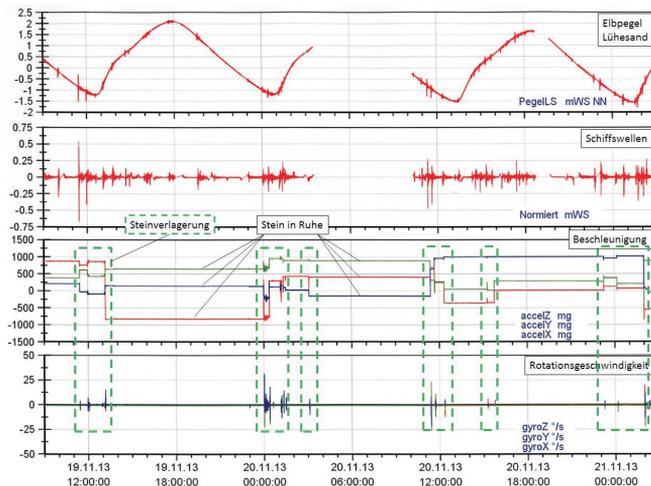


Abbildung 14: Beispiel für Messungen mit instrumentierten Wasserbausteinen im Feldversuch.

## 10 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Diskrete Elemente Methode ist ein geeignetes Verfahren für die Simulation von Deckwerken mit Partikeln mit komplexer Form. Sie erlaubt die Reproduktion der Bewegung von Einzelsteinen mit einer beliebigen Zahl von Freiheitsgraden. In Verbindung mit einer CFD-Berechnung ist es möglich, ein ganzheitliches Modell der Interaktion zwischen Deckwerk und hydraulischen Belastungen zu erstellen. Die die Deckwerkssteine repräsentierenden numerischen Partikel werden anhand physikalischer Versuche in einer hydraulischen Rinne und durch ein Messgerät zur Erfassung der Steinbewegungen kalibriert. Die Fortsetzung der physikalischen Modellversuche und Feldversuche ist geplant und die Modellierung und Validierung der numerischen Simulation wird angepasst und verbessert, um eine größtmögliche Übereinstimmung mit realen Bedingungen zu erreichen.

## 11 Schriftenverzeichnis

- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW): Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR). Eigenverlag, Karlsruhe, 2008.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW): Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB). Eigenverlag, Karlsruhe, 2010.
- CIRIA; CUR and CETMEF: The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2<sup>nd</sup> edition). C683, CIRIA, London, 2007.
- CUNDALL, P. A. and STRACK, O. D. L.: A discrete numerical model for granular assemblies. In: Géotechnique, Vol. 29,1, 47-65, doi: 10.1680/geot.1979.29.1.47, 1979.
- DIN EN 13383-1: Wasserbausteine Teil 1: Anforderungen, 2002.
- HANSEN, U. A.: Wasserbausteine im Deckwerksbau. Bemessung und Konstruktion. Westholsteinische Verlagsanstalt Boyens & Co. Heide (Holstein), 1985.
- HERBST, M.; POHL, M. und KONIETZKY, H.: Numerische Simulation der Interaktion Wasser – Deckwerk im Tidegebiet. In: Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen, Vol. 40. Dresden, 85-94, 2010.
- HERBST, M.: DEM-Fluid Coupling. Coupled CFD Add-on to PFC3D 4.0. Coupled CFD Training. Presentation, Freiberg, 23.-25.03.2011.
- INTERNATIONAL CENTER FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING: GiD. User Manual. Version 9. Barcelona, 2008.
- ITASCA CONSULTING GROUP INC.: PFC3D. Particle Flow Code in 3 Dimensions. User's Manual. Version 4.0. Minneapolis, 2008a.
- ITASCA CONSULTING GROUP INC.: PFC3D. Particle Flow Code in 3 Dimensions. CCFD Add-on. Version 1.0. Minneapolis, 2008b.
- ITASCA CONSULTING GROUP INC.: Distinct Element Method.  
Stand 13.05.2014: <http://www.itascacg.com/software/pfc/distinct-element-method>
- JAKOB, C. und KONIETZKY, H.: Partikelmethoden. Eine Übersicht. Report. TU Bergakademie Freiberg, 2012.  
Stand 13.05.2014: [http://tu-freiberg.de/fakult3/gt/feme/studium/Handbuch\\_Partikelmethoden.pdf](http://tu-freiberg.de/fakult3/gt/feme/studium/Handbuch_Partikelmethoden.pdf)

- KURATORIUM FÜR FORSCHUNG IM KÜSTENINGENIEURWESEN (KFKI) (Ed.): Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken durch den Ausschuss für Küstenschutzwerke (EAK 2002, Korrigierte Ausgabe 2007). Die Küste, 65, 2007.
- LU, M. and MCDOWELL, G. R.: The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method. In: Granular Matter, Vol. 9, 1-2, 69-80, 2007.
- MITTELBACH, L.: Numerical Simulation of Rip-Raps with the Distinct Element Method. In: AIP Conf. Proc. 1542: Powders and Grains. Sydney, 1178-1181, doi: 10.1063/1.4812147, 2013.
- PILARCZYK, K. W.: Dikes and Revetments. Design, Maintenance and Safety Assessment. A.A.Balkema, Rotterdam, 1998.
- PILARCZYK, K. W.: Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering. A.A.Balkema, Rotterdam, 2000.
- YUAN, F. L.: Coupled CFD-DEM simulation of wind wave interaction with rock riprap on riverside slopes. Research Report. TU Bergakademie Freiberg (not published), 2012.