

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Herbst, Martin; Pohl, Martin; Konietzky, Heinz

Numerische Simulation der Interaktion Wasser - Deckwerk im Tidegebiet

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103637>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Herbst, Martin; Pohl, Martin; Konietzky, Heinz (2010): Numerische Simulation der Interaktion Wasser - Deckwerk im Tidegebiet. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Wasserbau und Umwelt - Anforderungen, Methoden, Lösungen. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 40. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 85-94.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Numerische Simulation der Interaktion Wasser – Deckwerk im Tidegebiet

Martin Herbst
Martin Pohl
Heinz Konietzky

Im norddeutschen Küstengebiet werden Deckwerke neben den schiffserzeugten Belastungen – mit anderen Schiffsabmessungen und Gewässerquerschnitten als im Binnenbereich – durch Sturmfluten, Windwellen, Tideströmung und durch tidebedingte Grundwasserpotentiale belastet. Die ganzheitliche Erfassung dieser komplexen sich überlagernden Randbedingungen an den Bundeswasserstrassen in den Tideästuaren soll mittels gekoppelter numerischer Verfahren ermöglicht werden.

Ziel der vorgestellten Arbeit ist es, Deckwerksteine numerisch zu modellieren und den Einfluss hydraulischer Belastungen zu simulieren. Die Deckwerksteine werden mittels der Distinct Element Method (DEM) als bewegliche Einzelelemente aus Kugelclustern erzeugt. Die Kopplung mit einem Programm zur Berechnung der Fluidströmung (Coupled Computational Fluid Dynamics - CCFD) ermöglicht es, Strömungen bzw. Wellen zu simulieren und deren Einfluss auf die Deckwerksschicht zu untersuchen. Der unterlagernde Boden und Mineralkornfilter werden mit der Finiten Differenzen Methode simuliert.

Im Beitrag werden die Modellierungsmethode für die Deckwerkssteine mittels DEM, die Strömungsberechnung und der Kopplungsmechanismus vorgestellt. Ein Schwerpunkt liegt in der Erläuterung der Vorgehensweise zur realitätsnahen Generierung der Deckwerksschicht (Geometrie und Größenverteilung der Einzelsteine). Es werden erste Ergebnisse mit einem modellierten Deckwerk unter Wellenbelastung beispielhaft erläutert. Hierbei sind sowohl das sich ausbildende Strömungsfeld sowie die wirkenden Kräfte und Elementbewegungen von Interesse. Es wird auf die Möglichkeiten der grafischen Ergebnisdarstellungen (Postprocessing) ausführlich eingegangen.

Deckwerk, Tide, DEM, CCFD, Numerik

1 Motivation

In der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) werden an den Tideflüssen im Rahmen der Unterhaltung und des Neubaus große Mengen an Deckwerkssteinen als Ufersicherung eingebaut. Kenntnisse über Schädigungsmechanismen und Widerstände von Deckwerken gegenüber hydraulischen Belastungen sind für eine wirtschaftliche Bemessung der Deckwerke in der WSV unverzichtbar. Neben den schiffserzeugten Belastungen – mit anderen Schiffsabmessungen und Gewässerquerschnitten als im Binnenbereich – werden im norddeutschen Küstengebiet die Deckwerke durch Sturmfluten, Windwellen, Druckschläge, Tideströmung und tidebedingte Grundwasserpotentiale belastet. Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens ist es, mit Hilfe numerischer Verfahren die Widerstände von Deckwerken gegenüber den hydraulischen Belastungen für die jeweiligen lokalen komplexen sich überlagernden Randbedingungen an den Tideflüssen zu erfassen und eine integrierte Bemessung zu ermöglichen. Alle Simulationen beinhalten die Erfassung stabiler und instabiler Zustände im Deckwerk sowie des unterlagernden Bodens und somit die Bemessung sowie die Herleitung von Schadensmechanismen und -bildern.

2 Modellierung

2.1 Werkzeuge

Die Besonderheit bei der Modellierung von Deckwerken und der Interaktion Wasser – Stein ist die Verbindung von mechanischer mit strömungsmechanischer Berechnung. Im Vorfeld sind hierbei prinzipielle Probleme zu lösen. Das Hauptproblem ist, sich frei bewegende Einzelsteine darzustellen und diese in einem Strömungsregime einzubetten, um die entsprechenden Berechnungen zu den Wechselwirkungen durchführen zu können. Für dieses Problem steht kein einzelnes Programmpaket zur Verfügung. Es müssen verschiedene Modellierungswerkzeuge eingesetzt werden, die über einen geeigneten Kopplungsmechanismus miteinander kommunizieren können.

Zur Modellierung von Deckwerksteinen eignet sich z. B. das Programm PFC^{3D} – Particle Flow Code – von *ITASCA (2005)*. Es handelt sich hierbei um ein Programmpaket, das mittels der so genannten Distinct Element Method (DEM) bewegliche kugelförmige Einzelelemente und deren Interaktion unter gegebenen Bedingungen simuliert. Von der idealisierten Kugel abweichende Modell-

geometrien können mittels der Verschmelzung sich überlappender Kugeln zu „Klumpen“ (Clumps) realisiert werden. Die Möglichkeit, Clumps zu bilden, eröffnet ein mächtiges Spektrum an realisierbaren Formen und Größen.

Zur Strömungssimulation existieren verschiedene Programme, die zum Teil die Kopplung mit anderen Programmen erlauben. Da aber seit Anfang 2009 eine Erweiterung zu PFC^{3D} existiert, die gekoppelte strömungsmechanische Berechnungen erlaubt, wurde für die Berechnungen diese Möglichkeit gewählt. Es handelt sich hierbei um das so genannte CCFD Add-On zum PFC^{3D} (CCFD – Coupled Computational Fluid Dynamics), wie in *ITASCA (2008)* beschrieben.

Die CCFD-Software ist in das Modellierungsprogramm *GID (2008)* eingebunden, dass die Modellierung der Geometrie, das setzen von Materialeigenschaften, Anfangs- und Randbedingungen (Preprocessing) und die grafische Auswertung der Ergebnisse (Postprocessing) ermöglicht. Das Programm *GID* ist eine Entwicklung vom „International Center for Numerical Methods in Engineering“ (Barcelona, Spanien). Das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten ist in Abb. 1, entnommen aus *ITASCA (2008)*, dargestellt. Über Angaben zur Häufigkeit der Zwischenergebnisspeicherung können die Ergebnisse im *GID* grafisch dargestellt werden.

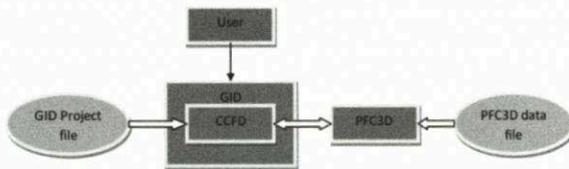


Abbildung 1: Interaktion der beteiligten Programme *GID*, *PFC* und *CCFD (ITASCA, 2008)*

2.2 Modellierung Deckwerk

Für die Modellierung der Einzelsteine der Deckwerksschicht wurde der Algorithmus von *Lu und McDowell (2007)* genutzt. Der Algorithmus nutzt verschiedene Möglichkeiten zur zufälligen Steuerung der Generierung von dreidimensionalen Clumps. Die Arbeitsweise soll nur kurz beschrieben werden.

Die Generierung der Clumps erfolgt, indem im ersten Schritt eine zentrale Ausgangskugel mit einem Radius r_0 erzeugt wird. Anschließend werden in verschiedene Raumrichtungen eine festgelegte Anzahl nb weitere Kugeln mit einem bestimmten Überlappungs- und Radienverringungsgrad (ol und c) angefügt. Die

Raumrichtungen werden zufällig mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit p gewählt. Um sternförmige Clumps zu vermeiden, können Füllkugeln zwischen benachbarten Richtungen eingefügt werden. Als Nebenbedingung sollten möglichst wenig Kugeln je Clump verwendet werden, da die Gesamtanzahl der Kugeln direkt die Rechenzeit beeinflusst.

Trotz der relativ vielen Parameter ist es mit dem Algorithmus nicht möglich, die gesamte geometrische Vielfalt realer Deckwerkssteine abzubilden. Aus diesem Grund wurden im Vorfeld mehrere Bilder eines realen Deckwerks ausgewertet, um eine sinnvolle Klasseneinteilung vornehmen zu können. Die Steine lassen sich generell nach Form und Größe unterscheiden. Es wurden je drei Klassen gebildet, bzgl. der Größe die Klassen „groß“, „mittel“ und „klein“ und bzgl. der Form die Klassen „kompakt“, „plattig“ und „länglich“. Da jede mögliche Kombination auftritt, entstehen neun Klassen von „groß-kompakt“ bis „klein-länglich“. Ausgewertet wurden 657 Steine in 8 Bildern. Tabelle 1 zeigt die ermittelten relativen Häufigkeiten in % der Klassenanteile. Mit 44 % ist die Klasse der mittleren kompakten Steine am stärksten besetzt.

Tabelle 1: Gesamtanteile in % der ausgewerteten Steine an den Klassen

	<i>klein</i>	<i>mittel</i>	<i>groß</i>	Summe
<i>kompakt</i>	10	44	7	61
<i>plattig</i>	4	10	4	18
<i>länglich</i>	5	12	4	21
Summe	19	66	15	100

Für jede Klasse wurde ein repräsentativer Parametersatz ermittelt, mit dem Steine der entsprechenden Form und Größe generiert werden können. Der maßgebliche Parameter für die Größe ist r_0 , da von ihm ol und c abhängen. Zwei weitere Parameter nb und p steuern die Form. Abb. 2 zeigt im gleichen Maßstab zehn generierte Steine jeder Klasse. Abb. 3 zeigt den Ausschnitt eines vollständig modellierten Deckwerks.

klein *mittel* *groß*

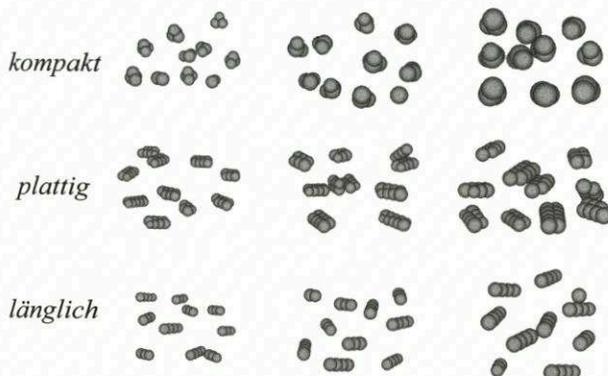


Abbildung 2: Generierte Beispielsteine jeder Klasse in einheitlichem Maßstab

Während der Berechnung mit PFC^{3D} ist es möglich, so genannte Histories aufzuzeichnen. Das sind vorgegebene bzw. selbst definierte variable Zustandsgrößen der PFC-Bälle, wie z. B. Geschwindigkeit, wirkende Kraft, Verschiebung, wirkende Spannungen etc. an bestimmten Stellen bzw. für bestimmte Bälle/Clumps.

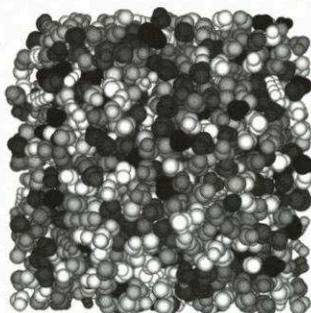


Abbildung 3: Fertig modelliertes Deckwerk (Ausschnitt)

2.3 Fluidströmung

Die strömungsmechanische Berechnung wird mit den Programmpaketen GID und CCFD durchgeführt. GID ist das Werkzeug für Geometrie, Material, Materialeigenschaften, Anfangs- und Randbedingungen sowie zur grafischen Auswertung der Berechnungsergebnisse. Darin eingebettet ist der CCFD-Solver, mit dem sowohl mit PFC^{3D} gekoppelte als auch nicht gekoppelte reine strömungs-

mechanische Simulationen durchgeführt werden können. Für Testzwecke ist die Berechnung ohne Kopplung günstig, da sie deutlich weniger Zeit beansprucht.

Im CCFD werden Geschwindigkeit und Druck des Fluides als Funktionen der Zeit in einem diskretisierten Modellraum berechnet. Bei der gekoppelten Berechnung werden beim Programmwechsel die Fluidkräfte auf die Clumps im PFC^{3D} und nach der Berechnung des Zeitschrittes die Verschiebungen und Geschwindigkeiten der Clumps in Folge der Fluidströmung an das CCFD-Tool übergeben und der nächste Zeitschritt berechnet. Wesentliche Einstellparameter sind die Gesamtanzahl an Iterationsschritten und die Zeitdifferenz je Iterationsschritt (Zeitschritt), die den gesamten Zeitrahmen der Simulation definieren.

Mittels der Definition von Teilkörpern lassen sich verschiedene Szenarien simulieren (vgl. Abb. 4), da jeder Teilkörper separat initialisiert und mit Randbedingungen belegt werden kann. Die Dichte der Vernetzung ist für jeden Teilkörper separat festlegbar und steuert im Wesentlichen die Auflösung des Modelles, d. h. wie detailgenau Strömungsvorgänge abgebildet werden können. Auf die Vielzahl der möglichen Randbedingungen kann hier nicht näher eingegangen werden.

Der wichtigste begrenzende Faktor neben der Modellgröße ist die Netzauflösung, von der die Rechenzeit stark abhängt. Eine wichtige Nebenbedingung bzgl. der Netzauflösung ist, dass in jeder Zelle des Netzes eine Fluidströmung berechenbar sein muss. Dies wird durch die Forderung nach einer Mindestporosität von 0.05 in jeder Zelle gewährleistet. Daraus folgt, dass die Zellen des Netzes größer sein müssen, als die modellierten Deckwerksteine. Abb. 5 zeigt ein verwendetes Netz in der Seitenansicht. Abb. 6 schließlich zeigt die Porosität in den Zellen bei eingebrachtem Deckwerk. Porosität Eins bedeutet keinerlei Material in der Zelle und der Minimalwert 0.37 am Böschungsrand zeigt die Stellen mit der dichtesten Materialfüllung.

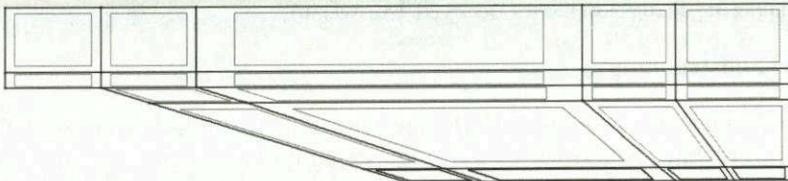


Abbildung 4: Geometrisches Modell aus 22 Teilkörpern in der Seitenansicht

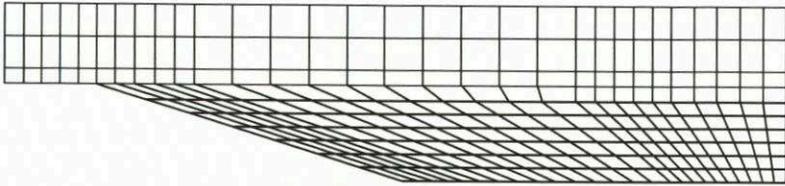


Abbildung 5: Gitternetz des Strömungsmodells



Abbildung 6: Porosität der Zellen mit Deckwerk

2.4 Beispiele

Als erstes Beispiel soll eine einfache Welle gegen das Ufer laufen und auf das Deckwerk treffen. Dies ist der einfachste Simulationsfall, da hier nur ein Wellenberg initialisiert wird, der in Folge der Schwerkraft im Laufe der Berechnungen in Form einer Welle auf das Ufer trifft. Der rechte Modellrand (etwa in der Wasserstraßenmitte) reflektiert die Welle. Dadurch kommt es mehrfach zum Auftreffen der sich abschwächenden Welle am Ufer. Abb. 7 zeigt einige Momentaufnahmen der Welle in 2,5 s-Schritten. Die Strömungsberechnungen wurden ohne Kopplung mit PFC^{3D}, also ohne Deckwerk, durchgeführt.

Sollen mehrere Wellen bzw. Wellen mit definierten Eigenschaften modelliert werden, ist es nötig, entweder zeitabhängige Randbedingungen einzuführen oder einen Wellengenerator aus PFC^{3D}-Bällen zu konstruieren, da hier die einfache Initialisierung eines unausgeglichene Zustandes nicht ausreicht. Beide Probleme sind nicht einfach zu lösen und werden momentan im Rahmen eines von der BAW initiierten Forschungsprojektes am Institut für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg bearbeitet.

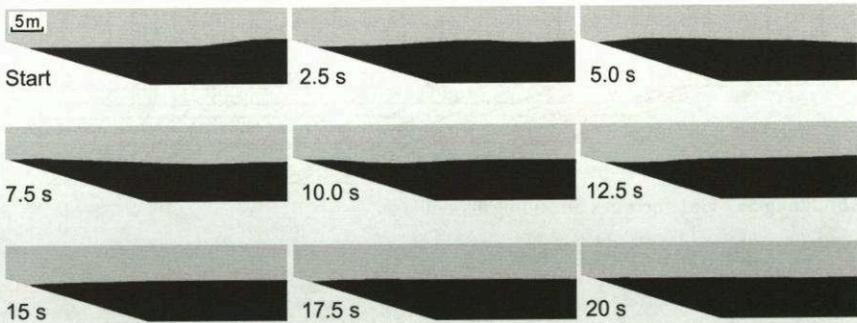


Abbildung 7: Welle (schwarz) im Schnitt zu verschiedenen Zeitpunkten

Das zweite Beispiel soll einen halben Zyklus eines Tidewechsels modellieren. Ausgehend von einem hohen Wasserstand wird eine relativ schnelle Wasserstandsabsenkung über die Randbedingungen realisiert, indem das Wasser zur Wasserstraßenmitte abfließen kann. Dieses Beispiel wurde mit der Kopplung zum PFC^{3D} gerechnet. Abb. 8 zeigt die Deckwerkschicht schräg von oben.

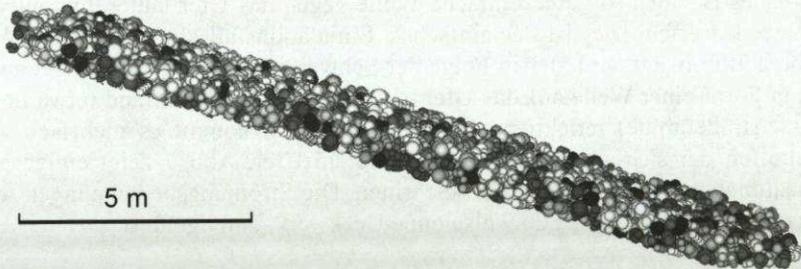


Abbildung 8: Deckwerkschicht in Schrägansicht

Die Modellgeometrie gleicht der des obigen Beispiels. Unterschiede sind nur in der Initialisierung und den Randbedingungen gegeben. Bei der Initialisierung wurde eine glatte Wasseroberfläche mit einem hohen Wasserstand fast bis zum Böschungsende vorgegeben. Um den sinkenden Wasserstand zu simulieren, wurden am rechten unteren Modellende für einen Teilkörper die Randbedingungen geändert. Abb. 9 zeigt das Abströmen zu verschiedenen Zeitpunkten der Berechnungen.

Abb. 10 zeigt die auf die Deckwerksteine wirkenden Kräfte nach 6.25 s Simulationszeit. Das abfließende Wasser ist transparent überlagert. Im oberen Bereich sind deutlich die hangabwärts weisenden Kraftvektoren zu erkennen, die vom

zurückweichenden Wasser kommen. Daran anschließend folgt ein Bereich mit nur geringen Kräften während am Böschungsfuß Gegenströmungen bzw. Wirbel Kräfte erzeugen, die aufwärts gerichtet sind.

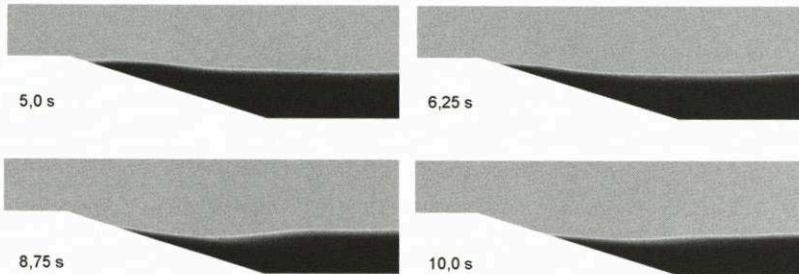


Abbildung 9: Abströmvorgang bei der Simulation einer Tidesenkung

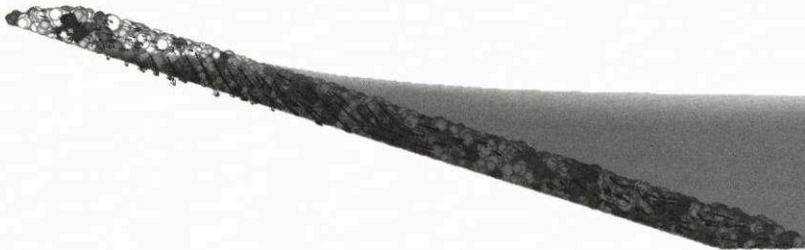


Abbildung 10: Deckwerk mit Kraftvektoren nach 6,25 s Simulationszeit

3 Ausblick

Die vorgestellten Ergebnisse der Simulation von Deckwerksbeanspruchungen durch Tidesenk und Wellen sind nur ein erster Schritt zur Simulation der komplexen Problematik im Tidegebiet. Es wurden einfache Strömungsszenarien vorgestellt, die noch deutlich ausgebaut werden müssen. Ziel ist es, zeitabhängige Wechselbelastungen durch definierte Tidenhube und Wellen zu untersuchen. Dabei werden zeitabhängige Randbedingungen unabdingbar. Diese müssen separat in C++ programmiert und anschließend in das Programm GID importiert werden. Konkrete Szenarien zu Fehlstellen und Schwächezonen im Deckwerk sowie Strömungsbelastungen in Folge von Tide und Starkniederschlagsereignissen sowie von Wind- und Schiffswellen sollen zukünftig modelliert werden (siehe auch *Söhngen, 2010*).

Die Interaktion Boden – Deckwerk soll in die Modellierung einbezogen werden. Auch dies kann nur über Programmkopplungen geschehen. Die wirkenden Kräfte sowie Grundwasserströmungen in den unterliegenden Filterschichten und im Boden werden mit dem Kontinuumsprogramm $FLAC^{3D}$ von *ITASCA (2009)* modelliert. Anschließend werden die wirkenden Kräfte ausgelesen und in die Strömungsmodelle eingefügt.

4 Literatur

- CCFD (2007): CCFD – Theoretical Manual, ITOCHU Techno-Solutions Corporation.
 GID-CCFD (2007): GID-CCFD Thermohydrodynamic Analysis Software. Operating Manual, ITOCHU Techno-Solutions Corporation.
 GID (2008): GID – User Manual. ISBN: 978-84-96736-50-4
 ITASCA (2005): Itasca Consulting Group, Inc. 2005. PFC^{3D} – Particle Flow Code in 3 Dimensions, Ver. 3.1 User's Manual. Minneapolis, USA.
 ITASCA (2009): Itasca Consulting Group, Inc. 2005. $FLAC^{3D}$ – Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Ver. 4.0 User's Manual. Minneapolis, USA.
 ITASCA (2008): Itasca Consulting Group, Inc. 2008. PFC^{3D} – Particle Flow Code in 3 Dimensions CCFD Add-On. Minneapolis, USA.
 Lu und McDowell (2007): The importance of modelling ballast particle shape in the discrete element method. *Granular Matter*, 9(1-2):69–80.
 Söhngen, Pohl, Gesing (2010): Bemessung von losen Schüttsteinen gegen schiffsinduzierte Strömungen und Wellen. *Dresdner Wasserbaukolloquium 2010*, Dresden.

Autoren:

Dr. rer. nat. Martin Herbst
 Prof. Dr.-Ing. Heinz Konietzky

Dr.-Ing. Martin Pohl

Institut für Geotechnik
 TU Bergakademie Freiberg
 Gustav-Zeuner-Str. 1
 09596 Freiberg

Bundesanstalt für Wasserbau
 Dienststelle Hamburg
 Wedeler Landstrasse 157
 22559 Hamburg

Tel.: +49 3731-39-2519
 Fax: +49 3731-39-3638
 E-Mail: Martin.Herbst@ifgt.tu-freiberg.de
 Heinz.Konietzky@ifgt.tu-freiberg.de

Tel.: +49 40 81908 310
 Fax: +49 40 81908 514
 E-Mail: martin.pohl@baw.de