

Tim Stöcker  
Hans-Georg Kempfert

# Numerische Modellierungen mit einem zyklisch-viskoplastischen Stoffansatz für granulare Böden

In der Geotechnik, insbesondere aber im Verkehrswegebau, gewinnt die Frage der Boden-Bauwerk-Interaktion bei nichtruhenden Lasteinwirkungen zunehmend an Bedeutung. Dabei stehen neben sicherheitsrelevanten Aspekten besonders Fragen zur Gebrauchstauglichkeit sowie wirtschaftliche Aspekte im Vordergrund. Ziel einer anwendungsorientierten Forschung muß daher die Entwicklung eines praxisorientierten Verfahrens zur ingenieurmäßigen Modellierung der Langzeitverformungen bzw. des Langzeitverhaltens des Baugrundes unter nichtruhender Belastung sein. Die dargestellten Arbeiten beschäftigen sich daher mit der Implementierung, Validierung und Anwendung eines neuen, im folgenden als „zyklisch-viskoplastisch“ bezeichneten Stoffansatzes für granulare Böden unter nichtruhender Lasteinwirkung. Die wesentlichen Grundlagen dieses Ansatzes sind dabei im Heft 4, 2004, dieser Zeitschrift beschrieben, [1]. Das erreichte Ziel war, den Stoffansatz für numerische Berechnungsmodelle ingenieurmäßig aufzubereiten, zu implementieren, sowie das Berechnungsmodell zu verifizieren und auf reale Problemstellungen anzuwenden.

**Numerical modelling with a cyclic viscoplastic constitutive approach for granular soils.** *In modern Geotechnics, especially in track engineering, research for soil-structure interaction under cyclic loading has been gaining importance over the past decades. Next to states of system/structure failure, the long-term (deformation) behaviour is of major interest, as it has a major impact on e. g. maintenance costs in track engineering. Hence, the objective of this work is to be seen in the necessity of investigations on the long-term deformation behaviour of granular soils and ballast under cyclic loading. In the present paper the validation and implementation of a cyclic viscoplastic constitutive approach for granular under cyclic dynamic loading, [1], into a numerical model is carried out. The investigation and set up of a theoretical and physical complete model has not been intended. The objective rather is the development of an engineering type model, appropriate for practical tasks. Some modelling examples are given to illustrate modelling capacities.*

## 1 Einleitung

Neben ruhenden bzw. statischen Lasteinwirkungen treten bei einem großen Teil von Ingenieurbauwerken auch verschiedenartige nichtruhende Lasteinwirkungen auf. Beispielhaft seien hier z. B. Verkehrswegebauwerke und Maschinenfundamente genannt. In [1] ist dazu ein zyklisch-viskoplastischer Stoffansatz für nichtbindige Böden und

Schotter dargestellt. Unter nichtruhenden Lasteinwirkungen werden im Allgemeinen nicht statische Belastungen verstanden. Dies können sowohl harmonische, zyklische oder generell wiederkehrende ortsfeste oder translatorische Lastschemata sein. In der Literatur findet sich im Zusammenhang mit dem Stoffverhalten von Böden unter nichtruhenden Lasteinwirkungen oft der Begriff der Zyklik. Unter dem Begriff der Zyklik wird eine zeitlich veränderliche Lasteinwirkung verstanden, welche einen bestimmten Grad der Regelmäßigkeit in Größe, Orientierung und Frequenz aufweist. In [3] wurde auf die in der Vergangenheit oft fälschlich verwendeten Begrifflichkeiten, insbesondere auf den Begriff der Zyklik, eingegangen und deutlich voneinander abgegrenzt. Für die weiteren Ausführungen wird auf den Oberbegriff nichtruhende Lasteinwirkung zurückgegriffen.

Die nichtruhende Lasteinwirkung selbst wird über Gründungselemente in den Baugrund eingeleitet und ruft in der Regel mit jedem wiederkehrenden Belastungszyklus bzw. Belastungsschema eine Reaktion des letzteren in Form von elastischen sowie plastischen Dehnungszunahmen, und damit einer Zunahme bleibender Setzungen, hervor. Das Verhalten nichtbindiger Böden unter nichtruhenden Lasteinwirkungen wird dabei z. B. in [6], [8], [9] und [11] analysiert und z. T. zugehörige Stoffansätze beschrieben. Weiterhin sind in letzter Zeit zu dieser Thematik weitere Fortschritte mit der theoretisch vollständigeren hypoplastischen Theorie erreicht worden, z. B. [15].

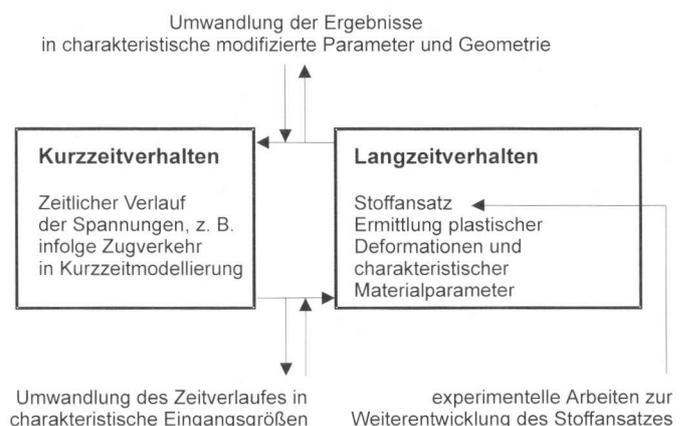


Bild 1. Entkopplung Betrachtung von Kurzzeitdynamik und Langzeitverhalten

Fig. 1. Decoupling of system behaviour into short-term dynamics and long-term deformation behaviour

Neben den vorgenannten plastischen Dehnungen unter nichtruhenden Lasteinwirkungen ist andererseits ein sich änderndes Stoffverhalten des Bodens zu beobachten. Einschränkung der Tragfähigkeit bzw. Tragfähigkeitsverluste lokal oder in der Gesamtheit können an Bauwerksteilen oder Untergrundbereichen die Folge sein. Im wesentlichen beeinflussen die nichtruhenden Belastungen bei einer sorgfältigen ingenieurmäßigen Dimensionierung der Gründungskörper jedoch primär die Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken.

Im vorliegenden Beitrag wird der zyklisch-viskoplastische Stoffansatz aus [1], der das nichtlineare Materialverhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung beschreibt, aufbereitet, in das Finite-Elemente-Programm Abaqus implementiert und ein Validierungs- und ein Berechnungsbeispiel vorgestellt.

Zum besseren Verständnis wird zunächst die Vorgehensweise der Entkopplung des Systemverhaltens „Boden- und Bauwerk“ in die Kurzzeitdynamik und das Langzeitverhalten erläutert, durch welche die Anwendung des vorgenannten Stoffansatzes überhaupt ermöglicht wird.

## 2 Vorgehensweise

Grundlage der Vorgehensweise ist die Entkopplung des Systemverhaltens (Interaktion Boden-Bauwerk) unter nicht ruhender Lasteinwirkung in die des Kurzzeitverhaltens mit der dynamischen Antwort des Systems, und die des Langzeitverhaltens mit den sich einstellenden bleibenden Verformungen über der wiederholten Lasteinwirkung. Eine solche Entkopplung erlaubt die systematische Untersuchung des Langzeitverhaltens von Gründungselementen auf granularen Böden. Das Kurzzeitverhalten, das i. d. R. unter Ansatz eines elastischen Materialverhaltens abgebildet wird, wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt.

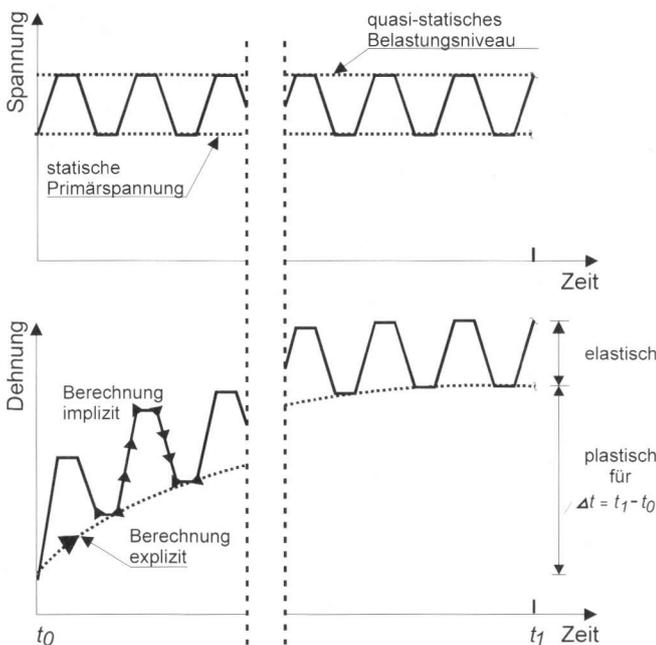


Bild 2. Implizite und explizite Betrachtungsweise der Verformungen unter nichtruhenden Lastenwirkungen  
Fig. 2. Implicit and explicit idealisation of deformation behaviour under cyclic loading

Im Bereich des Langzeitverhaltens wird im folgenden in „implizite“ und „explizite“ Ansätze unterschieden. Implizite Ansätze verfolgen zwar den tatsächlichen Verlauf eines jeden Lastwechsels über der Zeit, stellen aber hohe Anforderungen an einen theoretisch vollständigen Ansatz und verlangen große Rechenleistungen. Die Gefahr der Fehlerfortpflanzung, insbesondere für hohe Lastwechselzahlen, ist gegeben. Es wird daher eine explizite Vorgehensweise angewendet. Bei dieser steht nicht ein einzelner Lastwechsel im Mittelpunkt des Interesses, sondern die über der wiederholten Lasteinwirkung akkumulierenden bleibenden Verformungen, siehe Bild 2.

Mit einem quasi-statischen Belastungsniveau, welches sich aus der absoluten Größe der wiederholten Lasteinwirkung ergibt, werden unter Ansatz statischer Gleichungslöser für Lastwechselkonglomerate plastische Dehnungskremente berechnet. Die Formulierung des Stoffansatzes wird in dieser Arbeit ähnlich der klassischen visko-plastischen Theorie in einem expliziten numerischen Modell umgesetzt. Insofern wird dieser als zyklisch-viskoplastischer Stoffansatz bezeichnet.

## 3 Modellbildung

Die Untersuchung und Aufstellung eines theoretisch und physikalisch vollständigen Modells stand im Rahmen der vorgestellten Arbeit nicht im Vordergrund. Zielsetzung war vielmehr, ein in ingenieurmäßiger Näherung zutreffendes Modell für praktische Aufgabenstellungen zu entwickeln.

Grundlage sind die in [1] dargestellten Arbeiten. Die darin abgeleiteten analytischen Zusammenhänge für zyklische Triaxialversuche, insbesondere die der Frequenzabhängigkeit und der Entwicklung der Porenzahl bezüglich der plastischen Dehnungen, gehen in das umgesetzte numerische Modell ein. Elastische und akkumulierende plastische Dehnungskremente ergeben sich in Abhängigkeit der primären statischen  $\sigma_{s,3}$  und überlagernden nicht ruhenden Spannungszustände  $\sigma_{dyn}$ .

Bei der Beschreibung der zyklisch-viskoplastischen Dehnungsanteile wird davon ausgegangen, daß je nach statischer Vorbelastung und zyklischer deviatorischer Spannung im zyklischen Triaxialversuch, siehe Bild 3, zwei Zustände zu beobachten sind,

- zyklische Beruhigung und
- zyklisches Versagen.

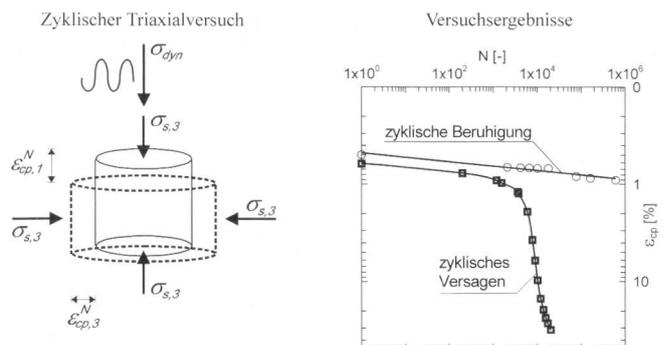


Bild 3. Prinzipskizze zyklischer Triaxialversuch und Versuchsergebnisse  
Fig. 3. Sketch of cyclic triaxial test unit/specimen and corresponding test results

Zur Abgrenzung dieser beiden Verformungszustände wird im Sinne der Modellbildung ein modifiziertes *Mohr-Coulombsches* Bruchkriterium verwendet, siehe Bild 4, welches durch Erfassung der verminderten Scherfestigkeit von granularen Böden unter zyklischer Last als reduziert-zyklisches Kriterium bezeichnet wird.

Analog der viskoplastischen Modelltheorie tritt bei Überschreiten der Fließfläche ein schrittweises Versagen des Bodenelements, das sogenannte „zyklische Versagen“ auf. Im zyklischen Triaxialversuch führt dieser Zustand in kürzester Zeit, bzw. bei niedriger Zyklenzahl, zum Versagen bzw. Bruch des Bodenelements. Im Sinne der Modellbildung folgt, daß eine lokale Überschreitung der Fließgrenze zur Zyklenzahl  $N$ , zusätzlich zu den zyklisch-plastischen Dehnungsanteilen  $\epsilon_{cp}$ , zu weiteren Plastifizierungen mit viskoplastischen Dehnungen  $\epsilon_{vp}$  am Materialpunkt führt. Plastische Dehnungssinkremente treten solange auf, wie das Grenzwertkriterium verletzt wird. Innerhalb des Stoffansatzes werden diese zusätzlichen Dehnungsanteile als zeitunabhängig angesehen.

Für zyklische Spannungszustände, die dem reduziert-zyklischen *Mohr-Coulombschen* Bruchkriterium genügen, konvergieren die bleibenden, d. h. plastischen Dehnungen gegen einen Grenzwert. Für diesen Grenzzustand des Unendlichen würden bei gleichbleibender Belastung im zyklischen Triaxialversuch nur noch oszillierende „quasi-elastische“ Dehnungsamplituden auftreten. Der Vorgang kann auch als Verfestigung des Bodenelements angesehen werden. Entsprechend wird dieser Zustand als „zyklische Beruhigung“ bezeichnet. Nach [1] wird zur mathematischen Beschreibung der zyklischen Beruhigung für nicht-bindige Böden und Schotter z. B. folgender Potenzansatz verwendet:

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

Die zyklisch-plastischen Dehnungen  $\epsilon_{cp,1}^N$  stellen dabei die Hauptdehnungen analog zum zyklischen Triaxialversuch

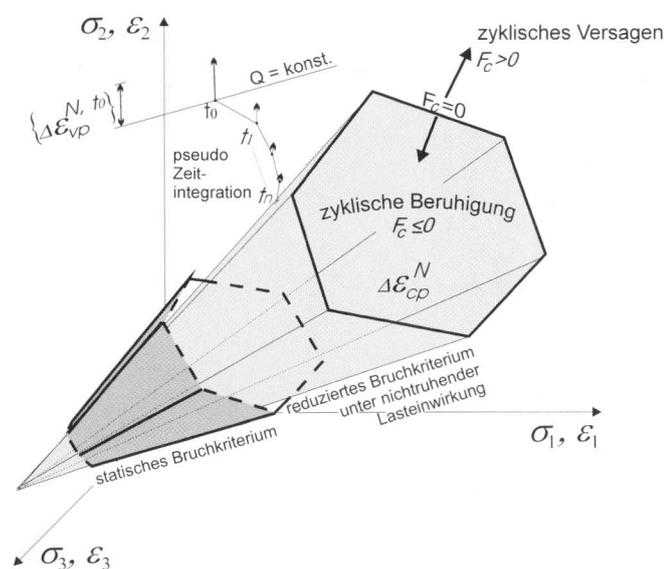


Bild 4. Abgrenzung der Verformungsarten im Hauptspannungsraum  
 Fig. 4. Separation of deformation modes in principal stress space

dar.  $\epsilon_{cp,1}^1$  stellt die axiale zyklisch-plastische Dehnung zum ersten Lastzyklus und  $\alpha_{cp}$  den Anstieg der plastischen Dehnungskurve im doppelt-logarithmischen Maßstab dar. Die funktionalen Zusammenhänge hierzu sind [1], [3] zu entnehmen.

Die Abbildung der Querdehnungsanteile in den verbleibenden Hauptspannungsrichtungen  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  nimmt eine besondere Stellung ein. In der Literatur finden sich nur wenige Hinweise auf echte Triaxialversuche mit drei voneinander unabhängigen Hauptspannungsrichtungen, [13]. Bei den gebräuchlichen Triaxialversuchen kann i. d. R. einzig die axiale Spannung dynamisch gesteuert werden. Bedingt durch den axialsymmetrischen Querschnitt der Probe entspricht das Fehlen der mittleren Hauptspannung einem Sonderfall des dreidimensionalen Spannungszustands.

Es liegen daher zur Zeit nur begrenzt verwertbare Versuchsergebnisse vor. Die Auswertung fremder zyklischer Triaxialversuche an Schotter sowie die eigenen Versuche an Schotter und granularen Materialien [3] lassen jedoch z. B. auf die folgende Beziehung zwischen der axialen Dehnung  $\epsilon_{cp,1}^N$  und der radialen Dehnung  $\epsilon_{cp,r}^N$  schließen:

$$\epsilon_{cp,r}^N = (\lambda - \omega \log N) \epsilon_{cp,1}^N \quad (2)$$

Für die numerische Berechnung wird demnach für die Querdehnungsanteile in zyklischen Triaxialversuchen  $\epsilon_{cp,2}^N = \epsilon_{cp,3}^N = \epsilon_{cp,r}^N$  angenommen. Die Funktionale  $\lambda$  und  $\omega$  werden neben der Seitenspannung von dem aktuellen Verhältnis der zyklischen Deviatorspannung zur statisch deviatorischen Bruchspannung bestimmt und sind experimentell im zyklischen Triaxialversuch zu bestimmende funktionale Größen, z. B. [4].

Im Sinne der Modellbildung wird die Gültigkeit des Superpositionsprinzips der sich überlagernden Dehnungsanteile für Axial- und Querdehnung in allen drei Hauptspannungsrichtungen angenommen. Diese Vorgehensweise wird z. B. von [2] verfolgt.

Durch die erläuterte Vorgehensweise soll entsprechend der Aufgabenstellung eine ingenieurmäßige Näherung für das komplexe Materialverhalten unter nicht ruhenden Lasteinwirkungen gefunden werden. Zum anderen werden für den Hauptspannungsraum die durch Vernachlässigung der im Versuch fehlenden mittleren Hauptspannung bedingten Fehler minimiert.

Die inkrementellen Entwicklungsgleichungen der zyklischen Beruhigung für die einzelnen Hauptspannungsrichtungen  $i$  ergeben sich damit entsprechend des zyklisch-viskoplastischen Ansatzes nach [1] und [3] für granulare Böden zu:

$$\frac{\partial \epsilon_{cp,i}^N}{\partial N} = \delta_{ij} \alpha_{cp} N^{\alpha_{cp}-1} \epsilon_{cp,i}^1 - (1 - \delta_{ij}) \times \left[ \alpha_{cp} \epsilon_{cp,j}^1 N^{\alpha_{cp}-1} (\lambda_j - \omega \log N) - \frac{\omega \epsilon_{cp,j}^1}{N \ln 10} N^{\alpha_{cp}} \right] \quad (3)$$

Die dargestellte mathematische Formulierung (3) der inkrementellen Entwicklungsgleichungen in den Hauptspannungsrichtungen basiert auf dem erläuterten Superpositionsprinzip der zyklisch-plastischen Dehnungsanteile in den Hauptspannungsrichtungen. Für jede der drei

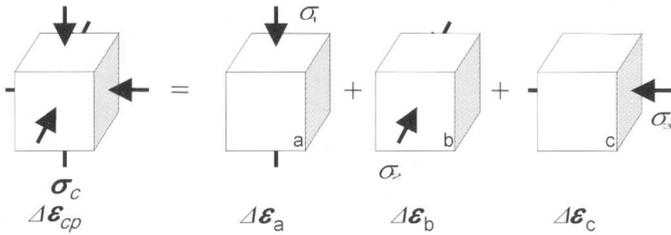


Bild 5. Superposition vektoriellem Dehnungsincrementen in Hauptspannungsrichtungen aus jeweils einachsigen Normalspannungsbeanspruchungen des Elements  
 Fig. 5. Superpositioning of vectorial strain increments in principal strain direction, assuming uniaxial normal stress components

Hauptspannungsrichtungen wird aus den zusätzlichen dynamischen Spannungsanteilen bezogen auf die statische Ausgangsspannung die Entwicklung der zyklisch-plastischen Dehnungen berechnet. Die absolute Größe des in jeder Hauptspannungsrichtung  $i$  wirkenden zyklisch-plastischen Dehnungsincrementes ergibt sich damit aus dem (bezogen auf einen zyklischen Triaxialversuch) axialen Dehnungsincrement in Richtung der oszillierenden dynamischen Spannung  $\sigma_{dyn}$ , abzüglich der radialen Dehnungsanteile aus den verbleibenden Hauptspannungsrichtungen. Diese Formulierung ergibt sich aus der Tatsache, daß sich durch Lastumlagerungen auch räumlichen Spannungszustände ändern. Das heißt, daß für jede einzelne Hauptspannungsrichtung entsprechend Bild 5 alle drei zyklisch-plastischen Dehnungsincrementen in den drei Hauptspannungsrichtungen ermittelt und überlagert werden. Die endgültigen zyklisch-plastischen Dehnungsincrementen werden danach für die numerische Modellierung in das lokale Koordinatensystem zurückgedreht. Diese Vorgehensweise stellt keine eindeutige mathematische Formulierung dar, sondern dient einzig der ingenieurmäßigen Umsetzung des im zyklischen Triaxialversuch beobachteten Deformationsverhaltens auf den tatsächlich dreidimensionalen Spannungszustand der numerischen Berechnung.

Es ist festzuhalten, daß bei der zyklischen Beruhigung, im Gegensatz zu der für das zyklische Versagen angewendeten klassischen Theorie der Viskoplastizität, die

plastischen Verzerrungsgeschwindigkeiten auch für Spannungszustände unterhalb der Fließfläche immer ungleich Null sind, da für diesen Fall stetig die zyklisch-plastischen Dehnungsanteile berechnet werden. Ein Gleichgewicht, das zur Lösung des numerischen Problems führt, wird entgegen herkömmlichen statischen Berechnungen also nicht für eine Laststufe, sondern jeweils für eine Zyklenzahl bzw. einen Zeitschritt gefunden. Im Gegensatz dazu wird bei temporären Verletzungen des Bruchkriteriums nach Mohr-Coulomb der zyklisch-plastische Verformungsvorgang solange eingefroren, bis ein Gleichgewicht durch viskoplastische Iterationen des zyklischen Versagens gefunden wird.

Die getroffenen Annahmen zur Implementierung des Stoffansatzes in das Programmsystem ABAQUS lauten zusammenfassend:

- Die nicht ruhende oder zyklische Lasteinwirkung kann mittels eines quasi-statischen Lastniveaus, unter Vernachlässigung von Massenträgheitskräften, näherungsweise idealisiert werden.
- Es werden nur effektive Spannungen berücksichtigt. Eine mögliche Entwicklung der Porenwasserdrücke oder auch Liquefactions-Prozesse können nicht berücksichtigt werden.
- Das zyklische Versagen kann mit einer klassischen viskoplastischen Formulierung beschrieben werden.
- Die inkrementellen Entwicklungsgleichungen der „zyklischen Beruhigung“ im Hauptspannungsraum können mit halb- bzw. doppelt-logarithmischen Ansätzen aus zyklischen Triaxialversuchen beschrieben werden.
- Es gilt das Superpositionsprinzip zur Ermittlung der absoluten Größen der zyklisch-plastischen Dehnungsincrementen in den Hauptspannungsrichtungen (Überlagerung einzelner zyklischer Triaxialversuche)

Da der vorgestellte quasi-statisch zyklisch-viskoplastische Stoffansatz zwei voneinander unabhängige und nicht notwendigerweise zeit- und ortsgleich auftretende Verformungszustände, das zyklische Versagen und die zyklische Beruhigung, enthält, wurde für die Implementierung des Ansatzes in das numerische Programm ABAQUS auf die klassische explizite viskoplastische „Initial-Strain-Methode“, z. B. [12], mit konstanter Steifigkeitsmatrix zurückgegriffen. In Bild 6 ist die dazugehörige Organisation des Berechnungsablaufs in ABAQUS dargestellt.

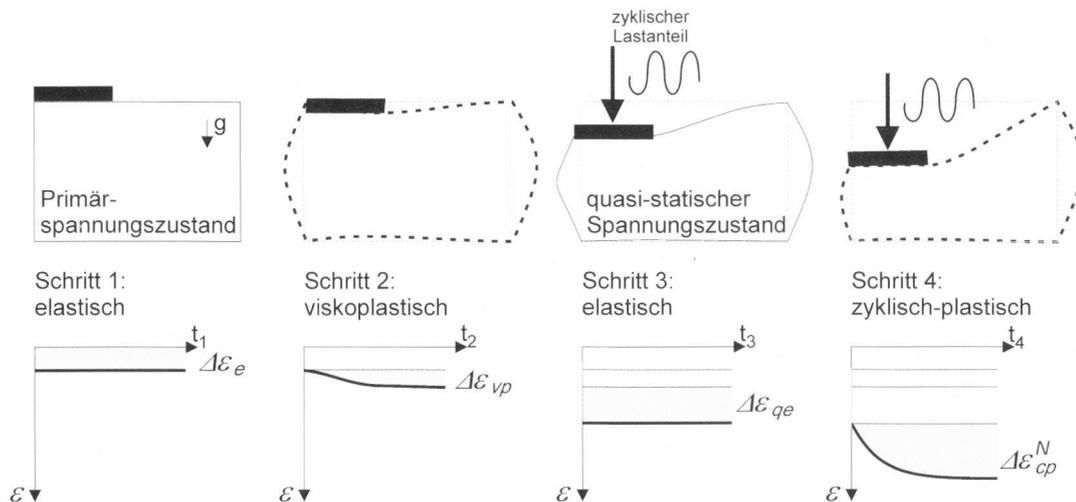


Bild 6. Organisation des Berechnungsvorganges von Langzeitverformungen unter nicht ruhender Lasteinwirkung mit ABAQUS  
 Fig. 6. Organisation of numerical model for long term deformation behaviour under cyclic loading

Insgesamt ist der Berechnungsablauf in vier aufeinanderfolgende, jedoch nicht umkehrbare Schritte gegliedert.

### Schritt 1: Primärspannungszustand (Ausgangszustand), elastisch

Der erste Berechnungsschritt ist eine lineare Gleichgewichtsiteration des elastischen Primärspannungszustandes des Systems unter Eigengewicht und statischen Vorlasten. Die auftretenden Dehnungen sind elastisch,  $\Delta \varepsilon_e$ .

### Schritt 2: Primärspannungszustand, viskoplastisch

Der zweite Berechnungsschritt enthält das aus dem ersten Schritt unverändert übernommene Lastbild. Zusätzlich werden über das definierte viskoplastische Materialverhalten die plastischen Dehnungen am System im Primärspannungszustand berechnet. Die gesamten Dehnungen am Ende des Berechnungsschrittes setzen sich aus dem elastischen Anteil  $\Delta \varepsilon_e$  nach Schritt 1 und dem viskoplastischen Anteil  $\Delta \varepsilon_{vp}$  zusammen.

### Schritt 3: Quasi-statischer Spannungszustand, quasi-elastisch

Im dritten Berechnungsschritt werden zusätzlich zu dem aus dem zweiten unverändert übernommenen Lastbild die nicht ruhenden Lasten definiert. Eine linear-elastische Berechnung bringt zusätzlich zu den elastisch-plastischen Dehnungen aus dem Primärspannungszustand (Schritte 1 und 2) den quasi-statischen Anteil elastischer Dehnungen  $\Delta \varepsilon_{qe}$ .

### Schritt 4: Quasi-statischer Spannungszustand, zyklisch-viskoplastisch

Im letzten Berechnungsschritt wird aus dem vorherigen das quasi-statische Lastbild übernommen. Unter Ansatz des erläuterten zyklisch-viskoplastischen Materialverhaltens mit den Anteilen der zyklischen Beruhigung,  $\varepsilon_{cp}^N$ , sowie des zyklischen Versagens,  $\varepsilon_{vp}^N$ , werden somit die gesamten plastischen Dehnungen aus der nicht ruhenden Lasteinwirkung berechnet. Aus der direkten Überlagerung der Verformungen aus Schritt 3 und Schritt 4 lassen sich näherungsweise die plastischen Verformungen bzw. Dehnungen aus der nicht ruhenden Lasteinwirkung bestimmen.

## 4 Validierungsbeispiel

Die Implementierung in ABAQUS/standard erfolgt über die vorgegebene Schnittstelle UserMATERIAL (UMAT). Grundlage für die weitergehenden numerischen Analysen an Modellversuchen und praktischen Projekten ist die Verifizierung der implementierten Stoffroutinen an einfachen Strukturen bzw. Elementen. Im folgenden wird am Beispiel des zyklischen Triaxialversuchs selbst eine Validierung der in ABAQUS implementierten Routinen zur Abbildung der zyklisch-plastischen Dehnungsanteile der zyklischen Beruhigung vorgenommen.

In Bild 7 ist beispielhaft der Vergleich der Versuchsergebnisse und der numerischen Berechnungsergebnisse für einen zyklischen Triaxialversuch an Basaltschotter 22.4/63, [5], mit einer statischen Seitenspannung von  $\sigma_{s,3} = 40 \text{ kN/m}^2$  wiedergegeben. Es liegt eine befriedigende Übereinstimmung zwischen der numerischen Modellierung mit ABAQUS und dem zyklisch-triaxialen Laborversuch vor.

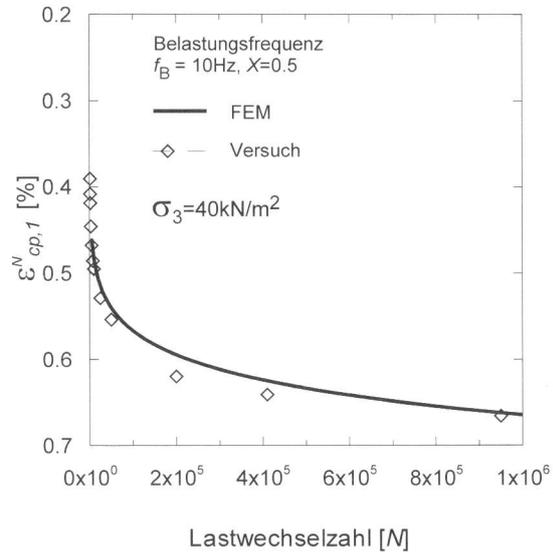


Bild 7. Vergleich der Versuchsergebnisse für einen zyklischen Triaxialversuch an Basaltschotter 22,4/63 mit  $s_3 = 40,0 \text{ kN/m}^2$ , aus [3], zur numerischen Berechnung mit ABAQUS

Fig. 7. Comparison of laboratorial test results of a cyclic triaxial test on basalt ballast 22.4/63 with  $s_3 = 40.0 \text{ kN/m}^2$ , [3], against numerical modelling results with ABAQUS

Die durchgeführten Vergleichsberechnungen zu den zyklisch-plastischen Hauptdehnungen der zyklischen Beruhigung ergeben eine gute Übereinstimmung der zyklisch-plastischen Dehnungen für die Hauptspannungsrichtungen  $i$ , die im zyklischen Triaxialversuch der axialen sowie radialen Richtung entsprechen. Für das numerische Modell werden entsprechend der gewählten Modellvorstellung nach Abschn. 3 in der ABAQUS-Benutzeroutine die Hauptdehnungsincremente in das lokale Koordinatensystem am Materialpunkt gedreht und der Spannungszustand nach der Initial-Strain-Methode aktualisiert.

Für das untersuchte Beispiel kann mit einem empirischen Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = 0,98$  von einer starken Korrelation ausgegangen werden. Weitere Berechnungen mit ABAQUS haben das hohe Korrelationsverhalten der berechneten plastischen Dehnungen in bezug auf die Meßwerte bestätigt, [4]. Es wird deshalb von einer hinreichend genauen Abbildung der zyklisch-viskoplastischen Dehnungsanteile für die numerischen Modellierungen ausgegangen.

## 5 Berechnungsbeispiel: Dauerschwellversuch einer besohnten Schwelle im Schottertrog

### 5.1 Zielsetzung

Die generelle Brauchbarkeit des zyklisch-viskoplastischen Stoffansatzes für Schottermaterialien unter nicht ruhenden Lasteinwirkungen ist in [3] durch eine numerische Vergleichsstudie zu den Ergebnissen aus einem großmaßstäblichen Modellversuch an einer kreisrunden Platte auf geschichtetem Halbraum dokumentiert.

Aufbauend auf den nach [14] durchgeführten Dauerschwellversuchen an einem besohnten Schwellenblock im Schottertrog soll mit dem folgenden Berechnungsbeispiel die Anwendbarkeit des in das numerische Modell implementierten zyklisch-viskoplastischen Stoffansatzes auf will-

kürliche Geometrien, hier die spezielle Schwellengeometrie mit begrenzter Aufstandsfläche auf dem Schotterbett, geprüft werden.

**5.2 Geometrie, Lastannahmen und Materialkenngrößen**

Bild 8 zeigt die geometrischen Abmessungen des mit Bahnschotter verfüllten rechteckigen Stahltrags. Auf der Oberfläche des verdichteten Schotterbetts wurde ein besohlter Schwellenblock mittig angeordnet, welcher über eine Schienenbefestigung mit konventioneller Zwischenlage zyklisch belastet wurde. Der Schwellenblock war auf der Unterseite mit einem Sylomer-Material beschichtet. Die Einsenkung des Schwellenblocks gegenüber dem Stahltrug wurde mit Meßuhren registriert. Eine Differenzierung in elastische und zyklisch-plastische Anteile der Schwellenblockverschiebung während des Versuchs war dadurch gewährleistet.

Für die numerische Berechnung wird unter Ausnutzung der Symmetrieachsen ein geviertelter Ausschnitt diskretisiert. Die aufgebrachte Schwelllast während des Versuchs beträgt  $P_{dyn} = 35 \text{ kN}$  bei einer Belastungsfrequenz von  $f_B = 3 \text{ Hz}$ .

Für das Materialverhalten nach [1] wurden für die numerische Simulation die in Tabelle 1 zusammengestellten benötigten Kenngrößen verwendet.

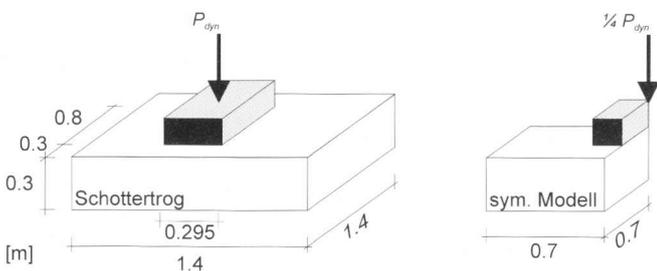


Bild 8. Geometrie des Schottertrags mit aufliegender Schwelle und symmetrisches Modell für die numerische Modellierung

Fig. 8. Geometry of laboratory test unit sleeper on ballasted track; symmetrical model for numerical modelling

Tabelle 1. Kenngrößen für die numerische Berechnung  
Table 1. Characteristics for numerical calculation

Materialien	Bodenkenngrößen	Stoffansatz
Schwelle	$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$ $E = 3400 \text{ MN/m}^2$ $\nu = 0,2$	elastisch
Schotter	$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ $E = 180 \text{ MN/m}^2$ $\nu = 0,33$ $e = 0,71$ $f_B = 3 \text{ Hz}$	zyklisch-viskoplastisch

Die Anzahl der benötigten variablen Materialparameter beschränkt sich für bekannte Materialien i. d. R. auf die fünf aufgeführten. Zu dieser Thematik siehe auch [1].

**5.3 Ergebnisse**

In Bild 8 sind die Meßergebnisse aus [14] den eigenen Ergebnissen der numerischen Berechnung mit ABAQUS gegenübergestellt. Der zyklisch-plastische Setzungsanteil ist jeweils in einer linearen und einer doppelt-logarithmischen Darstellung aufgetragen. In der linearen Darstellung ist deutlich das konvergente Verhalten der „zyklischen Beruhigung“ nach Abschn. 3 zu erkennen. In der doppelt-logarithmischen Darstellung ergibt sich sowohl für die Meßergebnisse als auch für die numerische Berechnung konsequenterweise ein linearer Zusammenhang.

Die Berechnung mit ABAQUS bildet den Setzungsverlauf gut ab, überschätzt aber den zyklisch-viskoplastischen Setzungsanteil. In der doppelt-logarithmischen Darstellung ist der Bereich einer 20 % Fehlerabweichung eingetragen; in dieser Größenordnung liegt die Überschätzung mit ABAQUS. Die Nachrechnung eigener großmaßstäblicher Modellversuche mit Bahnschotter, siehe [3], weist eine bessere Korrelation auf. Es ist dabei aber zu beachten, daß der hier simulierte Modellversuch nach [14] mit einer besohlenen Schwelle durchgeführt worden ist, deren dämpfende Wirkung in der quasi-statischen Berechnung mit dem zyklisch-viskoplastischen Stoffansatz nicht berücksichtigt werden konnte.

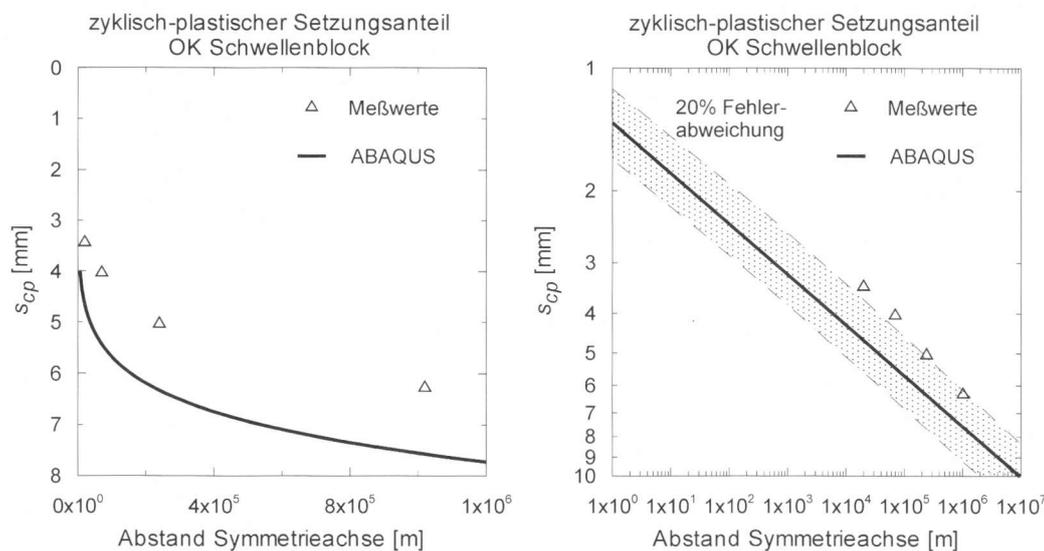


Bild 9. Zyklisch-plastischer Setzungsanteil des Schwellenblocks im linearen sowie doppelt-logarithmischen Maßstab  
Fig. 9. Portion of cyclic plastic sleeper settlement in linear and double logarithmic scale

## 6 Schlußfolgerung

Mit dem in [1], [3] aufgestellten und in [4] in ein dreidimensionales numerisches Modell ingenieurmäßig implementierten Stoffansatz für granulare Böden unter nichtruhender Lasteinwirkung liegt ein numerisches Berechnungsmodell vor, mit dem unter bestimmten Randbedingungen auch heute schon aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden können. Unabhängig davon sollten Verfeinerungen im Stoffansatz und eine weitere Absicherungen des Berechnungsverfahrens durch ergänzende Forschungen vorgenommen werden. Denkbar erscheint weiterhin ein vereinfachtes analytisches Ersatzverfahren, welches in einem ersten Ansatz bereits mit Erfolg in [4] umgesetzt wurde.

### Literatur

- [1] Gotschol, A., Kempfert, H.-G.: Zyklisch viskoplastischer Stoffansatz nichtbindiger Böden und Schotter. Bautechnik 81 (2004), H. 4. S. 279–285.
- [2] Hu, Y.: Zum Verformungsverhalten von wassergesättigten bindigen Böden unter zyklischer Belastung. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 8 (2000).
- [3] Gotschol, A.: Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 12 (2002).
- [4] Stöcker, T.: Zur Modellierung von granularen Materialien bei nichtruhenden Lasteinwirkungen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 13 (2002).
- [5] 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. 53–58.
- [6] Diyalyjee, V. A., Raymond, G. P.: Repetitive Load Deformation of Cohesionless Soil. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, No. GT10 (1982), pp. 1215–1229.
- [7] Hodjera, B.: Das Verhalten der Böden unter dynamischer Dauerbelastung. Geotechnik, Heft 2 (1979), S. 84–97.
- [8] Hettler, A.: Schottertriaxialversuche mit statischem und zyklischem Belastungsverlauf. ETR 36 (1987), S. 399–405.
- [9] Shenton, M. J.: Deformation of Railway Ballast under Repeated Loading Conditions. Railroad Track Mechanics and Technology, Pergamon Press (1978), pp. 405–425.
- [10] Herle, I.: Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste. Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 142 (1997).
- [11] Lentz, R. W., Baladi, G. Y.: Simplified Procedure to Characterize Permanent Strain in Sand Subjected to Cyclic Loading. International Symposium on Soils under Cyclic and Transient Loading, Swansea, Jan. 7.–11. (1980), pp. 89–95.
- [12] Semprich, S.: Berechnung der Spannungen und Verformungen im Bereich der Ortsbrust von Tunnelbauwerken im Fels. Veröffentlichung des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, Heft 8 (1980).
- [13] Hosseini, S. M. M.: Stress-Strain Behaviour of Granular Soils under Monotonic and Cyclic Loading Conditions. Department of Civil Engineering, The University of Leeds, United Kingdom (1987).
- [14] Eisenmann, J.: Prüfung einer elastischen Schwellenbesohlung. Forschungsbericht, Prüfam für Bau von Landverkehrswegen, TU München, München (1996).
- [15] Wichtmann, T.: Explizites Materialmodell für die Akkumulation in nichtbindigen Böden unter zyklischer Belastung. Ruhr Universität Bochum (2004).

### Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Tim Stöcker, Schäftlarnstraße 156, D – 81371 München, (vormals Universität Kassel)  
 Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Universität Kassel, Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Mönchebergstraße 7, D – 34125 Kassel

## BAUTECHNIK aktuell

### Aussichtsturmsanierung

Der 15 m hohe Rhön-Aussichtsturm am „Dreistelz“ in der Nähe von Bad Brückenau überragt den 660 m hohen Dreistelzberg und wurde am 01. 07. 1897 eröffnet.

Aus geometrischer Sicht ist der Turm ein sich leicht verjüngender Stapel von fünf Quadern von je etwa 3 m Höhe und einer Basislänge und -breite von ca. 4 m. Eine Zwischenplattform mit Bohlenbelag lädt zum Rasten ein und versteift den Turm. Eine runde Kanzel mit 4,5 m Durchmesser krönt die Konstruktion.

Die Stahlkonstruktion war ursprünglich mit einer grauen Beschichtung versehen und seit der Einweihung des Tur-

mes nicht wenige Male erneuert worden. Trotzdem war die Konstruktion mittlerweile durchgängig ver- und unterrostet und insgesamt stark angegriffen, so daß eine Komplettanierung notwendig wurde.

Hierfür wurde der Turm mit einem Kran in Hälften demontiert und per Tief-lader zum Stahlbauer transportiert. Dort wurde er völlig zerlegt, sandgestrahlt, soweit nötig ergänzt bzw. verstärkt, feuerverzinkt und wieder montiert. Der Turm besitzt nun einen extrem langlebigen und zudem wartungsfreien Schutz vor Korrosion, der leider bei seiner Erbauung noch nicht eingesetzt werden konnte, da das Verzinken von Bauteilen dieser Größe vor mehr als 100 Jahren noch nicht möglich war. Die elementierte Schraubbauweise des Turms begünstigte den Einsatz der Feuerverzinkung für dieses Projekt. Der Turm erstrahlt nun wieder in neuem silbrigem Glanz.



Sanierung und Foto: Tank- und Stahlbau Abersfelder GmbH & Co. KG, Schondra-Schilder