

## Pfahlbelastung in weichen, bindigen Böden infolge Seitendruck – Eignung eines fluid-mechanischen, visko-plastischen Ansatzes

Denis Maier M. Sc., Dr.-Ing. Héctor Montenegro (Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe)

### Einführung

Horizontale Bodenverschiebungen gegen Pfahlgründungen in weichen, bindigen Böden gehen mit großen lokalen Verformungen einher. Diese verursachen erhebliche Probleme bei der Abbildung mit Hilfe von üblichen Lagrange Formulierungen der Bodenmechanik, auf Grund der weit verbreiteten Annahme linearer Kinematik (Theorie kleiner Verformungen). Modellversuche von unter anderen Wenz (1963) und Bauer (2016) zeigten, dass die Verschiebungen um einen Pfahl der Umströmung eines Zylinders durch ein Fluid entsprechen. Hieraus stellt sich die Frage, ob fluid-mechanische Ansätze eine geeignete Alternative zur Beschreibung großer Bodenverformungen darstellen. Fluid-mechanische Ansätze basieren auf der Euler Formulierung, die die Annahme linearer Kinematik nicht erfordert, allerdings erweist sich die Interpretation und Definition geeigneter Dehnungsmaße für elastisches Materialverhalten als nicht trivial. Für Fluide werden überwiegend viskose Materialgesetze zugrunde gelegt, die elastischen Effekte nicht berücksichtigen. Die Schubspannungen im viskosen Material hängen vom lokalen Geschwindigkeitsgradienten (Scherrate)  $\dot{\epsilon}$  [ $1/T$ ] und der Viskosität  $\mu$  [ $L^2/T$ ] ab (vgl. Bild 1).

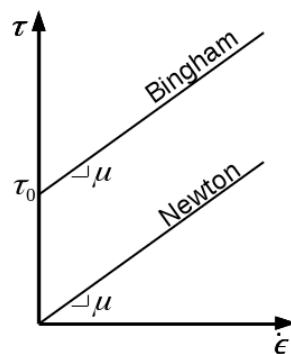


Bild 1: Schematische Darstellung von zwei viskosen Stoffgesetzen

Die vorliegenden Untersuchungen gehen von der Annahme aus, dass elastische Dehnungen und daraus resultierende Spannungen keinen Einfluss auf die aus horizontalen Bodenverschiebungen resultierenden Pfahlbelastungen in weichen, bindigen Böden haben. Diese Annahme ist nicht völlig neu und wird auch in der für die Berechnung der Pfahlbelastungen üblichen Plastizitätstheorie genutzt. Das viskose Materialverhalten wird hier durch einen empirischen Zusammenhang zwischen der undrainierten Kohäsion  $c_u$  [ $F/L^2$ ] und einer vorab festzulegenden, maßgebenden Scherrate berücksichtigt (Leinenkugel, 1976). Messtechnisch wirft die Bestimmung der maßgebenden Scherrate Probleme auf, da in situ Scherraten kaum zu ermitteln oder abzuschätzen sind. Um dieser Problematik zu entgehen wird in der hier beschriebenen Untersuchung ein fluid-mechanischer, visko-plastischer Ansatz eingesetzt, der viskoses Materialverhalten inhärent beinhaltet. Als Materialmodell für Scherverformungen wird das

Bingham-Fluid-Modell genutzt. Darin verhält sich ein Material starr gegen Schubspannung bis eine Grenzscherubspannung  $\tau_0$  [F/L<sup>2</sup>] erreicht ist (siehe Bild 1).

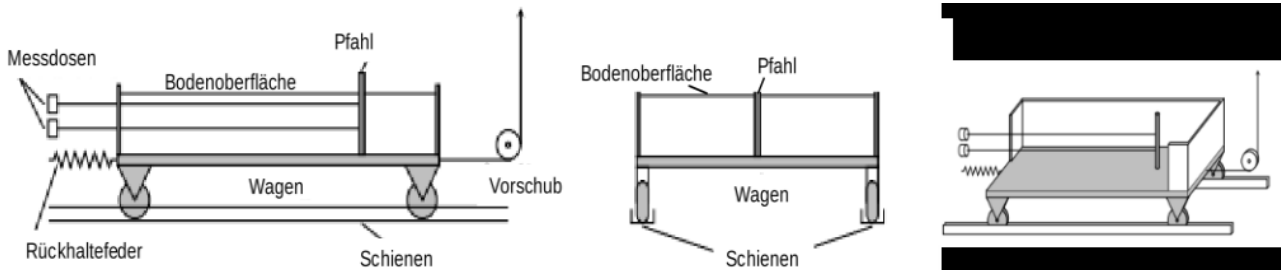


Bild 2: Schematische Darstellung der Modellversuche nach Bauer (2016)

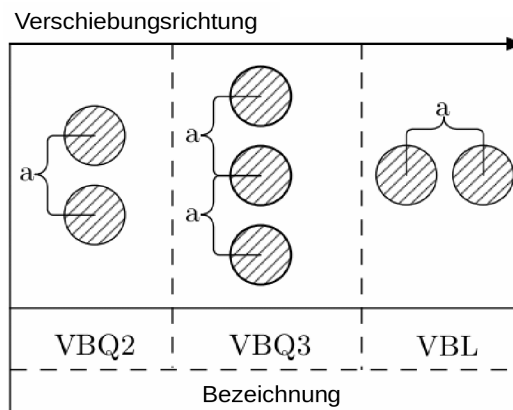


Bild 3: Anordnungen und Bezeichnungen der Pfahlreihenversuche

Mit Überschreiten der Grenzscherubspannung  $\tau_0$  ändert sich das Materialverhalten entsprechend eines newtonischen Fluides, und man spricht von einer Plastifizierung des Materials. Da in der Fluidmechanik die Grenzscherubspannung bei  $\dot{\epsilon} = 0$  definiert ist, ist eine allgemeine Zuordnung zur undrainierten Kohäsion  $c_u$  nicht möglich. In der fluid-mechanischen Sichtweise entspricht der Wert der undrainierten Kohäsion der Schubspannung bei einer für die untersuchte Fragestellung festzulegenden Scherrate.

In der vorliegenden Untersuchung werden Modellversuche zur Pfahlbelastung in bindigen Böden (Bauer, 2016) auf Grundlage eines fluid-mechanischen Ansatzes basierend auf der Finiten-Volumen-Methode modelliert. Die Ergebnisse werden mit bodenmechanischen Berechnungen auf Grundlage der Finiten-Elemente-Methode (FE) unter Ansatz eines elasto-plastischen (Mohr-Coulomb) Materialgesetzes (Bauer, 2016) verglichen.

## Modellversuche

Bauer (2016) untersuchte Pfahlbelastungen in weichen, bindigen Böden mittels Modellversuchen, bei welchen die Pfähle durch zylindrische Aluminium-Profile repräsentiert werden. An Kraftmessdosen befestigte Stahlseile fixieren die Pfähle im Raum (vgl. Bild 2). Anschließend werden die Pfähle in einen

auf Schienen stehenden Wagen gesetzt. Der Einbau des Bodens erfolgt mit Kaolin mit unterschiedlichen Wassergehalten. Die seitlichen Wände des Wagens halten den Boden in horizontale Richtung. Der obere Rand des Bodens ist frei verformbar. Durch Verschieben des Wagens auf den Schienen werden relative Verschiebungen des Bodens gegenüber den Pfählen aufgezwungen, was eine Beanspruchung der Pfähle infolge horizontaler Kräfte zur Folge hat. Neben Einzel-Pfählen, wie in Bild 2 dargestellt, wurden auch Pfahlreihen in drei Anordnungen (vgl. Bild 3) untersucht.

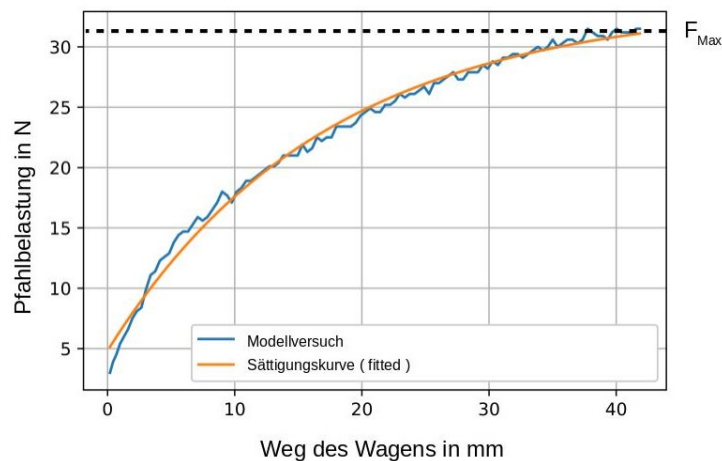


Bild 4: Pfahlbelastungen aufgetragen über den Verschiebungsweg des Wagens

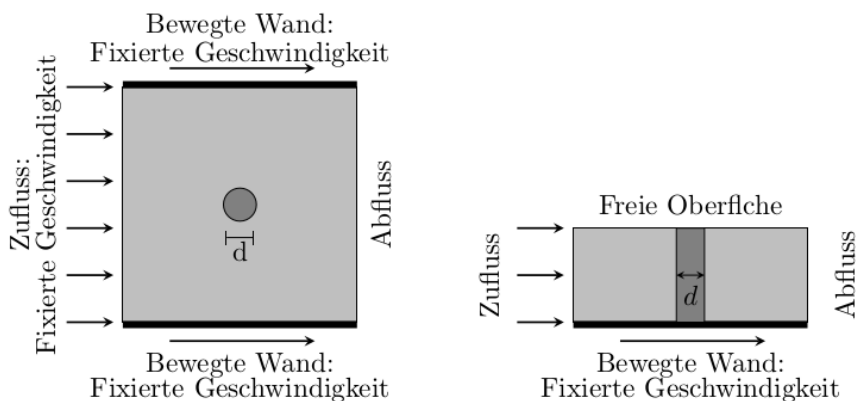


Bild 5: Berechnungsgebiet und Randbedingungen der numerischen Untersuchungen in openFOAM

Die Kraftmessungen wurden über die Verschiebung des Wagens aufgezeichnet. Dabei folgen die Pfahlkräfte Kurven, die maximale Werte für die Pfahlbelastungen  $F_{Max}$  der jeweiligen Versuche aufzeigen (vgl. Bild 4).

Neben den Kräften wurden ebenfalls Verschiebungsfelder auf der Oberfläche des Bodens mittels PIV (Particle Image Velocimetry) aufgezeichnet und anschließend qualitativ ausgewertet. Dabei konnte erwartungsgemäß eine Bodenverschiebung ähnlich einer Umströmung der Einzel-Pfähle beobachtet werden. Der Boden zwischen den Pfählen in Pfahlreihen-Versuchen blieb unbewegt. Bei den Versuchen mit Reihen quer zur Verschiebungsrichtung führte dies zu einem Aufstauen von Boden vor den Pfählen.

## Fluid-mechanisches Modell

Für die numerische Abbildung der Modellversuche wird ein rechteckiges, 3-dimensionales Gebiet betrachtet. In der Mitte befindet sich ein zylindrischer Ausschnitt für Einzelpfähle (siehe Bild 5) bzw. zylindrische Ausschnitte, die Pfahlreihen repräsentieren. Da das Materialverhalten im Bingham-Modell ausschließlich von der Scherrate (Geschwindigkeitsgradient) abhängig ist, stellen sich Massen- und Impulsbilanz als Differentialgleichungen mit Geschwindigkeit und Druck als Hauptvariablen dar. Diese Gleichungen sind Verallgemeinerungen der Transportgleichungen für newtonische Fluide (Navier-Stokes-Gleichungen). Die Diskretisierung erfolgte mit der in der Fluid-Mechanik bevorzugten Finiten-Volumen-Methode.

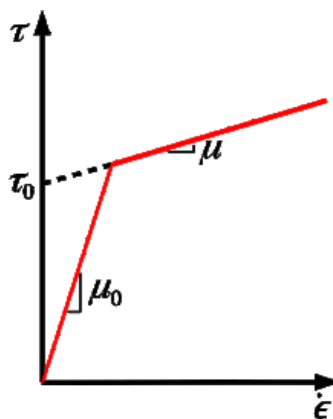


Bild 6: Bi-viskoses Modell (rot) als Annäherung an das Bingham-Modell (schwarz)

Diese nutzt standardmäßig Gitter, die raumfest und damit gemäß der Euler Sichtweise definiert sind. Die Untersuchungen erfolgten mit der Finite-Volumen-Plattform openFOAM v6 (open-source Field Manipulations And Operations).

Da im klassischen Bingham-Modell die Schubspannungen vor Erreichen der Grenzscherbspannung unbestimmt sind, wird das Materialmodell durch ein sogenanntes bi-viskose Modell beschrieben. Hierbei wird der problematische Bereich kleiner Scherraten (s. Bild 2) durch einen zweiten viskosen Übergang ersetzt (vgl. Bild 6). Das Modell nähert sich asymptotisch dem Bingham Modell mit zunehmender Viskosität  $\mu_0$  an. Das bi-viskose Modell gestattet eine einheitliche Auswertung der Schubspannungen unter Berücksichtigung von  $\mu_0$  und  $\mu$  über den gesamten Bereich möglicher Scherraten.

Um die Materialparameter  $\tau_0$ ,  $\mu_0$  und  $\mu$  für das verwendete bi-viskose Modell für den in den Modellversuchen verwendeten Kaolin abzuleiten, wurden Versuchsdaten aus Viskometer-Versuchen am selben Tonmineral von Boukpeti et al. (2009) verwendet. Da das verwendete Kaolin eine sehr geringe Durchlässigkeit besitzt und die Verformungsgeschwindigkeiten im Modellversuch im Bezug zu dieser als schnell angesehen werden können, wird der Boden als undrainiert und damit inkompressibel betrachtet. Die hohen Viskositäten, die sich für den betrachteten Boden ergeben, führen in der Finiten-Volumen Diskretisierung dazu, dass das sogenannte viskose Stabilitätskriterium maßgebend wird. Aus diesem ergibt sich ein sehr kleiner Zeitschritt ( $\sim 10^{-9}$ s) und letztendlich ein enormer numerischer Aufwand. Das gewählte iterative Verfahren (PIMPLE) der openFOAM-Plattform nutzt deshalb zur Lösung der gekoppelten Differenzialgleichungen (Hauptvariablen Druck und Geschwindigkeit) eine weitere innere Iteration über sogenannte Korrekturterme, was den maximalen zulässigen Zeitschritt er-

heblich vergrößert ( $\sim 0,1s$ ). Die räumliche Diskretisierung des Berechnungsgebiets erfolgt mit einem unstrukturierten Gitter, um eine möglichen Ausrichtung eventueller Gleitfugen zu vermeiden. Der freie Rand an der Oberfläche wird durch eine Randbedingung auf das Druckfeld approximiert.

## Ergebnisse

Die Beurteilung des hier verwendeten visko-plastischen Ansatzes erfolgt über eine Gegenüberstellung der berechneten maximalen Pfahlbelastungen auf Einzelpfähle und Pfähle in Pfahlreihen (s. Bild 4) mit den Messungen von Bauer (2016) und den elasto-plastischen FE Untersuchungen von Bauer (2016). Die berechneten Verschiebungen werden mit den PIV-Messungen qualitativ verglichen.

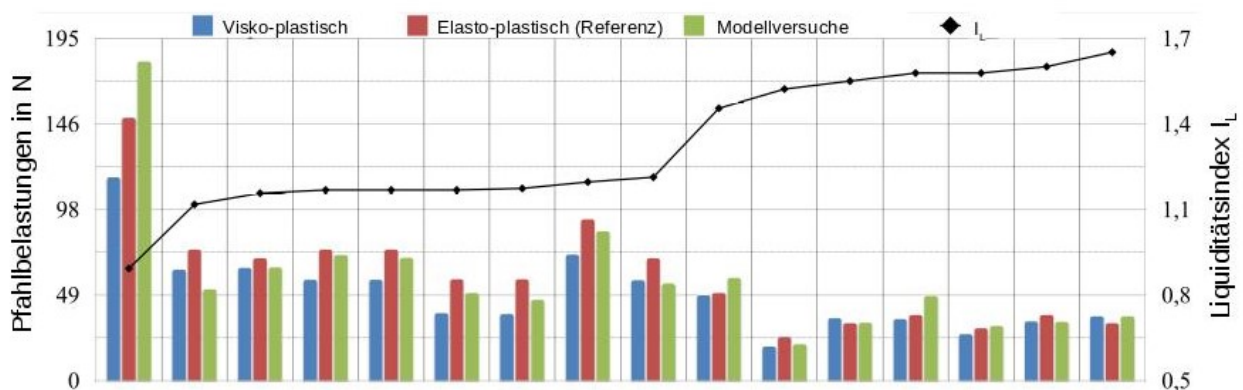


Bild 7: Resultierende maximale Pfahlbelastungen aus Bodenverschiebungen nach visko-plastischen Berechnungen, elasto-plastischen Berechnungen und den Modellversuchen

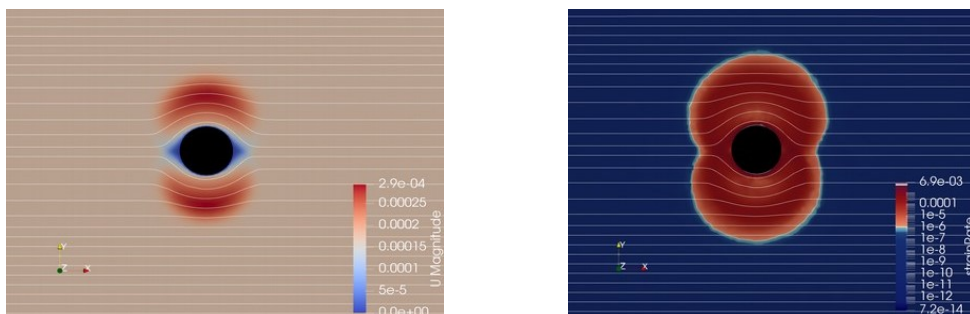


Bild 8: Norm der Geschwindigkeit (links) und Scherraten (rechts) eines Einzelpfahl-Versuchs

Die mittels visko-plastischen Ansatz berechneten Pfahlbelastungen von Einzelpfählen zeigen gute Übereinstimmung mit den Messungen der Modellversuche und insbesondere mit den Belastungen resultierend aus den bodenmechanischen Berechnungen mit elasto-plastischem Stoffgesetz. Bild 7 stellt die maximalen Pfahlbelastungen auf die Pfähle der untersuchten Modellversuche gegenüber. Der rechten Ordinate ist der Liquiditätsindex  $I_L$  ( $=1$ -Konsistenzzahl  $I_c$ ) der einzelnen Versuche zu entnehmen. Die Übereinstimmung nimmt mit abnehmendem Liquiditätsindex der Bodenprobe ab. Eine Erklärung hierfür ist, dass plastische Böden ( $I_L < 1$ ) unterhalb der Grenzschubspannung von elastischen Materialverhalten beeinflusst werden und die Annahme rein visko-plastischen Verhaltens für solche Böden unzureichend ist. Über alle untersuchten Modellversuche liefert der visko-plastische Ansatz sehr gute Werte für die maximalen Pfahlbelastungen mit einem mittleren Fehler (mean absolute per-

centage error) von 13% bezogen auf die Messungen. Der visko-plastische Ansatz erreicht damit eine Vorhersagezuverlässigkeit, die vergleichbar mit den elasto-plastischen Referenzuntersuchungen von Bauer (2016) ist. Der mittlere Fehler betrug hier ca. 15%. Die in den Modellversuchen beobachtete Umströmung der Einzelpfähle kann vom visko-plastischen Modell abgebildet werden. In Bild 8 (rechts) zeigt die Scherraten im Nahbereich eines Pfahls, wobei die Skalierung eine Plastifizierung des Bodens in rot anzeigt. Bild 8 (links) zeigt das Umfließen anhand des Betrags des Geschwindigkeitsfeldes. In beiden Abbildungen sind die dazugehörigen Stromlinien weiß dargestellt.

Pfähle, die Bodenbewegungen in der Nähe anderer Pfähle ausgesetzt sind, beeinflussen sich wechselseitig sowohl in beiden Modellvarianten (visko- und elasto-plastisch) als auch in den Modellversuchen.

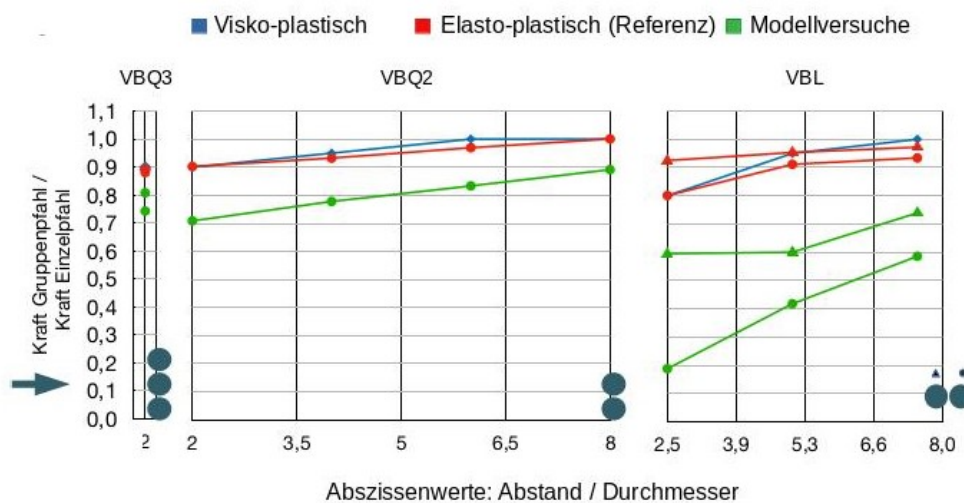


Bild 9: Pfahlbelastungen der Pfähle in Reihen über den Abstand der Pfähle (Anordnungen gemäß Bild 3)

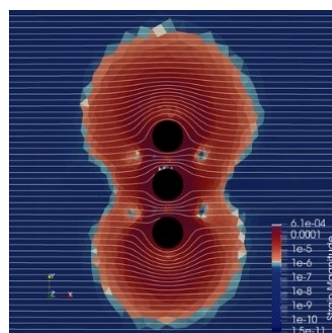


Bild 10: Scherraten eines Pfahlreihen-Versuchs

Die resultierende Pfahlbelastung auf den einzelnen Pfahl einer Pfahlreihe liegt dabei stets unterhalb der Belastungen auf einen Einzelpfahl bzw. Pfahl mit sehr großem Abstand zu weiteren Pfählen. Bild 9 zeigt die Belastungen auf einen Pfahl der Pfahlreihe normiert durch die Belastung eines äquivalenten Einzelpfahls. Dabei wurde der Abstand zwischen den Pfählen der Reihe variiert. Es zeigt sich, dass die Wechselwirkung mit abnehmendem Abstand größer wird. Dabei stimmen visko-plastisches und elasto-plastisches Materialgesetz gut überein, während die Modellversuche eine stärkere Interaktion zwischen den Pfählen aufzeigen.

Die Experimente an Pfahlreihen zeigten ein Verhalten auf das sich mit dem visko-plastischen Ansatz in vorgestellter Form nicht abbilden lässt. Bild 10 zeigt exemplarisch einen Versuch der Anordnung VQL3. Die Stromlinien zeigen, dass sich das Material nach dem visko-plastischen Ansatz nicht vor der Pfahlreihe aufstaut wie in den Modellversuchen beobachtet. Das Material fließt bei der visko-plastischen Beschreibung mit erhöhter Geschwindigkeit durch die Lücken zwischen den Pfählen, wobei die Oberfläche weitgehend unverändert bleibt. Für ein inkompressibles Material ist dieses Verhalten durchaus physikalisch begründet. Bei Berücksichtigung von Kompressibilität (als Folge von Gaseinschlüssen im Boden) kommt es darauf an, ob die Verformung der Oberfläche energetisch günstiger ist als die Erhöhung der Scherraten zwischen den Pfählen (Prinzip des kleinsten Zwanges). Darüber hinaus lässt sich bei Berücksichtigung der Kompressibilität das instationäre Verhalten abbilden und somit der zeitlicher Verlauf der Pfahlbelastung (s. Bild 4) darstellen. Im derzeit verwendeten inkompressiblen visko-plastischen Ansatz erfährt der Pfahl mit Beginn der Verformung die maximale Beanspruchung, da das inkompressible Modell den stationären Endzustand berechnet.

## Fazit

Im vorliegenden Beitrag wird die prinzipielle Eignung eines fluid-mechanischen Ansatzes, der auf einem modifizierten, visko-plastischen Bingham-Material Modell basiert, zur Berechnung der Pfahlbelastungen aus horizontalen Bodenverschiebungen in weichem bindigen Boden untersucht. Zur Bewertung des Ansatzes dienen Modellversuche sowie Finite-Elemente Berechnungen (Mohr-Coulomb) von Bauer (2016). Die fluid-mechanischen Berechnungen ergaben eine gute Übereinstimmung mit den Modellversuchen, wobei die Vorhersagegenauigkeit der im Versuch gemessenen Pfahlbelastungen mit dem Liquiditätsindex  $I_L$  des für den jeweiligen Versuch aufbereiteten Kaolins korreliert. Je höher der Liquiditätsindex, umso mehr dominiert das viskose Materialverhalten und umso besser die Übereinstimmung zwischen Messungen im Versuch und Berechnungen. In gesamter Betrachtung der Versuchsreihe liefert der fluid-mechanische Ansatz eine mit den bodenmechanischen Berechnungen von Bauer (2016) vergleichbare Vorhersagezuverlässigkeit.

Die in den Modellversuchen beobachtete Umströmung von Einzelpfählen wird im fluid-mechanischen Ansatz gut reproduziert. Allerdings kann der im Versuch beobachtete Aufstau des Materials vor Pfahlgruppen mit dem fluid-mechanischen Ansatz nicht korrekt abgebildet werden. Ferner berechnet das hier verwendete Modell eine stationäre Strömung und ist daher nicht in der Lage, den Anstieg der Pfahlbeanspruchung mit der Zeit abzubilden. Um diese „Modellfehler“ zu beheben, ist eine Modell-erweiterung hin zu einem transienten Modell erforderlich, das in der Lage ist, Kompressibilität des Materials zu berücksichtigen. Kompressionseffekte würden sich insbesondere aus dem Vorhandensein von Gaseinschlüssen im Boden ergeben. Bei aufbereitetem Boden, wie das in den Modellversuchen verwendete Kaolin, ist eine vollständige Wassersättigung eher unwahrscheinlich. In bodenmechanischen Ansätzen sind aus einer verringerten Kompressionssteifigkeit des Porenfluids (Gaseinschlüsse) resultierenden volumetrischen Dehnungen vernachlässigbar. In fluid-mechanischen Ansätzen haben jedoch Kompressionseffekte einen erheblichen Einfluss und sollten berücksichtigt werden.

Der visko-plastische Ansatz erweist sich in dieser Untersuchung als durchaus vielversprechend, um das Verhalten von weichen, bindigen Böden zu beschreiben. Im Gegensatz zur auf der lagrangeschen Betrachtung basierenden bodenmechanischen Analyse stellen die auftretenden großen Verformungen beim auf der eulerschen Betrachtungsweise basierenden fluidmechanischen Ansatz keine Probleme

dar. Dass die visko-plastischen Modellparameter nicht von der Schergeschwindigkeit abhängen, untermauert die physikalische Konsistenz solcher rheologischer Ansätze für weiche, bindige Böden. In bodenmechanischen Ansätzen muss dagegen eine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Scherfestigkeit berücksichtigt werden (Leinenkugel, 1976). Nicht zuletzt von Bedeutung: Die für das Bingham-Modell benötigten Parameter sind physikalisch begründet und entweder aus Messungen (Viskosimeterversuch oder Messungen mit Flügelsonden) oder über Korrelationsbeziehungen zum Liquiditätsindex vergleichsweise einfach zu bestimmen.

## Literatur

- Bauer, Jörg (2016): Seitendruck auf Pfahlgründungen in bindigen Böden infolge quer zur Pfahlachse wirkender Bodenverschiebungen. Kassel: Schriftenreihe Geotechnik der Universität Kassel, Heft 26.
- Boukpeti, Nathalie; White, David; Randolph, Mark; Low, Han Eng (2009): Characterization of the Solid-Fluid Transition of Fine-Grained Sediments. In: Proceedings of the ASME 2009 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Offshore Geotechnics; Petroleum Technology, Buch 7.
- Leinenkugel, H. J. (1976): Deformations- und Festigkeitsverhalten bindiger Erdstoffe. Experimentelle Ergebnisse und ihre physikalische Bedeutung. Karlsruhe: Institut für Boden- und Felsmechanik der Universität Fridericiana, Heft 66.
- Wenz, W. P. (1963): Über die Größe des Seitendrucks auf Pfähle in bindigen Erdstoffen. Karlsruhe: Veröffentlichungen des Instituts für Boden- und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 12.