

EINFLUSSFAKTOREN ZUR STABILITÄT VON KÜSTENBAUWERKEN AUS GEOTEXTILEN SANDCONTAINERN (GSC)

von

¹ Juan Recio

² Hocine Oumeraci

ABSTRACT

New shore protection structures such as seawalls, groins, breakwaters, revetments and artificial reefs, especially at sandy coasts, are increasingly being developed. Softer and low cost protection alternatives, such as geotextile sand containers are often used instead of more expensive and hard coastal structures made of concrete or rubble material.

Although the effect of the deformation of the sand containers on the hydraulic stability is significant, no stability formula is available to account for those deformations and associated processes leading to the observed failures. Therefore, at Leichtweiß-Institute (LWI) the hydraulic stability of GSC-coastal structures was investigated taking into account the effect of those deformation processes.

To achieve a better understanding of the processes that affect the stability of GSC-structures, several types of hydraulic model tests were performed at LWI. The processes investigated were: (i) permeability of GSC-structures, (ii) interaction between waves and structure, (iii) wave-induced forces on GSC-elements in a GSC-structure and (iv) internal movement of sand inside a GSC-element.

In addition, three numerical models were further developed and used to extend the range of the hydraulic model tests towards a better understanding of the involved processes. The wave-induced forces on the structure are calculated by using a RANS-VOF type model which is based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and the Volume of Fluid concept. The stresses and deformations of the GSC-elements are simulated by using an FEM model (Finite Element Method) and finally, the displacements of GSC-elements are simulated by a DEM model (Discrete Element Method). The numerical models (VOF-FEM-DEM) were validated with experimental data and then further applied for further parameter studies. Based on the experimental and numerical results analytical formulae for the stability of GSC-structures were developed including the required empirical parameters such as drag, inertia and lift coefficients.

This paper gives an overview of the study and key results related to the processes involved as well as the developed stability formulae for GSC-structures.

¹ M.Sc. Juan Recio, Stipendiat, Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI), Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig, E-Mail: j.recio@tu-bs.de

² Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci, LWI, TU Braunschweig, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

1. EINLEITUNG

Für den Schutz sandiger Küsten wird verstärkt nach Alternativen zu den herkömmlichen harten Küstenschutzmaßnahmen wie z.B. Deckwerken gesucht, da diese häufig als Verfälschung der Küste empfunden werden. Ein Konzept, die Dünenerosion und somit deren Funktionsverlust zu verhindern, stellt die Dünenverstärkung durch Geotextilien dar. Neben dem lagenweisen Einbau des Geotextils besteht die Möglichkeit, den lokal vorhandenen Sand in geotextilen Containern zu verpacken, um damit den Kern der Düne zu bilden. Dadurch werden Transportkosten und die mit dem Transport verbundenen Umweltbelastungen reduziert.

Das Haupthindernis für den verstärkten Einsatz geotextiler Sandcontainer (GSC) bildet das Fehlen zuverlässiger Bemessungsgrundlagen, die die Verformung der Container und die hydraulischen Prozesse, die die Stabilität beeinflussen, berücksichtigen. Eine erhöhte Aufmerksamkeit ist demzufolge der Bemessung dieses Bauwerkstyps zu schenken. Am LWI sind daher Modellversuche durchgeführt worden, um die auftretenden hydraulischen Prozesse, die die Stabilität beeinflussen, zu untersuchen und physikalisch begründete Bemessungsansätze zu entwickeln. Die Prozesse sind: (i) die Durchlässigkeit der Küstenbauwerke, die aus geotextilen Sandcontainern (GSC) gebaut sind; (ii) die Interaktion von Welle und Struktur; (iii) die welleninduzierten Kräfte auf den GSC und (iv) die Bewegungen des Sandkerns im Inneren der GSC-Elemente. Zusätzlich wurden alle physikalischen Prozesse durch numerische Modelle simuliert, um die Interaktion der verschiedenen Prozesse zu untersuchen. Hierbei wurde: (i) ein VOF-RANS-Modell (Volume-of-Fluid und Reynolds-Averaged Navier-Stokes) verwendet, um die Strömungsfelder zu simulieren, und (ii) ein strukturell gekoppeltes FEM-DEM-Modell (Finite and Diskrete Elemente Methode) benutzt, um die Interaktion zwischen den Strukturelementen und den Strömungsfeldern zu simulieren.

Die Ergebnisse der Modellversuche und der numerischen Simulationen konnten die physikalischen Prozesse, die die Stabilität beeinflussen, erklären. Die Ergebnisse wurden als Grundlage für die Entwicklung einer neuen prozessorientierten Bemessungsformel für GSC-Strukturen verwendet, die die Verformung der GSC hierbei berücksichtigt.

In diesem Bericht werden die wichtigsten Ergebnisse der Modellversuche und der numerischen Simulationen, ein neuer Bemessungsansatz für GSC-Strukturen sowie verschiedene Ratschläge für den Bau der GSC-Strukturen präsentiert.

2. KLEINMAßTÄBLICHE MODELLVERSUCHE

Im Wellenkanal des LWI wurden Versuche zur Bestimmung der Einflussfaktoren zur Stabilität von Küstenschutzbauwerken aus geotextilen Sandcontainern (GSC) durchgeführt. Hierfür wurde ein Deckwerk aus GSC-Elementen aufgebaut. Eines dieser GSC-Elemente war mit sechs Druckmessdosen (DMD) ausgestattet, um die welleninduzierten Kräfte auf die Außenhaut der GSC zu messen. Ein weiterer GSC wurde mit unterschiedlich eingefärbtem Sand und einer transparenten, durchlässigen Hülle angefertigt, um die Bewegungen der Sandkörner im Inneren eines GSC-Elements während des Wellenangriffs zu beobachten. Um die welleninduzierten Strömungsfelder und die Interaktion zwischen Welle und Struktur zu beobachten und zu untersuchen, wurde der Wellenkanal des LWI in zwei Sektionen eingeteilt. Eine Sektion wurde mit einer PIV-Technik (Particle Image Velocimetry) ausgestattet, in der zweiten Sektion wurden die welleninduzierten Kräfte auf die GSC gemessen (Abb. 1).

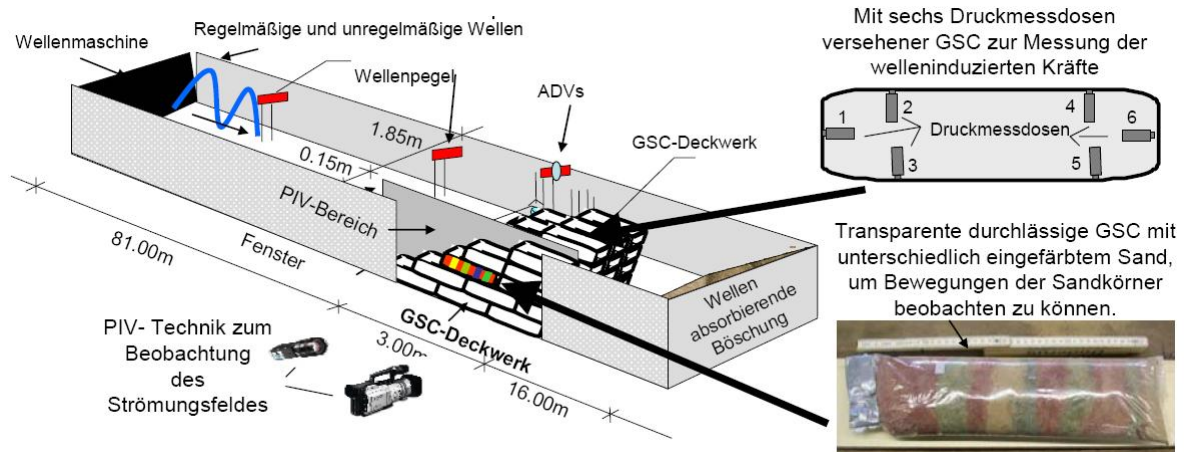


Abb. 1: Versuchsaufbau im Wellenkanal des LWI

Welleninduzierte Kräfte auf die GSC

Ein mit Druckmessdosen versehener GSC wurde in drei unterschiedlichen Positionen eingebaut, um den Einfluss der welleninduzierten Kräfte auf die jeweilige Position zu quantifizieren. Die Ergebnisse zeigten, dass die kritischen Belastungen auf das GSC-Element in Positionen knapp unterhalb des Ruhewasserspiegels sowie auf der Krone auftraten (Abb. 2).

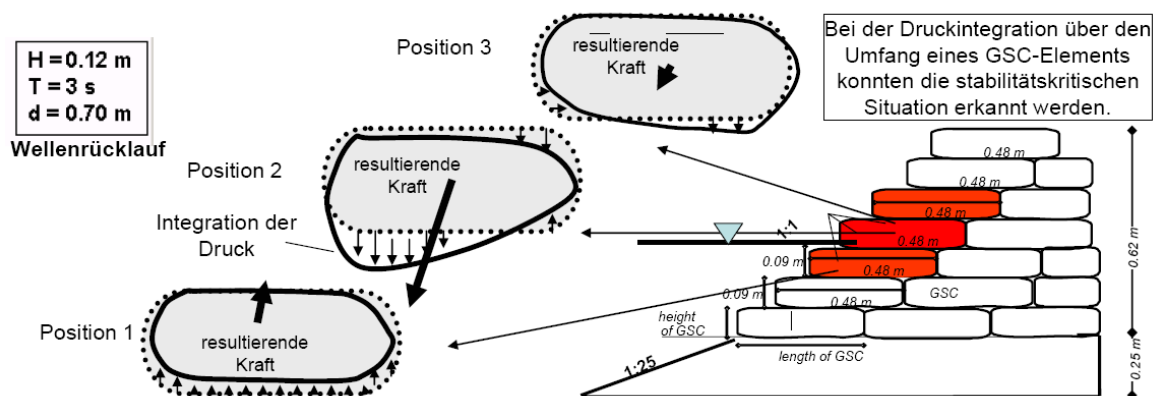


Abb. 2: Welleninduzierte Kräfte auf GSC-Elemente

Welleninduziertes Strömungsfeld vor der GSC-Struktur

Mit Hilfe der PIV-Technik konnte das welleninduzierte Strömungsfeld vor der Struktur aufgezeigt werden. Während des Wellenauf- und -rücklaufs teilte sich die Strömung in eine Hauptströmung parallel zur Struktur und „lokale“ Strömungen zwischen den GSC auf (Abb. 3).

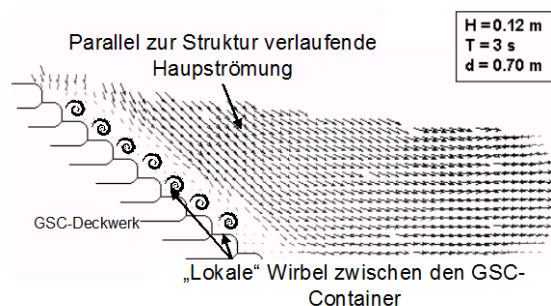


Abb. 3: Welleninduziertes Strömungsfeld vor der GSC-Struktur

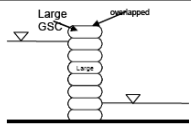
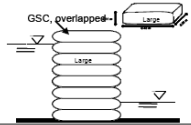
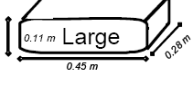
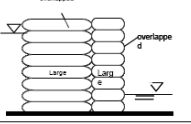
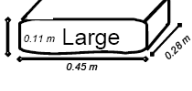
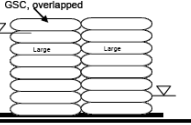
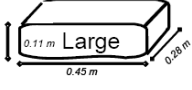
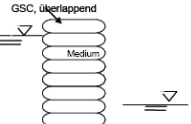
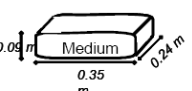
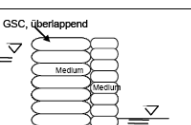
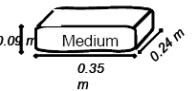
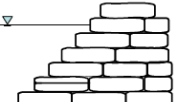
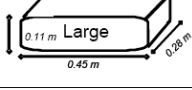
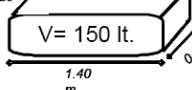
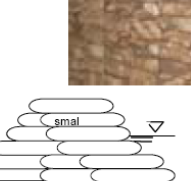
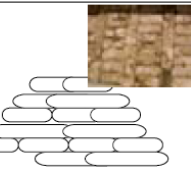
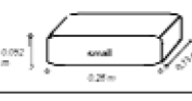
	Querschnitt	Größe des GSC	Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)	Anmerkung
MODELL 5			$k = 8 \times 10^{-3}$	- Durchströmte GSC haben kleineren Durchlässigkeitsbeiwert
MODELL 6			$k = 1.5 \times 10^{-2}$	- Typische Lagerung für GSC-Deckwerke
MODELL 7			$k = 9 \times 10^{-3}$	- Beste Einrichtung für kleine Durchlässigkeitsbeiwert
MODELL 9			$k = 1.4 \times 10^{-2}$	- Typische Lagerung für GSC-Deckwerke
MODELL 10			$k = 8 \times 10^{-3}$	- Kleine GSC-Elemente haben kleinere Durchlässigkeitsbeiwerte als große GSCs
MODELL 11			$k = 7 \times 10^{-3}$	- Blockierung der Fugen von benachbarten GSC-Elementen mit einem GSC verkleinert den Durchlässigkeitsbeiwert der Struktur
LWI			$k = 1.4 \times 10^{-2}$	- GSC-Deckwerk
GWK			$k = 2 \times 10^{-2}$	- Beiwert für GSC-Deckwerk mit geotextilen Filter und Sand (nach Hinz und Oumeraci 2002)
MODELL A			$k = 2.2 \times 10^{-2}$	- Kleinere parallel zum Wellenkanal eingebaute GSC haben höhere Stabilität als zufällig eingebaute GSC
MODELL B			$k = 1.2 \times 10^{-2}$	- Kleinere quer und parallel zum Wellenkanal eingebaute GSC. Ein GSC blockiert damit die Fugen von benachbarten GSC.
MODELL C			$k = 2.4 \times 10^{-2}$	- Kleinere zufällig angeordnete GSCs haben größeren Durchlässigkeitsbeiwert

Abb. 4: Durchlässigkeitsbeiwerte der GSC-Strukturen

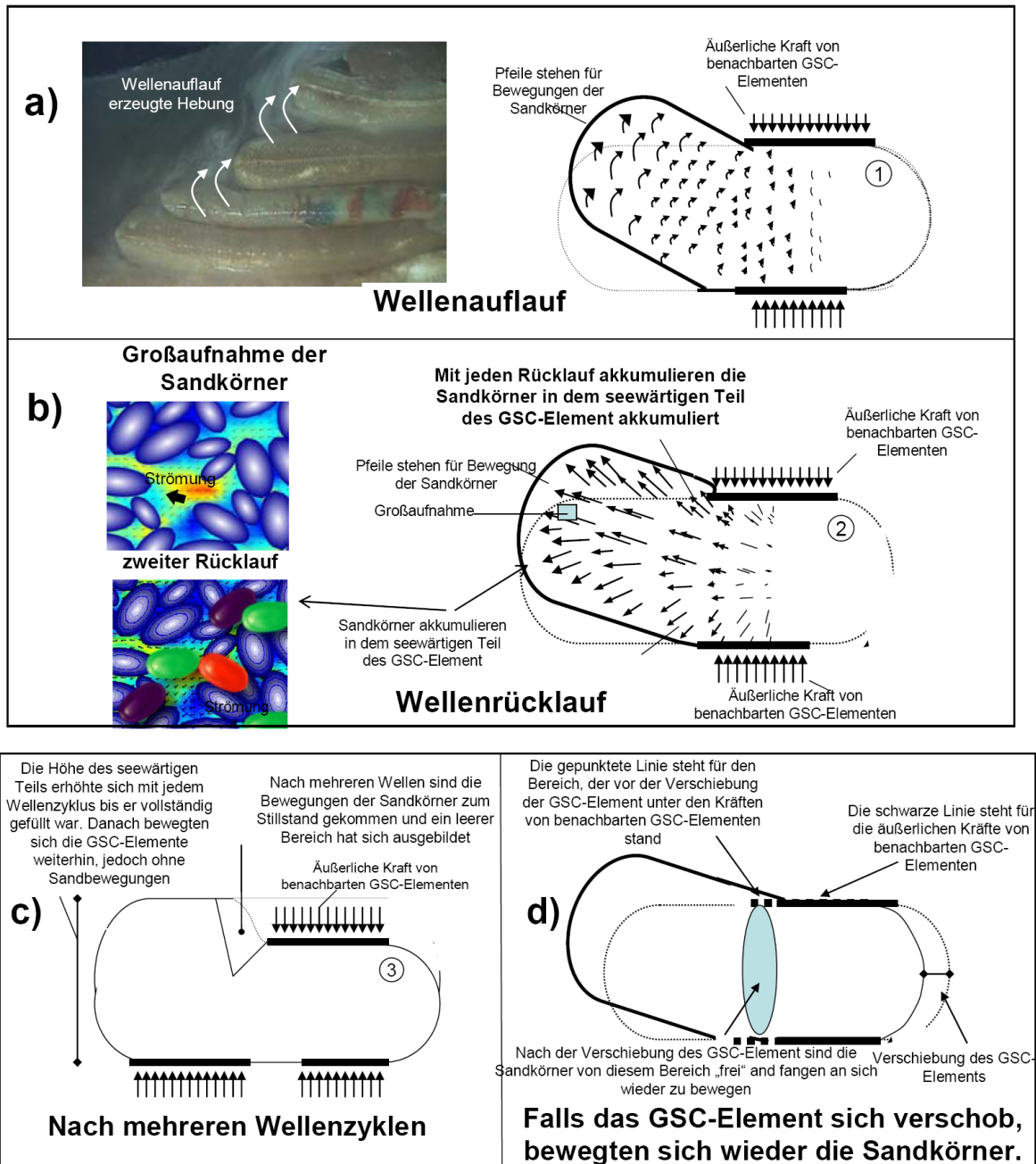


Abb. 5: Bewegungen der Sandkörner im Inneren der GSC

Durchlässigkeit der GSC-Strukturen

Die Durchlässigkeit der GSC-Strukturen und der Einfluss von Größe und Lagerung der GSC-Elemente auf den Durchlässigkeitsbeiwert wurden untersucht. Die Ergebnisse in Abb. 4 zeigen, dass die Durchlässigkeit hauptsächlich von der Größe der GSC-Elemente und somit von der Größe der Fugen zwischen den GSC-Elementen abhängig ist.

Bewegungen der Sandkörner im Inneren der GSC

Die Beobachtungen der Bewegungen der Sandkörner im Inneren der GSC während des Wellenangriffs zeigten, dass (Abb. 5)

- (i) die Bewegungen der Sandkörner im Inneren der GSC einem gleichen Muster folgen, das von der einlaufenden Welle abhängt.
- (ii) die größten Bewegungen der Sandkörner während der ersten 30 Wellen des Versuchs auftraten.
- (iii) während des Wellenaufbaus hauptsächlich translatorische aufwärts gerichtete Bewegungen der Sandkörner beobachtet wurden (Abb. 5a).
- (iv) die Bewegungen der Sandkörner während des Wellenrücklaufs seewärts gerichtet sind. Verschiebungen der GSC-Elemente traten hierbei auf, als die kritische Wellenhöhe erreicht wurde (Abb. 5b).
- (v) nach mehreren Wellen die Sandkörner in dem seewärtigen Teil des GSC-Elements akkumuliert waren und eine Verformung zeigten, wodurch eine Abnahme der Kontaktfläche zwischen den GSC-Elementen auftrat. Dieser Zustand bleibt konstant, solange keine Verschiebung der GSC-Elemente auftritt (Abb. 5c).
- (vi) die unter (i) beschriebenen Sandbewegungen im GSC-Element auftraten, falls eine Verschiebung des GSC-Elements erfolgte (Abb. 5d).

3. NUMERISCHE SIMULATIONEN VON GSC-STRUKTUREN

Die numerische Simulation baute auf den Ergebnisse der Modellversuche auf. So wurden mit Hilfe der FE-Methode die Verformungen der GSC und die in den GSC herrschenden Spannungen simuliert. Die Bewegungen der GSC wurden mit Hilfe der DE-Methode simuliert. Des Weiteren wurden die hydrodynamischen Einwirkungen durch den Seegang auf die GSC-Elemente mit einem validierten VOF-Modell berechnet (Liu et al., 2004). Basierend auf den Ergebnissen aus den numerischen FEM- und DEM-Simulationen wurde ein prozessorientierter Bemessungsansatz entwickelt (s. Abschnitt 4). Die Modelle sind „gekoppelt“ (Abb. 6) und die Ergebnisse der Simulationen und der Modellversuche stimmen gut überein (Abb. 7) (Recio und Oumeraci, 2007).

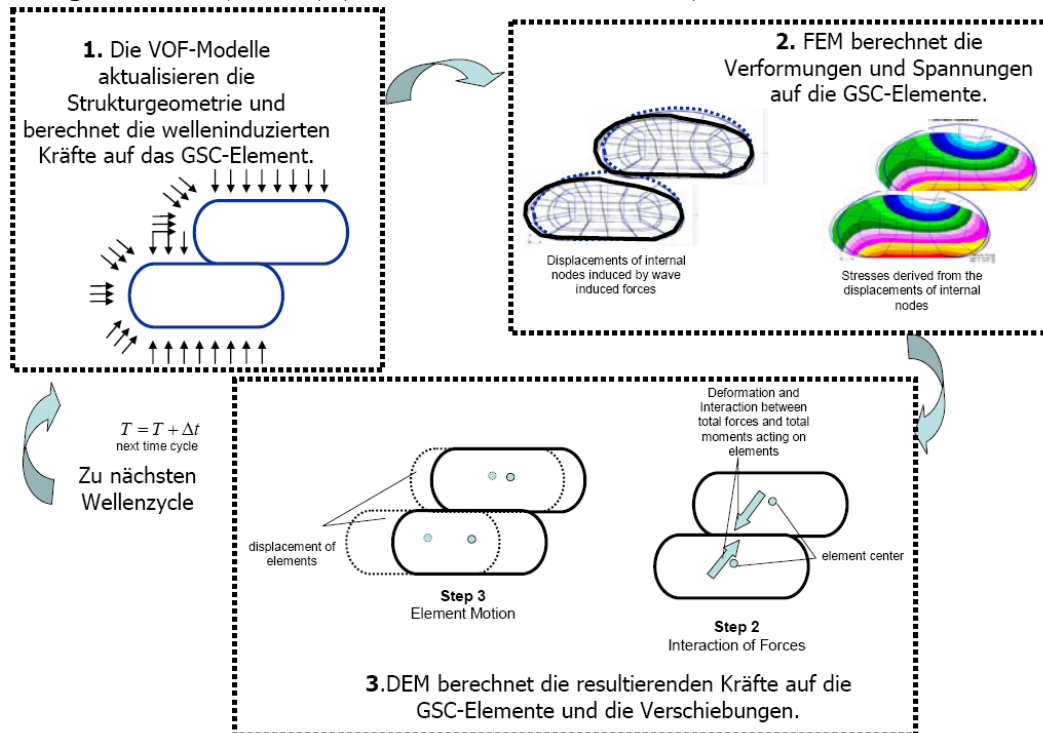


Abb. 6: Prinzipielle numerische Simulation der GSC-Strukturen

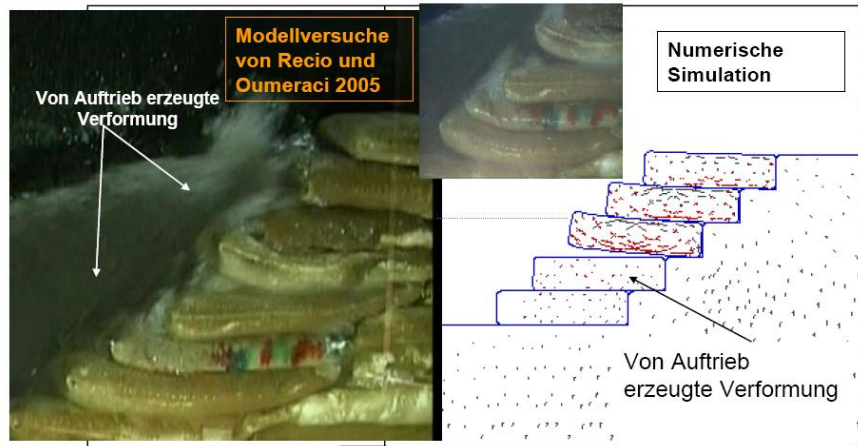


Abb. 7: Qualitativer Vergleich zwischen experimentellen und numerischen Ergebnissen

4. STABILITÄTSFORMEL FÜR GSC-STRUKTUREN

Mit Hilfe der numerischen und experimentellen Ergebnisse konnten zwei analytische Stabilitätsformeln entwickeln werden: (i) eine für eine kippende Verschiebung des GSC-Elements (overturning displacement) und (ii) eine für rutschende Verschiebung des GSC-Elements (sliding displacement). Die Formeln sind auf Grundlage von Trägheit, Widerstand und Auftrieb entwickelt worden. Für die Formeln wurden für die Abmessungen des GSC-Elements folgende Annahme getroffen: Länge des GSC l_c = zweimal so lang wie die Breite = fünfmal so lang wie die Höhe (Breite des GSC = $l_c/2$; Höhe = $l_c/5$).

Für kippende und rutschende Verschiebung:

$$l_{c(overl.)} \geq u^2 \frac{[0.05C_D + 1.25C_L]}{\left[0.5\Delta g - 0.1C_M \frac{\partial u}{\partial t}\right]} \quad (1) \quad l_{c(sliding)} \geq u^2 \frac{[0.5C_D + 2.5C_L\mu]}{\left[\mu\Delta g - C_M \frac{\partial u}{\partial t}\right]} \quad (2)$$

mit $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho_w} - 1$ [-] (3) und l_c = Länge der GSC [m]; ρ_s = Dichte der GSC [kg/m³];

ρ_w = Dichte des Wassers [kg/m³]; u = welleninduzierte horizontale Geschwindigkeit [m/s]; g = Erdbeschleunigung [m/s²]; C_D = Widerstandsbeiwert [-]; C_L = Auftriebsbeiwert [-]; C_M = Trägheitsbeiwert [-]; $\partial u / \partial t$ = welleninduzierte horizontale Beschleunigung [m/s²]; μ = Reibungsbeiwert zwischen den GSC [-].

Um die entwickelte Formel anwenden zu können, werden empirische Beiwerte (C_D , C_M , C_L) benötigt, die anhand der Modelversuche bestimmt wurden (s. Recio und Oumeraci, 2006b).

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die Erkenntnisse der Untersuchungen und Auswertungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- a) Die Prozesse, die die Stabilität der GSC-Strukturen beeinflussen, konnten durch Modellversuche und numerische Simulationen identifiziert werden.
- b) Die kritischen GSC-Elemente in einer GSC-Struktur befinden sich knapp unterhalb des Ruhewasserspiegels sowie auf der Krone.
- c) Der Wellenrücklauf ist kritischer für die Stabilität als der Wellenauflauf.
- d) Die Verformungen der GSC-Elemente beeinflussen die Stabilität der GSC-Strukturen.
- e) Die Bewegungen der Sandkörner im Inneren der GSC beeinflussen die Stabilität der GSC-Struktur. Deshalb muss der Füllungsgrad kontrolliert werden (mindestens 85%).
- f) Ein „gekoppeltes“ VOF-FEM-DEM-Modell (Volume-of-Fluid, Finite Elemente Methode, Diskrete Elemente Methode) für die Stabilität der GSC-Strukturen konnte entwickelt werden. Experimentelle und numerische Ergebnisse stimmten gut überein.
- g) Neue Stabilitätsformeln für GSC-Strukturen konnten entwickelt werden.

6. SCHRIFTTUM

- BLECK M., OUMERACI H.: Hydraulic Performance of Artificial Reefs: Global and Local description, Proceedings of the 28th ICCE 2002, pp. 1778-1790, Cardiff, Wales, 2002.
- BLECK M.: Hydraulische Wirksamkeit künstlicher Riffe am Beispiel einer rechteckigen Struktur, PhD Thesis, LWI, Germany, 2003.
- CUNDALL P.A.: A discrete numerical model for granular assemblies. Geotechnique 29, pag. 47-65, 1979.
- HINZ M., OUMERACI H.: “Versuchstagebuch, Geotextile Sandcontainer Dünenbarriere” Internal Report, LWI, Germany, 2001.
- ITASCA CONSULTANTS: UDEC Manual, Volume 4, Theory and Background and Volume 1 Users Guide, USA, 2004.
- H.; BLECK, M.; HINZ, M.; MÖLLER, J. OUMERACI H.: Theoretische Untersuchungen geotextiler Sancontainer im Küstenschutz. Bericht des Leichtweiß-Instituts Nr. 866, Braunschweig, 2002a.
- LIU P.: A finite volume/volume of fluid method for solving the navier-stokes-equation with application to water-wave problems, Lecture Notes of the 3 Days Compact Course, LWI, Germany, 2004.
- OUMERACI H.; HINZ, M.: Geotextile snad-filled container as innovative measures for shore protection, Technical paper, Proc. EuroGeo 2004, Vol 1, pp 175-180, 2004.
- OUMERACI H.; BLECK, M.; HINZ, M.; KÜBLER, S.: Großmaßstäbliche Untersuchungen zur hydraulischen Stabilität geotextiler Sancontainer unter Wellenbelastung. Bericht des Leichtweiß-Instituts Nr. 878, Braunschweig, 2002b.

- PYLARCZYK K.: Dikes and Revetments, design, maintenance and safety assessment, A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, 1998.
- PILARCZYK, K. W.: Geosynthetics and Geosystems in Hydraulic and Coastal Engineering. A.A. Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 3026, the Netherlands, 2000.
- RECIO J., OUMERACI H.: Experimental Results obtained from Model Tests, Wave-induced Forces, PIV visualization and Internal Movement of Sand of a Revetment, Progress Report, LWI, 2005.
- RECIO J.: Considerations for Simulating a GSC-revetment using a Numerical Model, Short Progress Report, LWI (internal report), 2004.
- RECIO J., OUMERACI H.: Analyse der stabilitätsgefährdenden Prozesse von GSC-Deckwerken, FZK 2004 pag 83-88, 2004.
- RECIO J., OUMERACI H.: Permeability of GSC-Revetments, Model Test and Analyses, Progress Report, LWI, 2006a.
- RECIO J. OUMERACI H.: Geotextile Sand Containers for Coastal Structures, Hydraulic Stability Formulae and Tests for Drag, Inertia and Lift Coefficients, Progress Report, LWI, 2006b.
- RECIO J., OUMERACI H.: "Coupled" Numerical Simulations of the Stability of Coastal Structures made of Geotextile Sand Containers (GSC), Progress Report, LWI, 2007.