

M Geogitter zur Lastverteilung und zum Ausgleich von unterschiedlichen Setzungen beim Überbauen von Deponien und Altlasten

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert,
Dipl.-Ing. Claas Heitz, Kassel

Geogitter zur Lastverteilung und zum Ausgleich von unterschiedlichen Setzungen beim Überbauen von Deponien und Altlasten

1 Einleitung

Im Zuge der Rekultivierung und Nutzbarmachung von Deponie- und Altlastenflächen, insbesondere bei Industriestandorten, kann es erforderlich sein bzw. ist es erwünscht, diese Flächen zu überbauen. Je nach vorgesehener Nutzung kann es dabei auch zur konzentrierten Lasteinleitung in die unterlagernden Ablagerungen kommen. Bild 1 zeigt dazu mögliche Anwendungsformen.

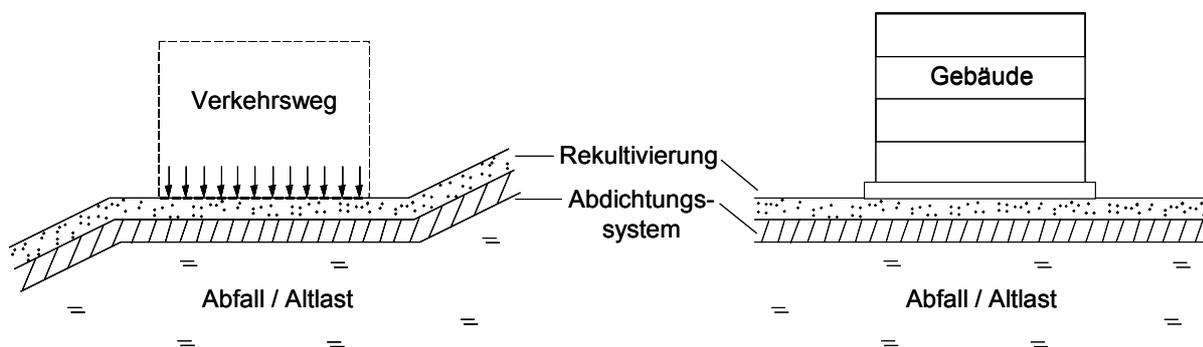


Bild 1: Mögliche Überbauungsformen von Deponie- und Altlastenflächen (schematisch)

In dem vorliegenden Beitrag wird eine Gründungsform aus den Elementen:

- pfahlartige Tragglieder
- horizontale Geogitterlagen in Verbindung mit
- einer mineralischen hoch scherfesten Tragschicht

auf die Fragestellung angewendet. Dabei werden zunächst Anwendungsformen als möglich angesehen, bei denen keine Kombinationsabdichtungen als Oberflächenabdichtung für die Altlast vorliegen, sondern diese als mineralische Abdichtung ausgeführt ist.

Für die Gründungsform dargestellt werden:

- die bodenmechanische Wirkungsweise
- konstruktive Gesichtspunkte
- die Anordnung der Geogitter und
- die Nachweise zum Spannungs-Verformungsverhalten.

Weiterhin werden Hinweise für die spezielle Anwendungsform bei Deponien und Altlasten gegeben.

Die Ausführung von geokunststoffbewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen wurde bisher zur Ertüchtigung von gering tragfähigem oder setzungsempfindlichem Untergrund (Weichschichten – hier Abfall) eingesetzt und ermöglicht eine setzungsarme Gründung von Bauwerken.

Der Grundgedanke des Verfahrens besteht darin, dass setzungsempfindliche Bodenschichten entlastet werden, ohne dass die ursprüngliche Bodenstruktur grundsätzlich verändert werden muss. Dies wird durch pfahlartige Gründungselemente erreicht, die in rasterförmigen Abständen bis in tiefere tragfähige Bodenschichten abgeteuft werden und auf die eine mineralische Tragschicht, ggf. in Verbindung mit einer Geokunststoffbewehrung, aufgebracht wird. Die Entlastung des anstehenden Bodens resultiert aus einer Spannungsumlagerung in der aufgehenden Tragschicht (Gewölbewirkung), die sich auf den pfahlartigen Gründungselementen abstützt sowie einer Membranwirkung der Geokunststoffbewehrung, die die mineralische Tragschicht zusätzlich stabilisiert.

Insbesondere im Verkehrswegebau hat sich das Bauverfahren in den letzten Jahren als Maßnahme zur Untergrundverbesserung bewährt. Bild 2 zeigt schematisch die Konstruktion und die Wirkungsweise.

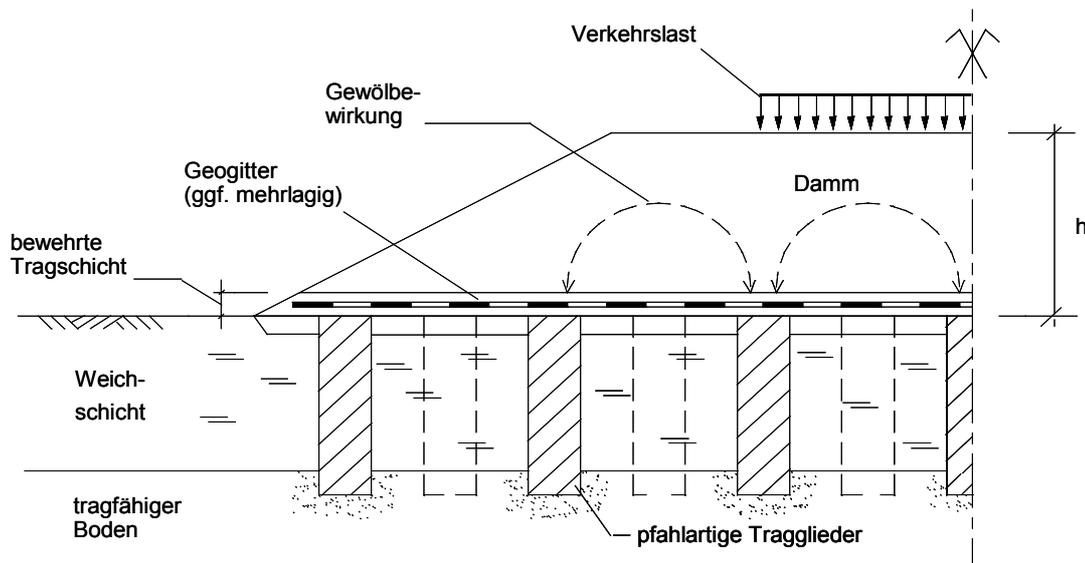


Bild 2: Gründungsverfahren geokunststoffbewehrte mineralische Tragschicht über Pfahlelementen als Beispiel im Verkehrswegebau

Die Konstruktion lässt sich an wechselnde Untergrundverhältnisse leicht anpassen, da das Gründungsverfahren sehr flexibel ausgeführt werden kann. Weitere bekannte Anwendungsfälle sind z.B. bewehrte Bodenaustauschkörper und Tankgründungen. Für die Überbauung von Deponien und Altlasten ist dieses Verfahren ebenfalls denkbar. Hierbei sind besonders folgende Punkte konstruktiv zu lösen:

- Gestaltung der Abdichtungssysteme zwischen den pfahlartigen Elementen
- Interaktion und Verformungsverträglichkeit der Konstruktionselemente einschließlich
- Langzeitbetrachtungen.

2 Wirkungsweise der Gründungskonstruktion und Berechnungsmodelle

2.1 Allgemeines

Statisch kann die Wirkungsweise des Gründungssystems hinsichtlich der Lastumlagerung auf die Tragglieder nach verschiedenen Modellen erfasst werden. In einfachen Fällen wird die Anwendung eines Gewölbemodells empfohlen, wie es z.B. in [1] und [2] erläutert sowie empirisch und theoretisch nachgewiesen wurde. Diese einfachen Modelle liefern nach vorliegenden Erfahrungen eher konservative Ergebnisse. Weitergehende Untersuchungen mit Modellen finden sich in [3] und [4] wieder. Diese werden im Folgenden näher betrachtet, sie werden auch in die neue Ausgabe der EBGEO [5] als Berechnungsmodell einfließen. Als pfahlartige Tragglieder können dabei z.B. Fertigrammpfähle, vermörtelte Stopfsäulen u.s.w. verwendet werden.

2.2 Gewölbewirkung der Tragschicht

Durch das Einbringen der pfahlartigen Tragglieder in den gering tragfähigen Untergrund wird im Bereich der Pfahlköpfe eine steifere Auflagerung der mineralischen Tragschicht erzeugt, was mit einer Spannungskonzentration über den Pfählen und einer Entlastung der Weichschicht einhergeht. Die Spannungsunterschiede in der Aufstandsebene der mineralischen Tragschicht führen zu Scherbeanspruchungen bzw. Drehungen der Hauptspannungsrichtungen in der Tragschicht, so dass sich ein vom Erdruchdruck abweichender Spannungszustand einstellt. Da sich dabei die Hauptdruckspannungen in Form eines Gewölbebogens einstellen, wird diese Spannungsumlagerung auch als Gewölbewirkung bezeichnet, siehe Bild 3.

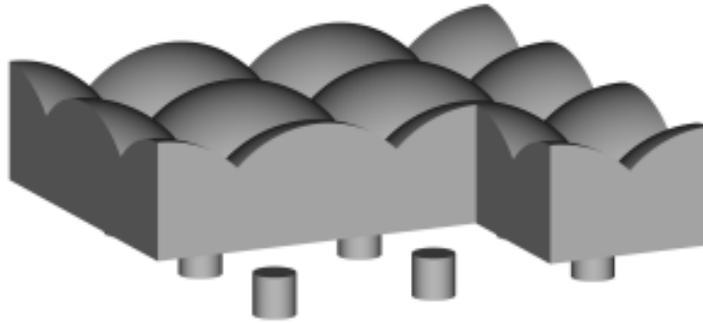


Bild 3: Räumliche Traggewölbe über den Pfahlelementen

Während sich über den Pfahlelementen die vertikalen Lasten konzentrieren nimmt die Vertikalbelastung auf die Zwischenräume ab, die Weichschicht wird entlastet. Der Grad der Lastumlagerung ist dabei von den Steifigkeitsunterschieden zwischen den Pfahlelementen und dem Boden sowie von der Scherfestigkeit der Dammschüttung abhängig.

Für das Berechnungsmodell wird ein System aus mehreren Gewölbeschalen berücksichtigt, die in Bild 4 (links) in der Ebene dargestellt sind.

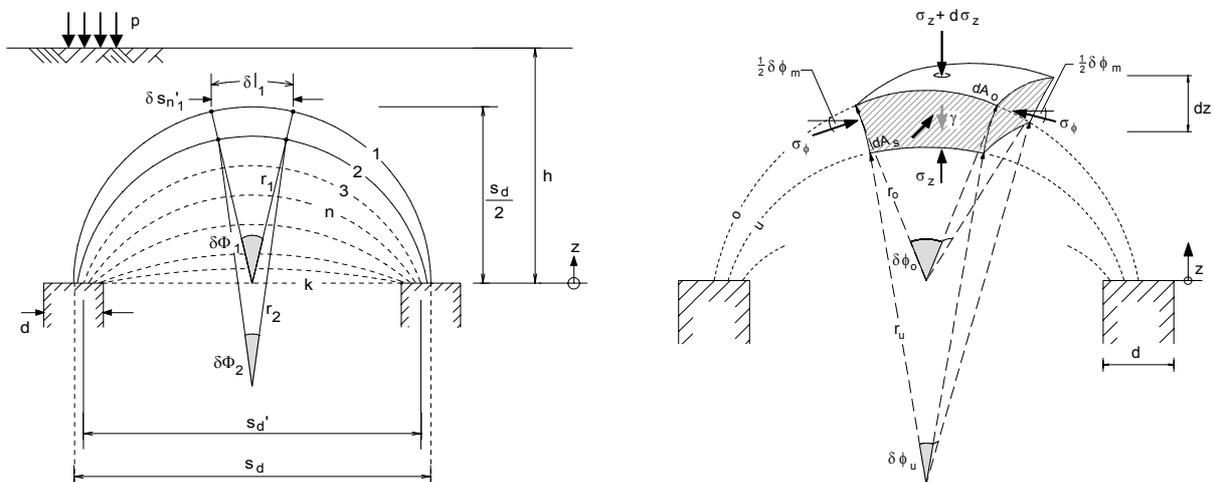


Bild 4: Theoretisches Gewölbemodell nach [3], [4]

Gleichgewichtsbetrachtung in radialer Richtung am räumlichen System (Bild 4, rechts) führt zu einer DGL (1), deren Lösung eine Funktion der senkrechten Spannung σ_z [z] innerhalb des Gewölbesystems liefert.

$$-\sigma_z \cdot dA_u + (\sigma_z + d\sigma_z) \cdot dA_o - 4 \cdot \sigma_\phi \cdot dA_s \cdot \sin\left(\frac{\delta\Phi_m}{2}\right) + \gamma \cdot dV = 0. \quad (1)$$

Für die Bereiche oberhalb der Gewölbeausbildungen wird eine mit der Auflast zunehmende Spannungsverteilung angenommen. Die auf die Weichschicht wirksame Spannung σ_{z0} ergibt sich durch die Grenzwertbetrachtung $z \rightarrow 0$; Gl. (2) nach [3], [4]:

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

Mit den Bezeichnungen:

p äußere Belastung [kN/m²] auf die Tragschicht;

h Tragschichthöhe [m];

s_d Abstand der Pfähle [m] in der Schnittlinie, in der das Gewölbe seine maximale Höhe erreicht

t Gewölbehöhe [m]: bei $h > s_d/2$ ist $t = s_d/2$ und für $h \leq s_d/2$ ist $t = h$ zu setzen;

d Pfahldurchmesser [m];

γ Wichte der Tragschicht [kN/m³];

und den Abkürzungen:

$$\chi = \frac{d \cdot (K_{krit} - 1)}{\lambda_2 \cdot s_d}, \quad \lambda_1 = \frac{1}{8} \cdot (s_d - d)^2, \quad \lambda_2 = \frac{s_d^2 + 2 \cdot d \cdot s_d - d^2}{2 \cdot s_d^2}, \quad K_{krit} = \tan^2 \left[45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right]$$

Vereinfachend kann σ_{z0} statt aus Gl. (2) auch direkt aus dimensionslosen Diagrammen abgelesen werden, wie sie in Bild 5 dargestellt sind.

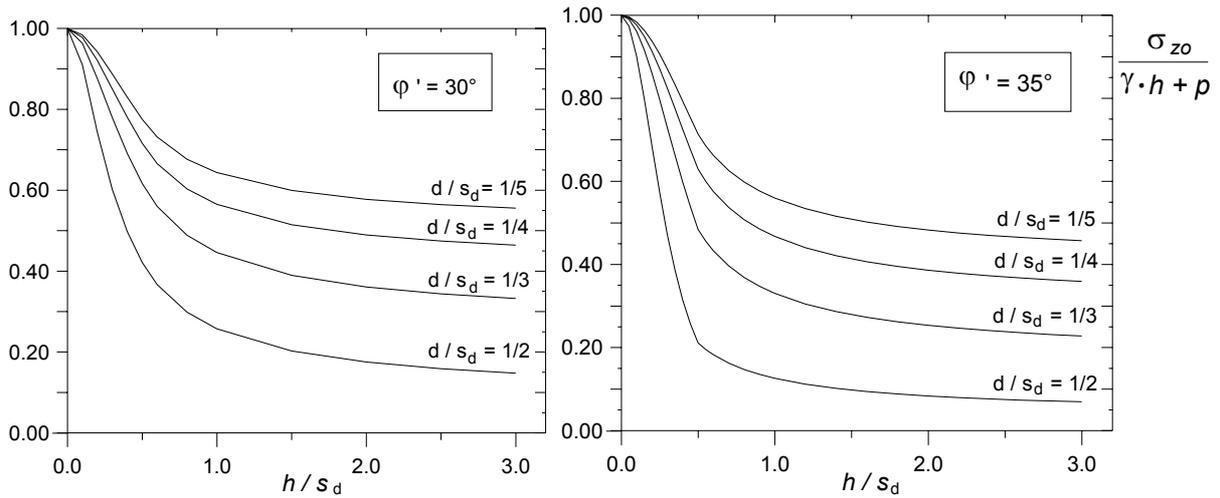


Bild 5: Lotrechte Spannung σ_{zo} auf die Weichschicht bzw. Geokunststoffbewehrung bei pfahlartigen Traggliedern, aus [3], [4]

Bild 6 zeigt einen Vergleich der analytischen Spannungsverteilung mit Messwerten aus Modellversuchen.

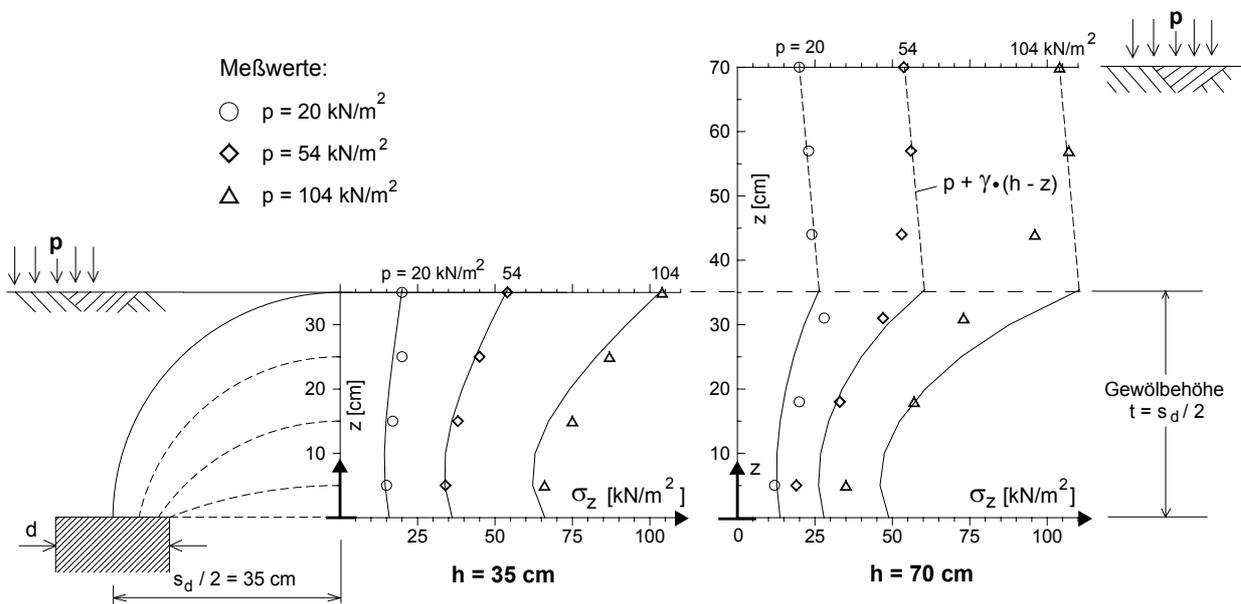


Bild 6: Vertikale Bodenspannung in der Tragschicht zu verschiedenen äußeren Belastungen auf die Tragschichtoberkante. Vergleich: Theorie – Modellversuch, für Tragschichthöhen $h = 35$ und 70 cm, aus [3]

2.3 Membranwirkung der Geokunststoffbewehrung

Wird in der mineralischen Tragschicht eine ein- oder mehrlagige Geokunststoffbewehrung, i.d.R. aus hochzugfesten Geogittern, ausgeführt, so wird die Tragwirkung des Systems zusätzlich gesteigert. Die Setzungsdifferenzen zwischen Pfahlelementen und nachgiebigem Untergrund in der Ebene der Dammaufstandsfläche bewirken Dehnungen und Zugkräfte in den verlegten Geokunststoffen. Die Geokunststoffe spannen sich wie eine Membran über die weitgehend unnachgiebigen Pfahlelemente, was zu einer weiteren Umlagerung der vertikalen Lasten auf die Pfahlelemente führt und zu geringeren Setzungen der Gesamtkonstruktion.

Für das Berechnungsmodell wird dabei angenommen, dass die Hauptbeanspruchungen in einer Geokunststoffbewehrung aus Geogittern in einem Bewehrungsstreifen der Breite b stattfinden, der in Tragrichtung des Geogitters benachbarte Pfähle überspannt, so dass eine ebene Betrachtung des Systems ermöglicht wird. Die Belastung auf einen Geogitterstreifen wird als Streckenlast q_z aus der lotrechten Bodenspannung σ_{z0} nach Gl. (2), die auf die Einflussfläche A_L im Bewehrungshorizont wirksam ist, abgeleitet. Die stützende Wirkung der Tragglieder und des Bodens kann dabei durch Bettungsmodule $k_{s,p}$ für die Tragglieder und $k_{s,w}$ für den Boden erfasst werden, siehe Bild 7.

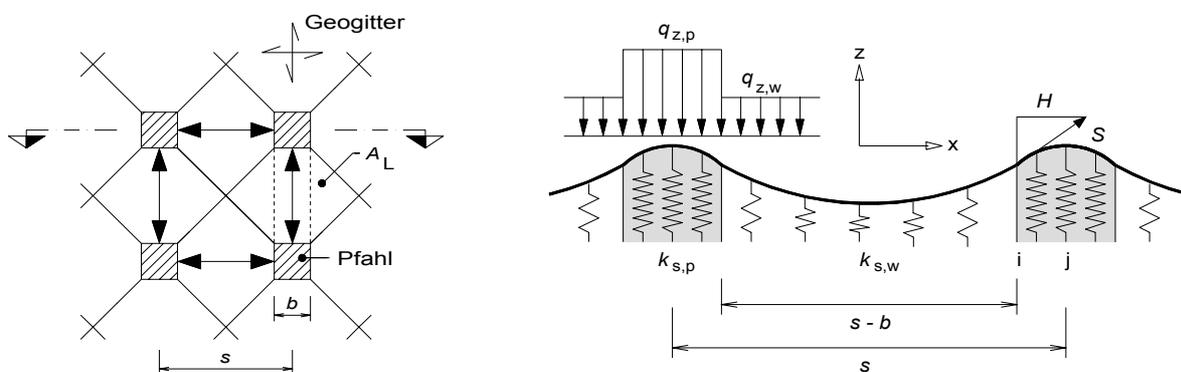


Bild 7: Lasteinzugsflächen und ebenes Tragsystem zur Membranwirkung einer Geokunststoffbewehrung aus Geogittern

Die Beanspruchung der Bewehrung wird durch die DGL (3) des elastisch gebetteten Seils ausgedrückt, in der neben der Einsenkung z die Horizontalkraft H nach Bild 6 als Unbekannte auftritt.

$$\frac{d^2 z}{dx^2} = \frac{q_z}{H} + \frac{k_s \cdot z}{H} \quad (3)$$

Die Lösung der DGL ergibt eine Funktion für die horizontale Komponente der Geogitterzugkraft, siehe Gl. (4). Die Seilkraft bzw. die Beanspruchung des Geokunststoffes berechnet sich schließlich aus Gl.(5) in direkter Abhängigkeit zu den Geokunststoffdehnungen.

$$H = \frac{2 \cdot \int_0^i \sqrt{1 + z_W'^2} dx + 2 \cdot \int_i^j \sqrt{1 + z_P'^2} dx - l_0}{2 \cdot \int_0^i (1 + z_W'^2) dx + 2 \cdot \int_i^j (1 + z_P'^2) dx} \cdot J \quad (4)$$

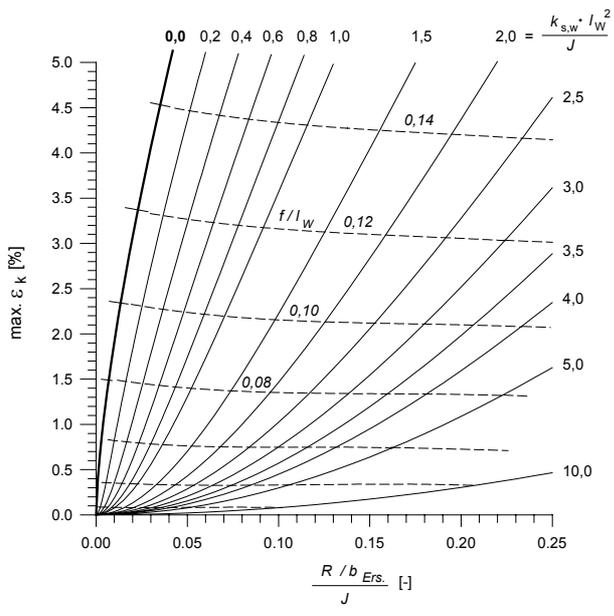
$$S[x] = E_{s,k}[x] = \varepsilon[x]/J = H \cdot \sqrt{1 + z'^2[x]} \quad (5)$$

Für den Sonderfall, dass die Steifigkeit der Tragglieder wesentlich höher als die des Bodens, bzw. der Weichschicht ist, kann die Verformung z_p näherungsweise vernachlässigt werden (starre Auflagerung), was etwa bei einem Steifigkeitsverhältnis, ausgedrückt über den Bettungsmodul, von $k_{s,p} / k_{s,w} \geq 100$ zutrifft. Dieses Steifigkeitsverhältnis wird in der Regel von allen mit Bindemitteln verfestigten Traggliedern, die in natürlich gewachsenen Boden eingebracht sind, erfüllt.

Eine explizite Lösung von Gl. (4) kann nicht angegeben werden, da die vertikale Absenkung über den Traggliedern z_p und über dem Boden z_w wieder von der Kraft H abhängig ist. Die vereinfachte Bestimmung der Geokunststoffbeanspruchung erfolgt darum über das dimensionslose Bemessungsdiagramm in Bild 8 aus [3], [4].

In Abhängigkeit der Dehnsteifigkeit J der Bewehrung, der resultierenden Belastung R und dem Bettungsmodul k_s der Weichschicht kann aus dem Bemessungsdiagramm die maximale Dehnung in der Bewehrung sowie das Stichmaß f abgelesen werden. Bei Geogittern mit zwei Tragrichtungen in x - und y - Richtung sind Systeme in x - und y -Richtung zu untersuchen, die jeweils mit der Streckenlast $q_{z,w}[x]$ und $q_{z,w}[y]$ bzw. deren Resultierenden R_x und R_y über die lichte Weite $l_{w,x} = (s_x - b_{Ers.})$ und $l_{w,y} = (s_y - b_{Ers.})$ belastet werden. Die Dehnsteifigkeit der Bewehrung ist aus den produktspezifischen Arbeitslinien der verwendeten Geokunststoffe zu bestimmen. Die aus Bild 8 abgelesene Dehnung muss dabei mit dem für die Berechnung angenommenen Wert J , ggf. unter Berücksichtigung einer zeitlichen Entfestigung infolge Kriechen, verträglich sein. Bei einer mehrlagigen Bewehrung, die im dichten Abstand über den Traggliedern verlegt ist, können die Kräfte näherungsweise im Verhältnis der Dehnsteifigkeiten aufgeteilt werden.

Rechteckraster	Dreieckraster
$A_{Lx} = \frac{1}{2} \cdot (s_x \cdot s_y) - \frac{d^2}{2} \cdot \operatorname{atan} \left[\frac{s_y}{s_x} \right]$ $A_{Ly} = \frac{1}{2} \cdot (s_x \cdot s_y) - \frac{d^2}{2} \cdot \operatorname{atan} \left[\frac{s_x}{s_y} \right]$	$A_{Lxy} = \frac{1}{2} \cdot s_x \cdot s_y - \frac{d^2}{4} \cdot \pi$
$R_x = A_{Lx} \cdot \sigma_{zo}$ $R_y = A_{Ly} \cdot \sigma_{zo}$	$R_x = \frac{J_x}{J_x + J_y} \cdot A_{Lxy} \cdot \sigma_{zo}$ $R_y = \frac{J_y}{J_x + J_y} \cdot A_{Lxy} \cdot \sigma_{zo}$



Größe	Dimension	Bezeichnung
$k_{s,w}$	[kN/m ³]	Bettungsmodul nach Abschnitt 7
l_w	[m]	lichte Weite = (s-b)
J	[kN/m]	Dehnsteifigkeit der Geokunststoffbewehrung
R	[kN]	resultierende Belastung
max. ϵ	[kN/m]	maximale Dehnung in der Bewehrung

Bild 8: Maximale Dehnung der Bewehrung bei elastischer Bettung über der Weichschicht und starrer Stützung auf den pfahlartigen Elementen als Grundlage für die Zugkraftermittlung in der Bewehrung, aus [3], [4]

In Böschungsbereichen entstehen infolge der fehlenden seitlichen Stützung des bewehrten Erdkörpers Horizontalkräfte („Spreizkräfte“) in dessen Aufstandsfläche. Zur Vermeidung planmäßiger Horizontalbelastungen auf die Tragglieder, empfiehlt sich die rechnerische Zuweisung der Spreizkräfte auf die Geokunststoffbewehrung. Über Verbundwirkung wird eine zusätzliche Zugkraft ΔE_k in die Bewehrung geleitet, die näherungsweise aus dem aktivierten Erddruck entsprechend Bild 9 abgeleitet und zu den Beanspruchungen aus der Membranwirkung superpositioniert wird. Vergleichsberechnungen zeigen, dass mit dieser Vorgehensweise die Spreizwirkung auf der sicheren Seite liegend abgedeckt werden kann [2], [3].

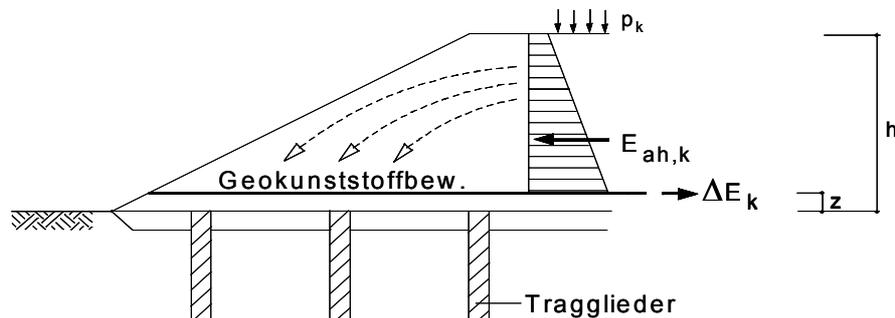


Bild 9: Zusätzliche Beanspruchungen der Geokunststoffbewehrung bei Dämmen

3 Konstruktive Gesichtspunkte

Auf Grund vorliegender Erfahrungen, aus baupraktischen Gründen und wegen der Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens wird die Einhaltung folgender konstruktiver Gesichtspunkte empfohlen:

Tragglieder

Die Entlastung setzungsempfindlicher Bodenschichten nimmt mit dichter werdendem Raster, bzw. größerem Querschnitt der Tragglieder zu. Darum wird empfohlen, den Achsabstand s und den Durchmesser d der Tragglieder wie folgt zu wählen:

- $s \leq 2,5$ m bei vorwiegend ruhender Belastung
- $s \leq 2,0$ m bei hohen veränderlichen Beanspruchungen
- $d/s \geq 0,2$

Auf die Gewölbeausbildung in der Tragschicht wirkt sich ein Rechteckraster vorteilhaft aus, da der maßgebliche Pfahlabstand s_d bei gleicher Anzahl der Tragglieder geringer als bei ei-

nem Dreieckraster ist, siehe Bild 8. Aus fahrdynamischen Gründen wird aber oftmals Letzteres bevorzugt.

Geokunststoffbewehrung

Die größte Wirksamkeit erreicht eine Geokunststoffbewehrung, wenn sie möglichst dicht über den starren Köpfen der Tragglieder, d.h. in der Aufstandsebene der mineralischen Tragschicht, verlegt wird. Im Verhältnis zur Untergrundsteifigkeit kann die Steifigkeit der Tragglieder dann in der Regel, wie im Berechnungsmodell vorausgesetzt, vernachlässigt werden ($k_{s,p} \rightarrow \infty$).

Eine direkte Auflagerung der untersten Bewehrungslage auf den Pfahlköpfen sollte jedoch vermieden werden, um die Gefahr des Abscherens der Bewehrung an den Pfahlkopfrändern zu vermindern. Darum wird empfohlen, nach dem Herstellen der Tragglieder eine Ausgleichsschicht über der Aufstandsfläche des bewehrten Erdkörpers mit einer Dicke von 10-20 cm zu erstellen, die ein Mindestverformungsmodul von $E_{v2}=20 \text{ MN/m}^2$ aufweist. Auf dem Planum der Ausgleichsschicht werden die Bewehrungsgeokunststoffe verlegt.

Bei zwei Bewehrungslagen sollte eine gut verdichtete Bodenschicht von 15 bis 30 cm Dicke zwischen beiden Bewehrungslagen angeordnet werden.

Ferner sollte die Bewehrung mindestens eine Kurzzeitzugfestigkeit $F_{Bi,ko} \geq 60 \text{ kN/m}$ einhalten bei einer zugehörigen Dehnung $\leq 12\%$.

Überlappungen von biaxialen Bewehrungen sind nur über den Stützflächen zulässig und sind in Hauptzugrichtung zu vermeiden. Die Breite der Überlappungen sollte dabei wenigstens so groß sein wie der Ersatzdurchmesser d_{Ers} aus den Stützflächen.

Empfohlen wird eine ein- oder zweilagige Bewehrung aus Geogittern.

Mineralische Tragschicht

Die Lastumlagerung in der mineralischen Tragschicht ist direkt abhängig von der Scherfestigkeit des eingesetzten Tragschichtmaterials. Die Verwendung von Böden hoher Scherfestigkeit bzw. gute Verdichtung beim Einbau wirkt sich daher vorteilhaft auf die Tragwirkung des Gesamtsystems aus und geht auch in die Berechnungen mit ein. Empfohlen wird darum den Erdkörper aus nichtbindigen Böden herzustellen, die einen inneren Reibungswinkel $\varphi_k \geq 25^\circ$ aufweisen.

Da sich eine Spannungsumlagerung maßgeblich bis in eine Tragschichthöhe $\frac{1}{2} \cdot s_d$ oberhalb der pfahlartigen Tragelemente einstellt (vgl. Bild 6), sollte dieses Maß für die baupraktische Anwendung als Mindesthöhe h der mineralischen Tragschicht eingehalten werden. Für hohe veränderliche Beanspruchungen wird eine größere Tragschichthöhe empfohlen.

4 Nachweise zum Spannungs-Verformungs-Verhalten

Erforderlich sind nach DIN 1054: 2003-01 der Nachweis der Tragfähigkeit für den Grenzzustand 1 B und 1 C sowie der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit.

4.1 Nachweis der Tragfähigkeit

Der Nachweis der Tragfähigkeit nach DIN 1054: 2003-01 unterscheidet zwischen den Nachweisen für die einzelnen Bauteile der Konstruktion und dem Nachweis der Standsicherheit am Gesamtsystem.

Grenzzustand 1 B

Für die einzelnen Bauteile ist der Nachweis für den Grenzzustand 1 B zu erbringen. Nachzuweisen sind die Geokunststoffbewehrung und die Tragglieder. Hierfür werden die Beanspruchungen, die allgemein mit E bezeichnet sind, als charakteristische Werte E_k zugrunde gelegt und daraus durch Multiplikation mit den Teilsicherheitsbeiwerten γ für die Einwirkungen nach Tabelle 2 der DIN 1054: 2003-01 die Bemessungswerte der Beanspruchungen E_d nach Gleichung (6) bestimmt.

$$E_d = E_{G,k} \cdot \gamma_G + (E_{G+Q,k} - E_{G,k}) \quad (6)$$

Der Nachweis der Tragfähigkeit im Grenzzustand 1B ist erfüllt, wenn die Grenzzustandsgleichung (7) eingehalten wird, wobei R_d die Bemessungswerte der Widerstände sind.

$$E_d \leq R_d \quad (7)$$

Der Nachweis der Geokunststoffbewehrung für den Grenzzustand 1 B lautet somit:

$$R_{B,d} \leq E_{M,d} + \Delta E_d \quad (8)$$

Darin bedeuten:

$E_{M,d}$: Bemessungswert der Beanspruchung infolge Membranwirkung nach Gl.(5),(6)

ΔE_d : Bemessungswert der Beanspruchung infolge Spreizwirkung

$R_{B,d}$: Bemessungsfestigkeit der Geokunststoffes

Der Nachweis der Tragglieder für den Grenzzustand 1 B lautet:

$$R_d \leq E_{s,d} \quad (9)$$

Darin bedeuten:

$E_{s,d}$: Bemessungswert der Beanspruchung nach Gl.(5)

R_d : Bemessungswert der Tragfähigkeit der Tragglieder entsprechend der jeweiligen Normen/Zulassungsbescheide

Grenzzustand 1 C

Der Nachweis im Grenzzustand 1 C beinhaltet eine Untersuchung des Gesamtsystems. Hierbei sind mögliche Gleitlinien, welche die Bewehrungslagen und die Tragglieder schneiden, bzw. lokale Bruchmechanismen im Böschung- und Fußbereich bei Dammbauwerken zu untersuchen. Bei Gleitflächen, welche die Tragglieder bzw. die Geokunststoffbewehrung schneiden, können die Widerstände der Bauteile als zurückhaltende Kräfte berücksichtigt werden. Dabei sind die Beanspruchungen mit den Bemessungswerten der Einwirkungen zu ermitteln und den Bemessungswerten der Widerstände gegenüberzustellen, näheres siehe DIN 1054: 2003-01.

4.2 Nachweis der Gebrauchstauglichkeit

Die Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit ergeben sich aus den einzuhaltenden Verformungen im System. Die Gesamtverformungen des Systems setzen sich dabei zusammen aus den Verformungen im bewehrten Erdkörper und den Verformungen der Tragglieder und des Untergrundes. Diese Verformungen können einzeln oder insgesamt betrachtet bzw. für einen Nachweis zugrunde gelegt werden. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist von besonderer Bedeutung, wenn von den geometrischen Empfehlungen in Abschnitt 3 abgewichen wird.

Verformungen im bewehrten Erdkörper

Während der schichtweisen Herstellung des bewehrten Erdkörpers kann der Geokunststoff eine bleibende Vordehnungen erhalten, die aber für die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit nicht maßgebend ist. Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sind i.d.R. nur die Verformungen im bewehrten Erdkörper maßgebend, die nach der Herstellung unter den Einwirkungen auftreten. Zusätzlich sind die Kriechdehnungen nach Herstellung des bewehrten Erdkörpers bis Ende der Gebrauchsdauer zu berücksichtigen.

Verformungen der Tragglieder

Die Verformungen der Tragglieder können aus Ergebnissen von Probelastungen, Aufzeichnungen bei Herstellung oder Erfahrungswerten bei vergleichbaren Baugrundverhältnissen und Einwirkungen abgeschätzt werden. Darüber hinaus stehen traggliebspezifische analytische Methoden zur Verfügung, um die Verformungen abzuschätzen. Ferner kann eine Absicherung durch die Anwendung der Beobachtungsmethode nach DIN 1054: 2003-01 oder durch numerische Verfahren erfolgen.

Nachweis der Gesamtverformungen

Derzeit liegen abgesicherte analytische Verfahren für eine Prognose der Gesamtverformungen des Systems nicht vor. Die Gesamtverformungen können näherungsweise durch numerische Verfahren (siehe [3]) ermittelt werden. Für die Absicherung der Gebrauchstauglichkeit wird die Anwendung der Beobachtungsmethode nach DIN 1054: 2003-01 empfohlen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die gewonnenen Erkenntnisse zum Tragverhalten des Systems „geokunststoffbewehrte Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen“ sind in [3] und (4) ausführlich dargestellt und für eine praktische Anwendung aufbereitet. Diese Erkenntnisse werden derzeit in die 2. Auflage der „Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO“ [5] eingearbeitet.

Weiterer Forschungsbedarf besteht noch in der Untersuchung des Einflusses von veränderlichen oder zyklischen Einwirkungen auf das System. Während das vorgestellte Berechnungsmodell auf der Grundlage von statischen Einwirkungen abgeleitet wurde, sind die Auswirkungen von zyklischen oder veränderlichen Lasten, denen z.B. im Verkehrswegebau eine besondere Bedeutung zukommt, auf das Tragsystem noch nicht abschließend erforscht.

Aus großmaßstäblichen Modellversuchen ist lediglich bekannt, dass sich unter Lastwechseln die Gewölbewirkung deutlich verschlechtert, was bei bewehrten Tragschichten zu einem Durchstanzen der Pfähle durch die Geokunststoffbewehrung führen kann und mit großen Verformungen verbunden ist. Das sich für den statischen Zustand ausbildende Tragsystem (Gewölbeausbildung in der Tragschicht und Membranwirkung der Geokunststofflage) lässt sich darum nicht direkt auf ein System unter periodischen Lasteinwirkungen übertragen. In [2] wird empfohlen, den veränderlichen Anteil durch eine erhöhte statische Ersatzlast abzubilden, was nach den vorliegenden Erfahrungen auch zu einer auf der sicheren Seite liegen-

den Bemessung der Gründungskonstruktion führt. Ein Ziel muss jedoch die genauere Angabe von Berechnungsempfehlungen bzw. die Erweiterung der vorhandenen Berechnungsverfahren im Hinblick auf zyklische Einwirkungen sein.

Für die hier angedachte Anwendung des Gründungssystems bei der Überbauung von Depo- nien und Altlasten sind für den konkreten Anwendungsfall

- die konstruktive Durchbildung der Oberflächenabdichtung bei der Pfahldurchdringung
 - die richtige Auswahl der Pfahlelemente in der Umgebung Altlast/Abfall und
 - Fragen der Langzeitbeständigkeit der Bewehrungselemente
- einer besonderen Aufmerksamkeit zu unterziehen.

6 Literatur

- [1] *Hewlett, W.J.; Randolph, M.F.; Aust, M.I.E. (1988):* Analysis of piled embankments. Ground Engineering Vol.21, pp. 12-17
- [2] *Kempfert, H.-G.; Stadel, M.; Zaeske, D. (1997):* Berechnung von geokunststoff- bewehrten Tragschichten über Pfahlelementen. Bautechnik Jahrgang 75, Heft 12, pp. 818-825.
- [3] *Zaeske, D. (2001):* Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten minerali- schen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geo- technik, Universität Gh-Kassel, Heft 10
- [4] *Zaeske, D; Kempfert, H.-G. (2002):* Berechnung und Wirkungsweise von unbewehr- ten und bewehrten mineralischen Tragschichten auf punkt- und linienförmigen Trag- gliedern. Bauingenieur Band 77, Februar 2002
- [5] *EBGEO (2002):* Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen - EBGEO. 2. Auflage, Entwurf Oktober2002 (in Vorbereitung)