

**B**ei einer Vielzahl von Bauwerken wird der Baugrund neben einer statischen auch einer dynamischen Beanspruchung ausgesetzt, zum Beispiel Maschinenfundamente, Verkehrs- und Off-Shore-Bauwerke. Das Kurzzeitverhalten wird in der Regel mit den Elastizitätsparametern E-Modul beziehungsweise G-Modul und Dämpfung D beschrieben. Das Langzeitverhalten drückt sich vorwiegend durch bleibende Verformungen während der Beanspruchungsdauer aus. Die Folge bleibender Verformungen sind Strukturänderungen des Bodens und Veränderungen der zyklenabhängigen Kurzzeitparameter.

Zur Bestimmung dieser dynamischen Materialparameter stehen Feld- und Laboruntersuchungen zur Verfügung. Die bekanntesten bodendynamischen Versuchsgeräte sind das Resonant-Column Gerät (RC) und das zyklische Triaxialgerät. Diese Geräte haben eine unterschiedliche Arbeitsweise, was sich auf die ermittelten dynamischen Materialparameter auswirkt.

Durch die hier neu vorgenommene Kombination beider Versuchsgeräte können die Vorteile jeder einzelnen Versuchseinrichtung an ein und derselben Probe ausgenutzt und ein direkter Vergleich der Materialparameter angestellt werden. Darüber hinaus ist mit einer derart kombinierten Versuchseinrichtung erstmals die Untersuchung zur Veränderlichkeit der Kurzzeitparameter in Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte möglich, was aufgrund des Erinnerungsvermögens der Lockergesteine notwendig ist.

Im Rahmen des Europäischen Forschungsprojekts EUROBALT II wurde an der Universität Gesamthochschule Kassel ein zyklisches Triaxialgerät in Kombination mit einer Resonant-Column Versuchseinrichtung (CTRC – Combined cyclic Triaxial and Resonant-Column test device) für granulare Böden und Schotter entwickelt.

Langzeitbeanspruchungen mit Variation der Spannungsamplitude und Belastungsfrequenz sind mit dem zyklischen Triaxialversuch auf relativ

## Bodendynamisches Versuchsgerät zur kombinierten Bestimmung zyklischer und dynamischer Kenngrößen granularer Böden und Schotter

Dipl.- Ing. Alexander Gotschol,  
Univ.-Prof. Dr.- Ing. Hans-Georg Kempfert,  
Dipl.- Ing. Ralph Meyer, Dipl.- Ing. Tim Stöcker,  
Fachgebiet Geotechnik,  
Universität Gesamthochschule Kassel

einfache Weise zu simulieren. Neben der Beobachtung der Langzeitverformungseigenschaften ist im zyklischen Triaxialversuch die Bestimmung des dynamischen Sekantenmoduls  $E_{s,dyn}$  möglich. In RC-Geräten werden die Bodenproben dynamisch tordiert und somit einer reinen Scherbeanspruchung ausgesetzt. Dabei werden in den beiden Versuchsteilen in der Regel unterschiedliche Scherdehnungsbereiche aufgebracht. Der prinzipielle Versuchsablauf zur Ermittlung der Stoffparameter im neuen CTRC-Versuch in Abhängigkeit von der Belastungsdauer ist im Bild 1 dargestellt.

### Dimensionierung der zyklischen und dynamischen Belastungseinrichtung

#### Proben- und axiale Belastungsgrößen

Im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens soll das Kurz- und Langzeitverhalten des Schotteroberbaus an Hochgeschwindigkeitsstrecken und

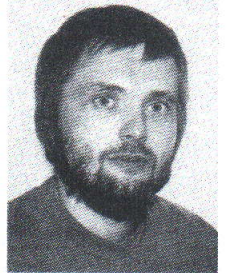
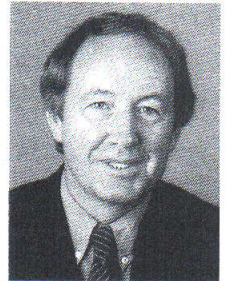


Bild 1. Prinzipieller Versuchsablauf im CTRC-Gerät.

In dem Beitrag wird ein neues Versuchsgerät zur kombinierten Bestimmung von Stoffparametern granularer Böden unter zyklischen und dynamischen Einwirkungen beschrieben. Damit werden einerseits zyklenabhängige plastische Verformungen bestimmt und andererseits die mit der Zyklenzahl sich ändernden dynamischen elastischen Parameter, zum Beispiel als Grundlage für dynamische Berechnungen im Verkehrswegebau, verfolgt. Neben der Gerätebeschreibung und Konstruktionsrandbedingungen werden erste Versuchsergebnisse mitgeteilt.

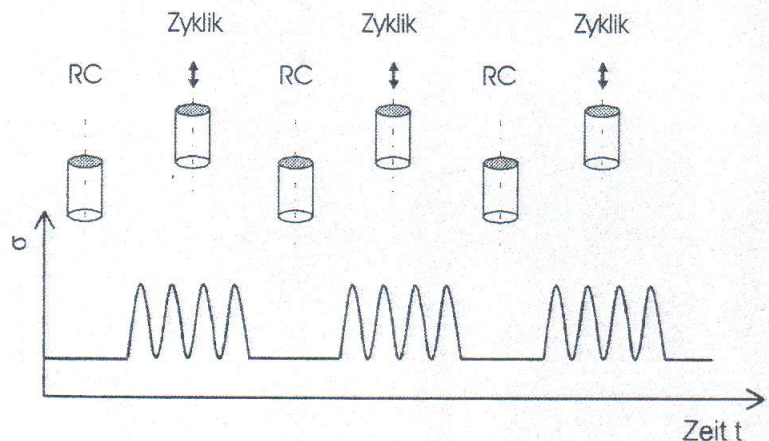
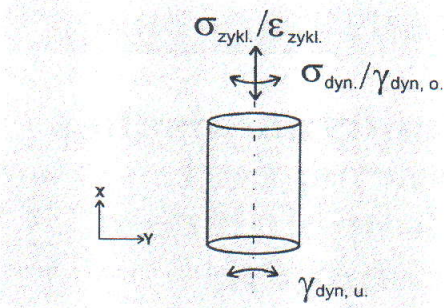




Bild 2. Resonant-Column Probe mit freien Torsionsfreiheitsgraden am Fuß- und Kopfpunkt.



deren Untergrundverhalten untersucht werden, so daß für die Geräteeinrichtung weitgehend diese Belastungsrandbedingungen zugrunde gelegt wurden. Die Dimensionierungsparameter der zyklischen Belastungseinrichtung des neuen CTCRC-Geräts wurden hauptsächlich durch den erforderlichen Spannungs- und Frequenzbereich sowie den Probendurchmesser bestimmt.

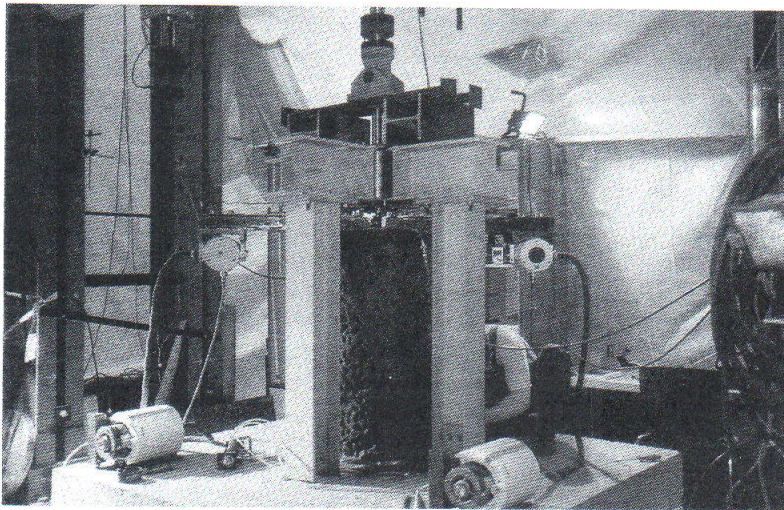


Bild 3. Versuchsstand CTCRC-Gerät.

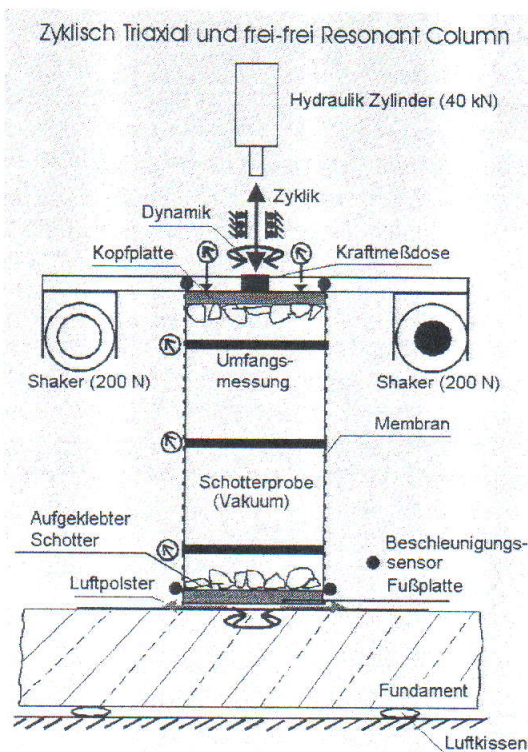


Bild 4. Schematische Darstellung des CTCRC-Versuchsstands und Meßeinrichtungen.

Die Größe der Versuchsprobe ist bekanntlich abhängig vom Korndurchmesser des zu untersuchenden Materials. Der Versuchsstand sollte für Gleisschotter 30/60 ausgelegt sein. Ein entsprechendes Schottermaterial hat ein Größtkorn von 63 mm und einen mittleren Korndurchmesser von 44 mm. Der gewählte Probendurchmesser von 500 mm entspricht etwa dem Achtfachen des Größtkorns beziehungsweise dem Elffachen des mittleren Korndurchmessers und kann damit als ausreichend angesehen werden.

Die Krafteinleitung der Tordierung um die Längsachse bedingt eine Schubverzahnung zwischen den Endplatten und der Probe. Aus diesem Grund konnte beim kombinierten Gerät eine Endflächenschmierung der Triaxialversuche nicht vorgenommen werden. Daher wurde die Probenhöhe mit 1 000 mm festgelegt, was einem Verhältnis  $h/d = 2$  entspricht.

Die auftretende Spannungsamplitude in Schienenwegen wird geprägt von der Qualität der Fahrzeuge, der Radsätze, der Schienenoberfläche, der Schwellenauflagerung (zum Beispiel Hohlstellen bei Schotteroberbau) sowie sonstigen Störstellen. Auf Grundlage von gemessenen In-situ-Beanspruchungen wurde die axiale zyklische Belastungseinrichtung mit einer maximalen Lastamplitude von 40 kN (entspricht max.  $\sigma = 203,7 \text{ kN/m}^2$  in der Probe) und einer möglichen Lastwechselfrequenz bis maximal 35 Hz ausgelegt.

### Torsionsbelastung

Ausgehend von den Empfehlungen der ASTM STANDARDS (1981) erfolgt die dynamische Tordierung der zylindrischen Probe mittels elektrodynamischer Shaker. Der generelle Versuchsaufbau entspricht einem Resonant-Column Versuch vom Typ „free-free“ (drehfreie Lagerung am Kopf- und Fußpunkt, Bild 2).

Die Größe des Schubmoduls wird bekanntlich maßgeblich von der Größe der Scherverformung beeinflusst. Gleisschotter besitzt bei Scherverformungen  $< 10^{-3} \%$  nach bisherigen Untersuchungen etwa einen konstanten Schubmodul. Dieser nimmt mit zunehmender Scherverformung ab und ist bei einer Verformung von etwa  $10^{-1} \%$  nur noch halb so groß. Die dynamische Erregerkraft zur Auslenkung der Probe sollte für realistische Scherverformungen bemessen sein. Für die Dimensionierung wurden im Vorfeld numerische Simulationen mit einer im Maßstab 1 : 1 modellierten Schotterprobe sowie Vorversuche durchgeführt. Die Materialparameter Schubmodul und Dämpfung wurden aus PRANGE (1981) entnommen.

Die Berechnung ergab bei einem Schubmodul  $G = 100 \text{ MN/m}^2$  und einer Shakerkraft von 1 kN eine Scherverformung  $\gamma = 1,2 \cdot 10^{-1} \%$  und bei einer Shakerkraft von 0,1 kN eine Scherverformung  $\gamma = 1,2 \cdot 10^{-2} \%$ . Vergleicht man die berechneten Scherverformungen mit den Angaben nach STU-



DER/KOLLER (1997) für den Scherverformungsbereich bei verkehrserregter Beanspruchung, so ist eine Anregungskraft von 0,1 kN bei einem Hebelarm von 1 m ausreichend.

### **Konstruktion und Aufbau des zyklisch-dynamischen Versuchsgeräts**

#### **Triaxialer Versuchsaufbau**

Der grundsätzliche Versuchsaufbau des CTCRC-Geräts entspricht dem eines herkömmlichen statischen Triaxialversuchs. Zusätzlich kann die hydraulische Belastungseinrichtung über ein Servoventil zyklisch gesteuert werden.

Die Kraftübertragung vom Zylinder zur Probe erfolgt über eine 50 cm lange Kolbenstange, die auf einer Länge von 20 cm durch eine Linearkugelhülse zwangsgeführt wird. Diese Führung ist notwendig, um ein Verkanten der Kopfplatte zu verhindern. Zusätzlich ist zwischen Kopfplatte und Kolbenstange eine Kraftmeßdose angeordnet.

Gewöhnlich wird bei Triaxialversuchen die Stützspannung nach Einbau der Probe in einer flüssigkeitsgefüllten Druckzelle aufgebracht. Für die dynamische Tordierung würden sich daraus erhebliche technische Probleme bezüglich der Anordnung der Shaker ergeben. Daher wird die  $\sigma_3$ -Spannung mit Hilfe eines Vakuums erzeugt. Dazu ist das Probenmaterial von einer Latexmembran seitlich umhüllt und luftdicht mit Kopf- und Fußplatte verbunden. Die theoretisch maximale Seitenspannung  $\sigma_3$  beträgt etwa 100 kN/m<sup>2</sup> und ist für Elementversuche zur Untersuchung von Ober- und Unterbau sowie den obersten Schichten des Untergrunds ausreichend.

Weiterer Vorteil einer druckzellenlosen Triaxialanlage ist die direkte Umfangmessung zur Volumenbestimmung. Die Volumenmessung stellt gerade bei nicht gesättigten Bodenproben eine meßtechnische Schwierigkeit dar.

#### **Resonant-Column Versuchsaufbau**

Die dynamische Krafteinleitung erfolgt am Kopf der Probe. Die dafür erforderlichen elektrodynamischen Shaker sind schlupffrei über biegesteife Hebelarme mit der Kopfplatte verbunden. Zur Einleitung der Torsionskraft wird die Kopfplatte mit dem granularen Boden beziehungsweise dem Schotter verklebt.

Um eine am Fußpunkt reibungsarm um die Drehachse gelagerte Probe zu erreichen, wird bei verschiedenen RC-Geräten die Probe auf einem Kugellager geführt. Von dieser Konstruktion wurde beim oben beschriebenen Versuchsstand Abstand genommen. Die zum Teil hohen Axialkräfte während der zyklischen Versuchsphase würden zu einem erheblichen Verschleiß beziehungsweise Bruch der Lager führen. Eine dauerhaft reibungsarme Probenführung ist unter diesen Randbedingungen nicht gegeben.

Geotechnik mit Geokunststoffen

Suchen  
Sie  
nicht  
länger  
nach  
Lösungen.

Wir kennen  
den Weg.

Innovative Entwicklung,  
zerstörte Herstellung,  
kompetente Beratung  
sowie fachgerechte  
Ausführung bieten Ihnen  
die Sicherheit, die Sie  
für Ihr spezielles  
Bauvorhaben benötigen.

**NAUE**   
**FASERTECHNIK**

Naue Fasertechnik GmbH & Co. KG  
Wartturmstraße 1 · 32312 Lübbecke  
Telefon 0 57 41 / 40 08 - 0  
Telefax 0 57 41 / 40 08 - 40  
Internet: [www.naue.com](http://www.naue.com)  
e-mail: [geokunststoffe@naue.com](mailto:geokunststoffe@naue.com)



Bild 5.  $\epsilon$ -log N-Diagramm aus zyklischem Triaxialversuch.

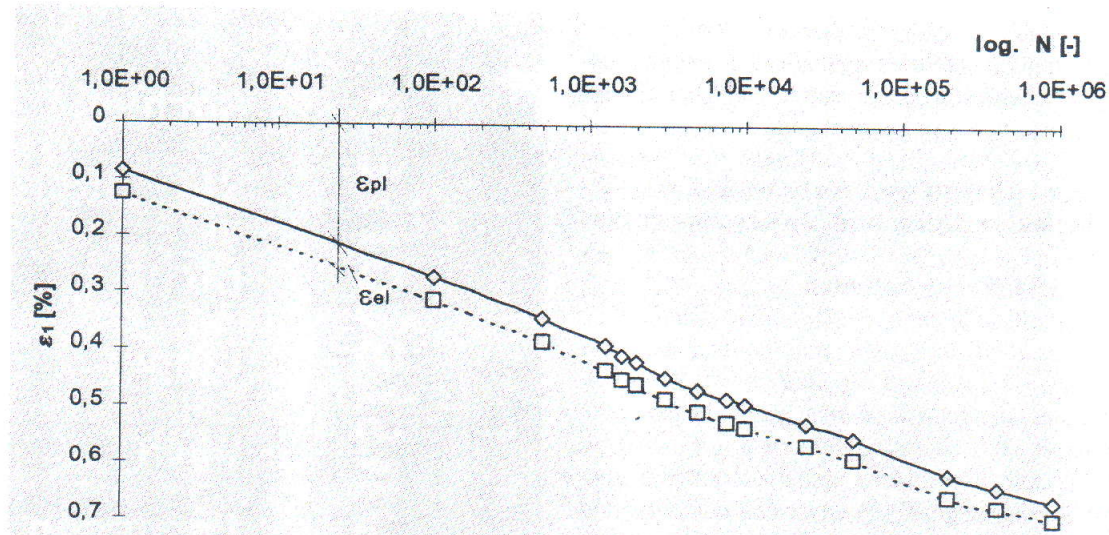


Bild 6.  $E_{s,dyn}$ -log N-Diagramm aus zyklischem Triaxialversuch.

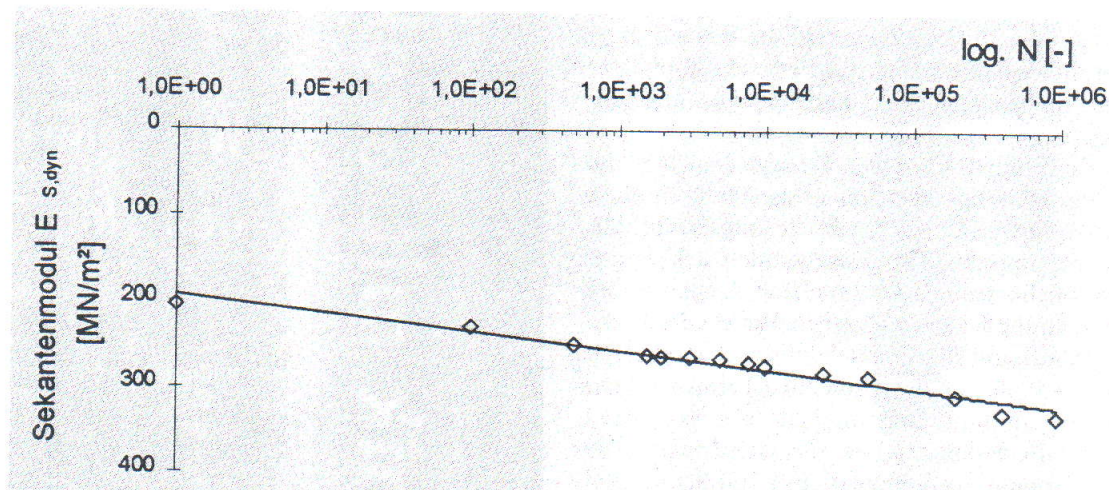


Tabelle 1. Formeln und Bezeichnungen für die dynamische Testphase.

$G = \rho \cdot v_s^2$ .....	[1a]
$G = \rho \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f_R \cdot l}{\alpha} \right)^2$ .....	[1b]
$\alpha \cdot \tan \alpha - \frac{J_P^2}{J_F \cdot J_K} \cdot \frac{\tan \alpha}{\alpha} = \frac{J_P}{J_K} + \frac{J_P}{J_F}$ .....	[2]
$J_K = \frac{k_T}{(2 \cdot \pi \cdot f_R)^2}$ .....	[3]
$J_K = \frac{m \cdot g}{4 \cdot \pi^2} \cdot T^2 \cdot \frac{a \cdot b}{h}$ .....	[4]
mit	
$\rho$	Dichte der Probe
$l$	Höhe der Probe
$f_R$	Resonanzfrequenz
$\alpha$	Eigenwert
$J_P$	Massenträgheitsmoment der Probe
$J_K$	Massenträgheitsmoment des Antriebskopfs
$J_F$	Massenträgheitsmoment der Fußplatte
$k_T$	Torsionsfederkonstante der Kalibrierprobe
$a, b, h$	geometrische Größen des Versuchsaufbaus
$m$	Masse des Antriebskopfes mit Shakern
$g$	Erdbeschleunigung
$T$	Periodendauer einer Schwingung

Die Lösung der reibungsfreien Fußpunkt-lage-rung besteht hier in einem Luftfilm, der zwischen Fußplatte und Fundament erzeugt wird. Dieser Luftfilm hebt die Probe um einige zehntel Millimeter an, so daß diese auf einem Luftpolster schwebt. Hierzu wurde die Fußplatte mit einem hohen Ebenheitsmaß an ihrer Unterseite gefertigt und eine spezielle Gleitschicht auf dem Fundament mit ebenfalls hoher Ebenheit hergestellt. Eine pneumatische Vorrichtung innerhalb der Fußplatte läßt einen Luftstrom zwischen der Fußplatte und der Gleitschicht abströmen. Das Luftvolumen und der Luftdruck werden so eingestellt, daß die gesamte Probe angehoben wird und auf dem „Luftpolster“ schwebt, wobei ein Zentrierdorn in der Mitte der Fußplatte das seitliche Ausweichen der Probe verhindert (Bilder 3 und 4).

Die Scherverformung des Probekörpers wird mit seismischen piezoelektrischen Beschleunigungssensoren gemessen. Damit keine Fremdschwingungen benachbarter Versuchseinrichtungen über den Hallenfußboden und das Fundament des CTCR-Geräts übertragen und meßtechnisch erfaßt werden, wird der gesamte Versuchsstand während der RC-Versuchsphase über Druckluftkissen vom Hallenfußboden entkoppelt.



## Meßtechnik

Die meßtechnische Ausrüstung des Versuchstands besteht aus zwei unabhängig voneinander arbeitenden Meßsystemen. Ein Meßsystem zur Erfassung der Verformungen während der zyklischen Beanspruchung (plastische und elastische Axial- und Querverformung), ein zweites Meßsystem zur Registrierung des dynamischen Erregungs- und Antwortverhaltens. Bild 4 zeigt einen Schnitt mit der Meßeinrichtung.

Während der zyklischen Versuchsphase werden die axialen Verformungen, die Querverformungen und die zyklische Kraft an der Oberkante der Probe gemessen. Die Aufnahme der axialen Verformung erfolgt über drei induktive Wegaufnehmer am Kopf der Probe. Die Querdehnungen werden mit einer speziell entwickelten Umfangsmeeinrichtung auf elektrischer Widerstandsbaasis gemessen.

Die Qualität zyklischer Messungen hängt entscheidend von der Abtastfrequenz der Datenaufnahme ab. Eine zu geringe Abtastfrequenz erfat den Kurvenverlauf nicht korrekt, und es kommt zu Fehlinterpretationen bei der Auswertung. Testmessungen haben gezeigt, daß eine effektive Abtastfrequenz mit etwa 50 Meßdaten je Zyklus notwendig ist, um eine korrekte Bestimmung des dynamischen Sekantenmoduls vornehmen zu können.

Die dynamische Torsionsanregung der Versuchsproben erfolgt in Resonanz. Dies ist notwendig, um ausreichende Scherverformungen zur Bestimmung des Schubmoduls und der Dämpfung zu erreichen. Aufgrund der geringen Verformungen und der gleichzeitig hohen Erregerfrequenzen (etwa 20 bis 100 Hz) ist die Verwendung von induktiven Wegaufnehmern nicht möglich. Für diese Messungen werden seismische Beschleunigungssensoren verwendet. Das entsprechende Wegsignal wird anschließend durch Doppelintegration des Beschleunigungssignals nach der Zeit berechnet.

## Test- und Kalibrierphase des Versuchsgesats

An der neuen Versuchseinrichtung wurde eine intensive Test- und Kalibrierphase zur Abstimmung des Versuchstands vorgenommen. Die versuchstechnischen Randbedingungen der Testphase wurden an publizierten Untersuchungen angelehnt. Dabei wurden statische, zyklische und dynamische Versuche ausgeführt.

Die statischen Versuche wurden an unbelasteten Proben sowie an Proben mit einer zyklischen Vorbelastung von  $N = 10^5$  Lastwechseln vorgenommen. Als Untersuchungsmaterial kam ein Basaltschotter 30/60 zur Anwendung. Die Seitendruckspannungen lagen im Bereich von 20, 40, 60 und 80 kN/m<sup>2</sup>. Vergleiche mit Ergebnissen von HETTLER (1987) und RAYMOND/

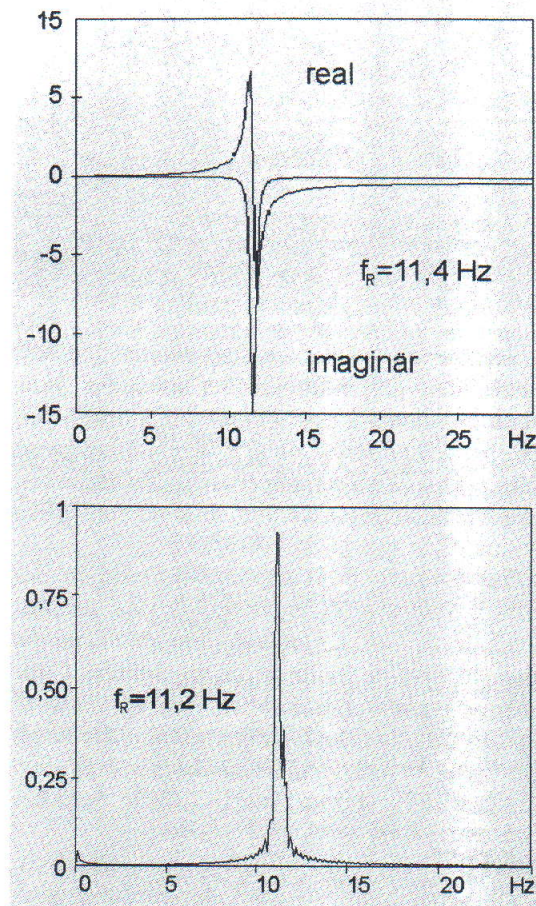


Bild 7. Resonanzfrequenz aus der Kalibrierphase; oben: Real- und Imaginärteil aus der Berechnung; unten: Normiertes Frequenzspektrum aus Kalibrierversuch.

DAVIES (1978) zeigen eine gute Übereinstimmung.

Für die zyklischen Versuche wurde der gleiche Schotter bei ähnlichen Einbau- und Versuchsrandbedingungen verwendet. Im Vordergrund dieser Testphase stand die Optimierung zur



**JESSBERGER + PARTNER**

Beratende Ingenieure · Geotechnik · Umwelttechnologie

**Objektplanung  
Projektmanagement  
Sicherheitsanalysen**

**Altlasten-Seminar**

Leipzig 09. Mai 2000

**„Flächenrecycling und Grundwassersanierung“**

Bochum 24. Mai 2000

**Flächenrecycling  
Sanierungsplanung  
Deponietechnik**

**Prof. Dr.-Ing. JESSBERGER + PARTNER GmbH**

Am Umweltpark 3-5, 44793 Bochum

Tel.: (02 34) 6 87 75-0 · Fax: (02 34) 6 87 75-10

e-mail: bochum@jessberger.de

Internet: http://www.jessberger.de

**Bochum**

**Dortmund**

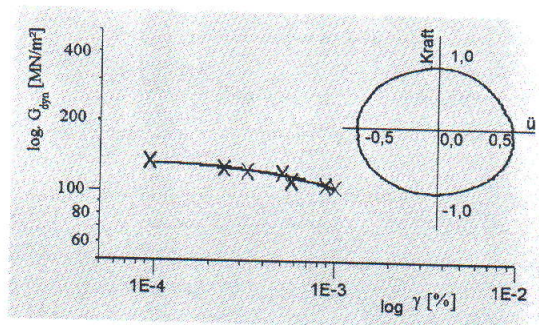
**Leipzig**

**Berlin**

**Ilse**



Bild 8. Links: Schubmodul in Abhängigkeit der Scherdehnung,  $\rho_E = 1,72 \text{ g/cm}^3$ ,  $\sigma_3 = 50 \text{ kN/m}^2$ , rechts: Lissajusfigur, Kraft versus Beschleunigung.



meßtechnischen Erfassung der plastischen und elastischen Verformungsgrößen sowie der zyklischen Druckspannung. Die Bilder 5 und 6 zeigen ein  $\epsilon$ -log N- sowie ein  $E_{s,dyn}$ -log N-Diagramm eines zyklischen Triaxialversuchs. Zu erkennen ist auch der elastische Stauchungsanteil jedes Zyklus.

Die dynamische Testphase bestand in der Kalibrierung des Versuchsstands und im Abgleich der Sensorik. Dafür sind nachfolgend die Formeln und Bezeichnungen in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Kalibrierung ist notwendig, um das Massenträgheitsmoment der Kopfplatte zur Berechnung des Schubmoduls entsprechend Gleichung 1 nach Tabelle 1 zu bestimmen.

Der Eigenwert  $\alpha$  berechnet sich für den verwendeten Versuchsaufbau nach der Eigenwertgleichung (Gleichung 2, Tabelle 1). Er spiegelt das Verhältnis der Massenträgheitsmomente der Probe zum Antriebskopf und der Fußplatte wider. Die Massenträgheit der Probe läßt sich aufgrund der zylindrischen Form problemlos berechnen. Beim Antriebskopf dagegen ist das Massenträgheitsmoment rechnerisch nur sehr schwer zu erfassen und ist für den CTRC-Versuchsstand experimentell in zwei voneinander unabhängigen Versuchen bestimmt worden.

Zum einen wurde eine definierte Kalibrierprobe verwendet. Die Kalibrierprobe wurde mittels Shaker harmonisch tordiert und die Resonanzfrequenz bestimmt. Diese Resonanzfrequenz wurde anschließend im Ausschwingversuch am gleichen

Versuchsaufbau nochmals überprüft. An Hand der Resonanzfrequenz  $f_{r,K}$  des Kalibrierversuchs wurde das Massenträgheitsmoment  $J_{KK}$  des Antriebskopfs nach Gleichung 3 aus Tabelle 1 berechnet.

Zum anderen wurde ein Pendelversuch durchgeführt. Dabei wurde der gesamte Antriebskopf an Stahlseilen aufgehängt und um dessen Torsionsachse ausgelenkt. Aus diesem Versuch läßt sich das Massenträgheitsmoment entsprechend Gleichung 4 nach Tabelle 1 berechnen.

Aus beiden Versuchen ergaben sich Massenträgheitsmomente mit nur geringen Abweichungen. Mit dem daraus gemittelten Wert wurde mit einem FEM Programm eine dynamische Berechnung des Kalibrierversuchs durchgeführt. Die berechnete Resonanzfrequenz stimmt mit der im Experiment ermittelten Resonanzfrequenz überein (Bild 7, unten).

Ein erster Vorversuch mit einer unbelasteten Schotterprobe (Basalt 30/60) ergab bei einer Einbaudichte von  $1,72 \text{ g/cm}^3$ , einem Seitendruck  $\sigma_3 = 20 \text{ kN/m}^2$  und einer Scherverformung  $\gamma = 2 \cdot 10^{-2} \%$  eine Scherwellengeschwindigkeit  $v_s = 214,4 \text{ m/s}$  und einen Schubmodul  $G = 80 \text{ MN/m}^2$ .

Im Bild 8 ist der experimentell ermittelte Schubmodul von Basaltschotter in Abhängigkeit der Scherdehnung aufgetragen. Dabei handelt es sich um Versuchsergebnisse einer unbelasteten Schotterprobe mit einem Seitendruck von  $50 \text{ kN/m}^2$  und einer Einbaudichte  $\rho_E = 1,72 \text{ g/cm}^3$ . Diese Versuchsergebnisse sind direkt mit denen von PRANGE (1981) vergleichbar und zeigen eine gute Übereinstimmung.

Nach Abschluß der Test- und Kalibrierphase werden derzeit umfangreiche Versuchsserien unter anderem auch als Grundlage für numerische Berechnungen an realen Systemen durchgeführt.

### Quellennachweis

ATM STANDARDS (1981): *Modulus and Damping of soils by the Resonant-Column Method*. ASTM Standard 4015-81.

HETTLER, A. (1987): Schottertriaxialversuche mit statischem und zyklischem Belastungsverlauf. In: *ETR* 36, Nr. 6, S. 399-405.

PRANGE, B. (1981): *Resonant Column Testing of Railroad Ballast*. Proceedings X. Intern. Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm.

PRANGE, B. (1983): *Der Resonant Column Test in Theorie und Experiment*. Symposium Meßtechnik im Erd- und Grundbau, DGEG, München, S. 99-104.

RAYMOND ; DAVIES (1978): Triaxial Tests on Dolomite Railroad Ballast. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 104, No. GT6, Proc. Paper 13835, pp. 737-751.

STUDER, J.A. ; KOLLER, M.G. (1997): *Bodendynamik*. 2. Auflage. Berlin: Springer Verlag.



- ▶ Alu-Gestängeziehgeräte
- ▶ Gehäuse in hochfester Aluminiumlegierung
- ▶ ca. 40% Gewichtsersparnis
- ▶ Einarm- und Doppelausführung

**WILL UMWELT- U. GEOTECHNIK**  
**Waldstraße 31**  
**61191 Rosbach**  
**Tel. 0 60 07/74 82 · Fax 0 60 07/12 78**