

# **ANWENDUNG DES FE-PROGRAMMS ROCKFLOW AUF PROBLEME DER BODEN-WASSER-INTERAKTION**

von

Martin Kohlmeier<sup>1</sup>  
Jobst Maßmann<sup>2</sup>  
Werner Zielke<sup>3</sup>

## **ABSTRACT**

The description and numerical investigation of multi-phase flow processes in deformable porous solids is of great interest in geotechnical engineering. For this purpose, the finite element program RockFlow has been extended towards poroelastic consolidation in the framework of unsaturated flow and with consideration of heat and matter transport (Kohlmeier, 2006). With these implemented extensions the code is being used for the investigation of engineered barrier systems including its structural integrity that may be influenced by pore water pressure or induced matter migration (Maßmann et al., 2006). In this contribution we present simulations which are concerned with wave induced groundwater flow and slope stability showing the applicability of the code in coastal engineering.

## **1. EINLEITUNG**

Das Finite-Elemente-Programm RockFlow (Kohlmeier et al., 2007) basiert mit seinem heutigen Modellumfang auf einer mehr als zwanzigjährigen Entwicklungsgeschichte am Institut für Strömungsmechanik. Entstanden als Grundwasserströmungs- und Transportmodell erfolgte die Ergänzung von Mehrphasenströmung und reaktivem Transport im Rahmen einer ortsadaptiven und gekoppelten Modellierung. Mit der Erweiterung um Deformationsprozesse (Kohlmeier, 2006) wird RockFlow heute im Bereich der thermisch, hydraulisch und mechanisch gekoppelten Simulation, beispielsweise zur Untersuchung von Barriersystemen, eingesetzt (Maßmann et al., 2006).

---

<sup>1</sup> Dipl.-Ing., Institut für Strömungsmechanik, Appelstraße 9a, 30167 Hannover

<sup>2</sup> Dipl.-Ing., Institut für Strömungsmechanik, Appelstraße 9a, 30167 Hannover

<sup>3</sup> Prof. Dr.-Ing., Institut für Strömungsmechanik, Appelstraße 9a, 30167 Hannover

Mit diesem weiten Anwendungsspektrum kann RockFlow im Bereich des Küsteningenieurwesens von Interesse sein, insbesondere bei der Interaktion zwischen freiem Wasserkörper und voll- bzw. teilgesättigter Bodenzone. Hierzu werden im Folgenden zwei Beispiele gezeigt. Das erste steht im Zusammenhang mit numerischen Kolkberechnungen (Göthel und Zielke, 2006) und befasst sich mit welleninduzierter Grundwasserströmung. Das zweite zeigt den Einfluss des Porenwasserdrucks auf die Stabilität von Böschungen.

## 2. WELLENINDUZIERTER GRUNDWASSERSTRÖMUNG

### 2.1 Motivation

Die Kolkbildung unter welleninduzierter Strömung ist bei der Gründung von meeres-technischen Konstruktionen von besonderer Bedeutung. Hier soll zunächst auf die welleninduzierte Grundwasserströmung und auf die Veränderung des Strömungsfeldes im Nahfeld einer Pfahlgründung eingegangen werden. Weitere Faktoren, die die Kolkbildung beeinflussen können, sind die aus der zyklischen Belastung resultierende Bewegung der Gründungsstruktur und die Deformation des Untergrundes. Diese sollen hier aber zunächst unberücksichtigt bleiben.

### 2.2 Modellaufbau

Die prinzipiellen Veränderungen im Strömungsverhalten sollen anhand eines vereinfachten zweidimensionalen Modells veranschaulicht werden. Die Geometrie des Modells aus porösem Untergrund und einer Pfahlstruktur ist in Abb. 1 dargestellt, und die zugehörigen Materialeigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Es wird eine Wassertiefe von 25 m und eine Wellenhöhe von 5 m angenommen, deren Druckwirkung nach Airy-Theorie als Randbedingung am oberen Rand des Modells vorgegeben wird.

Speicherterme bleiben unberücksichtigt. Damit kann eine obere Abschätzung der maximalen örtlichen Ausdehnung der welleninduzierten Strömungssituation abgeleitet werden.

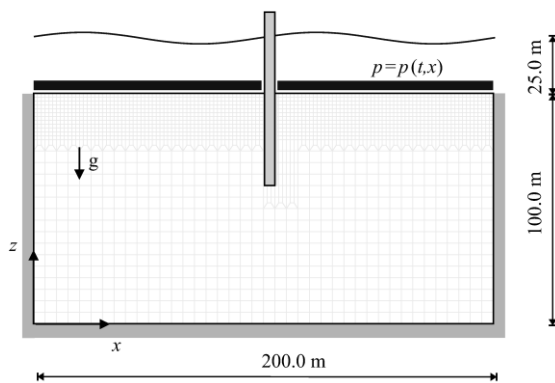


Abbildung 1 Geometrie und Randbedingungen.

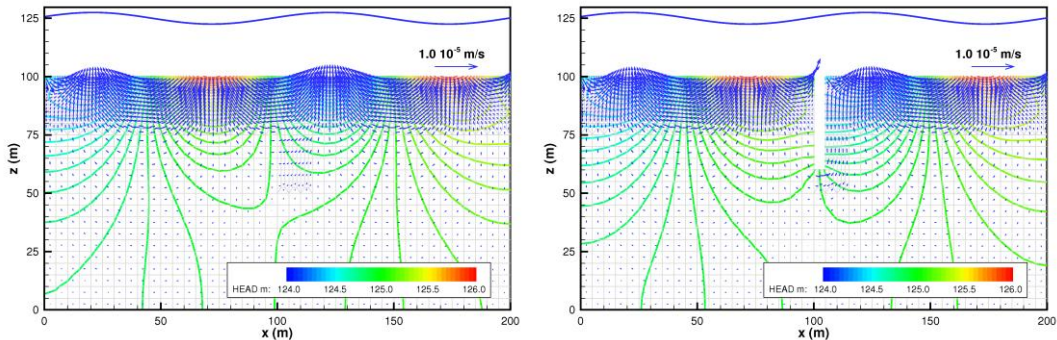
Tabelle 1 Materialeigenschaften.

Parameter	Symbol	Wert	
Permeabilität			
Boden	$k$	$5.0 \times 10^{-12}$	$\text{m}^2$
Spalt	$k$	$5.0 \times 10^{-7}$	$\text{m}^2$
Wasserviskosität	$\mu^w$	$10^{-3}$	$\text{Pa s}$
Wasserdichte	$\rho^w$	1025	$\text{kg m}^{-3}$
Porosität	$n$	0.3	
Gravitation	$g$	9.81	$\text{m s}^{-2}$

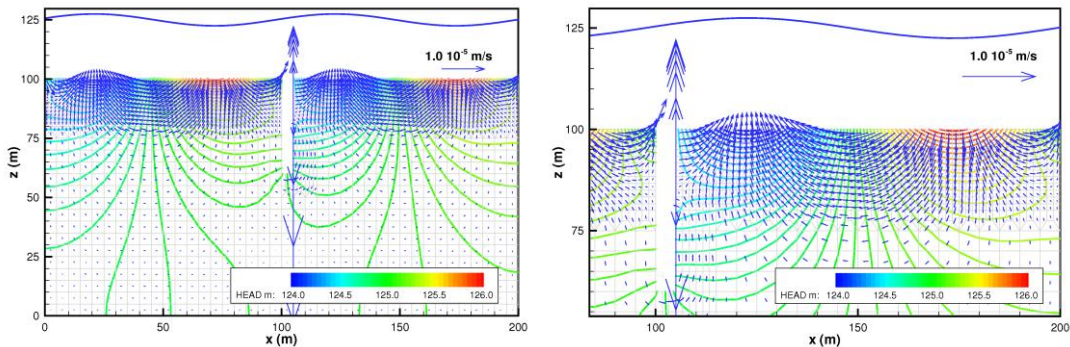
### 2.3 Ergebnisse der hydraulischen Simulation

Die Simulationsergebnisse des Grundwasserströmungsmodells sind in Abb. 2 vergleichend für den Fall mit und ohne Pfahl wiedergegeben. Der auftretende Druck im Boden ist als Standrohrspiegelhöhe farblich dargestellt. Es zeigt sich, dass die resultierenden Fließgeschwindigkeiten durch die angenommene Pfahlgründung kaum beeinflusst werden. Sie

zeigen vergleichsweise geringe Veränderungen. Im zweiten Fall wird ein Spalt der Breite 20 cm zwischen Pfahl und Boden angenommen. Er wird zu einem Ausgleich des Druckfeldes am Pfahl führen. Die daraus resultierende Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten ist zwar deutlich (Abb. 3), ob sie jedoch die Standsicherheit herabsetzt wäre zu untersuchen.



**Abbildung 2** Welleninduzierte Grundwasserströmung mit und ohne Monopile.



**Abbildung 3** Welleninduzierte Grundwasserströmung unter der Wirkung eines angenommenen Spalts an der rechten Seite des Monopiles.

## 2.4 Fazit

Es zeigt sich, dass bei Anwendung eines inkompressiblen Modells die Beeinflussung der welleninduzierten Grundwasserströmung durch eine Monopile-Gründung von vergleichsweise geringer Bedeutung ist. Auch die Annahme einer hohen Wegbarkeit im Nahfeld des Pfahls zeigt nur eine begrenzte Steigerung der Strömungsgeschwindigkeit. Deformationsvorgänge und das Vorhandensein von Hohlräumen können zusätzliche Strömungsvorgänge induzieren. Die Simulation derartiger Szenarien ist im Rahmen der vorhandenen hydraulisch-mechanisch gekoppelten Formulierung in RockFlow denkbar.

## 3. BÖSCHUNGSSTABILITÄT UNTER DEM EINFLUSS VON PORENWASSER-ÜBERDRUCK

### 3.1 Motivation

Die Untersuchung der Böschungsstabilität ist ein wichtiger Aspekt geotechnischer Untersuchungen im Küstenbereich, wobei eine korrekte Abbildung der Stabilität und möglicher Schädigungszonen wichtig ist. Dabei kann die Berücksichtigung von Sohlschub-

spannungen und Porenwasserdruck eine besondere Bedeutung haben. In den hier dargestellten Simulationen soll zunächst der Einfluss des Porenwasserüberdrucks auf die Böschungsstabilität dargestellt werden.

### 3.2 Modellaufbau

Es wird eine Böschung mit einer Steigung von 1:1 angenommen (Abb. 4), die durch eine Last aus einem Streifenfundament belastet wird. Die Last wird mittels Lastfaktor  $\lambda$  im Intervall  $[0 \dots \lambda_{crit.}]$  gesteigert. Der Boden wird als wassergefülltes poröses Medium angenommen, dessen Materialverhalten durch ein Plastizitätsmodell nach Drucker-Prager angenähert werden kann. Die Materialeigenschaften sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

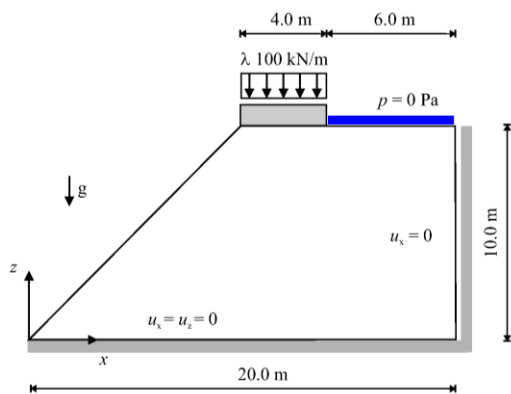


Abbildung 4 Geometrie und Randbedingungen.

Tabelle 2 Materialeigenschaften.

Parameter	Symbol	Wert	
Elastizitätsmodul	$E$	10.0	MPa
Querkontraktionszahl	$\nu$	0.3	
Kohäsion	$C$	65.0	kN m <sup>-2</sup>
Innerer Reibungswinkel	$\phi$	10	°
Dilatanzwinkel	$\psi$	0	°
Permeabilität	$k$	$1.0 \times 10^{-10}$	m <sup>2</sup>
Wasserviskosität	$\mu^w$	$10^{-3}$	Pa s
Wasserdichte	$\rho^w$	1000	kg m <sup>-3</sup>
Korndichte	$\rho^s$	2700	kg m <sup>-3</sup>
Porosität	$n$	0.2	
Gravitation	$g$	9.81	m s <sup>-2</sup>
Biot Koeffizient	$\alpha$	1.0	

### 3.3 Ergebnisse der hydraulisch-mechanisch gekoppelten Simulation

Die in Abb. 5 dargestellten Ergebnisse zeigen den Deformationszustand kurz vor Erreichen der kritischen Last im drainierten Zustand (links), das heißt ohne auftretenden Porenwasserdruck, und im undrainierten Zustand (rechts), in dem zusätzlich ein hydrostatischer Porenwasserdruck wirkt. Durch die auftretenden Deformationsraten wird zwar eine leichte Strömung induziert, das hydrostatische Druckfeld aber kaum beeinflusst. Im drainierten Zustand ergibt sich neben einer höheren maximal aufnehmbaren Last bei Lastfaktor  $\lambda_{crit.} = 0.450$  eine kleinere Bruchzone als im undrainierten Zustand. Hier ergibt sich der maximale Lastfaktor zu  $\lambda_{crit.} = 0.306$ . Es zeigt sich also ein deutlicher Einfluss des Porenwasserüberdrucks.

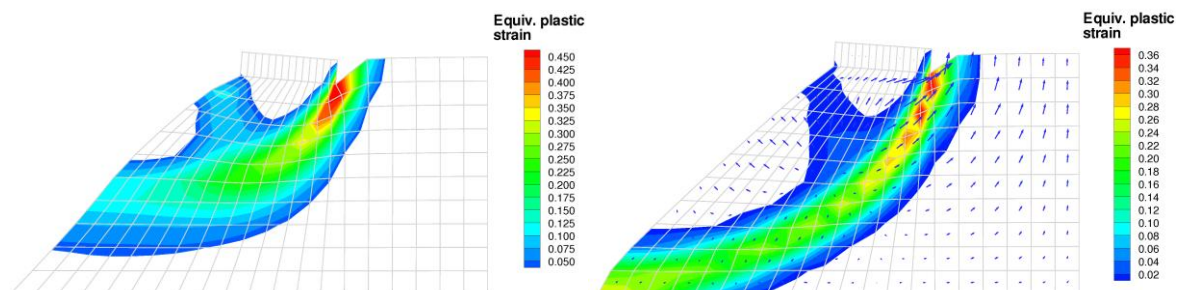


Abbildung 5 Ausbildung der Scherbänder bei Erreichen des kritischen Lastfaktors  $\lambda_{crit.}$ . Drainierter Zustand bei  $\lambda_{crit.} = 0.450$  (links). Undrainierter Zustand bei  $\lambda_{crit.} = 0.306$  (rechts) mit Darstellung der Strömung.

### 3.4 Fazit

Die numerische Simulation zeigt, dass sowohl die Größe der maximal aufnehmbaren Last als auch die Größe des resultierenden Bruchkörpers von der Wirkung des Porenwasserüberdrucks abhängen. Die lokale Entstehung von Porenwasserüberdruck, beispielsweise durch Kontraktanz in der Bruchzone, soll hier nicht weiter untersucht werden. Vielmehr wird hier zunächst ein nahezu hydrostatischer Druckzustand angenommen.

## 4. ZUSAMMENFASSUNG

Anhand von zwei Beispielen wird die prinzipielle Anwendbarkeit von RockFlow im Bereich der Boden-Wasser-Interaktion dargestellt. Bei der ersten, rein hydraulischen Simulation von welleninduzierten Strömungsprozessen im Nahfeld einer meeres-technischen Pfahlgründung zeigt sich, dass bei Anwendung eines inkompressiblen Strömungsmodells nur geringe Veränderungen im Grundwasserströmungsfeld festgestellt werden können. Ein Einfluss zeigt sich dann, wenn angenommen wird, dass sich zusätzliche Fließwege bilden können. Die Ausbildung derartiger Fließwege setzt die Berücksichtigung inelastischer Deformationsvorgänge voraus, die im Rahmen der Theorie Poröser Medien mittels adäquater Materialmodelle im numerischen Modell beschrieben werden können.

Die Berücksichtigung von Strömungsvorgängen im Porenraum kann von besonderer Bedeutung sein. Dazu wird in einer zweiten Simulation exemplarisch gezeigt, wie das Auftreten eines Böschungsbruchs von der Wirkung des Porenwasserdrucks abhängen kann und somit eine strukturmechanisch-hydraulisch gekoppelte Beschreibung notwendig macht. Als mögliche Erweiterungen der dargestellten Simulationen sind beispielsweise die Untersuchungen der Kolkbildung an wellenbelasteten Pfahlgründungen oder der Standsicherheitsnachweis von Deichen bei Extremereignissen zu nennen. Sie erfordern jeweils die Kopplung der Simulationen des hydrodynamischen Wasserkörpers mit der des poro-elastoplastischen Bodenkörpers unter Berücksichtigung seiner möglicherweise teilgesättigten Grundwasserströmungsvorgänge.

## SCHRIFTUM

- Göthel, O. und Zielke, W.: A Model of Scouring Around Structures including Stability Analysis of the Bottom. In: *Proc. of 3rd International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2006) in Amsterdam*, The Netherlands, 2006.
- Kohlmeier, M., Maßmann, J., Wulkau, M. und Ziefle, G.: *RockFlow 5, User's Manual, - Keyword Description -*. Institut für Strömungsmechanik, Leibniz Universität Hannover, 2007.
- Kohlmeier, M.: *Coupling of thermal, hydraulic and mechanical processes for geotechnical simulations of partially saturated porous media*. Dissertation, Institut für Strömungsmechanik, Universität Hannover, 2006.
- Maßmann, J., Ziefle, G., Kohlmeier, M., Zielke, W. und Shao, H.: Coupled Hydro-Mechanical Modeling of Seasonally Affected Unsaturated Claystone. In: *Proc. of GeoProc 2006*, pp. 555-560, 2006.