

Verhalten von Bodengewölben unter ruhender und nichtruhender Belastung

C. Heitz, H.-G. Kempfert
Institute of Geotechnique, University of Kassel, Germany

ABSTRACT

In der geotechnischen Anwendungspraxis wird das Phänomen der Bodengewölbeausbildung z.B. beim Tragsystem „geokunststoffbewehrte Erdschichten über pfahlartigen Tragelementen“ konstruktiv genutzt. Während über das Tragverhalten dieses Systems unter statischen Einwirkungen abgesicherte Erkenntnisse vorliegen, kann das Verhalten unter zyklischen Beanspruchungen noch nicht zuverlässig vorhergesagt werden. Ungünstige Geometrien und zyklische Belastungsrandbedingungen können zu einer Gewölbereduktion führen. Der Beitrag gibt eine kurze Einführung in die derzeit existierenden analytischen Gewölbemodelle. Des Weiteren wird auf die am Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel durchgeführten großmaßstäblichen Modellversuche zur Untersuchung der Beeinflussung der Gewölbeausbildung durch zyklische Lasten eingegangen. Erste Versuchsergebnisse werden dargestellt.

Keywords: Bodengewölbe, zyklische Belastung, Modellversuche, Geokunststoffe

1 EINLEITUNG

Die Druckgewölbeausbildung innerhalb eines granularen Materials ist ein bekanntes Phänomen. Bezeichnet wird hiermit ein Lastabtragungsmechanismus, bei dem es innerhalb eines Erdkörpers z.B. infolge unterschiedlicher Aufstandsteifigkeiten und lokaler Setzungsdifferenzen zu gewölbförmigen Spannungsumlagerungen kommt. In der geotechnischen Anwendungspraxis wird dieses Bodenverhalten oft konstruktiv genutzt. Anwendungsfälle sind z.B. Bauwerke, die auf geokunststoffbewehrten Erdschichten über pfahlartigen Tragelementen (GEP-Tragsysteme) gegründet sind sowie Systeme zur Erdfallüberbrückung. Die weiteren Ausführungen beziehen sich hauptsächlich auf GEP-Tragsysteme. Mögliche Ausführungsformen sind in Bild 1 dargestellt.

Bei einem GEP-Tragsystem wird durch die Einbringung von pfahl- oder wandartigen Gründungselementen in den anstehenden setzungsempfindlichen Untergrund eine künstliche Gründungsebene auf Höhe der Oberkante der setzungsempfindlichen Schicht hergestellt. Die Gründungselemente reichen dabei bis in eine tiefere tragfähigere Bodenschicht. Oberhalb der Gründungsebene wird eine geokunststoffbewehrte Erd-

schicht aufgebracht und auf dieser schließlich das Bauwerk errichtet.

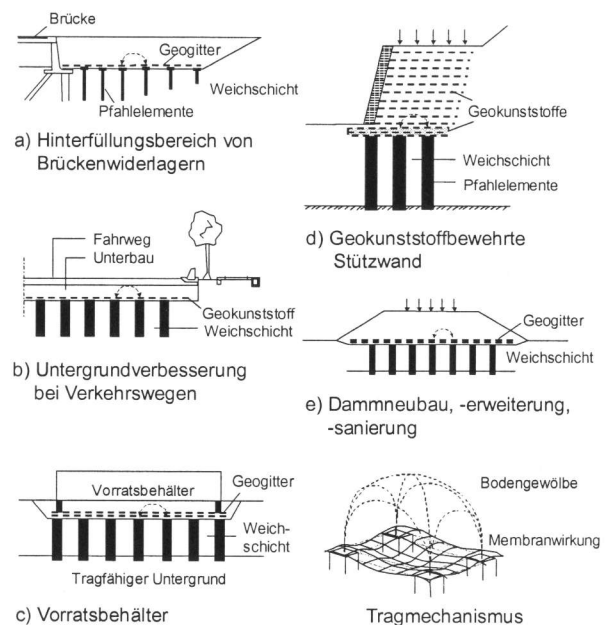


Bild 1. Ausführungsformen von GEP-Tragsystemen.

Von den starren Auflagern (Pfahlköpfe) beginnend bilden sich Bodengewölbe aus, die die weichen Zwischenbereiche überspannen und ober-

halb befindliche Lasten überproportional in die pfahlartigen Gründungselemente und von dort in den tragfähigen Untergrund einleiten. Die horizontalen Geokunststofflagen stabilisieren dabei das Tragsystem zusätzlich, überspannen membranartig die Pfahlköpfe und nehmen die noch verbliebenen vertikalen Spannungen in den Pfahlzwischenbereichen auf, siehe Bild 2.

Insbesondere im Eisenbahnbau hat sich diese Bauweise als gründungsverbessernde Maßnahme etabliert und wird vermehrt zur Ertüchtigung von gering tragfähigem oder setzungsempfindlichem Untergrund eingesetzt.

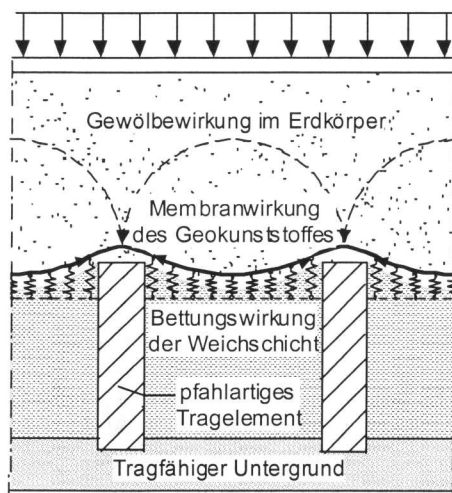


Bild 2. Tragmechanismen bei statischer Belastung.

Während über das Tragverhalten dieser Verbundkonstruktion unter statischen Einwirkungen abgesicherte Erkenntnisse vorliegen, kann das Systemverhalten unter zyklischen Beanspruchungen noch nicht zuverlässig vorhergesagt werden. In der Ausführungspraxis kommen GEP-Systeme vornehmlich im Verkehrswegebau zur Anwendung. Hier sind insbesondere nicht ruhende Beanspruchungen (z.B. aus Verkehrslasten) wirksam, die das Gewölbetragsverhalten maßgeblich verändern können.

Die nachfolgenden Abschnitte geben einen Überblick über die derzeit existierenden analytischen Gewölbemodelle aus dem Bereich der GEP-Tragsysteme. Des Weiteren wird auf die am Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel durchgeführten großmaßstäblichen Modellversuche zur Untersuchung der Beeinflussung der Gewölbeausbildung durch zyklische Lasten eingegangen und ein erster Einblick in die gewonnenen Versuchsergebnisse gegeben.

2 ANALYTISCHE GEWÖLBEANSÄTZE FÜR STATISCHE LASTENZUSTÄNDE

In der Literatur findet man eine große Anzahl von Berechnungsverfahren, mit denen die Gewölbeausbildung in punktförmig gelagerten Erdkörpern bzw. GEP-Tragsystemen berücksichtigt und die Einzelkomponenten der Konstruktion (Pfahlelement / Geokunststoffbewehrung) bemessen werden können.

Die bislang meist verbreitete Bemessungspraxis in Deutschland war, mit dem Gewölbemodell nach Hewlett et al. (1988) oder BS 8006 (1995) die vertikale Spannung auf die horizontale Bewehrung oberhalb der Pfahlelemente zu bestimmen und mit dem klassischen Seilstatikansatz, z.B. nach Kempfert et al. (1997) die Dehnung im Geokunststoff zu ermitteln. Ein neueres Verfahren, basierend auf den Untersuchungen von Zaeske (2001), wird derzeit in einen Empfehlungstext der DGGT (Empfehlung 6.9, 2004) eingearbeitet und soll künftig deutschlandweit Gültigkeit besitzen. Das Gewölbemodell nach Zaeske (2001) ist differenzierter und liefert präzisere Ergebnisse. Darüber hinaus erlaubt der entwickelte Membranansatz auch eine Berücksichtigung der Bettungswirkung der Weichschicht.

Weitere Gewölbeansätze finden sich darüber hinaus in Terzaghi (1943), Guido et al. (1987), Carlson (1987), Russel et al. (1997), Kolymbas (1998) und Svano (2000).

In Bild 3 sind vier ausgewählte analytische Gewölbeansätze den in Modellversuchen gewonnenen Erddruckmesswerten gegenübergestellt.

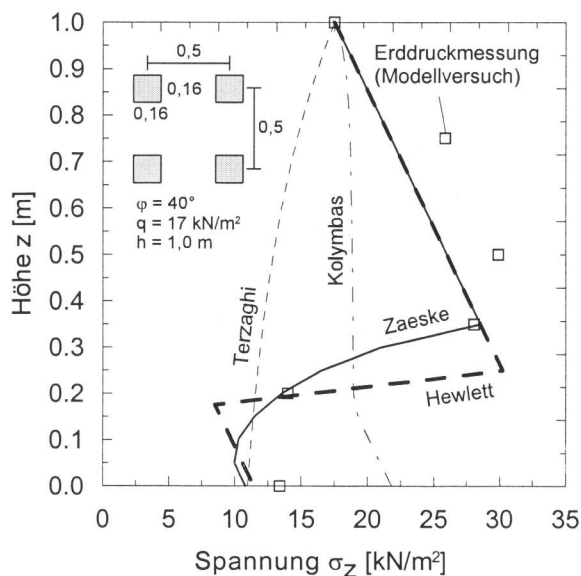


Bild 3. Exemplarischer Vergleich ausgewählter Gewölbeansätze mit Versuchsergebnissen.

Im Vergleich zu den statischen Modellversuchen liefern insbesondere die Verfahren nach Hewlett et al. (1988) und Zaeske (2001) realitätsnahe Ergebnisse.

Alle derzeit existierenden analytischen Gewölbemodelle basieren entweder auf der Annahme eines statischen Lastzustandes oder sind empirisch aus statischen Modellversuchen abgeleitet. In der Praxis kommen GEP-Tragsysteme vornehmlich im Verkehrswegebau zur Anwendung. Hier unterliegt das Bauwerk insbesondere nicht-ruhenden Beanspruchungen, z.B. in Form wiederholter Zugüberfahrten. Diese nicht-ruhenden Lasten werden derzeit in der Bemessung auf der Einwirkungsseite pauschal durch eine erhöhte statische Ersatzlast berücksichtigt.

Da ein Nachlassen der Gewölbewirkung unter nicht-ruhender Belastung in Laborversuchen bereits beobachtet werden konnte, siehe Zaeske (2001) und Schwerdt (2005), ist es fraglich, ob mit der bisherigen quasi-statischen Bemessungsvorgehensweise die tatsächliche zyklisch-dynamische Beanspruchung erfasst werden kann. Insbesondere auch deswegen, weil die Anwendung des Gewölbetrageprinzips unter nicht-ruhenden Lasten in Frage steht.

3 GEWÖLBEAUSBILDUNG UNTER ZYKLISCH-DYNAMISCHEN LASTEN

3.1 Allgemeines

Bild 4 verdeutlicht die möglichen Folgen einer nicht-ruhenden Belastung innerhalb eines GEP-Systems.

Ungünstige zyklische Belastungsrandbedingungen und Systemgeometrien können zu einer Gewölbereduktion und einer Ausbildung von Scherzonen führen. Das geokunststoffbewehrte Bodenpaket stanzt sich von oben in die Pfahlelemente ein. Erhöhte Geokunststoffzugkräfte und große Oberflächensetzungen sind die Folge.

Zur wissenschaftlichen Absicherung wurden im Rahmen eines DFG-Forschungsprojektes am Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel großmaßstäbliche Modellversuche durchgeführt, in denen die Bodengewölbeausbildung unter ruhenden und nicht-ruhenden Beanspruchungen exemplarisch für eine GEP-Dammkonstruktion untersucht wurden. Ziel der Modellversuche war die Identifizierung und Quantifizierung der Haupteinflussgrößen, die zu einer Gewölberückbildung führen können.

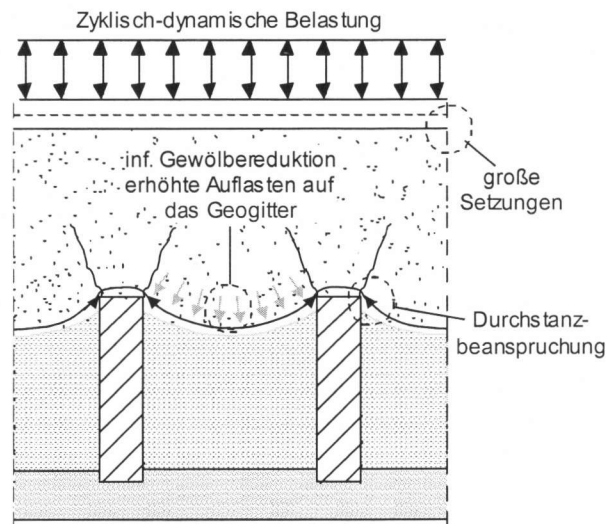


Bild 4. Mögliche Auswirkungen einer nicht-ruhenden Beanspruchung bei GEP-Tragsystemen, Heitz (2006).

3.2 Zyklische Modellversuche und erste Versuchsergebnisse

Als Grundlage für die Modellversuche wurde ein Verkehrsweg in Dammlage gewählt. Die maßgebliche zyklisch-dynamische Beanspruchung in der GEP-Dammkonstruktion tritt vertikal unterhalb des Lasteinleitungsbereiches (Fahrbahn) auf und nimmt infolge von Spannungsausbreitung und Dämpfungseffekten innerhalb des Dammkörpers über die Tiefe und zur Systemaußenseite hin deutlich ab. Das Gesamtsystem wurde darum in zwei Teilbereiche unterteilt, die in zwei großmaßstäblichen Modellversuchsständen (Maßstab 1:3) nachgebildet wurden.

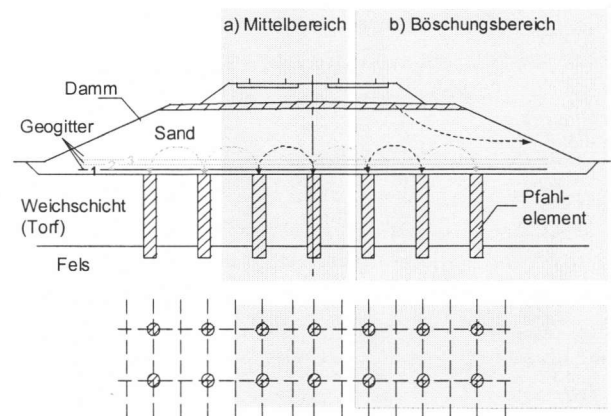


Bild 5. Untersuchte Teilbereiche einer GEP-Dammkonstruktion, Heitz (2006).

Modellversuchsstand M1 untersucht die uneinflusste Gewölbeausbildung im Systemmittelbereich, in dem die Gewölbebeeinflussung infolge

nicht ruhender Lasten am größten ist. Für den Böschungsbereich wurde ein zweiter Modellversuchsstand M2 konzipiert. Die Ausbreitung der nicht ruhenden Beanspruchung innerhalb der Böschung steht hierbei im Vordergrund.

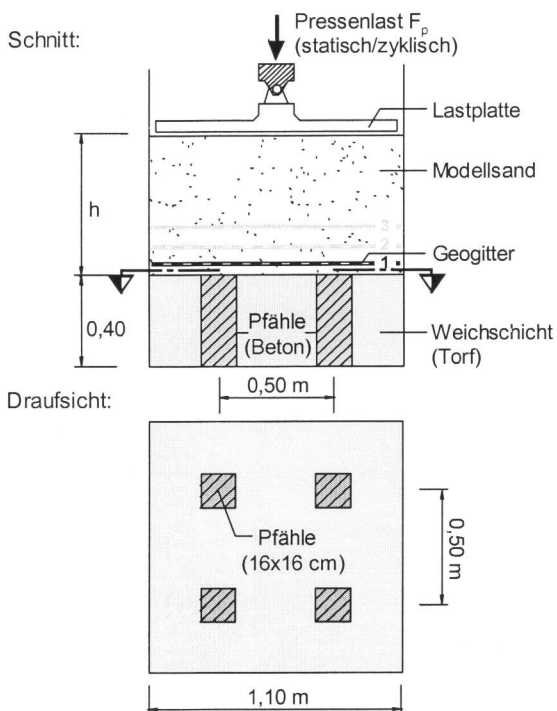


Bild 6. Modellversuchsstand M1, Heitz (2006).

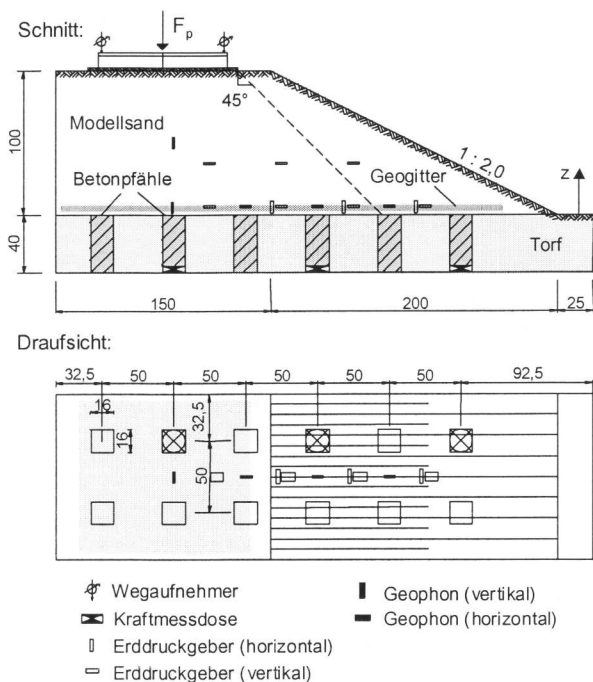


Bild 7. Modellversuchsstand M2, Heitz (2006).

In Bild 5 sind die beiden untersuchten Systembereiche schematisch dargestellt. Bild 6 und Bild

7 zeigen den Versuchsaufbau der beiden Modellversuchsstände sowie die eingebaute Messtechnik.

Für die zyklischen Modellversuche war es im Vorfeld der Versuche erforderlich, die zyklischen Belastungsrandbedingungen zu definieren. Neben der aufzubringenden Mittelspannung und Amplitude der zyklischen Belastung waren die Belastungsfrequenz und die Versuchsdauer sowie die Belastungsabfolge realitätsnah festzulegen. Aufgrund der häufigen Anwendung von GEP-Dammkonstruktionen im Eisenbahnbau und der hier infolge des Eisenbahnverkehrs i.d.R. großen dynamischen Beanspruchungen des Unterbaus wurden die Modellversuche mit zyklischen Belastungsgrößen durchgeführt, die am Eisenbahnbau orientiert sind.

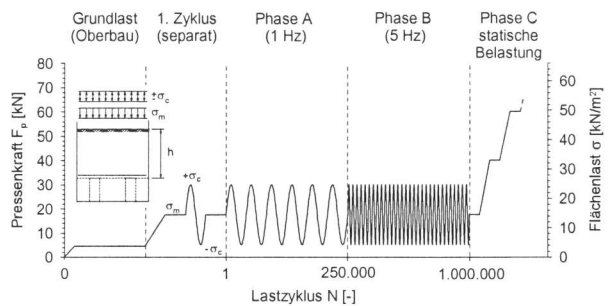


Bild 8. Belastungsablauf für die zyklischen Modellversuche (Belastungsschema II - Langzeitbetrachtung).

Bild 8 zeigt exemplarisch das vorwiegend zur Anwendung gekommene dreiphasige Belastungsschema. Die Belastungsgrößen wurden dabei im Maßstab des Modellversuchsstandes verkleinert. Insgesamt wurden in den Modellversuchen für Versuchsstand M1 folgende Parameter variiert:

- Art der Beanspruchung (ruhend/nicht ruhend),
- Lastintensität (Amplitude $\sigma_c = \pm 5 / \pm 10 / \pm 20$ kN/m², Mittelstellung $\sigma_m = 17 / 50$ kN/m²),
- Frequenz ($f = 1 / 5 / 10$ Hz),
- Überdeckungshöhe ($h = 0,35 / 0,70 / 1,00$ m),
- Geogittertyp (PET / PVA) und
- Anzahl der Geogitterlagen ($n = 0 / 1 / 2 / 3$).

4 ERSTE VERSUCHSERGEBNISSE

Die nachfolgend dargestellten, ausgewählten Versuchsergebnisse beschränken sich auf Modellversuchsstand M1 und sollen die bereits angesprochenen Folgen (Bild 4) einer nicht ruhenden Belastung für ein GEP-Tragsystem verdeutlichen.

Bild 9 zeigt die gemessenen vertikalen Erddrücke oberhalb der Weichschicht während der zyk-

lischen Lastphasen A und B für die zyklischen Belastungsgrößen $\sigma_m = 17 \text{ kN/m}^2$ und $\sigma_c = \pm 10 \text{ kN/m}^2$. Die Erddrücke sind dabei für den Zeitpunkt des Mittelspannungsdurchganges ($\sigma_m = 17 \text{ kN/m}^2$ und $\sigma_c = 0 \text{ kN/m}^2$) dargestellt.

Es ist ein deutlicher Anstieg der vertikalen Spannungen über die Versuchsdauer zu verzeichnen. Zum Vergleich ist im Diagramm ein statischer Referenzwert eingetragen der sich für die gleiche Versuchsanordnung und eine rein statische Belastung ($\sigma_{\text{stat}} = 17 \text{ kN/m}^2$) ergab.

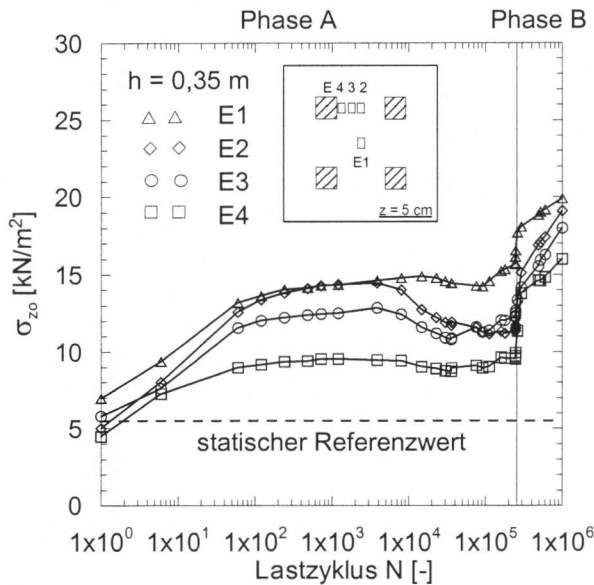


Bild 9. Vertikale Erddrücke oberhalb der Weichschicht während Phase A und B ($h = 0,35 \text{ m}$; 0 Geogitter).

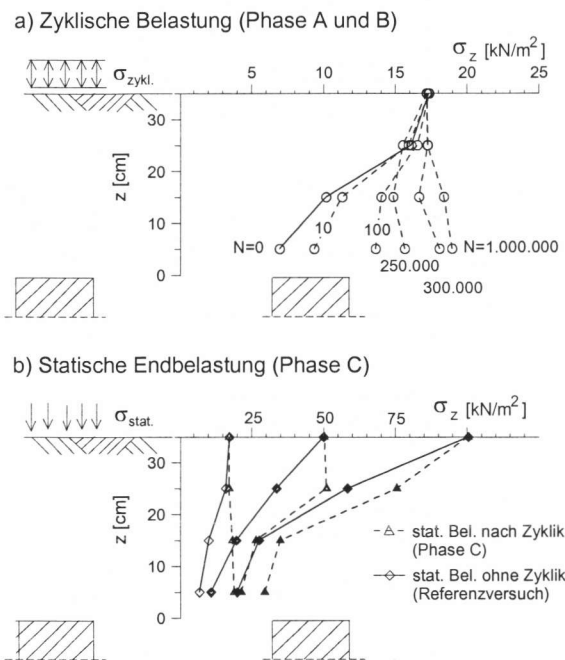


Bild 10. Vertikale Erddrücke in der Symmetrieachse ($h = 0,35 \text{ m}$; 0 Geogitter).

Bild 10 zeigt den Verlauf der vertikalen Erddrücke über die Höhe der mineralischen Schicht. Am Ende der zyklischen Belastung ($N = 1.000.000$ Lastzyklen) ähnelt die Erddruckverteilung etwa dem linearen Erddruckverlauf, siehe Bild 10a. Die Erddruckergebnisse beziehen sich auch hier auf den Zeitpunkt des Mittelspannungsdurchganges.

Nach Ende der zyklischen Belastung und Durchführung einer statischen Endbelastung (Phase C) wird eine erneute Spannungsumlagerung sichtbar, die aber hinter den Ergebnissen ohne zyklische Belastungsvorgeschichte zurückbleibt (Bild 10b). Zur Veranschaulichung sind auch hier wieder die Ergebnisse des rein statischen Referenzversuches ergänzend dargestellt.

Bei Anordnung einer einlagigen, tief liegenden Geokunststoffbewehrung ($z = 5 \text{ cm}$; Geogitter 60/60 PET) ist ein ähnlicher Anstieg der vertikalen Erddrücke oberhalb der Geokunststoffbewehrung über die Lastzyklenzahl festzustellen. Gleichzeitig ist zu bemerken, dass sich die Pfahlköpfe während der zyklischen Belastungsphase von unten in die geokunststoffbewehrte Schicht einstanzen. Die Dehnungen im Geokunststoff nehmen hierdurch signifikant zu, siehe Bild 11.

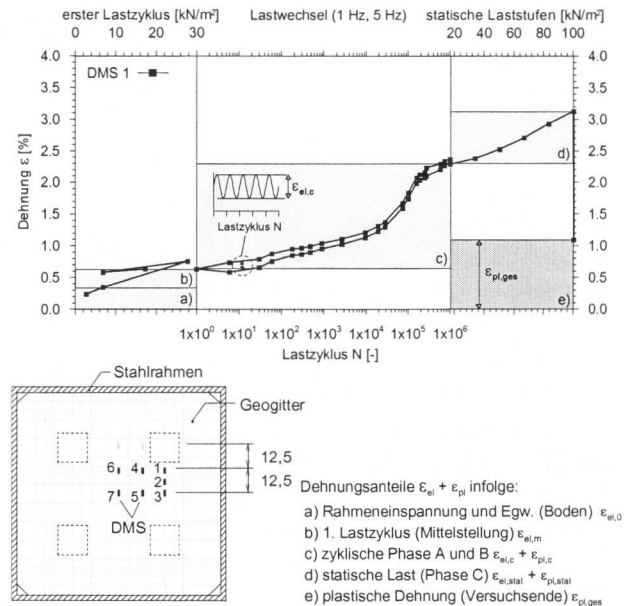


Bild 11. Geogitterdehnung im Pfahlkopfbereich ($h = 0,35 \text{ m}$; 1 Geogitter 60/60 PET).

Nach Ende des Versuches und Freilegung des Geogitters sind große plastische Einstanzenverformungen im Bereich der Pfahlköpfe zu erkennen. Die plastischen Verformungen führten zu einem bleibenden Geogitterdurchhang, der bis zu 50 %

der Gesamtsetzungen an der Versuchsoberfläche entsprach.

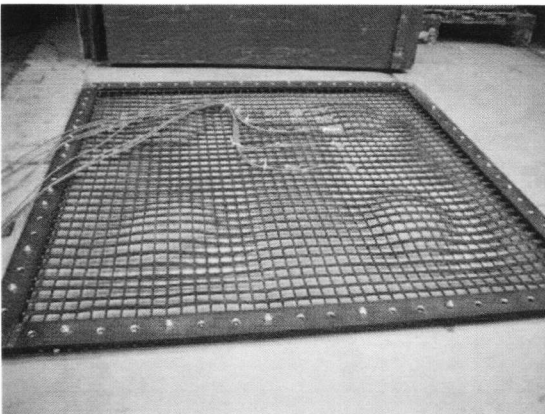
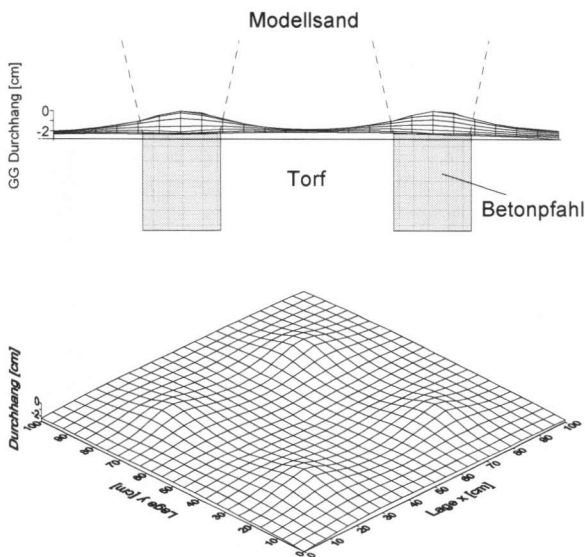


Bild 12. Plastische Verformungen nach Versuchsende und Freilegung des Geogitters ($h = 0,35$ m; 1 Geogitter 60/60 PET).

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In den ersten Versuchsreihen konnte eine Abhängigkeit der Gewölbereduktion von der Belastungsfrequenz, der Belastungsamplitude und der Überdeckungshöhe festgestellt werden. Insbesondere bei ungünstigen Systemgeometrien (kleines h/s -Verhältnis) und großen zyklisch-dynamischen Beanspruchungen (großes σ_c/σ_m -Verhältnis) ist eine Gewölberückbildung festzustellen, die mit erhöhten Setzungen und erhöhten Beanspruchungen der Einzelkomponenten (Pfahl, Geogitter) einhergeht. Mit Hilfe der derzeit vorhandenen analytischen Gewölbeansätze können diese Situationen bzw. Randbedingungen nur unzureichend abgebildet werden. Differenzierte Aussagen zur

Gewölbeausbildung in punktförmig gelagerten Erdkörpern unter nicht ruhender Belastung werden nach Abschluss der Auswertung aller Versuchsreihen möglich sein.

LITERATURVERZEICHNIS

- BS 8006, British Standards Institution: Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and Other Fills. London 1995.
- Empfehlung 6.9, Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern. Entwurf Juli 2004 – vorgesehen als Kapitel 6.9 für die Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO), 2004.
- V. Guido, Plate loading tests on geogrid-reinforced earth slabs. Proc. Geosynthetics '87 Conf., New Orleans, pp. 216-225, 1987.
- C. Heitz, Bodengewölbe über punktförmigen Traggliedern unter statischer und zyklisch-dynamischer Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungseinlagen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, in Vorbereitung, 2006.
- W.J. Hewlett, M.F. Randolph, M.I.E. Aust, Analysis of piled embankments. Ground Engineering Vol.21, pp. 12-17, 1988.
- H.-G. Kempfert, M. Stadel, D. Zaeske, D., Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen. Bautechnik 74, Heft 12, S. 818-825, 1997.
- D. Kolymbas, Geotechnik – Tunnelbau und Tunnelmechanik. Springer-Verlag, Berlin, 1998.
- D. Russel, N. Pierpoint, M. MacDonald, An assessment of design methods for piled embankments. Ground Engineering, pp. 39-44, Nov. 1997.
- S. Schwerdt, Untersuchungen zur Ableitung eines Bemessungsverfahrens für die Überbrückung von Erdrinbrüchen unter Verwendung von Geokunststoffbewehrungen. Schriftenreihe Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, Heft 4, 2004.
- G. Svano, T. Ilstad, G. Eiksund, A. Want, Alternativ calculation principle for design of piled embankments with base reinforcement. Proc. Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems, Helsinki, Building Information Ltd, pp. 541-548, 2000.
- K. Terzaghi, Stress Distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door. Proc. 1th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Mass., Harvard Univ., Vol. 1, pp. 307-311, 1943.
- D. Zaeske, Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel, Heft 10, 2001.



Slovensko geotehniško društvo

PROCEEDINGS OF THE XIIITH DANUBE-EUROPEAN CONFERENCE ON
GEOTECHNICAL ENGINEERING, 29-31 MAY, 2006, LJUBLJANA, SLOVENIA

ACTIVE GEOTECHNICAL DESIGN IN INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT

Volume 2: Papers

TAGUNGSBAND DER XIII. DONAU-EUROPÄISCHE KONFERENZ FÜR
GEOTECHNIK, 29.-31. MAI 2006, LJUBLJANA, SLOWENIEN

AKTIVE GEOTECHNISCHE PLANUNG IN DER INFRASTRUKTUR-ENTWICKLUNG

Band 2: Beiträge

Edited by

Janko Logar

University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia

Ana Gaberc

Slovenian Geotechnical Society, Ljubljana, Slovenia

Bojan Majes

University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering, Ljubljana, Slovenia

Ljubljana, 2006