
Beurteilung der Verflüssigungsneigung grobkörniger Böden

Božana Bačić, Ivo Herle

Technische Universität Dresden, Institut für Geotechnik, Professur für Bodenmechanik und Grundbau

Laboruntersuchungen zur Bodenverflüssigung wurden meist mittels undrainierter zyklischer Triaxialversuche durchgeführt. Diese sind kompliziert und zeitaufwendig. Der Probeneinbau und die zuverlässige Erfassung von Messgrößen stellen sehr hohe Anforderungen dar, die nur wenige Labore erfüllen können. Das Ziel dieser Forschung ist die Beurteilung des Verflüssigungspotentials grobkörniger Böden anhand einer einfachen Methode. Diese Methode ermöglicht einen schnellen Probeneinbau und eine anschließende Untersuchung des Porenwasserdruckaufbaus während zyklischer Scherung innerhalb kurzer Zeit. Das neue experimentelle Verfahren wurde in ersten Versuchen validiert, welche den Aufbau des Porenwasserdrucks und Reproduzierbarkeit bestätigt haben. Es wurde bestätigt, dass der Aufbau des Porenwasserdrucks von der Anfangsdichte abhängt. Beim Vergleich verschiedener Böden wird gezeigt, dass das Verflüssigungspotential von den granulometrischen Eigenschaften des Bodens (z.B. Korngrößenverteilung) abhängig ist. Ziel der weiteren Untersuchungen ist es, die Neigung zur Verflüssigung zu bewerten und auf unterschiedliche granulometrische Eigenschaften zu beziehen.

1 Einleitung

Das mechanische Verhalten sandiger Böden ist insbesondere von Druck und Lagerungsdichte abhängig. Lockere Böden werden infolge einer Scherbeanspruchung verdichtet während in den dichten Böden eine Auflockerung entsteht. Die Verdichtung wassergesättigter, lockerer Böden kann nur durch das Ausdrücken des Porenwassers stattfinden. In Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit und der Bodendurchlässigkeit entstehen Porenwasserüberdrücke bzw. -unterdrücke. Diese können den Betrag der effektiven Spannungen bei gleich bleibenden totalen Spannungen verändern. Da die Steifigkeit des Bodens von den effektiven Spannungen abhängig ist, kann sie von den entstandenen Porenwasserdrücken beeinflusst werden. Wenn die effek-

tive Spannungen (Korn-zu-Korn-Spannungen) sehr gering werden, weist der Boden keine Steifigkeit mehr auf und verhält sich wie eine Flüssigkeit. Man spricht von einer Bodenverflüssigung. Die höchste Neigung zur Verflüssigung haben sandige und rundkörnige Böden ([BAS⁺11]). Dabei können sehr große Bodenbewegungen entstehen, die durch katastrophale Auswirkungen auf die Infrastruktur und Menschen begleitet werden ([Ham14]).

Laboruntersuchungen der Tendenz zur Bodenverflüssigung werden üblicherweise mittels zyklischer Triaxialversuche durchgeführt ([Kra96], [Ish93], [Cas69], [IY72]). Die Untersuchungen in Triaxialversuchen sind aufwendig und langwierig. Der Probeneinbau und die zuverlässige Erfassung von Messgrößen stellen sehr hohe Anforderungen dar, die nur wenige spezialisierte Labore erfüllen können. Darüber hinaus lassen sich manche Einflussfaktoren in Triaxialversuchen kaum bzw. nur in Spezialfällen untersuchen. Es ist bisher kaum möglich die Verflüssigungsneigung verschiedener Sande schnell zu überprüfen und für unterschiedliche Zustände miteinander zu vergleichen.

Ein Verfahren zur schnellen und einfachen Untersuchung der Verflüssigungsneigung wurde am Institut für Geotechnik der Technischen Universität Dresden entwickelt. Von den ursprünglichen Modellversuchen ist eine Art Identifikationsversuch entstanden. Es wurden mehrere Änderungen des ersten Versuchsstandes ([SH14], [HS14]) vorgenommen und dieser ist immer noch in der Entwicklung. Dabei ist im Vergleich zum Triaxialversuch ein einfacherer Versuchsaufbau vorhanden. Die Herstellung der Bodenproben ist relativ unempfindlich. Gleichzeitig werden die Versuchsergebnisse schnell geliefert. Bei dem Versuch wird ein lockeres, wassergesättigtes Bodenvolumen in eine Membran eingebaut. Nach Erhöhung der effektiven Spannungen durch Unterdruck, wird die Probe in horizontaler Richtung zyklisch beansprucht. Um den Aufbau der Porenwasserdrücke zu ermöglichen, wird der Versuch in undrainierten Bedingungen durchgeführt. Während des Versuchs werden die Porenwasserdrücke gemessen und anschließend ausgewertet.

In einer ersten Versuchsreihe wurde ein Boden mit verschiedenen Anfangsdichten untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Verflüssigungsneigung von der Dichte des Bodens abhängt. Eine wichtige Rolle bei der Verflüssigungsneigung spielt die Bodenstruktur ([MSC⁺77]). Beim Vergleich verschiedener Böden wurde gezeigt, dass das Verflüssigungspotential von der durch den Einbau erzeugten Bodenstruktur abhängt.

Das neue Verfahren soll seine Anwendung als ein Identifikationsversuch in der schnellen Beurteilung des Verflüssigungspotentials finden. Es ist zu erwarten, dass die weiteren Versuche eine starke Abhängigkeit des Verflüssigungspotentials von granulometrischen Eigenschaften wie Korngröße und -form zeigen. Somit sollte auch möglich sein, anhand der Versuchsergebnisse auf die Korneigenschaften schließen zu können.

2 Identifikationsversuche

2.1 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau des Identifikationsversuchs kann Abbildung 1 entnommen werden. Der Stand mit der Bodenprobe ist auf eine Waage gesetzt, um die Masse des Wassers in der Probe zu bestimmen. Diese Masse wird bei der Auswertung für die Bestimmung des Wassergehaltes und des Sättigungsgrades verwendet.

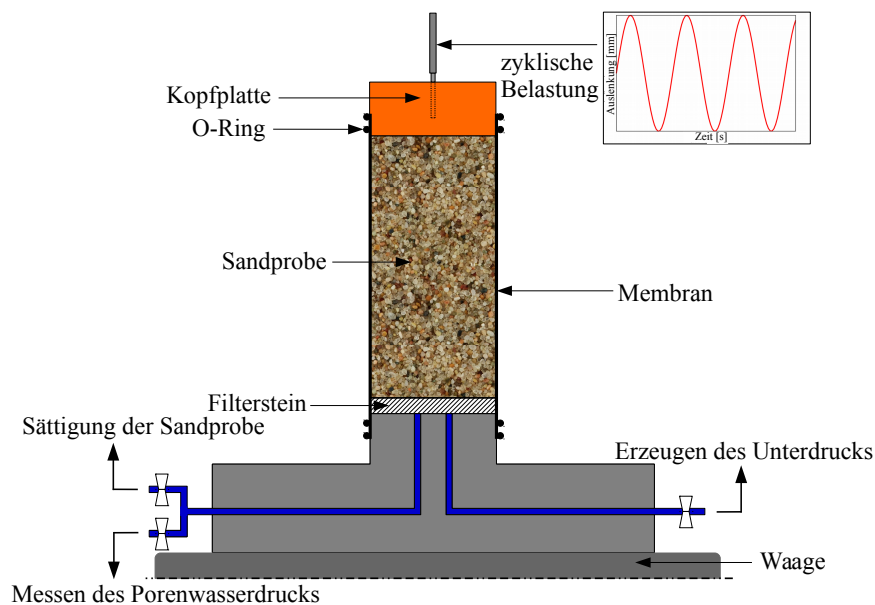


Abbildung 1: Skizze des Versuchsaufbaus im Identifikationsversuch

Im ersten Schritt wird die Bodenprobe mit einem Trichter im lockeren Zustand in eine Membran eingebaut. Anschließend erfolgt eine langsame Sättigung der Bodenprobe von unten nach oben. Danach wird ein Unterdruck (negativer Porenwasserdruck) durch das Saugen des Wassers in der Probe angelegt. Die äußere Belastung (totale Spannung - p) entspricht in diesem Fall dem relativen Luftdruck. Da die totale Spannung gleich Null ist, wird der Betrag der effektiven Spannung (p') um den Wert des negativen Porenwasserdrucks (u) erhöht. Die erhöhte effektive Spannung (Druckspannung positiv) kann analog zu Gleichung 1 bestimmt werden.

$$p = p' + u = 0 \text{ kPa} \quad \rightarrow \quad p' = -u > 0 \text{ kPa} \quad (1)$$

Letztlich wird die Probe unter undrainierten Bedingungen am Kopf in der horizontalen Richtung zyklisch belastet. Somit entsteht eine direkte Scherbelastung. Diese zyklische Belastung erfolgt unter einer definierten Frequenz und Belastungsamplitude. Die Beanspruchung der Probe ist mechanisch und erfolgt durch einen Elektromotor. Die Art der Belastungseinrichtung entspricht dem Mechanismus einer Schubkurbel. Dabei wird eine Drehbewegung in eine Schubbewegung umgeformt. Dadurch ist die konstante Belastungsamplitude gesichert. Die Verschiebungen werden berührungslos mittels eines Lasers gemessen.

Der Kontakt zwischen der Kopfplatte der Bodenprobe und der Belastungseinheit wird mithilfe eines Elektromagneten hergestellt. Die Kopfplatte ist durch eine geschliffene Ankerplatte mit dem Elektromagnet verbunden. Um die Messung der Probensetzung zu ermöglichen, wurde ein Lineallager aus Kunststoff in die Kopfplatte eingebaut. Die Ankerplatte wird in den Lineallager spielfrei eingeführt. Während des Versuchs werden der ansteigende Porenwasserdruck in der Probe und der Luftdruck gemessen und ausgewertet.

2.2 Versuchsböden

Für die ersten Versuche zur Untersuchung der Verflüssigungsneigung wurden vier verschiedene fein- bis grobkörnige Sande ausgewählt. Die Korngrößenverteilungen der verwendeten Sande sind in Abbildung 2 dargestellt.

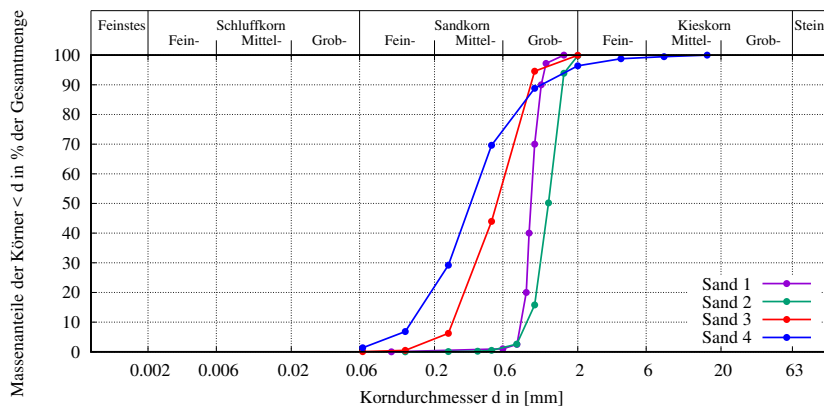


Abbildung 2: Korngrößenverteilung der in den Identifikationsversuchen verwendeten Sande

Alle Sande sind enggestuft klassifiziert ($C_u < 6$). Sand 1 und Sand 2 haben sehr ähnliche Korngrößenverteilungen und beide können als grobkörnige Sande bezeichnet werden. Sand 2 ist etwas grobkörniger als Sand 1. Dies kann aus der KGV Kurve

entnommen werden und wurde mit dem höheren Schüttwinkel beim Sand 2 bestätigt. Aus diesem Grund wird das ähnliche Verhalten dieser Sande beim Versuch erwartet. Sand 3 und Sand 4 sind mittelkörnige Sande. Beim Sand 4 sind in kleinen Mengen Kieskörner vorhanden was auch durch höheren Schüttwinkel beim Sand 4 bestätigt wird. Bei diesem Sand ist wichtig zu erwähnen, dass die Körner mit $d > 4,0$ mm, aus technischen Gründen nicht eingebaut wurden.

Für diese Sande wurde die Bestimmung der Kornform für die Fraktionen $0,5 \text{ mm} \leq d \leq 1,0 \text{ mm}$ und $1,0 \text{ mm} \leq d \leq 2,0 \text{ mm}$ durchgeführt. Die gescannte Bilder von den Körnern wurden mit der Software *ImageJ* ausgewertet. Die bestimmte Kornform ist durch Rundungskoeffizient *RK* (eng. *circularity*) dargestellt. Rundungskoeffizient hat den Wert Null für zunehmend längliche Körner und den Wert Eins für den perfekten Kreis. Weitere Parameter der untersuchten Sand sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Parameter der in den Identifikationsversuchen verwendeten Sande

Sand	φ [°]	e_{min} [-]	e_{max} [-]	ρ_s [-]	RK [-]
1	30,00	0,579	0,865	2,650	0,77
2	34,13	0,622	0,918	2,636	0,75
3	32,68	0,417	0,713	2,639	0,81
4	35,11	0,412	0,921	2,643	0,77

2.3 Ergebnisse und Auswertung

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wurde die Anzahl der Zyklen (N) betrachtet, welche für die Abnahme der effektiven Spannung um 20 kPa nötig ist. Nach der Feststellung der Reproduzierbarkeit der Versuche wurden zwei Einflüsse auf Bodenverflüssigung untersucht: Einbaudichte und die durch Probeneinbau erzeugte Bodenstruktur.

In der ersten Versuchsreihe wurden die Versuchsbedingungen konstant gehalten, um vergleichbare Ergebnisse zu bekommen. Dazu zählen Frequenz (f) und Amplitude (A) bei der Probenbelastung, effektive Spannung zum Versuchsbeginn (p'_0) und -ende (p'_E), Dicke der Membran (D_m) sowie die Probengeometrie (D, H).

In ersten Versuchen wurden die Bodenproben bei der niedrigen effektiven Spannung untersucht ($p'_0 = 30$ kPa). Jeder Versuch wurde bei der effektiven Spannung von $p'_E = 10$ kPa beendet. Die Frequenz der Probenbelastung wurde mit 1 Hz gewählt. Es wurde davon ausgegangen, dass die Trägheitseffekte, welche bei dieser Frequenz auftreten, vernachlässigbar sind. Dieser Einfluss der Frequenz wird durch zukünftige Untersuchungen detaillierter überprüft. Aufgrund der niedrigen Frequenz werden die Proben quasi-statisch und nicht dynamisch beansprucht ([Wic05]). Durch die quasi-statische Belastung der Bodenproben sind die Verflüssigungseffekte besser erkennbar und vergleichbar. Eine Amplitude von $4,6 \text{ mm} \pm 2\%$ wurde für die Versuche gewählt. Da es

sich im Versuch um eine niedrige effektive Spannung handelt, ist der Einfluss der Steifigkeit der Membran nicht zu vernachlässigen. Um diesen Einfluss gleich zu halten, wurden alle Versuche mit Membranen der gleichen Stärke durchgeführt. Die Geometrie der untersuchten Bodenproben wurde konstant gehalten in allen Versuchen und betrug $D/H = 50,0/100,0$ mm.

Die Versuchsbedingungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Bedingungen in Identifikationsversuchen

Versuchs- bedingung	σ'_0 [kPa]	σ'_E [kPa]	f [Hz]	A [mm]	D_m [mm]	D [mm]	H [mm]
	30,0	10,0	1,0	$4,6 \pm 2\%$	0,3	50,0	100,0

Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

In Abbildung 3 sind die in den Identifikationsversuchen gemessenen Porenwasserdrücke dargestellt. Es wurde die Anzahl der Zyklen betrachtet, welche für die Zunahme des Porenwasserdrucks um 20 kPa benötigt wird. Es zeigt sich, dass die gemessenen Porenwasserdrücke reproduzierbar sind, da immer ähnliche Anzahl der Zyklen für definierte Porenwasserdruckänderungen bestimmt wurde. Anhand der Ergebnisse, kann die Bandbreite bestimmt werden, in welcher die Streuung der Ergebnisse zu berücksichtigen ist. Bei der Betrachtung der gemessenen Porenwasserdrücke bei 50 Zyklen wurde festgestellt, dass die Bandbreite der Ergebnisse bei 10% liegt.

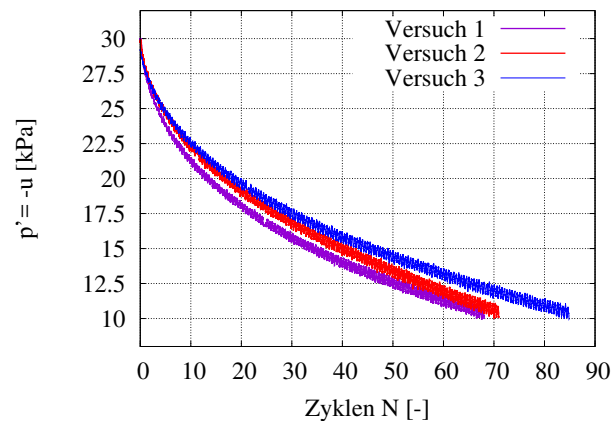


Abbildung 3: Entwicklung des Porenwasserdrucks in Reproduzierbarkeitsversuchen

In Tabelle 3 sind die Lagerungsdichten, Sättigungsgrade und Anzahl der Zyklen in jeweiligen Versuchen zusammengefasst.

Tabelle 3: Lagerungsdichten, Sättigungsgrade und Anzahl der Zyklen in Reproduzierbarkeitsversuchen

Versuch	bezogene Lagerungsdichte I_{D0} [-]	Sättigungsgrad S_r [%]	Anzahl der Zyklen N [-]
1	0,431	91,0	68
2	0,411	89,7	71
3	0,439	88,0	85

Einfluss der Einbaudichte

Die Abhängigkeit des Verflüssigungspotentials von der Einbaudichte wurde am Sand 1 überprüft. Es wurden vier Versuche mit unterschiedlichen Einbaudichten durchgeführt. Da die Verflüssigung in wassergesättigten Böden auftritt, spielt der Sättigungsgrad eine wichtige Rolle bei der Bestimmung des Verflüssigungspotentials. Es wurde eine sehr langsame Sättigungsgeschwindigkeit gewählt um einen hohen Sättigungsgrad zu erreichen. Es wird davon ausgegangen, dass bei $S_r > 80\%$ die Lufteinschlüsse nur als individuelle Gasblasen vorhanden sind, und nicht als eine kontinuierliche Phase ([KTI09]). In jedem Versuch wurde der Sättigungsgrad anhand der gemessenen Masse des Wassers in der Probe bestimmt.

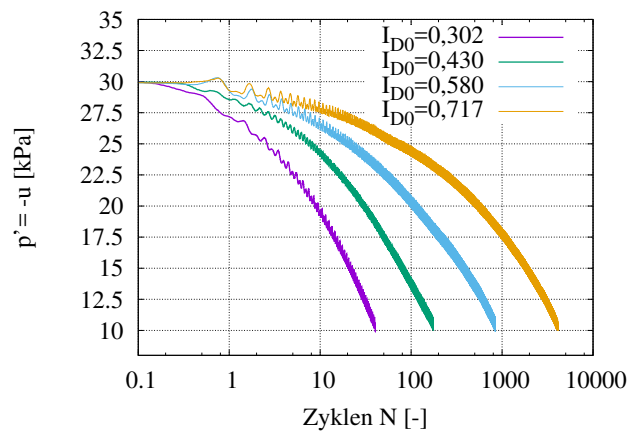


Abbildung 4: Abnahme der effektiven Spannung bei unterschiedlichen Einbaudichten

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse dieser Untersuchung abgebildet. Die dargestellte Zyklen stellen die nötige Zyklen für eine Zunahme des PWDs um 20 kPa dar. Die Versuche zeigen deutlich, dass die Zunahme des Porenwasserdrucks bzw. Abnahme der effektiven Spannung ($u \rightarrow 0, p' \rightarrow 0$) von der Dichte des Bodens abhängt. In Tabelle 4 sind die bezogenen Lagerungsdichten und die Sättigungsgrade zum Versuchsbeginn sowie die Anzahl der Zyklen in den jeweiligen Versuchen dargestellt.

Tabelle 4: Bezogene Lagerungsdichten, Sättigungsgrade und Anzahl der Zyklen in Versuchen am Sand 1

Versuch	bezogene Lagerungsdichte I_{D0} [-]	Sättigungsgrad S_r [%]	Anzahl der Zyklen N [-]
1	0,302	87,3	40
2	0,430	85,7	175
3	0,580	90,1	842
4	0,717	90,6	4089

Die Bodenproben mit den höheren Anfangsdichten mussten mit mehreren Zyklen belastet werden, um den definierten Porenwasserdruck zu erreichen. In Abbildung 5 ist dieser Trend dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der Zyklen mit der zunehmenden Dichte exponentiell steigt.

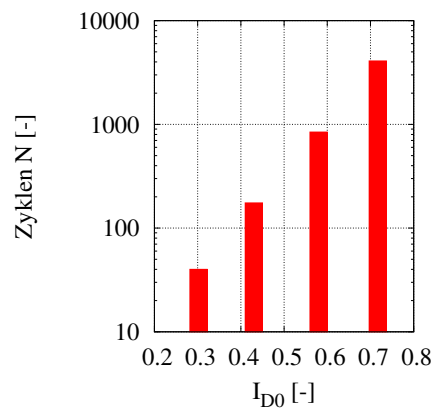


Abbildung 5: Abhängigkeit der nötigen Zyklenanzahl von der Einbaudichte in Identifikationsversuchen

Die Geschwindigkeit mit welcher sich der Porenwasserdruck in der Probe aufbaut, nimmt mit der Zunahme der Dichte des Boden ab. Diese Tendenz ist auch innerhalb eines Versuchs erkennbar. In Abbildung 6 sind die Versuchsergebnisse für die ersten 25 Zyklen dargestellt. In die Betrachtung wurden die ersten 20 Zyklen genommen. Für alle betrachtete Dichten ist festzustellen, dass die Zunahme des Porenwasserdrucks in den ersten fünf Zyklen gleich groß ist, wie in den restlichen 15 Zyklen.

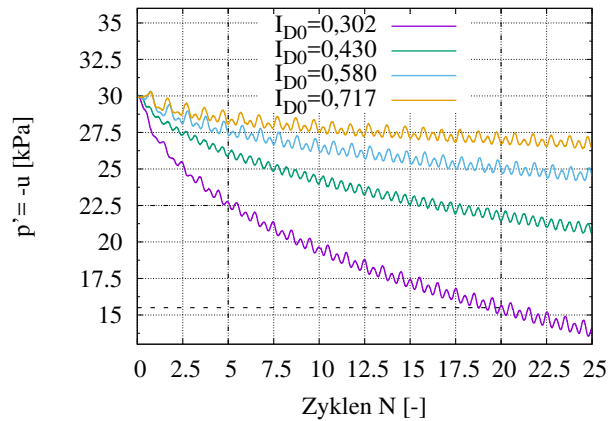


Abbildung 6: Abnahme der effektiven Spannung bei unterschiedlichen Einbaudichten innerhalb der ersten 25 Zyklen

Einfluss der durch den Einbau erzeugten Bodenstruktur

Die beim Einbau erzeugte Bodenstruktur spielt eine wichtige Rolle bei der Neigung zur Bodenverflüssigung ([MSC⁺77]). Unter Bodenstruktur wird die Anordnung der Körner und die Orientierung der Kontaktebenen zwischen den Körnern beim Probeneinbau berücksichtigt. Alle vier getesteten Sande wurden auf gleicher Weise im lockeren Zustand mit einem Trichter in die Membran eingebaut, gesättigt und anschließend zyklisch belastet. So ist es möglich, das Verflüssigungspotential verschiedener Sande mit einer Struktur, die auf gleicher Weise erzeugt ist, zu vergleichen.

In Tabelle 5 sind die Lagerungsdichten und Sättigungsgrade der jeweiligen Sanden dargestellt. Beim Sand 1 und Sand 2 sind ähnliche Lagerungsdichten beim Probeneinbau erreicht worden. Diese Sande besitzen auch ähnliche Korngrößenverteilungen (Abbildung 2). Es kann davon ausgegangen werden, dass die erzeugte Bodenstruktur auch sehr ähnlich ist.

Tabelle 5: Bezogene Lagerungsdichten, Sättigungsgrade und Anzahl der Zyklen in den jeweiligen Versuchen an verschiedenen Sanden

Sand	bezogene Lagerungsdichte I_{D0} [-]	Sättigungsgrad Sr [%]	Anzahl der Zyklen N [-]
1	0,302	87,3	40
2	0,343	86,7	47
3	0,089	83,3	37
4	0,505	77,4	63

Beim Sand 3 ist eine deutlich geringere Lagerungsdichte und etwas niedriger Sättigungsgrad als beim Sand 1 und Sand 2 zu beobachten. Es ist zu erwarten, dass eine sehr lockere Lagerung zu schneller Verflüssigung führt. Auf der anderen Seite, beim Sand 4 ist eine deutlich höhere Lagerungsdichte vorhanden. Hier kann erwartet werden, dass sich der Boden etwas langsamer verflüssigt.

Trotz der erwähnten Unterschiede in der Lagerungsdichten und in der Granulometrie zeigen die Ergebnisse ein ähnliches Verflüssigungspotential bei allen Sanden. In Abbildung 7 ist eine Abnahme des Porenwasserdrucks um 20 kPa und die benötigte Anzahl der Zyklen dargestellt. Offensichtlich ist die durch den (gleichen!) Einbau erzeugte Bodenstruktur für die Verflüssigungsneigung entscheidend. Diese Struktur äußert sich dabei auch durch unterschiedliche Lagerungsdichten.

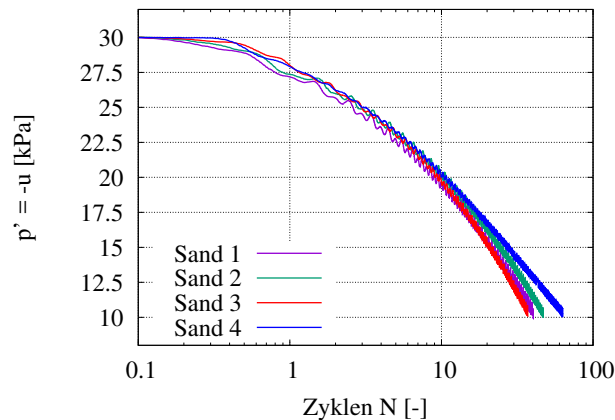


Abbildung 7: Aufbau des Porenwasserdrucks mit Belastungszyklen für verschiedene Sande

3 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der Ergebnisse des neuentwickelten Verfahrens zur Untersuchung der Neigung zur Verflüssigung grobkörniger Böden konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, eine Tendenz zur Bodenverflüssigung über die Porenwasserdrücke infolge einer zyklischen Scherung zu erkennen.

Es wurden Versuche an einem Sand drei mal wiederholt, um die Versuchsreproduzierbarkeit zu überprüfen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Versuche reproduzierbar sind. Vier Versuche an einem Sand mit unterschiedlichen Lagerungsdichten zum Versuchsbeginn haben bewiesen, dass die Verflüssigungsneigung von der Dichte des Bodens abhängt. Untersuchung von verschiedenen Böden, die gleich eingebaut,

gesättigt und belastet wurden, zeigten, dass durch den Einbau erzeugte Bodenstruktur einen maßgebenden Einfluss auf die Verflüssigungsneigung hat.

Das neue Verfahren ermöglicht, die Verflüssigungsneigung unter verschiedenen Bedingungen schnell zu überprüfen. Es kann nicht nur der Spannungszustand variiert werden, sondern auch die durch den Bodeneinbau erzeugte Bodenstruktur. In den zukünftigen Untersuchungen werden anderen Einflussfaktoren (z.B effektive Spannung zum Versuchsbeginn, Frequenz und Belastungsamplitude) auf Verflüssigung überprüft.

Es ist geplant ein Verflüssigungsindex (f_l) einzuführen. Der Verflüssigungsindex kann z.B. als Verhältnis der Porenwasserdruckänderung (Δu) zur effektiven Spannung zum Versuchbeginn (p'_0) definiert werden - $f_l = \frac{\Delta u}{p'_0}$. Durch den Vergleich des Verflüssigungsindex für verschiedene Böden soll es möglich sein, die Verflüssigungsneigung verschiedener Böden miteinander zu vergleichen.

Literatur

- [BAS⁺11] BELKHATIR, M ; ARAB, A ; SCHANZ, T ; MISSOUM, H ; DELLA, N: Laboratory study on the liquefaction resistance of sand-silt mixtures: effect of grading characteristics. In: *Granular Matter* 13 (2011), Nr. 5, S. 599–609
- [Cas69] CASTRO, Gonzalo: Liquefaction of sands. In: *Harvard Soil Mechanics Series* 81 (1969), Nr. January 1969, S. 112
- [Ham14] HAMADA, Masanori: *Engineering for Earthquake Disaster Mitigation*. 2014
- [HS14] HERLE, Ivo ; SCHWITEILO, Erik: Bodenverflüssigung als Indexversuch. (2014)
- [Ish93] ISHIHARA, K: Liquefaction and flow failure during earthquakes. In: *Géotechnique* 43 (1993), Nr. 3, S. 351–415
- [IY72] ISHIHARA, Kenji ; YASUDA, Susumu: Sand liquefaction due to irregular excitation. In: *Soils and Foundations* 12 (1972), Nr. 4, S. 65–77
- [Kra96] KRAMER, Steven L.: *Geotechnical Earthquake Engineering*. 1996
- [KTI09] KAMATA, Toshiyuki ; TSUKAMOTO, Yoshimichi ; ISHIHARA, Kenji: Undrained Shear Strength of Partially Saturated Sand in Triaxial Tests. In: *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 42 (2009), Nr. 1, S. 57–62
- [MSC⁺77] MULILIS, J P. ; SEED, H B. ; CHAN, Clarence K. ; MITCHELL, James K. ; ARULANANDAN, Kandiah: *Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction*. 1977

- [SH14] SCHWITEILO, Erik ; HERLE, Ivo: Modell- und Elementversuche zur Bodenverflüssigung. (2014)
- [Wic05] WICHTMANN, Torsten: Explizites Akkumulationsmodell für nichtbindige Böden unter zyklischer Belastung. In: *Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Bochum* 48 (2005), Nr. 3, S. 472–477