

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Kanitz, Manuela; Grabe, Jürgen

Gekoppelte CFD-DEM-Simulation zum Verflüssigungsverhalten gesättigter sandiger Böden

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106580>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kanitz, Manuela; Grabe, Jürgen (2019): Gekoppelte CFD-DEM-Simulation zum Verflüssigungsverhalten gesättigter sandiger Böden. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Numerik in der Geotechnik. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 31-36.

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.



Gekoppelte CFD-DEM-Simulation zum Verflüssigungsverhalten gesättigter sandiger Böden

Manuela Kanitz M. Sc., Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe
(Institut für Geotechnik und Baubetrieb, Technische Universität Hamburg)

Einleitung

Ausgeprägte Porenwasserströmungen durch gesättigte tragfähige Böden können zur Verflüssigung des Bodenkörpers führen und somit zum Versagen mariner geotechnischer Strukturen. Um den Übergang von fester zu flüssiger Phase untersuchen zu können, muss eine Methode gewählt werden, die zum Einen die mikromechanischen Eigenschaften des Bodens und zum Anderen den Einfluss der Wasserphase und der Interaktion der beiden Medien miteinander wiedergeben kann. Die gekoppelte CFD-DEM Methode bietet hier die Möglichkeit, die Wechselwirkung der Partikel mit dem Fluid durch numerische Simulationen zu untersuchen. In Kanitz & Grabe (2018) wurden bereits erste Untersuchungen zur Verflüssigung mithilfe der gekoppelten CFD-DEM durchgeführt. In diesen ersten Untersuchungen wurde das Verflüssigungsverhalten von Glaskugeln mit einem Durchmesser von 3 mm sowohl numerisch als auch experimentell untersucht. Dabei konnte eine qualitativ gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen und den numerischen Ergebnissen erzielt werden. Zur Untersuchung des Verflüssigungsverhalten von Sand wird nun in Laborversuchen eine gesättigte Bodensäule verflüssigt und die Partikelbewegungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen. Diese experimentellen Ergebnisse werden mit den numerischen Ergebnissen der gekoppelten CFD-DEM verglichen und analysiert.

Grundlagen der gekoppelten CFD-DEM

Die Diskrete Elemente Methode (DEM) ist eine Lagrange-Methode, die die Partikelposition und -geschwindigkeit explizit verfolgt. Sie wurde ursprünglich von Cundall und Strack (1979) entwickelt. Die maßgebenden Gleichungen der DEM zur Beschreibung der Translations- und Drehbewegung eines Partikels basieren auf dem zweiten Newtonschen Bewegungsgesetz:

$$m_i \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sum_j F_{ij}^c + F_i^f + F_i^g, \quad (1)$$

$$I_i \frac{\partial w_i}{\partial t} = \sum_j M_{ij}^c. \quad (2)$$

v_i und w_i beschreiben die translatorische und die Winkelgeschwindigkeit des Partikels i , I_i ist sein Trägheitsmoment. F_{ij}^c und M_{ij}^c stellen die Kontaktkraft und das Drehmoment dar, die von einem Partikel j oder den Wänden auf das Partikel i ausgeübt werden. F_i^f und F_i^g sind die Partikel-Fluid-Wechselwirkungskräfte und die Schwerkraft.

Die Berechnung des Druck- und Flüssigkeitsfeldes in der numerischen Strömungsdynamik (CFD) basiert auf den Navier-Stokes-Gleichungen (NSE). In diesem Beitrag wird die Finite Volumen Methode (FVM) verwendet, die die Berechnungsdomäne in Zellen unterteilt, in denen die lokal gemittelten NSEs

gelöst werden. Die maßgebenden Gleichungen basieren auf der Erhaltung von Masse und Momentum in Form von lokal gemittelten Variablen (Anderson und Jackson, 1967) durch:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_f \alpha_f + \nabla \cdot (\rho_f \alpha_f u_f) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f \alpha_f u_f) + \nabla \cdot (\rho_f \alpha_f u_f u_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot (\alpha_f \tau_f) + \alpha_f \rho_f g + R_{pf}, \quad (4)$$

wobei u_f die Strömungsgeschwindigkeit und p den Druck darstellen, τ_f beschreibt den Fluidspannungstensor und ρ_f die Dichte der Flüssigkeit. Gegenüber den klassischen NSE lassen sich zwei zusätzliche Variablen unterscheiden: α_f und R_{pf} . α_f ist dabei die Porosität einer CFD-Zelle in Abhängigkeit der in der Zelle vorhandenen Partikel. R_{pf} ist der Fluid-Partikel-Impulsaustausch-Term. In diesem Term werden alle Wechselwirkungskräfte zwischen Partikel und Fluid zusammengefasst und in der NSE berücksichtigt, so dass die Strömungsgeschwindigkeit und der Fluiddruck unter Berücksichtigung der Anwesenheit der Partikel berechnet werden (Goniva et al., 2010).

Experimenteller Aufbau und Numerisches Modell

Der Versuchsaufbau zur Untersuchung der Verflüssigung in kohäsionslosen Böden ist in Bild 1 dargestellt. Es wurde ein zylindrischer Acrylglasbehälter mit einem Durchmesser von 8 cm und einer Höhe von 25 cm verwendet. Der Prüfzylinder ist mit der Wasserleitung verbunden. Es ist ein Druckregler installiert, der einen konstanten Druck von 6 kPa aufrechterhält. Der Wasserfluss wird durch einen Kugelhahn initialisiert und gestoppt und strömt vertikal von unten nach oben. Das abfließende Wasser wird in einem Eimer gesammelt, wo der Abfluss mit einer Waage gemessen wird. Zu Versuchsbeginn wird der Zylinder mit Wasser gefüllt. Das Material wird dann vorsichtig in den Zylinder geschüttet, um einen vollständig gesättigten Zustand zu gewährleisten. Locker und dicht gelagerter Hamburger Sand wird zur Untersuchung der Verflüssigung verwendet. Eine Materialhöhe von 4,0 cm wird realisiert. Bei der lockeren Lagerung wird der Sand in den Zylinder gefüllt und anschließend vorsichtig mit Wasser durchströmt. Um einen dicht gelagerten Zustand zu erreichen, wird der Hamburger Sand durch Vibrationen verdichtet, nachdem das Material in den Zylinder gefüllt wurde. So wird eine Porenzahl von $n = 0,42$ ($D = 0,27$) für den locker gelagerten und $n = 0,35$ ($D = 0,95$) für dicht gelagerten Sand erreicht. Der Versuch wird durch Öffnen des Kugelhahns gestartet. Der gesamte Prozess der Verflüssigung wird mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet. Der Wasserdurchfluss ist konstant mit einer Geschwindigkeit von 0,016 m/s. Nach 5 s wird der Wasserzufluss gestoppt und die Sedimentation des Materials aufgezeichnet. Auf diese Weise kann auch das Hohlraumverhältnis nach der Verflüssigung analysiert werden.

Das numerische Modell wird mit den gleichen Dimensionen wie im Versuchsaufbau erstellt. Die Materialparameter für den Hamburger Sand für die numerischen Simulationen wurden im Vorfeld kalibriert und können Kanitz & Grabe (2019) entnommen werden. Die polydisperse Partikelpackung ist der vom Hamburger Sand nachempfunden. Die Partikel werden entsprechend ihrer Lagerungsdichte und Materialhöhe in einer separaten DEM-Berechnung initialisiert. Bei diesem Schritt ist eine Kopplung mit der CFD noch nicht notwendig. Dies führt zu einer deutlichen Reduzierung der Rechenzeiten. Für die anschließende Untersuchung der Verflüssigung der Sandsäule wird die gekoppelte CFD-DEM verwendet. Der DEM-Zeitschritt beträgt $t = 10^{-6}$ s und der CFD-Zeitschritt $t = 10^{-4}$ s. Nach jedem 100. DEM-Zeitschritt werden die Ergebnisse der DEM-Berechnung an den CFD-Solver übergeben. Als Randbe-

dingung wird am Zufluss eine konstante Geschwindigkeit von $v = 0.015$ m/s eingestellt, wobei sich der Druck beim Zufluss frei einstellen kann. Vorangehende Untersuchungen zeigten jedoch, dass bei dieser Strömungsgeschwindigkeit im Gegensatz zum experimentellen Versuch keine Verflüssigung eintritt. Aus diesem Grund wurde für einen Zeitraum von 0,025 s ein Impuls mit einer Geschwindigkeit von $v_{ini} = 0,05$ m/s vorgegeben. Nach diesem Intervall sinkt die Geschwindigkeit auf die im Experiment gemessenen $v = 0,015$ m/s ab. Zeitintervall sowie Initialgeschwindigkeit im numerischen Modell wurden mithilfe von Vorversuchen mit Glaskugeln kalibriert.

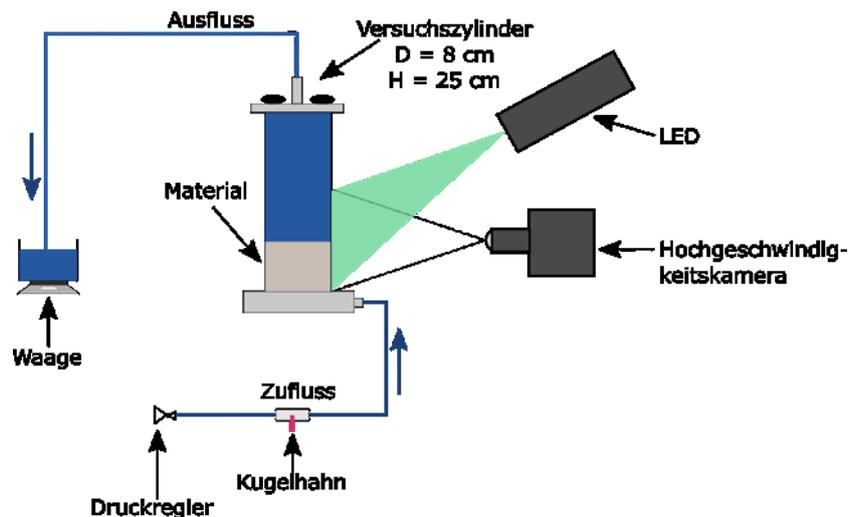


Bild 1: Versuchsaufbau - schematisch dargestellt

Ergebnisse

Bild 2 und Bild 3 zeigen das Verflüssigungsverhalten bei vertikaler Durchströmung des locker gelagerten Hamburger Sands im Versuch und im numerischen Modell zu drei Zeitschritten. Mithilfe der Particle Image Velocimetry Methode (PIV) wird in Bild 2 das Bewegungsverhalten des Sands veranschaulicht. Es zeigt sich, dass nach 1 s Durchströmung das Wasser das Bodengefüge durchstößt und sich ein Wirbel bildet. Dabei bleibt der Bodenkörper im mittleren Bereich in Ruhe. Das Wasser strömt über die Seiten nach oben und sorgt an dieser Stelle für die Auflockerung. Dieses Verhalten kann auch im numerischen Modell beobachtet werden. Nach dieser ersten Auflockerung wird ein größerer Teil des Sandkörpers verflüssigt und das Wasser durchdringt den Bodenkörper an mehreren Stellen, wobei sich die verflüssigten Stellen weiter auf den Randbereich konzentrieren. Sowohl in den Versuchen als auch im numerischen Modell verflüssigt nicht der komplette Sandkörper. Jedoch zeigt sich, dass je länger die Durchströmung andauert die Strömungskanäle im Bodengefüge sich weiter ausbreiten. Die Sedimentation nach Versuchsende geschieht nahezu augenblicklich. Die Porenzahl nach Versuchsende beim locker gelagerten Sand beträgt $n_{exp,locker} = 0,43$ im Versuch und $n_{num,locker} = 0,42$ in der numerischen Simulation. Der locker gelagerte Sand wurde somit durch die Verflüssigung erheblich aufgelockert, welches auch im numerischen Modell beobachtet werden kann.

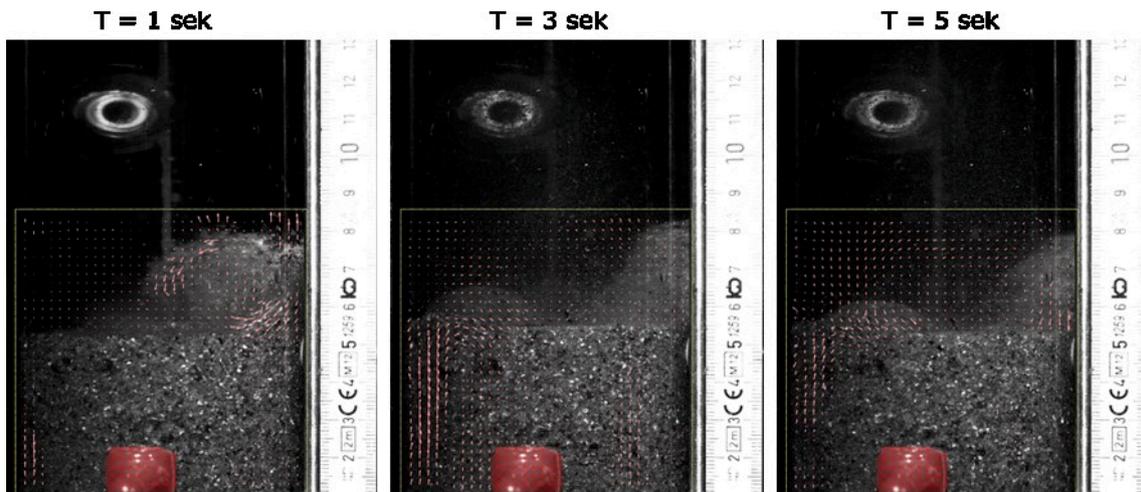


Bild 2: Verflüssigungsverhalten des locker gelagerten Hamburger Sands bei vertikaler Durchströmung, der rote Bereich ist aus der PIV-Analyse ausgeschlossen

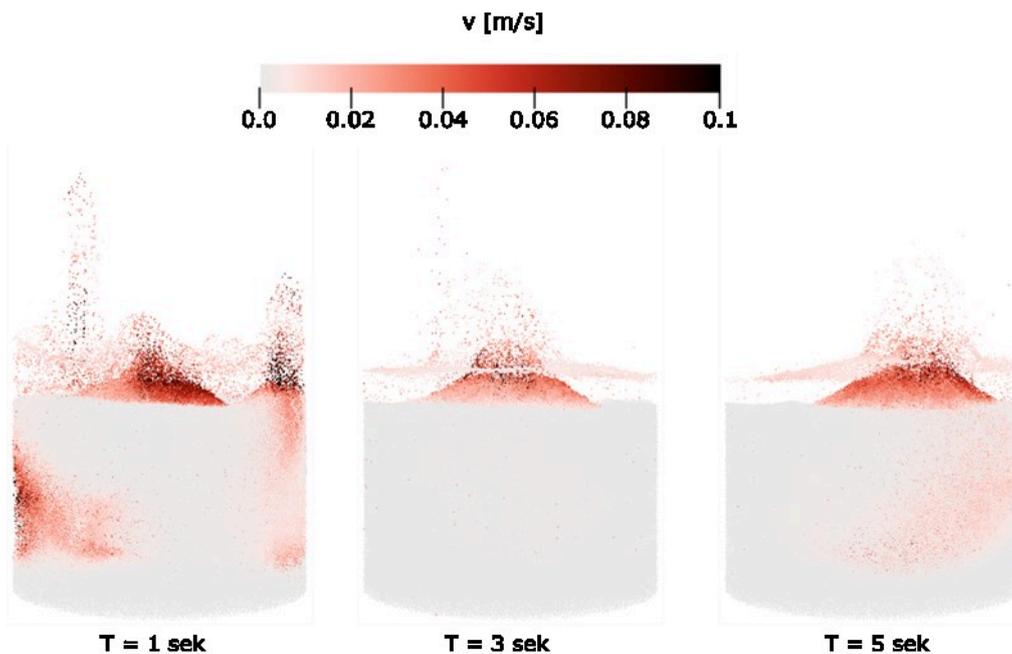


Bild 3: Verflüssigungsverhalten des locker gelagerten Hamburger Sands im numerischen Modell

In Bild 4 ist das Verflüssigungsverhalten des dicht gelagerten Hamburger Sands dargestellt. Im Gegensatz zum locker gelagerten Sand bildet sich bei der vertikalen Durchströmung nach 1 s ein Pfropfen, der gleichmäßig aufsteigt. Am unteren Rand des Pfropfens kann beobachtet werden, wie sich ein Hohlraum bildet und an der Unterseite des Pfropfens der Sand abgewaschen wird. Diese Pfropfenbildung kann im numerischen Modell nicht beobachtet werden (vgl. Bild 5). Dort wird die Bodensäule vom Wasser bereits nach 1 s durchbrochen und wirbelt an mehreren Stellen den Sand auf. Das Material wird dabei höher geschleudert als beim locker gelagerten Boden. Nach 3 s kann in den Versuchen eine Verflüssigung der Bodensäule beobachtet werden. Nachdem der Pfropfen zusammengefallen ist, verringern sich die Partikelinteraktionskräfte erheblich und fast der gesamte Bodenkörper verflüssigt.

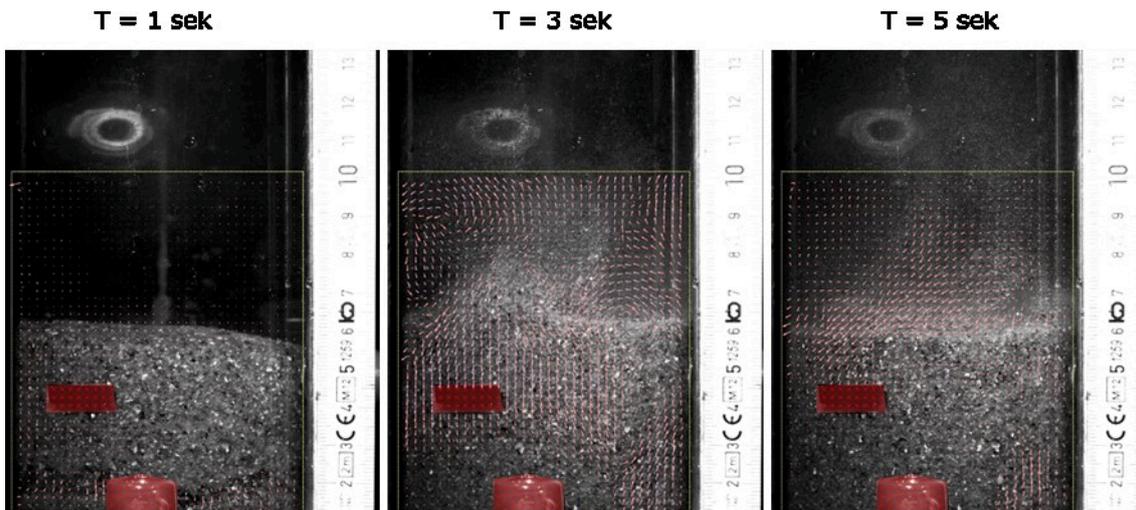


Bild 4: Verflüssigungsverhalten des dicht gelagerten Hamburger Sands bei vertikaler Durchströmung, der rote Bereich ist aus der PIV-Analyse ausgeschlossen

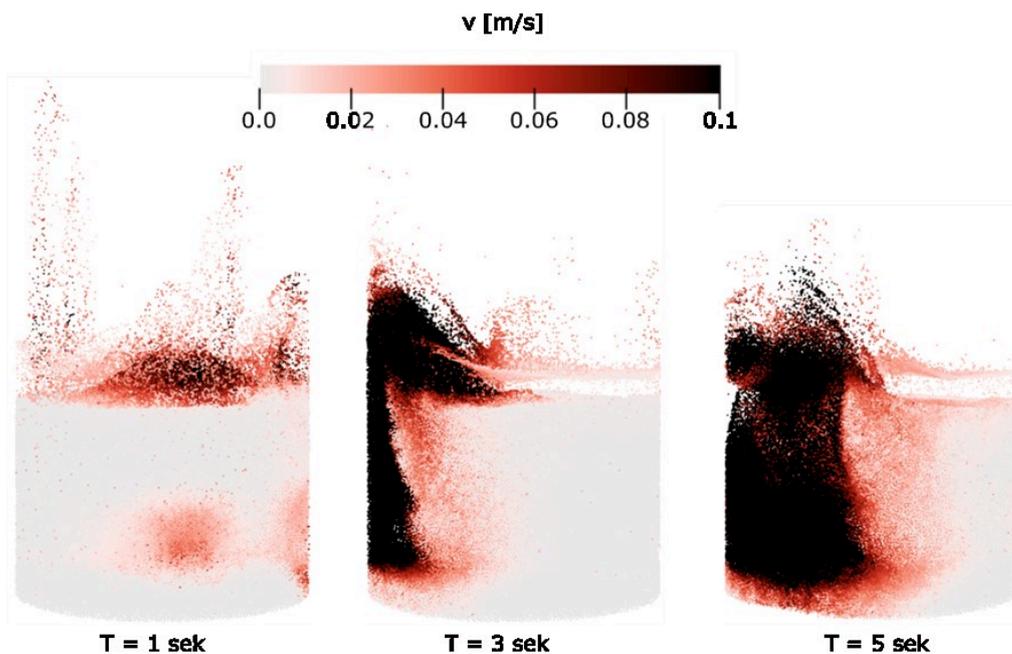


Bild 5: Verflüssigungsverhalten des dicht gelagerten Hamburger Sands im numerischen Modell

Die Verflüssigung ist dabei insgesamt stärker als beim locker gelagerten Boden. Die Partikelgeschwindigkeiten sind ebenfalls höher. Die numerischen Ergebnisse nach 3 s zeigen eine ähnliche Tendenz. Ein großer Bereich der Bodensäule ist verflüssigt und bewegt sich stetig und stärker als beim locker gelagerten Sand. Wie in den Versuchen kann ein höherer Materialaustrag aus den Bodensäule beobachtet werden. Sowohl in den Versuchen als auch in den numerischen Ergebnissen zeigt sich, dass sich der Durchbruch des Wassers eher auf eine Stelle im Boden fokussiert. An dieser Stelle wird das Material nach oben transportiert, wo es verwirbelt und anschließend in einer Abwärtsbewegung wieder auf die Sandsäule aufprallt. Die Sedimentation des dicht gelagerten Sands benötigt mehr Zeit als der locker

gelagerte. Nach Sedimentation hat sich im Versuch eine Porenzahl von $n_{exp,dicht} = 0,42$ und im numerischen Modell eine Porenzahl von $n_{num,dicht} = 0,42$ eingestellt. Die Auflockerung des dicht gelagerten Sands durch die Verflüssigung ist erheblich. Die Lagerungsdichten nach Verflüssigung von locker und dicht gelagerten Sand sind vergleichbar.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Verflüssigung einer locker und einer dicht gelagerten Sandsäule durch Durchströmung experimentell und numerisch mithilfe der gekoppelten CFD-DEM untersucht. Sowohl die locker als auch die dicht gelagerte Sandsäule verflüssigen bei einer Durchströmungsgeschwindigkeit von $v = 0,015$ m/s. Sowohl im Versuch als auch im numerischen Modell zeigt sich dabei, dass die Verflüssigung im dicht gelagerten Sand deutlich ausgeprägter ist. Aufgrund der geringeren Durchlässigkeit des dicht gelagerten Bodens baut sich ein stärkerer Druck auf, da das Wasser nicht frei durch den Bodenkörper strömen kann. Dieses resultiert in einem plötzlichen Durchbruch der Wasserströmung durch das Korngefüge. Aus diesem Grund ist die Materialbewegung beim dicht gelagerten Sand deutlich stärker als beim locker gelagerten. Nach Ende der Durchströmung sedimentiert der Boden und eine starke Auflockerung resultiert. Locker und dicht gelagerter Boden weisen nach Versuchsende eine ähnliche Porenzahl auf.

Der Vergleich mit den numerischen Modellen zeigt eine qualitative Übereinstimmung. Beim locker gelagerten Sand konnten die vorherrschenden Phänomene der Verflüssigung abgebildet werden. Beim dicht gelagerten Sand kann das numerische Modell die anfängliche Pfropfenbildung nicht abbilden. Als Grund ist zu benennen, dass in der DEM nicht die reale Partikelform abgebildet wird und somit ein Verhaken der Partikel aufgrund der Kornform nicht dargestellt werden kann. Um dies zu umgehen, müssten erhöhte Partikelinteraktionskräfte im DEM-Modell implementiert werden, die ggfs. von der Porenzahl abhängen. Das Verflüssigungsverhalten stimmt jedoch qualitativ überein.

Literatur

- Anderson, T. B.; Jackson, R. (1967): A fluid mechanical description of fluidized beds. In: *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals* 6 (4), S. 527–538.
- Cundall, Peter A.; Strack, O. D. L. (1979): A discrete numerical model for granular assemblies. In: *Géotechnique* (29), S. 47–65.
- Goniva, Christoph; Kloss, Christoph; Hager, Alice; Pirker, S. (2010): An Open Source CFD-DEM Perspective. In: *Proceeding of OpenFOAM Workshop*. Göteborg.
- Kanitz, M.; Grabe, J. (2018): Numerical investigations on the liquid-solid transition of a soil bed with coupled CFD-DEM. In: Manuel de Matos Fernandes (Hg.): *Numerical Methods in Geotechnical Engineering IX. Proceedings of the 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 2018)*, June 25-27, 2018, Porto, Portugal. Milton: Chapman and Hall/CRC.
- Kanitz, M.; Grabe, J. (2019): Influence of Suction Dredging on the Failure Mechanism of Sandy Submarine Slopes: Revisited With a Coupled Numerical Approach. In: *Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE)*.