

Im modernen Verkehrswegebau, insbesondere im Eisenbahnbau, ist die Fragestellung der Kornstabilität und des Langzeitverhaltens nichtbindiger Böden und Schotter von großer Bedeutung. Dies gilt besonders auch im Hinblick auf die Grenzen konventioneller Schotteroberbausysteme bei zunehmenden Fahrgeschwindigkeitserhöhungen. Mit dem entwickelten zyklisch viskoelastisch-viskoplastischen Stoffansatz ist es möglich, das plastische und elastische Langzeitverhalten in Abhängigkeit von den Belastungsrandbedingungen und Spannungszuständen sowie wesentlicher Materialeigenschaften zu beschreiben. Durch die numerische Umsetzung des Stoffansatzes kann zwischenzeitlich auch das plastische Langzeitverhalten komplexer dreidimensionaler Strukturen zufriedenstellend berechnet werden.

**Cyclic viscoelastic-viscoplastic constitutive approach for granular soils and ballast.** *In modern track building, in particular railway tracks, grain stability and long-term behaviour of non-cohesive soils and ballast have gained importance. Especially the capacity of conventional ballasted tracks are of major interest. The developed cyclic viscoelastic-viscoplastic constitutive approach presented in the actual work describes the long term plastic and elastic material behaviour. Major dependencies are defined by loading conditions and states of stress. With a numerical model implemented, the modelling of the plastic deformation behaviour of complex three dimensional structures under cyclic loading is made possible too.*

## 1 Einleitung

Bei einer Vielzahl von Bauwerken, wie Brücken, Maschinenfundamenten, Verkehrs- und Offshore-Bauwerken treten neben statischen auch zyklische und z. T. dynamische Beanspruchung auf, die über Gründungselemente in den Baugrund eingeleitet werden. Die zyklisch-dynamische Belastungsform führt zu einer mit jedem Belastungszyklus sich fortsetzenden bleibenden Dehnung, die i. d. R. immer kleiner wird und über die Beanspruchungszeit nahezu abklingt. Das Verhalten nichtbindiger Böden unter nichtruhender Beanspruchung wird ansatzweise in [1], [5], [8], und [10] beschrieben.

Nichtruhende Belastungen beeinflussen im wesentlichen die Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken. Die mit der Belastungszeit zunehmenden plastischen Dehnungen sowie das ggf. sich ändernde Stoffverhalten des Bodens kann aber auch zur Einschränkung der Tragfähigkeit führen bzw. lokal an Bauwerksteilen oder Untergrundbereichen einen Tragfähigkeitsverlust herbeiführen.

Im vorliegenden Beitrag wird ein zyklisch viskoelastisch-viskoplastischer Stoffansatz vorgestellt, der das nichtlineare Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung beschreibt.

## 2 Stoffgesetze/Stoffansätze

Die Beschreibung des Stoffverhaltens nimmt in der Geotechnik einen wesentlichen Stellenwert ein. Dies ist in der Vielzahl der unterschiedlichen Böden mit ihren sehr komplexen Eigenschaften und Abhängigkeiten begründet.

In der Geotechnik existiert eine große Bandbreite an Modelltheorien, die in Abhängigkeit von der Bodenart und deren Eigenschaften das Spannungs-Dehnungs-Verhalten ermitteln. Zu nennen sind die klassischen Spannungs-Dehnungs-Betrachtungen der linearen Elastizitäts- und Plastizitätstheorie, die im Laufe der Entwicklung um das nichtlineare Materialverhalten sowie Ver- und Entfestigung erweitert wurden. Darüber hinaus entstanden u. a. viskoelastische und viskoplastische Formulierungen sowie das hypoplastische Stoffgesetz, mit welchem die Zeitabhängigkeit des Bodens berücksichtigt wird.

Für zyklische bzw. zyklisch-dynamische Belastungsvorgänge und die daraus resultierenden Dehnungen wurden neben physikalisch begründeten Stoffgesetzen, wie das hypoplastische Stoffgesetz, empirische Setzungsgesetze (settlement law) entwickelt. Mit diesen wird das elastische und plastische Dehnungsverhalten der Böden hauptsächlich in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel beschrieben. Nur vereinzelt werden Spannungszustände oder Materialkenngrößen berücksichtigt. Bei entsprechender Problemstellung werden bei diesen Ansätzen die Parameter aus Labor- bzw. Modellversuchen unter den gegebenen Randbedingungen ermittelt und als feste Größen in die Setzungsgesetze eingefügt.

Der nachfolgend beschriebene Stoffansatz erweitert die bestehenden Setzungsgesetze dahingehend, daß plastische und elastische Dehnungen in Abhängigkeit der Spannungszustände, der Anzahl der Lastwechsel und deren Frequenz sowie der Materialeigenschaften ermittelt werden.

## 3 Experimentelle Untersuchungen

Die Entwicklung des zyklisch viskoelastisch-viskoplastischen Stoffansatzes erfolgte auf der Grundlage umfangreicher zyklisch-dynamischer Triaxialversuche an verschiedenen nichtbindigen Böden und Schotterkornungen. Die Kornverteilungskurven der untersuchten Materialien sind in Bild 1 abgebildet. Als Versuchsgesetz kam das eigens für diesen Stoffansatz entwickelte „Kombinierte zyklische Triaxial- und Resonant-Column-Versuchsgerät (CTRC)“ zum Einsatz. Das CTCRC-



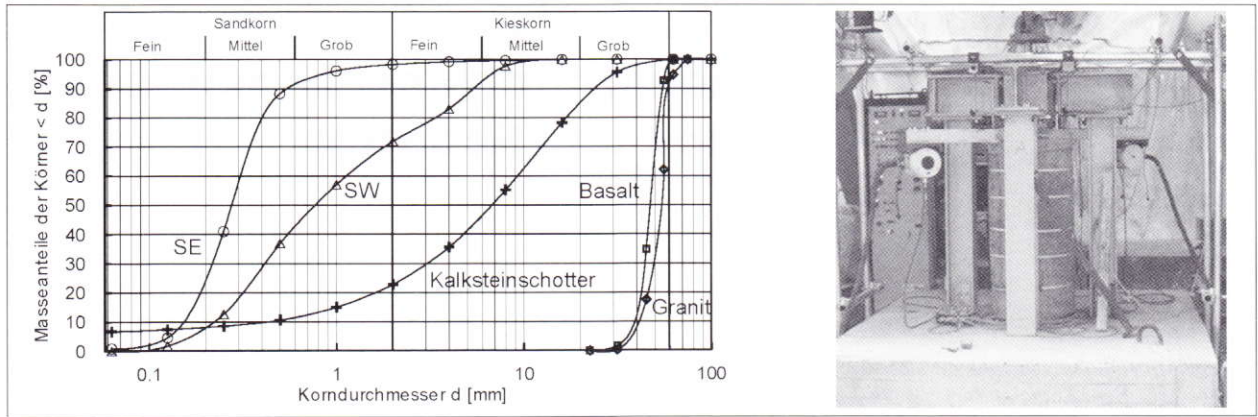


Bild 1. Kornverteilungskurven der untersuchten Materialien und CTRC-Versuchsstand  
 Fig. 1. Grain side of the investigated Soils and the test device

Versuchsgerät ermöglicht die Untersuchung von Bodenproben mit 100 cm Probenhöhe und 50 cm Durchmesser. Aufgrund der verwendeten Vakuumtechnik zur Aufbringung des Seitendrucks ist dieser mit max.  $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$  begrenzt, die axiale Belastungsfrequenz  $f_B$  betrug 1 bis 10 Hz. Versuchsaufbau, Arbeitsweise und Meßtechnik des CTRC-Versuchsgeräts ist in [2] ausführlich beschrieben.

Das durchgeführte Versuchsprogramm sah die Untersuchung des Materialverhaltens in Abhängigkeit der folgenden Einflußgrößen vor:

$$E_{S,dyn} = \frac{\sigma_c}{\epsilon_{ce}} = f(\sigma_3, \sigma_c, N, f_B, \varphi, e, M) \quad (1)$$

$$\epsilon_{cp} = f(\sigma_3, \sigma_c, N, f_B, \varphi, e, M) \quad (2)$$

- $\sigma_3$  kleinste Hauptspannung
- $\sigma_c, \sigma_{dyn}$  dynamische oder zyklische Spannung
- N Anzahl der Lastzyklen
- $\varphi$  Reibungswinkel des Bodens
- e Porenzahl
- M mineralogische Materialeigenschaften

Während der Versuchsdurchführung wurden die Proben mit  $N = 10^5$  bis  $10^6$  Lastwechseln sinusförmig belastet. Die Datenerfassung erfolgte in Meßfenstern zu verschiedenen Versuchszeitpunkten. Dabei wurden vollständige Spannungs-Dehnungs-Schleifen aufge-

nommen, aus denen das elastische und plastische Verhalten ermittelt wurde, s. Bild 2.

**4 Versuchsergebnisse**

Mit dem experimentellen Versuchsprogramm konnten Abhängigkeiten des elastischen und plastischen Dehnungsverhaltens der in Gl. (1) angeführten Einflußparameter festgestellt werden. Nachfolgend sollen einige wesentliche Ergebnisse näher angesprochen werden. Das generelle elastische und plastische Dehnungsverhalten nichtbindiger Böden und Schotter läßt sich wie folgt zusammenfassen:

- Zunahme der plastischen Dehnungen mit zunehmender Anzahl an Lastwechseln
- Abnahme der Zuwachsraten der plastischen Dehnungen mit zunehmender Anzahl an Lastwechseln ( $X \leq X_{krit}$ )
- Zunahme der Steifigkeit (Aufrichten der Hystereseschleifen) mit zunehmender Zyklenzahl
- bananenförmige Hysteresefigur, deren Flächeninhalt (Dämpfungsmaß) mit zunehmender Anzahl an Lastwechseln

Eine detaillierte Versuchsauswertung ist in [3] zu finden.

**4.1 Plastisches Verhalten**

In Bild 3 ist der Einfluß der zyklisch-dynamischen Spannung  $\sigma_c$  auf das plastische Dehnungsverhalten nach dem ersten Lastwechsel dargestellt. Die zyklisch-dynamische Spannung  $\sigma_c$  wird hier in der normierten Form des zyklischen Spannungsverhältnisses X verwendet. X beschreibt nach Gl. (3) das Verhältnis der zyklisch-dynamischen Spannung zur statischen Deviatorspannung im Bruchzustand:

$$X = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_c}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{s,f}} \quad (3)$$

Die bleibenden Dehnungen wachsen mit zunehmendem zyklisch-dynamischen Spannungsverhältnis X exponentiell an. Dieser Zuwachs ist theoretisch bis zu einem Verhältnisfaktor  $X = 1$  zu erwarten, wobei bei den untersuchten nichtbindigen Böden und Schotter ab einem Spannungsverhältnis  $X_{krit} \geq 0,85$  ein zyklischer Versagenszustand zu erwarten ist. Im Fall  $X <$

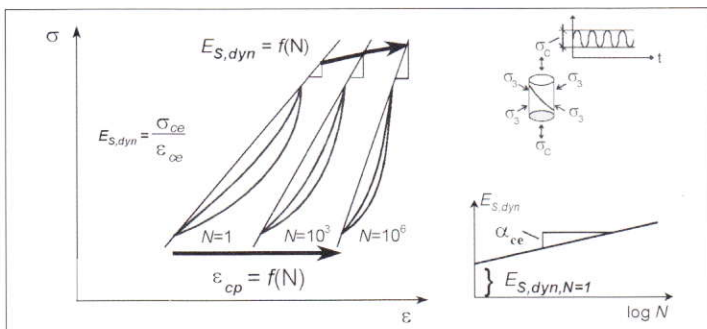


Bild 2. Aufgenommene Hystereseschleifen im zyklischen Triaxialversuch  
 Fig. 2. Hysteresis slup of soil in the cyclic triaxial test device



$X_{krit}$  konvergieren die plastischen Dehnungen gegen eine Asymptote, d. h., die plastischen Dehnungsinkremente gehen gegen Null. Dieser Zustand wird als zyklische Beruhigung bezeichnet und beschreibt die zyklisch-dynamische Stabilität.

Den wesentlichsten Materialparameter nichtbindiger Böden und Schotter stellt die Porenzahl bzw. die Porosität dar. In Bild 3b ist die Abhängigkeit der plastischen Dehnung nach dem ersten Lastwechsel  $\epsilon_{cp, N=1}$  von der Porenzahl  $e$  und dem zyklischen Spannungsverhältnis  $X$  abgebildet. Änderungen der Porenzahl  $e$  und damit einhergehend der Lagerungsdichte  $D$  wirken sich auf das plastische und elastische Dehnungsverhalten aus. Mit abnehmender Porenzahl (Zunahme der Lagerungsdichte) nehmen die plastischen Dehnungen bei ansonsten gleichen Randbedingungen

ab. Der Einfluß der Pyknotropie (dichteabhängiges Materialverhalten) nichtbindiger Böden wurde bei der Auswertung in Bild 3 vernachlässigt. Unter Berücksichtigung des pyknotropen Materialverhaltens verschiebt sich die Kurve für  $\rho_E = 1,65 \text{ g/cm}^3$  in Bild 3b nach rechts. Die abnehmende deviatorische Bruchspannung bei zunehmender Porenzahl und dem damit einhergehenden höheren Spannungsverhältnis  $X$  bei gleichbleibendem  $\sigma_c$  ist hierfür verantwortlich. Die qualitative Aussage von Bild 3b, daß bei konstanter zyklisch-dynamischer Spannungsamplitude aber höherer Porenzahl bzw. geringerer Scherfestigkeit größere plastische Anfangsdehnungen auftreten, wird dadurch nicht beeinträchtigt.

Bild 4 beschreibt den Verlauf der Porenzahl mit zunehmender Anzahl der Lastwechsel. Unabhängig

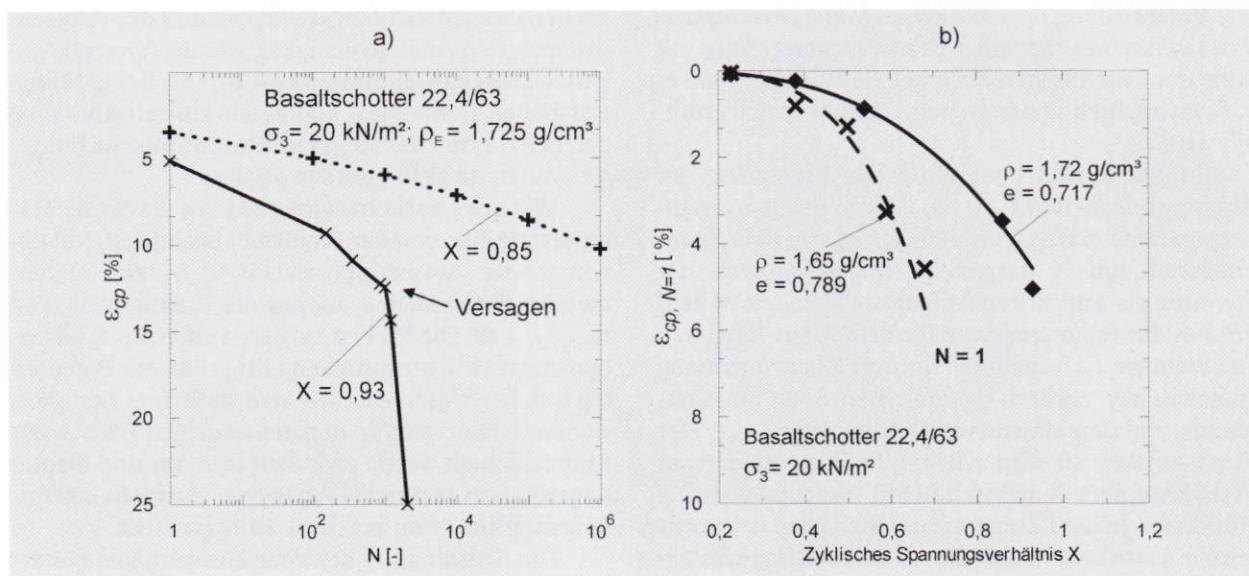


Bild 3. Plastisches Dehnungsverhalten unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung; a) abhängig von  $X$ , b) abhängig von der Einbaudichte  
 Fig. 3. Behaviour of plastic strain under cyclic-dynamic strength; a) influence of  $X$ , b) influence of density

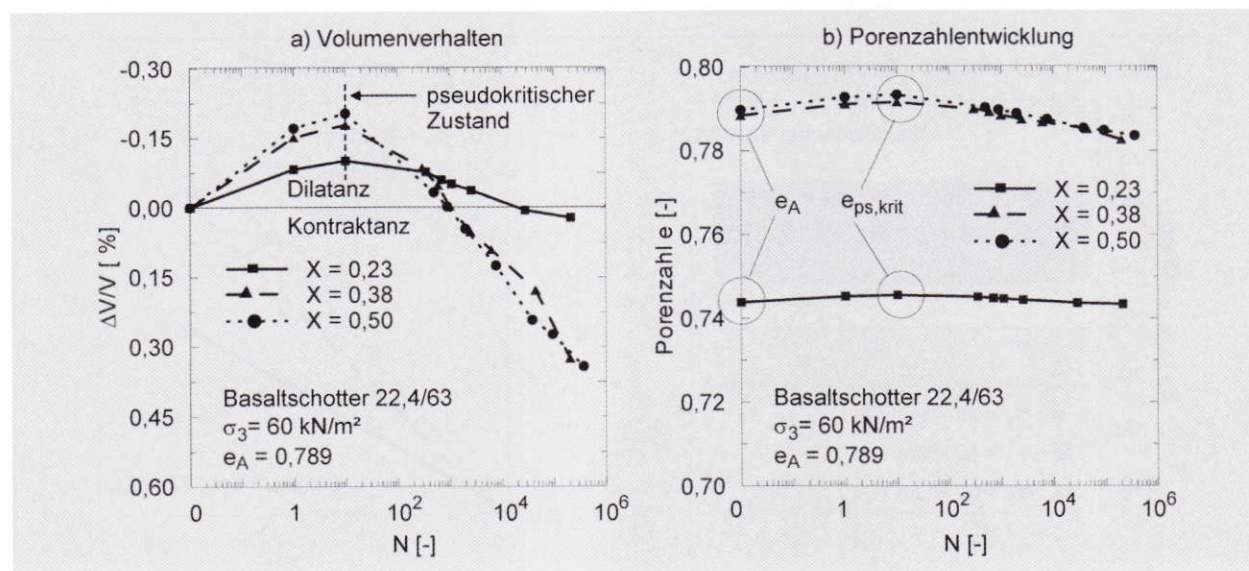


Bild 4. Volumen- und Porenzahlentwicklung zyklisch-dynamisch beanspruchter Gleisschotterproben in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastzyklen  
 Fig. 4. Development of volume and void ratio for ballast under cyclic-dynamic strain versus number of cycles



von der Einbaudichte reagierten die Proben bis zu einer Zyklenzahl  $N_{krit}$  mit einer Zunahme der Porenzahl, d. h. mit dilatantem Verhalten. Anschließend trat unter der zyklisch-dynamischen Beanspruchung eine Verdichtung der Proben ein (Kontraktanz). Der Übergang vom dilatanten zum kontraktanten Verhalten lag bei den untersuchten Proben in einem Schwankungsbereich zwischen  $N_{krit} = 1$  bis  $N_{krit} = 100$  und konnte aus der halblogarithmischen  $\Delta V/V-N$ -Darstellung im Mittel bei  $N_{krit} \sim 10$  bestimmt werden. Zum Belastungszeitpunkt  $N_{krit}$  besitzt das nichtbindige Bodenmaterial sowie der Schotter die größte Porenzahl. Diese Porenzahl wird in Anlehnung an statische Triaxialversuche als „Pseudokritische Porenzahl  $e_{ps,krit}$ “ bezeichnet.

**4.2 Elastisches Verhalten**

Die Beschreibung des elastischen Materialverhaltens unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung erfolgt mit Hilfe des dynamischen Sekantenmodul  $E_{S,dyn}$ , wie er z. B. im zyklisch-dynamischen Triaxialversuch ermittelt wird.

In Bild 5 sind beispielhaft die Ergebnisse der Anfangssteifigkeiten  $E_{S,dyn,N=1}$  sowie des Kurvenanstiegsparameters  $\alpha_{ce}$  in Abhängigkeit von dem Spannungsverhältnis  $X$  dargestellt. Abgesehen von der Streuung der ermittelten Anfangssteifigkeiten ist kein Einfluß des Spannungsverhältnisses  $X$  auf  $E_{S,dyn,N=1}$  zu erkennen. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der zyklisch-dynamischen Spannungsamplitude und den elastischen Dehnungen  $\epsilon_{ce,N=1}$ . Der Kurvenanstieg  $\alpha_{ce}$  wird, wie in Bild 5b zu sehen, vom Verhältnisfaktor  $X$  bestimmt. Mit zunehmendem  $X$  erfolgt eine höhere Zunahme der Steifigkeit bei wachsender Lastwechselzahl. Die Abnahmegeschwindigkeit der elastischen Dehnungen ist daher mit zunehmendem Spannungsverhältnis  $X$  größer. Im weiteren kann aus Bild 5a geschlossen werden, daß die von der Seitenspannung abhängige Anfangssteifigkeit  $E_{S,dyn,N=1}$  des nichtbindigen Bodens und des Schot-

ters näherungsweise dem Anfangstangentenmodul  $E_T$  unter statischen Randbedingungen entspricht. Das heißt, die zyklisch-dynamische Beanspruchung hat keinen Einfluß auf die Anfangssteifigkeit. Sie bestimmt ausschließlich den Zuwachs der Steifigkeit mit zunehmender Lastwechselzahl.

Der Vergleich der Anfangssteifigkeit  $E_{S,dyn,N=1}$  und dem Anfangstangentenmodul  $E_T$  aus dem statischen Triaxialversuch ergab ca. 15 % kleinere Werte als bei den statischen Versuchen. Unter Berücksichtigung der Streuung der Anfangssteifigkeiten  $E_{S,dyn,N=1}$  aber auch der Anfangstangentenmodule  $E_T$  kann näherungsweise von der Beziehung

$$E_{S,dyn,N=1} \approx E_T \tag{4}$$

ausgegangen werden. Diese Beziehung zwischen statischer Tangentenanstiegssteifigkeit und der zyklisch-dynamischen Anfangssteifigkeit gilt nur für vergleichbare elastische Dehnungen  $\epsilon_e < 10^{-2}$  %. Bei größeren elastischen Dehnungen konnte die Übereinstimmung nach Gl. (4) mit dem durchgeführten Untersuchungsprogramm nicht festgestellt werden.

Wie das plastische wird auch das elastische Materialverhalten von der Porenzahl beeinflusst. Mit zunehmender Ausgangsporenzahl, d. h., mit abnehmender Einbaudichte, nimmt die Anfangssteifigkeit  $E_{S,dyn,N=1}$  ab. Die Proben reagieren unter der zyklisch-dynamischen Beanspruchung bei größerem Porenanteil weicher, was in Affinität zum statischen Kompressionsverhalten steht. In dem untersuchten Bereich der Einbaudichten wurde zwischen lockerer und dichter Lagerung ein porenzahlabhängiger Zuwachs der Anfangssteifigkeit von maximal 50 % ermittelt.

Die Kombination der Versuchstechniken des zyklischen Triaxial- mit dem Resonant-Column-Versuch im CTCRC-Gerät ermöglichte den Vergleich der elastischen Materialkennwerte beider Versuchstechniken an ein und derselben Probe in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte.

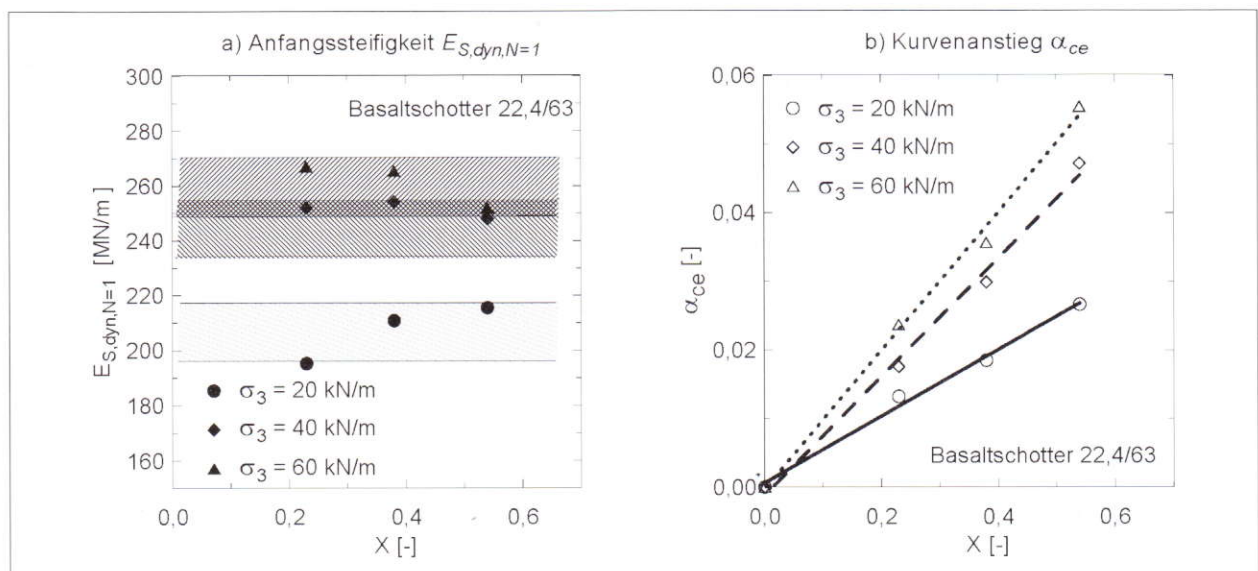


Bild 5. Elastisches Verhalten vs. zyklischem Spannungsverhältnis  
 Fig. 5. Elastic behaviour versus cyclic stress level  $X$



Bei dem Vergleich der elastischen Parameter aus zyklischen Triaxial- und Resonant-Column-Versuchen ist die Einbeziehung der Axial- und der Scherdehnung von wesentlicher Notwendigkeit. Die Größe des Elastizitäts- und Schubmoduls ist von der aufgetragenen Dehnung abhängig. Für die angestellten Vergleiche des elastischen Verhaltens beider Versuchstechniken wurde zuvor die Scherdehnung  $\gamma_e$  mit der Axialdehnung  $\epsilon_{ce}$  nach Gl. (5) verglichen:

$$\gamma_e = \epsilon_{ce} \cdot (1 + \nu_{dyn}) \quad (5)$$

Um die Vergleichbarkeit von Scherdehnung und zyklischer Axialdehnung zu erlangen, wurden in jeder RC-Phase verschiedene dynamische Torsionsmomente aufgebracht und somit unterschiedliche Scherdehnungen erzielt. Sofern die Voraussetzung nach Gl. (5) erfüllt war, wurde aus dem Schubmodul  $G_{dyn}$  des RC-Versuchs der dynamische Elastizitätsmodul  $E_{dyn}$  berechnet:

$$G_{dyn} = \frac{E_{dyn}}{2 \cdot (1 + \nu_{dyn})} \quad (6)$$

Die Untersuchungen ergaben, daß unter Berücksichtigung der Ergebnisstreuung die Steifigkeit bei dynamischer Beanspruchung im RC-Versuch  $E_{dyn}$  zum Zeitpunkt  $N = 0$  und die Anfangssteifigkeit  $E_{S,dyn,N=1}$  nahezu identisch sind (Bild 6).

Obwohl der dynamische Schubmodul  $G_{dyn}$  von der Dichte beeinflusst wird, war in den RC-Versuchen nur ein geringer Anstieg von  $G_{dyn}$  bzw.  $E_{dyn}$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel festzustellen. Die zyklisch-dynamische Belastungsphase in axialer Richtung hat im verwendeten Spannungsbereich einen vernachlässigbaren Einfluß auf die dem RC-Versuch zugrunde liegende Scherwellengeschwindigkeit  $V_S$ , s. [3].

Ein weiteres wesentliches Untersuchungsergebnis zum elastischen Materialverhalten war die Erkennt-

nis, daß die Belastungsfrequenz  $f_B$  im untersuchten Frequenzbereich bis 10 Hz keinen Einfluß auf das elastische Verhalten hat. Aufgrund dieser Versuchsergebnisse sowie der Ergebnisse von [5] und [9] ist die Existenz eines „dynamischen“ Moduls für nichtbindige Böden und Schotter zu verneinen. Nichtbindige Böden und Schotter besitzen unter dränierten Randbedingungen keine viskosen Eigenschaften. Die in der Literatur oftmals falsch verwendete Differenzierung zwischen statischer und dynamischer Steifigkeit ist nicht in der Beanspruchungsart, sondern in den unterschiedlichen elastischen Dehnungen, Spannungszuständen und Belastungsgeschichten bei deren Ermittlung begründet.

### 5 Zyklisch viskoelastisch-viskoplastischer Stoffansatz

Für die Ableitung des Stoffansatzes wurde eine zyklisch viskoelastisch-viskoplastische Modellvorstellung (CVP-Modell) entwickelt, die auf der klassischen elastisch-viskoplastischen Modellvorstellung sowie der Modelltheorie von [7] aufbaut (Bild 7). Mit diesem Modell werden die plastischen ( $\epsilon_{c,p}$ ) und die elastischen ( $\epsilon_{c,e}$ ) Dehnungsanteile getrennt betrachtet und können anschließend zur zyklisch-dynamischen Gesamtdehnung  $\epsilon_{c,ges}$  zusammengesetzt werden:

$$\epsilon_{c,ges} = \epsilon_{cp} + \epsilon_{ce} \quad (7)$$

Das CVP-Modell besteht grundsätzlich aus drei hauptsächlichen Elementbausteinen:

- dem zyklischen Bruchkriterium
- dem zyklisch-viskoplastischen Element
- und dem zyklisch-viskoelastischen Element.

Die einzelnen Modellelemente und ihre Bausteine sind nachfolgend näher erläutert.

Das Gleitelement ( $g_p$ ) beinhaltet das zyklisch-dynamische Bruchkriterium  $K$ , mit welchem das zyklische Versagen ( $X > K$ ) beschrieben wird.

$$K = \frac{(\sigma_{1,c} - \sigma_{3,c})_f}{(\sigma_{1,s} - \sigma_{3,s})_f} \geq X \quad (8)$$

mit

$K$  Bruchkriterium der zyklischen zur statischen Deviatorbruchspannung nach [6]

Das zyklisch-dynamische Bruchkriterium  $K$  und das Spannungsverhältnis  $X$  werden nach Gl. (8) von der statischen Deviatorbruchspannung beeinflusst und sind somit vom Reibungswinkel  $\varphi'$  abhängig.

Das plastische Konsolidationselement ( $k_{cp}$ ) berücksichtigt den Einfluß der Anzahl der Lastwechsel, der zyklisch dynamischen Spannung  $\sigma_c$ , dem zyklischen Spannungsverhältnis  $X$ , der Porenzahl  $e$  und mineralogische Materialkennwerte. Das zyklische Konsolidationselement ( $k_{cp}$ ) ist als eine Art „Feststellfeder“ anzusehen, bei der die unter einer zyklisch-dynamischen Belastung erreichten plastischen Dehnungen nach Wegnahme der Belastung nicht wieder zurückgehen.

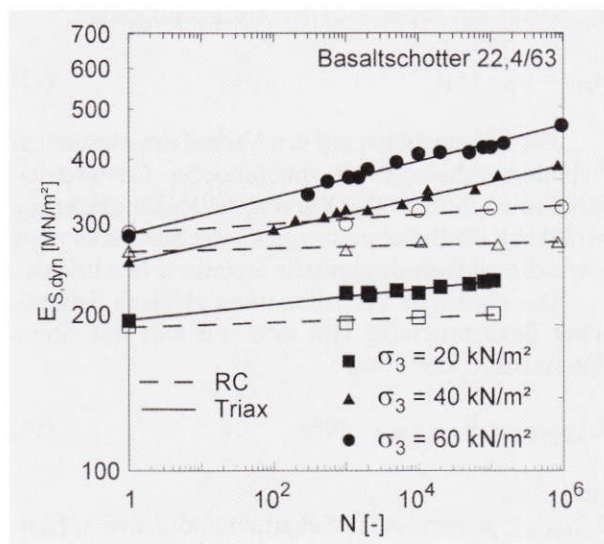


Bild 6. Vergleich von  $E_{S,dyn,N}$  und  $E_{dyn}$  bei axialer Druckschwellbelastung  
 Fig. 6. Comparison of  $E_{S,dyn,N}$  and  $E_{dyn}$  under axial threshold pressure



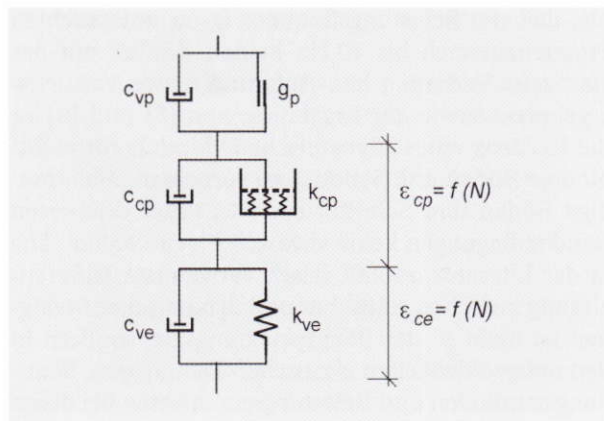


Bild 7. Zyklisch viskoelastisch-viskoplastische Modellvorstellung  
 Fig. 7. Cyclic viscoelastic-viscoplastic model

Im Gegensatz zur klassischen viskoplastischen Modelltheorie berücksichtigt das Dämpfungselement ( $c_{cp}$ ) nicht die Frequenzabhängigkeit der Hysteresefigur im Kraft-Dehnungs-Diagramm. Mit ( $c_{cp}$ ) wird der Einfluß der axialen Belastungsfrequenz  $f_B$  auf die plastischen Dehnungen erfaßt.

Das elastische Federelement ( $k_{ce}$ ) beschreibt die Veränderlichkeit der elastischen Dehnungen während der zyklisch-dynamischen Beanspruchung. Zur Beschreibung des veränderlichen elastischen Verhaltens wurde das Federelement ( $k_{ce}$ ) als Funktion der Anzahl der Lastwechsel definiert.

Aufgrund der Randbedingungen des umgesetzten Versuchskonzepts unterliegen die abgeleiteten Stoffansätze entsprechenden Einschränkungen. Das abgeleitete Dehnungsverhalten ist daher nur in folgenden Grenzen gültig:

- a) max.  $\sigma_3 = 100 \text{ kN/m}^2$
- b) max.  $X = 0,75$  (zyklisch stabiler Zustand)
- c) max.  $N = 10^6$ , bei größeren Zyklenzahlen werden erfahrungsgemäß die prognostizierten plastischen Dehnungen überschätzt
- d) max. axiale Belastungsfrequenz  $f_B \leq 10 \text{ Hz}$
- e) dränierte und ungesättigte Randbedingungen

Das plastische Dehnungsverhalten zyklisch-dynamisch beanspruchter nichtbindiger Böden und Schotter kann in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastwechsel generell mit folgendem Potenzansatz

$$\epsilon_{cp,N} = \epsilon_{cp,N=1} \cdot N^{\alpha_{cp}} \quad (9)$$

mit

- $\epsilon_{cp,N=1}$  plastische Dehnung während des 1. Lastzyklus
- $\epsilon_{cp,N}$  plastische Dehnung in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastzyklen
- $\alpha_{cp}$  Anstieg der plastischen Dehnungskurve im doppellogarithmischen Maßstab

beschrieben werden.

Die Gleichungsparameter  $\epsilon_{cp,N=1}$  und  $\alpha_{cp}$  lassen sich als Funktionen der Belastungsrandbedingungen und Materialkennwerte beschreiben. Die funktionalen Zusammenhänge für  $\epsilon_{cp,N=1}$  und  $\alpha_{cp}$  sind in den Gln. (10) und (11) angegeben, wobei festzustellen ist,

daß der Anstiegsparameter  $\alpha_{cp}$  unabhängig von der Porenzahl  $e$  ist.

$$\epsilon_{cp,N=1} = f(\sigma_3, X, f_B, e, M) \quad (10)$$

$$\alpha_{cp} = f(\sigma_3, X, f_B, M) \quad (11)$$

Die Einflußparameter nach den Gln. (10) und (11) wurden der Dehnung  $\epsilon_{cp,N=1}$  bzw. dem Kurvenanstieg  $\alpha_{cp}$  gegenübergestellt und mögliche Korrelationen aufgezeigt. Dabei wurde der Einfluß der Parameter spezifiziert, einzelne eliminiert und dafür Gleichungssysteme abgeleitet. Anschließend wurden die abgeleiteten Ansätze einer Grenzwertanalyse unterzogen, um auch in den nicht untersuchten Randbereichen der Einflußparameter realistische Dehnungen prognostizieren zu können. Die abgeleiteten funktionalen Zusammenhänge wurden in Auswertung dieser Grenzwertanalyse ggf. abgeglichen. Bei dieser Grenzwertanalyse war z. B. maßgebend, daß auch im Zustand der theoretisch lockersten Lagerung ( $e = 1$ ) die Dehnungen  $\epsilon_{cp,N=1}$  kleiner 100 % sind.

Für  $\epsilon_{cp,N=1}$  wurde der nachfolgende Zusammenhang gefunden:

$$\epsilon_{cp,N=1} = \phi_f \cdot \kappa_p \cdot e^{\lambda_p} \quad (12)$$

mit

- $\phi_f$  Einflußfunktion der Belastungsfrequenz
- $\kappa_p$  Kurvenparameter im  $\epsilon_{cp,N=1}$ -Porenzahl-Diagramm
- $\lambda_p$  Kurvenparameter im  $\epsilon_{cp,N=1}$ -Porenzahl-Diagramm

Nach Gl. (12) sind die plastischen Dehnungen in erster Linie von der Porenzahl  $e$  sowie der Belastungsfrequenz des nichtbindigen Bodens bzw. des Schotters abhängig.

In einer zu  $\epsilon_{cp,N=1}$  affinen Form konnten die Einflußgrößen von  $\alpha_{cp}$  nach Gl. (9) spezifiziert werden. Es war möglich,  $\alpha_{cp}$  mit Hilfe der zyklisch-dynamischen Belastungsrandbedingungen zu beschreiben. Für  $\alpha_{cp}$  wurde ein exponentieller Ansatz aufgestellt:

$$\alpha_{cp} = \kappa_p^\alpha \cdot \exp(-\lambda_p^\alpha \cdot f_B) \quad (13)$$

Die Porenzahl hat auf den Verlauf des plastischen Dehnungsverhaltens mit zunehmender Lastwechselzahl keinen Einfluß. Der Kurvenanstiegsparameter  $\alpha_{cp}$  wird durch die Belastungsfrequenz, der Seitenspannung sowie die zyklisch-dynamische Spannung beschrieben.

Das elastische Verhalten unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung läßt sich ebenfalls mit einem Potenzansatz der Form

$$E_{S,dyn,N} = E_{S,dyn,N=1} \cdot N^{\alpha_{ce}} \quad (14)$$

mit

- $E_{S,dyn,N=1}$  dynamischer Sekantenmodul des 1. Lastwechsels (Anfangssteifigkeit)
- $\alpha_{ce}$  Kurvenanstiegsparameter im  $E_{S,dyn}$ -log N-Diagramm

beschreiben.



$E_{S,dyn,N=1}$  und  $\alpha_{ce}$  wurden auf der Grundlage der durchgeführten Untersuchungen in Abhängigkeit der Belastungsrandbedingungen und Materialkennwerte ausgewertet und folgender funktionaler Zusammenhang aufgestellt:

$$E_{S,dyn} = f(\sigma_3, X, N, e, M) \quad (15)$$

Die Belastungsfrequenz  $f_B$  besitzt, wie bereits angesprochen, keinen Einfluß auf das elastische Verhalten. Die verbleibenden Variationsparameter des umgesetzten Versuchskonzepts wurden einzeln eliminiert und mit dem elastischen Verhalten nach dem ersten Lastzyklus  $E_{S,dyn,N=1}$  sowie dem Anstiegsparameter  $\alpha_{ce}$  gegenübergestellt:

$$E_{S,dyn,N=1} = \zeta_1 - \zeta_2 \cdot e \quad (16)$$

$$\alpha_{ce} = (\zeta_1^\alpha \cdot e - \zeta_2^\alpha) \cdot X. \quad (17)$$

Mit dem zyklisch-viskoplastischen Stoffansatz wurden Versuchsergebnisse aus der Literatur zum plastischen Dehnungsverhalten unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung nachgerechnet. Hierzu wurden Versuchsergebnisse aus [1], [4] und [10] verwendet.

In Bild 8 ist beispielhaft der Vergleich des plastischen Dehnungsverhaltens eines Gleisschotters 22,4/63 den Versuchswerten des unverschmutzten Altschotters 22,4/63 aus [4] gegenübergestellt. Die gemittelten Versuchsergebnisse für den unverschmutzten Altschotter ergaben zur berechneten Kurve geringfügig kleinere plastische Dehnungen. Die berechnete Dehnungskurve liegt jedoch noch innerhalb des aus [4] ermittelten Streubereichs der plastischen Dehnungen und kann somit als zufriedenstellend angesehen werden.

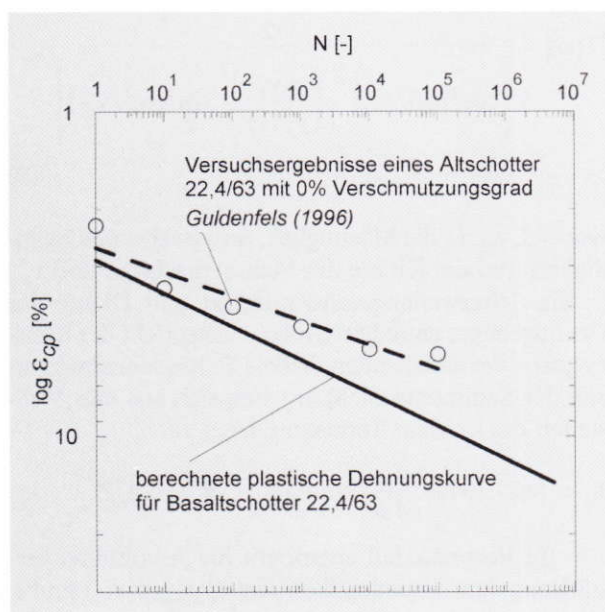


Bild 8. Vergleich der berechneten plastischen Dehnung des Basaltschotters (22,4/63) mit Versuchswerten der Literatur

Fig 8. Comparison of calculated plastic strain of ballast with experimental test results from literature

Die durchgeführten Vergleiche der berechneten plastischen Dehnungen bei zyklisch-dynamischer Beanspruchung mit publizierten Ergebnissen zeigen eine gute Übereinstimmung. Der abgeleitete zyklisch viskoelastisch-viskoplastische Stoffansatz zum plastischen Dehnungsverhalten konnte somit bestätigt werden.

Weiterführende Anwendungsbeispiele sind in [3] und in [11] zu finden. In [11] wurde der abgeleitete zyklisch viskoelastisch-viskoplastische Stoffansatz in das FE-Programm ABAQUS implementiert, sowie dessen Leistungsfähigkeit durch Vergleichsrechnungen von in-situ-Messungen und Modellversuchen bestätigt.

## Literatur

- [1] Dyaljee, V. A., Raymond, G. P.: Repetitive Load Deformation of Cohesionless Soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, No. GT 10 (1982), pp. 1215–1229.
- [2] Gotschol, A., Kempfert, H.-G., Stöcker, T., Meyer, R.: Bodenmechanisches Versuchsgerät zur kombinierten Bestimmung zyklischer und dynamischer Kenngrößen granularer Böden und Schotter. Geotechnik, Heft 1 (2000), S. 55–58.
- [3] Gotschol, A.: Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 12 (2002).
- [4] Guldenfels, R.: Die Alterung von Bahnschotter aus bodenmechanischer Sicht. Veröffentlichung des Instituts für Geotechnik der ETH Zürich, Band 209 (1996).
- [5] Hettler, A.: Schottertriaxialversuche mit statischem und zyklischem Belastungsverlauf. ETR 36 (1987), S. 399–405.
- [6] Hodjera, B.: Das Verhalten der Böden unter dynamischer Dauerbelastung. Geotechnik, Heft 2 (1979), S. 84–97.
- [7] Hu, Y.: Zum Verformungsverhalten von wassergesättigten bindigen Böden unter zyklischer Belastung. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 8 (2000).
- [8] Lentz, R. W., Baladi, G. Y.: Simplified Procedure to Characterize Permanent Strain in Sand Subjected to Cyclic and Transient Loading. International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, Jan. 7–11. (1980), pp. 89–95.
- [9] ORE Frage D 117: Ergänzende Untersuchung der Boden- und Schottereigenschaften unter dynamischer Last. Optimale Anpassung des klassischen Oberbaus an den künftigen Verkehr, Report 5 (1974).
- [10] Shenton, M. J.: Deformation of Railway Ballast under Repeated Loading Conditions. Railroad Track Mechanics and Technology, Pergamon Press (1978), pp. 405–425.
- [11] Stöcker, T.: Zur Modellierung von granularen Materialien bei nichtruhenden Lasteinwirkungen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 13 (2002).

## Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Alexander Gotschol, iBEG mbH – Ingenieurgesellschaft für Bodenmechanik, Erd- und Grundbau mbH, Pfortenteich 5, 99974 Mühlhausen (vormals Universität Kassel)

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Universität Kassel, Fachgebiet Geotechnik, Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel