

Torsten Wichtmann  
 Thorsten Sonntag  
 Theodor Triantafyllidis

# Über das Erinnerungsvermögen von Sand unter zyklischer Belastung

Zum Zweck der Messung der Veränderung von dynamischem Schubmodul  $G_{\text{dyn}}$  und Dämpfungsmaß  $D$  von Bodenproben während einer zyklischen Belastung wurde am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik an der Ruhr-Universität Bochum ein Resonant-Column-Gerät (kurz: RC-Gerät) entwickelt und gebaut. Die wesentliche Funktionsweise des RC-Versuches und die theoretischen Grundlagen werden präsentiert. Weiterhin wird das Versuchsgerät, seine Meßtechnik und Kalibrierung beschrieben. Es werden die Ergebnisse zweier Versuchsreihen an Sandproben vorgestellt. In der ersten Reihe wurde die Veränderung der dynamischen Parameter nach einer zyklischen, axialen Belastung in einer Lastpresse beobachtet. In der zweiten Testreihe wurden Proben einer dynamischen Torsionsbelastung im RC-Gerät ausgesetzt. Auch hier wurde die Veränderung von  $G_{\text{dyn}}$  und  $D$  gemessen. Es wird gezeigt, daß der Sand eine Art "Erinnerungsvermögen" bezüglich der Anzahl der Zyklen und der Dehnungen während der Vorbelastung aufweist. Außerdem scheint die Richtung der Belastung der Probe und die Polarisation der durch die Probe geschickten Welle (Scher- oder Kompressionswelle) eine Rolle zu spielen.

**On the memory capacity of sand under cyclic loading.** For the purpose of measuring the change of dynamic shear modulus  $G_{\text{dyn}}$  and damping ratio  $D$  of soil samples under cyclic loading a resonant column (RC) device is developed and manufactured at the Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering at Ruhr University Bochum. An explanation of the basic principles of the RC device and the theoretical background is given. The elements of the test device, the data acquisition system and equipment and the calibration of the apparatus is presented. The present paper reports on two series of RC tests on sand specimens carried out up to now. During the first series of tests the change of dynamic properties after cyclic axial loading in a load press was measured. In the second series of tests specimens were exposed to dynamic torsional loading in the RC device under a given maximum strain. The change of  $G_{\text{dyn}}$  and  $D$  was measured. It is demonstrated that the sand exhibits a kind of memory related to the number of cycles and the strain amplitude during the prestraining. As indicated from the results the direction of loading and the polarization of the wave (compressional or shear wave) sent through the specimen seems to be of high importance.

## 1 Einführung

Zyklische Belastungen von Böden kommen in der Praxis z.B. unter Maschinenfundamenten oder Trassen schie-nengebundener Verkehrsmittel vor. Als aktuelles Beispiel sind hier auch die Gründungen der aufgeständerten Fahrbahn von Magnetschwebbahnen zu nennen. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit dieser zyklisch belasteten Bauwerke gegenüber Setzungsdifferenzen kommt der Berechnung der Setzungen des Bodens unter einer zyklischen Belastung eine hohe Bedeutung zu.

Das Setzungsverhalten eines Bodens unter zyklischer Belastung läßt sich durch die üblichen Zustandsvariablen der Bodenmechanik (Porenzahl  $e$  und Spannungstensor  $\mathbf{T}$ ) allerdings nicht ausreichend beschreiben. Vielmehr hat sich in zyklischen Triaxialversuchen (siehe [9],[11]) gezeigt, daß eine Probe, die zuvor mit einer definierten Anzahl von Zyklen  $N$  belastet wurde und nach der zyklischen Vorbelastung die Porenzahl  $e$  besitzt, unter gleichen Spannungsverhältnissen ein weitaus geringeres Setzungspotential aufweist als eine Probe, die mit dieser Porenzahl  $e$  eingebaut wurde, aber keine zyklische Vorbelastung erfahren hat.

Es wird also eine weitere Variable benötigt, die in der Lage ist, die Belastungs-Vorgeschichte des Bodens wiederzugeben. Diese vermutlich tensorielle Zustandsvariable wird in der Struktur des Bodens gesucht. Dabei ist es wichtig, eine Methode zu finden, mit der der Anfangswert der Strukturvariablen eines Bodens in situ festgestellt werden kann.

Eine im Bereich der Geophysik angewandte in situ-Untersuchungsmethode ist die Laufzeitmessung von polarisierten Wellen. Aus diesen Laufzeiten können die Steifigkeiten des durchschallten Materials im Bereich kleiner Dehnungen bestimmt werden. Die Frage ist, ob und inwiefern eine zyklische Vorbelastung das Materialverhalten bei kleinen Dehnungen verändert. Besonders wichtig ist es, den Anfangswert der Strukturvariablen mit den Messungen der Wellenausbreitung in situ zu korrelieren.

In Laborversuchen kann die Schubsteifigkeit im Bereich kleiner Dehnungen mit dem Resonant Column Gerät bestimmt werden. Am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik an der Ruhr-Universität Bochum wurde daher ein Resonant Column Gerät entwickelt und gebaut. Versuche mit dem RC-Gerät sollen zeigen, ob eine zyklische Belastung (sowohl Torsions- als auch axiale Belastung) das Verhalten des Bodens bei kleinen Deh-

nungsamplituden beeinflusst. Die Versuche beschränken sich zunächst auf granulare Böden.

In dieser Arbeit soll zunächst die Theorie des Resonant Column Versuches kurz vorgestellt werden, anschließend werden die Ergebnisse zweier durchgeführter Versuchsreihen mit zyklischer Belastung an Sandproben präsentiert.

## 2 Theoretische Grundlagen des RC-Versuches

Der Resonant-Column-Versuch (Resonanzsäulen-Versuch) dient der Bestimmung dynamischer Stoffparameter eines Bodens an einer zylindrischen Probe, die Torsionsschwingungen kleiner Dehnungsamplitude ausgesetzt wird. Bei Variation der Erregerfrequenz der Probe wird die Eigenfrequenz  $f_R$  ermittelt. Aus der Resonanzfrequenz des Systems kann die Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  sowie der dynamische Schubmodul  $G_{\text{dyn}}$  bestimmt werden. Außerdem kann das Dämpfungsmaß  $D$  (Lehr'sches Maß) des Bodens mit Hilfe dieses Versuches ermittelt werden. Bild 1a zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau eines RC-Versuches.

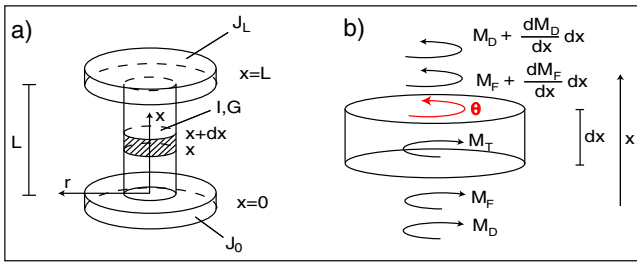


Bild 1: a) Prinzipieller Versuchsaufbau, b) Gleichgewicht am differentiellen Scheibenelement

Fig. 1: a) Principle scheme of the resonant column test, b) Equilibrium at differential disc element

Der Versuchsaufbau besteht aus einer zylindrischen Bodenprobe der Länge  $L$ , die an ihren Enden mit einer Fuß- bzw. Kopfmass verbunden ist. Die polaren Massenträgheitsmomente dieser Endmassen werden mit  $J_0$  (Fußmasse) bzw.  $J_L$  (Kopfmass) bezeichnet.

Bei der Torsion der Bodenprobe im RC-Gerät kann bei entsprechender Ausbildung des Fußbereiches davon ausgegangen werden, daß der Anteil der Abstrahlungsenergie minimal ist und deshalb nur drei Momentenanteile von Bedeutung sind. Diese sind das Moment aus der Massenträgheit  $M_T$  der Probe, das Moment aus der elastischen Verformung der Probe, also aus Federung  $M_F$  und ein Moment aus der Dämpfung  $M_D$  der Probe (Materialdämpfung). Diese Momente können wie folgt ausgedrückt werden:

$$M_T = \varrho I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} dx \quad (1)$$

$$M_F = G I \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2)$$

$$M_D = \mu I \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (3)$$

mit

$\theta$	Verdrehwinkel der Probe
$G$	Dynamischer Schubmodul der Probe
$I$	Polares Trägheitsmoment $\int r^2 dA$
$\mu$	Scher-Viskositätskoeffizient
$\varrho$	Dichte des Bodens

Durch Bildung des Momentengleichgewichts am differentiellen Scheibenelement (siehe Bild ??b) erhält man:

$$\mu I \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) dx + G I \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} dx - I \varrho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} dx = 0$$

Zur Vereinfachung der Herleitung wird in den meisten Fällen angenommen, daß der Momentenanteil aus der Materialdämpfung klein ist gegenüber dem Momentenanteil aus der Federwirkung und daher wird dieser Term zumeist vernachlässigt. Man erhält dann die bekannte Wellengleichung:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (4)$$

mit der Scherwellengeschwindigkeit:

$$v_s = c = \sqrt{\frac{G}{\varrho}} \quad (5)$$

Zur Lösung des Eigenwertproblem es müssen zunächst die Randbedingungen formuliert werden. Als Gleichgewichtsbedingung am Probenkopf kann

$$M_T + M_F = 0$$

aufgestellt werden und am Probenfuß muß folgende Bedingung erfüllt werden:

$$M_T - M_F = 0$$

Mit dem Moment aus der Massenträgheit der oberen Endmasse

$$M_T = I_L \varrho L \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} h_L = J_L \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \Big|_{x=L}$$

und dem Moment aus der Federwirkung an der Stelle  $x = L$  ergibt sich:

$$J_L \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \Big|_{x=L} + G I \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0 \quad (6)$$

Mit dem Moment aus der Massenträgheit der unteren Endmasse

$$M_T = I_0 \varrho_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} h_0 = J_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \Big|_{x=0}$$

und dem Moment aus der Federwirkung an der Stelle  $x = 0$  erhält man die zweite Randbedingung:

$$J_0 \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \Big|_{x=0} - G I \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (7)$$

Die partielle Differentialgleichung zur Beschreibung des RC-Versuches wird mit Hilfe eines Produktansatzes gelöst:

$$\theta(x, t) = f(t) g(x) \quad (8)$$

Mit der Kreisfrequenz  $\omega$  erhält man:

$$\theta(x, t) = \left[ A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) \right] \left[ C \cos\left(\frac{\omega x}{c}\right) + D \sin\left(\frac{\omega x}{c}\right) \right] \quad (9)$$

Der Ansatz für den Verdrehwinkel (9) wird in die zwei Randbedingungsgleichungen (6) und (7) eingesetzt und mit der Einführung einer bezogenen Kreisfrequenz  $a$

$$a = \frac{\omega L}{c} \Rightarrow \omega = \frac{ca}{L} \quad (10)$$

können die Gleichungen am Probenkopf und Probenfuß folgendermaßen geschrieben werden:

$$\frac{GI}{c} \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \frac{J_0}{J} a \\ 1 - \frac{J_0}{J} a \tan(a) & -\frac{J_0}{J} a - \tan(a) \end{bmatrix}}_{\mathbf{M}} \begin{bmatrix} D \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Aus der Bedingung  $\det \mathbf{M} = 0$  kann die implizite Eigenwertgleichung für den allgemeinen Fall einer an Kopf und Fuß freien Probe bestimmt werden. Diese lautet:

$$a \tan(a) - \frac{J^2}{J_0 J_L} \frac{\tan(a)}{a} = \frac{J}{J_0} + \frac{J}{J_L} \quad (12)$$

Die Bild 2 zeigt die Lösung von Gl. (12) in Abhängigkeit der Massenträgheitsmomente  $J_0$ ,  $J_L$  und  $J$  von Probenfuß, Probenkopf und der Bodenprobe selbst. Für den Fall des Bochumer RC-Gerätes und Proben der Geometrie  $d = 10$  cm und  $h = 30$  cm zeigt Bild 3, daß der Verlauf von  $a$  über der Dichte der Probe  $\rho$  gut durch eine lineare Funktion angenähert werden kann.

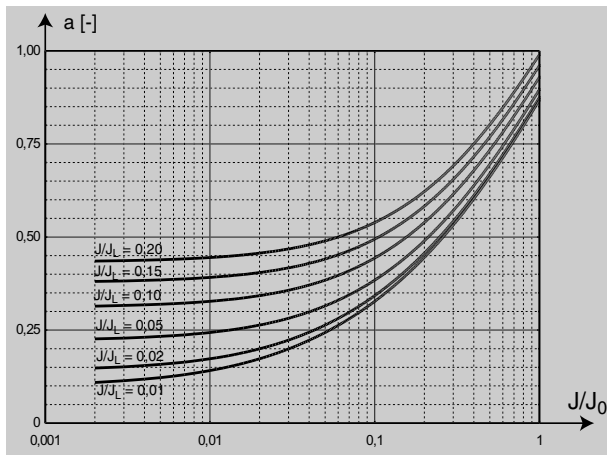


Bild 2: Parameter  $a$  in Abhängigkeit der Massenträgheitsmomente  $J_0$ ,  $J_L$  und  $J$

Fig. 2: Parameter  $a$  versus the moments of inertia  $J_0$ ,  $J_L$  and  $J$

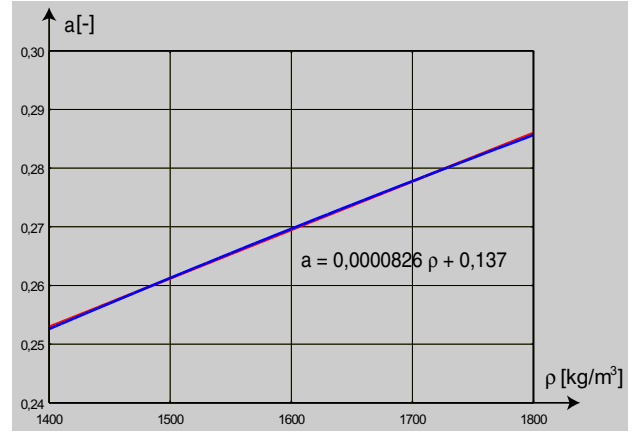


Bild 3: Verlauf  $a(\rho)$  für das RC-Gerät in Bochum und Proben der Geometrie  $d = 10$  cm und  $h = 30$  cm

Fig. 3: Function  $a(\rho)$  for the RC apparatus in Bochum and for specimens of 10 cm diameter and 30 cm height

## 2.1 Berechnung des dynamischen Schubmoduls

Mit der Bestimmung der bezogenen Kreisfrequenz  $a$  aus Gl. (12) kann die Eigenfrequenz  $f_R$  der Probe berechnet werden. Aus Gl. (10) folgt:

$$f_R = \frac{a}{2\pi L} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (13)$$

Der dynamische Schubmodul kann aus der Resonanzfrequenz und der bezogenen Kreisfrequenz  $a$  ermittelt werden. Eine Umformung von Gl. (13) liefert:

$$G = \left( \frac{2\pi L f_R}{a} \right)^2 \rho \quad (14)$$

## 2.2 Berechnung der Dehnungsamplitude

Die Scherdehnung  $\gamma$  ist bei der Verdrillung eines zylindrischen Körpers mit dem Radius  $R$  nicht homogen über das Volumen der Probe verteilt und wird folgendermaßen beschrieben (siehe Bild 4a):

$$\gamma(x, r, t) = r \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x} \quad (15)$$

Dabei ist  $r$  der Abstand eines Punktes von der Achse der Probe ( $0 \leq r \leq R$ ). Aus der Bedingung zum Zeitpunkt der maximalen Kopfauslenkung (siehe Bild 4b)

$$\theta(x = L, t_{\max}) = \theta_{\max}$$

erhält man den Verlauf der Scherdehnung  $\gamma$  über den Ort  $x$  (Höhe der Probe) zum Zeitpunkt der maximalen Verdrehung der Probe:

$$\gamma(x, r, t_{\max}) = -r \frac{\theta_{\max}}{\cos(a) - \frac{J_0}{J} a \sin(a)} \frac{a}{L} \left[ \sin\left(\frac{ax}{L}\right) + \frac{J_0}{J} a \cos\left(\frac{ax}{L}\right) \right] \quad (16)$$

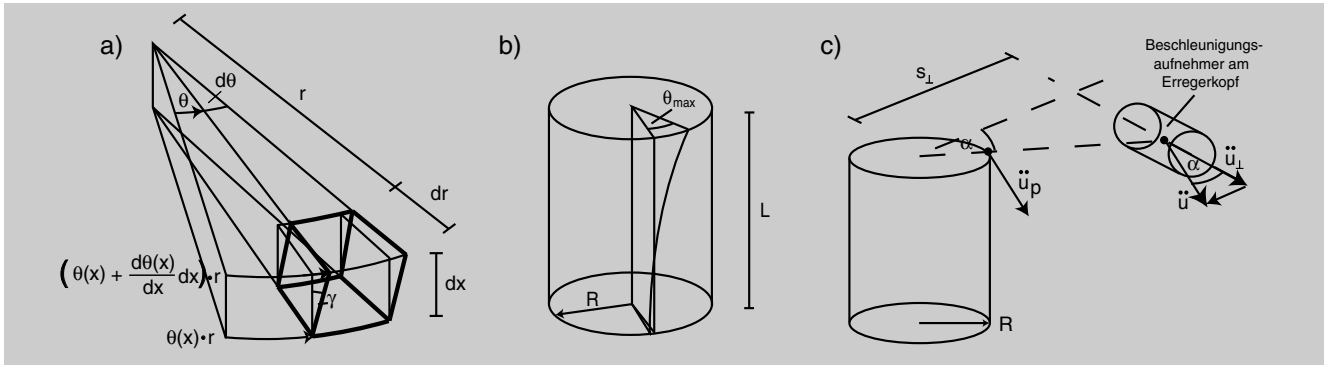


Bild 4: a) Definition der Scherdehnung  $\gamma$ , b) Definition der Kopfverdrehung  $\theta_{\max}$ , c) Definition von  $\ddot{u}_{\perp}$  und  $s_{\perp}$   
 Fig. 4: a) Definition of shear strain  $\gamma$ , b) definition of the displacement angle  $\theta_{\max}$  at the top of the specimen, c) definition of  $\ddot{u}_{\perp}$  and  $s_{\perp}$

Als Dehnungsamplitude  $\bar{\gamma}_{\max}$  betrachtet man üblicherweise den Mittelwert der Scherdehnung im Probenvolumen zur Zeit der maximalen Auslenkung:

$$\bar{\gamma}_{\max} = \frac{1}{V} \int_V \gamma(x, r, t_{\max}) dV \quad (17)$$

Unter Ansetzung einer sinusförmigen Randverschiebung  $u(r = R, x, t)$  der Probe

$$u(r = R, x, t) = A(x) \sin(\omega t) \quad (18)$$

und mit der Beziehung

$$u(r = R, x = L, t_{\max}) = \theta_{\max} R \quad (19)$$

ergibt sich für die mittlere Dehnungsamplitude folgender Ausdruck:

$$\bar{\gamma}_{\max} = \underbrace{\frac{\ddot{u}_{\perp}}{f_R^2} \frac{d}{12\pi^2 L s_{\perp}} \left[ 1 - \frac{1}{\cos(a) - \frac{32J_0}{\pi\rho L d^4} a \sin(a)} \right]}_{\zeta(\rho)} \quad (20)$$

Dabei bedeuten (siehe Bild 4c):

- $\ddot{u}_{\perp}$  am äußeren Beschleunigungsaufnehmer des Erregerkopfes in dessen Achsrichtung gemessene Beschleunigung
- $s_{\perp}$  Abstand der horizontalen Achse dieses Beschleunigungsaufnehmers von der vertikalen Achse der Probe
- $d$  Durchmesser der Probe

Wie aus Bild 5 ersichtlich ist, ist der Faktor  $\zeta$  für eine bestimmte Probengeometrie und für übliche Dichten des Bodens nahezu unabhängig von der Dichte  $\rho$ , kann also in guter Näherung als konstant betrachtet werden.

### 2.3 Berechnung des Dämpfungsmaßes $D$

Das Dämpfungsmaß  $D$  ist definiert aus dem Verhältnis der während eines Zyklus in der Resonanzfrequenz

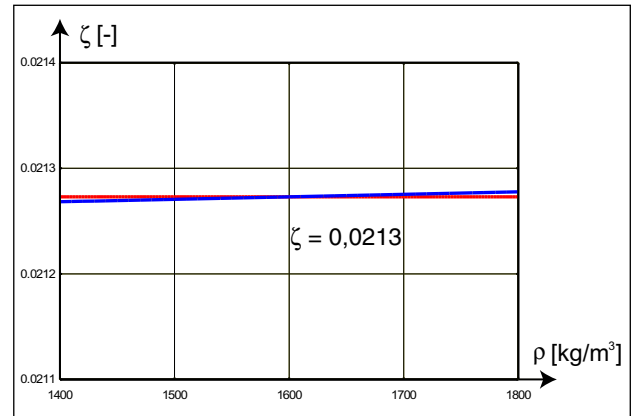


Bild 5: Faktor  $\zeta$  für das RC-Gerät in Bochum und Proben der Geometrie  $d = 10$  cm und  $h = 30$  cm

dissipierten Energie  $\Delta W$  zu der Gesamtenergie  $W$  der Probe:

$$D = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \quad (21)$$

Die Gesamtenergie der Probe ermittelt sich bei einer über das Volumen gemittelten Dehnungsamplitude  $\bar{\gamma}_{\max}$  zum Zeitpunkt der maximalen Kopfauslenkung aus:

$$W = \int_V \frac{1}{2} G \gamma(x, r, t_{\max})^2 dV = \frac{1}{2} G \bar{\gamma}_{\max}^2 V \quad (22)$$

Dabei bezeichnet  $V$  das Volumen der Probe. Die pro Zyklus dissipierte Energie  $\Delta W$  entspricht der Fläche der Lissajous-Figur. Die Lissajous-Figur entsteht durch Auftragen der Werte der Verschiebung  $u_F$  in der Achse des Schwingerregers über der Erregerkraft  $F$  (siehe Bilder 6a und 6b)

Aus den Achsenabschnitten der Lissajous-Figur, also der doppelten Amplitude von Verschiebung  $u_{F,2\text{-Ampl}}$  und Erregerkraft  $F_{2\text{-Ampl}}$ , kann die dissipierte Energie berechnet werden:

$$\Delta W = \frac{1}{4} \pi u_{F,2\text{-Ampl}} F_{2\text{-Ampl}} \quad (23)$$

Demzufolge kann mit den Gln. (22) und (23) das Dämpfungsmaß  $D$  bestimmt werden.

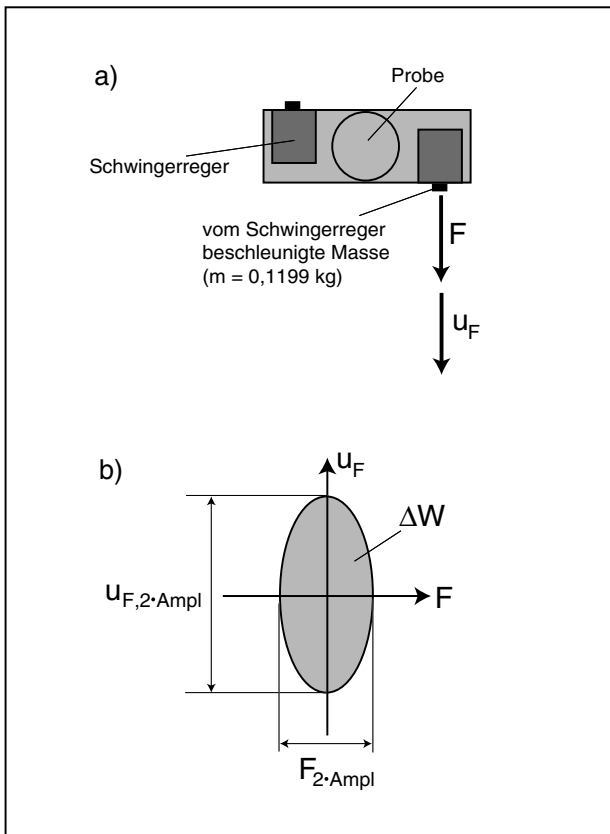


Bild 6: a) Schematische Darstellung der Draufsicht auf den Erregerkopf, b) Lissajous-Figur  
 Fig. 6: a) Scheme of the driving head and the corresponding movement b) Lissajous-figure

### 3 Beschreibung des Aufbaus, der Meßtechnik und der Kalibrierung des RC-Gerätes

Die Bild 7a zeigt eine Schemaskizze des RC-Gerätes und in Bild 7b ist das neue Versuchsgerät mit einer eingebauten Probe zu sehen.

Die untere Endmasse wird als drehbarer, kugellagerter Sockel mit einem im Vergleich zur Probe und zur Kopfmasse großen Massenträgheitsmoment  $J_0$  ausgebildet. Diese Kugellagerung sorgt dafür, daß fast keine Energieabstrahlung in die Umgebung stattfindet. Der quaderförmige Erregerkopf stellt die obere Endmasse dar. Zu Schwingungen angeregt wird der Kopf durch zwei im Abstand von 10 cm zur Probenachse angeordnete elektrodynamische Schwingerreger. Die Bodenprobe wird von einer dünnen Latex-Membran umgeben, die mittels O-Ringen luftdicht an die Endplatten der Probe angeschlossen wird. Um eine schlupffreie Verbindung zwischen Probe und Endplatten zu gewährleisten, werden die Probenendplatten besandet. Die Probenendplatten sind wiederum schlupffrei mit der Fußmasse bzw. dem Erregerkopf verbunden. Dieses System aus Probe und Endmassen ist in einer Druckzelle eingeschlossen, so daß ein seitlich stützender Luftdruck auf die Probe aufgebracht werden kann. Um eine Übertragung von Schwingungen aus dem Gebäude auf die Probe im RC-

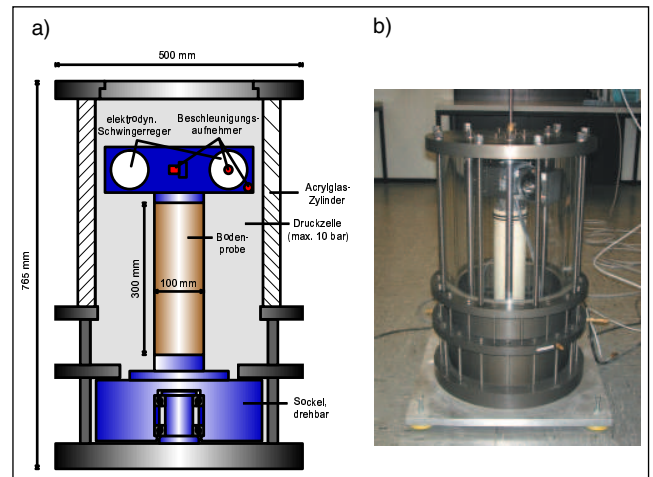


Bild 7: a) Schematischer Aufbau des RC-Gerätes, b) RC-Gerät am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der RUB

Fig. 7: a) Principle scheme of the resonant column device, b) RC apparatus at the Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering at Ruhr-University Bochum

Gerät zu vermeiden, wird das Gerät auf vier Schwingungsdämpfern aus einem Elastomer gelagert.

Eine schematische Darstellung des Regelkreises und der Meßwerterfassung enthält Bild 8. Das sinusförmige Erregersignal wird mit einem Funktionsgenerator erzeugt. Über einen Leistungsverstärker wird das Signal auf die Schwingerreger gegeben. Auf dem Probenkopf und den von den Schwingerreger beschleunigten Massen sind insgesamt sechs Beschleunigungsaufnehmer angebracht. Damit können die Verschiebungen des Probenkopfes durch Aufintegration der Beschleunigung ebenso bestimmt werden wie die Erregerkraft, die sich aus dem Produkt der Masse der vom Erreger beschleunigten Erregermasse mit der Beschleunigung dieser Masse ergibt. Außerdem können mit dieser Anzahl von Beschleunigungsaufnehmern eventuelle Schiefstellungen des Erregerkopfes bzw. der Probe durch den Vergleich der Signale verschiedener Aufnehmer aufgedeckt werden. Die Meßsignale der Beschleunigungsaufnehmer werden über Ladungsverstärker an ein Digital-Speicheroszilloskop geleitet.

Die Erregerfrequenz  $f$  wird am Funktionsgenerator so lange variiert, bis die Achsen der Lissajous-Figur senkrecht stehen. Damit hat man die Resonanzfrequenz  $f_R$  des Systems bestimmt.

Die Kalibrierung, d.h. die genaue Bestimmung des Massenträgheitsmomentes  $J_L$  des Erregerkopfes, wurde mit Hilfe eines Aluminiumstabs mit dem Durchmesser  $d = 4$  cm und der Höhe  $h = 30$  cm durchgeführt. Die Dichte des Aluminiums wurde zu  $\rho = 2830$  kg/m<sup>3</sup> bestimmt, der Schubmodul konnte mit  $G = 27 \cdot 10^9$  N/m<sup>2</sup> angesetzt werden. Der Aluminiumstab wurde fest mit der Fußmasse und dem Erregerkopf verschraubt, anschließend wurde die Resonanzfrequenz  $f_R$  des Systems bestimmt. Gemessen wurde der Wert  $f_R = 96,40$  Hz. Mit

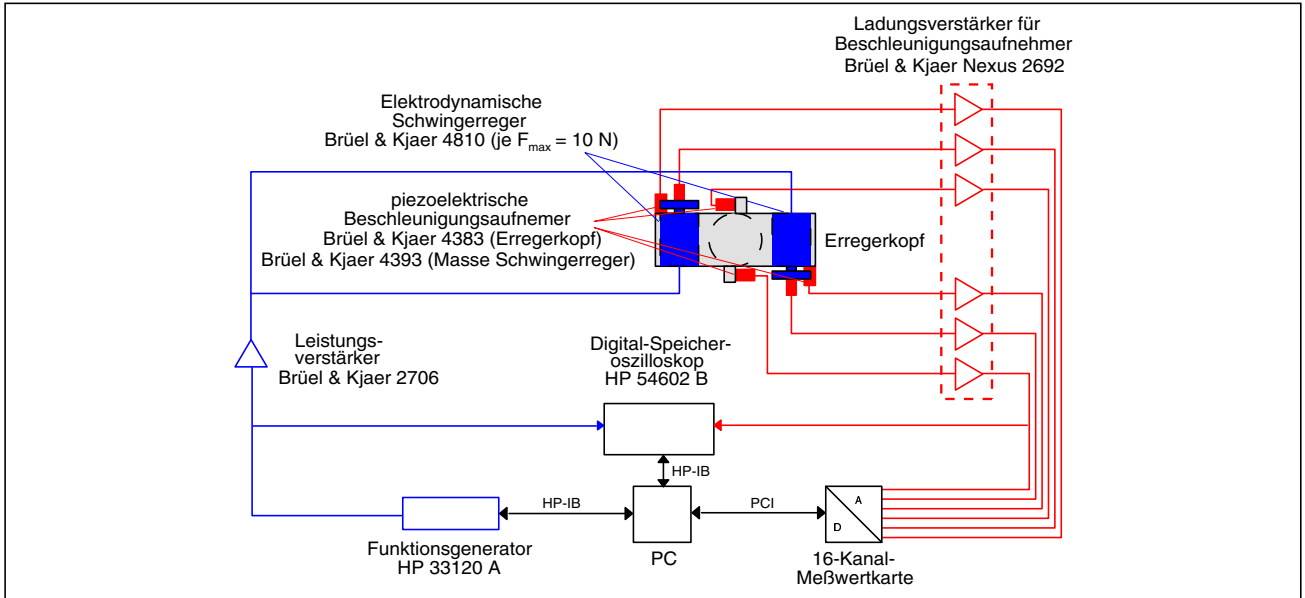


Bild 8: Schema des Regelkreises und der Meßwert erfassung des RC-Gerätes  
 Fig. 8: Scheme of control circuit and data acquisition of the RC apparatus

Hilfe der Gl. (13) wurde der Wert der bezogenen Kreisfrequenz  $a$  berechnet. Aufgrund der einfachen Geometrie der Fußmasse konnte deren Massenträgheitsmoment  $J_0$  berechnet werden. Es ergab sich:

$$J_0 = 1,190663 \text{ kgm}^2$$

Anschließend konnte aus der Gl. (12) das Massenträgheitsmoment des Kopfes  $J_L$  bestimmt werden:

$$J_L = 0,067039 \text{ kgm}^2$$

Eine Überprüfung dieses Wertes erfolgte über die Berechnung des Massenträgheitsmomentes  $J_L$  aus der Addition der Massenträgheitsmomente (inklusive Steinerischem Anteil) der einzelnen Bauelemente des Erregerkopfes. Dabei ergab sich ein Wert für  $J_L$  von

$$J_L = 0,065221 \text{ kgm}^2$$

und damit eine Abweichung um 2,7 % vom experimentell bestimmten Wert. Da im rechnerisch ermittelten Wert noch Annahmen bezüglich des Schwerpunkts der elektrodynamischen Schwingerreger sowie zum Eigenmassenträgheitsmoment des Schwingerregers gemacht werden mußten (keine Angaben seitens des Herstellers erhältlich), wurde das durch die Kalibrierung ermittelte  $J_L$  als der genauere der beiden Werte angesehen und in allen folgenden Berechnungen angesetzt.

#### 4 Ergebnisse einer Versuchsreihe zur Veränderung der dynamischen Stoffparameter infolge zyklischer axialer Belastung

Im Rahmen einer ersten Versuchsreihe (siehe [12]) mit

dem neuen Resonant Column Gerät wurden Sandproben nach der Probenpräparation in einer Lastpresse zyklisch axial belastet.

Der Sand wurde mit einem Trichter bei konstant bleibender Fallhöhe von 20 cm in die Probenform eingeriebelt. Nach dem Ausschalen der Proben bei angelegtem Vakuum an das Korngerüst wurden Traggriffe an die Fußplatte der Probe montiert und die Proben wurden zur Lastpresse transportiert. Das Bild 9 zeigt eine Probe in der Lastpresse.

Der Nachweis, daß der Einfluß des Transportes unter Vakuum auf die dynamischen Parameter der Proben ohne größeren Einfluß bleibt, wurde in Versuchen, deren Ergebnisse in Bild 10 dargestellt sind, gezeigt. Dabei wurden Proben nach der Präparation in das RC-Gerät eingebaut und ihre dynamischen Eigenschaften bei sehr kleinen Dehnungen bestimmt. Anschließend erfolgte der Ausbau der Proben aus dem RC-Gerät, worauf ein Transport zunächst zur Lastpresse und danach wieder zurück zum RC-Gerät folgte. Nach dem erneuten Einbau ins RC-Gerät wurden die dynamischen Parameter nach dem Transport gemessen. Bild 10 zeigt, daß der Transport ohne größeren Einfluß auf den Schubmodul bei kleinen Dehnungen  $G_{\text{dyn}} (\gamma \approx 10^{-6})$  blieb. Die Erhöhung dieses Schubmoduls betrug maximal 3,8 %. Dabei ist allerdings auch zu bedenken, daß die Proben bis zur zweiten Messung der dynamischen Parameter insgesamt zweimal ins RC-Gerät eingebaut und einmal ausgebaut wurden, während sie bei den RC-Versuchen nach der axialen zyklischen Belastung in der Lastpresse lediglich einmal eingebaut wurden. In diesen Versuchen ist also mit einer noch geringeren Veränderung der dynamischen Parameter zu rechnen.



Die durch Vakuum aufgebrachte seitliche Spannung während der Belastung in der Lastpresse betrug  $\sigma_3 = 65 \text{ kN/m}^2$ , die mittlere vertikale Auflast wurde unter Annahme eines Erdruhedruckbeiwertes von  $k_0 = 0,5$  zu  $\sigma_1 = 130 \text{ kN/m}^2$  gewählt. Die Amplitude  $\Delta\sigma_1$  der vertikalen Spannung wurde so gewählt, daß die obere Lastgrenze auf der Bruchgerade für einen angenommenen Reibungswinkel von  $\varphi = 30^\circ$  liegt. Mit dieser Bedingung ergab sich ein Wert von  $\Delta\sigma_1 = 65 \text{ kN/m}^2$ .

Bei dem verwendeten Sand handelte es sich um einen enggestuften Feinsand ( $d_{10} = 0,08 \text{ mm}$  und  $U = 1,75$ ). Aus der zyklisch aufgebrachten Last ergaben sich Dehnungsamplituden von  $\varepsilon_{1,\text{prestrain}} = 3,5 \cdot 10^{-4}$  bei einer akkumulierten Gesamtdehnung von ca.  $\varepsilon_1 = 4 \cdot 10^{-2}$ . Nach der Belastung mit einer definierten Anzahl von Zyklen  $N$  wurden die Proben ins RC-Gerät eingebaut.

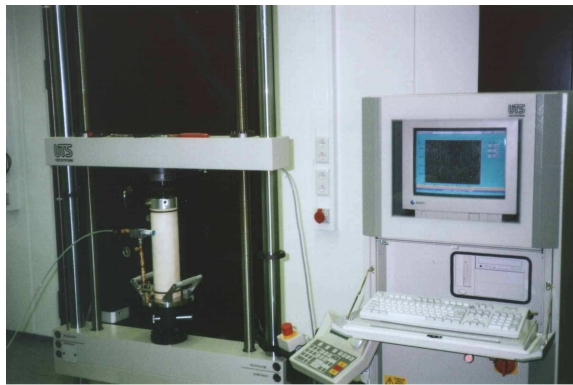


Bild 9: Zyklische axiale Belastung in der Lastpresse  
Fig. 9: Cyclic axial loading in the loading frame

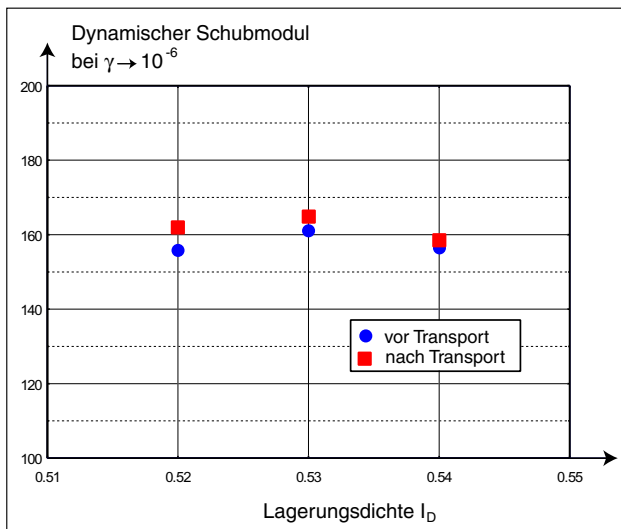


Bild 10: Dynamischer Schubmodul bei  $\gamma \approx 10^{-6}$  vor und nach einem Transport zur Lastpresse und zurück zum RC-Gerät

Fig. 10: Dynamic shear modulus at  $\gamma \approx 10^{-6}$  before and after transportation of the specimen towards the loading device and back towards the RC device

Im RC-Gerät wurden anschließend die dynamischen

Parameter  $G_{\text{dyn}}$  und  $D$  bei kleinen Scherdehnungen  $\gamma \approx 10^{-6}$  bestimmt und mit den Werten nicht zyklisch vorbelasteter Proben der gleichen Lagerungsdichte verglichen. Dem Bild 11 kann entnommen werden, daß sich die dynamische Schubsteifigkeit nach der zyklischen Belastung zum Teil signifikant von den Meßwerten der unvorbelasteten Probe (approximiert durch die schwarze Linie) unterscheidet.

Allerdings läßt sich keine Korrelation zwischen der Anzahl der Vorbelastungszyklen  $N$  und der Abweichung des dynamischen Schubmoduls von den unvorbelasteten Werten aufstellen. Während einige Proben nach einer Zyklenanzahl  $N$  eine deutliche Versteifung erfahren, zeigen andere Proben, die mit der gleichen Anzahl von Lastspielen belastet wurden, eine Abnahme der Steifigkeit. Gleiches gilt für das Dämpfungsmaß  $D$ .

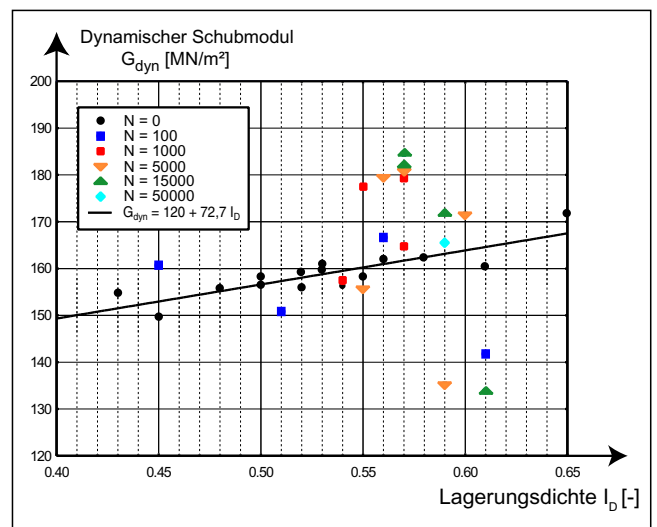


Bild 11: Veränderung des dynamischen Schubmoduls bei Scherdehnungen  $\gamma \approx 10^{-6}$  nach zyklischer axialer Belastung in der Lastpresse in Abhängigkeit der Lagerungsdichte, RC-Versuche bei  $p = 1,0 \text{ bar}$

Fig. 10: Change of dynamic shear modulus at small strains  $\gamma \approx 10^{-6}$  after cyclic loading versus the density index of the specimen, RC tests with  $p = 1,0 \text{ bar}$

Diese Versuche lassen vermuten, daß die Richtung der Vorbelastung und die Polarisation der anschließend durch die Bodenprobe geschickten Welle bei der Messung der Wellengeschwindigkeiten von Bedeutung sind. In dieser ersten Versuchsreihe wurde die zyklische Vorbelastung in axialer Richtung der Probe aufgebracht, anschließend wurde die Scherwellengeschwindigkeit (Ausbreitung vertikal, Erregung horizontal) gemessen. Erfolgsversprechender ist wahrscheinlich die Messung der Kompressionswellengeschwindigkeit in Richtung der Probenachse nach zyklischer, axialer Vorbelastung. Die Messung der Scherwellengeschwindigkeit ist nach zyklischer Torsionsvorbeltung ein brauchbares Mittel, um die Strukturveränderungen bei dieser Belastungsrichtung zu erfassen.

## 5 Ergebnisse einer Versuchsreihe zur Veränderung der dynamischen Stoffparameter infolge dynamischer Torsionsbelastung

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen wurde eine zweite Versuchsreihe mit dynamischer Torsionsvorbelastung der Proben und anschließender Messung von  $G_{\text{dyn}}$  und  $D$  im RC-Gerät geplant und durchgeführt. Die zyklische Torsionsvorbelastung wurde ebenfalls im RC-Gerät aufgebracht. Dabei wurden die Proben mit einer definierten Scherdehnungsamplitude  $\gamma_{\text{prestrain}}$  in der Resonanzfrequenz des Systems aus Probe und Endmassen mit einer bestimmten Anzahl von Zyklen  $N$  vorbelastet. Nach definierten Anzahlen von Zyklen wurde die Scherdehnungsamplitude verkleinert und anschließend wieder auf  $\gamma_{\text{prestrain}}$  erhöht. Schließlich wurde die Scherdehnungsamplitude über den Wert  $\gamma_{\text{prestrain}}$  hinaus bis zum maximal aufbringbaren Wert  $\gamma_{\text{max}}$  gesteigert. Bild 12 stellt die Verläufe des dynamischen Schubmoduls  $G_{\text{dyn}}$  und des Dämpfungsmaßes  $D$  über der Scherdehnungsamplitude  $\gamma$  in einem repräsentativen Versuch dar. Die Versuche wurden wiederholt und die Ergebnisse wurden bestätigt.

Die Versuche zeigen die Ausbildung eines Plateaus in den Verläufen von  $G_{\text{dyn}}(\gamma)$  und  $D(\gamma)$  an der Stelle der Scherdehnungsamplitude während der Vorbelastung  $\gamma_{\text{prestrain}}$ . Dieses Verhalten wurde bereits von *Li* (siehe [3], [4] und [5]) beobachtet. Weiterhin ist bemerkenswert, daß der Schubmodul bei Verringerung und anschließender Wiedererhöhung der Scherdehnungsamplitude bei Beibehaltung des isotropen Drucks kleiner ist als während der ersten Erhöhung der Scherdehnungsamplitude. Dieses Verhalten erinnert an die Darstellung von Erstbelastungs-, Ent- und Wiederbelastungsast im Druck-Porenzahl-Diagramm beim Kompressionsversuch an einem bindigen Boden. Eine merkliche Versteifung der Proben, wie sie z.B. von *Drnevich* und *Richart* (siehe [2]) festgestellt wurde, ist nicht zu beobachten. Nach Überschreitung des Plateau-Bereiches im  $G_{\text{dyn}}-\gamma$  bzw.  $D-\gamma$ -Diagramm nähert sich der Verlauf von Schubsteifigkeit und Dämpfungsmaß wieder der Kurve der nicht zyklisch vorbelasteten Proben an.

In einer umfangreichen Studie (siehe [10]) wurde die Abhängigkeit der Größe der Plateaus von der aufgetragenen Anzahl der Zyklen  $N$  und der Dehnungsamplitude während der Vorbelastung  $\gamma_{\text{prestrain}}$  für den Feinsand und einen enggestuften Mittelsand ( $d_{10} = 0,30$  mm und  $U = 1,80$ ) untersucht. Die bezogene Lagerungsdichte betrug in allen Versuchen in etwa  $I_D = 0,65$ , der isotrope Druck wurde bei  $p = 2,0$  bar konstant gehalten. Es wurden Dehnungsamplituden während der Vorbelastung von  $\gamma_{\text{prestrain}} = 0,5 \cdot 10^{-4}$  und  $\gamma_{\text{prestrain}} = 1,0 \cdot 10^{-4}$  auf die Proben aufgebracht. Die Ergebnisse der Versuche am Feinsand mit einer Dehnungsamplitude  $\gamma_{\text{prestrain}} = 1,0 \cdot 10^{-4}$  sind in der Bild 13 für den dynamischen Schubmodul und in der Bild 14 für das Dämpfungsmaß dargestellt. Dabei wird der dynamische Schubmodul auf den Wert am Anfang der Belastung bei einer Scherdehnungsamplitude  $\gamma \rightarrow 10^{-6}$  bezogen. Gleiches

gilt für das Dämpfungsmaß.

Es ist klar zu erkennen, daß die Ausbildung der Plateaus mit zunehmender Anzahl der Zyklen signifikanter wird. Der Sand "merkt" sich also nicht nur die Größe der Dehnungsamplitude  $\gamma_{\text{prestrain}}$ , die aus der Lage des Plateaus zu identifizieren ist, sondern auch die Anzahl der Lastspiele, abzuschätzen aus der Größe der Plateaufläche.

Zur Quantifizierung der Fläche der Plateaus werden die Anfangs- und Endpunkte des Plateaubereiches entsprechend Bild 15 definiert. Die Plateaufläche im Verlauf des normierten dynamischen Schubmoduls wird wie folgt bestimmt. Als Anfangspunkt wird auf der Kurve  $G_{\text{dyn}}(\gamma)$  der letzten Wiedererhöhung der Scherdehnungsamplitude nach Erreichen der maximalen Zyklenanzahl der Wendepunkt gewählt. Ab diesem Wendepunkt flacht der Verlauf von  $G_{\text{dyn}}(\gamma)$  ab. Als Endpunkt wird der Punkt gewählt, an dem der Funktionsverlauf  $G_{\text{dyn}}(\gamma)$  nach der Erhöhung von  $\gamma$  über  $\gamma_{\text{prestrain}}$  hinaus wieder auf die in Gedanken verlängerte Gerade der nicht vorbelasteten Probe ( $N = 0$ ) trifft. Gegebenenfalls muß die Kurve für  $N = 0$  dafür parallel verschoben werden. Die Fläche zwischen der geradlinigen Verbindung von Anfangs- und Endpunkt im halblogarithmisch skalierten  $G_{\text{dyn}} - \gamma$ -Diagramm und der gemessenen Kurve  $G_{\text{dyn}}(\gamma)$  der letzten Wiedererhöhung der Scherdehnungsamplitude über den Wert während der Vorbelastung hinaus wird mit  $A_{P,G_{\text{dyn}}}$  bezeichnet.

Analog wird die Plateaufläche im Verlauf des Dämpfungsmaßes definiert. Die Fläche wird mit  $A_{P,D}$  bezeichnet.

Bild 16 zeigt die Ergebnisse der Auswertung der Plateauflächen im Verlauf des normierten dynamischen Schubmoduls. Dabei wurde in Bild 16a eine halblogarithmische Darstellung gewählt, in Bild 16b sind beide Achsen linear skaliert. Da jeweils zwei Versuche mit dem gleichem Sand bei identischen Werten von  $\gamma_{\text{prestrain}}$  und  $N$  durchgeführt wurden, werden die Mittelwerte jeder Versuchsreihe mit konstantem  $\gamma_{\text{prestrain}}$  an einem bestimmten Sand zum besseren Vergleich der Ergebnisse linear miteinander verbunden.

Die Vergrößerung der Plateaus mit größer werdender Zyklenanzahl ist klar zu erkennen. Im Bereich kleiner Werte von  $N$  ist die Zunahme der Plateaufläche  $\Delta A_P$  während einer definierten Anzahl von Zyklen  $\Delta N$  größer als bei größeren Zyklenzahlen. Die Plateaufläche scheint gegen einen oberen Grenzwert zu streben, der bei 10.000.000 Zyklen allerdings noch nicht erreicht wird. Bei gleicher Zyklenanzahl  $N$ , aber unterschiedlichen Dehnungsamplituden während der Vorbelastung  $\gamma_{\text{prestrain}}$  bildet sich bei einem größeren  $\gamma_{\text{prestrain}}$  ein signifikanteres Plateau aus. Bei einer Verdoppelung von  $\gamma_{\text{prestrain}}$  von  $0,5 \cdot 10^{-4}$  auf  $1,0 \cdot 10^{-4}$  zeigt sich in dieser Versuchsreihe im Mittel in etwa auch eine Verdoppelung der Plateaufläche. Die Verläufe sind für Fein- und Mittelsand annähernd gleich.

Bei der Auswertung der Plateauflächen im Verlauf des Dämpfungsmaßes (siehe Bild 17) zeigen sich ähnliche Tendenzen wie in den Diagrammen des Schubmo-



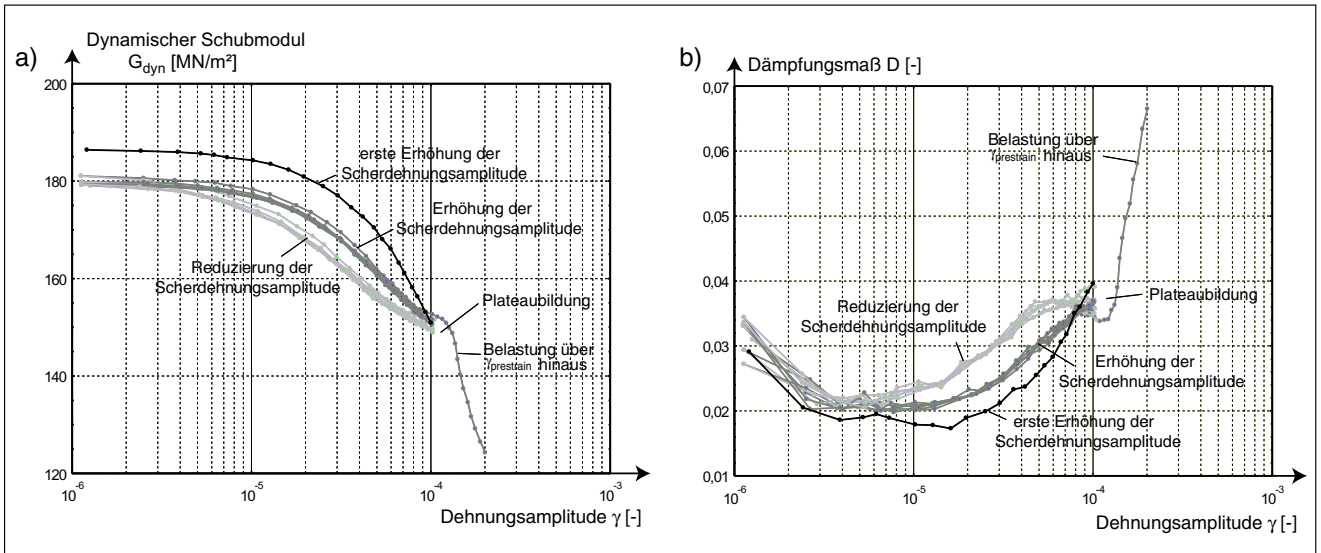


Bild 12: Veränderung von a) dynamischem Schubmodul und b) Dämpfungsmaß nach  $N = 3 \cdot 10^6$  Zyklen mit  $\gamma_{prestrain} = 10^{-4}$ , isotrope Spannung  $p = 2,0$  bar, Lagerungsdichte  $I_D = 0,64$   
 Fig. 12: Change of a) dynamic shear modulus and b) damping ratio after  $N = 3 \cdot 10^6$  cycles with  $\gamma_{prestrain} = 10^{-4}$ , isotropic pressure  $p = 2,0$  bar, density index  $I_D = 0,64$

duls. Allerdings liegt die Kurve des Mittelsandes bei  $\gamma_{prestrain} = 1,0 \cdot 10^{-4}$  deutlich unter dem entsprechenden Verlauf des Feinsandes. Einzelne Versuche liegen sogar im Bereich der Verläufe für  $\gamma_{prestrain} = 0,5 \cdot 10^{-4}$ . Die Art des Sandes scheint beim Dämpfungsmaß eine größere Rolle zu spielen als bei der Ausbildung der Plateaus im Verlauf von  $G_{dyn}(\gamma)$

Sowohl die Plateauflächen im Verlauf des Schubmoduls  $G_{dyn}(\gamma)$  als auch diejenigen im Verlauf des Dämpfungsmaßes  $D(\gamma)$  zeigen zum Teil deutliche Streuungen um die Mittelwerte.

Interessant ist auch die Ausbildung der Plateaus, wenn Zyklen bei unterschiedlichen Dehnungsamplituden  $\gamma_{prestrain}$  nacheinander aufgebracht werden. So wurden in einem Versuch zunächst ca. 3 Millionen Zyklen bei  $\gamma_{prestrain} = 0,5 \cdot 10^{-4}$ , anschließend ca. 3 Millionen Zyklen bei  $\gamma_{prestrain} = 1,0 \cdot 10^{-4}$  und abschließend noch einmal ca. 3 Millionen Zyklen mit einer Dehnungsamplitude  $\gamma_{prestrain} = 2,0 \cdot 10^{-4}$  aufgebracht. Das Ergebnis ist für den Schubmodul und das Dämpfungsmaß in Bild 18 dargestellt.

Es zeigt sich, daß sich der Sand bei einer sukzessiven Erhöhung von  $\gamma_{prestrain}$  stets die jeweils letzte Scherdehnungsamplitude während der Vorbelastung merkt und die zuvor erfahrenen "vergißt". Erhöht man z.B.  $\gamma_{prestrain}$  von  $0,5 \cdot 10^{-4}$  auf  $1,0 \cdot 10^{-4}$ , stellt man ein Plateau an der Stelle  $\gamma = 0,5 \cdot 10^{-4}$  fest, das nicht mehr zu bemerken ist, wenn die Scherdehnungsamplitude auf den Wert  $\gamma = 0$  reduziert und anschließend wieder auf  $\gamma = 1,0 \cdot 10^{-4}$  erhöht wird. Mit fortschreitender Zyklenanzahl unter diesem neuen  $\gamma_{prestrain}$  bildet sich auch an dieser Stelle ein Plateau aus. Dieses Verhalten erinnert ebenfalls stark an das Porenzahl-Druckdiagramm einer wiederholten Ent- und Wiederbelastung eines bindigen Bodens im Kompressionsversuch.

Ein anderes Verhalten zeigt sich, wenn zunächst eine Anzahl von Zyklen mit einer Scherdehnungsamplitude  $\gamma_{prestrain} = 1,0 \cdot 10^{-4}$  auf die Probe aufgebracht und anschließend eine Reduzierung auf  $\gamma_{prestrain} = 0,5 \cdot 10^{-4}$  vorgenommen wird. Bild 19 zeigt einen Versuch, bei dem jeweils ca. 3 Millionen Zyklen mit den zwei Werten von  $\gamma_{prestrain}$  aufgebracht wurden. Nach abschließender Reduzierung der Scherdehnungsamplitude auf  $\gamma = 0$  und anschließender Erhöhung auf das maximal aufbringbare  $\gamma$  über die zwei Werte von  $\gamma_{prestrain}$  hinaus, erhält man eine Kurve, die wie eine Umhüllende der beiden zu erwartenden Plateaus verläuft. Diese Umhüllende zeigt sich sowohl im Verlauf des Schubmoduls als auch im  $D$ - $\gamma$ -Diagramm. Die Abfolge der Vorbelastungen scheint also für die Verläufe des Schubmoduls und des Dämpfungsmaßes eine Rolle zu spielen, da das Verhalten bei einer Umkehrung der Belastungsgeschichte anders aussieht. Das kann auch als Beweis bewertet werden, daß die Miner'sche Regel für zyklische Belastung von Sand nicht gültig ist, d.h. die Reihenfolge der Beanspruchung spielt auch eine maßgebende Rolle für den Verlauf der Steifigkeit und Dämpfung über  $\gamma$ .

Weiterhin wurde untersucht, wie sich eine Veränderung des Zelldruckes nach der Vorbelastung auf die Plateaus auswirkt. So wurden Proben mit ca. 3,5 Millionen Zyklen unter  $\gamma_{prestrain} = 1,0 \cdot 10^{-4}$  und einem Zelldruck von  $p = 2,0$  bar vorbelastet. Anschließend wurde der Zelldruck in einem Versuch auf  $p = 2,25$  bar erhöht, in einem anderen auf  $p = 1,75$  bar reduziert. Es konnte beobachtet werden, daß die Dehnungsamplitude  $\gamma_{prestrain}$  in den Verläufen von  $G_{dyn}(\gamma)$  und  $D(\gamma)$  zwar immer noch lokalisiert werden kann, die Ausprägtheit des Plateaus jedoch wesentlich geringer ist als in dem Fall, daß der isotrope Druck während der Vorbelastung und der Druck während der abschließenden Erhöhung

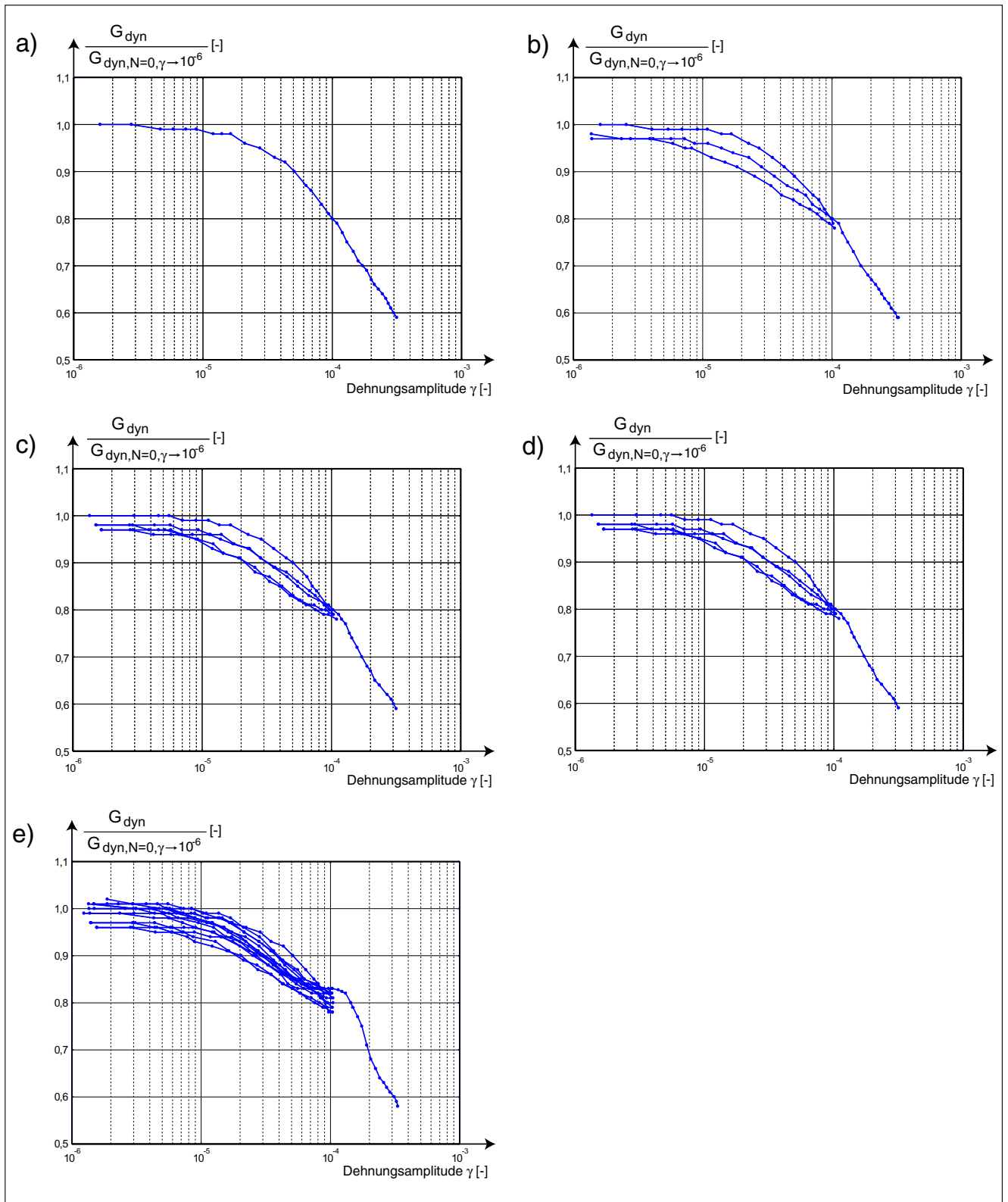


Bild 13: Veränderung des dynamischen Schubmoduls bei a)  $N = 0$ , b)  $N = 10.000$ , c)  $N = 100.000$ , d)  $N = 1.000.000$ , e)  $N = 10.000.000$

Fig. 13: Change of the dynamic shear modulus for a)  $N = 0$  (number of cycles), b)  $N = 10.000$ , c)  $N = 100.000$ , d)  $N = 1.000.000$ , e)  $N = 10.000.000$

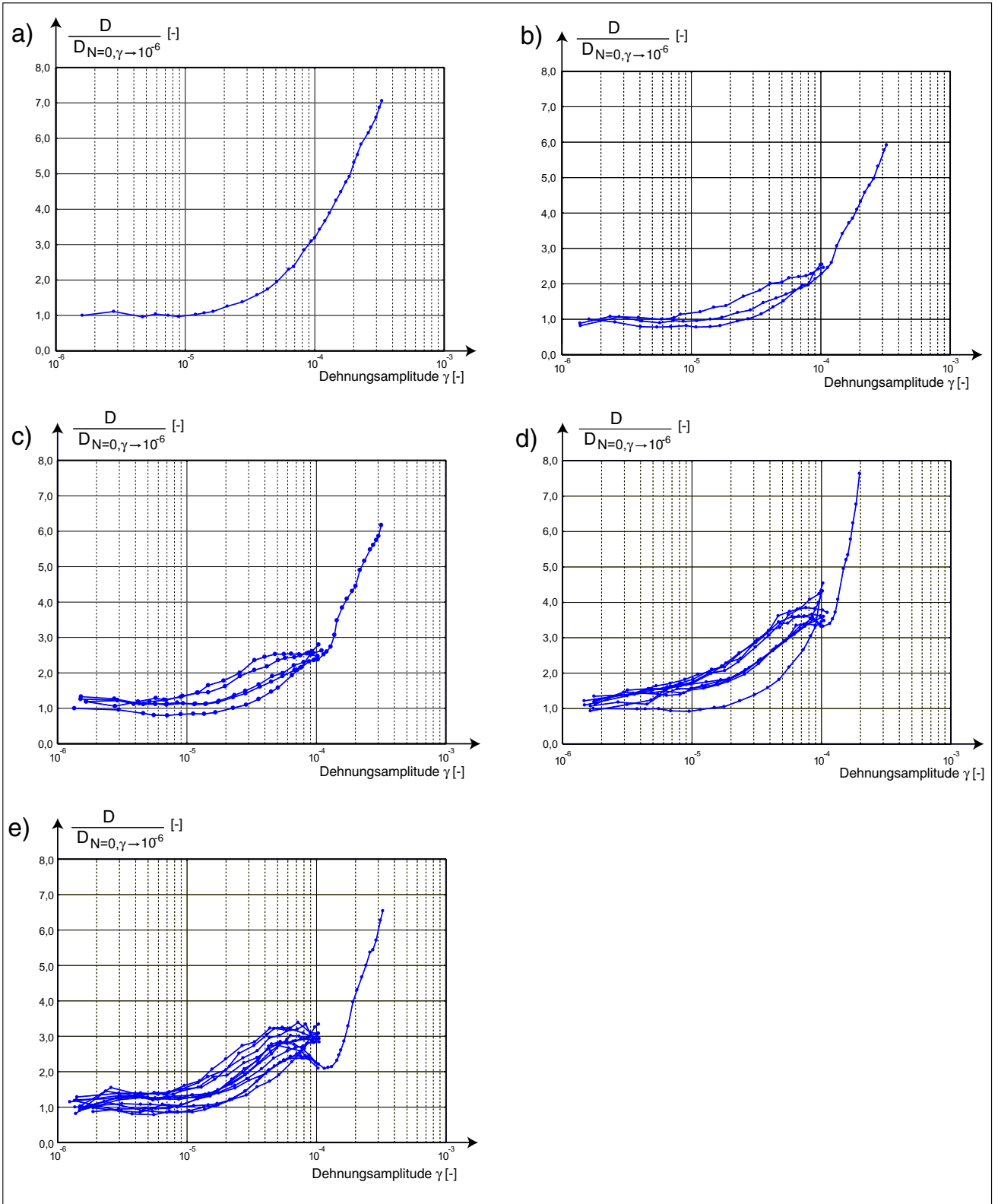


Bild 14: Veränderung des Dämpfungsmaßes bei a)  $N = 0$ , b)  $N = 10.000$ , c)  $N = 100.000$ , d)  $N = 1.000.000$ , e)  $N = 10.000.000$

Fig. 14: Change of the damping ratio for a)  $N = 0$  (number of cycles), b)  $N = 10.000$ , c)  $N = 100.000$ , d)  $N = 1.000.000$ , e)  $N = 10.000.000$

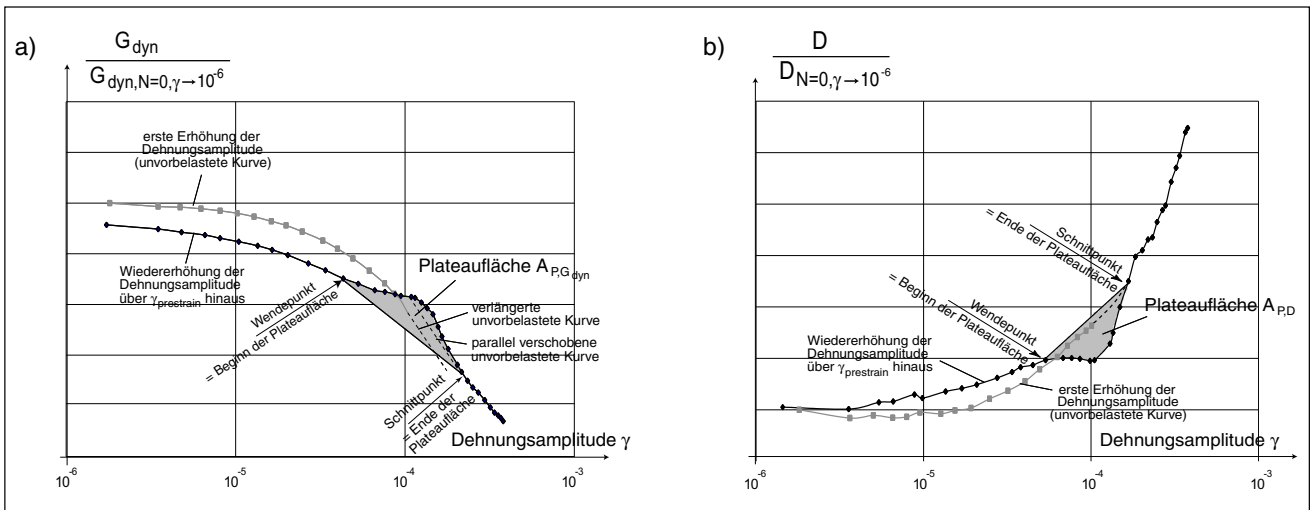


Bild 15: Definition der Plateaufläche im Verlauf von a) normiertem dynamischen Schubmodul und b) Dämpfungsmaß  
 Fig. 15: Definition of plateau area within a) the normalized curve of dynamic shear modulus and b) within the normalized curve of damping ratio

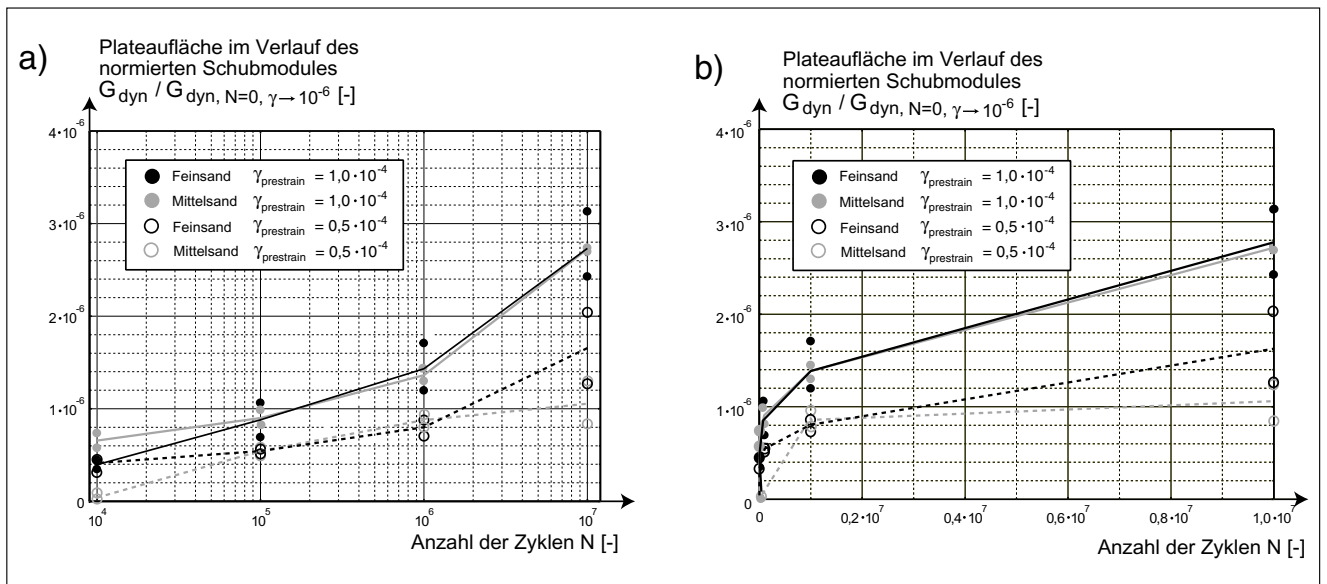


Bild 16: Ausbildung der Plateaufläche  $A_{P,G_{dyn}}$  im Verlauf des normierten dynamischen Schubmoduls mit der Anzahl der Zyklen  $N$  in Abhängigkeit von  $\gamma_{prestrain}$  und des verwendeten Sandes,  $I_D \approx 0,65$ , a) halblogarithmische Darstellung, b) lineare Darstellung

Fig. 16: Formation of plateau area  $A_{P,G_{dyn}}$  within the shear modulus curve versus the number of cycles  $N$  with  $\gamma_{prestrain}$  of the sand specimen,  $I_D \approx 0,65$ , a) semilogarithmic presentation, b) linear presentation

der Dehnungsamplitude identisch sind. Eine Änderung des Spannungsniveaus scheint also einige der sichtbaren Zeichen der Vorbelastung zu verwischen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In der ersten Versuchsreihe zur Untersuchung von zyklischen Vorbelastungen auf das Materialverhalten von Boden für kleine Dehnungsamplituden wurden Sandproben in einer Lastpresse axial zyklisch belastet. Anschließend wurde die dynamische Schubsteifigkeit im RC-Gerät bestimmt. Viele der zyklisch vorbelasteten

Proben zeigen signifikante Veränderungen von  $G_{dyn}$  gegenüber den unvorbelasteten Proben. Allerdings scheinen diese Veränderungen nicht mit der Anzahl der Zyklen zu korrelieren. Dieses Verhalten läßt sich vermutlich damit begründen, daß die Richtung der Vorbelastung nicht der Polarisation der Scherwelle entspricht, die im Resonant Column Versuch durch die Probe geschickt wird.

Bei den Proben, die im RC-Gerät dynamisch vorbelastet wurden, entsprach die Richtung der Vorbelastung (Torsion) der Polarisation der Scherwelle. Eine Ausbildung von Plateaus in den Verläufen von  $G_{dyn}(\gamma)$  und

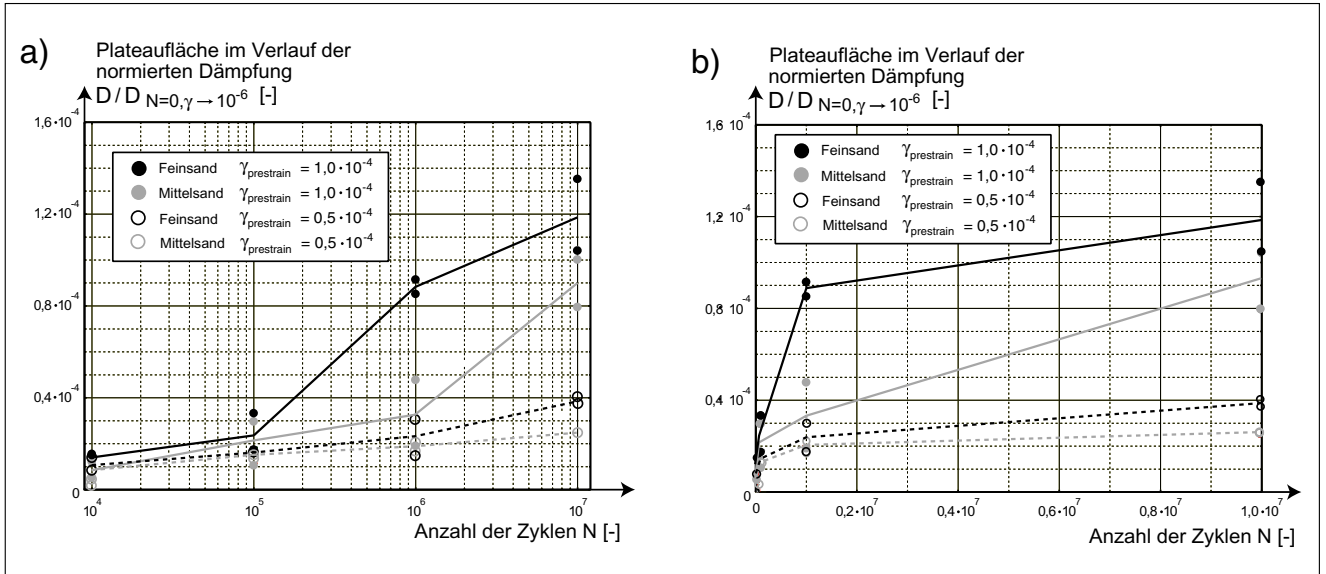


Bild 17: Ausbildung der Plateaufläche  $A_{P,D}$  im Verlauf des normierten Dämpfungsmaßes mit der Anzahl der Zyklen  $N$  in Abhängigkeit von  $\gamma_{prestrain}$  und des verwendeten Sandes,  $I_D \approx 0,65$ , a) halblogarithmische Darstellung, b) lineare Darstellung

Fig. 17: Formation of plateau area  $A_{P,D}$  within the damping ratio versus the number of cycles  $N$  with  $\gamma_{prestrain}$  of the sand specimen,  $I_D \approx 0,65$ , a) semilogarithmic presentation, b) linear presentation

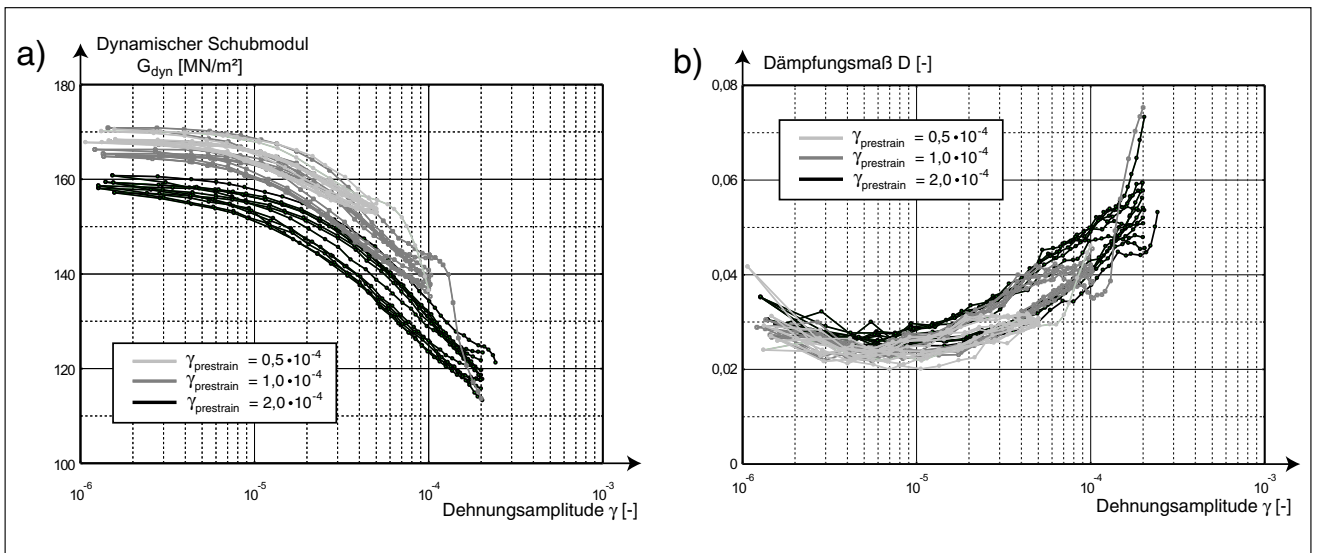


Bild 18: a) Dynamischer Schubmodul und b) Dämpfungsmaß in einem Versuch mit nacheinander aufgebrachtem  $\gamma_{prestrain} = 0,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $\gamma_{prestrain} = 1,0 \cdot 10^{-4}$  und  $\gamma_{prestrain} = 2,0 \cdot 10^{-4}$  mit jeweils ca. 3 Millionen Zyklen bei  $p = 2$  bar und  $I_D = 0,57$

Fig. 18: a) Dynamic shear modulus and b) damping ratio in a test with subsequent application of shearing amplitudes of  $\gamma_{prestrain} = 0,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $\gamma_{prestrain} = 1,0 \cdot 10^{-4}$  and  $\gamma_{prestrain} = 2,0 \cdot 10^{-4}$  with about  $3 \cdot 10^6$  cycles at  $p = 2$  bar and  $I_D = 0,57$

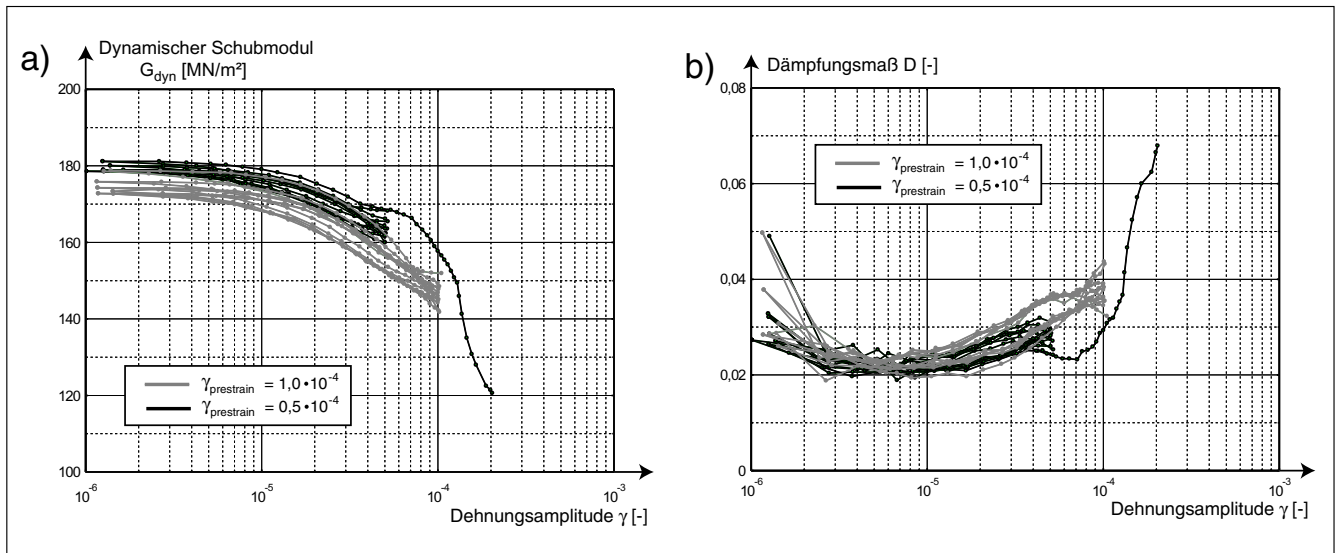


Bild 19: a) Dynamischer Schubmodul und b) Dämpfungsmaß in einem Versuch mit nacheinander aufgebrachtem  $\gamma_{prestrain} = 1,0 \cdot 10^{-4}$  und  $\gamma_{prestrain} = 0,5 \cdot 10^{-4}$  mit jeweils ca. 3 Millionen Zyklen bei  $p = 2$  bar und  $I_D = 0,67$   
 Fig. 19: a) Dynamic shear modulus and b) damping ratio in a test with subsequent application of shearing amplitudes of  $\gamma_{prestrain} = 1,0 \cdot 10^{-4}$  and  $\gamma_{prestrain} = 0,5 \cdot 10^{-4}$  with about  $3 \cdot 10^6$  cycles at  $p = 2$  bar and  $I_D = 0,67$

$D(\gamma)$  an den Stellen der Dehnungsamplitude während der Vorbelastung konnte beobachtet werden. Die Ausbildung dieser Plateaus wird mit zunehmender Zyklenanzahl signifikanter. Mißt man also nach einer dynamischen Torsionsvorbelastung im RC-Gerät den Verlauf des dynamischen Schubmoduls und der Dämpfung in Abhängigkeit der Dehnungsamplitude, kann die Dehnungsamplitude der Vorbelastung  $\gamma_{prestrain}$  bestimmt werden. Außerdem läßt die Beurteilung der Größe des Plateaus im Verlauf eine Aussage über die aufgebrauchte Zyklenanzahl zu. Größere Vordehnungsamplituden  $\gamma_{prestrain}$  verursachen signifikantere Plateaus.

Weiterhin wurde gezeigt, daß die Reihenfolge bei der Aufbringung von Paketen mehrerer Zyklen verschiedener Dehnungsamplitude eine große Rolle spielt. Eine Änderung des Spannungsniveaus nach der Vorbelastung und vor einer erneuten Belastung verwischt einen Großteil der Hinweise auf die Vorbelastung.

Die z.B. von *Drnevich* und *Richart* (siehe [2]) erhaltenen Versteifungen der Proben im Bereich kleiner Dehnungen bis zum Faktor 3,0 sind allerdings nicht zu beobachten gewesen. Dies kann zum einen daran liegen, daß die maximal aufbringbare Scherdehnungsamplitude in unseren Versuchen unterhalb des Wertes liegt, der in den Versuchen von *Drnevich* und *Richart* aufgebracht werden konnte. Zum anderen könnte die Homogenität der Scherdehnungen eine Rolle spielen. Während in unseren Versuchen Vollzylinderproben untersucht wurden, wurden in [2] Tests an Hohlzylinderproben vorgenommen.

In künftigen Versuchsreihen soll durch die Variation der Probengeometrie versucht werden, höhere maximale Scherdehnungsamplituden zu erreichen. Es muß untersucht werden, ob es erst beim Überschreiten einer Grenzscherdehnung (siehe *Dobry* [1]) zu Versteifungseffekten

kommt. Inwieweit sich das Verhalten von Hohlzylinderproben von dem der vollzylindrischen Querschnitte unterscheidet, müssen ebenfalls weitere Versuche zeigen. Interessant wäre auch die Untersuchung der Abhängigkeit der Plateaubildung vom isotropen Druck  $p$  während der Vorbelastung.

### Danksagung

An dieser Stelle wird dem Ministerium für Schule, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen für die Bereitstellung von Finanzmitteln zur Herstellung des RC-Gerätes gedankt sowie der DFG für die Finanzierung eines Teils des Personals zur Durchführung von Versuchsreihen im Rahmen des Teilprojektes A8 des Sonderforschungsbereiches SFB 398 "Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte unter Schädigungs- und Deteriorationsaspekten".

### Literatur

- [1] *Dobry, R., Ladd, R. S., Yokel, F. Y., Chung, R. M., Powell, D.*: Prediction of pore pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method. Veröffentlichung des U.S. Department of Commerce, National bureau of standards, Heft Nr. 138 (1982)
- [2] *Drnevich, V. P., Richart, F. E.*: Dynamic prestraining of dry sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, SM 2 (1970), S 453-467.
- [3] *Li, X. S., Yang, W. L., Chen, C. K., Wang, W. C.*: Energy-injecting virtual mass resonant column system. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 5 (1998), S. 428-438.



- [4] *Li, X. S., Yang, W. L.*: Effects of vibration history on modulus and damping of dry sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, No. 11 (1998), S. 1071-1081.
- [5] *Li, X. S., Cai, Z. Y.*: Effects of low-number previbration cycles on dynamic properties of dry sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 11 (1999), S. 979-987.
- [6] *Niemunis, A.*: Akkumulation der Verformung infolge zyklischer Belastung. Beiträge zum Workshop: Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrungen und Forschungsergebnisse. Veröffentlichungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, Heft Nr. 32 (2000), S. 1-20.
- [7] *Prange, B.*: Der Resonant-Column-Versuch: Theorie und Experiment. Symposium Meßtechnik im Erd- und Grundbau, München. (1983), S. 99-104.
- [8] *Richart, F. E. Jr., Hall, J. R. Jr., Woods, R. D.*: Vibrations of Soils and Foundations. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey (1970)
- [9] *Sawicki, A., Świdziński, W., Zadroga, B.*: Settlement of shallow foundations due to cyclic vertical force. *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 1 (1998), S. 35-43.
- [10] *Schanzmann, F.*: Veränderung der dynamischen Steifigkeit und Dämpfung von Sand infolge zyklischer Belastung. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum (2001).
- [11] *Triantafyllidis, Th., Niemunis, A.*: Offene Fragen zur Modellierung des zyklischen Verhaltens von nichtbindigen Böden. Beiträge zum Workshop: Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrungen und Forschungsergebnisse. Veröffentlichungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, Heft Nr. 32 (2000), S. 109-134.
- [12] *Wichtmann, T.*: Prognose von Verdichtbarkeit des Sandes infolge zyklischer Belastung. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum (2000).

**Autoren dieses Beitrages:**

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