

5. Geokunststoff-Kolloquium

Horizontalbewehrung über Pfählen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Dr.-Ing. Claas Heitz, Dr.-Ing. Berhane Gebreselassie
Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel



1. Einleitung

Das Verfahren „Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern“ ist zwischenzeitlich im Verkehrswegebau etabliert, siehe dazu *Kempfert et al. (1997)*, *Zaeske (2001)*, *Alexiew (2004)*, *Heitz (2006)*, und wurde auch in den Entwurf der Empfehlung für Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO) aufgenommen (*Empfehlung 6.9, 2006*). Im Empfehlungstext sind konstruktive Hinweise enthalten, die sich zunächst nur auf ein- oder zweilagige Bewehrungsführungen und überwiegend ruhende Belastungen beziehen.

Im Folgenden werden Versuchsergebnisse unter veränderlichen Lasten bei mehreren Bewehrungslagen sowie Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Produktstruktur dargestellt.

2. Großmaßstäbliche Modellversuche

Bild 1 zeigt den für die Modellversuche verwendeten Modellversuchsstand. Der Versuchstand bildet einen Rasterausschnitt bestehend aus vier Pfählen im Maßstab 1:3 ab. Neben Kraftmessungen in den Pfählen und Erddruckmessungen im Modellsand wurden die Dehnungsbeanspruchungen in den eingebauten Geokunststofflagen durch Dehnungsmessstreifen gemessen. An der Lastplatte angebrachte Setzungsmessuhren ermöglichten die Beurteilung des Verformungsverhaltens.

Die Modellversuche wurden mit zyklischen Belastungsgrößen durchgeführt, die am Eisenbahnbau orientiert und im Maßstab des Modellversuchsstandes verkleinert waren. Bild 2 zeigt das dreiphasige Belastungsschema. Die Mittelspannung beträgt $\sigma_m = 17 \text{ kN/m}^2$ und die Lastamplitude $\sigma_c = \pm 10 \text{ kN/m}^2$.

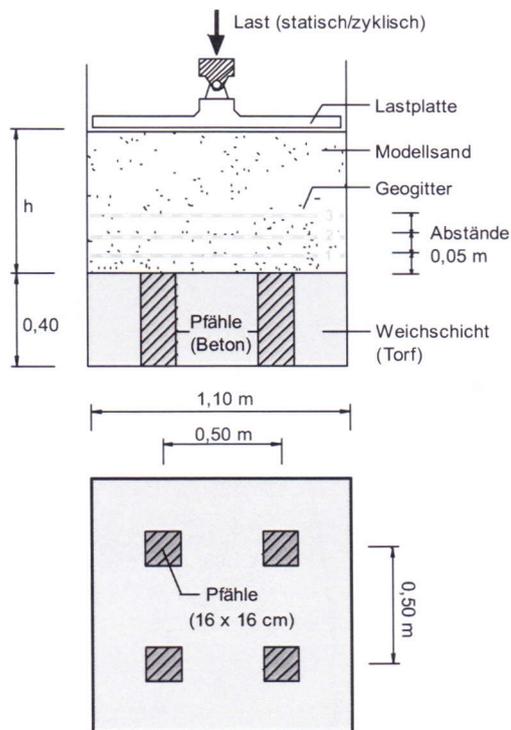


Bild 1: Ansicht, Draufsicht und Foto des Modellversuchsstandes

5. Geokunststoff-Kolloquium

Horizontalbewehrung über Pfählen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Dr.-Ing. Claas Heitz, Dr.-Ing. Berhane Gebreselassie
Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel

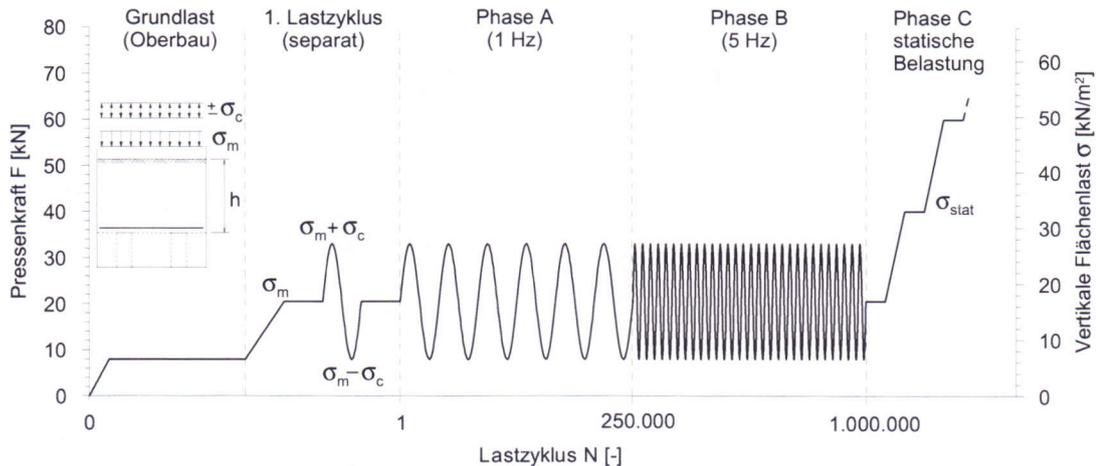


Bild 2: Belastungsablauf für die zyklischen Modellversuche

Untersucht wurden zwei Polyester-Geogittertypen „GW“ und „GL“ mit den Zugfestigkeiten 60 kN/m bzw. 30 kN/m. Bei Geogitter GW 60 PET handelt es sich um ein gezelegtes, biaxiales Geogitter aus gewebten Kunststoffäden, die durch eine Bitumenummantelung geschützt sind. Die einzelnen Längs- und Querstäbe sind an den Kreuzungspunkten miteinander verwebt und kraftschlüssig vernäht. Die Geogitter GL 60 PET bzw. GL 30 PET bestehen aus gereckten monolithischen Flachstäben mit Knotenpunktverschweißung. Im Gegensatz zum Typ GW weisen die Geogitter vom Typ GL eine größere Formstabilität auf, d.h. eine größere Biegesteifigkeit der Einzelstege und größere Steifigkeit der Knotenpunkte. Struktur und Abmessungen sind in Bild 3 exemplarisch dargestellt.

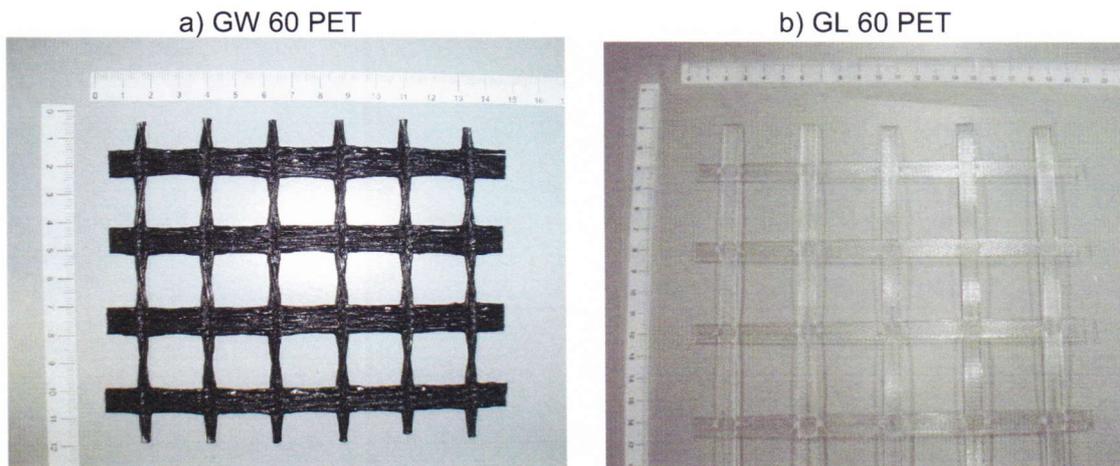


Bild 3: Struktur und Abmessungen der Geogitter GW 60 PET und GL 60 PET
Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf Versuche mit der Einbauhöhe $h = 0,35$ m, d.h. $h/s = 0,5$ nach *Empfehlung 6.9 (2006)*.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Allgemeines

Das Bauverfahren beruht auf einer Gewölbewirkung in den Bodenbereichen oberhalb der Pfahlköpfe und einer sich in den Geokunststofflagen einstellenden Membranlastabtragung. Eine nicht ruhende Belastung kann die Lastabtragung beeinflussen, siehe Bild 4. Ungünstige zyklische

5. Geokunststoff-Kolloquium

Horizontalbewehrung über Pfählen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Dr.-Ing. Claas Heitz, Dr.-Ing. Berhane Gebreselassie
Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel



Belastungsrandbedingungen und Systemgeometrien können zu einer Gewölberückbildung (erhöhte Spannungen auf die Weichschicht bzw. kleine Lastumlagerung auf die Pfahlelemente) und einer Ausbildung von Scherzonen führen. Das geokunststoffbewehrte Bodenpaket stanz sich dabei von oben in die Pfahlelemente ein. Erhöhte Geokunststoffzugkräfte und große Oberflächensetzungen sind die Folge, siehe auch *Heitz (2006)*.

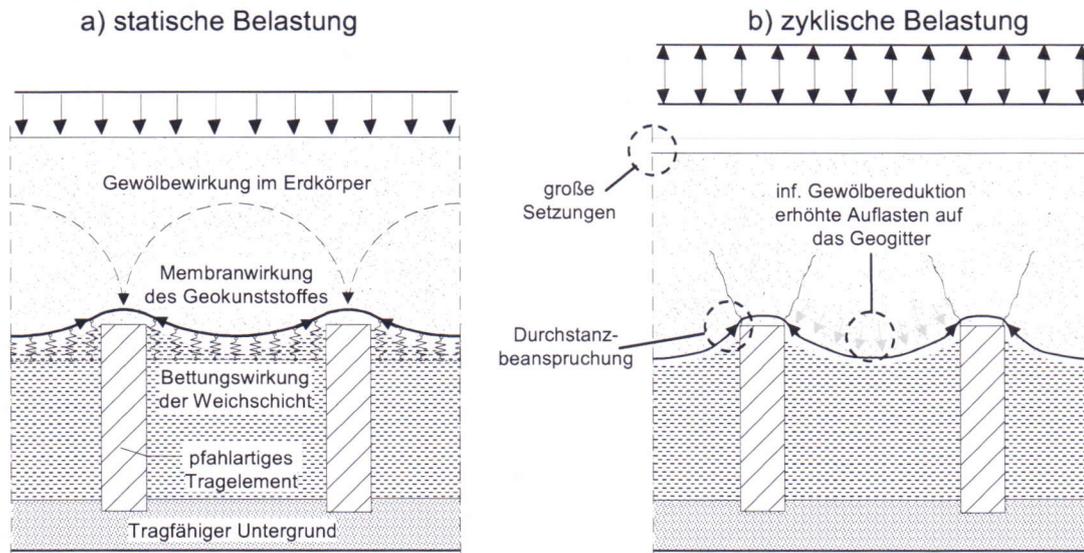


Bild 4: Mögliche Auswirkungen einer nicht ruhenden Beanspruchung, *Heitz (2006)*
Die beschriebenen Auswirkungen einer nicht ruhenden Beanspruchung sind in den nachfolgend dargestellten Versuchsergebnissen gezeigt.

3.2 Einfluss der Bewehrungslagen

Die Größe der Gewölberückbildung während einer zyklischen Belastung kann durch den Lastumlagerungswert E , der z.B. aus den Pfahlkräften abgeleitet wird, quantifiziert werden. Bild 5 zeigt den Lastumlagerungswert E während der zyklischen Lastphasen A und B für den unbewehrten Fall. Infolge der zyklischen Belastung verringert sich die Lastumlagerung von 76 % auf 39 %. Die Gewölberückbildung führt zu großen vertikalen Spannungen oberhalb der Weichschicht sowie zu Weichschichtverformungen, die bis zur Oberfläche durchschlagen und große Oberflächensetzungen zur Folge haben. Die Pfahlköpfe stanzen sich von unten in die mineralische Schicht ein.

5. Geokunststoff-Kolloquium

Horizontalbewehrung über Pfählen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Dr.-Ing. Claas Heitz, Dr.-Ing. Berhane Gebreselassie
 Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel

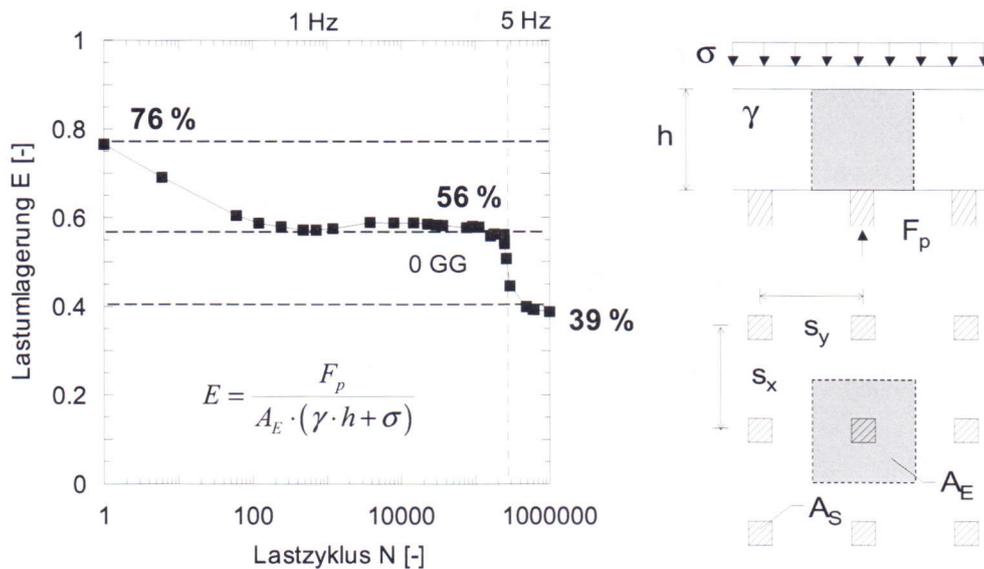


Bild 5: Lastumlagerungswert E während Zyklik (h = 0,35 m; 0 Geogitter)

Sind Geogitterlagen oberhalb der Pfahlköpfe eingelegt, so ist eine Stabilisierung des Systems festzustellen. Mit zunehmender Versuchsdauer behindern die Geogitter den Einstanzvorgang der Pfahlköpfe, es kommt zu einer zunehmenden Aktivierung des Membraneffektes und einer Aufnahme der vertikalen Spannungen durch die Geogitter. Die Lastumlagerung auf die Pfähle erhöht sich, siehe Bild 6a) dargestellt für ein bis drei Geogitterlagen vom Typ GW 60 PET.

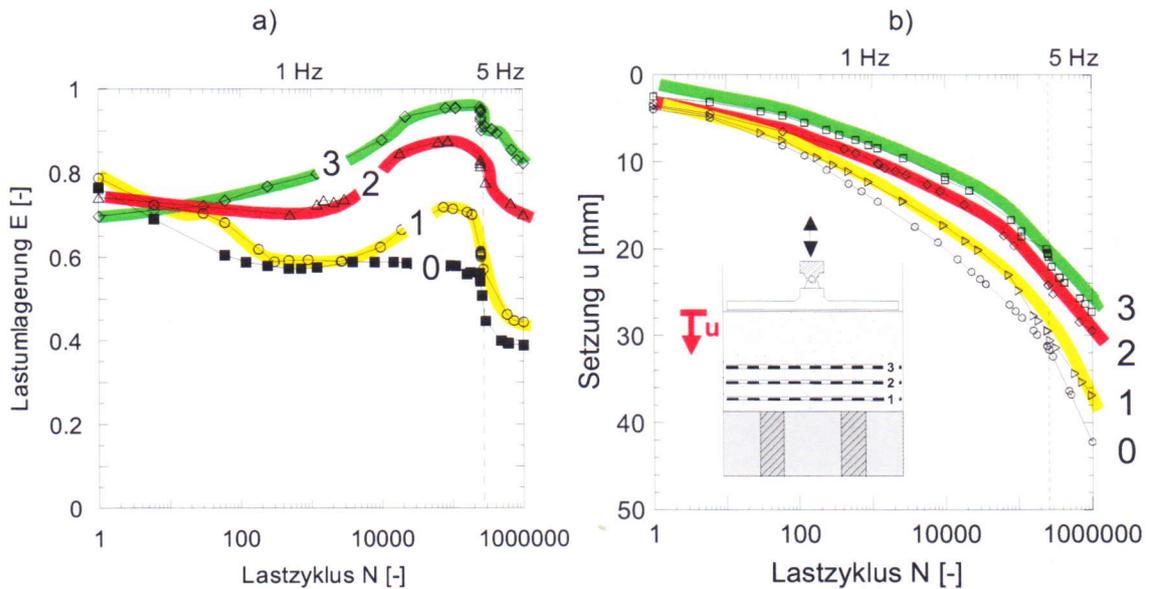


Bild 6: Lastumlagerungswert E (a) und Oberflächensetzung u (b) während Zyklik (h = 0,35 m; 0 bis 3 Geogitter GW 60 PET)

Durch die Systemstabilisierung verringern sich die Oberflächensetzungen, siehe Bild 6b). Insbesondere die ersten beiden tiefliegenden Geogitterlagen haben einen deutlichen setzungsreduzierenden Einfluss.

5. Geokunststoff-Kolloquium

Horizontalbewehrung über Pfählen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Dr.-Ing. Claas Heitz, Dr.-Ing. Berhane Gebreselassie
 Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel



Bild 7 zeigt exemplarisch die Wirkungsweise einer dreilagigen Bewehrungsführung. Die größten Dehnungen treten in der untersten Bewehrungslage auf. Mit zunehmender Höhenlage der Bewehrung nimmt die Beanspruchung und damit auch der Membraneffekt stark ab.

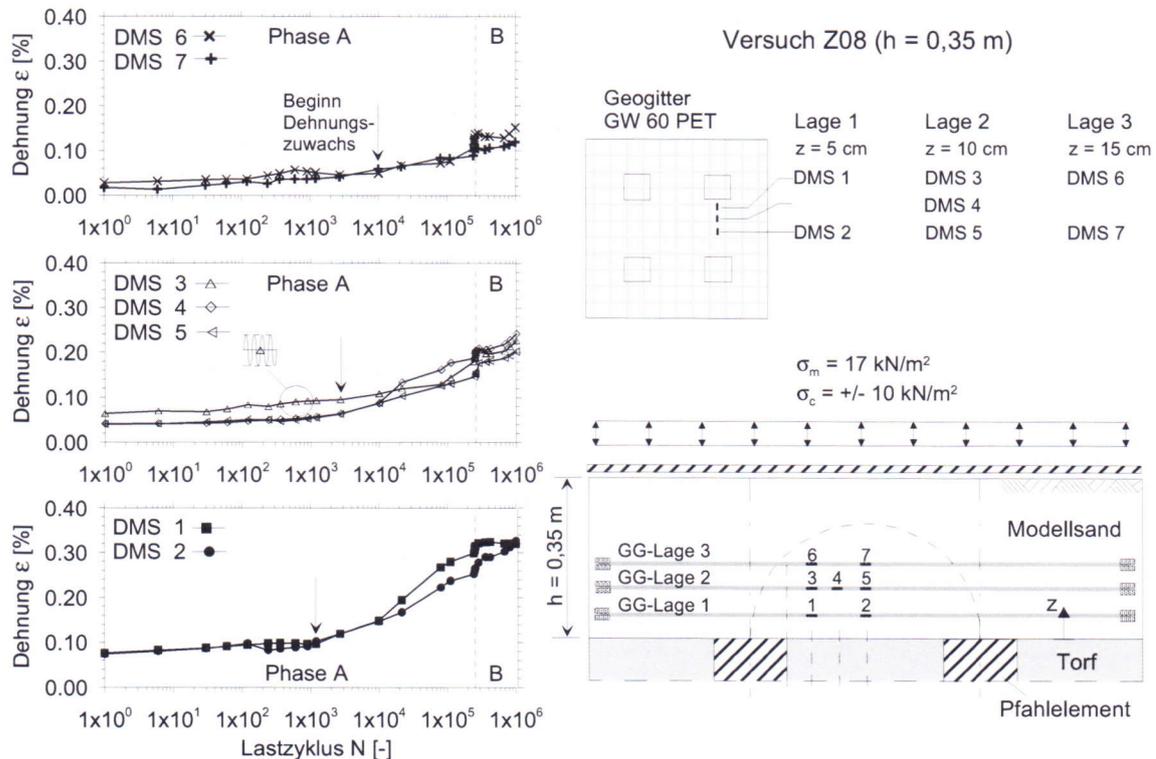


Bild 7: Geogitterdehnungen während Zykliek im Pfahlkopfzwischenbereich für verschiedene Höhenlagen (links) sowie Positionen der DMS (rechts) (h = 0,35 m; 3 Geogitter GW 60 PET)

Aus den Versuchen konnte ein konstantes Beanspruchungsverhältnis abgeleitet werden, das von den Annahmen nach *Empfehlung 6.9 (2006)* abweicht. Das festgestellte Beanspruchungsverhältnis ist unabhängig vom Geogittertyp und wurde in numerischen Vergleichsberechnungen (siehe *Heitz, 2006*) bestätigt. Die Beanspruchung der Geogitterlagen erfolgt (von unten nach oben) etwa im Verhältnis:

$F_{G,unten} : F_{G,oben} = 1 : 0,65$ bei zweilagiger Bewehrung,

$F_{G,unten} : F_{G,Mitte} : F_{G,oben} = 1 : 0,65 : 0,35$ bei dreilagiger Bewehrung

Allgemein konnte festgestellt werden, dass sich bei mehrlagiger Geogitteranordnung ein Strukturverbund zwischen Modellsand und Geogitter einstellt, der eine Lastumlagerung auf die Pfähle begünstigt und zu einer plattenartigen Lastabtragung führen kann.

3.3 Einfluss der Produktstruktur

Um einen direkten Vergleich zwischen den einzelnen Versuchskonfigurationen zu ermöglichen, sind die nachfolgenden Messergebnisse, mit Ausnahme der Pfahlkraftmessungen, auf den Zeitpunkt nach dem ersten Lastzyklus bezogen. D.h. bei den dargestellten Setzungs-, DMS- und Erddruckmessergebnissen handelt es sich um Zuwächse oder Abnahmen, die speziell während der zyklischen Lastphasen auftraten.

Bild 8 zeigt eine Gegenüberstellung der Setzungsmessungen bei ein- und mehrlagiger Anordnung der Geogitter GW 60 PET, GL 60 PET und GL 30 PET sowie für den unbewehrte Fall.

5. Geokunststoff-Kolloquium

Horizontalbewehrung über Pfählen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Dr.-Ing. Claas Heitz, Dr.-Ing. Berhane Gebreselassie
Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel

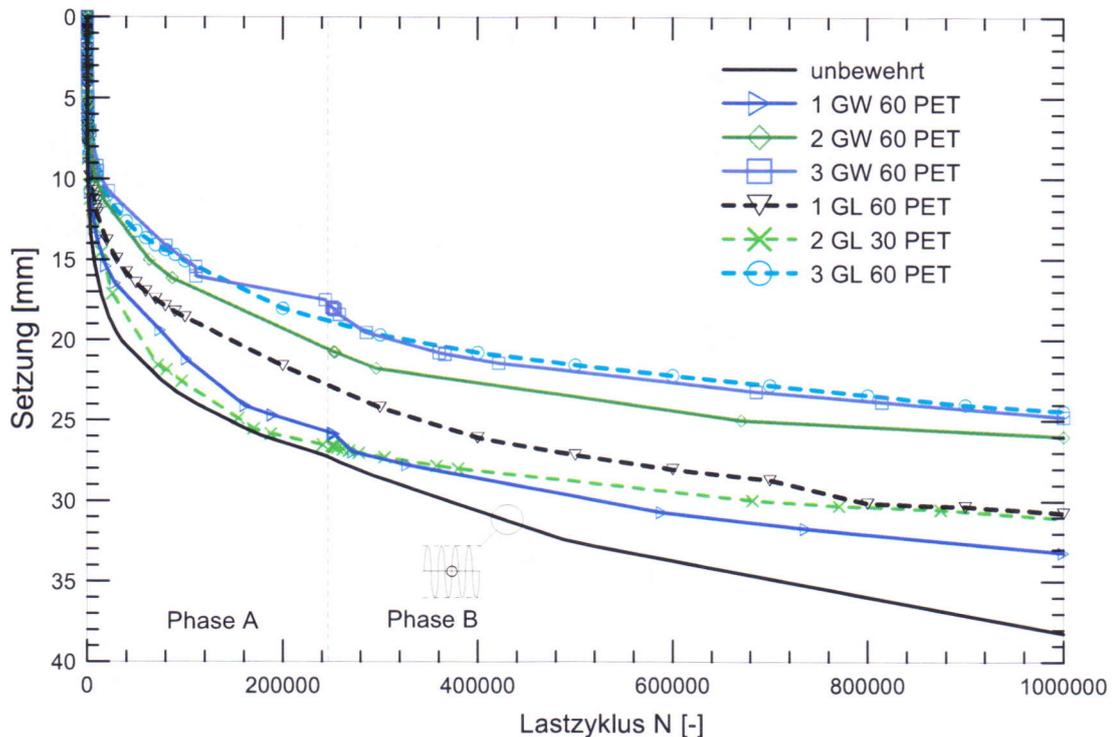


Bild 8: Oberflächensetzun während der zyklischen Belastung für verschiedene Versuchskonfigurationen

Mit zunehmender Geogitterlagenanzahl und erhöhter „verbauter“ Dehnsteifigkeit reduzieren sich die Systemsetzungen unter zyklischer Belastung. Gleiche Dehnsteifigkeit und eine Aufteilung auf mehrere Lagen führt hingegen zu einem ungünstigeren Systemverhalten. Für eine zweilagige Anordnung eines Geogitters vom Typ GL 30 PET sind große Anfangssetzungen festzustellen, die vermutlich auf das kleine Stegflächenverhältnis des Geogitters zurückzuführen sind. Da die Geometrie des Geogitters nicht auf den in den Modellversuchen verwendeten gleichkörnigen Modellsand abgestimmt war, ergab sich ein ungünstigeres Strukturverbundverhalten. Die Geometrie des Geogitters (Öffnungsweite und Stegflächenverhältnis) kann somit das Last-Verformungsverhalten beeinflussen.

Die Geogitter GL 60 PET und GW 60 PET zeigen bei ein- und dreilagiger Bewehrungsanordnung ein tendenziell gleichwertiges Verhalten.

In Bild 9 sind die gemessenen Pfahlkräfte sowie der äquivalente Lastumlagerungswert dargestellt. Mit zunehmender Geogitteranzahl und erhöhter, verbauter Dehnsteifigkeit steigt die Lastumlagerung auf die Pfähle an. Die Entlastung der Weichschicht erhöht sich ebenfalls erwartungsgemäß mit zunehmender verbauter Dehnsteifigkeit, siehe Bild 10. Im Gegensatz zur reinen Membranbeanspruchung bei einlagiger Bewehrungsanordnung und einfacher Dehnsteifigkeit führt die dreilagige Bewehrungsanordnung mit dreifacher Dehnsteifigkeit zu einer eher plattenartigen Lastabtragung.

5. Geokunststoff-Kolloquium

Horizontalbewehrung über Pfählen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Dr.-Ing. Claas Heitz, Dr.-Ing. Berhane Gebreselassie
 Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel

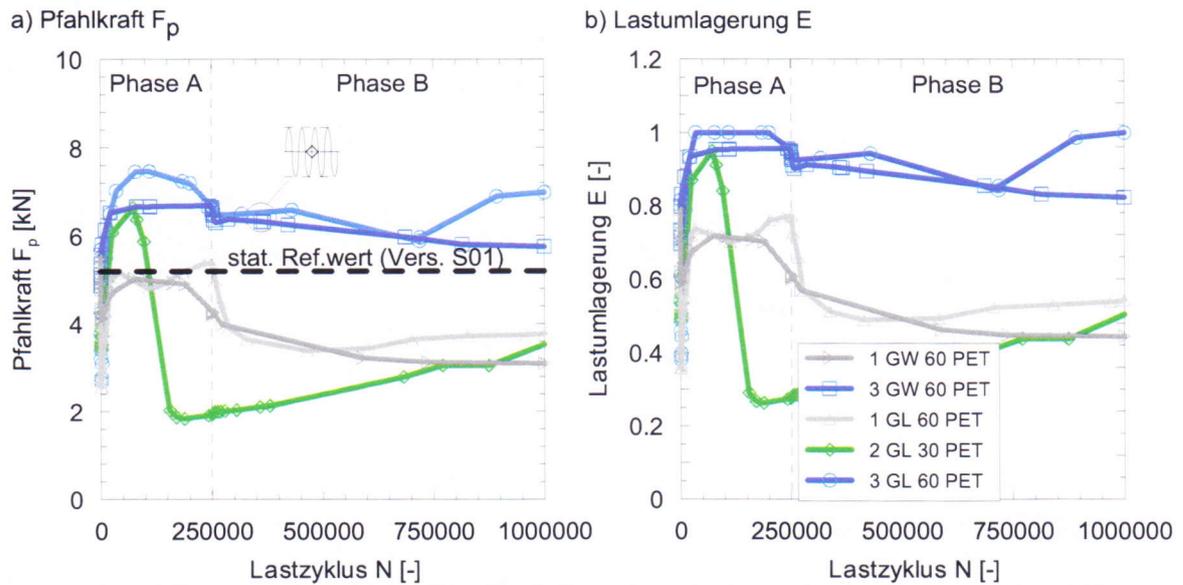


Bild 9: Gemessene mittlere Pfahlkraft F_p und äquivalenter Lastumlagerungswert E während Zyklis für verschiedene Versuchsconfigurations

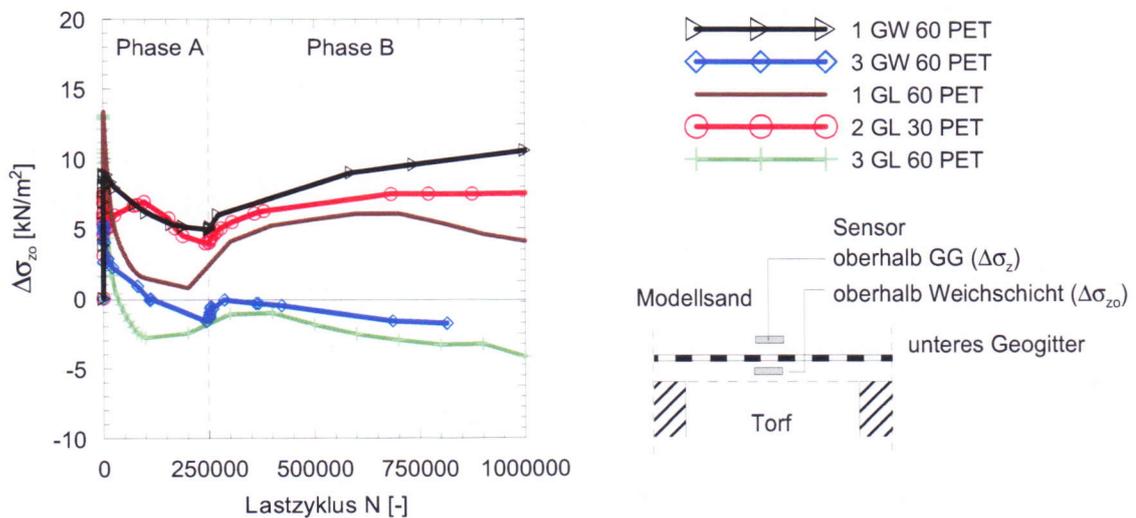


Bild 10: Spannungsanstieg unterhalb der untersten Bewehrungslage während der zyklischen Belastung für verschieden Versuchsconfigurations

Bild 11 zeigt eine Gegenüberstellung der während der zyklischen Phasen A und B gemessenen Dehnungszuwächse in der untersten Geogitterlage im Bereich der Pfahlzwischenräume.

5. Geokunststoff-Kolloquium

Horizontalbewehrung über Pfählen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Dr.-Ing. Claas Heitz, Dr.-Ing. Berhane Gebreselassie
 Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel

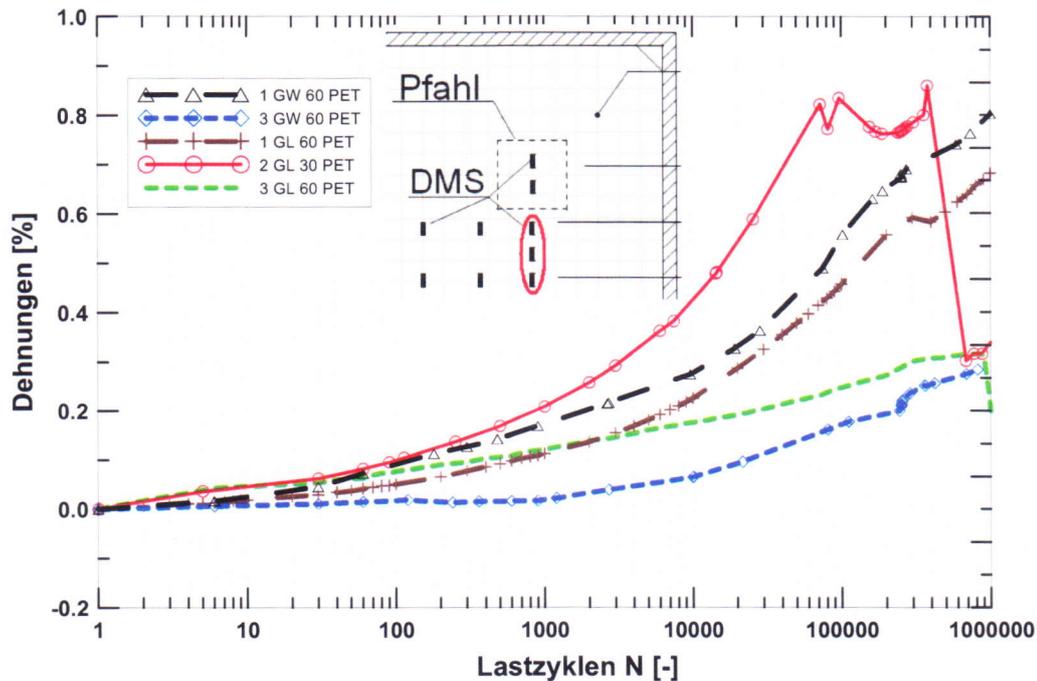


Bild 11: Mittlere Dehnungen in der unteren Geogitterlage im Pfahlzwischenraumbereich während der zyklischen Belastung für verschiedene Versuchskonfigurationen (Anmerkung: der Dehnungsabfall nach ca. $N = 100000$ bei dem Versuch 2 GL 30 PET kann zunächst nicht erklärt werden)

Für die Geogitter GL 60 PET und GW 60 PET kann auch hier ein etwa tendenziell gleichwertiges Verhalten festgestellt werden. Dagegen werden für eine zweilagige Anordnung GL 30 PET relativ hohe Dehnungen gemessen. Als Ursache hierfür sind die bereits oben genannten Gründe zu nennen.

4. Zusammenfassung

Aus den Modellversuchen können nachfolgende wesentliche Ergebnisse zusammengefasst werden: Das Einlegen horizontaler Geogitterlagen führt zu einer Systemstabilisierung und zu einer Verringerung der Systemsetzungen unter nicht ruhender Beanspruchung.

Bei mehrlagiger Geogitteranordnung stellt sich unabhängig vom Geogittertyp das in Abschnitt 3.2 dargestellte Beanspruchungsverhältnis ein. Die gemessene Dehnungsverteilung weicht von den Annahmen nach *Empfehlung 6.9 (2006)* ab:

Bewehrung	Modellversuch	Empfehlung 6.9 (2006)
zweilagig	1 : 0,65	1 : 1
dreilagig	1 : 0,65 : 0,35	keine Angabe

Das Last-Verformungsverhalten wird insbesondere durch die verbaute Dehnsteifigkeit beeinflusst.

Bei dreilagiger Bewehrungsführung können sich Strukturverbundeffekte zwischen Geogitter und Füllboden einstellen, die das Last-Verformungsverhalten positiv beeinflussen (plattenartige Lastabtragung). Gleiche Dehnsteifigkeit und eine Aufteilung auf mehrere Lagen führt hingegen zu einem ungünstigeren Systemverhalten.

Ein signifikanter Systemunterschied, der ausschließlich auf die Produktstruktur zurückzuführen ist, ist nicht eindeutig festzustellen. Die verschiedenen Geogittertypen führen zu einem tendenziell gleichen Systemverhalten unter nicht ruhender Beanspruchung. Ist die Geogittergeometrie nicht auf die Korngrößen des Füllbodens abgestimmt, kann das Last-Verformungsverhalten beeinflusst werden.

5. Geokunststoff-Kolloquium

Horizontalbewehrung über Pfählen

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Dr.-Ing. Claas Heitz, Dr.-Ing. Berhane Gebreselassie
Institut für Geotechnik und Geohydraulik, Universität Kassel



5. Literaturverzeichnis

Alexiew D. (2004): Geogitterbewehrte Dämme auf pfahlähnlichen Elementen: Grundlagen und Projekte. Die Bautechnik 81, Heft 9/2004

Empfehlung 6.9 (2006): Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern. Entwurf, 12. Fassung vom 01.09.2006 – vorgesehen als Kapitel 6.9 für die Empfehlung für Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO) der DGGT

Heitz, C. (2006): Bodengewölbe über punktförmigen Traggliedern unter statischer und zyklisch-dynamischer Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungseinlagen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 19

Kempfert, H.-G. / Stadel, M. / Zaeske, D. (1997): Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen. Bautechnik 74, Heft 12, S. 818-825

Kempfert, H.-G. / Göbel, C. / Alexiew, D. / Heitz, C. (2004): German Recommendations for Soil Reinforcement above Pile-Elements. EUROGeo3, Third Geosynthetics Conference, München, Band I, S. 279 – 283

Zaeske, D. (2001): Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 10