

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Pfletschinger-Pfaff, Heike; Kayser, Jan; Steeb, Holger Numerische Simulation von Suffosion

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101942>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Pfletschinger-Pfaff, Heike; Kayser, Jan; Steeb, Holger (2014): Numerische Simulation von Suffosion. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Filter und hydraulische Transportvorgänge im Boden. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 43-47.

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 von Suffosion

Heike Pflöschinger-Pfaff, Jan Kayser, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
Holger Steeb, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl Kontinuumsmechanik

Motivation der Arbeit

Die Durchsickerung von Erdbauwerken aufgrund hydraulischer Potentialunterschiede beeinflusst deren innere und äußere Stabilität. Die innere Stabilität kann gefährdet sein, wenn folgende Bedingungen gleichzeitig vorliegen:

1. ein Transport von Feinteilen durch das Korngerüst des Bodens ist geometrisch möglich (geometrisches Kriterium)
2. es ist eine ausreichend starke Wasserströmung im Porenraum vorhanden, so dass Feinanteile erodieren können (hydraulisches Kriterium).

Bestehende Stabilitätsberechnungen und Filterbemessungsmethoden beruhen in den meisten Fällen auf geometrischen, seltener auch auf hydraulischen Kriterien, beides üblicherweise jeweils getrennt betrachtet. Numerische Simulationen erlauben eine gekoppelte Betrachtung hydraulischer und geomechanischer Prozesse und können somit bestehende Methoden ergänzen. Voraussetzung zur richtigen Nutzung und Interpretation numerischer Modelle ist ein konsistentes mathematisches Modell sowie die Erfassung der notwendigen physikalischen Grundlagen.

Eine mögliche Versagensform ist die Suffosion, bei der die Feinanteile des Bodens durch das von den groben Kornanteilen des Bodens gebildete Korngerüst transportiert werden (Bild 1). Neben dem Austrag von Feinteilen können sich diese auch im Korngerüst anlagern.

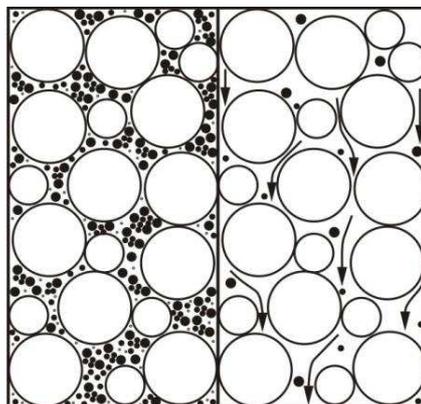


Bild 1: Schematische Darstellung von Suffosion (MMB, 2013)

Bei der numerischen Simulation von Suffosion in durchströmten Erdbauwerken sind das Zusammenwirken von Prozessen auf der Porenskala, gegeben durch die Bewegung einzelner Bodenkörner, und Prozessen auf der Makroskala, gegeben durch das Verhalten des gesamten Bodenkörpers abzubilden. Die intuitive Verwendung diskreter Elemente zur Darstellung einzelner Bodenkörner ist sehr rechenintensiv und zur Berechnung von Festkörper-Fluid-Interaktionen in einem Bodenkörper wenig geeignet. Die Anwendung der kontinuumsmechanischen Methode der Theorie Poröser Medien ermöglicht die Übertragung mikroskaliger Eigenschaften eines suffosiven Bodens auf ein makroskaliges Bodenelement anhand der Unterteilung des Elementes in unterschiedliche Phasen und die Aufstellung eines thermodynamisch konsistenten mathematischen Modells zur Beschreibung der Zusammenwirkung der Phasen. Die Implementierung eines entsprechend aufgestellten mathematischen Gleichungssystems in gängige netzbasierte numerische Methoden zur orts- und zeitaufgelösten Betrachtung eines durchströmten Erdkörpers ist möglich. Aufgrund fehlender Versuchskonzepte zur Übertragung der Mikroprozesse auf das kontinuumsmechanische Modell, sowie der Nicht-Linearitäten der an Bodenversagen durch Suffosion beteiligten Prozesse, beruht das vorgestellte Modell nach Steeb und Scheuermann (2012) teilweise auf vereinfachten physikalischen Annahmen. Zur Anwendung des Modells für Fragestellungen aus der Praxis gilt es zunächst, das Modell anhand von Laborversuchen und Messdaten zu validieren und den im Modell implementierten Suffosionsterm zu erweitern.

Modellkonzept für ein kontinuumsmechanisches Suffosionsmodell

Die Theorie Poröser Medien beschreibt einen makroskopischen Bodenkörper ohne auf die innere Porengeometrie oder die Lokalisierung einzelner Komponenten einzugehen. Die einzelnen Komponenten bzw. Phasen werden über Volumenanteile innerhalb eines Gesamtvolumens definiert. Die Wechselwirkungen der Phasen untereinander werden unter Einhaltung thermodynamischer Erhaltungssätze durch makroskopische Kopplungsgrößen berücksichtigt (Ehlers, 2002). Ohne Fragestellung zur Suffosion kann ein vollgesättigter Boden als Zweiphasen-System, bestehend aus einem Bodenskelett und dem die Bodenporen füllenden Wasser betrachtet werden. Zur Darstellung eines wassergesättigten suffosiven Bodens, der aus einem Grob- und Feinkornanteil besteht, wird der Boden nach Steeb und Scheuermann (2012) in vier Phasen eingeteilt: (1) ein festes Bodenskelett des Grobkorns, (2) an das Bodenskelett anhaftende Feinteile, (3) im Fluid suspendierte Feinteile und (4) eine reine Fluidphase. Der Abtrag der Bodenfeinteile wird über einen Austauschterm zwischen den Phasen der anhaftenden und der suspendierten Feinteile definiert (Bild 2) und ist über die sich dadurch ändernde Porosität mit den hydraulischen und mechanischen Bodeneigenschaften gekoppelt.

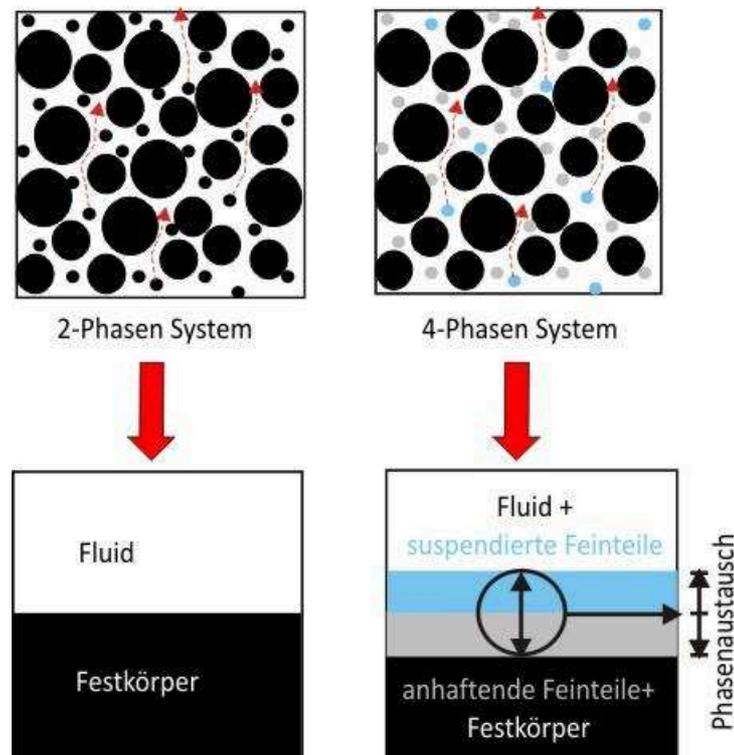


Bild 2: Modellkonzept Mehrphasensystem zur Darstellung von Suffosion

Das mathematische Modell beruht auf der Beschreibung der inneren Wechselwirkungen und individuellen Bewegungszustände, sowie der thermodynamisch konsistenten Bilanzrelationen der Phasen im Kontinuum (Ehlers 2002). Für das Suffosions-Modell ergeben sich hieraus die vier Primärvariablen Fluiddruck, Porosität des Festkörpers unter Berücksichtigung der anhaftenden Feinteile, Konzentration der Feinteile im Fluid und die Festkörperverformung. Konstitutivbeziehungen werden unter anderem zur Beschreibung der porositätsabhängigen Filtergeschwindigkeit, der spannungsabhängigen Verformung des Festkörpers, sowie des filtergeschwindigkeitsabhängigen Abspülvorgangs der Feinteile benötigt.

Implementierung und Verifizierung des Suffosionsmodells

Das Gleichungssystem des mathematischen Modells kann in einem Finite Elemente Kode implementiert werden. Die Definition von Anfangs- und Randbedingungen erfolgt für die Primärvariablen sowie für die Phase der anhaftenden Feinteile, die den Suffosions-Prozess limitiert. Eine Bestimmung des Anteils abspülbare Feinteile am Gesamt-Bodenvolumen ist somit eine Voraussetzung zur Modellanwendung. Die bisherigen Simulationen beruhen auf Suffosion bei zweigestuftem Bodenmaterial.

Zur physikalisch-mathematischen Modellverifizierung werden Anfangs-Randwert-Probleme von Durchströmung ohne suffosiven Feinkornanteil, sowie statische und zeitvariable Durchströmung

mit variablem Feinbodenanteil aufgestellt. Simulationen mit Veränderungen der Bodenparameter der aufgestellten Konstitutivbeziehungen zeigt eine deutliche Dominanz des Anfangswerts der hydraulischen Bodenleitfähigkeit hinsichtlich der Erosionsdynamik (Bild 3), d. h. je größer die Durchlässigkeit desto stärker die Suffosion.

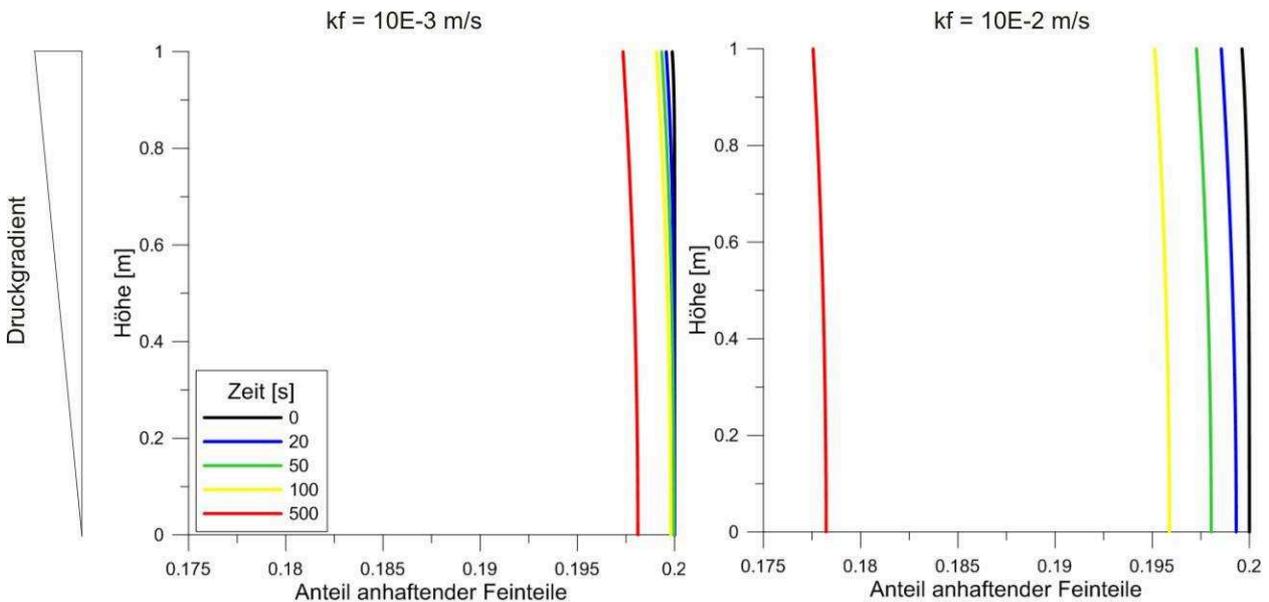


Bild 3: *Abspülung anhaftender Feinteile bei einer 1m-Säule mit angelegtem Druckgradient mit unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeiten (Anfangsanteil der anhaftenden Feinteile 0.2).*

Zur Modellvalidierung werden Messdaten aus unter Laborbedingungen durchgeführten Säulenversuchen verwendet. Derzeitige Simulationen werden anhand von Angaben von Permeameter-Versuchen zum Versagensmechanismus suffosiver Böden von der University of British Columbia, Canada durchgeführt (Moffat & Fannin, 2006). Die in den Versuchen beobachteten lokalisierten Versagensprozesse können jedoch nur unter heterogenen Anfangsbedingungen, insbesondere der Porosität, reproduziert werden. Zusätzlich ist durch das derzeitige mathematische Modell nur ein Abtransport von am Festkörperskelett anhaftenden Feinteilen, nicht aber eine Anlagerung von im Fluid suspendierten Feinteilen bestimmt.

Zur konkreteren Definition des Austauschterms zwischen anhaftenden und suspendierten Feinteilen werden Mikroskalen-Versuche durchgeführt. In einem definiert strukturiertem Gitternetzwerk zur Übertragung auf ein strukturiertes Porennetzwerk werden Ein- und Austrag zugeführter Feinpartikeln bestimmt. Die hochaufgelöste Detailaufnahme einzelner Porenstrukturen ermöglichen, Skalierungsfaktoren zur Übertragung der Porenskalenprozesse auf das implementierte Kontinuumsmodell zu ermitteln.

Möglichkeiten und Einschränkungen des bestehenden Suffosionsmodells

Das vorgestellte numerische Modell zur Darstellung von Suffosion in durchströmten Böden beschreibt die Kopplung zwischen hydraulischen Bodeneigenschaften und den Abtransport von Feinteilen. Das numerische Modell kann nicht den natürlichen Boden und insbesondere nicht die einzelnen Prozesse des Mikrogefüges des Bodens darstellen. Die Dynamik des Feinteilabtrags ist stark durch die hydraulische Durchlässigkeit des Materials bestimmt, während der Gesamtabtrag aus dem zu definierenden Anteil der Feinteile bestimmt ist.

Das Modell ist derzeit anwendbar auf grundsätzliche Fragestellungen der Sensitivitäten einzelner Bodenparameter auf die beschriebenen Austauschvorgänge. Der implementierte Austauschterm zwischen anhaftenden und suspendierten Feinteilen ist empirisch und die Übertragung auf unterschiedliche Bodengefüge ist zu überprüfen. Zusätzliche Einschränkung besteht durch die Unidirektionalität des Austauschterms, der die Abspülung von Feinteilen, nicht jedoch die mögliche Anhaftung von Feinteilen beschreibt. Eine Erweiterung des Austauschterms ist unter Auswertung kleinskaliger Zellenversuche noch zu entwickeln.

Literatur

- Ehlers, W. (2002): Foundations of multiphase and porous materials. In: Porous media: Theory, experiments and numerical applications, edited by W. Ehlers & J. Bluhm, pp. 3–86. Springer-Verlag, Berlin.
- MMB (2013): Merkblatt Materialtransport im Boden (MMB), Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Karlsruhe.
- Moffat, R. & Fannin, R. J. (2006): A Large Permeameter for Study of Internal Stability in Cohesionless Soils. *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 29(4):273-279.
- Steeb, H. & Scheuermann, A. (2012): Modelling internal erosion: A continuum based model enriched by microstructural information, *Acta Geotechnica*, submitted.