

UNTERSUCHUNGEN VON KÜSTENSCHUTZBAUWERKEN MIT DEM NUMERISCHEN RANS-MODELL COBRAS

von

Matthias Kudella¹
Hocine Oumeraci²

ABSTRACT

COBRAS (Cornell Breaking Waves and Structures) is a two-dimensional mathematical model based on the Volume-Averaged / Reynolds Averaged Navier-Stokes (VARANS) equations. It was developed to simulate the hydraulic behaviour in the vicinity of coastal structures loaded by waves. The model was introduced by Liu et al. (1999) in order to simulate regular breaking waves overtopping a porous structure, where turbulent Forchheimer-flow is calculated. Losada et al. (2008) extended the model for the application of random waves (called COBRAS-UC). Both models are used at the Leichtweiss-Institute in order to simulate the hydraulic behaviour at coastal structures. Selected projects are presented in this paper to give an overview on the features of the model and to discuss the reliability of the obtained results.

1 EINFÜHRUNG IN DIE THEORETISCHEN GRUNDLAGEN

Numerische Modelle, welche auf den „Reynolds Average Navier-Stokes“ Gleichungen (RANS) beruhen und ein Turbulenzmodell enthalten, ermöglichen die Simulation von hochturbulenten Strömungsvorgängen wie sie z.B. in brechenden Wellen stattfinden. Die Einbindung der „Volume of Fluid“ (VOF) Methode erlaubt darüber hinaus die Simulation großräumiger Änderungen des Wasserspiegels. Der Vorteil solcher Modelle liegt im Wesentlichen darin, daß keine Wellentheorie benötigt wird und daß die erforderliche Rechnerleistung relativ gering bleiben kann.

Liu et al. (1999) entwickelte das numerische Modell COBRAS (Cornell Breaking Waves and Structures), welches auf den RANS-Gleichungen beruht und eine Weiterentwicklung des am Alamos National Laboratory entwickelten RIPPLE Modells ist. Es enthält ein

¹ Dipl.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

² Prof. Dr.-Ing., Leichtweiß-Institut, Beethovenstraße 51a, 38106 Braunschweig

nichtlineares k - ε Turbulenzmodell und ermöglicht, basierend auf der Forchheimer-Gleichung, die Simulation turbulenter Strömungsvorgänge in porösen Medien. Hsu et al. (2002) erweiterte den Code durch einen „Volume Average / Reynolds Average Navier-Stokes“ (VARANS) Ansatz, mit dem die Interaktion von regelmäßigen Wellen mit Bauwerken beschrieben werden kann. Der volumengemittelte Ansatz wird ebenso auf das Turbulenzmodell angewandt. Das Modell berücksichtigt turbulente Strömungsvorgänge während des Wellenbrechens, innerhalb der Grenzschichten an angeströmten Bauwerken und an der Sohle sowie innerhalb poröser Medien, wo die turbulente kinetische Energie und ihre Dissipation aus kleinmaßstäblichen turbulenten Strömungsvorgängen berechnet werden.

Die Bewegungsgleichungen im porösen Medium werden über ein Volumen gemittelt, welches einerseits größer ist als das signifikante Volumen eines einzelnen Hohlraumes, andererseits aber kleiner als der jeweilige Bereich, in dem konstante Fließparameter vorliegen. Die zur Berechnung notwendigen Forchheimer-Koeffizienten zur Beschreibung der linearen und nichtlinearen Widerstandskräfte als auch eines zusätzlichen Trägheitsterms sind schwierig zu bestimmen. Umfangreiche Untersuchungen sind notwendig, um die Größenordnungen korrekt zu erfassen (vgl. Muttray (2000)). Die turbulenten Eigenschaften werden mit der volumengemittelten turbulenten kinetischen Energie $\langle k \rangle$ und der volumengemittelten Dissipationsrate $\langle \varepsilon \rangle$ beschrieben, welche definiert sind durch:

$$\langle k \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_f} k \, dV \quad \text{and} \quad \langle \varepsilon \rangle = \frac{1}{V} \int_{V_f} \varepsilon \, dV \quad (0.1)$$

mit V gesamtes mittleres Volumen
 V_f Volumenanteil der Porenflüssigkeit

Hsu et al. (2002) untersuchte mit dem Modell turbulente Strömungsvorgänge an einem, mit Tetrapoden geschützten, zusammengesetzten Wellenbrecher. Ein Vergleich mit direkten Messungen zeigte erstaunlich gute Übereinstimmungen.

Die Implementierung der Bewegungsgleichungen in numerische Modelle sowie die Fähigkeiten der vorhandenen Codes werden im folgenden Kapitel kurz angesprochen.

2 EIGENSCHAFTEN DES COBRAS MODELLS

Die COBRAS zugrundeliegenden Bewegungsgleichungen sind zur Genauigkeitssteigerung in zwei unterschiedliche 2-dimensionale Finite Differenz Modelle (FDM) eingebunden. Die VOF - Methode erlaubt die Simulation beliebiger freier Wasseroberflächen, einschließlich zusammenhangloser Wasservolumen (Tropfen), sowie die Erzeugung von Wasserstrahlen.

Es können beliebige Geometrien definiert werden, die entweder als undurchlässige Hindernisse oder als poröse Medien beschrieben werden. Die Maschengröße des FDM kann variiert werden, um höhere Auflösungen in besonders kritischen oder interessierenden Bereichen zu erhalten.

COBRAS erlaubt die Generierung von linearen und nichtlinearen regelmäßigen Wellen (Stokes II und V, cnoidale Wellen) sowie Solitärwellen.

Als wesentliche Daten liefert das Modell die zeitliche und räumliche Verteilung von Wasserdruck, kinetischer Energie und Energiedissipation, horizontaler und vertikaler Strömungskomponente und Information über die Flüssigkeitssättigung (VOF).

COBRAS wurde vom Team um Prof. Losada an der Universität von Kantabrien zu COBRAS-UC erweitert, welches einen effizienteren Code beinhaltet und die Generierung von Wellenspektren ermöglicht. Beide Versionen werden in der Abteilung Küsteningenieurwesen am Leichtweiß-Institut verwendet, um die Interaktion zwischen Wellen und welleninduzierten Strömungsvorgängen und Bauwerken zu untersuchen. Kapitel 3 gibt einen Ausschnitt der am LWI durchgeführten Untersuchungen.

3 ANWENDUNGSBEISPIELE

Kudella & Oumeraci (2008) untersuchten die Interaktionen zwischen Welle, Caisson Wellenbrecher und Bauwerksgründung. COBRAS-UC wurde hierbei eingesetzt, um die Wellenbelastung am Caisson und an der Oberfläche des Sanduntergrundes vor und innerhalb der Schüttsteinunterlage zu erhalten. Die Forchheimer Koeffizienten wurden Muttray (2000) entnommen, welcher ähnliches Steinmaterial untersuchte. Abbildung 1 zeigt das realisierte Modell Setup.

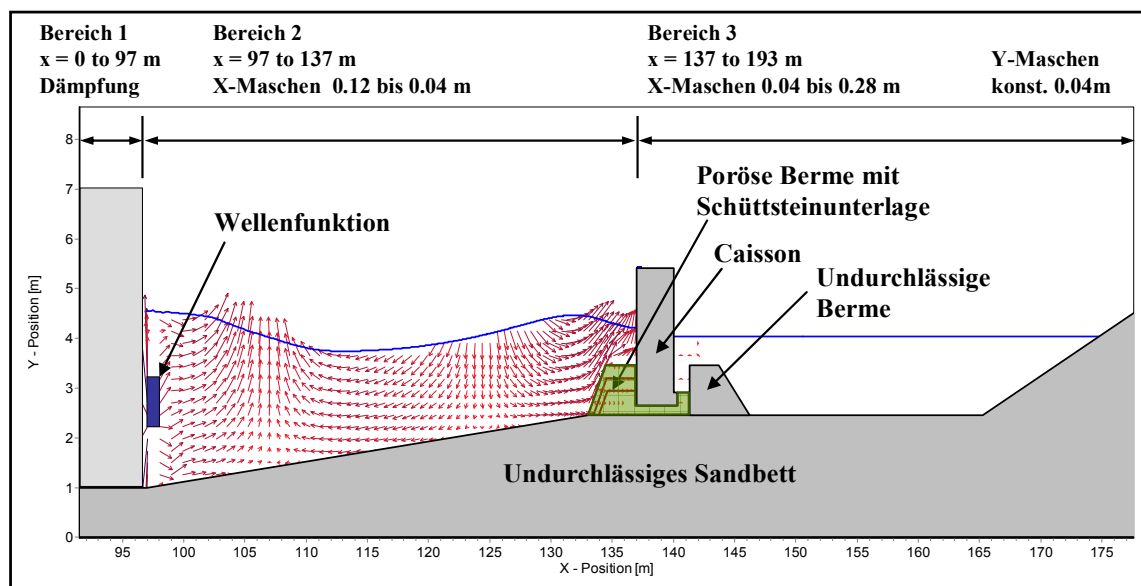


Abbildung 1: Setup des numerischen Modells zur Untersuchung der Wellenbelastung an einem Caisson Wellenbrecher

Exemplarisch ist in Abbildung 2 die Situation im Augenblick des Auftreffens einer brechenden Welle am Caisson dargestellt. Die Druckverteilung ist in Abb. 2a dargestellt, in den Abbildungen 2b und 2c die Geschwindigkeitsvektoren und die Verteilung der kinetischen Energie.

Ein Vergleich der gemessenen und berechneten resultierenden Belastungen zeigte eine sehr gute Übereinstimmung für nichtbrechende Wellen, während bei brechenden Wellen mit Druckschlagbelastung die Maximalbelastung deutlich streute und die beobachteten Druckschlagbelastungen nicht reproduziert werden konnten (Abbildung 2d).

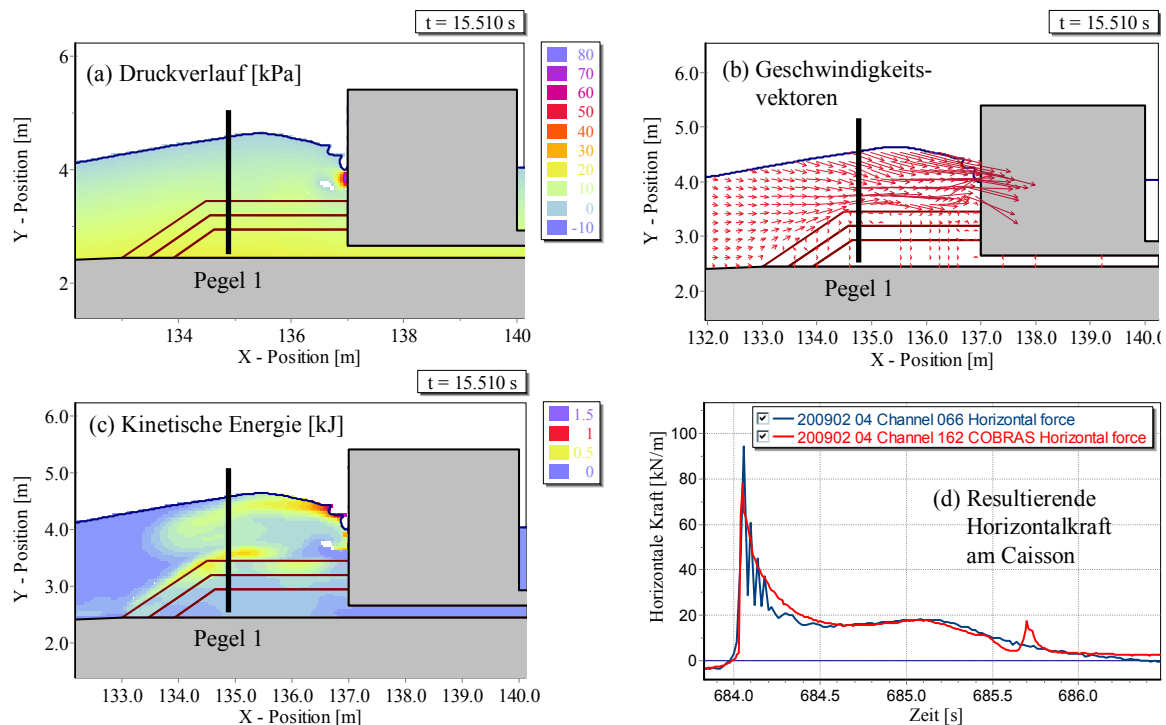


Abbildung 2: Örtliche Verteilung von Druck (a), Geschwindigkeit (b), kinetischer Energie (c) und zeitliche Entwicklung von Wasserspiegelauslenkung und Sohldruck am Pegel 1

In Kürze wird ein innovatives, poröses Deckwerk für den Küstenschutz am GWK untersucht. Die Positionierung von Meßgeräten wurde u. a. anhand von numerischen Untersuchungen mit COBRAS-UC festgelegt. Brechvorgang und Druckbelastung am Deckwerk durch den auftreffenden Wellenkamm wurde adäquat simuliert (Abb. 3a,b). Jedoch zeigte sich im Bereich des Wellenaufbaus, daß die Verweilzeit des Wassers auf und innerhalb des Deckwerks deutlich überschätzt wurde (Abb. 3a).

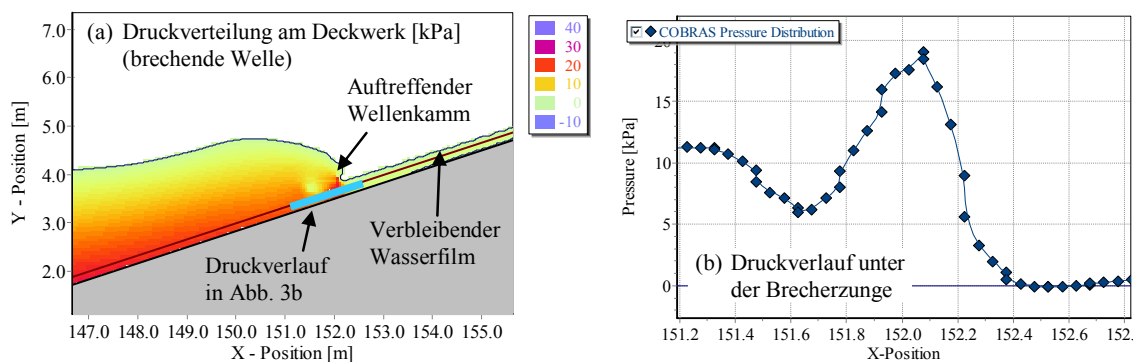


Abbildung 3: Druckverteilung an einem porösen Deckwerk unter einer brechenden Welle ($H=1.5\text{m}$, $T=5\text{s}$)

Einschränkungen bei der Reproduzierung des Wellenaufbaus zeigen sich besonders an flach geneigten Böschungen. Ein flach geneigtes Deckwerk wie in Abb. 4b dargestellt, wurde mit unregelmäßigen Wellen belastet. Das Spektrum der ankommenden Wellen wurde einer Reflexionsanalyse entnommen und in COBRAS generiert. Obwohl der Verlauf der gemessenen und simulierten Wellen durchaus vergleichbar war (Abb. 4a), wurde der Wellenaufbau und in der Folge ebenso der Wellenüberlauf deutlich unterschätzt.

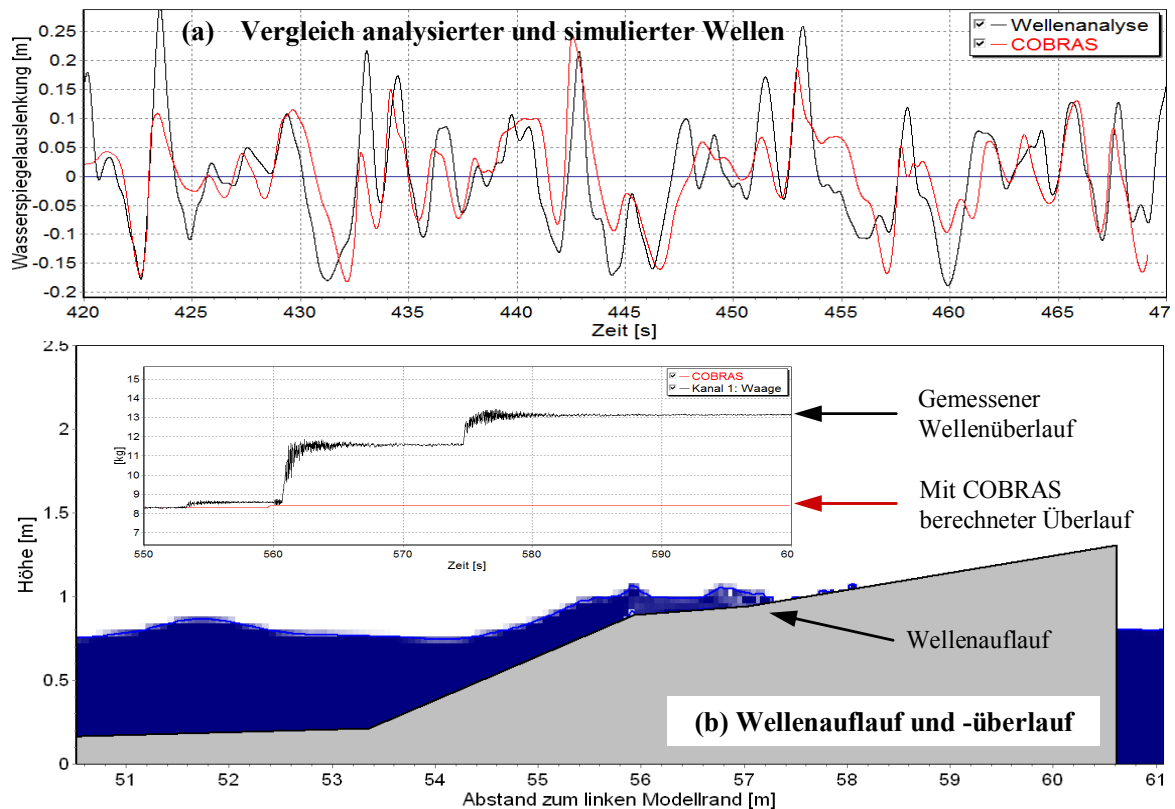


Abbildung 4: Unregelmäßige Wellen an einer flach geneigten Böschung mit Wellenauflauf und -überlauf

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

COBRAS bzw. COBRAS-UC sind ein vielseitig einsetzbares Tool zur Untersuchung von welleninduzierten hydraulischen Belastungen an porösen oder undurchlässigen Bauwerken. Unter quasistatischer Wellenbelastung lassen sich sehr genaue Ergebnisse erzielen. Die Ergebnisse bei dynamischen Belastungen durch brechende Wellen streuen und sind stark von der simulierten lokalen hydraulischen Situation abhängig (z.B. verbleibender Wasserfilm auf der Böschung). Schwächen zeigt der Code in der Behandlung von Lufteinschlüssen bei dynamischen Wellenbelastungen sowie in der Simulation dünner Schichtdicken (z.B. beim Wellenauflauf auf schwach geneigten Böschungen).

Gegenwärtig wird eine Verbesserung des Verhaltens an der Grenze zwischen Wasser und Luft implementiert. Die Berücksichtigung von Luft als einer zweiten, kompressiblen, Phase könnte die Simulation von Belastungen durch brechende Wellen weiter verbessern.

SCHRIFTTUM

- Hsu, T.-J.; Sakakiyama, T.; Liu, P.L.-F. (2002): A numerical model for wave motions and turbulence flows in front of a composite breakwater. Elsevier Science B.V.: *Coastal Engineering*, vol. 46, pp. 25-50.
- Kudella, M.; Oumeraci, H. (2008): Experimental and numerical study of the response of a seabed beneath a caisson breakwater subject to cyclic wave load. *International Conference on Coastal Engineering*, World Scientific, in press, Hamburg, Germany, 13 pp.

- Liu, P.L.-F.; Lin, P.; Chang, K.-A.; Sakakiyama, T. (1999): Numerical modeling of wave interaction with porous structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, vol. 125, no. 6, pp. 322-330.
- Losada, I.J.; Lara, J.L.; Guancho, R.; Gonzales-Ondina, J.M. (2008): Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, vol. 55, no. 1, pp. 47-62.
- Muttray, M. (2000): Wellenbewegung an und in einem geschütteten Wellenbrecher - Laborexperimente im Großmaßstab und theoretische Untersuchungen. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig, Fachbereich Bauingenieurwesen, Leichtweiss-Institut für Wasserbau, Abt. Hydromechanik und Küsteningenieurwesen, Braunschweig, Deutschland, 280S.