

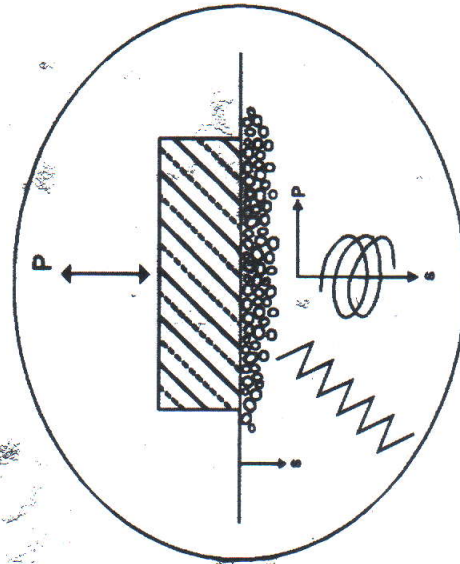


Herausgeber: Th. Triantafyllidis

Heft 32

BEITRÄGE ZUM WORKSHOP:

"BODEN UNTER FAST ZYKLISCHER BELASTUNG: ERFAHRUNGEN UND FORSCHUNGSERGEBNISSE"



Bochum 2000

SSN 1439-9342

SFB



398

Kombiniert zyklische und dynamische Elementversuche zur Beschreibung des Kurz- und Langzeitverhaltens von Schotter und granularen Böden

Prof. Dr.- Ing. H.-G. Kempfert, Dipl.- Ing. A. Gotschol, Dipl.- Ing. T. Stöcker
Universität Gh Kassel, Fachgebiet Geotechnik

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wird zunächst über Ergebnisse zum plastischen Verformungsverhalten wassergesättigter bindiger Böden unter zyklischer Beanspruchung berichtet. Schwerpunkt des Beitrages stellen dann die Forschungsergebnisse und Aktivitäten der Universität Kassel hinsichtlich des zyklisch-dynamischen Verhaltens granularer Böden und Schotter dar. Es wird ein neu entwickeltes kombiniertes zyklisches Triaxial und Resonant-Column Gerät beschrieben. Damit werden einerseits zyklenabhängige plastische Verformungen bestimmt und andererseits die mit der Zyklenzahl sich ändernden dynamischen elastischen Parameter, z.B. als Grundlage für dynamische Berechnungen im Verkehrswegebau verfolgt. Abschließend werden erste Erkenntnisse zum elastischen und plastischen Stoffverhalten von Bahnschotter (30/60) unter zyklischer Belastung mitgeteilt.

1 Einleitung

In einer Vielzahl praktischer Fragestellungen tritt die Problematik der zyklischen wie auch dynamischen Belastung von Bauwerken auf. Das mechanische Verhalten von Lokergesteinen unter zyklisch-dynamischer Belastung ist sehr komplex. Standsicherheit und Verformungsverhalten des Untergrundes weisen mit dem darauf errichteten Bauwerk ein gekoppeltes Erreger-Antwort-System, mit einem nichtlinearen Verformungsverhalten auf.

Das bodenmechanische bzw. bodendynamische Verhalten jeweiliger Bodenarten unter solch zyklisch-dynamischer Last ist seit längerem Gegenstand der Forschung auf nationaler und internationaler Ebene.

Im Rahmen des DFG Schwerpunktprogramms „Systemdynamik und Langzeitverhalten von Fahrwerk, Gleis und Untergrund“ wurden am Fachgebiet Geotechnik der Universität Gh Kassel die dynamischen Belastungen im Unterbau/Untergrund aus Eisenbahn-

verkehr untersucht. Dazu wurden vorhandene in-situ Messungen ausgewertet und die Belastungsrandbedingungen in Schienenwegen beschrieben. Zum derzeitigen Stand wurde schwerpunktmäßig das Verformungsverhalten von wassergesättigten bindigen Böden unter diesen Belastungsbedingungen theoretisch und experimentell untersucht. Dabei wurde ein wesentlicher Erkenntnisfortschritt zum Verformungsverhalten von wassergesättigten bindigen Böden unter zyklischer Belastung erzielt, darauf aufbauend ein Stoffansatz abgeleitet und numerisch umgesetzt, *Kempfert/Hu (1999 b)*.

Im künftigen Verlauf des o. g. DFG Schwerpunktprogrammes soll der grundsätzliche Stoffansatz zur Langzeitverformung wassergesättigter bindiger Böden auf Schotter und granulare Böden übertragen werden. Die Machbarkeit dieser Erweiterung wurde Ansatzweise auf der Grundlage von Versuchsergebnissen der Literatur bereits bestätigt und in *Kempfert/Hu (1999 a)* beschrieben.

Parallel zur Untersuchung des plastischen Verformungsverhaltens von Schotter und granularen Böden wird derzeit auch das veränderliche elastische Langzeitverhalten von Schotter und granularen Böden unter Eisenbahnverkehrslast untersucht und ein Stoffansatz abgeleitet. Ansätze zum veränderlich elastischen Langzeitverhalten granularer Böden liegen nur vereinzelt vor. Es soll eine Grundlage für eine Verknüpfung zwischen Lang- und Kurzzeitmodellen geschaffen werden.

Für diese Untersuchungen steht am Fachgebiet Geotechnik der Universität Gh Kassel ein neu entwickeltes zyklisches Triaxialgerät in Kombination mit einer Resonanz-Column Versuchseinrichtung (CTRC) zur Verfügung. Mit diesem Versuchsgerät ist u. a. die Ermittlung des veränderlichen dynamischen Schubmoduls durch kurzzeitiges Unterbrechen des zyklischen Triaxialversuches und Durchführung des Resonanz-Column Versuches möglich. Damit ergeben sich über die Belastungsgeschichte (Zyklus) ändernde Kurzzeitparameter (Dynamik).

Im folgenden soll ein kurzer Überblick über den Forschungsstand, zum Thema Langzeitverformungsverhalten wassergesättigter bindiger Böden unter zyklischer Last, der Universität Gh Kassel gegeben werden. Der Schwerpunkt dieses Manuskriptes liegt jedoch im Langzeitverformungsverhalten granularen Böden, insbesondere Schotter, sowie den über die Zyklenzahl veränderlichen elastischen Materialeigenschaften (Kurzzeitparameter).

2 Langzeitverformungsverhalten wassergesättigter, bindiger Böden unter zyklischer Last

2.1 Genereller Ansatz

Ausgehend von Literaturergebnissen und eigenen experimentellen Erkenntnissen wurde festgestellt, daß sich der infolge zyklischer Belastung einstellende bleibende Porenwasserüberdruck sowohl die undrainierten plastischen Scherverformungen nach Belastungsbeginn, als auch die anschließenden drainierten plastischen Volumenverformungen bestimmt, siehe *Kempfert/Hu (1999 b)*. Aufbauend auf dieser Erkenntnis, wurde ein quasi-statischer Stoffansatz formuliert, in welchem der anfänglich bleibende Porenwasserüberdruck als Druckquelle in die Konsolidationsgleichung eingefügt wurde. Der anschließende Abbau des Porenwasserüberdruckes kann infolge der Konsolidation simuliert werden. Der gesamte Porenwasserüberdruck setzt sich aus den reversiblen und bleibenden Anteilen zusammen. Unter bleibendem Porenwasserüberdruck ist hier der Porenwasserüberdruck zu verstehen, der während zyklischer Beanspruchung in der undrainierten Phase entsteht.

Für eine ausführliche Modellbeschreibung, sowie den theoretischen Grundlagen wird auf *Hu (1999)* verwiesen. Es soll an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden.

2.2 Berechnungsbeispiel

Für die praktische Anwendung wurde der abgeleitete Stoffansatz numerisch mit der Finite-Elemente und der Finiten-Differenzen Methode umgesetzt. Zur Überprüfung des stofflichen Ansatzes und der programmtechnischen Umsetzung wurden ausgewählte Ergebnisse von zyklischen Triaxialversuchen der Literatur nachgerechnet. Die Belastung sowie die hydraulischen und geometrischen Randbedingungen sind in Bild 2.1 schematisch wiedergegeben.

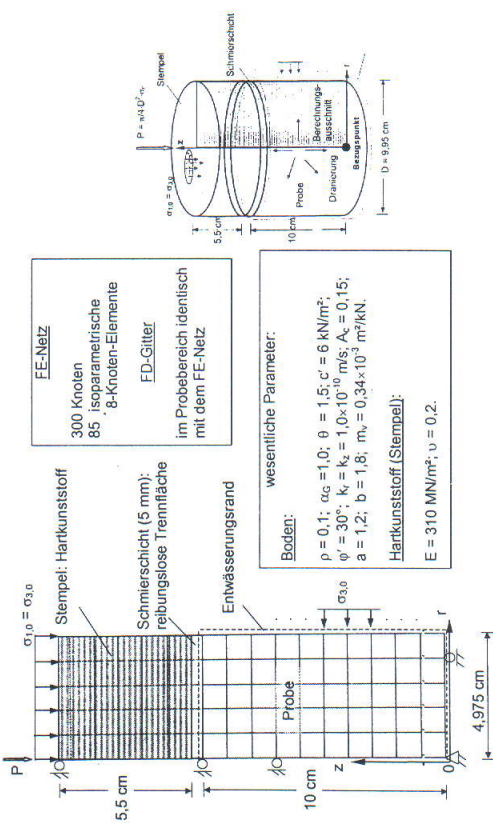


Bild 2.1: Berechnungsausschnitt, FE-Netz und FD-Gitter, Randbedingungen sowie Materialparameter, aus *Hu (1999)*

In Bild 2.2 sind Berechnungsergebnisse für den in Bild 2.1 gekennzeichneten Porenwasserdruckmeßpunkt mit den dazugehörigen Versuchsergebnissen dargestellt.

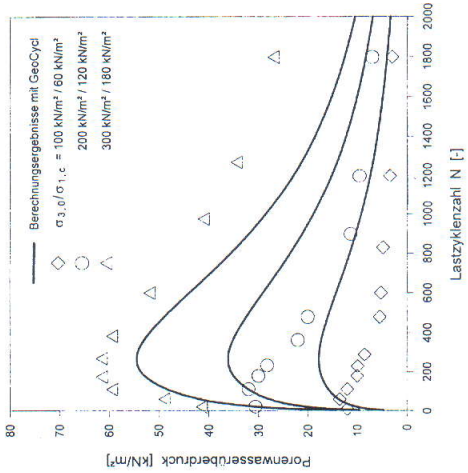


Bild 2.2: Porenwasserüberdruck des Meßpunktes in Abhängigkeit der Zyklenzahl, Messung und Berechnung, aus *Hu (1999)*

Es läßt sich eine befriedigende Übereinstimmung der gemessenen zyklischen Porenwasserüberdrücke mit der durchgeführten FE Berechnung erkennen. Es ist festzu-

halten, daß aufgrund der schwierig durchzuführenden Porenwasserdruckmessungen in zyklischen Triaxialversuchen wenig brauchbare Meßergebnisse in der Literatur verfügbar sind und der hier beschriebene Ansatz noch experimentell belegt werden sollte. Die Entwicklung einer für diese Zielstellung geeigneten Meßeinrichtung wird derzeit am Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel vorangetrieben.

3 Langzeitverformungen und veränderlich elastisches Verhalten granularer Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung

3.1 Allgemeines

Das Antwortverhalten granularer Böden, insbesondere Schotter, auf zyklisch-dynamische Beanspruchungen wird von den Belastungsrandbedingungen sowie den bodenmechanischen und mineralogischen Eigenschaften und Randbedingungen geprägt. Unter bodenmechanischen und mineralogischen Eigenschaften sind hier z. B. Kornform und -verteilung, Rauigkeit und Porosität zu verstehen. Mit Randbedingungen sind z. B. Sättigungs- und Drainageverhältnisse gemeint. Die Zahl der Einflußfaktoren ist erheblich, wobei die Wichtung je nach Beanspruchungsart und Randbedingungen differiert. So ist z. B. ein mitteldicht gelagerter teilgesättigter Sand unter zyklisch-dynamischer Belastung und drainierten Randbedingungen noch dynamisch stabil, während er bei undrainierten Randbedingungen kollabiert und liquefaktionsgefährdet ist.

Die gegenseitige Beeinflussung einzelner Parameter verdeutlicht, daß ein allgemeingültiges Stoffgesetz welches alle Randbedingungen berücksichtigt, nicht ohne weiteres aufzustellen ist. Das Aufstellen eines allgemeingültigen Stoffgesetzes erscheint daher in der Bodenmechanik nicht praktikabel, siehe auch *Gudehus (1995)*. Für begrenzte Problemstellungen wird daher an dieser Stelle eine Ableitung von reduzierten Stoffansätzen als sinnvoll erachtet. Stoffansätze können durch die Eliminierung von für die Problemstellung untergeordneten Einflußfaktoren bzw. Parametern reduziert werden.

Im folgenden sollen einzelne Einflußparameter zur Veränderlichkeit der elastischen Kurzeiparameter sowie des plastischen Langzeitverhaltens näher erläutert werden.

3.2 Elastisches Kurzzeitverhalten

Das Verhalten der elastischen Materialparameter in Abhängigkeit der Lastzyklenzahl wird in der Literatur sehr widersprüchlich beschrieben. *Hettler (1997)* geht im Gegensatz zu *Raymond & Williams (1978)* von einem konstanten, d.h. zyklunabhängigen Elastizitäts- bzw. Schubmodul aus, siehe hierzu Tabelle 3.1

Güttler (1984) nimmt eine 2-Phasenteilung der Lastwechselzahl bezüglich des elastischen Verhaltens vor, siehe Bild 3.1. Die erste Phase, die er bis zu einer Lastwechselzahl von ca. $N = 100$ definiert, ist mit deutlichen Zu- oder Abnahmen des elastischen Dehnungsanteils gekennzeichnet. Dieses uneinheitliche elastische Anfangsverhalten der 1. Phase ist vermutlich auf Einbauungenauigkeiten bzw. verschiedenen Einbaudichten zurückzuführen und nach Güttler (1984) nach ca. 100 Zyklen abgeschlossen. In der anschließenden 2. Phase nehmen die elastischen Dehnungsanteile einheitlich ab.

Table 3.1: Beispielhafte Stoffansätze zur Beschreibung des elastischen Verhaltens granularer Böden und Schotter unter zyklischer oder dynamischer Beanspruchung

Stoffansatz	Autoren (beispielhaft)	Versuchsgerät
1 $G = \frac{7230 \cdot (2,97 - e)^2}{(1 + e)} \cdot (\bar{\sigma}_0)^{0,38}$	Prange (1981); Kuribayashi et al. (1975)	Resonant-Column Versuche
2 $G = \frac{6907 \cdot (2,17 - e)^2}{(1 + e)} \cdot (\bar{\sigma}_0)^{0,5}$	Woods (1978)	Resonant-Column Versuche
3 $E^r = \frac{(c + \sigma_m \cdot \sin \varphi) \cdot (1 + 2\nu)}{c_1 \cdot (\tau / \tau_B)^{d_1} + e_1 \cdot (\tau / \tau_B)^{d_2} \cdot \log N}$	Güttler (1984)	zykl. Triaxialversuch

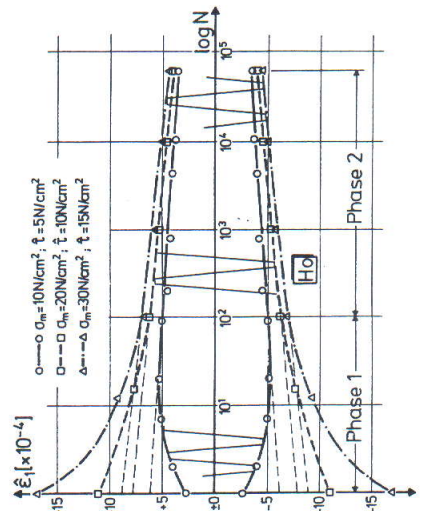


Bild 3.1: Elastischer Dehnungsanteil versus Zyklenzahl, aus Güttler (1984)

Mit der Abnahme des elastischen Dehnungsanteils mit der Zyklenzahl ist die Zunahme des dynamischen E-Moduls verbunden. Das bedeutet, daß der Boden mit steigenden Lastwechselzahlen zunehmend steifer reagiert, d.h. sich verfestigt. In Bild 3.2 ist die Zunahme der statischen Bruchspannung nach unterschiedlichen Lastwechselzahlen (LW) dargestellt.

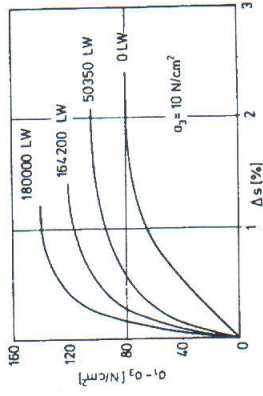


Bild 3.2: Spannung-Dehnungskurven statischer Triaxialversuche nach unterschiedlicher zyklischer Beanspruchungsdauer, aus Jessberger / Dörr (1981)

3.3 plastisches Langzeitverformungsverhalten

Hinsichtlich des plastischen Langzeitverformung von granularen Böden und Schotter unter zyklischer Last liegen in der Literatur umfangreiche Untersuchungen vor, siehe Tabelle 3.1. Aus der Tabellarischen Übersicht ist ersichtlich, daß die Abhängigkeit der bleibenden Verformungen von der Lastzyklenzahl zumeist mit einem halblogarithmischen oder einem doppellogarithmischen Ansatz beschrieben wird.

Table 3.1: Kurzübersicht plastischer Langzeitverformungsgesetze

Stoffansatz	Autoren (beispielhaft)	Versuchsgerät
1 $\epsilon_{pl,N} = \epsilon_{pl,0} \cdot e^{r \cdot x} \cdot N^x$	Diyaljee / Raymond (1982)	zykl. Triaxialgerät, $f < 1,0$ Hz
2 $\epsilon_{pl} = a_{pl} + b_{pl} \cdot \lg N$	Güttler (1984); Lentz / Baladi (1980)	zykl. Triaxialgerät, $f = 0,5$ Hz und $1,0$ Hz
3 $\epsilon_N = \epsilon_1 \cdot (1 + 0,2 \cdot \lg N)$	Hettler (1987); Shenton (1978)	zykl. Triaxialgerät, $0,1 < f < 30$ Hz

Mit Hilfe der halb- oder doppellogarithmischen Darstellung lassen sich zusätzlich Aussagen zur dynamischen Stabilität granularer Böden oder Schotter tätigen. Ergibt sich eine lineare Kurve im logarithmischen Dehnungs-Lastwechselzahl Diagramm so wird vom „Shake Down“ gesprochen (Bild 3.3). Als „Shake Down“ wird das Konvergieren der bleibenden Verformungen gegen einen stabilen Grenzwert bezeichnet.

Zeigt der Kurvenverlauf eine Zunahme der Dehnungszinkremente bei steigender Zyklenzahl spricht man dagegen vom Kollabieren der Probe. Dieses Verhalten wird mit „Incremental Collaps“ bzw. „Gradual Failure“ bezeichnet (Bild 3.3). Dieser Versagenszustand setzt bei entsprechender Spannungsamplitude im Regelfall bereits nach wenigen Lastzyklen ein.

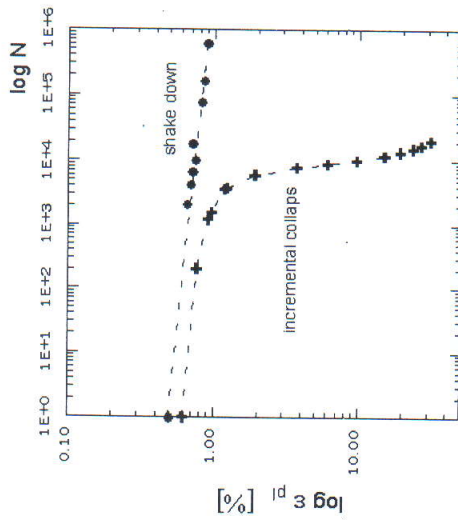


Bild 3.3: Shake Down (drainiert) und incremental collaps (undrainiert) im $\log \epsilon_{p1} - \log N$ Diagramm einer teilgesättigten Sandprobe ($S_r = 0,75$)

3.4 Eigene Erfahrungen und Versuchstechnik

Zur Untersuchung der veränderlichen elastischen Materialparameter sowie der plastischen Langzeitverformungen von Schotter wurde am Fachgebiet Geotechnik der Universität Gh Kassel im Rahmen eines von der EU finanzierten Forschungsprojektes (Euroball II) ein zyklisches Triaxialgerät in Kombination mit einer Resonant-Column-Versuchseinrichtung (CTRC - Combined Triaxial Resonant Column Test Device) entwickelt, siehe Bild 3.4. Diese kombinierte Versuchstechnik wurde nach unserem Kenntnisstand bisher noch nicht angewendet.

Die Kombination des zyklischen Triaxialversuches (Langzeitverhalten) mit der Resonant-Column Technik erlaubt die experimentelle Ermittlung der veränderlichen elastischen Kurzzeitparameter versus Zyklenzahl, was durch das Anhalten der zyklischen Dauerbelastung und Aktivierung der Resonant-Column Versuchsphase realisiert wird. Damit ist eine Ausführung der Versuche möglich, ohne das die Auswirkungen der vorgegangenen zyklischen Dauerbelastungen verfälscht wird - anisotrope Vorbelastung. Somit läßt sich neben den plastischen Verformungen auch die Entwicklung der Kurzzeitparameter über die Belastungsgeschichte verfolgen.

Die Probeabmessungen für die kombinierten zyklisch-dynamischen- Versuche ($d = 0,5$ m, $h = 1,0$ m) ermöglichen die Untersuchung von Körnungslinien wie die des Gleisschotters entsprechend den Lieferbedingungen der DB AG. Eine ausführliche Beschreibung der kombinierten Versuchsstandes ist in *Gotschol et al. (2000)* zu finden

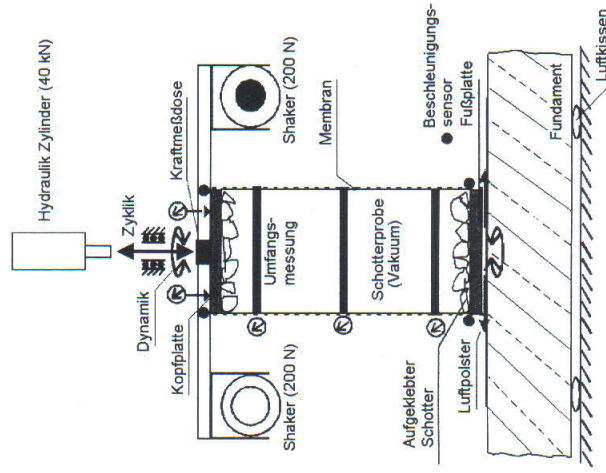


Bild 3.4: Schematische Darstellung des CTCRC- Versuchsstandes;

Nachfolgend soll anhand der mit dem oben beschriebenen CTCRC Versuchsstand durchgeführten ersten Versuchsreihen zyklischer und dynamischer Schotterversuche die verschiedenen Einflüsse auf das plastische und elastische Bodenverhalten skizziert werden. Bild 3.5 zeigt exemplarisch Meßergebnisse einer Schotterprobe aus Basalt (30/60) unter harmonischer Lastanregung. Es wird deutlich, daß neben der Lastzyklenzahl die Porenzahl einen maßgeblichen Einfluß auf die veränderlichen elastischen Materialparameter

sowie auf das plastische Langzeitverhalten besitzt. Je nach Ausgangsdichte ρ_a der Probe und damit der Ausgangsporenzahl e_a kommt es nach Belastungsbeginn zu einer deutlichen Volumenvergrößerung bzw. Verkleinerung (Dilatanz - Kontraktanz). Unabhängig vom Ausgangszustand zeigen ab einer gewissen Zyklenzahl alle Proben ein leicht kontraktantes Verhalten. Betrachtet man die elastischen Parameter Elastizitäts- und Schubmodul sowie die Dämpfung parallel zum Volumenverhalten, so ist hier erwartungsgemäß eine vom Volumenverhalten abhängige Entwicklung zu sehen, siehe Bild 3.6. Bis zu der Zyklenzahl von ca. $N = 10^3$ kommt es je nach Ausgangszustand zu einer Zu- oder Abnahme der Steifigkeit. Anschließend ist eine kontinuierliche Zunahme der Steifigkeit festzustellen. Güttler (1984) stellte bei seinen zyklischen Triaxialversuchen an Schlacke und Kiesmaterial ein ähnliches Verhalten fest, siehe Bild 3.1, und unterteilte das zyklischen abhängige Materialverhalten in eine 1. und 2. Phase. Die Abgrenzung der Phasen stellte Güttler (1984) wie in Abschnitt 3.2 beschrieben bei ca. 100 Lastzyklen fest.

Es ist anzunehmen, daß zu diesem Belastungszeitpunkt (Übergang Phase 1 zu Phase 2) die Probe eine von den Randbedingungen markante Porenzahl einnimmt. Diesen Zustand bezeichnen wir als „Pseudokritischen Zustand“. Die dazugehörige Porenzahl als „Pseudokritische Porenzahl“ e_{pk} . Je nach Ausgangsporenzahl kommt es durch Kornumlagerungen bis zum Erreichen der pseudokritischen Porenzahl zu kontraktantem oder dilatantem Verhalten. Ist der pseudokritische Zustand erreicht tritt eine kontinuierliche Verfestigung der Probe ein. Vergleich hierzu auch Bild 3.1.

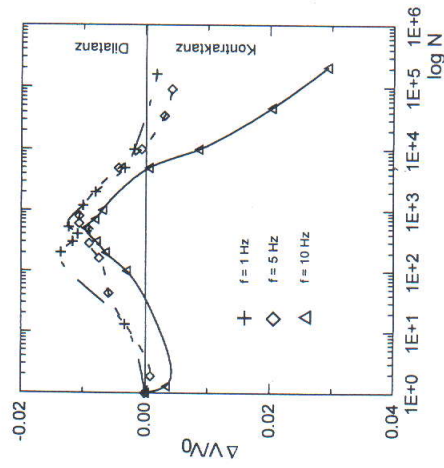


Bild 3.5: Volumenverhalten einer Schotterprobe bei verschiedenen Belastungsfrequenzen in Abhängigkeit der Zyklenzahl, σ_3 und ρ_0 konstant

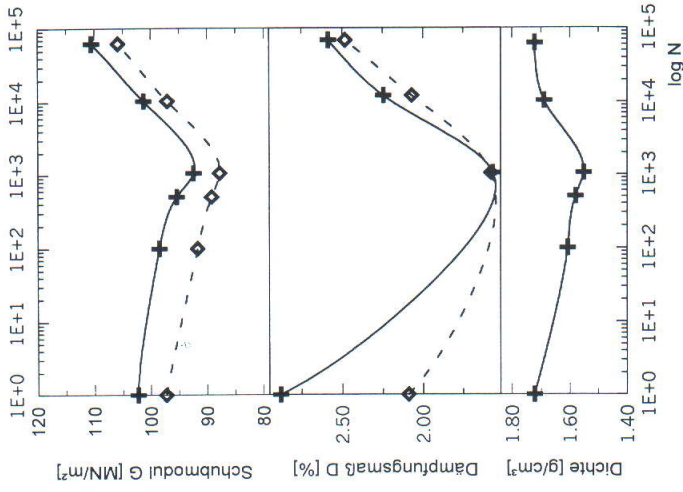


Bild 3.6: Schubmodul und Dämpfung unter Berücksichtigung des zyklischen abhängigen Volumenverhaltens

In Bild 3.7 ist der Einfluß der Belastungsfrequenz auf das plastische Dehnungsverhalten (Stauchung) abgebildet. Mit zunehmender Belastungsfrequenz und ansonsten gleichen Versuchsrandbedingungen steigen die bleibenden Stauchungsanteile der Probe nach den ersten Lastwechseln. Dieses Verhalten deckt sich mit den Erfahrungen aus der Verdichtungspraxis, bei der durch die Zunahme der Verdichtungsfrequenz die Reibungskräfte zwischen den Schotterkörnern herabgesetzt wird. Das Ergebnis ist eine Strukturänderung des granularen Haufwerkes infolge Kornumlagerung.

Im weiteren Verlauf der plastischen Stauchung ist die Abnahme des Kurvenanstieges bei höheren Frequenzen zu sehen (Bild 3.7). Das bedeutet das die plastischen Inkremente bei höheren Frequenzen kleiner sind.

$$m_1 > m_5 > m_{10} \quad (3.1)$$

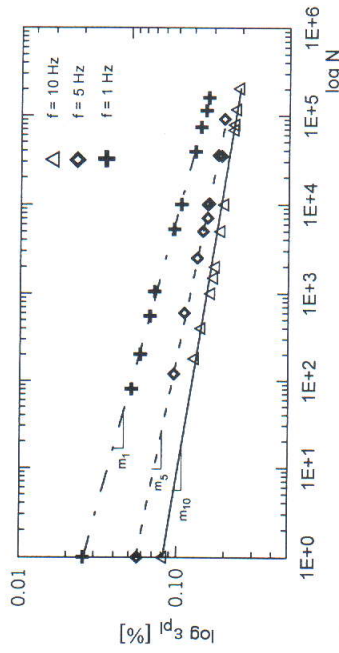


Bild 3.7: Frequenzeinfluss auf plastisches Langzeitverhalten

4 Ausblick

Mit dem in diesem Manuskript vorgestellten neuentwickelten CTCRC - Versuchsgerät kann erstmals eine kombinierte Untersuchung von lastzyklenabhängigen dynamischen Materialparametern und plastischem Verformungsverhalten an ein und der selben Probe durchgeführt werden.

Erste Ergebnisse zum plastischen Verhalten versprechen einen Erkenntnisfortschritt zur Beschreibung des stofflichen Materialverhaltens granularer Böden und Schotter unter zyklischer Last. Die veränderlichen Materialparameter können wie oben angedeutet ohne Verfälschung der Belastungshistorie bestimmt und in Bezug auf die Belastungsrandbedingungen gebracht werden.

Besonderer Augenmerk soll bei weiteren Untersuchungen auch praktischen Fragestellungen gegeben werden. Zu nennen sind z.B. sogenannte Geburtsfehler am Schotteroberbau, siehe *Lichtenberger (1999)*, die den ersten Untersuchungen mit dem CTCRC zufolge in engen Zusammenhang mit der Entwicklung des E Moduls, der Einbaudichte und der Zyklenzahl stehen. Zu zitieren ist hier der Forschungsbericht des *ORE Frage D161 (1987)* „Die Qualität eines Gleises während seiner gesamten Lebensdauer scheint also direkt vom Anfangsniveau nach Gleisverlegung und der ersten Zeit danach abhängen“.

5 Literatur

- Diyaljee, V. A. / Raymond, G. P. (1982)*: Repetitive Load Deformation of Cohesionless Soil, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, No. GT10, Okt., 1982, pp 1215-1229
- Gotschol, A. / Kempfert, H.-G. / Stöcker, T. / Meyer, R. (2000)*: Bodendynamisches Versuchsgerät zur kombinierten Bestimmung zyklischer und dynamischer Kenngrößen für Granulare Böden und Schotter, zur Veröffentlichung eingereicht, voraussichtlich in Geotechnik Heft 1/2000
- Gudehus, G. (1995)*: Stoffgesetze, in Grundbautaschenbuch, Teil 1, Auflage 5, Ernst & Sohn Verlag
- Güttler, U. (1984)*: Beurteilung des Steifigkeits- und Nachverdichtungsverhaltens von ungebundenen Mineralstoffen, Schriftenreihe des Institutes für Grundbau Wasserwesen und Verkehrswesen Ruhr- Universität Bochum, Heft 8
- Hettler, A. (1987)*: Schottertriaxialversuche mit statischem und zyklischem Belastungsverlauf, ETR 36.
- Hu, Y. (1999)*: Zum Verformungsverhalten von wassergesättigten, bindigen Böden unter zyklischer Belastung, Veröffentlichung des Fachgebietes Geotechnik der Universität Gh Kassel, Heft 8, Habilitationsschrift
- Kempfert, H.-G. / Hu, Y. (1999 a)*: Numerical modeling of the deformation in railway foundation - a case study, Numerical Models in Geomechanics - NUMOG VII, *Pandé, Pietruszczak & Schweiger (eds)*, Balkema Verlag, Rotterdam,
- Kempfert, H.-G. / Hu, Y. (1999 b)*: Unterbau- und Untergrundbeanspruchung infolge Eisenbahnverkehrslasten sowie Langzeitverhalten von gering tragfähigen Böden, 2. Zwischenbericht, DFG - Schwerpunktprogramm Systemdynamik und Langzeitverhalten von Fahrwerk, Gleis und Untergrund, unveröffentlicht
- Kuribayashi, E. / Iwasaki, T. / Tatsuoka, F. (1975)*: Effects of Stress-Strain Conditions on Dynamic Properties of Sand, Proceeding JSCE, No. 242
- Lentz, R. W., Baladi, G. Y. (1980)*: 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
- Lichtenberger, B. (1999)*: Praxis der Verdichtung, Stabilisierung und Homogenisierung des Schotteroberbaues, IFV - Symposium Schotteroberbau, Berlin 1999
- ORE Frage D161 (1987)*: Dynamische Erscheinungen der Wechselwirkung Fahrzeug/Gleis aus der Sicht der Gleisunterhaltung, Bericht Nr. 1, Utrecht, 4' 1987
- Prange, B. (1981)*: Resonant Column Test of Railroad Ballast, Proceedings of the X International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol., pp. 273-278

Shenton M. J. (1978): Deformation of railway ballast under repeated loading conditions, *Railroad track Mechanics and Technology*, Pergamon Press

Woods, R. D. (1978): Parameters Affecting Elastic Properties, *Proceeding dynamical Methods in Soil and Rock Mechanik*, Vol 1, Balkema, Rotterdam