
Kumulatives und dynamisches Verhalten von Böden

Triantafyllidis, Theodor; Wichtmann, Torsten; Niemunis, Andrzej

Zusammenfassung

Ein Überblick über einige der letzten Forschungsergebnisse an der Ruhr-Universität Bochum auf dem Gebiet der zyklischen bzw. dynamischen Belastung von Boden wird präsentiert. Sowohl residuale als auch reversible Effekte in Böden unter zyklischer Belastung werden untersucht. Ein hochzyklisches Akkumulationsmodell für nichtbindige Böden wurde entwickelt. Das Modell wird zusammen mit den zugrundeliegenden Experimenten dargestellt. Für eine nichtlineare Beschreibung des reversiblen Verhaltens wurden Versuche zur dynamischen Steifigkeit und zur Dämpfung von nichtbindigen, bindigen und organischen Böden durchgeführt, welche in diesem Beitrag präsentiert werden.

1 Einleitung

Eine dynamische Belastung wird zunächst als eine Vibration des Bauwerks und nach längerer Zeit als akkumulierte Setzung wahrgenommen. Diese beiden Effekte werden separat untersucht.

Die Akkumulation der bleibenden Verformungen (insbesondere Setzungsdifferenzen) bzw. der Spannungen (siehe Bild 1a) in den Gründungen kann die Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks (z.B. Hochgeschwindigkeitsstrecke, Kranbahn, Schleuse, Tank) gefährden. Übermäßige Porenwasserüberdrücke können sogar den Verlust der Standsicherheit (Verflüssigung) zur Folge haben. Im Abschnitt 2 dieses Beitrags wird ein hochzyklisches Modell für die Prognose der Setzungsakkumulation in nichtbindigen Böden vorgestellt. Experimentelle Ergebnisse, die dem Modell zugrunde liegen, werden zusammen mit der Simulation der Setzungsakkumulation eines Streifenfundamentes mit der FE – Methode präsentiert.

Bei vielen bodendynamischen Problemen (z.B. der Dimensionierung von Maschinenfundamenten) steht zunächst 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 können z.B. im Resonant Column (RC) Gerät ermittelt werden. Im Abschnitt 3 werden RC – Versuche an Sand vor-

gestellt. Weiterhin werden RC – Versuche an bindigen und organischen Böden präsentiert, die für die ICE - Strecken Nürnberg – Ingolstadt und Hamburg – Berlin durchgeführt wurden.

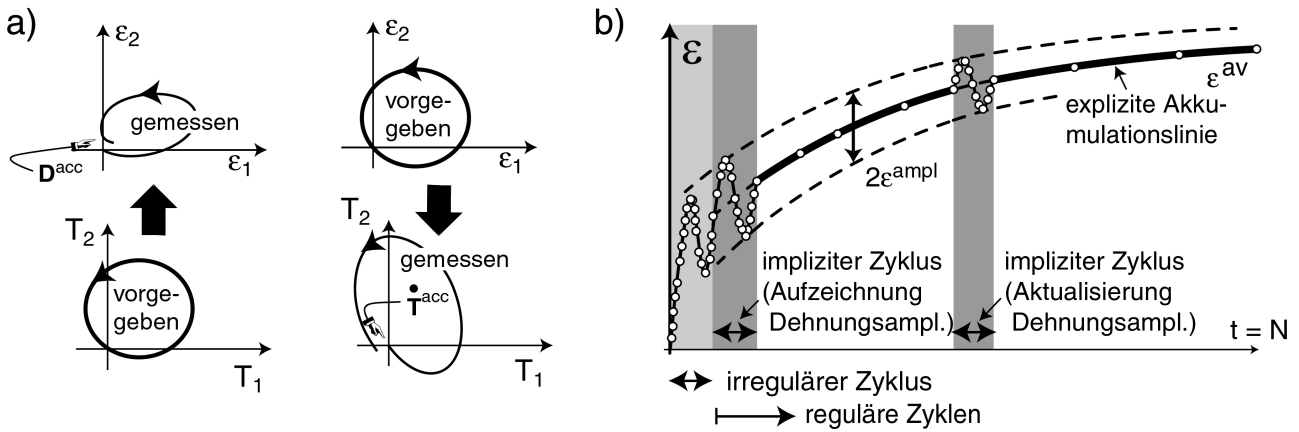


Bild 1: a) Akkumulation von Dehnungen bzw. Spannungen b) Vorgehensweise der Akkumulationsberechnung mit expliziten Modellen (Niemunis et al. 2004b)

2 Bleibende Verformungen in nichtbindigen Böden unter zyklischer Belastung

2.1 Akkumulationsmodell

Die Struktur des expliziten Akkumulationsmodells ist der Struktur viskoplastischer Modelle ähnlich. Die Zyklenanzahl N wird als Zeitvariable verwendet. Die allgemeine Spannungs-Dehnungs-Beziehung lautet (Niemunis et al. 2004b)

$$\dot{\mathbf{T}} = E : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^{\text{acc}} - \mathbf{D}^{\text{pl}}). \quad (1)$$

Darin ist $\dot{\mathbf{T}}$ die Jaumannsche Spannungsrate, E eine elastische Steifigkeit und \mathbf{D} die Dehnungsrate. „Rate“ meint hier eine Ableitung nach der Zyklenanzahl N . \mathbf{D}^{acc} ist die durch die expliziten Formeln vorgegebene Akkumulationsrate und \mathbf{D}^{pl} ist die Rate der plastischen Dehnung, die für überlagerte monotone Belastungen notwendig ist. Die Akkumulationsrate \mathbf{D}^{acc} berechnet sich mit der Fließrichtung \mathbf{m} und der Intensität D^{acc} aus (Niemunis et al. 2004a):

$$\mathbf{D}^{\text{acc}} = D^{\text{acc}} \mathbf{m} = (f_{123}^A \dot{\mathbf{g}}^A + f_{123}^B \dot{\mathbf{g}}^B) f_p f_Y f_e f \mathbf{m} \quad (2)$$

Die in Tabelle 1 zusammengefassten und im Abschnitt 2.2 näher erläuterten Funktionen in Gleichung (2) beschreiben im einzelnen die folgenden Einflüsse:

f_{ampl} : Dehnungsamplitude ϵ^{ampl} der Erregung

f_N^A, f_N^B : Funktionen für die zyklische Vorbelastung (bisher aufgebrauchte Zyklenanzahl N und ihre Amplitude)

f_p : mittlerer Druck $p^{\text{av}} = -\text{tr}(\mathbf{T})/3$

f_Y : Spannungsverhältnis $\bar{Y}^{\text{av}} = (Y^{\text{av}} - 9)/(Y_c - 9)$ mit $Y = -I_1 I_2 / I_3$,
 $Y_c = (9 - \sin^2 \varphi_c)/(1 - \sin^2 \varphi_c)$, I_i : Basis-Invarianten von \mathbf{T} , φ_c : krit. Reibungswinkel

f_e : Porenzahl e

f_π : Polarisationsänderungen

Funktion	Materialkonstanten	
$f_{\text{ampl}} = \left(\frac{\epsilon^{\text{ampl}}}{\epsilon^{\text{ampl}}_{\text{ref}}} \right)^2$	$\epsilon^{\text{ampl}}_{\text{ref}}$	10^{-4}
1D-Zyklen: $\epsilon^{\text{ampl}} = \sqrt{\frac{3}{2} (\epsilon^{\text{ampl}}_q)^2 + \frac{1}{3} (C_{\text{ampl}} \epsilon^{\text{ampl}}_v)^2}$	C_{ampl}	0,54
$\epsilon_v = \text{tr}(\epsilon)$, $\epsilon_q = \sqrt{2/3} \ \epsilon^*\ $		
$f_N^A = C_{N1} C_{N2} \exp(-g^A / C_{N1} / f_{\text{ampl}})$	C_{N1}	$2,9 \cdot 10^{-4}$
$f_N^B = C_{N1} C_{N3}$	C_{N2}	0,55
	C_{N3}	$5,7 \cdot 10^{-5}$
$f_p = \exp[-C_p (p^{\text{av}} / p_{\text{ref}} - 1)]$	C_p	0,44
	p_{ref}	100 kPa
$f_Y = \exp(C_Y \bar{Y}^{\text{av}})$	C_Y	2,05
$f_e = \frac{(C_e - e)^2}{1 + e} \frac{1 + e_{\text{ref}}}{(C_e - e_{\text{ref}})^2}$	C_e	0,52
	e_{ref}	0,874
$f = 1 + C_{\pi 1} (1 - \cos \theta)$ $\cos \theta = \frac{\mathbf{r}}{A} :: \pi$	$C_{\pi 1}$	4,0
$\& = -C_{\pi 2} \left(\frac{\epsilon^{\text{ampl}}}{\epsilon^{\text{ampl}}_{\text{ref}}} \right)^2$ $\text{neu} = R :: \text{alt}$	$C_{\pi 2}$	200
Rotationsoperator R: siehe Abschnitt 2.2		

Tabelle 1: Funktionen des Akkumulationsmodells und Satz von Materialkonstanten für einen Mittelsand

Als Maß für die zyklische Vorbelastung wird die Zustandsvariable $g^A = \int g^A dN$ verwendet (Niemunis et al. 2004a), die die Anzahl N der bisherigen Zyklen mit ihrer jeweiligen Dehnungsamplitude wichtet. Ein Problem für Akkumulationsprognosen stellt der unbekannte Anfangswert von g^A in situ dar (Triantafyllidis et al. 2004).

Das Bild 1b zeigt die Vorgehensweise bei Berechnungen mit einem *expliziten* Akkumulationsmodell. Nur die ersten beiden Zyklen werden *implizit* (d.h. mit Dehnungssinkrementen) berechnet (z.B. mit elastoplastischen Mehrflächenmodellen oder mit dem hypoplastischen Materialmodell). Im zweiten Zyklus wird die Dehnungsschleife aufgezeichnet, aus der die Dehnungsamplitude $\varepsilon^{\text{ampl}}$ ermittelt wird (der erste Zyklus ist irregulär und eignet sich nicht für die Ermittlung von $\varepsilon^{\text{ampl}}$). Die Akkumulation infolge eines Paketes mit ΔN Zyklen wird anschließend direkt mit Hilfe expliziter Gleichungen berechnet, ohne den Dehnungspfad in den einzelnen Zyklen zu verfolgen. Bis zur Aktualisierung der Dehnungsamplitude in einem sog. *Kontrollzyklus* (notwendig z.B. infolge von Spannungsumlagerungen oder Verdichtung) wird $\varepsilon^{\text{ampl}} = \text{konstant}$ gesetzt. Danach wird mit der aus dem Kontrollzyklus errechneten Amplitude $\varepsilon^{\text{ampl}}$ weitergerechnet.

Zur Erfassung der Form und der Polarisierung komplexer sechsdimensionaler Dehnungsschleifen wurde eine tensorielle Definition der Dehnungsamplitude (Niemunis 2003) eingeführt. Zu ihrer Ermittlung wird zunächst die größte Spanne der Dehnungsschleife mit dem Abstand $2R^{(6)}$ und der Richtung $\mathbf{r}^{(6)}$ gesucht. Da eine Schleife mehrere Dimensionen im Dehnungsraum besitzen kann, berechnet sich der vierstufige Tensor der Amplitude aus

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^6 R^{(i)} \mathbf{r}^{(i)} \otimes \mathbf{r}^{(i)} \quad (3)$$

Das Symbol \otimes bedeutet eine dyadische Multiplikation. Als skalares Maß der Amplitude wird $\varepsilon^{\text{ampl}} = \|\mathbf{A}_\varepsilon\|$ und als Polarisierung wird $\mathbf{A} = \mathbf{A} / \|\mathbf{A}\|$ verwendet, wobei die Klammern $\|\ \|\$ für die Euklidische Norm stehen.

2.2 Experimente

Zur Bestimmung der Akkumulationsrichtung \mathbf{m} und der Funktionen in Gleichung (2) wurden zyklische Triaxialversuche und zyklische multiaxiale Einfachscherversuche (CMDSS – Versuche für „cyclic multiaxial direct simple shear“) an einem Mittelsand ($d_{50} = 0,55$, $U = d_{60}/d_{10} = 1,8$) durchgeführt. Die Versuchsgeräte (siehe Bilder 2 und 3) und die Probenpräparation werden von Wichtmann et al. (2004a,b,c) beschrieben. In den folgenden Diagrammen wird der Dichteindex $I_D = (e_{\text{max}} - e) / (e_{\text{max}} - e_{\text{min}})$ und das Amplitudenverhältnis $\zeta = \sigma_1^{\text{ampl}} / p^{\text{av}}$ (siehe Bild 2b,c) verwendet.

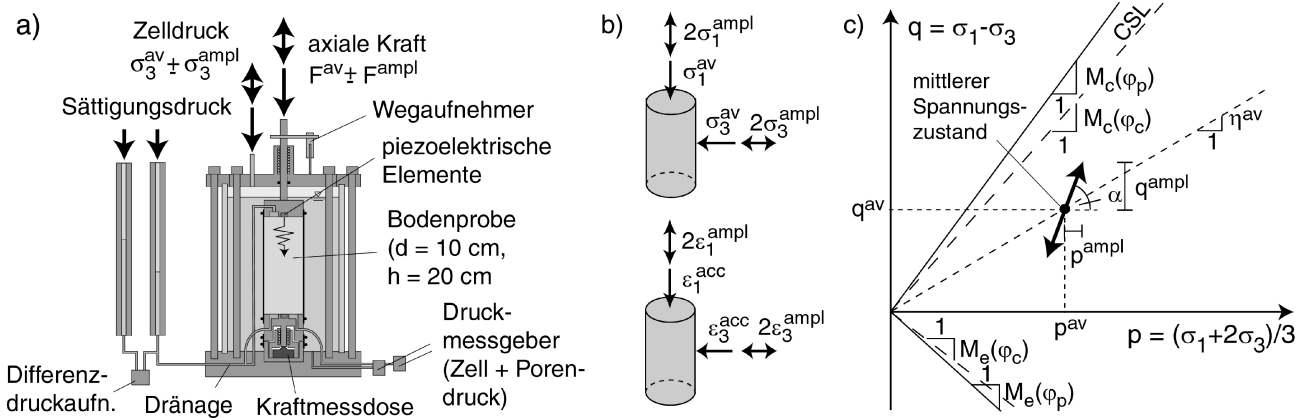


Bild 2: Zyklischer Triaxialversuch: a) Versuchsgerät, b) Spannungs- und Dehnungszustand, c) Darstellung des Spannungszustandes in der $p - q$ - Ebene, exemplarisch für einaxiale Spannungszyklen (Wichtmann et al. 2004a,c)

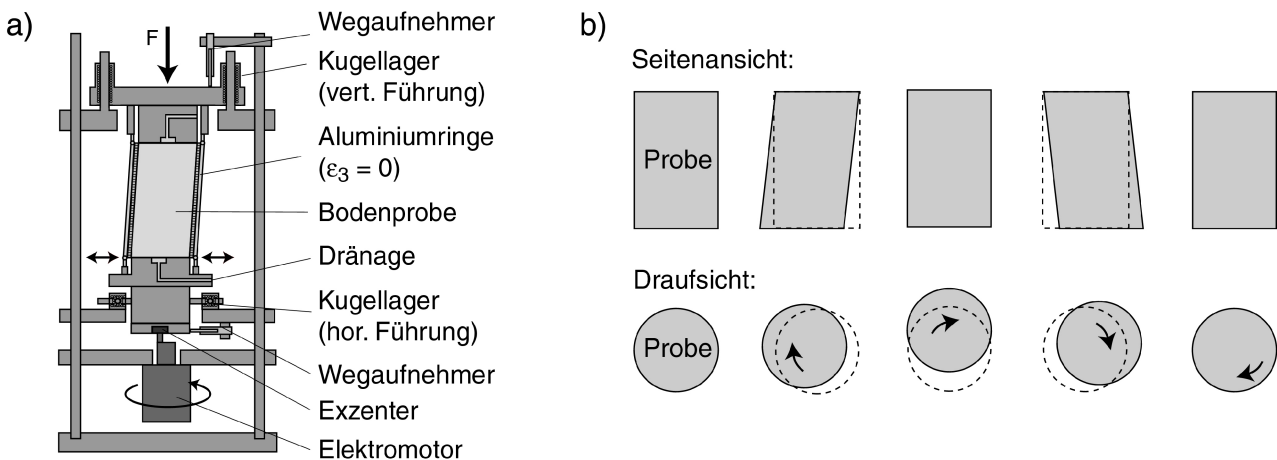


Bild 3: CMDSS - Versuch: a) Versuchsgerät, b) Abfolge von Verschiebungszuständen der Probe bei kreisförmigen Zyklen (Wichtmann et al. 2004b,c)

Es zeigte sich, dass die Akkumulationsrichtung \mathbf{m} („zyklische Fließrichtung“, Bild 4a) als eine einfache Funktion des mittleren Spannungsverhältnisses $\eta^{av} = q^{av} / p^{av}$ (siehe Bild 2c) beschrieben werden kann (z.B. kann die Fließregel des Modified Cam Clay Modells oder die hypoplastische Fließregel verwendet werden). Der Einfluss der Dehnungsamplitude (Spannweite, Form, Polarisierung), des mittleren Druckes p^{av} , der Porenzahl e und der Belastungsfrequenz auf \mathbf{m} ist vernachlässigbar.

Die akkumulierte Dehnung $\epsilon^{acc} = \|\epsilon^{acc}\|$ nimmt mit der Anzahl der Zyklen N zu, während die Akkumulationsrate D^{acc} abnimmt (Bild 4b, dargestellt sind nur die regulären Zyklen). Die Akkumulation verläuft proportional zum Quadrat der Dehnungsamplitude $(\epsilon^{ampl})^2$ (Bild 4c), woraus für die Funktion f_{ampl} in Gleichung (2) folgt (Niemunis et al. 2004b):

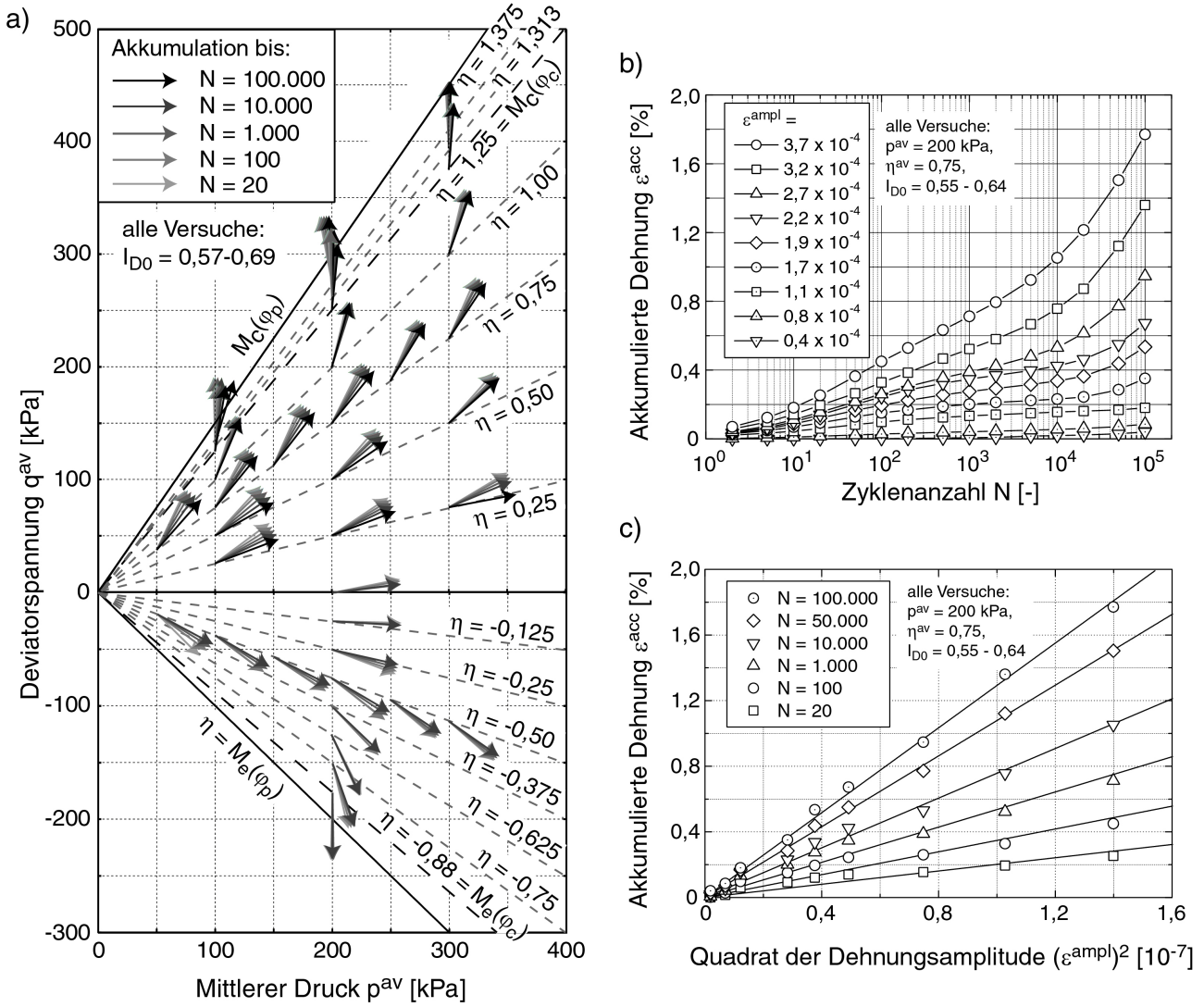


Bild 4: a) Akkumulationsrichtung, dargestellt als Einheitsvektor in der $p^{av} - q^{av}$ - Ebene, b) Zunahme der akkumulierten Dehnung ε^{acc} mit der Zyklenzahl in den regulären Zyklen, c) Quadratische Abhängigkeit der Akkumulationsrate von der Dehnungsamplitude ε^{ampl} (Wichtmann et al. 2004a)

$$f_{ampl} = \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon^{ampl}}{\varepsilon^{ampl}_{ref}} \right)^2 & \text{für } \varepsilon^{ampl} \leq 10^{-3} \\ 100 & \text{für } \varepsilon^{ampl} > 10^{-3} \end{cases} \quad (4)$$

$\varepsilon^{ampl}_{ref} = 10^{-4}$ ist darin eine Referenzamplitude. Die Gültigkeit der oberen Zeile von Gleichung (4) wurde für $5 \cdot 10^{-5} \leq \varepsilon^{ampl} \leq 10^{-3}$ nachgewiesen. Für größere Amplituden $\varepsilon^{ampl} > 10^{-3}$ bleibt die Akkumulationsrate hingegen nahezu konstant.

Zyklische Triaxialversuche mit einer gleichzeitigen Variation der axialen und der seitlichen Spannung zeigten, dass rein deviatorische Dehnungsschleifen eine ca. 3,4fach größere Verdichtung als rein volumetrische Zyklen verursachen (Bild 5a, $\varepsilon_P = 1/\sqrt{3} \varepsilon_v$, $\varepsilon_Q = \sqrt{3}/2 \varepsilon_q$).

Dies wird im Akkumulationsmodell berücksichtigt, indem der volumetrische Anteil der Dehnungsschleife vor der Ermittlung von A_e (Vorgehensweise siehe Abschnitt 2.1) mit dem Faktor C_{ampl} (siehe Tabelle 1) skaliert wird.

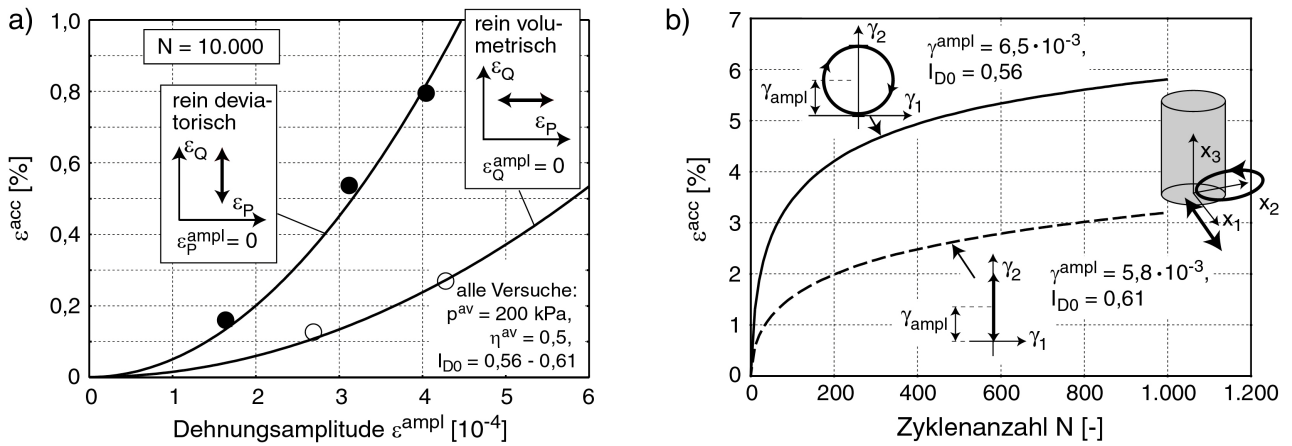


Bild 5: a) Akkumulation infolge rein deviatorischer und rein volumetrischer Zyklen, b) CMDSS-Versuche zum Einfluss der Form der Dehnungsschleife auf die Akkumulation (Wichtmann et al. 2004b)

In CMDSS – Versuchen wurde beobachtet (Bild 5b), dass die Akkumulation bei einer kreisförmigen Scherung in etwa doppelt so groß ist wie bei einer Scherung in einer Richtung (bei gleicher Amplitude, d.h. gleicher maximaler Scherdehnung in einer Richtung), d.h. die Akkumulationsrate steigt mit der Rundheit der Dehnungsschleife. Diesen Einfluss der Form der Dehnungsschleife auf die Akkumulationsrate erfasst die tensorielle Definition der Dehnungsamplitude.

Die Akkumulationsrate steigt mit abnehmendem mittleren Druck p^{av} (Bild 6a), mit dem Spannungsverhältnis \bar{Y}^{av} (Bild 6b) und mit der Porenzahl e (Bild 6c). Diese Abhängigkeiten können durch die Funktionen f_p , f_Y und f_e in Gleichung (2) beschrieben werden (Wichtmann et al. 2004a):

$$f_p = \exp\left[-C_p \left(p^{\text{av}} / p_{\text{ref}} - 1\right)\right] \quad f_Y = \exp\left(C_Y \bar{Y}^{\text{av}}\right) \quad f_e = \frac{(C_e - e)^2}{1 + e} \frac{1 + e_{\text{ref}}}{(C_e - e_{\text{ref}})^2} \quad (5)$$

Darin sind C_p , C_Y und C_e Materialkonstanten, $p_{\text{ref}} = p_{\text{atm}}$ ist ein Referenzdruck und e_{ref} ist eine Referenzporenzahl. Normiert man die Verläufe $\varepsilon^{\text{acc}}(N)$ mit den Funktionen f_{ampl} , f_p , f_Y , f_e und f_π (hier $f_\pi = 1$), fallen die Kurven in einem Band zusammen (Bild 6d), an das die folgende Funktion angepasst werden kann (Wichtmann et al. 2004a):

$$f_N = C_{N1} \left[\ln(1 + C_{N2} N) + C_{N3} N \right]. \quad (6)$$

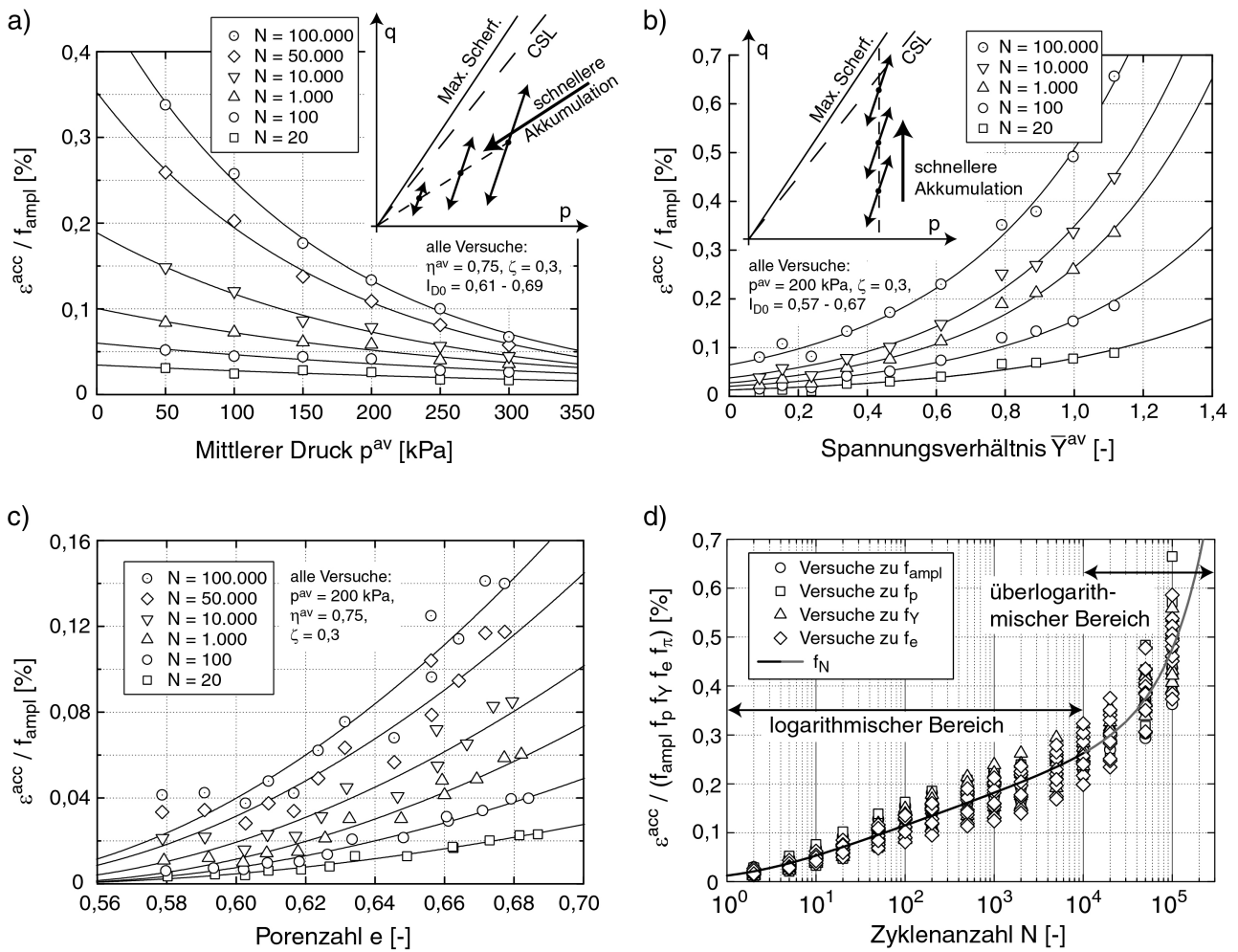


Bild 6: Abhängigkeit der Akkumulationsrate von a) dem mittleren Druck, b) dem Spannungsverhältnis, c) der Porenzahl und d) der Zyklanzahl (Wichtmann et al. 2004a)

C_{N1} , C_{N2} und C_{N3} sind Materialkonstanten. Gleichung (6) erfasst den in etwa logarithmischen Anstieg der akkumulierten Dehnung mit der Zyklanzahl bis $N = 10^4$ und den überlogarithmischen Anstieg für größere Zyklanzahlen N . In der Ratenformulierung und mit Einführung von g^A ergibt sich (Niemunis et al. 2004a)

$$\dot{\epsilon}_N = \frac{C_{N1} C_{N2}}{1 + C_{N2} N} + C_{N1} C_{N3} = \frac{C_{N1} C_{N2}}{\exp\left(\frac{g^A / f_{ampl}}{C_{N1}}\right)} + C_{N1} C_{N3} \quad (7)$$

Durch die Verwendung der Zustandsvariable g^A für die zyklische Vorbelastung kann die Akkumulation infolge einer Reihe von Zyklpaketen mit unterschiedlicher Amplitude gut prognostiziert werden (Niemunis et al. 2004a). Ein Problem für Akkumulationsprognosen stellt die unbekannte Vorbelastung g^A in situ dar, da sie die Akkumulationsrate stark beeinflusst (die Kenntnis von \mathbf{T} und e reicht nicht aus, siehe Verdichtungskurven in Bild 7a). Für

die Bestimmung von g^A in situ sind einfache Korrelationen aufzustellen. Eine Korrelation der zyklischen Vorbelastung mit dynamischen Bodenkenngrößen erwies sich als nicht möglich (Wichtmann und Triantafyllidis 2004a,b). Eine Korrelation mit dem Verflüssigungspotential konnte erwartungsgemäß nachgewiesen werden (Triantafyllidis et al. 2004) und könnte in situ z.B. durch zyklische Pressiometersondierungen oder Drucksondierungen genutzt werden. Eine Bestimmung von g^A mit Hilfe von Probelastungen ist ebenfalls denkbar (Triantafyllidis et al. 2004).

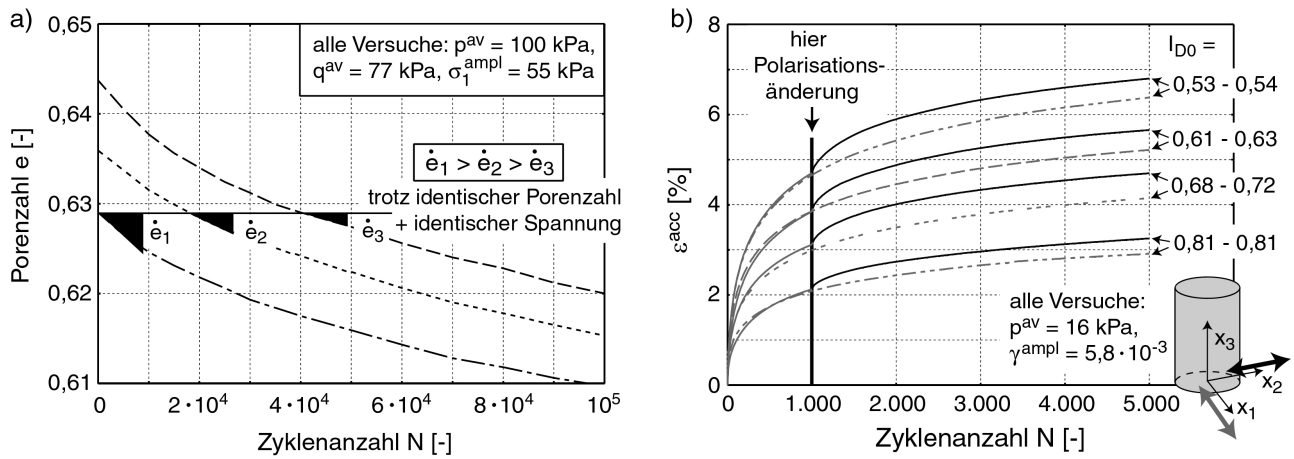


Bild 7: a) Abhängigkeit der Akkumulationsrate von der zyklischen Vorbelastung (Triantafyllidis et al. 2004), b) temporärer Anstieg der Akkumulationsrate infolge von Polarisationsänderungen (Wichtmann et al. 2004b)

CMDSS – Versuche mit einer Änderung der Scherrichtung um 90° zeigten, dass Polarisationsänderungen zu einem temporären Anstieg der Akkumulationsrate führen (Bild 7b). Im Modell wird dies durch den Faktor f_π berücksichtigt (Niemunis et al. 2004b):

$$f = 1 + C_1(1 - \cos \alpha) \quad \cos \alpha = \frac{r}{A} :: \pi \quad (8)$$

Der *back polarization* Tensor (Niemunis 2003) speichert die Polarisation der Amplitude während der zurückliegenden Zyklen. α bezeichnet den Winkel zwischen A_ϵ und A_r im sechsdimensionalen Raum. Das Zeichen $::$ bedeutet eine vierfache r -Überschiebung der Tensoren. A_r passt sich durch eine Rotation der aktuellen Polarisation A_ϵ an. Die Entwicklungsgleichung für α hat die Form (Niemunis et al. 2004b):

$$\dot{\alpha} = -C_2 \left(\frac{r}{A} \right)^2 \quad \Delta \alpha = \dot{\alpha} \Delta N \quad \alpha^{neu} = R :: \alpha^{alt} \quad (9)$$

$$R = (\cos \Delta \alpha - 1)(\mu^r \otimes \mu^r + \mu^r \otimes \mu^r) + \sin \Delta \alpha (\mu^r \otimes \mu^r - \mu^r \otimes \mu^r) + I$$

Im Rotationsoperator R bedeuten $\mu = \frac{r}{A} + \pi$ und $\mu = \frac{r}{A} - \pi$, wobei die Pfeile in Gleichung (9) für eine Normierung stehen. I ist der Identitätstensor.

2.3 FE - Rechnung

Das Akkumulationsmodell wurde in Form der Benutzerroutine UMAT in das Finite-Elemente-Programm ABAQUS implementiert und ein Zentrifugenmodellversuch (Streifenfundament unter zyklischer Belastung) wurde nachgerechnet, wobei eine gute Übereinstimmung zwischen FE-Rechnung und Experiment erhalten wurde (Bild 8, Niemunis et al. 2004a).

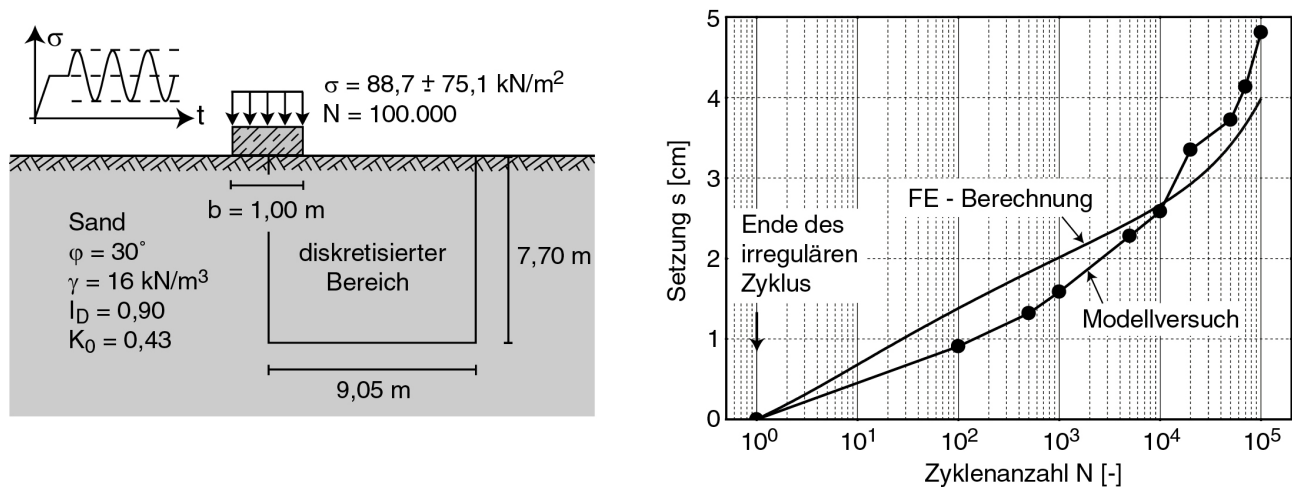


Bild 8: FE – Nachrechnung eines Zentrifugen – Modellversuches: Streifenfundament unter zyklischer Belastung (Niemunis et al. 2004a)

3 Dynamische Bodenkenngrößen

Das Bild 9 zeigt das Resonant Column – Gerät, mit dem die bodendynamischen Versuche durchgeführt wurden, deren Ergebnisse in den folgenden Abschnitten präsentiert werden. Details hinsichtlich des Gerätes, der Probenpräparation, der Versuchsdurchführung und -auswertung können bei Wichtmann et al. (2001) oder Wichtmann und Triantafyllidis (2004c) nachgelesen werden.

Alternativ besteht die Möglichkeit, die dynamischen Steifigkeiten bei sehr kleinen Dehnungen ($\gamma^{\text{ampl}} \approx 10^{-6}$) auch über die Messung von Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten in der Triaxialprobe mit Hilfe von piezoelektrischen Elementen zu bestimmen (siehe Bild 2a). Die auf diese Weise gemessenen Schubmoduli stimmen gut mit den Schubsteifigkeiten aus dem RC-Versuch überein (Wichtmann und Triantafyllidis 2004c).

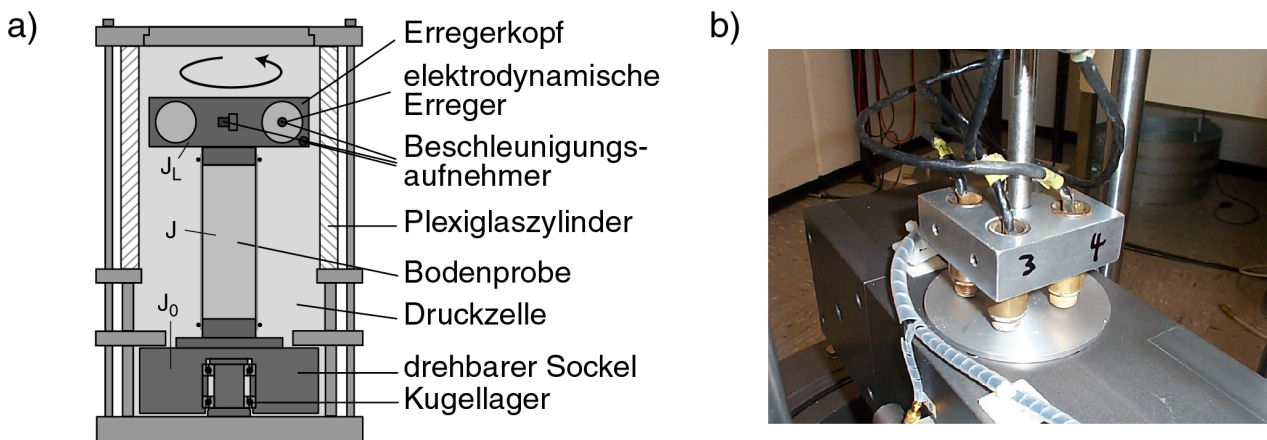


Bild 9: a) Schema des Resonant Column (RC) – Gerätes, b) Axiale Verformungsmessung im RC-Gerät

3.1 Nichtbindige Böden

Der dynamische Schubmodul G und der Dämpfungsgrad D der nichtbindigen Böden hängen insbesondere von der Spannung, der Porenzahl und der Scherdehnungsamplitude ab. Bild 10a zeigt den linearen Verlauf des Schubmoduls bei kleinen Dehnungen $G_0 = G(\gamma^{\text{ampl}} \approx 10^{-6})$ mit dem mittleren Druck p im doppeltlogarithmischen Maßstab für unterschiedliche Anfangslagerungsdichten I_{D0} . Bild 10b präsentiert die hyperbolische Abnahme von G_0 mit der Porenzahl e . Für den untersuchten Mittelsand kann die Abhängigkeit $G_0(p, e)$ durch die dimensionsreine empirische Gleichung von Hardin und Back (1966) beschrieben werden:

$$G_0 = A \frac{(a - e)^2}{1 + e} p_{\text{atm}}^{1-n} p^n \quad (10)$$

mit $A = 2750$, $a = 1,46$, $n = 0,42$ und dem atmosphärischen Druck $p_{\text{atm}} = 100 \text{ kPa}$. Eine gute Übereinstimmung der Schubmoduli G_0 nach Gleichung (10) mit den empirischen Formeln der Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 „Baugrunddynamik“ der DGGT (zurückgehend auf Hardin und Black 1966) konnte festgestellt werden (Wichtmann und Triantafyllidis 2004c). Eine Beziehung $E_{s0}(p, e)$ ähnlich zu Gleichung (10) ließ sich für den Elastizitätsmodul bei behinderter Seitendehnung aus der Messung der P-Wellenausbreitung in der Triaxialprobe aufstellen (Wichtmann und Triantafyllidis 2004c).

Während der Schubmodul G mit steigender Scherdehnungsamplitude γ^{ampl} (gemessen als geometrischer Mittelwert über das Probenvolumen) abnimmt (Bild 10c), steigt der Dämpfungsgrad D (Bild 10d). Die Verläufe $G/G_0(\gamma^{\text{ampl}})$ und $D(\gamma^{\text{ampl}})$ sind druckabhängig (Bilder 10c,d), variieren aber kaum mit der Lagerungsdichte (Wichtmann und Triantafyllidis 2004c) und lassen sich durch die folgende Gleichung nach Hardin (1972) gut approximieren (Wichtmann und Triantafyllidis 2004c):

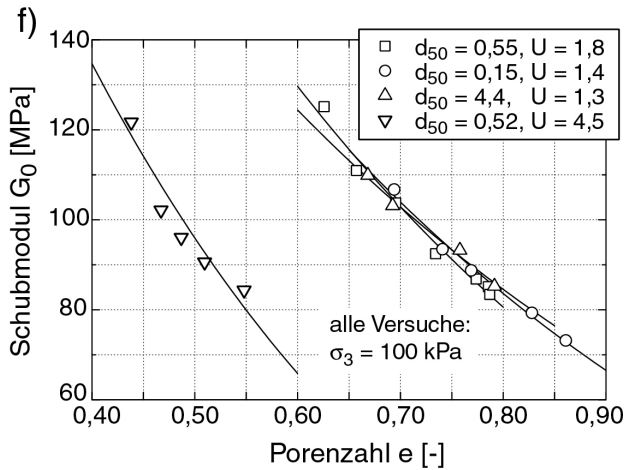
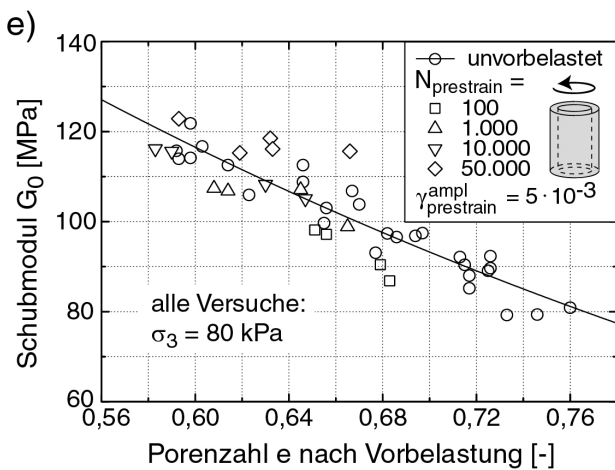
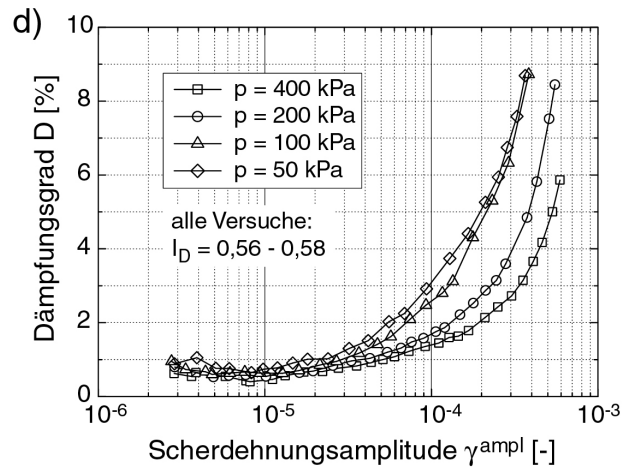
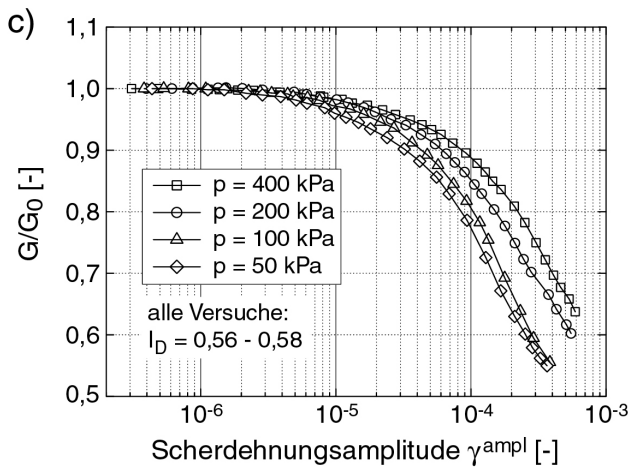
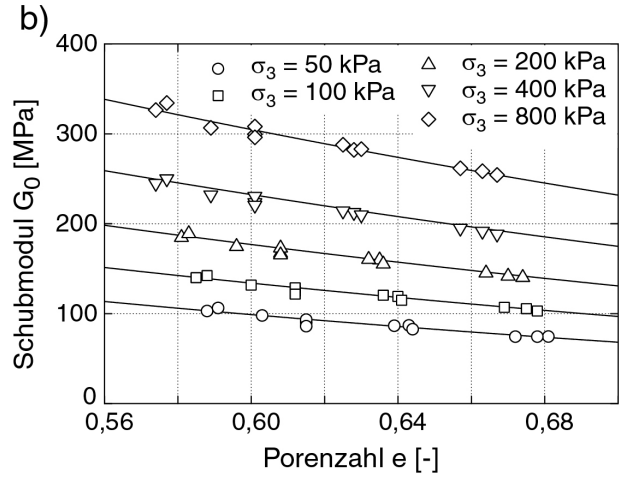
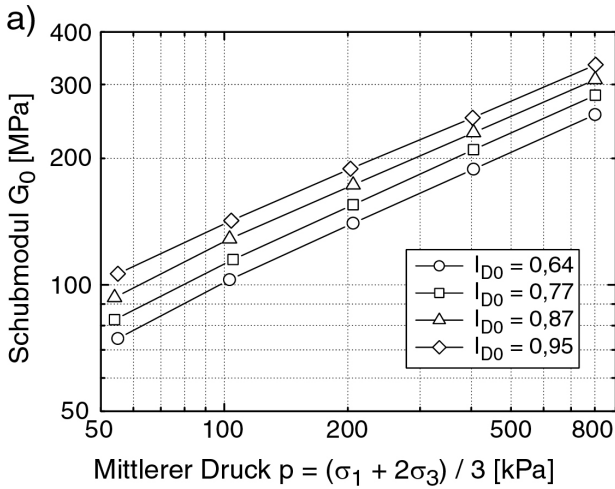


Bild 10: a) Steifigkeit G_0 als Funktion des mittleren Druckes p , b) Steifigkeit G_0 als Funktion der Porenzahl e , c) Verläufe $G/G_0(\gamma^{ampl})$, d) Verläufe $D(\gamma^{ampl})$, e) Steifigkeitsänderung nach zyklischer Vorbelastung, f) Einfluss der Kornverteilungskurve auf G_0 (Wichtmann und Triantafyllidis 2004c)

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma^{\text{ampl}}}{\gamma_r}} \quad \gamma_r = \frac{\tau_{\text{max}}}{G_0} \quad \tau_{\text{max}} = \sqrt{\left(\frac{1+K_0}{2}\sigma_1 \sin \varphi + c \cos \varphi\right)^2 - \left(\frac{1-K_0}{2}\sigma_1\right)^2} \quad (11)$$

Darin ist γ_r eine Referenzscherdehnung und τ_{max} die maximal mobilisierbare Schubspannung bei der vertikalen Spannung σ_1 und dem Seitendruckbeiwert K_0 (φ ist der Reibungswinkel und c die Kohäsion).

Das Bild 10e zeigt, dass eine zyklische Vorbelastung die Schubsteifigkeit G_0 selbst bei großen Vorbelastungsamplituden ($\gamma^{\text{ampl}} = 5 \cdot 10^{-3}$) und einer homogenen Verteilung der Scherdehnungen über den Probenquerschnitt (Hohlzylinderprobe) kaum beeinflusst (Wichtmann und Triantafyllidis 2004a). Ähnliche Schlüsse konnten auch aus Triaxialversuchen gezogen werden, in denen die zyklische Belastung mehrmals für die Messung der P- und S-Wellengeschwindigkeiten unterbrochen wurde (Wichtmann und Triantafyllidis 2004b). In den RC-Versuchen wurde lediglich im Bereich der Vorbelastungsamplitude eine Anomalie in den Verläufen $G/G_0(\gamma^{\text{ampl}})$ und $D(\gamma^{\text{ampl}})$ nach der Vorbelastung beobachtet (Wichtmann et al. 2001).

Einen Einfluss auf G_0 besitzt die Kornverteilungskurve. Während bei gleicher Ungleichförmigkeit $U = d_{60}/d_{10}$ der mittlere Korndurchmesser d_{50} keine Rolle spielt (Bild 10f), sinkt die Schubsteifigkeit bei gleichem d_{50} (und gleicher Porenzahl) mit zunehmender Ungleichförmigkeit (Bild 10f). Ein zunehmender Feinanteil (hier nicht getestet) kann zu einer weiteren Reduzierung der dynamischen Steifigkeit führen (Iwasaki und Tatsuoka 1977). Weiterhin steigt die Steifigkeit bei konstanter Spannung infolge von Alterungsprozessen (engl. *Aging*, Wichtmann und Triantafyllidis 2004c).

Eine Messung der axialen Verformung der RC – Proben (siehe Messtechnik in Bild 9b) zeigte, dass bleibende Dehnungen ab einer Scherdehnungsamplitude $\gamma^{\text{ampl}} \approx 10^{-4}$ (sog. Grenzscherdehnung γ_r , Vucetic 1994) auftreten (Wichtmann und Triantafyllidis 2004c), während der Übergang vom linear-elastischen zum nichtlinearen Materialverhalten (Beginn einer signifikanten Reduzierung von G mit γ^{ampl}) bei $\gamma^{\text{ampl}} \approx 10^{-5}$ zu finden ist (Bild 10c).

3.2 Bindige und organische Böden

Die folgenden Versuche an ungestörten Proben bindiger und organischer Böden wurden für die ICE – Strecken Nürnberg – Ingolstadt und Hamburg – Berlin durchgeführt.

Im Fall der Neubaustrecke Nürnberg – Ingolstadt (siehe auch Triantafyllidis und Wichtmann 2004) wurden Feuerlettentone des mittleren Keupers in drei unterschiedlichen Verwitterungsstufen (kmF-w3, kmF-w4, kmF-w5) sowie der Amaltheenton des Lias (I-w3-w4) untersucht. Die Proben der Varietäten kmF-w3, kmF-w4 und I-w3-w4 waren ungestört,

während der kmF-w5 in gestörter Form vorlag und mit unterschiedlichen Konsistenzen (mit der natürlichen Konsistenz sowie mit $I_c = 0,75$) präpariert wurde. Es wurden sowohl RC – Versuche zur Bestimmung der dynamischen Steifigkeit und der Materialdämpfung als auch zyklische Triaxialversuche zur Beurteilung der Akkumulation unter einer großen Anzahl von Lastzyklen durchgeführt.

Die RC-Versuche wurden an gesättigten Proben bei geöffneter Drainage und einem mittleren effektiven Druck von $p = 35$ kPa durchgeführt. Bild 11a zeigt die gemessenen Kurven des Schubmoduls G mit der Scherdehnungsamplitude γ^{ampl} und Bild 11b die entsprechenden Verläufe des Dämpfungsgrades D . Die geringsten Steifigkeiten ($G_0 = 20$ und 22 MPa, Bild 11a) wies der gestörte und auf eine Konsistenz von $I_c = 0,75$ aufbereitete Feuerlettenton kmF-w5 auf. Bei der natürlichen Konsistenz wurde für den kmF-w5 ein Wert von $G_0 = 35$ MPa gemessen. Höher liegen die Steifigkeiten des kmF-w4 ($G_0 = 39$ und 41 MPa) und des kmF-w3 ($G_0 = 44$ und 49 MPa). Die dynamische Steifigkeit sinkt also mit dem Verwitterungsgrad. Die größte Steifigkeit ($G_0 = 47$ und 62 MPa) wurde für den Amaltheenton ermittelt. Der Übergang vom linear-elastischen zum nichtlinearen Materialverhalten wurde für die ungestörten Proben bei ca. $\gamma^{\text{ampl}} = 10^{-5}$ und für die aufbereiteten Proben des kmF-w5 bei $\gamma^{\text{ampl}} = 3 \cdot 10^{-5}$ beobachtet (Bild 11a).

Die Dämpfungsgrade lagen bei kleinen Dehnungen zwischen 4 und 8 % und stiegen auf bis zu 20 % bei $\gamma^{\text{ampl}} = 6 \cdot 10^{-4}$ (Bild 11b). Die Varietäten kmF-w3 und kmF-w4 des Feuerletten weisen höhere Dämpfungsgrade auf als die aufbereiteten Proben des kmF-w5. Die Kurven $D(\gamma^{\text{ampl}})$ verlaufen beim Amaltheenton I-w3-w4 steiler als beim Feuerlettenton (Bild 11b).

Bild 11c zeigt, dass (ähnlich wie beim Sand, Abschnitt 3.1) signifikante Setzungen der Proben ab einer Scherdehnungsamplitude von $\gamma^{\text{ampl}} \approx 10^{-4}$ auftreten (bei den gestörten Proben lag diese Grenzscherdehnung etwas höher als bei den ungestörten Proben).

Das Langzeitverhalten der Tone wurde in undrännierten zyklischen Triaxialversuchen untersucht. Es wurde eine Versuchsreihe an gesättigten und eine Reihe an ungesättigten Proben durchgeführt. In den Versuchen wurde einem isotropen Spannungszustand $\sigma_1' = \sigma_3'$ eine zyklische Belastung mit der Amplitude σ_1^{ampl} überlagert, d.h. die axiale Spannung oszillierte in einem Zyklus zwischen σ_1' und $\sigma_1' + 2\sigma_1^{\text{ampl}}$. Es wurde die Mehrstufentechnik verwendet, d.h. es wurden zunächst 10^6 Zyklen mit einer Amplitude $2\sigma_1^{\text{ampl}} = 20$ kPa, anschließend 10^6 Zyklen mit $2\sigma_1^{\text{ampl}} = 30$ kPa und abschließend weitere 10^6 Zyklen mit $2\sigma_1^{\text{ampl}} = 40$ kPa aufgebracht. Die bleibenden axialen Dehnungen $\varepsilon_1^{\text{acc}}$ in den Versuchen an ungesättigten Proben zeigt das Bild 11d. Die geringste Verformungsakkumulation wurde für den aufbereiteten Feuerlettenton der Varietät kmF-w5 gemessen (evtl. auch aufgrund der Probenpräparation durch lagenweises Einstampfen = zyklische Vorbelastung, s.o.). Relativ gering blieben auch die akkumulierten Dehnungen im Fall des Feuerlettentons kmF-w3 und des Amaltheentons I-w3-w4. Die größten Verformungen wurden für den Feuerlettenton kmF-w4 beobachtet ($\varepsilon_1^{\text{acc}} = 0,84$ % nach dem dritten Zyklenpaket, Bild 11d).

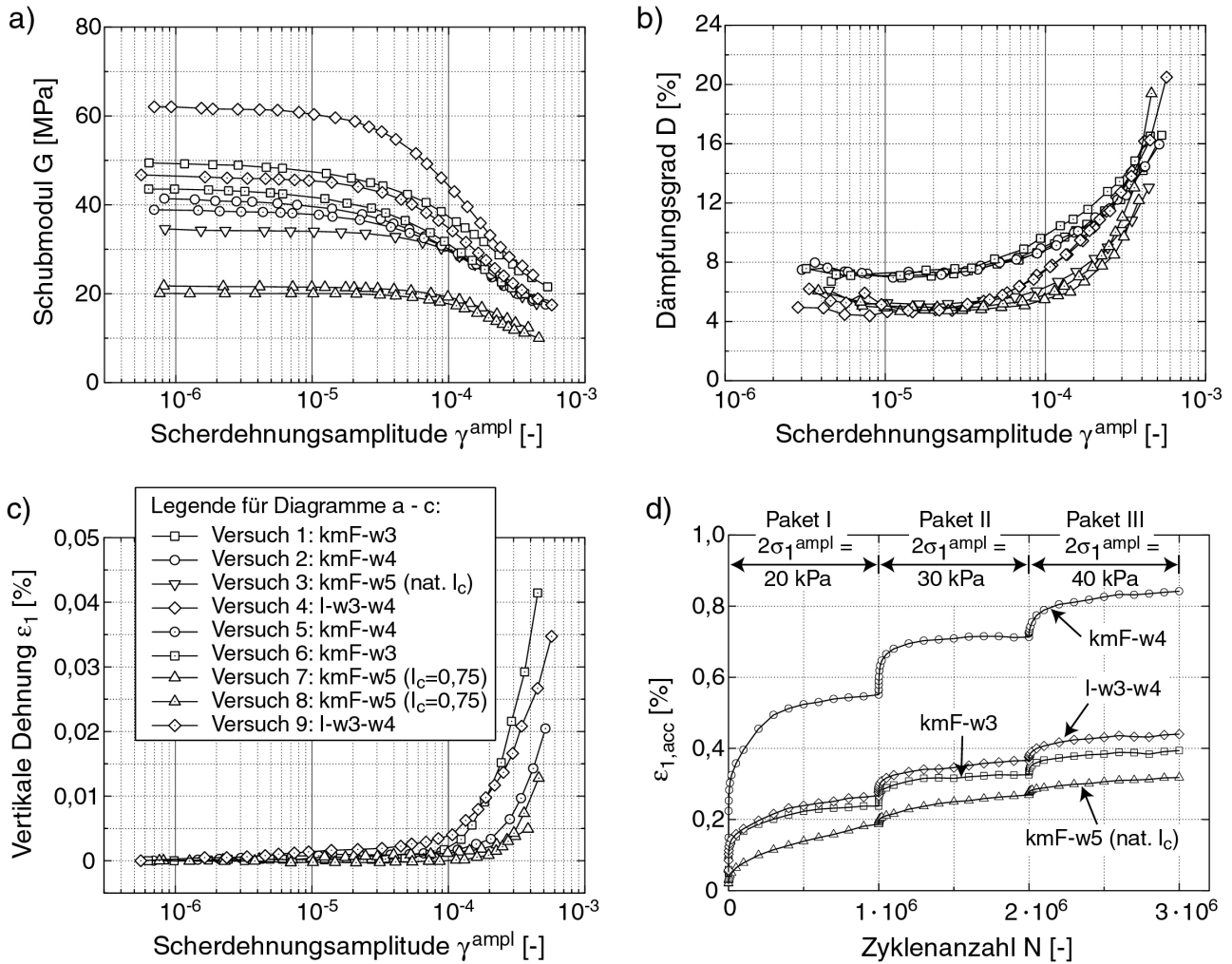


Bild 11: Untersuchungen an Feuerleiteton und Amaltheenton für die ICE – Neubaustrecke Nürnberg – Ingolstadt: a) Steifigkeit $G(\gamma^{ampl})$, b) Dämpfungsgrad $D(\gamma^{ampl})$, c) axiale Dehnung als Funktion der Scherdehnungsamplitude, d) Akkumulation der axialen Dehnung in zyklischen Triaxialversuchen mit Mehrstufentechnik (Triantafyllidis und Wichtmann 2004)

Problematischer erwies sich das Materialverhalten im gesättigten Zustand. Hier kam es insbesondere beim kmF-w4 unter $2\sigma_1^{ampl} = 20 \text{ kPa}$ zu einem signifikanten Anstieg des Porenwasserdruckes, zu einem Zustand verschwindender effektiver Spannungen (Verflüssigung) und damit zu großen Verformungsamplituden und auch zu großen bleibenden Verformungen. Ähnliches wurde für den Amaltheenton bei $2\sigma_1^{ampl} = 40 \text{ kPa}$ beobachtet (Details hierzu sind in Triantafyllidis und Wichtmann 2004 nachzulesen).

Für die Bahnstrecke Hamburg – Berlin wurden ungestörte Proben aus Kleiablagerungen in RC – Versuchen getestet (siehe auch Triantafyllidis und Wichtmann 2003). Die Tabelle 2 enthält die Bodenansprachen für die Proben, die ermittelten Wassergehalte w , die Konsistenzgrenzen w_L (w an der Fließgrenze) und w_P (w an der Ausrollgrenze) sowie die Plastizi-

täts- und Konsistenzzahlen $I_p = w_L - w_P$ bzw. $I_c = (w_L - w) / I_p$. Es wurden drei RC-Versuche zur Bestimmung der druckabhängigen Steifigkeit $G_0(p)$ und zur Ermittlung der Verläufe $G(\gamma^{\text{ampl}})$ und $D(\gamma^{\text{ampl}})$ durchgeführt (Proben 1 – 3). In weiteren RC-Versuchen (Proben 4 – 7) wurde die dynamische Langzeitstabilität unter einer hochzyklischen Torsionsbelastung untersucht.

Probe Nr.	Bodenansprache	Entnahmetiefe [m]	w [%]	w_L [%]	w_P [%]	I_p [%]	I_c [%]
1	Klei, Ton, schluffig mit Sandbändern < 1 cm weich	3,00 – 3,25	51,2	52,8	31,4	21,4	0,07
2	Torf mit Klei, weich	3,00 – 3,25	74,4	-	-	-	-
3	Klei, Schluff tonig, org. weich	3,00 – 3,25	69,9	-	-	-	-
4	Klei, Schluff, tonig, sandig, weich	3,00 – 3,25	36,6	38,2	32,4	5,8	0,28
5	Klei, Ton, schluffig, stark tonhaltig, weich bis breiig	5,75 – 6,00	93,2	120,5	41,7	78,8	0,35
6	Torf mit Klei, weich	5,75 - 6,00	108,1	107,4	34,9	72,5	-0,01
7	Klei, Ton, schluffig, torfhaltig, weich	5,75 – 6,00	79,1	107,6	45,2	62,4	0,46

Tabelle 2: In den Versuchen für die Bahnstrecke Hamburg – Berlin getestete Proben

Zur Bestimmung von $G_0(p)$ wurden die Proben ungesättigt in das Versuchsgerät eingebaut und zunächst unter $\sigma_3 = 50$ kPa konsolidiert (der leicht höhere mittlere Druck p im Bild 12a ergibt sich aus dem Eigengewicht des Erregerkopfes des RC-Gerätes). Nach Abschluss der Konsolidierung wurde der Schubmodul $G_0 = G(\gamma^{\text{ampl}} \approx 10^{-5})$ gemessen. Es folgte eine Erhöhung des Zelldruckes auf $\sigma_3 = 75$ kPa und nach der Konsolidierung wurde der Schubmodul unter der erhöhten Spannung bestimmt. Auf die gleiche Weise wurde der Wert $G_0(\sigma_3 = 100$ kPa) ermittelt. Der Versuch wurde bei $\sigma_3 = 100$ kPa mit einer Messung der Verläufe $G(\gamma^{\text{ampl}})$ und $D(\gamma^{\text{ampl}})$ abgeschlossen.

Bild 12a zeigt den Anstieg der Schubsteifigkeit G_0 mit dem mittleren Druck p . In der doppeltlogarithmischen Darstellung ergeben sich wie beim Sand (Bild 10a) lineare Verläufe. Die Steifigkeiten der Proben 2 und 3 lagen im untersuchten Druckbereich zwischen 2 und 5

MPa. Die höhere Steifigkeit der Probe 1 ($12 \text{ MPa} \leq G_0 \leq 23 \text{ MPa}$) ist vor allem auf die Sandeinlagerungen (siehe Tabelle 2) zurückzuführen.

Das Bild 12b präsentiert die Verläufe $G(\gamma^{\text{ampl}})$. Während die Abnahme des Schubmoduls mit der Scherdehnungsamplitude für die Proben 2 und 3 bis $\gamma^{\text{ampl}} = 6 \cdot 10^{-4}$ nicht mehr als 10 % betrug, reduzierte sich G bei der Probe 1 infolge der Sandeinlagerungen wesentlich schneller mit γ^{ampl} . Die Kurve $G(\gamma^{\text{ampl}})$ der Probe 1 ähnelt den bei Sand gemessenen Verläufen (Bild 10c). Der Dämpfungsgrad (Bild 12c) lag bei kleinen Dehnungsamplituden für alle Proben bei ca 3 % und stieg ab $\gamma^{\text{ampl}} = 10^{-4}$ an (z.B. auf ca. 8 % im Fall von Probe 1). Analog zu den Kurven des Schubmoduls nahm bei der Probe 1 der Dämpfungsgrad stärker mit γ^{ampl} zu als bei den Proben 2 und 3.

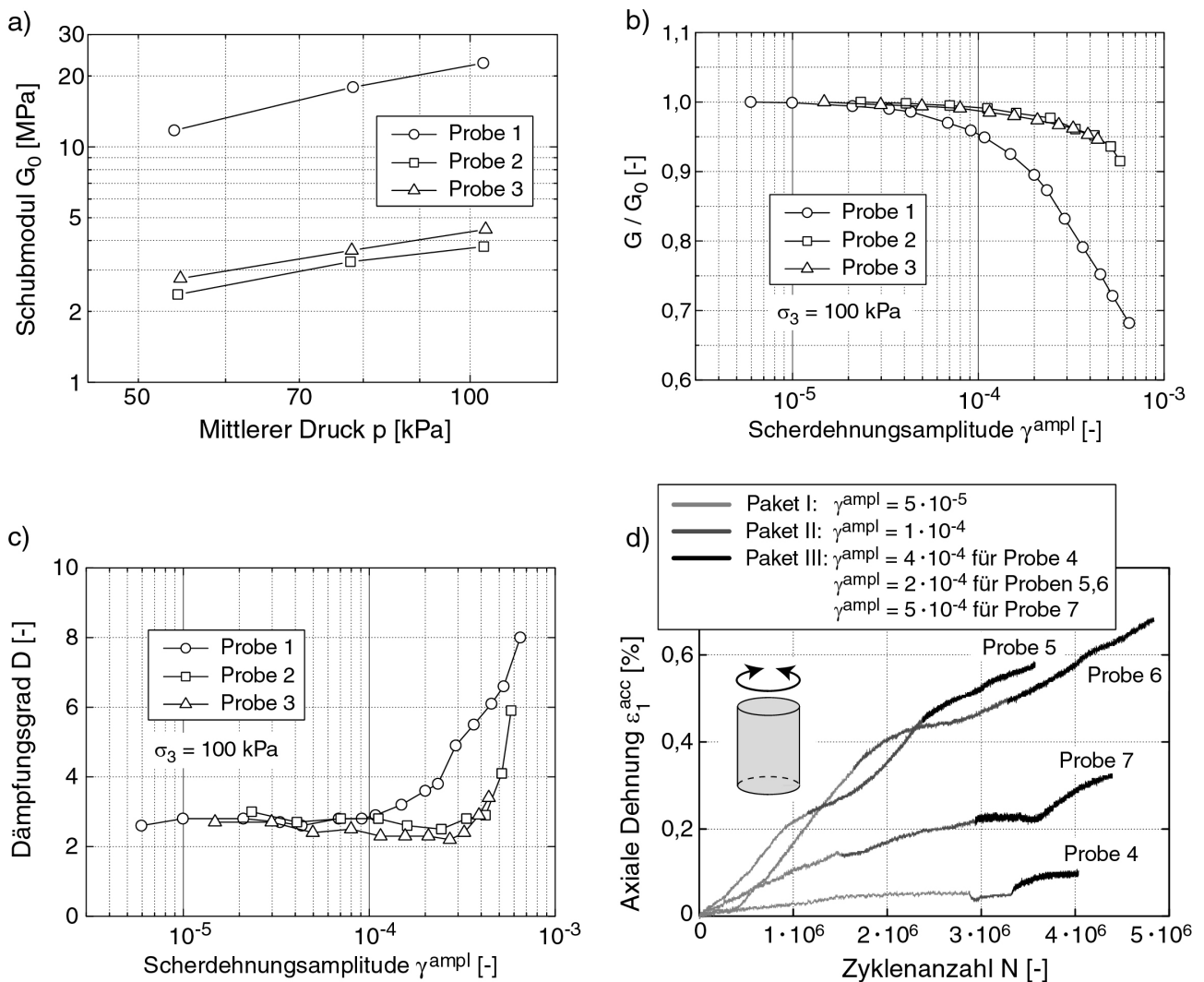


Bild 12: Untersuchungen an Klei und Torf für die ICE – Strecke Hamburg – Berlin: a) Steifigkeit G_0 als Funktion des mittleren Druckes p , b) Verläufe $G/G_0(\gamma^{\text{ampl}})$ bei $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, c) Verläufe $D(\gamma^{\text{ampl}})$ bei $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, d) Akkumulation axialer Dehnungen unter dynamischer Torsionsbelastung (Triantafyllidis und Wichtmann 2003)

Die Akkumulation von Verformungen unter einer größeren Anzahl von Lastspielen wurde in den Versuchen für die Strecke Hamburg – Berlin anders als in den Versuchen für Nürnberg – Ingolstadt nicht im zyklischen Triaxialversuch, sondern mit einer dynamischen Torsionsbelastung im RC – Gerät untersucht. Die Proben wurden in der Resonanzfrequenz f_R mit einer bestimmten Scherdehnungsamplitude γ^{ampl} dynamisch tordiert und die axialen Verformungen wurden gemessen. Es wurden nacheinander drei Zyklenpakete auf die Probe aufgebracht, wobei die Amplitude γ^{ampl} von Paket zu Paket gesteigert wurde (siehe Angaben zu γ^{ampl} in Bild 12d). Die Dauer der einzelnen Pakete betrug zumeist einen Tag. Die aufgebrachte Zyklenanzahl ergibt sich aus dieser Dauer und f_R . Bild 12d zeigt die akkumulierten axialen Dehnungen als Funktion der Lastspielzahl. Die Akkumulationskurven der Proben 5 und 6 waren in etwa identisch ($\epsilon_1^{\text{acc}} \approx 0,6 \%$ nach $N = 4 \cdot 10^6$ Zyklen). Mit sinkendem Wassergehalt w und abnehmender Plastizitätszahl I_P (siehe Tabelle 2) wurden kleinere bleibende Verformungen gemessen (siehe Proben 4 und 7 in Bild 12d).

Literatur

- Hardin, B.O. und W.L. Black [1966]. „Sand stiffness under various triaxial stresses”, J. of Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol. 92, No. SM2, pp. 27-42.
- Hardin, B.O. und V.P. Drnevich [1972]. „Shear modulus and damping in soils: design equations and curves”, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, Vol.98, No.SM7, pp. 667-692.
- Iwasaki, T. und F. Tatsuoka [1977]. „Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands”, Soils & Foundations, Vol. 17, No. 3, pp. 19-35.
- Niemunis, A [2003]. „Extended hypoplastic models for soils”, Habilitation, Schriftenreihe des Inst. für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, Heft 34.
- Niemunis, A., T. Wichtmann und T. Triantafyllidis [2004a]. „Explicit accumulation model for cyclic loading”, in *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, (T. Triantafyllidis, ed.) Balkema, Rotterdam, pp. 65-76.
- Niemunis, A., T. Wichtmann und T. Triantafyllidis [2004b]. „A high-cycle accumulation model for sand”, Computers & Geotechnics (eingereicht).
- Triantafyllidis, T. und T. Wichtmann [2003]. „Durchführung und Auswertung von Resonant-Column-Versuchen an ungestörten Proben aus norddeutschen Kleiablagerungen”, Bericht Projektnummer O-02-2003 für Bahnstrecke Hamburg – Berlin.
- Triantafyllidis, T., T. Wichtmann und A. Niemunis [2004]. „On the determination of cyclic strain history”, in *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, (T. Triantafyllidis, ed.) Balkema, Rotterdam, pp. 321-332.

- Triantafyllidis, T. und T. Wichtmann [2004]. „Verhalten bindiger Böden unter wechselnder dynamisch-zyklischer Beanspruchung“, Bericht Projektnummer E-06-2003 für Bahnstrecke Nürnberg-Ingolstadt.
- Vucetic, M. [1994]. „Cyclic threshold shear strains in soils“, *J. of Geotech. Engrg, ASCE*, Vol. 120, No. 12, pp. 2208-2228.
- Wichtmann, T., T. Sonntag und T. Triantafyllidis [2001]. „Über das Erinnerungsvermögen von Sand unter zyklischer Belastung“, *Bautechnik*, Vol. 78, Nr. 12, S. 852-865.
- Wichtmann, T., A. Niemunis und T. Triantafyllidis [2004a]. „Strain accumulation in sand due to drained uniaxial cyclic loading“, in *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, (T. Triantafyllidis, ed.) Balkema, Rotterdam, pp. 233-246.
- Wichtmann, T., A. Niemunis und T. Triantafyllidis [2004b]. „The effect of volumetric and out-of-phase cyclic loading on strain accumulation“, in *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*, (T. Triantafyllidis, ed.) Balkema, Rotterdam, pp. 247-256.
- Wichtmann, T., A. Niemunis und T. Triantafyllidis [2004c]. „Setzungsakkumulation in nichtbindigen Böden unter hochzyklischer Belastung“, *Bautechnik* (eingereicht).
- Wichtmann, T. und T. Triantafyllidis [2004a]. „Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part I: cyclic and dynamic torsional pre-straining“, *Soil Dyn. Earthqu. Eng.*, Vol. 24, pp. 127-147.
- Wichtmann, T. und T. Triantafyllidis [2004b]. „Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part II: cyclic axial preloading“, *Soil Dyn. Earthqu. Eng.* (in print).
- Wichtmann, T. und T. Triantafyllidis [2004c]. „Dynamische Steifigkeit und Dämpfung von Sand bei kleinen Dehnungen“, *Bautechnik* (eingereicht).