

Torsten Wichtmann  
Theodor Triantafyllidis

# Über den Einfluss der Kornverteilungskurve auf das dynamische und das kumulative Verhalten nichtbindiger Böden

Dieser Beitrag präsentiert experimentelle Untersuchungen an nichtbindigen Böden zum Einfluss der Kornverteilungskurve auf die dynamischen Bodenkenngrößen sowie die Akkumulation von bleibenden Verformungen unter zyklischer Belastung. Es wird gezeigt, dass der dynamische Schubmodul nicht vom mittleren Korndurchmesser beeinflusst wird, mit steigender Ungleichförmigkeit jedoch stark abnimmt. Für einen ungleichförmigen Boden überschätzen die gebräuchlichen empirischen Formeln den dynamischen Schubmodul um bis zu 70 %. Auch die bleibenden Verformungen unter zyklischer Belastung hängen signifikant von der Kornverteilungskurve ab. Diese sind umso größer, je feinkörniger der Boden ist. Ungleichförmige Böden verdichten sich unter zyklischer Belastung wesentlich schneller als gleichförmige Böden.

## On the influence of the grain size distribution curve on the dynamic and the cumulative behaviour of non-cohesive soils.

This paper presents experimental studies on non-cohesive soils on the influence of the grain size distribution curve on the dynamic soil properties and the accumulation of residual deformations under cyclic loading. It is shown that the dynamic shear modulus is not influenced by the mean grain diameter but decreases strongly with the non-uniformity. For a non-uniform soil the common empirical formulas overestimate the dynamic shear modulus by up to 70 %. Also the residual deformations under cyclic loading depend significantly on the grain size distribution curve. They are larger for fine-grained soils. Under cyclic loading non-uniform soils densify much faster than uniform soils.

### 1 Einleitung

Die Verformungen im Boden infolge zyklischer bzw. dynamischer Belastung setzen sich i. Allg. aus einem elastischen und einem residualen Anteil zusammen.

Bei vielen bodendynamischen Problemen (z.B. der Dimensionierung von Maschinenfundamenten) steht der elastische Anteil der Verformungen im Vordergrund. Für bodendynamische Analysen werden die Kennwerte des Bodens, zumeist der dynamische Schub- oder Elastizitätsmodul und der Dämpfungsgrad benötigt. Diese

sind keine Konstanten, sondern werden insbesondere von der Spannung, der Porenzahl und der Dehnungsamplitude beeinflusst (siehe Abschnitt 3.1). Der Einfluss der Kornverteilungskurve, insbesondere der Ungleichförmigkeit auf die dynamischen Bodenkenngrößen wurde bisher kaum systematisch untersucht.

Der bleibende Anteil der Verformungen resultiert aus der Tatsache, dass die Dehnungsschleifen infolge geschlossener Spannungszyklen nicht perfekt geschlossen sind. Mit jedem Zyklus akkumuliert sich eine bleibende Verformung, wobei die Rate (bleibende Verformung pro Zyklus) zumeist mit der Zyklenanzahl abnimmt. Die Akkumulation von bleibenden Verformungen (insbesondere von Setzungsdifferenzen) in den Gründungen kann die Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks (z.B. Hochgeschwindigkeitsstrecke, Kranbahn, Schleuse, Tank, Windkraftanlage) gefährden. Darüber hinaus wird die Akkumulation von Verformungen unter zyklischer Belastung auch zur maschinellen Verdichtung des Baugrunds genutzt (Oberflächenverdichtung mittels Vibration, Tiefenverdichtung als Rütteldruckverdichtung). Die Größe der Setzungen bzw. der Verdichtung unter zyklischer Belastung hängt von der Belastungsamplitude, der mittleren Spannung, der Porenzahl und der zyklischen Vorbelastung ab (siehe Abschnitt 4.1). Nur wenige Experimente zum Einfluss der Kornverteilungskurve auf das kumulative Verhalten unter zyklischer Belastung finden sich in der Literatur.

Dieser Aufsatz befasst sich mit der Fragestellung, inwiefern die Kornverteilungskurve das dynamische bzw. das kumulative Verhalten nichtbindiger Böden beeinflusst. Es wird sowohl für die dynamischen Bodenkenngrößen als auch für die Verformungsakkumulation zunächst ein Überblick über die Literatur gegeben. Anschließend werden die Ergebnisse eigener Laborversuche präsentiert. Die bodendynamischen Kenngrößen wurden im Resonant Column Gerät gemessen. Zur Untersuchung der Verformungsakkumulation wurden zyklische Triaxialversuche durchgeführt.

### 2 Testmaterial

Die Versuche wurden an einem Quarzsand bzw. -kies durchgeführt. Die getesteten Kornverteilungskurven

zeigt das Bild 1. Die Böden 1 bis 6 weisen eine in etwa identische Ungleichförmigkeit  $1,3 \leq U = d_{60}/d_{10} \leq 1,9$  aber unterschiedliche mittlere Korndurchmesser  $0,15 \text{ mm} \leq d_{50} \leq 4,4 \text{ mm}$  auf. Mit dem Boden 7 wurde auch ein ungleichförmiger Boden ( $U = 4,5$ ) untersucht. Die rundkantige Kornform ist allen getesteten Böden gemeinsam. In der Tabelle in Bild 2 sind neben Fotos der Böden die Charakteristiken der Kornverteilungen, die Porenzahlen bei dichtester und lockerster Lagerung (nach DIN 18126) sowie die kritischen Reibungswinkel zusammengestellt.

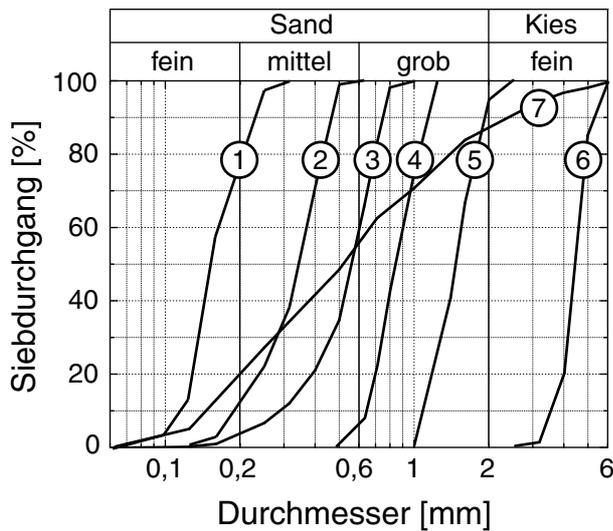


Fig. 1: Kornverteilungskurven der getesteten sieben Böden  
 Fig. 1: Grain size distribution curves of the seven tested soils

### 3 Dynamische Bodenkenngrößen

#### 3.1 Literatur

Der Einfluss der Spannung, der Porenzahl und der Scherdehnungsamplitude auf den dynamischen Schubmodul wurde bereits intensiv erforscht (siehe zahlreiche Literaturangaben in [1]). Der dynamische Schubmodul  $G$  nimmt mit der Scherdehnungsamplitude  $\gamma^{\text{ampl}}$  ab. Der Maximalwert bei kleinen Dehnungen wird mit  $G_0$  bezeichnet.  $G_0$  steigt mit dem mittleren Druck  $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  (die  $\sigma_i$  bezeichnen die effektiven Spannungen in den drei Achsrichtungen). In einer doppeltlogarithmischen Darstellung liegen die Wertepaare ( $G_0, p$ ) auf einer Geraden, d.h. es gilt  $G_0 \sim p^n$ . Der Exponent  $n$  wird i. Allg. zwischen 0,4 und 0,5 angegeben. Mit zunehmender Porenzahl  $e$  sinkt der dynamische Schubmodul. Zur Abschätzung von  $G_0$  werden üblicherweise die Formeln von Hardin [2] verwendet, welche auch Eingang in die Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 "Baugruddynamik" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) [3] gefunden haben. Sie lauten:

$$G_0[\text{MPa}] = 6,9 \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} (p[\text{kPa}])^{0,5} \quad (1)$$

für eine runde Kornform und

$$G_0[\text{MPa}] = 3,23 \frac{(2,97 - e)^2}{1 + e} (p[\text{kPa}])^{0,5} \quad (2)$$

für kantiges Korn.

$G_0$  sinkt mit zunehmender Spannungsanisotropie (z.B. um ca. 10 %, wenn im axialsymmetrischen Versuch das Spannungsverhältnis  $\sigma_1/\sigma_3$  der axialen zur seitlichen Spannung von 1 auf 2 erhöht wird, während  $p$  konstant gehalten wird [4]). Die Abnahme von  $G$  mit  $\gamma^{\text{ampl}}$  kann ebenfalls nach Hardin [5] berechnet werden (siehe auch [1]). Unter konstanten Spannungen steigt  $G_0$  mit der Zeit, während eine zyklische Vorbelastung  $G_0$  kaum beeinflusst [1].

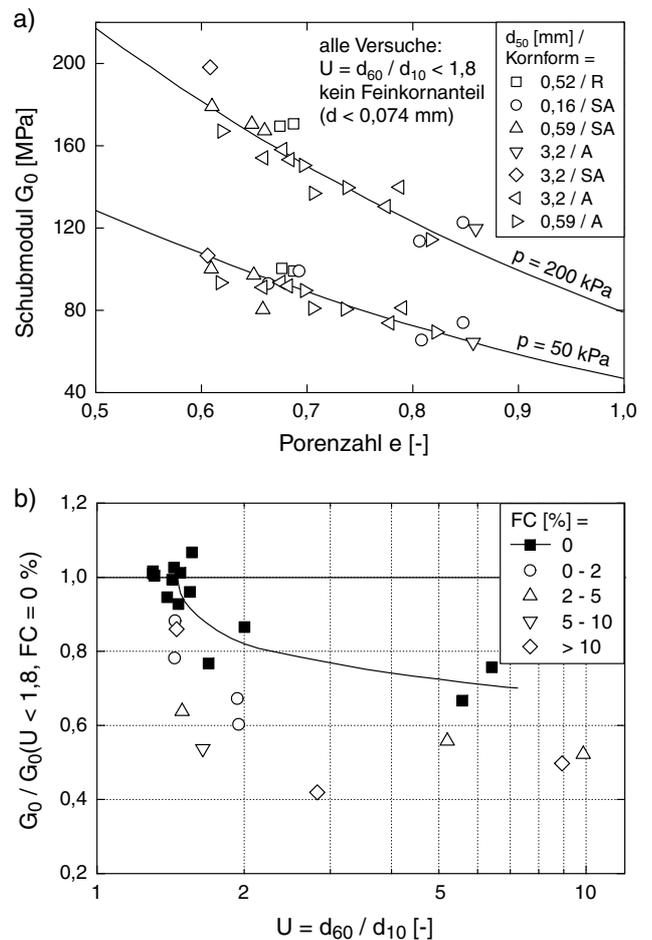


Fig. 3: Versuchsergebnisse von Iwasaki und Tatsuoka [6]: a) kein Einfluss des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$  und der Kornform ( $R = \text{rund}$ ,  $SA = \text{rundkantig}$ ,  $A = \text{kantig}$ ) auf  $G_0$ , b) Abnahme von  $G_0$  mit der Ungleichförmigkeit  $U$  und mit dem Feinkornanteil  $FC$  (Körner mit  $d < 0,074 \text{ mm}$ )  
 Fig. 3.: Test results of Iwasaki and Tatsuoka [6]: a) no influence of the mean grain diameter  $d_{50}$  and the grain shape ( $R = \text{round}$ ,  $SA = \text{subangular}$ ,  $A = \text{angular}$ ) on  $G_0$ , b) Reduction of  $G_0$  with the non-uniformity  $U$  and with the content of fines  $FC$  (grains with  $d < 0,074 \text{ mm}$ )

Experimente zum Einfluss der Kornverteilungskurve auf die dynamischen Bodenkenngrößen finden sich kaum

Boden	1	2	3	4	5	6	7
$d_{50}$	0,15 mm	0,35 mm	0,55 mm	0,84 mm	1,45 mm	4,4 mm	0,52 mm
U	1,4	1,9	1,8	1,4	1,4	1,3	4,5
C	0,9	1,2	1,2	1,0	0,9	1,1	0,7
$e_{max}$	0,992	0,930	0,874	0,878	0,886	0,851	0,691
$e_{min}$	0,679	0,630	0,577	0,590	0,623	0,669	0,422
$\varphi_c$	31,3°	33,3°	31,2°	33,7°	33,9°	35,1°	33,3°
Foto							

Fig. 2: Mittlerer Korndurchmesser  $d_{50}$ , Ungleichförmigkeit  $U = d_{60}/d_{10}$ , Krümmungszahl  $C = d_{30}^2/(d_{10}d_{60})$ , Porenzahlen bei dichtester ( $e_{min}$ ) und lockerster ( $e_{max}$ ) Lagerung, kritischer Reibungswinkel  $\varphi_c$  sowie Fotos der einzelnen Kornverteilungen  
 Fig. 2: Mean grain diameter  $d_{50}$ , non-uniformity  $U = d_{60}/d_{10}$ , curvature  $C = d_{30}^2/(d_{10}d_{60})$ , minimum ( $e_{min}$ ) and maximum ( $e_{max}$ ) void ratios, critical friction angle  $\varphi_c$  and photos of the grain size distributions

in der Literatur. Die einzige den Autoren bekannte systematische Untersuchung wurde von Iwasaki und Tatsuoka [6] durchgeführt. Diese berichteten, dass der dynamische Schubmodul stark durch die Kornverteilung beeinflusst wird. Während bei enggestuften Sanden ( $U < 1,8$ ) der mittlere Korndurchmesser  $d_{50}$  und die Kornform keinen Einfluss auf  $G_0$  besitzen (Bild 3a, die Unabhängigkeit von der Kornform widerspricht jedoch den Erkenntnissen von Hardin [2]), sinkt der dynamische Schubmodul mit der Ungleichförmigkeit  $U = d_{60}/d_{10}$  und mit dem Anteil an feinen Körnern mit Durchmessern  $d < 0,074$  mm (FC = engl. "content of fines", Bild 3b). Der Effekt der Kornverteilungskurve auf die Materialdämpfung wurde von Iwasaki und Tatsuoka als eher gering beschrieben. Eine Erweiterung der Gleichungen (1) und (2) um den Effekt der Ungleichförmigkeit und des Feinkornanteils wurde in [6] jedoch nicht vorgenommen. In [7] wird berichtet, dass ungleichförmige kiesige Böden unerwartet geringe Scherwellengeschwindigkeiten aufweisen können.

### 3.2 Eigene Versuchsergebnisse

Zur Untersuchung des Einflusses der Kornverteilungskurve auf die dynamischen Bodenkenngrößen wurden Resonant Column (RC)-Versuche durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung des Versuchsgerätes, der Probenpräparation und der Versuchsauswertung findet sich in [1]. Das Bild 4 zeigt den dynamischen Schubmodul  $G_0$  als Funktion der Porenzahl für den Seitendruck  $\sigma_3 = 100$  kPa ( $\sigma_1 \approx \sigma_3$ , d.h.  $p \approx \sigma_3$ , siehe [1]). Die Schubmoduli der gleichförmigen Böden 1,3 und 6 ( $1,3 \leq U \leq 1,8$ ) stimmen unbeeinflusst von den stark unterschiedlichen Korndurchmessern ( $0,15$  mm  $\leq d_{50} \leq 4,4$  mm) überein. Bei gleicher Porenzahl sind die Schubmoduli des ungleichförmigen Bodens 7 ( $U = 4,5$ ) nur etwa halb so groß wie die Werte der gleichförmigen Böden. Die Ungleichförmigkeit reduziert  $G_0$  also stark, womit Versuchsergebnisse in [6] bestätigt

werden konnten. Ein Vergleich mit den Formeln (1) und (2) zeigt (Bild 4), dass diese den Schubmodul des ungleichförmigen Bodens stark überschätzen (um bis zu 70 % bei  $e = 0,6$ ). Eine Erweiterung der Gleichungen (1) und (2) um den Einfluss der Ungleichförmigkeit sollte angestrebt werden. Die gemessenen Schubmoduli der gleichförmigen Böden 1,3 und 6 sind insbesondere bei kleineren Porenzahlen etwas größer als die mit den Gleichungen (1) und (2) berechneten Werte. Passt man die Formel von Hardin

$$G_0[\text{MPa}] = A \frac{(a - e)^2}{1 + e} (p[\text{kPa}])^n \quad (3)$$

an die Messdaten an (siehe durchgezogene Linien in Bild 4), so erhält man für die gleichförmigen Böden  $1,82 \leq a \leq 2,19$  und für den ungleichförmigen Boden lediglich  $a = 1,23$ .

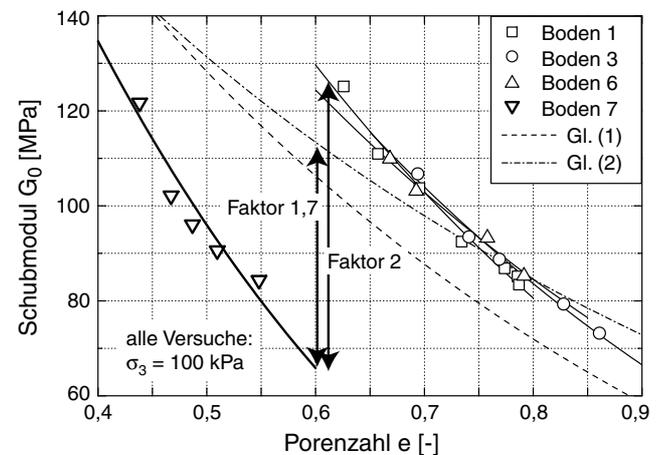


Fig. 4: Abhängigkeit  $G_0(e)$  für verschiedene Kornverteilungen  
 Fig 4.: Relationship  $G_0(e)$  for different grain size distributions

Im Bild 5 sind Versuche dargestellt, in denen der Seitendruck  $50 \text{ kPa} \leq \sigma_3 \leq 400 \text{ kPa}$  schrittweise gesteigert und der Schubmodul  $G_0$  gemessen wurde. Mit Ausnahme des Anfangsbereiches ( $p \leq 75 \text{ kPa}$ ) sind die Verläufe  $G_0(p)$  in der doppeltlogarithmischen Darstellung linear. Für alle gleichförmigen Böden wurde der Exponent  $n$  in Gleichung (3) zu  $0,41 \leq n \leq 0,47$  ermittelt, d.h. er ist nahezu unabhängig von  $d_{50}$ . Im Fall des ungleichförmigen Bodens 7 steigt der Schubmodul schneller mit dem Druck ( $n = 0,55$ ).

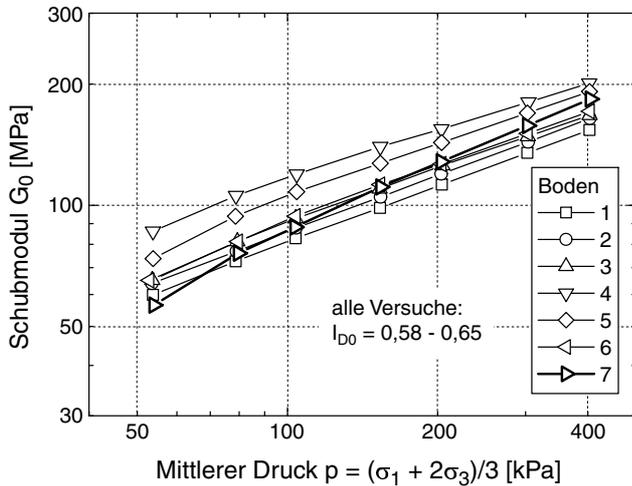


Fig. 5: Anstieg des Schubmoduls  $G_0$  mit dem mittleren Druck  $p$  für die sieben untersuchten Böden ( $I_D = (e_{\max} - e)/(e_{\max} - e_{\min})$ ,  $I_{D0}$  bedeutet den Anfangswert bei  $p \approx 50 \text{ kPa}$ )

Fig 5.: Increase of shear modulus  $G_0$  with mean pressure  $p$  for the seven tested soils ( $I_D = (e_{\max} - e)/(e_{\max} - e_{\min})$ ,  $I_{D0}$  means the initial value at  $p \approx 50 \text{ kPa}$ )

Die in Bild 5 dargestellten Versuche wurden mit einer Messung der Verläufe  $G(\gamma^{\text{ampl}})$  und  $D(\gamma^{\text{ampl}})$  bei  $\sigma_3 = 400 \text{ kPa}$  abgeschlossen (Bild 6). Die Abnahme des Schubmoduls und die begleitende Zunahme des Dämpfungsgrades  $D$  mit der Scherdehnungsamplitude verläuft beim ungleichförmigen Boden 7 schneller als bei den gleichförmigen Böden 1 bis 6. Der mittlere Korndurchmesser  $d_{50}$  beeinflusst die Kurven hingegen nur unwesentlich. Zu den Kurven in Bild 6 sei noch angemerkt, dass die Verläufe  $G/G_0(\gamma^{\text{ampl}})$  und  $D(\gamma^{\text{ampl}})$  druckabhängig sind [1]. Bei kleineren Drücken nimmt  $G$  i.Allg. schneller mit  $\gamma^{\text{ampl}}$  ab und  $D$  entsprechend schneller zu.

#### 4 Kumulatives Verhalten

##### 4.1 Literatur

Die bleibenden Verformungen unter zyklischer Belastung waren in den letzten Jahren intensiv Gegenstand unserer Forschung [8]. Die Intensität der Verformungsakkumulation steigt mit der Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$ , mit der Porenzahl  $e$  und mit dem mittleren Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}} = q^{\text{av}}/p^{\text{av}}$  (im triaxialen Fall gilt  $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$  und  $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ). Die Akkumulationsrate sinkt mit steigendem mittleren Druck und mit

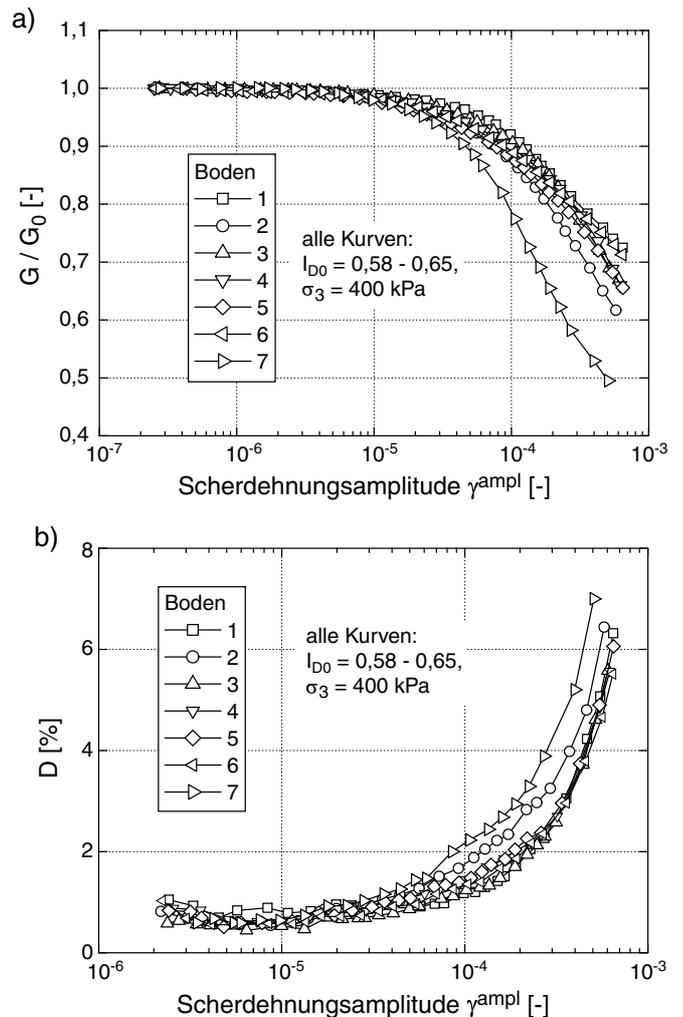


Fig. 6: Verläufe  $G/G_0(\gamma^{\text{ampl}})$  und  $D(\gamma^{\text{ampl}})$  für die sieben untersuchten Böden

Fig 6.: Curves  $G/G_0(\gamma^{\text{ampl}})$  and  $D(\gamma^{\text{ampl}})$  for the seven tested soils

einer zyklischen Vorbelastung (= Zyklenanzahl, wenn  $\varepsilon^{\text{ampl}} = \text{konstant}$ ). Auch die Form und die Polarisierung (Richtung) der Dehnungsschleife spielen eine Rolle. Die Akkumulationsrichtung, d.h. das Verhältnis der volumetrischen zur deviatorischen Akkumulationsrate hängt nur vom Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}}$  ab. Die eigenen experimentellen Untersuchungen [8] beschränkten sich bisher auf den Boden 3 entsprechend den Bildern 1 und 2.

Der Einfluss der Kornverteilungskurve auf das kumulative Verhalten nichtbindiger Böden in dränierten Versuchen mit vielen kleinen Zyklen ( $N > 10^4$ ,  $\varepsilon^{\text{ampl}} \leq 10^{-3}$ ) wurde bisher kaum systematisch untersucht. Helm et al. [9] beobachteten geringere bleibende Verformungen bei einem Feinsand ( $d_{50} = 0,13 \text{ mm}$ ,  $U = 1,75$ ) im Vergleich zu einem Mittelsand ( $d_{50} = 0,31 \text{ mm}$ ,  $U = 2,12$ ). Die Akkumulation des Porenwasserdruckes bei undrännierter zyklischer Belastung ist der Verdichtung (Porenzahlreduktion) in dränierten Versuchen äquivalent. Undrännierte zyklische Versuche werden zumeist zur Abschätzung der Gefahr einer Verflüssigung

des Bodens während eines Erdbebens (große Amplituden, kleine Zyklenanzahl) durchgeführt (zur Bodenverflüssigung siehe z.B. [10]). In [11] wurde berichtet, dass der Einfluss der Kornverteilungskurve auf den Verflüssigungswiderstand ebenso hoch einzuschätzen ist wie der Effekt der Anfangslagerungsdichte. Dabei wurde für Böden mit einem kleinen  $d_{10}$  zumeist ein schnellerer Aufbau von Porenwasserüberdrücken beobachtet als für größere Böden. Zu ähnlichen Versuchsergebnissen kam man in [12]. In [13] und [14] wurde berichtet, dass der Verflüssigungswiderstand durch den Anteil an feinem Korn stark reduziert wird. An anderer Stelle ist nachzulesen, dass die Porenwasserdruckakkumulation in undrännierten Versuchen im Fall von Kies bzw. von kiesigen Sanden langsamer verläuft als beim Sand [15,16].

#### 4.2 Eigene Versuchsergebnisse

Der Einfluss der Kornverteilungskurve auf die bleibenden Verformungen unter zyklischer Belastung wurde in zyklischen Triaxialversuchen studiert. Die verwendeten Versuchsgeräte wurden in [8] besprochen. Die Proben wurden mit Hilfe der Rieseltechnik [8] präpariert und anschließend mit entlüftetem Wasser gesättigt. In den Versuchen wurde die seitliche Spannung  $\sigma_3$  konstant gehalten und die axiale Spannung  $\sigma_1$  wurde mit einer Frequenz von 1 Hz zyklisch variiert. Gemessen wurde die axiale Stauchung der Proben sowie die Volumenverformung (über das Porenwasser).

Für die Böden 2, 3, 5 und 7 wurden Versuche mit einem mittleren (statischen) Spannungszustand  $p^{av} = 200$  kPa und  $q^{av} = 150$  kPa (d.h.  $\eta^{av} = q^{av}/p^{av} = 0,75$ ) und mitteldichter Anfangslagerung durchgeführt. Für jeden Boden wurden unterschiedliche Amplituden der axialen Spannung getestet ( $10 \text{ kPa} \leq \sigma_1^{ampl} \leq 87 \text{ kPa}$ ). Das Bild 7 zeigt die akkumulierte (bleibende) Dehnung  $\varepsilon^{acc} = \sqrt{(\varepsilon_1^{acc})^2 + 2(\varepsilon_3^{acc})^2}$  als Funktion der Zyklenanzahl  $N$ . In den Diagrammen in Bild 7 ist die bleibende Dehnung ohne den ersten Zyklus dargestellt, da sich der erste Zyklus signifikant von den weiteren Zyklen unterscheiden kann [8]. Für alle untersuchten Böden verläuft die Akkumulation der bleibenden Verformungen mit zunehmender Belastungsamplitude schneller. Für die gleichförmigen Böden 5, 3 und 2 steigt die bleibende Dehnung bis  $N = 10^4$  in etwa linear mit dem Logarithmus der Zyklenanzahl. Für  $N > 10^4$  wurde zumeist eine überproportionale Zunahme von  $\varepsilon^{acc}$  mit  $\ln(N)$  gemessen. Beim Boden 7 wurde bereits bei kleineren Zyklenanzahlen eine schnellere Akkumulation als  $\varepsilon^{acc} \sim \ln(N)$  gemessen. Die nahezu linearen Verläufe in der halblogarithmischen Darstellung für große Amplituden und größere Zyklenanzahlen resultieren aus der Reduktion der Akkumulationsrate infolge der starken Verdichtung (die Akkumulationsrate steigt mit der Porenzahl, Funktion  $f_e$  in [8]).

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Kornverteilungskurve die bleibenden Dehnungen signifikant beeinflusst. In Bild 8 sind die bleibenden Dehnungen nach  $10^5$  Zyklen über der Spannungsamplitude  $\sigma_1^{ampl}$  aufgetragen, in Bild 9 wurde auf der Abszisse

die Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{ampl}$  (berechnet als Mittelwert über  $10^5$  Zyklen) verwendet. Vergleicht man in Bild 8 die bleibenden Dehnungen der drei gleichförmigen Böden 2, 3 und 5 ( $1,4 \leq U \leq 1,9$ ) bei einer Spannungsamplitude  $\sigma_1^{ampl} = 80$  kPa, so wird deutlich, dass  $\varepsilon^{acc}(N = 10^5)$  mit abnehmendem mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$  steigt. Nach  $10^5$  Zyklen verbleibt im Boden 5 ( $d_{50} = 1,45$  mm) eine Dehnung von ca. 0,5 %. Beim Boden 3 ( $d_{50} = 0,55$  mm) beträgt diese Dehnung mit ca. 1,2 % schon doppelt so viel. Für den Boden 2 ( $d_{50} = 0,35$  mm) erhält man  $\varepsilon^{acc} \approx 2,5$  % und damit eine in etwa fünffach größere bleibende Dehnung als beim Boden 5. Noch wesentlich größer ist die Verformungsakkumulation beim ungleichförmigen Sand 7 ( $U = 4,5$ ). Hier verbleibt nach  $10^5$  Zyklen mit  $\sigma_1^{ampl} = 80$  kPa eine Dehnung von ca. 9,1 % im Material. Ähnliche Schlüsse lassen sich auch aus der Darstellung im Bild 9 ziehen. So betragen die bleibenden Dehnungen für  $\varepsilon^{ampl} = 3 \cdot 10^{-4}$  bei den gleichförmigen Böden 5, 3 und 2 0,5 %, 1,2 % bzw. 1,7 % und beim ungleichförmigen Boden 7,2 %. In [8] wird für den Boden 3 gezeigt, dass die Akkumulationsrate mit dem Quadrat der Dehnungsamplitude zunimmt, d.h. es gilt  $\dot{\varepsilon}^{acc} \sim (\varepsilon^{ampl})^2$ . Diese quadratische Abhängigkeit ist im Bild 9 für die Sande 2 und 7 nicht zu erkennen. Dies kann wiederum der starken Reduktion der Porenzahl in den Versuchen mit großen Amplituden zugeschrieben werden, die zu einer Verlangsamung der Akkumulationsrate führt [8]. Zur Verifizierung der Funktion  $\dot{\varepsilon}^{acc} \sim (\varepsilon^{ampl})^2$  auch für diese Kornverteilungen sollten die akkumulierten Dehnungen in Bild 9 daher noch um den Effekt der Porenzahl (Funktion  $f_e$  in [8]) korrigiert werden. Entsprechende Versuchsreihen mit einer Variation der Anfangsporenzahl zur Ermittlung von  $f_e$  sind für die Zukunft geplant.

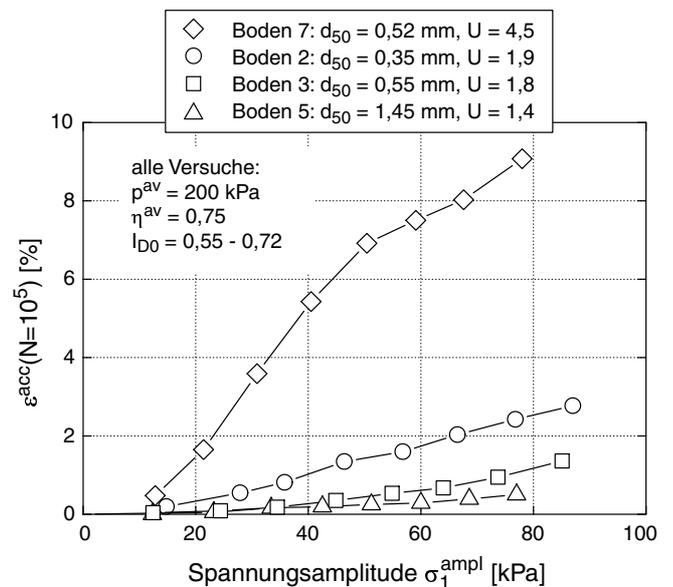
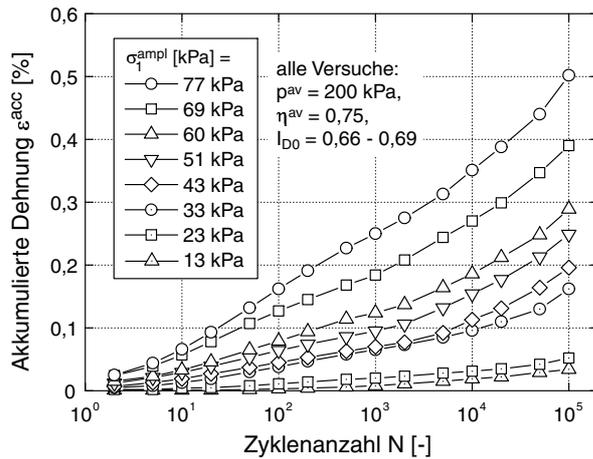


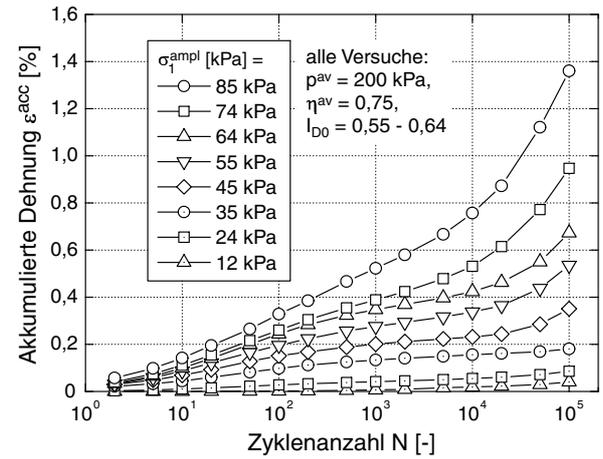
Fig. 8: Bleibende Dehnung nach 100.000 Zyklen als Funktion der Spannungsamplitude

Fig. 8.: Residual strain after 100,000 cycles as a function of the stress amplitude

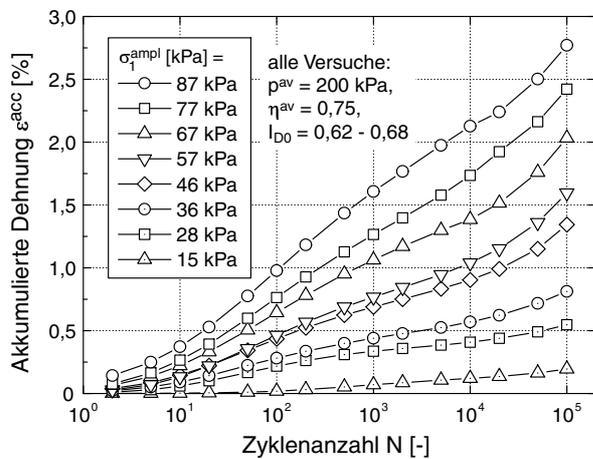
Boden 5:  $d_{50} = 1,45 \text{ mm}$ ,  $U = 1,4$



Boden 3:  $d_{50} = 0,55 \text{ mm}$ ,  $U = 1,8$



Boden 2:  $d_{50} = 0,35 \text{ mm}$ ,  $U = 1,9$



Boden 7:  $d_{50} = 0,52 \text{ mm}$ ,  $U = 4,5$

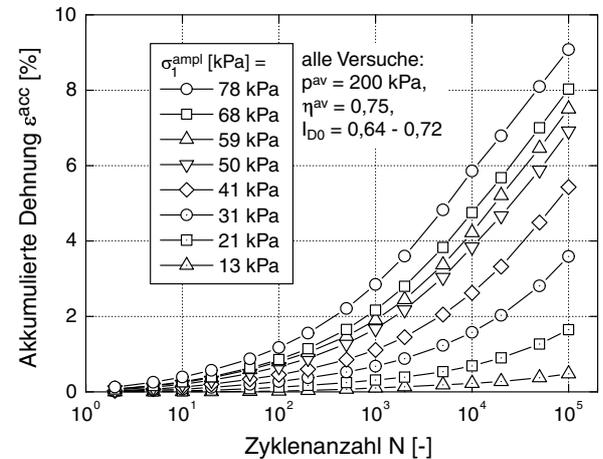


Fig. 7: Akkumulationskurven  $\epsilon^{acc}(N)$  für unterschiedliche Amplituden und Kornverteilungskurven  
 Fig 7.: Accumulation curves  $\epsilon^{acc}(N)$  for different amplitudes and grain size distributions

Das Bild 10 zeigt die deutliche Reduktion der Porenzahl mit  $N$  für den Sand 7. Es zeigte sich, dass die minimale Porenzahl aus dem Standardverfahren der DIN 18126 durch eine zyklische Belastung deutlich unterschritten werden kann.  $10^5$  Zyklen mit der Amplitude  $\sigma_1^{ampl} = 78 \text{ kPa}$  verdichteten die Probe auf  $I_D = 1,11$  und bei einem Fortsetzen der zyklischen Belastung ist eine weiter zunehmende, gegen einen unteren Grenzwert der Porenzahl tendierende Verdichtung zu erwarten.

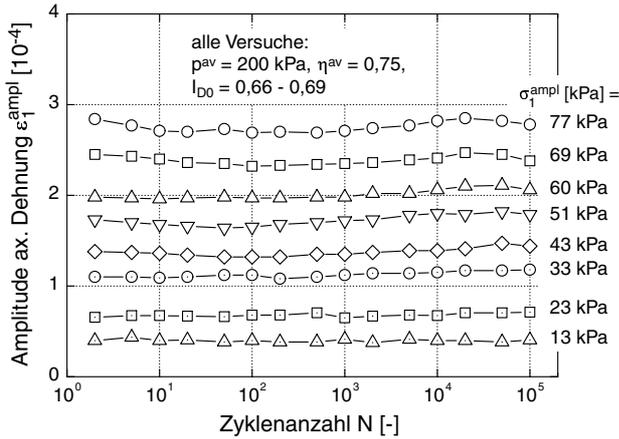
Im Bild 11 ist das Verhältnis  $\omega$  (Akkumulationsrichtung) der bleibenden volumetrischen ( $\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$ ) zur bleibenden deviatorischen Dehnung ( $\epsilon_q = 2/3(\epsilon_1 - \epsilon_3)$ ) nach 1.000 Zyklen als Funktion der Dehnungsamplitude dargestellt. Trotz Streuungen im Bereich kleiner Amplituden kann  $\omega$  für alle Sande als unabhängig von  $\epsilon_1^{ampl}$  angesehen werden. Der ungleichförmige Boden 7 weist etwas größere Werte auf als die gleichförmigen Böden. Weitere Versuchsreihen werden zeigen, ob die Fließregeln von Materialmodellen für monotone Belastungen (z.B. Hypoplastizität, wie in [8] für den Boden 3 gezeigt) unabhängig von der Kornverteilungskurve

für die Beschreibung der Abhängigkeit der zyklischen Akkumulationsrichtung vom Spannungsverhältnis  $\eta^{av}$  verwendet werden können.

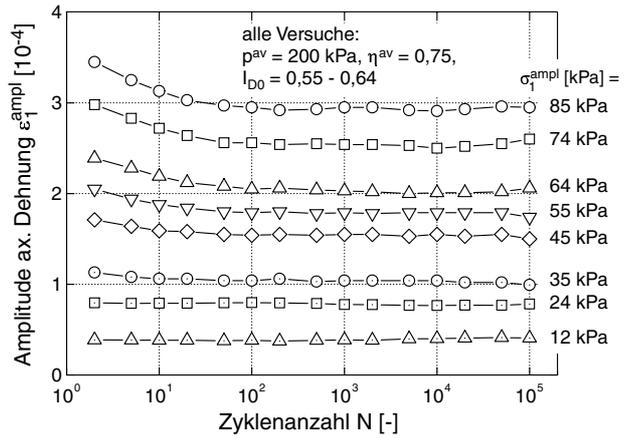
Im Hinblick auf maschinelle Verdichtungsmethoden (Oberflächenrüttlung, Rütteldruckverdichtung) bedeuten die Versuchsergebnisse, dass sich feinkörnige Böden besser verdichten lassen als grobkörniges Material und dass der Verdichtungserfolg bei gleichem Energieeintrag mit der Ungleichförmigkeit des Bodens steigt. Für eine FE-Prognose der Setzungsakkumulation einer zyklisch belasteten Gründung mit einem hochzyklischen Akkumulationsmodell (z.B. dem Modell in [8]) müssen die Materialparameter des anstehenden Bodens bestimmt werden. Die Bilder 7 bis 9 zeigen, dass diese signifikant von der Kornverteilungskurve abhängen können. Für eine zukünftige, vereinfachte Parameterbestimmung wird versucht, diese Materialparameter mit  $d_{50}$ ,  $U$  und dem Feinkornanteil des Bodens zu korrelieren.

Abschließend sollen die im zyklischen Triaxialversuch gemessenen elastischen Anteile der Verformung

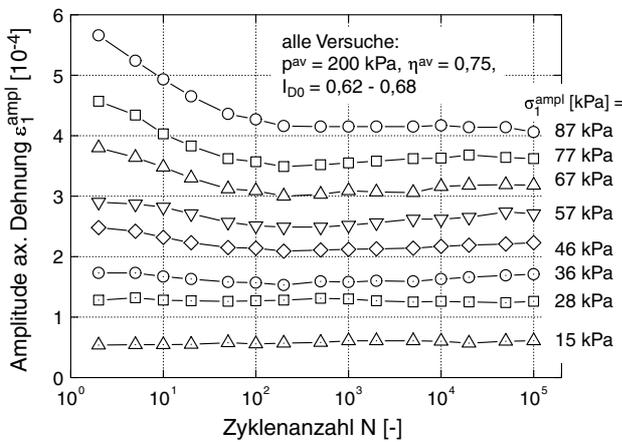
Boden 5:  $d_{50} = 1,45 \text{ mm}$ ,  $U = 1,4$



Boden 3:  $d_{50} = 0,55 \text{ mm}$ ,  $U = 1,8$



Boden 2:  $d_{50} = 0,35 \text{ mm}$ ,  $U = 1,9$



Boden 7:  $d_{50} = 0,52 \text{ mm}$ ,  $U = 4,5$

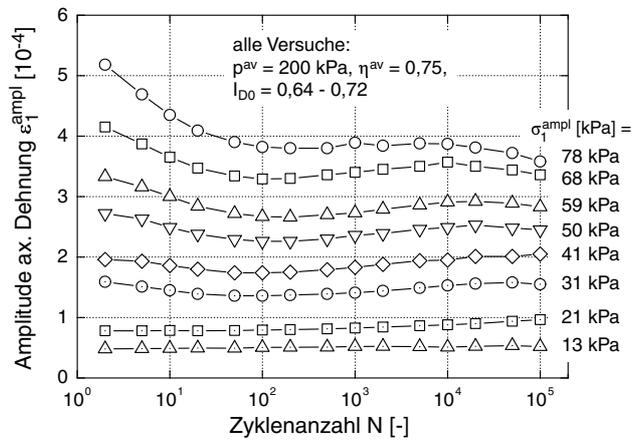


Fig. 12: Entwicklung der Amplitude der axialen Dehnung  $\varepsilon_1^{amp1}$  mit der Zyklanzahl für unterschiedliche Kornverteilungskurven

Fig 12.: Change of the amplitude of axial strain  $\varepsilon_1^{amp1}$  with the number of cycles for different grain size distribution curves

mit den Steifigkeiten aus den RC-Versuchen verglichen werden. Das Bild 12 zeigt die Entwicklung der Amplitude der axialen Dehnung  $\varepsilon_1^{amp1}$  mit der Zyklanzahl. Während der ersten 100 Zyklen (sog. Konditionierungsphase) nimmt die Steifigkeit zu und die Amplitude ab. Anschließend bleiben die Amplituden trotz weiterer Verdichtung nahezu konstant. Berechnet man aus der bei  $N = 2$  gemessenen Dehnungsamplitude  $\varepsilon_1^{amp1}$  und der zugehörigen Spannungsamplitude  $\sigma_1^{amp1}$  den hysteretischen Elastizitätsmodul (Bild 13, in [3] als "dynamischer Elastizitätsmodul" bezeichnet)

$$E_{hyst} = \sigma_1^{amp1} / \varepsilon_1^{amp1} \tag{4}$$

und stellt  $E_{hyst}$  als Funktion von  $\varepsilon_1^{amp1}$  dar, so erhält man die Datenpunkte in Bild 14. Bei  $I_D \asymp$  konstant (und nicht  $e =$  konstant wie im Bild 4) steigt die Steifigkeit der gleichförmigen Böden mit dem Korndurchmesser  $d_{50}$ . Die kleinsten Steifigkeiten wurden für den ungleichförmigen Boden 7 ermittelt. Aus Bild 14 ist die Abnahme des hysteretischen Elastizitätsmoduls mit

der Dehnungsamplitude ersichtlich (vergleiche Bild 6a für den dynamischen Schubmodul  $G$ ). Passt man analog zur Gleichung nach Hardin [5] für die Abnahme des dynamischen Schubmoduls  $G$  mit  $\gamma^{amp1}$  die Gleichung

$$E_{hyst} = E_{hyst,0} \frac{1}{1 + \varepsilon_1^{amp1} / \varepsilon_{1,ref}^{amp1}} \tag{5}$$

an die Datenpunkte in Bild 14 an (siehe Linien in Bild 14), so erhält man die extrapolierten, in Tabelle 1 zusammengestellten Maximalwerte des hysteretischen Elastizitätsmoduls bei kleinen Dehnungen  $E_{hyst,0}$  und die zugehörigen Referenzamplituden  $\varepsilon_{1,ref}^{amp1}$ .

Unter Ansatz einer Querkontraktionszahl von  $\nu = 0,2$  (nach [17]) wurde aus

$$G_0 = \frac{E_{hyst,0}}{2(1 + \nu)} \tag{6}$$

der hysteretische Schubmodul bei kleinen Dehnungen abgeschätzt. In Tabelle 1 werden diese Schätzwerte aus

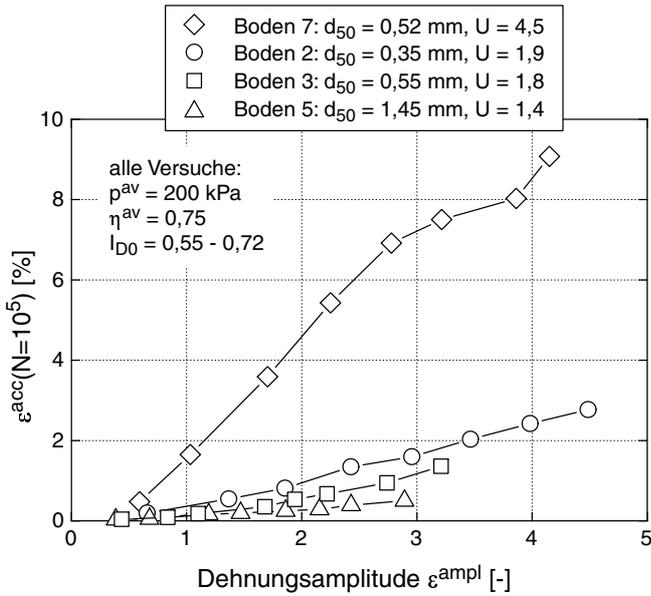


Fig. 9: Bleibende Dehnung nach 100.000 Zyklen als Funktion der Dehnungsamplitude  
 Fig 9.: Residual strain after 100,000 cycles as a function of the strain amplitude

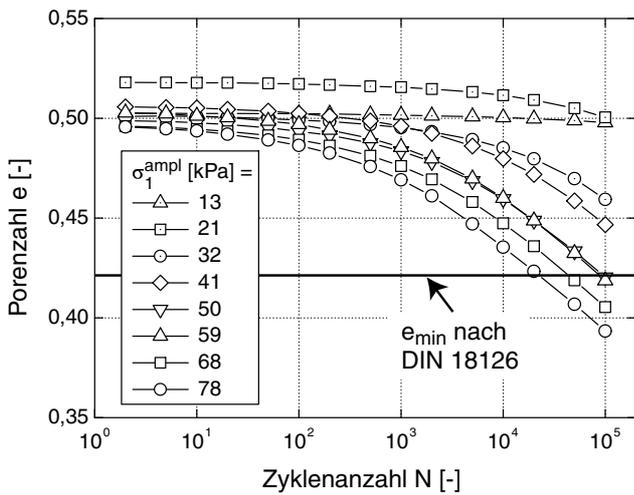


Fig. 10: Reduktion der Porenzahl e mit der Zyklenanzahl N für den ungleichförmigen Boden 7  
 Fig 10.: Reduction of void ratio e with the number of cycles N for the non-uniform soil 7

den zyklischen Triaxialversuchen mit Messwerten aus den RC-Versuchen bei einem gleichen mittleren Druck  $p$  und einer ähnlichen Lagerungsdichte verglichen. Die Werte aus den zyklischen Triaxialversuchen und den RC-Versuchen stimmen gut überein (Abweichungen bezogen auf  $G_0$  aus dem RC-Versuch: 3 % bis 10 %, siehe letzte Spalte von Tabelle 1). In Tabelle 1 ist die Anisotropie der mittleren Spannungen in den Triaxialversuchen ( $\sigma_1/\sigma_3 = 2$ ) noch nicht berücksichtigt. Diese führt gegenüber dem isotropen Zustand ( $\sigma_1/\sigma_3 = 1$ ) zu einem leichten Anstieg des Elastizitätsmoduls und einer Reduzierung des Schubmoduls (jeweils ca. 10 % [4]). Setzt man in Gleichung 6 im Zähler  $E_{hyst,0,\sigma_1/\sigma_3=1}$

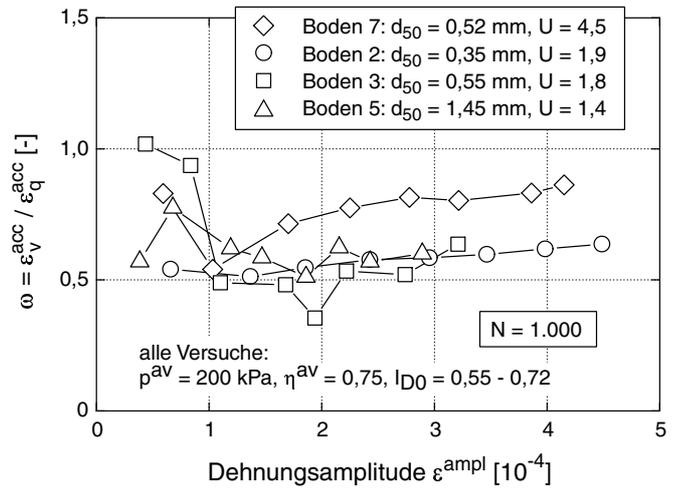


Fig. 11: Verhältnis der bleibenden volumetrischen und deviatorischen Dehnungen (Akkumulationsrichtung) als Funktion der Dehnungsamplitude  
 Fig 11.: Ratio of the residual volumetric and deviatoric strains (direction of accumulation) as a function of the strain amplitude

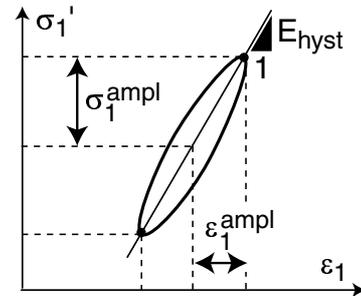


Fig. 13: Definition des hysteretischen Elastizitätsmoduls  $E_{hyst}$   
 Fig 13.: Definition of the hysteretic modulus of elasticity  $E_{hyst}$

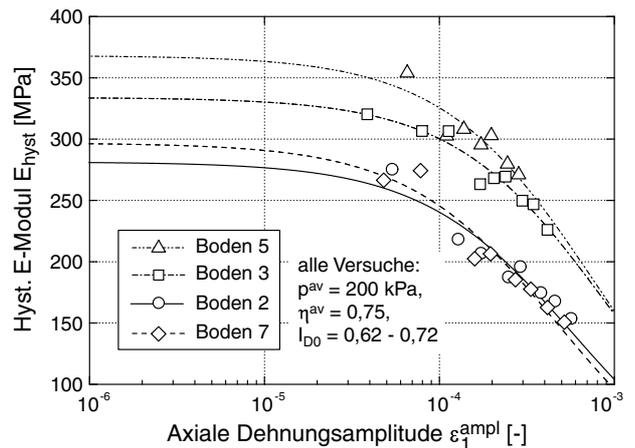


Fig. 14: Hysteretischer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit der axialen Dehnungsamplitude für die getesteten Kornverteilungskurven  
 Fig 14.: Hysteretic modulus of elasticity in dependence on the axial strain amplitude for the tested grain size distribution curves

Bo- den	Zyklische Triaxialver- suche ( $p^{\text{av}} = 200$ kPa)			RC-Versuche ( $p = 200$ kPa)		Unter- schied $\Delta G_0$ [%]
	$I_{D0}$ [-]	$E_{\text{hyst},0}$ [MPa]	$G_0$ aus $E_{\text{hyst},0}$ [MPa]	$I_{D0}$ [-]	$G_0$ [MPa]	
2	0,62- 0,68	281	117	0,63	120	3
3	0,55- 0,64	334	139	0,58	126	10
5	0,66- 0,69	368	153	0,63	143	7
7	0,64- 0,72	297	124	0,61	128	3

Table 1: Vergleich der Schubmoduli  $G_0$  aus den zyklischen Triaxialversuchen und den Resonant Column Versuchen

Table 1: Comparison of the shear moduli  $G_0$  in the cyclic triaxial tests and in the resonant column tests

= 0,9  $E_{\text{hyst},0,\sigma_1/\sigma_3=2}$  ein, so liegen die Abweichungen zwischen Triaxial- und RC-Versuchen zwischen 1 % und 13 %.

Insgesamt ist die Übereinstimmung der Steifigkeiten aus diesen beiden grundsätzlich verschiedenen Versuchstypen sehr zufriedenstellend. In [1] wurde bereits gezeigt, dass die Steifigkeiten aus den RC-Versuchen gut mit den Steifigkeiten übereinstimmen, die aus der Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Scherwelle in einer Triaxialprobe mit Hilfe von piezoelektrischen Elementen (u.a. sog. Bender Elements) resultieren.

## 5 Zusammenfassung

Der Einfluss der Kornverteilungskurve der nichtbindigen Böden auf die dynamische Steifigkeit und die bleibenden Verformungen unter zyklischer Belastung wurde experimentell untersucht. Aus den Resonant Column Versuchen ergaben sich folgende Erkenntnisse:

- Der dynamische Schubmodul bei kleinen Dehnungen  $G_0$  hängt für enggestufte Böden  $U < 1,9$  nicht vom mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$  ab.
- Ein ungleichförmiger Boden ( $U = 4,5$ ) weist bei gleicher Porenzahl und gleicher Spannung einen um bis zu 100 % geringeren Schubmodul auf als ein gleichförmiger Boden.
- Die Formeln nach Hardin [2] in den Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 "Baugrunddynamik" [3] überschätzen die Steifigkeit  $G_0$  des ungleichförmigen Bodens um bis zu 70 %. Eine Erweiterung der Formeln um den Einfluss der Ungleichförmigkeit (und des Feinkornanteils [6]) sollte angestrebt werden.
- Der mittlere Korndurchmesser  $d_{50}$  beeinflusst den Anstieg des Schubmoduls mit dem mittleren Druck kaum ( $G_0 \sim p^n$  mit  $0,41 \leq n \leq 0,47$ ). Bei einem ungleichförmigen Boden zeigt  $G_0$  schneller mit  $p$  ( $G_0 \sim p^{0,55}$ ).

- Die Kurven  $G/G_0(\gamma^{\text{ampl}})$  und  $D(\gamma^{\text{ampl}})$  sind unabhängig von  $d_{50}$ . Die Abnahme des Schubmoduls und die Zunahme des Dämpfungsgrades mit  $\gamma^{\text{ampl}}$  verläuft bei einem ungleichförmigen Boden schneller als bei einem gleichförmigen Boden.

Aus den zyklischen Triaxialversuchen kann folgendes geschlossen werden:

- Bei gleicher zyklischer Belastung (d.h. bei gleicher Spannungs- oder Dehnungsamplitude) steigen die bleibenden Verformungen mit abnehmendem mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$ .
- Ungleichförmige Böden verdichten sich unter zyklischer Belastung wesentlich schneller als gleichförmige Böden.

Außerdem konnte gezeigt werden, dass die im Resonant Column Versuch gemessenen Steifigkeiten gut mit den Werten übereinstimmen, die im zyklischen Triaxialversuch aus der Spannungs-Dehnungs-Hysterese ermittelt werden.

## Danksagung

Teile der in diesem Aufsatz vorgestellten Versuche wurden im Rahmen des Teilprojektes A8 "Einfluss der Strukturveränderung im Boden auf die Lebensdauer von Bauwerken" des Sonderforschungsbereiches SFB 398 "Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte unter Schädigungs- und Deteriorationsaspekten" der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) durchgeführt. Andere Versuchsreihen waren Teil des Projektes "Analytical and Numerical Studies on Microstructure Effects of the Response of Elastic Solids and Structures" im IKYDA - Programm des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD). An dieser Stelle wird der DFG und dem DAAD für die finanzielle Unterstützung gedankt.

## References

- [1] T. Wichtmann and T. Triantafyllidis. Dynamische Steifigkeit und Dämpfung von Sand bei kleinen Dehnungen. *Bautechnik*, 82(4):236–246, 2005.
- [2] B.O. Hardin and W.L. Black. Sand stiffness under various triaxial stresses. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 92(SM2):27–42, 1966.
- [3] *Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 "Baugrunddynamik" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT)*, 2001.
- [4] T. Wichtmann and Th. Triantafyllidis. Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part II: cyclic axial preloading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24(11):789–803, 2004.

- [5] B.O. Hardin and V.P. Drnevich. Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 98(SM7):667–692, 1972.
- [6] T. Iwasaki and F. Tatsuoka. Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands. *Soils and Foundations*, 17(3):19–35, 1977.
- [7] T. Kokusho and Y. Yoshida. SPT N-value and S-Wave Velocity for Gravely Soils with Different Grain Size Distribution. *Soils and Foundations*, 37(4):105–113, 1997.
- [8] T. Wichtmann, A. Niemunis, and T. Triantafyllidis. Setzungsakkumulation in nichtbindigen Böden unter hochzyklischer Belastung. *Bautechnik*, 82(1):18–27, 2005.
- [9] J. Helm, J. Laue, and Th. Triantafyllidis. Untersuchungen an der RUB zur Verformungsentwicklung von Böden unter zyklischen Belastungen. In *Beiträge zum Workshop: Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrungen und Forschungsergebnisse, Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, Heft Nr. 32*, pages 201–222, 2000.
- [10] T. Triantafyllidis. Bodenverflüssigung infolge zyklischer Belastung. *Georex*, (3):1–16, 2003.
- [11] G. Castro and S.J. Poulos. Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 103(GT6):501–516, 1977.
- [12] K.L. Lee and J.A. Fitton. Factors affecting the cyclic loading strength of soil. In *Vibration Effects of Earthquakes on Soils and Foundations, ASTM Special Technical Publication 450*, pages 71–95, 1969.
- [13] L.-K. Chien, Y.-N. Oh, and C.-H. Chang. Effects of fines content on liquefaction strength and dynamic settlement of reclaimed soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 39:254–265, 2002.
- [14] T. Kokusho, T. Hara, and R. Hiraoka. Undrained shear strength of granular soils with different particle gradations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 130(6):621–629, 2004.
- [15] R.T. Wong, H.B. Seed, and C.K. Chan. Cyclic loading liquefaction of gravelly soils. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 101(6):571–583, 1975.
- [16] M.D. Evans and S. Zhou. Liquefaction behavior of sand-gravel composites. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 121(3):287–298, 1995.
- [17] K. Güc. Dynamische Bodeneigenschaften eines Sandes und ihre Veränderung durch zyklische Belastungen. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, 2002.

#### Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Torsten Wichtmann, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Theodor Triantafyllidis, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Universitätsstraße 150, 44780 Bochum