

# DIMENSIONIERUNG VON BEWEHRTEN ERDKÖRPERN AUF PUNKTFÖRMIGEN TRAGGLIEDERN BEI BESONDEREN RANDBEDINGUNGEN

H.-G. Kempfert  
Universität Kassel, Kassel

J. Lüking  
Universität Kassel, Kassel

B. Gebreselassie  
Universität Kassel, Kassel

**KURZFASSUNG:** Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern werden häufig im Verkehrswegebau eingesetzt, um Verkehrslasten durch anstehende Weichschichten in tieferliegende, tragfähigere Bodenschichten einzuleiten. Diese Bauweise hat sich in der Vergangenheit gut bewährt.

Dennoch treten Unsicherheiten bei der Dimensionierung dieser Bauwerke unter besonderen Randbedingungen auf. Darunter wird der Einfluss der Pfahlrasteranordnung unterhalb der Geogitterlage auf den Lastabtrag, die Größe des auf die Geogitterlage wirkenden Spreizdrucks im Böschungsbereich, der Einfluss von zyklisch-dynamischer Belastung auf die Gewölbebildung und der Einfluss einer unterschiedlichen Produktstruktur des Geogitters auf den Lastabtrag verstanden.

Am Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel wurden in den letzten Jahren umfangreiche experimentelle und numerische Arbeiten durchgeführt, die den Einfluss dieser Randbedingungen untersucht haben.

Der Beitrag stellt diese neueren Forschungsergebnisse vor und gibt der Praxis zusätzlich einen Leitfaden zur Dimensionierung von bewehrten Erdkörpern auf punktförmigen Traggliedern unter Beachtung dieser besonderen Randbedingungen.

## 1 EINLEITUNG

Durch bewehrte Erdkörper auf punktförmigen Traggliedern (auch bekannt als geokunststoffbewehrte Erdschichten über Pfahlelementen, GEP-Konstruktionen) können statische und zyklisch-dynamische Lasten durch weiche Bodenschichten in tieferliegende, tragfähigere Bodenschichten abgetragen werden. Diese Bauweise wird seit den 1990er Jahren erfolgreich in der Baupraxis angewendet, siehe *Kempfert/Stadel (1995)*.

Der Aufbau dieser Konstruktion erfolgt gemäß Abbildung 1.1. Dabei werden pfahlartige Elemente durch eine weiche Schicht bis zum tragfähigeren Horizont eingebracht. Auf die Pfahlköpfe wird eine ein- oder mehrlagige Geogitterbewehrung gelegt, auf der z.B. ein Verkehrsdamm aus nichtbindigem Material errichtet wird.

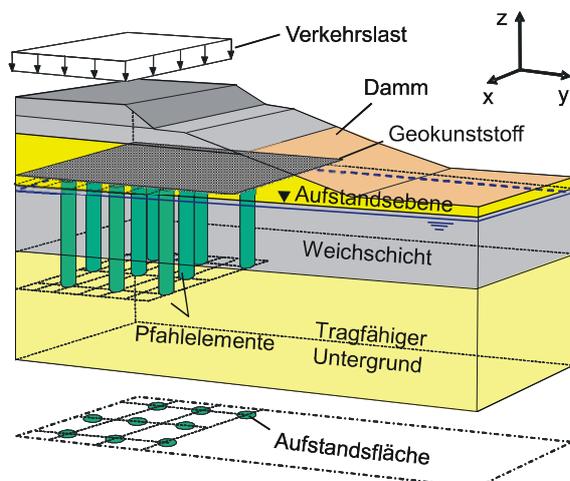


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau einer GEP-Konstruktion

Die Wirkungsweise von GEP-Konstruktionen beruht auf einer Gewölbewirkung im Damm oberhalb der Geogitterbewehrung. Dabei werden die Verkehrslasten durch das Bodengewölbe direkt in die pfahlartigen Elemente geleitet. Nicht umgeleitete Kräfte werden durch die Bewehrung aufgenommen und dann in die pfahlartigen Elemente abgetragen.

Den aktuellen Stand zur Berechnung dieser Konstruktion sind in der *EBGEO (2009)* gegeben, die hauptsächlich aus dem Gewölbemodell von *Zaeske (2001)* und *Zaeske/Kempfert (2002)* resultiert.

Dennoch sind gerade bei besonderen Randbedingungen noch nicht alle auf die Bemessung einer GEP-Konstruktion einwirkenden Faktoren umfassend behandelt, sondern auf der sicheren Seite liegend angenommen worden. Dazu zählen der Lastabtrag des Geogitters bei Anordnung der pfahlartigen Elemente im Dreieckraster, Berücksichtigung der Spreizkräfte in der Aufstandsfläche einer Dammböschung, der Einfluss von zyklisch-dynamischen Lasten, usw.

In diesem Beitrag werden neuere Forschungsergebnisse zu diesen Randbedingungen vorgestellt.

## 2 LASTABTRAG UNTER VARIATION DER ANORDNUNG DER PFAHLELEMENTE

### 2.1 Allgemeines

Die Pfahlelemente unterhalb der Geogitterbewehrung können im Rechteckraster und im Dreieckraster nach Abbildung 2.1 angeordnet werden. Die Ausrollrichtung des Geogitters erfolgt dabei immer in Dammlängsachse.

Erfahrungen aus der Baupraxis zeigen, dass sich der Lastabtrag einer GEP-Konstruktion bei Anordnung der Pfahlelemente im Dreieckraster oftmals günstiger verhält als bei Anordnung im Rechteckraster. Zur weiteren Untersuchung wurden Modellversuche und numerische Berech-

nungen für die Anordnung der Pfähle im Rechteck- und Dreieckraster durchgeführt.

Nach *EBGEO (2009)* wird ein Dreieckraster zunächst nur wie ein gedrehtes Rechteckraster berechnet, da zum allgemeinen Dreieckraster noch Kenntnislücken vorliegen.

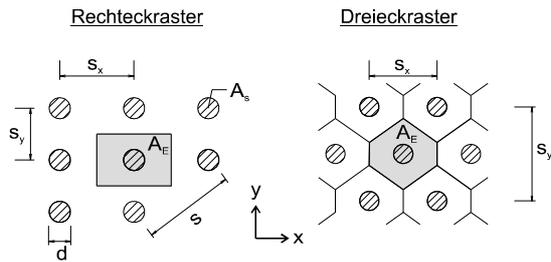
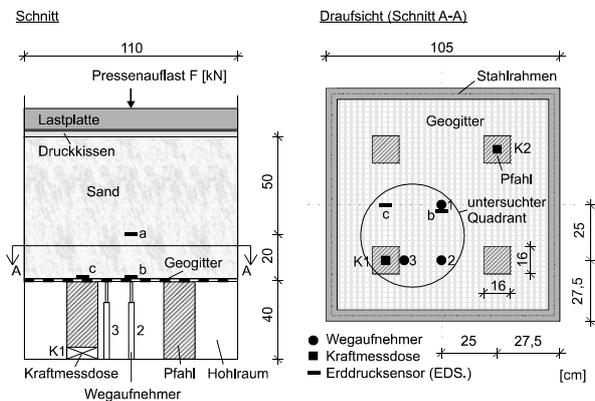


Abbildung 2.1: Abstand  $s$  der Tragglieder, Einflussfläche  $A_E$  und Stützfläche  $A_s$

## 2.2 Allgemeines zu den Modellversuchen

Für die Durchführung der Modellversuche wurde der sich bereits nach *Zaeske (2001)* und *Heitz (2006)* bewährte Modellversuchsstand verwendet. Dieser stellt den Teilbereich einer GEP-Konstruktion ohne Böschungsbereich im Maßstab von ca. 1:3 dar. Der Ausschnitt ist auf vier Pfähle begrenzt. Eine Darstellung ist in Abbildung 2.2 gegeben.



Ansicht



Abbildung 2.2: Schnitt, Draufsicht und Ansicht des Modellstandes

Es wurden unterschiedliche Versuche durchgeführt, bei denen die Geogittertypen und die Rasteranordnung der Pfähle variiert worden sind. Weitere Informationen zu den Modellversuchen sind *Heitz (2006)* und *Zaeske (2001)* zu entnehmen.

Wie in Abbildung 2.2 ersichtlich wurden bis zu drei Erdrucksensoren (EDS) im Bodenkörper angeordnet. Zur Messung der Dehnungen im Geogitter wurden Dehnungsmessstreifen (DMS) auf den einzelnen Stegoberflächen der Geogitter appliziert. Ausführlichere Informationen zur Messung mit DMS (1995) zu entnehmen.

Die Versuche wurden im ungebetteten Zustand durchgeführt. Ein unter das Geogitter gelegtes Vlies mit einer geringeren Dehnsteifigkeit verhinderte ein Durchrieseln des eingebauten Sandes.

Die Belastung des Systems erfolgte in 15 gleichmäßigen Laststufen zu je  $8,3 \text{ kN/m}^2$ . Die Belastung jeder Laststufe wurde für jeweils 30 Minuten aufrechterhalten.

## 2.3 Anordnung der pfahlartigen Elemente im Rechteckraster

In Abbildung 2.3 sind die experimentell ermittelten Dehnungen ausgewählter DMS für die Anordnung der pfahlartigen Elemente im Rechteckraster dargestellt.

Beim Rechteckraster treten die größten Dehnungen auf dem kürzesten Pfahlabstand auf (DMS 3, 11 und 12). In der Mitte des Geogitters fallen die Dehnungen deutlich geringer aus (z. B. DMS 1 und 7).

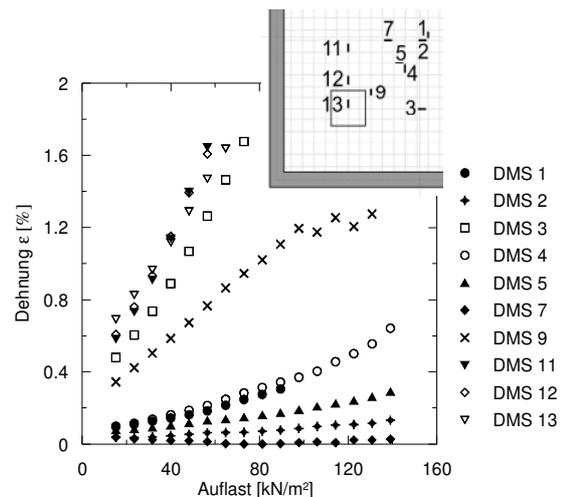


Abbildung 2.3: Dehnungen des Geogitters bei Anordnung der pfahlartigen Elemente im Rechteckraster

Die Modellversuche wurden zusätzlich mit einem Stabwerksprogramm nachgerechnet. Informationen zur Modellerstellung sind *Kempfert et al. (2008)* zu entnehmen. Die Möglichkeit zur vereinfachten Berechnung einer GEP-Konstruktion mit Hilfe eines Stabwerksprogramms wurde bereits in *Heitz (2006)* nachgewiesen. Das Ziel dieser Untersuchungen ist die numerische Ermittlung der Erddruckverteilung auf das Geogitter zur weiteren Untersuchung der Gewölbeausbildung im Erdkörper.

In Abbildung 2.4 sind die numerisch ermittelten Dehnungen mit den Ergebnissen des Modellversuches vergleichend dargestellt.

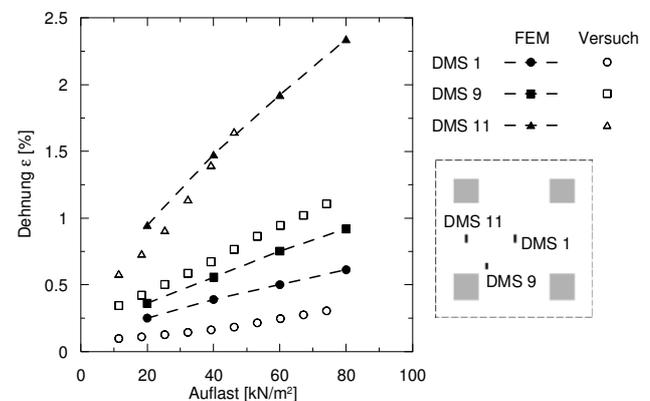


Abbildung 2.4: Vergleich der Dehnungen aus den numerischen Berechnungen und den Modellversuchen im Rechteckraster

Durch die numerische Berechnung konnte die in Abbildung 2.5 gezeigte Verteilung des vertikalen Erddrucks direkt oberhalb des Geogitters abgeschätzt werden.

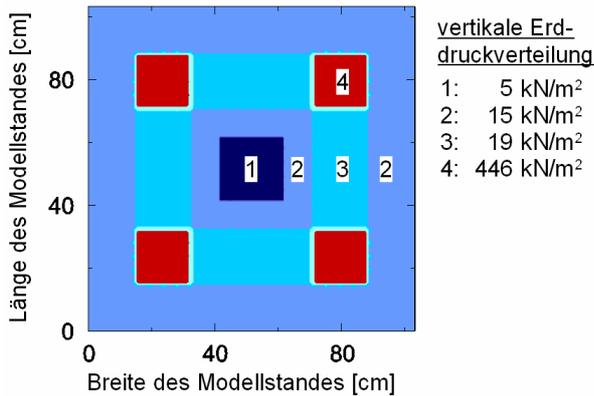


Abbildung 2.5: Vertikale Erddruckverteilung direkt oberhalb des Geogitters aufgrund der numerischen Berechnungen im Rechteckraster

Über den Pfahlköpfen ist eine hohe Spannungskonzentration erkennbar. Auf der kürzesten Distanz zwischen den Pfählen ist im Vergleich zur Geogittermitte eine höhere Spannung errechnet worden. Die hohen Spannungen über den Pfahlköpfen resultieren aus der Lagerung des Gewölbes. Die im Vergleich zur Geogittermitte höhere Spannung auf der kürzesten Distanz zwischen den Pfählen weist auf eine zusätzliche linienförmige Lagerung des Gewölbes hin, wodurch die Gewölbevorstellung in Abbildung 2.6 nach Heitz (2006) bestätigt werden kann.

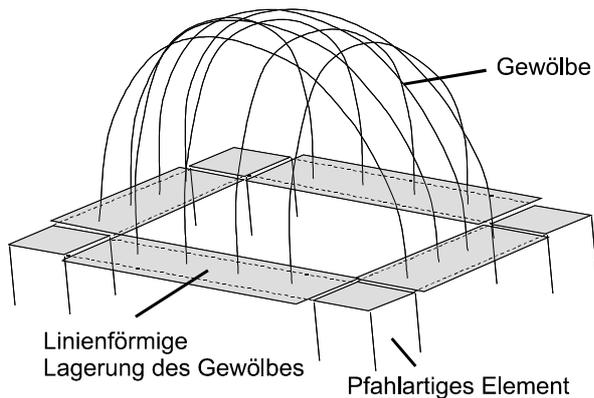


Abbildung 2.6: Modellvorstellung nach Heitz (2006) bei Anordnung der pfahlartigen Elemente im Rechteckraster

#### 2.4 Anordnung der pfahlartigen Elemente im Dreieckraster

Um eine Pfahlanordnung im Dreieckraster simulieren zu können, wurde das Geogitter um 45° gedreht in den Stahlrahmen eingespannt.

In Abbildung 2.7 sind die experimentell ermittelten Dehnungen ausgewählter DMS dargestellt. Die Modellversuche zeigen, dass bei Anordnung der pfahlartigen Elemente im Dreieckraster ein anderes Dehnungsverhalten feststellbar ist.

Die größten Dehnungen treten in den DMS 5, 8 und 14 auf, welche auf der Diagonalen zwischen den Pfählen appliziert sind. Die DMS 1 und 2 dagegen, welche in der kürzesten Pfahlverbindung angeordnet sind, wurden am geringsten beansprucht.

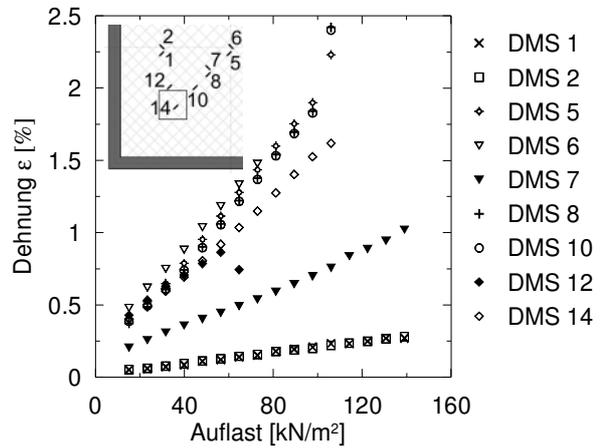


Abbildung 2.7: Dehnungen des Geogitters bei Anordnung der pfahlartigen Elemente im Dreieckraster

Abbildung 2.8 zeigt vergleichend die numerisch ermittelten Dehnungen mit den Ergebnissen des Modellversuches.

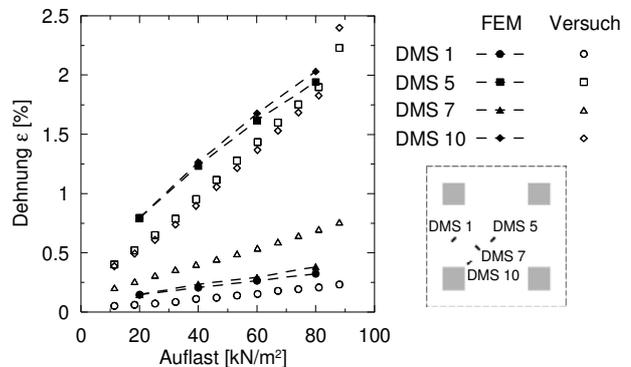


Abbildung 2.8: Vergleich der Dehnungen aus den numerischen Berechnungen und den Modellversuchen im Dreieckraster

In Abbildung 2.9 ist die numerisch ermittelte Spannungsverteilung oberhalb des Geogitters dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich über den Pfahlköpfen eine etwas höhere Spannungskonzentration einstellt als bei Anordnung im Dreieckraster. Die Spannungen auf das Geogitter sind im Vergleich zum Rechteckraster gleichmäßiger verteilt und auch geringer. In Geogittermitte konnte rechnerisch eine lokal begrenzte höhere Spannungskonzentration ermittelt werden.

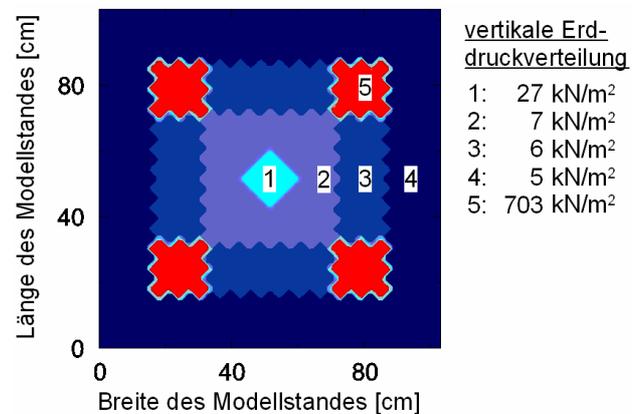


Abbildung 2.9: Vertikale Erddruckverteilung direkt oberhalb des Geogitters aufgrund der numerischen Berechnungen im Dreieckraster (Kett- und Schussrichtung des Geogitters laufen hierbei über die Diagonale)

Aufgrund der im Vergleich zum Rechteckraster unterschiedlichen Erddruckverteilung ist davon auszugehen, dass sich bei Anordnung des Geogitters im Dreieckraster eine andere Gewölbeform ausbildet. Die geringe Spannungskonzentration zwischen der kürzesten Distanz zwischen den Pfählen deutet darauf hin, dass sich keine linienförmige Lagerung des Gewölbes einstellt, sondern das Gewölbe diesen Bereich überspannt. Aufgrund der Spannungskonzentration in Geogittermitte scheint dort eine unterstützende punktförmige Lagerung des Gewölbes stattzufinden. Durch diese Lagerung wird die Stützweite des Gewölbes verringert, wodurch ein tragfähigeres Gewölbe möglich ist. Darauf weist auch die im Vergleich zum Rechteckraster höhere Spannungskonzentration über den Pfählen hin (vgl. Abbildung 2.5 mit 2.9). In Abbildung 2.10 ist die Modellvorstellung zur Gewölbebildung bei Anordnung der pfahlartigen Elemente im Dreieckraster schematisch dargestellt.

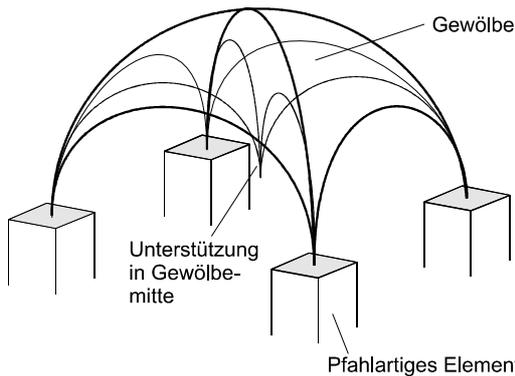


Abbildung 2.10: Modellvorstellung bei Anordnung der pfahlartigen Elemente im Dreieckraster

Bei Anordnung der pfahlartigen Elemente im Dreieckraster zeigt eine GEP-Konstruktion oftmals ein besseres Systemverhalten als im Rechteckraster, siehe *Kempfert et al. (2008)*. Da das dafür in *Kempfert et al. (2008)* vorgeschlagene Berechnungsverfahren noch nicht ausreichend abgesichert ist, wird in der *EBGEO (2009)* zunächst auf der sicheren Seite liegend empfohlen, bei Anordnung der pfahlähnlichen Elemente im Dreieckraster diese wie eine Anordnung im Rechteckraster zu berechnen, sie allerdings im Dreieckraster anzuordnen.

### 3 BERÜCKSICHTIGUNG DER SPREIZSPANNUNG IM BÖSCHUNGSBEREICH

#### 3.1 Allgemeines

Aufgrund der fehlenden seitlichen Stützung des bewehrten Erdkörpers entstehen im Böschungsbereich von Dämmen Horizontalkräfte (Spreizkräfte) in der Aufstandsebene, die von der Geogitterbewehrung aufgenommen und in die Dammmitte abgeleitet werden müssen.

Die *EBGEO (2009)* sieht zur Berücksichtigung dieser Spreizkräfte zwei Verfahren vor. Im ersten Verfahren wird der horizontale Anteil des aktiven Erddrucks nach *Rendulic (1938)* von der Dammkrone bis zur Geogitterlage auf die bereits ermittelte Membrankraft in der Geogitterlage summiert. Im zweiten Verfahren wird nur das Maximum aus Membran- und Spreizkraft berücksichtigt. Bei diesem Verfahren ist jedoch nicht davon auszugehen, dass die pfahlähnlichen Elemente keine unzulässigen Verformungen aufweisen, wodurch in der *EBGEO (2009)* weitere Nachweise gefordert werden.

#### 3.2 Numerische Parameterstudie

Auf der Grundlage von großmaßstäblichen Modellversuchen und 3D-FEM Berechnungen hat *Fahmy (2008)* die Spreizwirkung untersucht und weitergehende Parameterstudien durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Ausnahme der Geogitterdehnung eine GEP-Konstruktion mit der FEM realistisch abgebildet werden kann. Die Geogitterdehnungen wurden numerisch jedoch deutlich unterschätzt. Eine Verifikation mit weiteren Modellversuchen ergab, dass eine Multiplikation der Dehnungen mit dem Faktor 3,5 zu guten Übereinstimmungen mit den Modellversuchen führt, siehe Abbildung 3.1 und 3.2

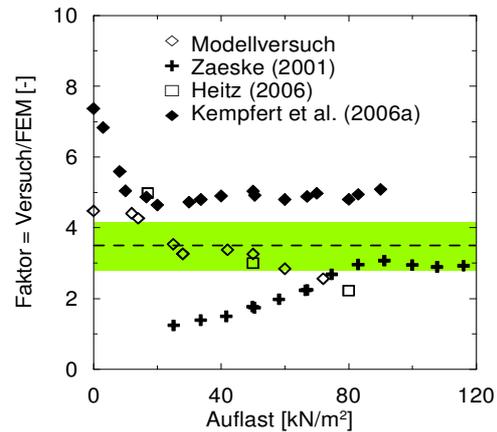


Abbildung 3.1: Ableitung des Faktors 3,5 zur numerischen Ermittlung der Dehnung im Geogitter nach *Fahmy (2008)*

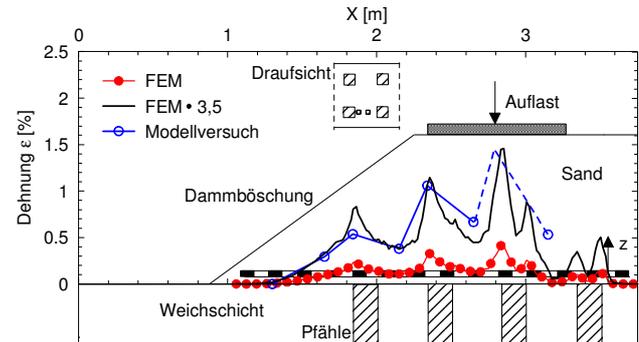


Abbildung 3.2: Vergleich der numerisch ermittelten Dehnungen im Geogitter mit den Modellversuchen nach *Fahmy (2008)*

Daraus hat *Fahmy (2008)* einen weitgehend empirischen Ansatz zur Ableitung der Spreizkraft  $\Delta E_{G+Q}$  unter Berücksichtigung der Steifigkeit des Untergrundes und der Böschungsneigung hergeleitet, siehe Gleichung (3.1),

$$\Delta E_{G+Q} = E_a \cdot f_{E_s} \cdot f_{\beta} \quad (3.1)$$

mit:  $f_{E_s}$  Faktor zur Berücksichtigung des Steifemoduls  $E_s$  der Weichschicht

$f_{\beta}$  Faktor zur Berücksichtigung der Böschungsneigung  $\beta$

Zur Ermittlung der horizontalen Erddruckkraft  $E_a$  wurde von *Fahmy (2008)* ein modifizierter Erddruckansatz entwickelt, bei dem der aktive Erddruck in Abhängigkeit des Winkels  $\Phi$  an einer fiktiven Wand ermittelt wird, siehe Abbildung 3.3.

Zur Vereinfachung des Erddruckansatzes nach *Fahmy (2008)* wird vorgeschlagen, den Erddruck von der Damm-

krone bis zur Geogitterlage wie in der *EBGEO (2009)* nach *Rendulic (1938)* zu ermitteln und dann mit den beiden Abminderungsfaktoren  $f_{E_s}$  und  $f_\beta$  zu multiplizieren, die die maßgeblichen Anteile Steifigkeit der Weichschicht und Böschungsneigung berücksichtigen, was in der *EBGEO (2009)* nicht enthalten ist.

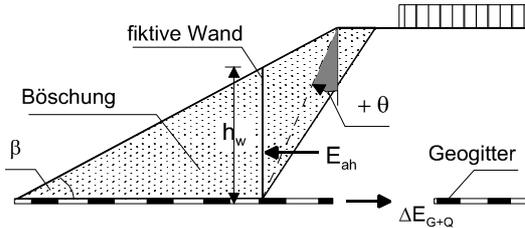


Abbildung 3.3: Modifizierter Erddruckansatz nach *Fahmy (2008)*

Die Abminderungsfaktoren werden nach Abbildung 3.4 bzw. 3.5 bestimmt.

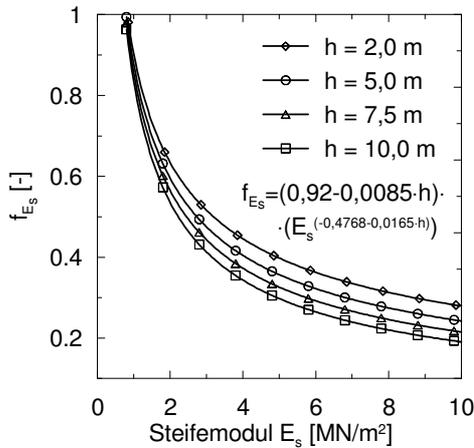


Abbildung 3.4: Bestimmung des Faktors  $f_{E_s}$  nach *Fahmy (2008)*

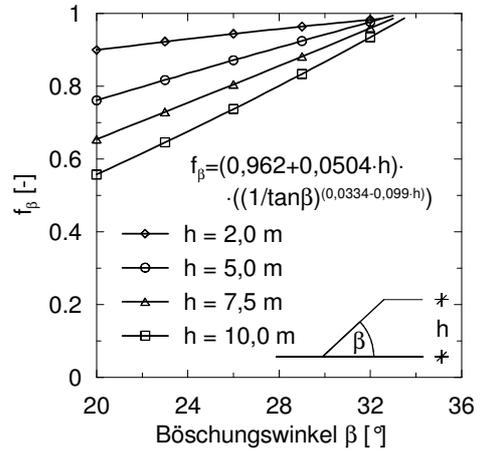


Abbildung 3.5: Bestimmung des Faktors  $f_\beta$  nach *Fahmy (2008)*

*Fahmy (2008)* hat die Abminderungsfaktoren in Abhängigkeit unterschiedlicher Laststufen ermittelt. Näherungsweise können die Abbildungen 3.4 und 3.5 jedoch für alle Laststufen angewendet werden.

In Abbildung 3.6 ist ein Vergleich mit dem hier vorgestellten modifizierten Verfahren und den Verfahren nach *EBGEO (2009)* und *Fahmy (2008)* bei einer Auflast von  $p = 30 \text{ kN/m}^2$  dargestellt. Darin wurde ein Torf ( $E_s = 0,8 \text{ MN/m}^2$ ), sowie ein normalkonsolidierter ( $E_s = 3 \text{ MN/m}^2$ ) und überkonsolidierter bindiger Boden ( $E_s = 10 \text{ MN/m}^2$ ) bei einer Böschungsneigung von 1:1,5 und 1:2,5 und einer Auflast von  $30 \text{ kN/m}^2$  untersucht.

Es wird davon ausgegangen, dass mit dem modifizierten Berechnungsverfahren die wahrscheinlichen Spreizkräfte zutreffender erfasst werden. Es sollte allerdings beachtet werden, dass bei hohen Dämmen von den Pfählen große horizontale Verformungen aufgenommen werden müssen. Daher wird ein Nachweis der zulässigen Verformungen für die Pfählelemente (z.B. numerisch) empfohlen.

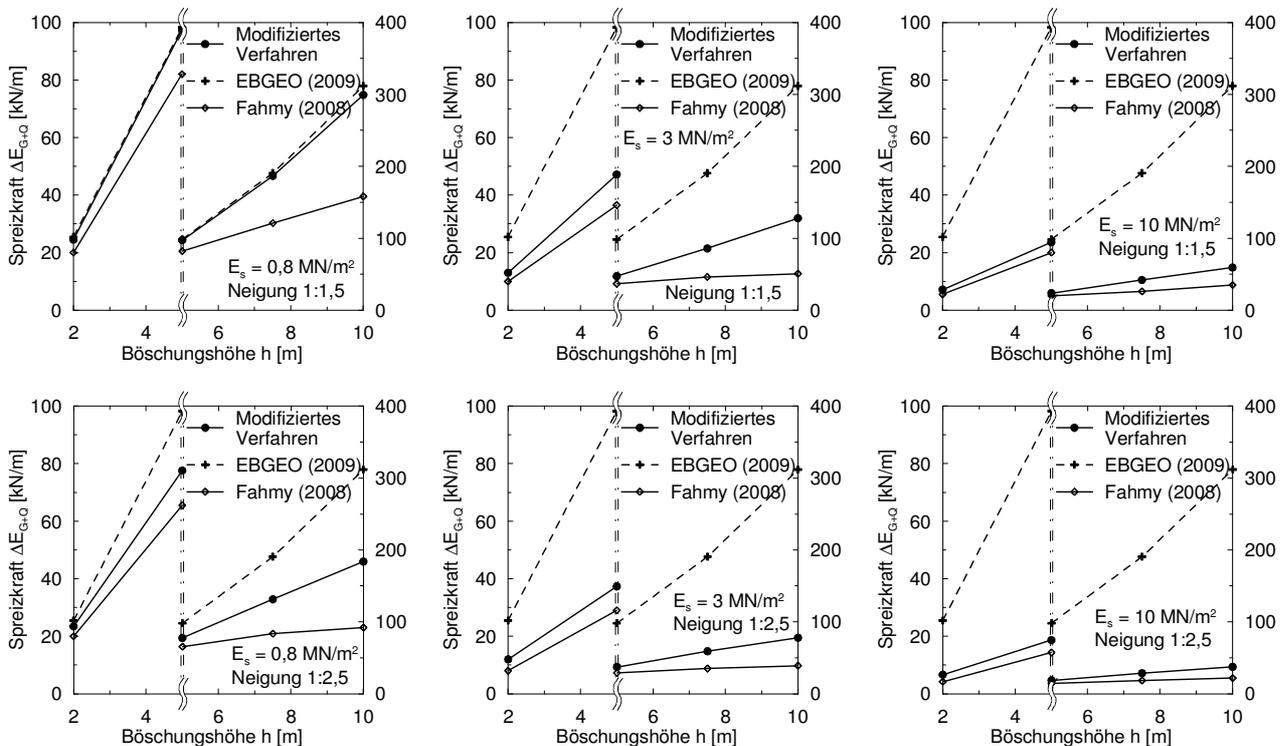


Abbildung 3.5: Spreizkraft  $\Delta E_{G+Q}$  für das modifizierte Verfahren sowie der Verfahren nach *EBGEO (2009)* und *Fahmy (2008)* für drei unterschiedliche Steifigkeiten  $E_s$  der Weichschicht und zwei Böschungsneigungen bei einer Auflast von  $p = 30 \text{ kN/m}^2$

## 4 EINFLUSS VON ZYKLISCH-DYNAMISCHEN BELASTUNGEN AUF GEP-TRAGSYSTEME

### 4.1 Allgemeines

Während das Systemverhalten unter statischen Lasten auf GEP-Tragsysteme bekannt ist, siehe *Zaeske (2001)* und *Zaeske/Kempfert (2002)*, war der Einfluss von zyklisch-dynamischer Belastung bisher wenig erforscht. Aus diesem Grund wurden von *Heitz (2006)* Modellversuche durchgeführt, um die Haupteinflussgrößen für eine Gewölbebeeinflussung zu ermitteln.

Im folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse dargestellt. Weiterführende Informationen sind *Heitz (2006)* und *Heitz/Kempfert (2007)* zu entnehmen.

### 4.2 Modellversuche

Für die Durchführung der Modellversuche wurde der bereits in Abschnitt 2.1 erwähnte Modellversuchsstand verwendet. In den Modellversuchen wurde das Überdeckungshöhen-Stützweitenverhältnis  $h/s$  (0,5 / 1 / 1,5), die Anzahl der Geokunststofflagen (0 bis 3) und der Geogittertyp variiert. In Abbildung 4.1 ist ein beispielhaftes Belastungsschema dargestellt. Die Versuche wurde jedoch in einem gebetteten Zustand durchgeführt. Als Weichschicht wurde ein mittel bis mäßig zersetzter Hochmoortorf verwendet. Bodenkenngößen sind in *Kempfert et al. (2006a)* angegeben.

Mit Hilfe des Lastumlagerungswertes  $E$  wird gemäß Gleichung (4.1) und Abbildung 4.2 die Effektivität des Gewölbesystems beurteilt.

$$E = \frac{F_p}{A_E \cdot (\gamma \cdot h + \sigma)} \quad (4.1)$$

mit:  $A_E = s_x \cdot s_y$      $A_S = b_x \cdot b_y$

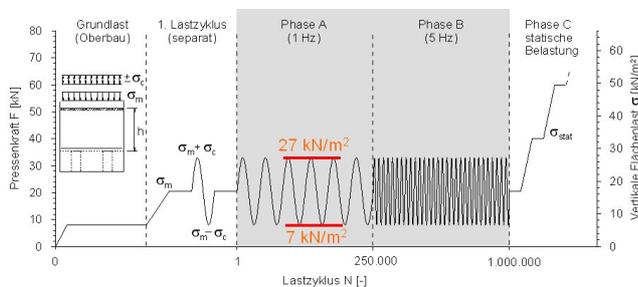


Abbildung 4.1: Belastungsschema in den Modellversuchen

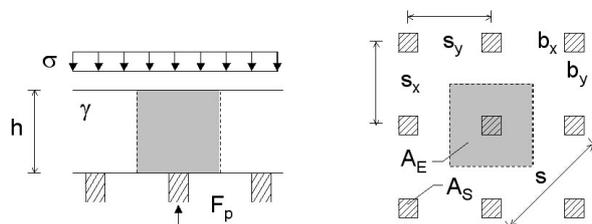


Abbildung 4.2: Definition des Lastumlagerungswertes  $E$

### 4.3 Ergebnisse

Abbildung 4.3 zeigt für den Fall  $h/s = 0,5$  die Auswirkungen der zyklischen Belastung aus Abbildung 4.1 auf den Lastumlagerungswert  $E$  für ein 0 bis 3 lagig bewehrtes System.

Ohne Geogitterbewehrung kommt es bei der 1 Hz Belastung zu einer Reduzierung der Lastumlagerung, die sich nach ca. 100 Lastzyklen stabilisiert. Nach Erhöhung der Belastungsfrequenz auf 5 Hz tritt eine weitere Reduzierung der Lastumlagerung ein, welches im vorliegenden Fall einem nahezu vollständigen Ausfall des Gewölbes entsprach. Zusätzlich sind höhere Systemverformungen eingetreten, die mit einem Einstanzen der Pfahlköpfe von unten in die mineralische Tragschicht verbunden war.

Unter Verwendung der Geogitterbewehrung tritt anfangs ebenfalls eine Gewölbereduzierung ein. Bei weiterer zyklischer Belastung behindern die Bewehrungslagen allerdings den Einstanzvorgang und die Systemverformungen, wodurch eine höhere Lastumlagerung auf die Pfähle erreicht wird. Nach Erhöhung der Belastungsfrequenz verringert sich die Lastumlagerung wieder.

Aus den Versuchsergebnissen konnte ein Gewölbereduktionsfaktor  $\kappa$  nach Gleichung (4.2) abgeleitet werden.

$$\kappa = \frac{E_{stat}}{E_{zykl}} \quad (4.2)$$

mit:  $E_{stat}$  Lastumlagerung (statisch) vor zyklischer Phase nach Gleichung (4.1)

$E_{zykl}$  minimale Lastumlagerung während zyklischer Phase nach Gleichung (4.1)

Eine Gewölbereduktion wird durch ein geringes  $h/s$  Verhältnis, einer großen Belastungsamplitude  $\sigma_c$ , einer großen Belastungsfrequenz  $f$  und einer hohen Lastzyklenzahl  $N$  begünstigt, siehe Abbildung 4.4a und Abbildung 4.4b.

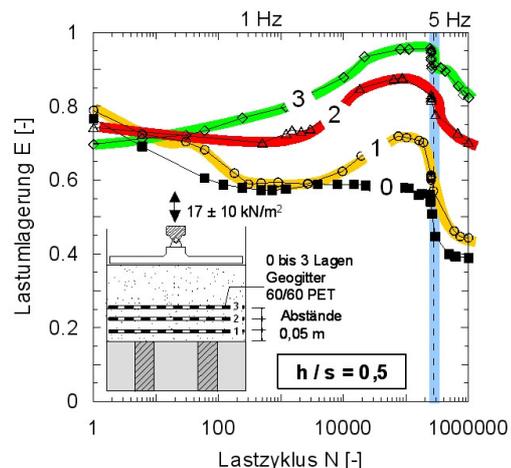
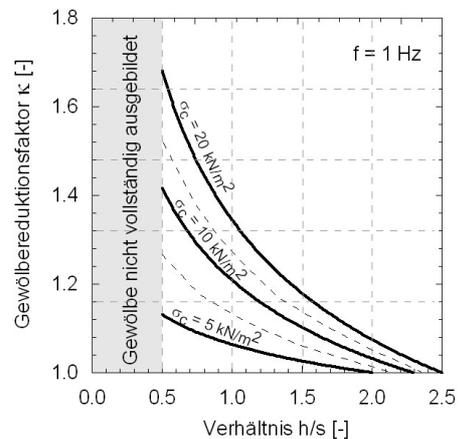


Abbildung 4.3: Lastumlagerung im 0 bis 3 lagig bewehrten System für zyklische Belastung nach Abbildung 4.1



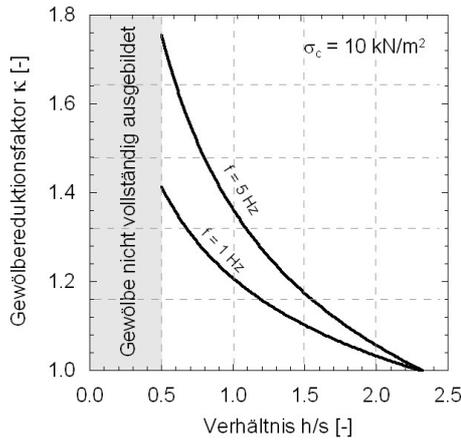


Abbildung 4.4: Diagramme zur Bestimmung des Gewölbereduktionsfaktors  $\kappa$  nach Heitz (2006)

Die möglichen Auswirkungen einer Gewölbereduktion sind in Abbildung 4.5 qualitativ dargestellt.

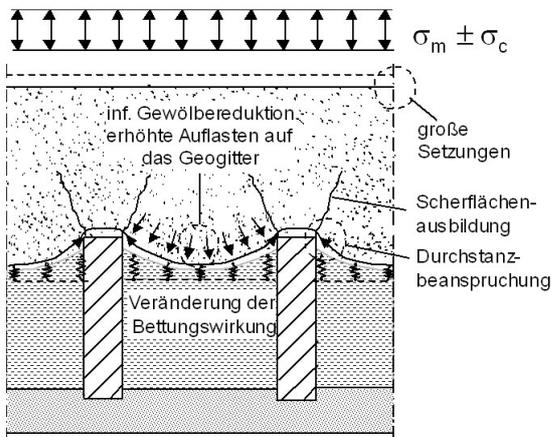


Abbildung 4.5: Mögliche Auswirkungen der Gewölbereduktion auf das Tragverhalten einer GEP-Konstruktion

#### 4.4 Analytische Berücksichtigung der Gewölbereduktion

Die vertikale Spannung  $\sigma_{z0}^{stat}$  auf die Weichschicht unter statischer Belastung kann nach dem Gewölbe-Modell der EBGeo (2009), aufbauend auf den Ergebnissen von Zaeske (2001), nach Abbildung 4.6 und Gleichung 4.3 bestimmt werden.

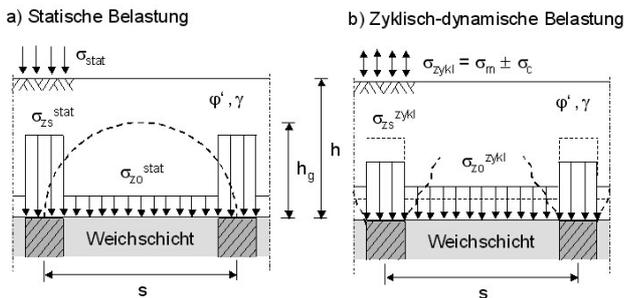


Abbildung 4.6: Vereinfachte vertikale Spannungsverteilung für die (a) statische und (b) zyklische Belastung

Gleichung (4.3) wurde von Heitz (2006) für zyklisch-dynamische Belastungssituationen mit Hilfe des Gewölbereduktionsfaktors  $\kappa$  erweitert. Die auf die Weichschicht wirkende und infolge Gewölberückbildung erhöhte vertikale Spannung  $\sigma_{z0}^{zykl}$  ergibt sich nach Gleichung (4.4) und den Abbildungen 4.4 und 4.6.

$$\sigma_{z0}^{stat} = \lambda_1^\chi \cdot \left( \gamma + \frac{\sigma_{stat}}{h} \right) \cdot \left( h \cdot (\lambda_1 + h_g^2 \cdot \lambda_2) \right)^{-\chi} + h_g \cdot \left( \left( \lambda_1 + \frac{h_g^2 \cdot \lambda_2}{4} \right)^{-\chi} - (\lambda_1 + h_g^2 \cdot \lambda_2)^{-\chi} \right) \quad (4.3)$$

$$\text{mit: } h_g \begin{cases} s/2 & \text{für } h \geq s/2 \\ h & \text{für } h < s/2 \end{cases}; \quad d = 2 \cdot \sqrt{\frac{b_x \cdot b_y}{\pi}}$$

$$K_{krit} = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right); \quad \chi = \frac{d \cdot (K_{krit} - 1)}{\lambda_2 \cdot s}$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{8} \cdot (s - d)^2; \quad \lambda_2 = \frac{s^2 + 2 \cdot d \cdot s - d^2}{2 \cdot s^2}$$

$$\sigma_{z0}^{zykl} = \frac{(\gamma \cdot h + \sigma_{stat}) \cdot A_E}{A_E - A_S} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\kappa} \right) + \frac{1}{\kappa} \cdot \sigma_{z0}^{stat} \quad (4.4)$$

Die über die Zeit veränderliche zyklische Belastung  $\sigma_{zykl}(t)$  wird nach Abbildung 4.7 als statische Ersatzlast berücksichtigt.

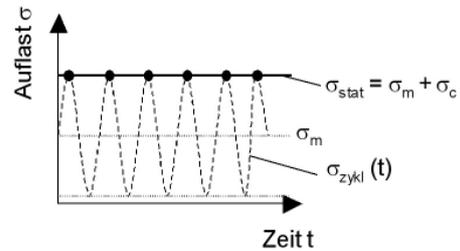


Abbildung 4.7: Definition der statischen Ersatzlast  $\sigma_{stat}$

Abbildung 4.8 zeigt einen Vergleich der Berechnungsergebnisse nach den Gleichungen (4.3) und (4.4) mit den Modellversuchen. Darin ist ersichtlich, dass das Berechnungsverfahren nach Heitz (2006) zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen führt.

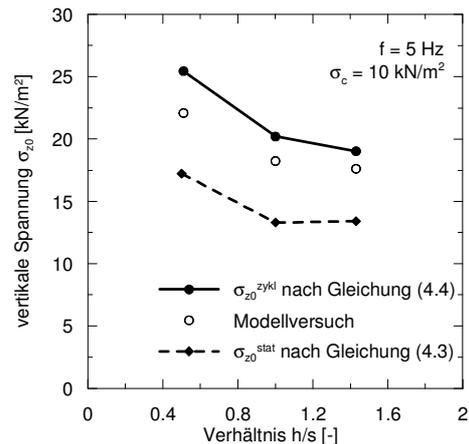


Abbildung 4.8: Vergleich der Gleichungen (4.3) und (4.4) mit den Modellversuchen

Weitere Hinweise dazu sind Heitz/Kempfert (2007) zu entnehmen.

## 5 EINFLUSS DER BEWEHRUNGSLAGEN UND DER PRODUKTSTRUKTUR

### 5.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zur Untersuchung des Einflusses der Bewehrungslagen und der Produktstruktur auf das Systemverhalten einer GEP-Konstruktion zusammengefasst. Die Zusammenfassung basiert auf Untersuchungen von *Kempfert et al. (2006a, 2006b und 2007)*.

### 5.2 Versuchsdurchführung

Die Modellversuche wurden ebenfalls mit dem in Abschnitt 2.1 vorgestellten Modellversuchsstand durchgeführt. Die auf das System wirkende Mittelspannung betrug  $\sigma_m = 17 \text{ kN/m}^2$  und die Lastamplitude  $\sigma_c = \pm 10 \text{ kN/m}^2$ . Die Einbauhöhe wurde zu  $h = 0,35 \text{ m}$  gewählt, welches ein  $h/s = 0,5$  ergab. Diese Versuche wurden ebenfalls wie bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben im gebetteten Zustand durchgeführt.

Es wurden unbewehrte sowie 1 bis 3 lagig bewehrte Systeme untersucht.

Als Geogitter wurden zwei Polyester-Geogittertypen GW und GL mit einer Zugfestigkeit von  $60 \text{ kN/m}$  verwendet. Das Geogitter GW 60 PET ist ein gelegtes, biaxiales Geogitter aus gewebten Kunststoffäden, die durch eine Bitumentummantelung geschützt werden. An den Kreuzungspunkten sind die Längs- und Querstäbe kraftschlüssig miteinander verwebt. Das Geogitter GL 60 PET besteht aus gereckten monolithischen Flachstäben, die an den Knotenpunkten miteinander verschweißt sind. Der Geogittertyp GL weist im Vergleich zum Geogittertyp GW eine größere Biegesteifigkeit der Einzelstege, eine größere Steifigkeit der Knotenpunkte und somit insgesamt eine höhere Formstabilität auf. In Abbildung 5.1 sind zwei Geogittertypen exemplarisch dargestellt.

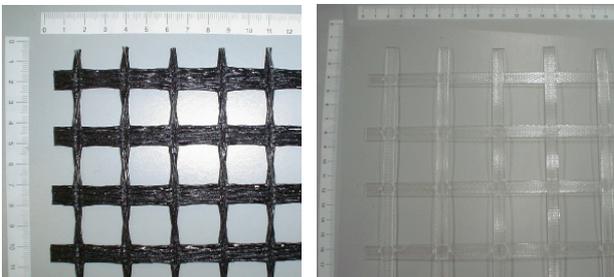


Abbildung 5.1: Struktur und Abmessungen der Geogitter GW 60 PET (links) und GL 60 PET (rechts)

### 5.3 Einfluss der Bewehrungslagen

Es zeigte sich, dass die unterste Geogitterbewehrung besonders wirksam war. Mit zunehmender Höhenlage verringerte sich der Membraneffekt jedoch deutlich. Für eine zweilagige und eine dreilagige, tiefliegende Bewehrungsführung wurde das in Tabelle 5.1 genannte Beanspruchungsverhältnis  $F_{G,unten}:F_{G,oben}$  bzw.  $F_{G,unten}:F_{G,mittle}:F_{G,oben}$  festgestellt. Darin ist eine Abweichung zu den Annahmen nach *EBGEO (2009)* ersichtlich.

Tabelle 5.1: Beanspruchungsverhältnis der Geogitterlagen

	Versuche	EBGEO (2009)
2-lagig	1:0,65	1:1
3-lagig	1:0,65:0,35	nicht vorgesehen

Ebenfalls konnte festgestellt werden, dass sich eine gleiche verbaute Dehnsteifigkeit des Geogitters und eine Aufteilung auf mehrere Lagen zu einem ungünstigeren

Systemverhalten führt. Es ist somit empfehlenswert die zu verbaute Dehnsteifigkeit auf eine möglichst geringe Bewehrungslagenanzahl aufzuteilen. Da bei einer 3-lagigen Bewehrung die oberste Bewehrungslage nur einen geringen Auslastungsgrad aufweist und zusätzlich die Gewölbebildung dadurch gestört wird, kann eine 3-lagige Bewehrung i.d.R. nicht empfohlen werden.

### 5.4 Einfluss der Produktstruktur

In diesem Abschnitt werden ausgewählte Versuchsergebnisse vorgestellt. In Abbildung 5.2 sind die Oberflächensetzungen über die Anzahl der Lastzyklen für verschiedene Versuchskonstruktionen aufgetragen.

Unter Verwendung mehrlagiger Geogitterbewehrungen treten im Vergleich zu einlagiger bzw. unbewehrter Bewehrung geringere Setzungen auf. Die Setzungsreduktion von einer 2- zu einer 3-lagigen Bewehrung fällt deutlich geringer aus als zwischen einer 1- und 2-lagigen Bewehrung. Bei vergleichbarer Bewehrungslagenanzahl ist bei den unterschiedlichen Geogittern ein tendenziell gleiches Systemverhalten zu erkennen.

In Abbildung 5.3 sind die mittleren Dehnungen im Pfahlzwischenbereich für die jeweils unterste Geogitterlage über die Lastzyklen dargestellt.

Es ist ein deutlicher Dehnungsanstieg bei zunehmenden Belastungszyklen erkennbar, der eindeutig auf die Gewölbereduktion bei zyklisch-dynamischer Belastung zurückzuführen ist. Auch hier ist tendenziell ein gleichwertiges Verhalten der unterschiedlichen Geogittertypen erkennbar.

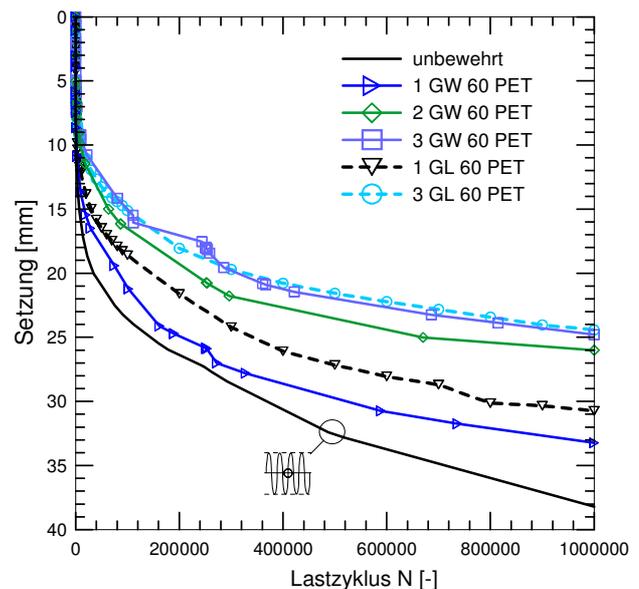


Abbildung 5.2: Oberflächensetzungen für verschiedene Versuchskonfigurationen in Abhängigkeit der Lastzyklen

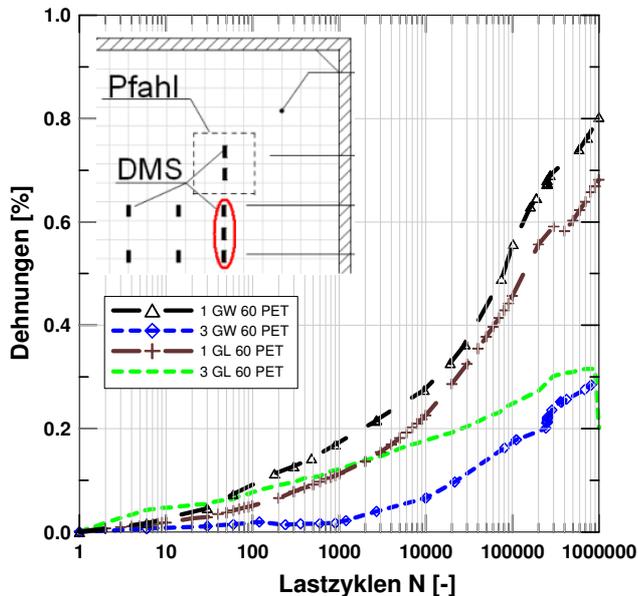


Abbildung 5.3: Mittlere Dehnungen im Pfahlzwischenbereich für die jeweils unterste Geogitterlage

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Beitrag stellt neuere Forschungsergebnisse vor, die sich auf spezielle Randbedingungen bei der Dimensionierung von GEP-Konstruktionen beziehen.

Durch experimentelle und numerische Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass sich bei Anordnung der pfahlartigen Elemente im Dreieckraster im Vergleich zum Rechteckraster ein unterschiedlicher Lastabtrag einstellt. Bei erstgenannter Anordnung konnte i.d.R. ein günstigeres Systemverhalten festgestellt werden. Zusätzlich wurde eine neue Modellvorstellung zum Lastabtrag vorgestellt.

Aufbauend auf den Untersuchungen von Fahmy (2008) konnte ein modifizierter Berechnungsansatz zur Bestimmung des Spreizdrucks entwickelt werden, welches die Steifigkeit der Weichschicht und die Neigung der Böschung mit berücksichtigt. Im Vergleich zu dem etwas konservativen Ansatz der EBGEO (2009) kann dadurch eine wirtschaftlichere Dimensionierung ermöglicht werden.

Unter zyklisch-dynamischen Lasten kann sich eine Rückbildung des Gewölbes einstellen, wodurch die vertikalen Spannungen auf die Weichschicht erhöht werden. Es wurden die Untersuchungen von Heitz (2006) vorgestellt, in denen ein Gewölbereduktionsfaktor abgeleitet worden ist.

Zusätzlich wurde der Einfluss unterschiedlicher Produktstrukturen auf das Systemverhalten einer GEP-Konstruktion untersucht, wobei ein tendenziell gleiches Systemverhalten festgestellt werden konnte.

## 7 LITERATUR

- EBGEO (2009): Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), in Vorbereitung
- Fahmy, G. (2008): Lateral Spreading in Basal Reinforced Embankments Supported by Pile-like Elements; Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 20
- Heitz, C. (2006): Bodengewölbe unter ruhender und nicht ruhender Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungseinlagen aus Geogittern; Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 19
- Heitz, C. / Kempfert, H.-G. (2007): Bewehrte Erdkörper über Pfählen unter ruhender und nicht ruhender Belastung; Bauingenieur, Heft 9, S. 380-387

- Keil, S. (1995): Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmeßstreifen; Cuneus Verlag, Zwingenberg a. d. Bergstr.
- Kempfert, H.-G. / Heitz, C. / Gebreselassie, B. (2006a): Versuchsbericht zum F+E Vorhaben: Modellversuche "geokunststoffbewehrte Erdschichten über Pfählen" zur Untersuchung des Einflusses der Produktstruktur; Teil 1, unveröffentlicht
- Kempfert, H.-G. / Heitz, C. / Gebreselassie, B. (2007): Horizontalbewehrung über Pfählen; 5. Geokunststoff-Kolloquium, 25.01.-26.01.2007, Bad Grund, S. 23-31
- Kempfert, H.-G. / Lüking, J. / Gebreselassie, B. (2006b): Versuchsbericht zum F+E Vorhaben: Modellversuche "geokunststoffbewehrte Erdschichten über Pfählen" zur Untersuchung des Einflusses der Produktstruktur; Teil 2, unveröffentlicht
- Kempfert, H.-G. / Lüking, J. / Gebreselassie, B. (2008): Load Transfer Mechanism of Geogrids in Pile Supported Embankments; Proceedings of the 11<sup>th</sup> Baltic Sea Geotechnical Conference, Gdansk (Poland), Vol. 1, p. 239-246
- Kempfert, H.-G. / Stadel, M. (1995): Zum Tragverhalten geokunststoffbewehrter Erdbauwerke über pfahlähnlichen Traggliedern; Geotechnik Sonderheft zur 4. Informations- und Vortragsveranstaltung über Kunststoffe in der Geotechnik der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), München, S. 146-152
- Rendulic, L. (1938): Der Erddruck im Straßenbau und Brückenbau; Forschungsarbeiten aus dem Strassenwesen, Band 10, Berlin
- Zaeske, D. (2001): Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen; Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 10
- Zaeske, D. / Kempfert, H.-G. (2002): Berechnung und Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über punkt- und linienförmigen Traggliedern; Bauingenieur, Band 77, S. 80-86

### Literaturangabe:

- Kempfert, H.-G. / Lüking, J. / Gebreselassie, B. (2009): Dimensionierung von bewehrten Erdkörpern auf punktförmigen Traggliedern bei besonderen Randbedingungen; 11. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München, Geotechnik Sonderheft 2009, S. 35-43