

Untersuchungen zum Einfluss des Feinkorngehaltes auf das Verflüssigungspotenzial von sandigen Böden

W. Baille¹, N. Rahemi¹

¹ Lehrstuhl für Bodenmechanik, Grundbau und Umweltgeotechnik, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, <wiebke.baille@rub.de>

KURZFASSUNG

Der Feinkornanteil von Sanden ist einer der Einflussparameter für die Verflüssigungsneigung, welche hier anhand von Kennlinien im Rahmen des critical-state Konzeptes quantifiziert wird. Das durchgeführte Versuchsprogramm umfasste hauptsächlich statische undrainierte triaxiale Kompressionsversuche, ergänzt durch drainierte statische Triaxialversuche. Diese wurden an Hostun Sand, reinem Schluff, und Mischungen aus beiden jeweils in einem Dichtebereich von etwa 28% bis 90% relativer Lagerungsdichte durchgeführt. Die Lage und Funktion des critical-state locus (CSL) unterscheidet sich maßgeblich in den Bereichen ober- und unterhalb eines Grenzfeinkorngehaltes. Jeweils für den Bereich unterhalb und oberhalb des Grenzfeinkorngehaltes wurde eine normalisierte CSL (äquivalente CSL) ermittelt, die es erlaubt, die Verflüssigungsneigung für verschiedene Feinkorngehalte im Gültigkeitsbereich der äquivalenten CSL zu ermitteln.

Schlagerworte: Sand, Nichtplastisches Feinkorn, Verflüssigung, Critical State Line, Undrainiertes Scherverhalten

1 EINLEITUNG

Verflüssigungserscheinungen können sowohl durch seismische Einwirkungen, z.B. Erdbeben, als auch durch andere zyklische und monotone Beanspruchungen hervorgerufen werden. In Deutschland sind die Sicherheit gegen Verflüssigungs- bzw. Setzungsfließerscheinungen insbesondere bei der Wiedernutzbarmachung von Kippen ehemaliger Braunkohletagebaue relevant (Hazen 1918, Ishihara 1993, Röchter & Schanz 2013). Verflüssigung geht mit einer Scherfestigkeitsverminderung infolge Reduzierung der effektiven Spannungen durch eine Porenwasserdruckzunahme einher. Es liegen zumindest temporär undrainierte Randbedingungen vor. Der Feinkorngehalt beeinflusst das undrainierte Scherverhalten von granularen Böden. In der Literatur vorgestellte Ansätze zur Einbeziehung von nichtplastischem Feinkorngehalt in die Ermittlung von adäquaten Zu-

standsparametern beschränkten sich bisher auf Feinkorngehalte bis zu ca. 30% und auf locker gelagerte Proben (Yang et al. 2006, Rahman et al. 2011). Im vorliegenden Beitrag wird anhand von monotonen undrainierten Triaxialversuchen der Einfluss von nichtplastischem Feinkorn (Schluff) auf die Lage der critical state line (CSL) von Hostun Sand untersucht. Neben dem reinen Sand ($f_c = 0$) und dem reinen Schluff ($f_c = 1$) wurden dafür binäre Mischungen aus beiden Komponenten verwendet.

2 UNDRAINIERTES SCHERVERHALTEN

Im monotonen, konsolidiert undrainierten Triaxialversuch lassen sich abhängig von der Lagerungsdichte sowie des initialen Spannungszustands drei typische Verhaltensweisen identifizieren. Eine dicht gelagerte Probe (i) zeigt eine dilatante Tendenz, welche sich als Porenwasserüberdruckabnahme und Zunahme

der Deviatorspannung (Verfestigung) bei zunehmender Axialdehnung ausdrückt. Eine locker gelagerte Probe (ii) verhält sich kontraktant, mit einhergehender Porenwasserüberdruckzunahme und Abnahme der Deviatorspannung (Entfestigung) bei zunehmender Axialdehnung. Mitteldicht gelagerte Proben (iii) können eine Umkehr von zunächst kontraktantem Verhalten auf dilatantes Verhalten zeigen. Der Umkehrpunkt wird Phasentransformationspunkt (PT) genannt. Wenn keine Änderungen der Deviatorspannung und des Porenwasserdrucks bei fortschreitender Deformation eintreten, ist der critical state (CS) erreicht. Bei entfestigenden (verflüssigenden) Spannungspfaden erreicht die Deviatorspannung ein temporäres Maximum, dessen Spannungsverhältnis $\eta_{IS} = q_{peak}/p'_{(q,peak)}$ die Neigung der Instabilitätslinie bestimmt. Aus einer Reihe von Versuchen mit verschiedenen Randbedingungen kann der critical state locus (CSL) (Schofield & Wroth 1968) als Beziehung zwischen der Porenzahl am critical state (e_{cs}) und der mittleren effektiven Spannung p'_{cs} formuliert werden (Abbildung 1). Diesen Referenzzustand der CSL verwenden Been & Jefferies (1985), um den Zustandsparameter ψ als Abstand von der aktuellen Porenzahl zur kritischen Porenzahl bei einer bestimmten mittleren effektiven Spannung p' zu definieren. Proben mit $\psi > 0$ neigen zu kontraktantem Verhalten (Verflüssigung), und Zustände mit $\psi < 0$ neigen zu dilatantem Verhalten, d.h. neigen nicht zur Verflüssigung.

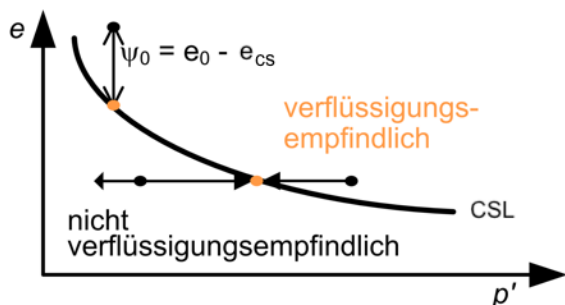


Abbildung 1 Definition des Zustandsparameters ψ

3 VERWENDETES MATERIAL UND VERSUCHSPROGRAMM

Es wurde Hostun Sand ($f_c = 0$), Querenburger Schluff ($f_c = 1$) sowie Mischungen aus beiden ($f_c = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4$, und $0,5$) verwendet, wobei f_c das Verhältnis der Trockenmassen von

Schluff zu Sand ist. Die KorngröÙeneigenschaften sind in Tabelle 1 aufgeföhrt. Anhand der ermittelten Werte für e_{min} und e_{max} bei den jeweiligen Feinkorngehalten wurde der Grenzfeinkorngehalt f_{cth} zu $f_{cth} = 0.32$ ermittelt. Es sind insgesamt 50 undrainierte, isotrop konsolidierte Triaxialversuche durchgeführt worden, deren Initialzustände in Abbildung 2 dargestellt sind.

Tabelle 1 KorngröÙeneigenschaften der Böden.

	D_{50}	D_{30}	D_{10}	C_u
	mm	mm	mm	-
Hostun Sand	0.365	0.30	0.265	1.45
Schluff	0.026	0.017	0.0016	18.75

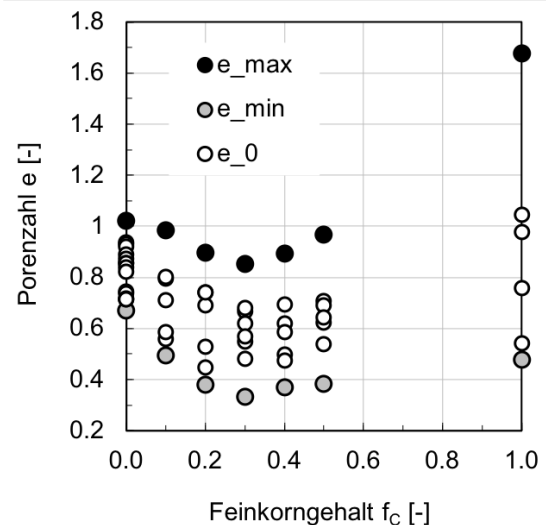


Abbildung 2 Initialzustände e_0 in Bezug zu e_{min} und e_{max} bei den untersuchten Feinkorngehalten

4 ERGEBNISSE

4.1 Einfluss des Feinkorngehalts auf CSL

Abbildung 3 zeigt die Lage der Initialzustände, die CS-Versuchspunkte und die daraus gemittelten CSLs. Im Bereich $f_c < f_{cth}$ zeigen die CSL einen gekrümmten Verlauf (Abbildung 3a), der durch Gl. (1) (Rahman 2012) angenähert wird, während für $f_c > f_{cth}$ die CS-Punkte einen linearen Verlauf aufweisen, der durch (Gl. 2) (Been & Jefferies 1985) angenähert wird.

$$e = e_{lim} - \lambda \left(\frac{p'}{p_a} \right)^\xi \quad (1)$$

$$e = \Gamma - \lambda \log p' \quad (2)$$

Hierbei sind p_a eine zu 100 kPa gewählte Referenzspannung, e_{lim} entspricht näherungsweise der maximalen Porenzahl, Λ , ξ , Γ , und λ sind sich aus der Kurvenanpassung ergebende Parameter (Tabelle 2).

Basierend auf den ermittelten CSL wurden die Zustandsparameter ψ_0 für die Initialzustände aller Versuche ermittelt. Die in Abschnitt 2 beschriebenen typischen Verhaltensweisen (i) Verflüssigung und (ii) dilatantes Verhalten haben sich entsprechend der Werte $\psi_0 > 0$ und $\psi_0 < 0$ eingestellt. Eine Probe bei $f_c = 0,1$ und zwei Proben bei $f_c = 1$ zeigten eine sogenannte

für die Feinkorngehalte: (a) $f_c = 0, 0,1, 0,2,$ und $0,3$ sowie (b) $f_c = 0,4, 0,5$ und $1,0$.

Tabelle 2 Aus der Kurvenanpassung bestimmte Parameter der Gl. (1) und Gl (2).

Gl. (1)	e_{lim}	Λ	ξ	SQT
-	-	-	-	-
$f_c = 0$	0.950	0.023	0.862	$2.41 \cdot 10^{-02}$
$f_c = 0,1$	0.820	0.064	0.586	$7.71 \cdot 10^{-03}$
$f_c = 0,2$	0.712	0.039	0.755	$7.39 \cdot 10^{-03}$
$f_c = 0,3$	0.640	0.089	0.470	$1.60 \cdot 10^{-02}$
Gl. (2)	Γ	λ	SQT	
-	-	-	-	
$f_c = 0,4$	0.935	0.300	$2.47 \cdot 10^{-02}$	
$f_c = 0,5$	1.119	0.352	$1.88 \cdot 10^{-02}$	
$f_c = 1$	1.956	0.699	$2.57 \cdot 10^{-02}$	

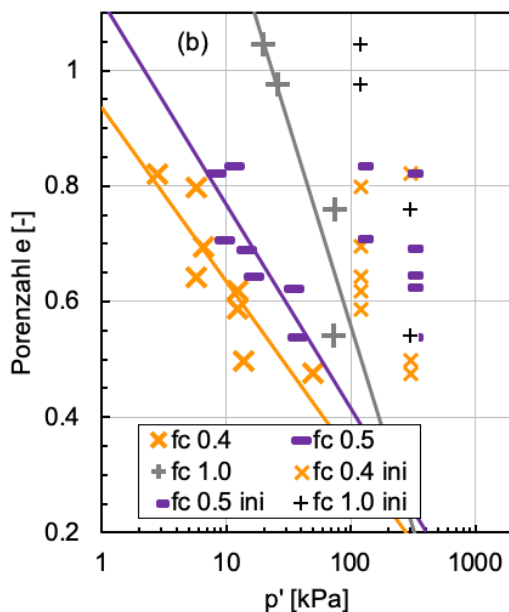
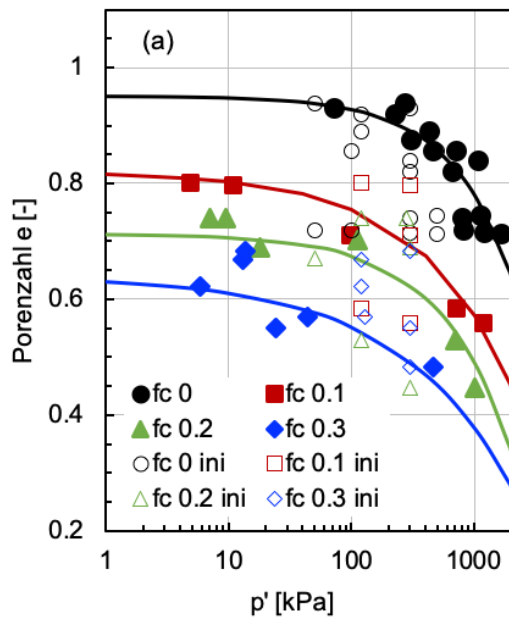


Abbildung 3 Initialzustand („ini“), Zustand im CS und aus den CS-Versuchspunkten angepasste CSL

„begrenzte Verflüssigung“ mit einer Umkehr von kontraktantem zu dilatantem Verhalten. Es ist anzumerken, dass im Feinkornbereich $f_c > f_{cth}$ die Proben auch bei sehr hohen Lagerungsdichten Entfestigung (Verflüssigung) zeigten. Dies ist im Einklang mit Untersuchungen von Lade & Yamamuro (1997), die ergaben, dass die relative Lagerungsdichte, bis zu der eine statische Verflüssigung möglich ist, mit zunehmendem Feinkornanteil ansteigt.

4.2 Äquivalente CSL

Kippen sind infolge des Abbau- und Verkipungsprozesses hinsichtlich des Feinkorngehaltes und der Lagerungsdichte räumlich heterogen. Für eine Modellierung ist es von Interesse, den Feinkorngehalt in einen modifizierten Zustandsparameter einzubeziehen, um die CSL für einen Feinkornbereich anhand einer einzigen Funktion abzubilden (Abbildung 4). Das hier angewendete Konzept zur Ermittlung äquivalenter Porenzahlen e^* beruht auf Thevanayagam (1998). Hierbei wird der zunehmende Anteil des Feinkorns am Lastabtrag bis zum Grenzfeinkorngehalt f_{cth} über den Faktor b ausgedrückt, der basierend auf Gl. (3) berechnet werden kann (Thevanayagam et al. 2002, Rahman et al. 2008). Eingangswerte sind der Grenzfeinkorngehalt f_{cth} , das Verhältnis der Korndurchmesser $r = d_{50}/D_{10}$, $k = 1 - r^{0,25}$, $\mu = 0.46$. Es ergeben sich für die Feinkorngehalte folgende b -Werte: 0,20 ($f_c = 0,1$), 0,36 ($f_c = 0,2$), 0,49 ($f_c = 0,3$). Die äqui-

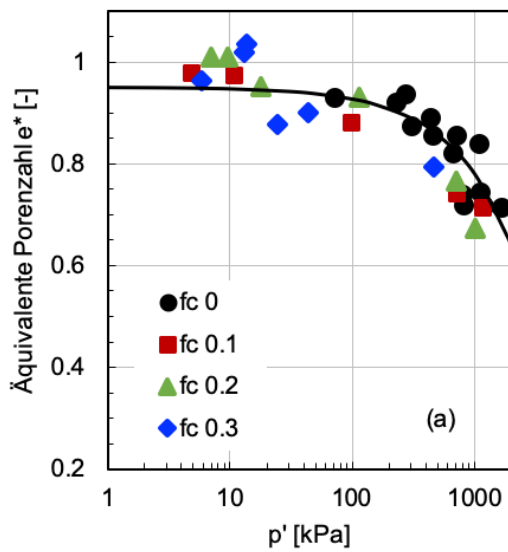


Abbildung 4 Äquivalente Porenzahl e^* über mittlerer effektiver Spannung p'_{cs} und äquivalente CSL

valenten Porenzahlen e^* wurden im Feinkornbereich $f_c < f_{cth}$ gemäß Gleichung (4) und im Bereich $f_c > f_{cth}$ gemäß Gleichung (5) (Thevanayagam 1998) berechnet. Hier entspricht $R_d = D_{50}/d_{50}$ dem Verhältnis der mittleren Durchmesser des Grob- und Feinanteils, und m ist ein Faktor für das Maß der aussteifenden Wirkung der Grobanteile innerhalb der Feinkornmatrix ($0 < m < 1$). Abbildung 4 zeigt exemplarisch für den Feinkornbereich $f_c < f_{cth}$ die so ermittelten äquivalenten Porenzahlen, aufgetragen über der effektiven Spannung im CS.

$$b = \left(1 - \exp\left[-\mu \frac{f_c/f_{cth}}{k}\right]\right) \left(r \frac{f_c}{f_{cth}}\right)^r \quad (3)$$

$$e^* = \frac{e + (1-b)f_c}{1 - (1-b)f_c} \quad (4)$$

$$e^* = \frac{e}{f_c + (1-f_c)/R_d^m} \quad (5)$$

5 ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde gezeigt, dass die CSLs für Mischungen unterhalb des Grenzfeinkorngehaltes ($f_c < f_{cth} = 0,32$) parallel und gekrümmt verlaufen, während für Feinkorngehalte oberhalb des Grenzfeinkorngehaltes ($f_c > f_{cth} = 0,32$) die CSLs linear und mit einer unterschiedlichen Steigung verlaufen. Es konnte je eine äquivalente CSL für beide Feinkornbereiche unterhalb und oberhalb des Grenzwertfeinkorngehaltes abgeleitet werden. In zukünftigen Arbeiten wird die Abhängigkeit der Beziehung

zwischen Instabilitätslinie und Zustandsparameter ($\eta_{IS} = f(\psi)$) vom Feinkorngehalt näher untersucht werden.

LITERATUR

- Been, K. & Jefferies, M. (1985). A state parameter for sands. *Géotechnique*, **35**(3): 99-112.
- Hazen, A. (1918) A study of the slip in the Calaveras Dam. *Engineering News Record*, **81**(26): 1158-1164.
- Ishihara, K. (1993) Liquefaction and flow failure during earthquakes. *Géotechnique*, **43**(3): 351-415.
- Lade, P.V., Yamamuro, J.A. (1997). Effects of nonplastic fines on static liquefaction. *Can. Geotech. J.* **34**: 918-928.
- Rahemi, N. (2017). *Evaluation of Liquefaction Behavior of Sandy Soils Using Critical State Soil Mechanics and Instability Concept*. Dissertation, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, Heft Nr. 64, Ruhr-Universität Bochum.
- Rahman, M.M., Lo, S.R. (2008). The prediction of equivalent granular steady state line of loose sand with fines. *Geomechanics & Geoengineering: An international J.* **3**(3): 179-190.
- Rahman, M., Lo, S. & Baki, A. (2011). Equivalent granular state parameter and undrained behaviour of sand-fines mixtures. *Acta Geotechnica* **6**(4): 183-194.
- Röchter, L. & Schanz, T. (2013). Statische und zyklische Verflüssigung unter Berücksichtigung des Feinkornanteils. In: *Tagungsband. 4. RuhrGeo Tag*, 21.03.2013 in Essen; Univ. Duisburg-Essen, Report Geotechnik, Heft 41; Hrsg.: E. Perau, VGE-Verlag Essen.
- Schofield, A.N., Wroth, P. (1968). *Critical state soil mechanics*. European civil engineering series. London and New York, Mc Graw-Hill.
- Thevanayagam, S. (1998). Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands. *J. Geotech. and Geoenviron. Eng.* **124**(6), 479-491.
- Thevanayagam, S., Shentan, T., Mohan, S. & Liang, J. (2002). Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts. *J. Geotech. and Geoenviron. Eng.* **128**(10): 849-859.
- Yang, J. (2002). Non-uniqueness of flow liquefaction line for loose sand. *Géotechnique* **52**(10): 757-760.
- Yang, S.L., Sandven, R., Grande, L. (2006). Steady-state lines for sand-silt mixtures. *Can. Geotech. J.* **43**, 1213-1219.