

D. Zaeske und H.-G. Kempfert

Berechnung und Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über punkt- und linienförmigen Traggliedern

Zusammenfassung Die Ausführung von mineralischen Tragschichten über punkt- oder linienförmigen Traggliedern ermöglicht eine setzungsarme Gründung von Bauwerken und wurde insbesondere im Verkehrswegebau bereits mehrfach mit Erfolg eingesetzt [1]. Die Wirkungsweise beruht auf einer Entlastung von anstehenden, setzungsempfindlichen Bodenschichten infolge einer Gewölbewirkung in der mineralischen Tragschicht, bei der die Lasten vorzugsweise in die punkt- oder linienförmigen Traggliedern geleitet werden, sowie einer Membranwirkung von Geokunststoffen, die als Bewehrungselemente in der Tragschicht verlegt sind. Das Trag- und Verformungsverhalten dieser Verbundkonstruktion wurde an großmaßstäblichen Modellversuchen und durch numerische Berechnungen nach der FEM untersucht und daraus ein bodenmechanisches Tragmodell abgeleitet, mit dem die Gewölbewirkung berechnet werden kann. Des Weiteren wird ein Tragmodell für die Membranwirkung vorgelegt, das eine Vorhersage der Beanspruchungen in einer Geokunststoffbewehrung aus Geogittern ermöglicht.

Calculation and behaviour of unreinforced and reinforced bearing layers over point- or lineshaped bearing elements

Abstract Reinforced bearing layers over point- or lineshaped bearing elements have proven to be an effective and economic foundation for infrastructures. They have successfully been applied in highway and railway track engineering [1]. The unloading of the poor underground results in an arching effect in the bearing layer and a membrane effect in the geosynthetics, where the loads are transferred to the bearing elements. To examine the bearing effect of the system, large scale model tests and numerical investigations with the FEM are carried out. Based on these results a theoretical model is developed, which describes the stress-distribution in the bearing layer and the membrane-effect of a geosynthetic-reinforcement.

1 Einführung

Das hier beschriebene Verfahren kann eingesetzt werden, wenn auf anstehendem, setzungsempfindlichem Untergrund ein Bauwerk in Verbindung mit mineralischen Bodenschichten aufgebracht wird und die Setzungen reduziert bzw. die Standsicherheit erhöht werden soll.

Bild 1 zeigt eine typische Ausführungsform im Verkehrswegebau.

Das System besteht aus pfehl- oder linienartigen Traggliedern, die den setzungsempfindlichen Untergrund bis in standfestere Bodenschichten durchfahren und aus einem darüber befindlichem bewehrten oder unbewehrten Bodenpaket, z. B. einem Dammkörper, der Bestandteil des Tragsystems ist und

Dr.-Ing. Dirk Zaeske

Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Hans-Georg Kempfert

Universität Kassel
FB 14 - Bauingenieurwesen
Fachgebiet Geotechnik
Mönchebergstraße 7
34125 Kassel
Fon: +49 561 804 2631
Fax: +49 561 804 2651

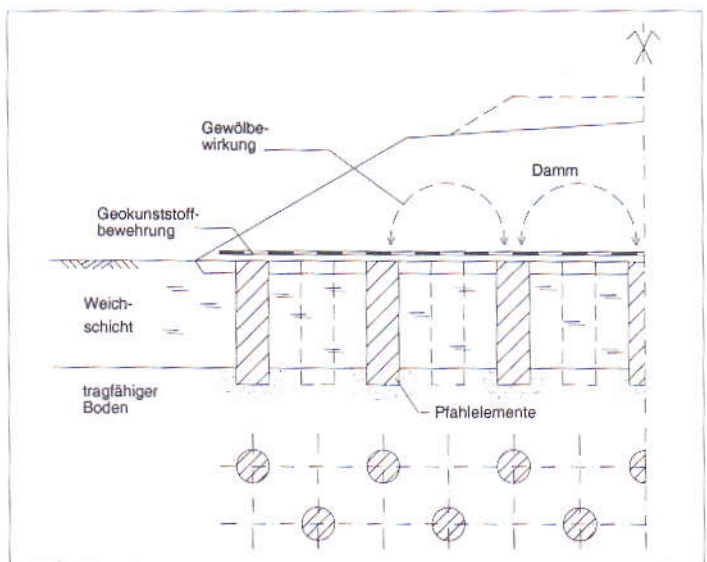


Bild 1. Ausführungsbeispiel mit pfehlartigen Traggliedern
Fig. 1. Example of an application with pile-elements

hier als mineralische Tragschicht bezeichnet wird. Die Steifigkeitsunterschiede zwischen den Traggliedern und dem umgebenden weichen Untergrund bewirken eine Spannungumlagerung bzw. Gewölbewirkung in der mineralischen Tragschicht, die zu einer Entlastung des setzungsempfindlichen Bodens führt. Eine weitere Lastumlagerung in die Tragglieder wird durch eine Geokunststoffbewehrung erreicht, die über den Traggliedern verlegt ist und sich auf diesen abstützt.

2 Modellversuche

Die Mechanismen der Gewölbewirkung und der Membranwirkung einer Geokunststoffbewehrung wurden an Modellversuchen etwa im Maßstab 1 zu 3 untersucht, bei denen eine Gruppe von vier Betonpfählen in einem weichen Untergrund eingebaut und darüber eine mineralische Tragschicht aus Sand aufgebracht wurde, siehe **Bild 2**.

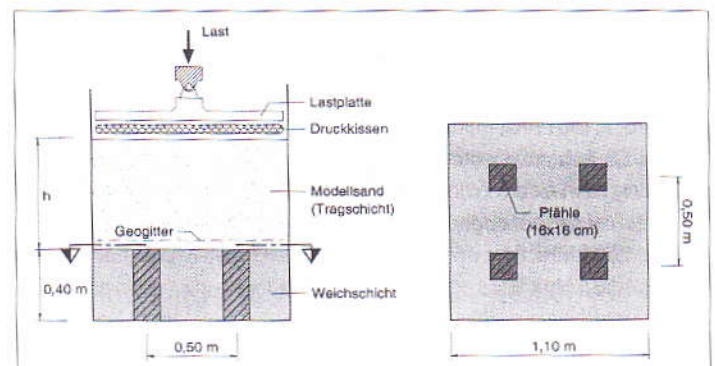


Bild 2. Grundsystem für die Modellversuche
Fig. 2. Principle of scaled model-tests

Für einige Versuche wurde die mineralische Tragschicht mit einem Geogitter bewehrt.

Die Spannungsumlagerung, bzw. Gewölbewirkung in der Tragschicht wurde durch Spannungsmessungen in der Sandschicht und Kraftmessungen in den Pfählen aufgezeichnet. Die Beanspruchungen in der Geogitterbewehrung konnten mittels Dehnungsmessstreifen und installierten Vertikalextensometern gemessen werden. Bild 3 links zeigt den eingebauten Zustand des Untergrundes aus Pfählen und umgebender Weichschicht. Zur Gewährleistung eines definierten und reproduzierbaren Lagerungszustandes wurde der Modellsand lagenweise bei vorgegebener Fallhöhe in den Versuchsstand eingerieselt (Bild 3 rechts).

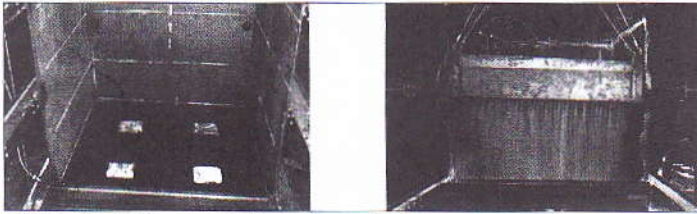


Bild 3. Durchführung der Modellversuche, Versuchseinbau
Fig. 3. Carrying out of placing in model-tests, Installation

Das Verhältnis der von den Pfählen aufgenommenen Last zu der Gesamtlast wird als Lastumlagerungswert E , siehe Gl. (1) bezeichnet. Die Auswertung der gemessenen Pfahlkräfte zeigt, dass dieses Verhältnis abhängig von der Tragschichthöhe h für alle Laststufen p einen konstanten Wert annimmt. In Bild 4 sind neben den gemessenen Pfahlkräften F_p auch die Ergebnisse von Spannungsmessungen über der Weichschicht ausgewertet, aus denen durch Gleichgewichtsbetrachtungen die theoretische Pfahlkraft rückgerechnet wurde. Die geringen Abweichungen in Bild 4 führen zu dem Schluss, dass die Spannung auf die Weichschicht innerhalb der Einflussfläche A_E weitgehend gleichmäßig verteilt sein muss und dass Reibungseinflüsse an den Kasteninnenwänden von vernachlässigbarer Größenordnung sind.

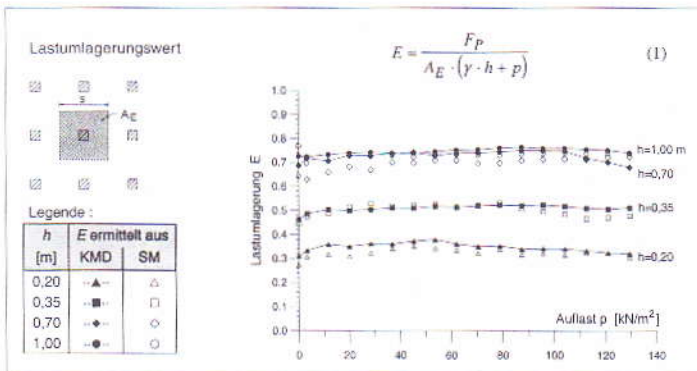


Bild 4. Lastumlagerungswert E aus Kraftmessungen (KMD) in den Pfählen bzw. Spannungsmessungen (SM) über der Weichschicht
Fig. 4. Load redistribution factor E recorded by load-cells (KMD) versus earth pressure cells (SM)

Aus Bild 5 geht der Einfluss einer zusätzlichen Geogitterbewehrung hervor, die neben einer weiteren Erhöhung der von den Pfählen aufzunehmenden Last (bzw. des Lastumlagerungswertes E) zu einer Setzungsreduktion an der Tragschichtoberkante führt. Erwartungsgemäß nimmt der Einfluss der Geokunststoffbewehrung mit höherer Dehnsteifigkeit des Geogitters zu. Dehnungsmessungen auf dem Geogitter zeigen, dass die Beanspruchungen vornehmlich in

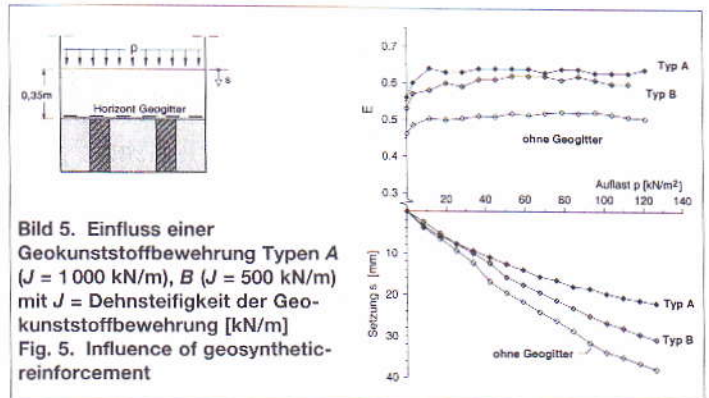


Bild 5. Einfluss einer Geokunststoffbewehrung Typen A ($J = 1\,000\text{ kN/m}$), B ($J = 500\text{ kN/m}$) mit $J =$ Dehnsteifigkeit der Geokunststoffbewehrung [kN/m]
Fig. 5. Influence of geosynthetic-reinforcement

einem Bereich zwischen gegenüberliegenden Pfählen stattfinden, siehe Bild 6, links. Die Beanspruchungen rechtwinklig zu diesen Haupttragrichtungen und im Mittelbereich des Gitters sind sehr gering. Die in y -Richtung gemessenen Dehnungen sind für eine exemplarische Laststufe im rechten Bildteil gezeigt.

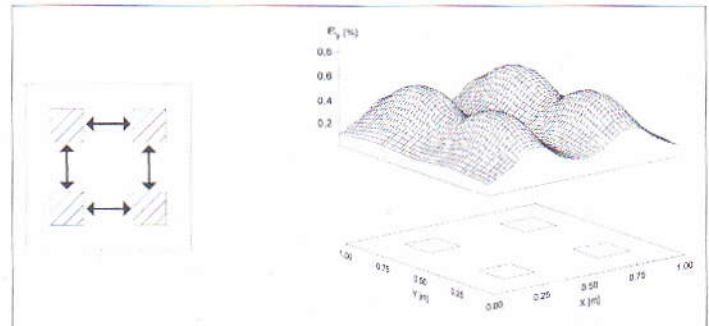


Bild 6. Tragwirkung der Geogitterbewehrung (links) und Dehnungsverteilung ϵ_y (rechts)
Fig. 6. Bearing behaviour of a geogrid-reinforcement and strains in the geogrid ϵ_y (right)

3 Berechnungsmodell zur Gewölbewirkung

Die Auswertung der Versuche mit und ohne Geogitterbewehrung zeigt, dass sich die Gewölbewirkung weitgehend unabhängig von der Membranwirkung einer vorhandenen Bewehrung einstellt, bzw. dass eine entkoppelte Betrachtung von Gewölbewirkung in der mineralischen Tragschicht und Membrantragwirkung der Bewehrung möglich ist. Ausgehend von den Versuchsbeobachtungen und Berechnungsergebnissen nach der FEM wird für die Gewölbewirkung angenommen, dass die Richtungen der Hauptspannungen koaxial zu Kugelschalen verlaufen

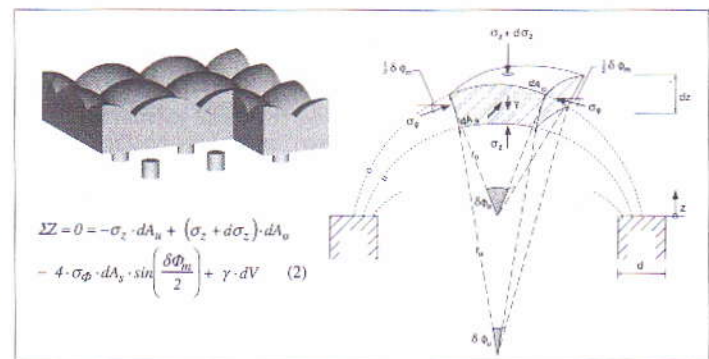


Bild 7. Räumliches Gewölbeyesystem und am Gewölbeseitel angreifende Spannungen
Fig. 7. 3-d arching and stresses in the vertex element

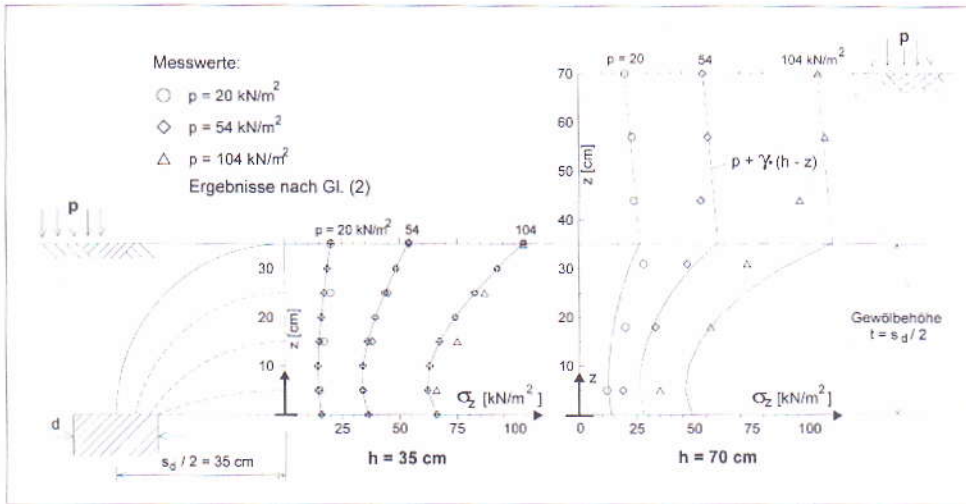


Bild 8. Auswertung von Gl. (2) an den Randbedingungen der Modellversuche ($h = 0,35 \text{ m}$ und $0,70 \text{ m}$; $s_g = \sqrt{2} \cdot 0,50 \text{ m}$; $\varphi' = 38^\circ$) für Laststufen $p = 20, 54, 104 \text{ kN/m}^2$
 Fig. 8. Evaluation of formula (2) with the boundary conditions of the model tests

Die Dehnung in der Bewehrung wird durch die Differentialgleichung (3) des elastisch gebetteten Seils ausgedrückt, in der neben der Einsenkung z die Horizontalkraft H als Unbekannte auftritt.

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

Die Lösungen der Differentialgleichung werden in die Bestimmungsgleichung für die Horizontalkomponente der Seilkraft S eingesetzt, in der nach Gl. (4) zusätzlich die Dehnsteifigkeit J der Bewehrung eingeht.

fen, die sich ihrerseits auf den Pfahlköpfen abstützen. Außerhalb der äußeren Gewölbeschale, die die Form einer Halbkugel hat, wird in der Tragschicht der Erdrudruck berücksichtigt, d. h. eine Spannungsumlagerung findet nur innerhalb der Gewölbeschalen nach Bild 7, links statt.

Aus Gleichgewichtsbetrachtungen im Gewölbescheitel, wovon in Bild 7 rechts ein Element dargestellt ist, wird eine Differentialgleichung (2) abgeleitet, die den Verlauf der lotrechten Spannung σ_z innerhalb der Tragschicht beschreibt. In Bild 8 ist Gl. (2) numerisch ausgewertet und den Messwerten der Modellversuche gegenübergestellt. Aufgetragen sind die lotrechten Bodenspannungen in der Symmetrieachse des Systems für verschiedene Laststufen p und Tragschichthöhen von $0,35$ und $0,70 \text{ m}$.

Aus den Versuchsergebnissen ging hervor, dass die Spannungsumlagerung vorzugsweise in einer Tragschichtzone dicht über den Pfählen stattfindet und darüber liegende Tragschichtbereiche weitgehend unbeeinflusst bleiben. Dieser Zusammenhang wird durch das Berechnungsmodell wiedergegeben, indem in der Tragschicht oberhalb der Gewölbehöhe t nach Bild 8 eine Erdrudruckverteilung berücksichtigt wird. Tatsächlich stellt sich aber ein kontinuierlicher Übergang ein.

4 Berechnungsmodell zur Membranwirkung

Für das Berechnungsmodell wird angenommen, dass die Hauptbeanspruchungen in einer Geokunststoffbewehrung aus Geogittern in einem Bewehrungsstreifen stattfinden, der in Tragrichtung des Geogitters benachbarte Pfähle überspannt. Diese Beobachtung wird dem Berechnungsmodell zugrunde gelegt, wodurch eine ebene Betrachtung des Systems ermöglicht wird. Die Belastung auf einen Geogitterstreifen der Breite b wird als Streckenlast q_z aus der lotrechten Bodenspannung σ_z nach Gl. (2), die auf die Einflussfläche A_L im Bewehrungshorizont wirksam ist, abgeleitet. Die stützende Wirkung der Tragglieder und des Bodens wird dabei durch Bettungsmodul $k_{s,p}$ für die Tragglieder und $k_{s,w}$ für den Boden erfasst, siehe Bild 9.

$$H = \frac{2 \cdot \int_0^i \sqrt{1+z_w^2} dx + 2 \cdot \int_0^i \sqrt{1+z_p^2} dx - l_0}{2 \cdot \int_0^i \sqrt{1+z_w^2} dx + 2 \cdot \int_0^i \sqrt{1+z_p^2} dx} \cdot J \quad (4)$$

Da die vertikale Absenkung über den Traggliedern z_p und über dem Boden z_w wieder von der Kraft H abhängig ist (siehe Bild 9), kann keine explizite Lösung von Gl. (4) angegeben werden. Die Integration erfolgt numerisch. 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. Die Seilkraft S berechnet sich aus Gl. (5) in direkter Abhängigkeit zu der Geokunststoffdehnung ε . Diese ist in Bild 10 für die Randbedingungen der Modellversuche ausgewertet.

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

Durch die Berechnungsergebnisse werden die Messwerte aus den Modellversuchen zutreffend reproduziert. Tendenziell führt das Berechnungsmodell zu etwas größeren Beanspruchungen in der Bewehrung, was für eine Bemessung auf der sicheren Seite liegt.

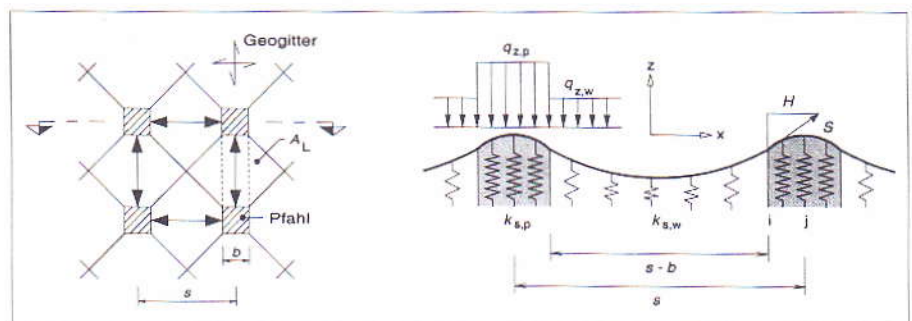


Bild 9. Lasteinzugsflächen und ebenes Tragsystem zur Membranwirkung einer Geokunststoffbewehrung aus Geogittern
 Fig. 9. Load transference and planar bearing system of a reinforcement with geogrids

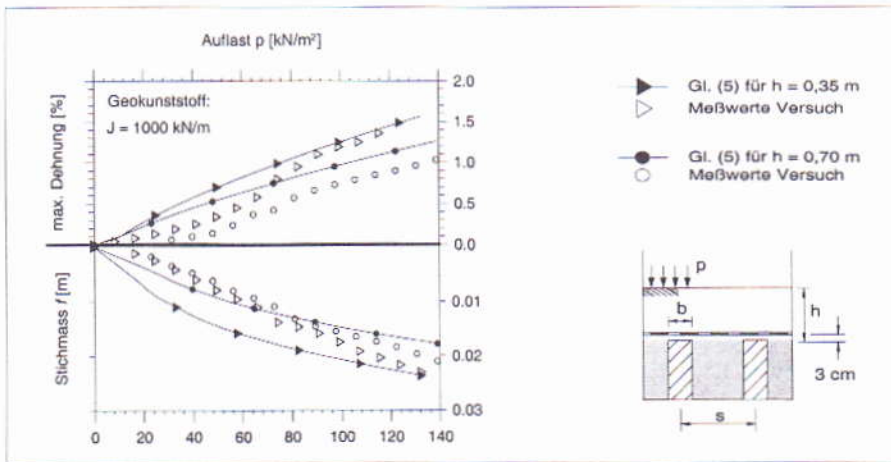


Bild 10. Berechnete und gemessene Beanspruchungen in der Geokunststoffbewehrung, Setzung in Feldmitte (x = 0); Stichmaß f
Fig. 10. Calculated and measured strains and settlement of the geogrid at midspan (x = 0); sticks f

5 Berechnung einer Geokunststoffbewehrung aus Geogittern über pfahlartigen Traggliedern

Nachfolgend werden die Berechnungsgleichungen zur Gewölbe- und Membranwirkung in allgemeingültiger Form ausgewertet, wobei pfahlartige Tragglieder in einem Dreieck oder Rechteckraster nach **Bild 11** betrachtet werden. Mit den hier beschriebenen Gleichungen können die Beanspruchungen in einer Geokunststoffbewehrung aus Geogittern berechnet werden; bei der praktischen Ausführung der Gründungskonstruktion sind ggf. aber weitere Nachweise oder Untersuchungen am Gesamtsystem zu führen, näheres siehe [2].

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 vernachlässigt werden (Bettungsmodul $k_{s,p} \rightarrow \infty$), wodurch die Berechnungen erheblich vereinfacht werden. Die Vernachlässigung einer dünnen Bodenschicht, die in der Praxis oftmals als Ausgleichsschicht zwischen der Traggliedoberkante und der Bewehrung eingebaut wird, liegt für eine Bemessung auf der sicheren Seite. Soll die Steifigkeit der Tragglieder berücksichtigt werden, z. B. wenn die Bewehrung in einem größeren Abstand in der mineralischen Tragschicht verlegt wird, kann eine genauere Berechnung nach [2] erfolgen. Die Bodenspannung auf die Weichschicht bzw. auf die darüber verlegte Geokunststoffbewehrung ergibt sich aus Gl. (2) für die Ebene $z = 0$ (Traggliedoberkante). Die Grenzwertbildung von Gl. (2) $\sigma_{z0} = \sigma_z [z \rightarrow 0]$ liefert:

$$\sigma_{z0} = \lambda_1 \chi \cdot \left(\gamma + \frac{p}{h} \right) \cdot \left[h \cdot \left(\lambda_1 + t^2 \cdot \lambda_2 \right)^{-\chi} + t \cdot \left(\left(\lambda_1 + \frac{t^2 \cdot \lambda_2}{4} \right)^{-\chi} - \left(\lambda_1 + t^2 \cdot \lambda_2 \right)^{-\chi} \right) \right] \quad (6)$$

Mit den Bezeichnungen:

- p äußere Belastung [kN/m²] auf die Tragschicht;
- h Tragschichthöhe [m];
- s_d Abstand der Pfahlachsen [m] in der Schnittlinie, in der das Gewölbe seine maximale Höhe erreicht, siehe Bild 11;

- 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];
- $K_{krit} = K_p = \tan^2 [45^\circ + \varphi'/2]$;
- γ Wichte der Tragschicht [kN/m³];

und den Abkürzungen

$$\chi = \frac{d \cdot (K_{krit} - 1)}{\lambda_2 \cdot s_d},$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{8} \cdot (s_d - d)^2,$$

$$\lambda_2 = \frac{s_d^2 + 2 \cdot d \cdot s_d - d^2}{2 \cdot s_d^2}$$

Bild 12 zeigt die Berechnungsergebnisse von Gl. (6) für Reibungswinkel $\varphi' = 30^\circ$ und $\varphi' = 35^\circ$ in dimensionsloser Form. Der maßgebliche Pfahlabstand s_d ist in einem Dreieck- oder Rechteckraster gemäß **Bild 11** zu bestimmen.

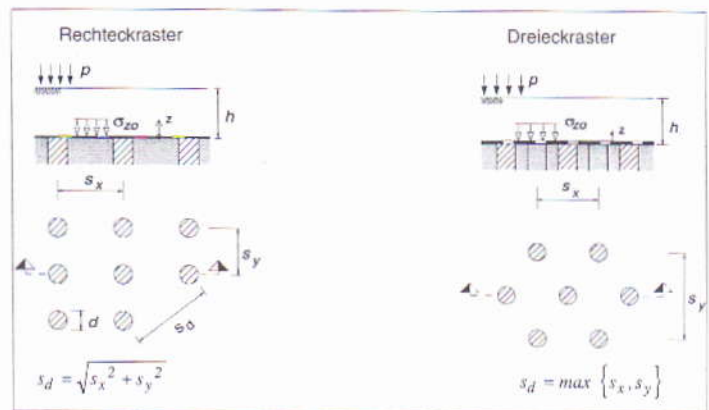


Bild 11. Festlegung der geometrischen Größe s_d am Rechteck- und Dreieckraster
Fig. 11. Definition of s_d in a rectangular or triangular grid of pile-elements

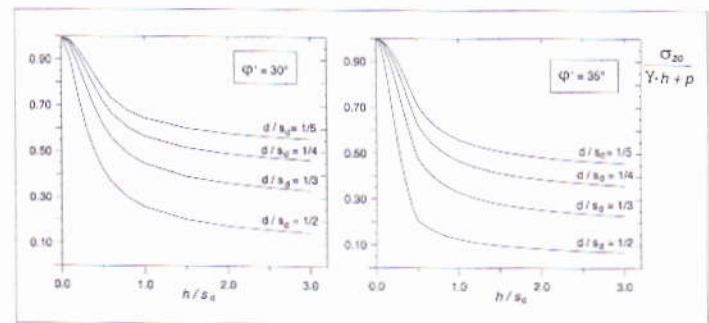


Bild 12. Lotrechte Spannung auf die Weichschicht bzw. Geokunststoffbewehrung bei pfahlartigen Traggliedern
Fig. 12. Vertical stress on the soft soil i.e. the geosynthetic-reinforcement, pile-element construction

Die Bodenspannung σ_{z0} wird unter Berücksichtigung der Lasteingangsflächen A_L als äußere Belastung der Geogitterbewehrung zwischen den Traggliedern als dreieckförmig verteilte Streckenlast zugewiesen. Die Vorgehensweise ist in **Bild 13** für ein Rechteck- und ein Dreieckraster von pfahlartigen Traggliedern gezeigt, wobei die Belastung zu einer resultierenden Kraft R zusammengefasst ist.

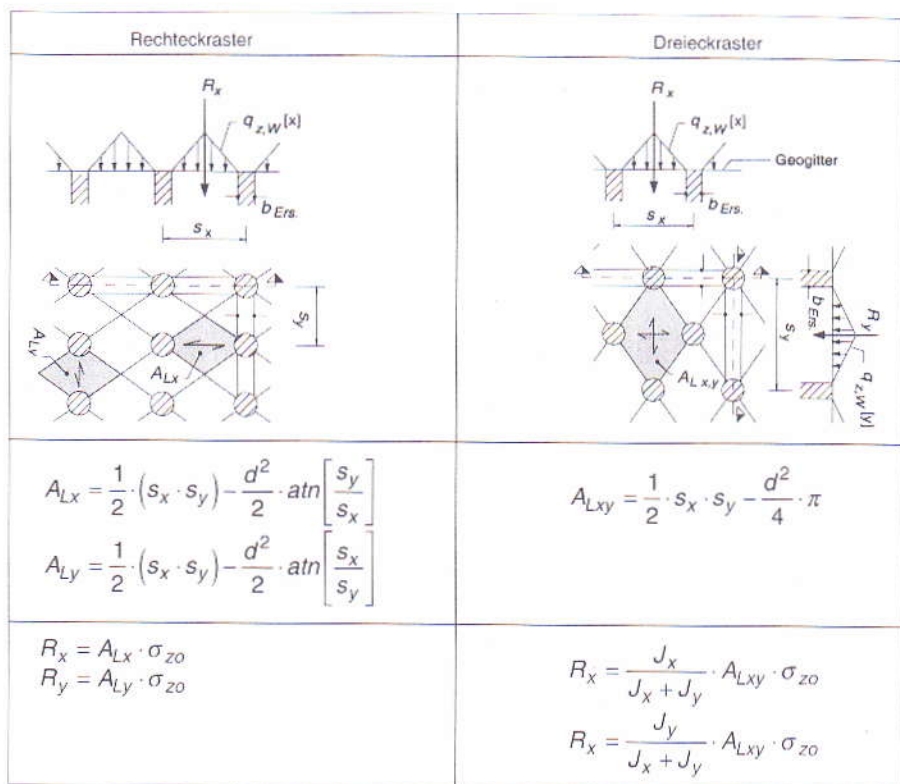


Bild 13. Ermittlung der Resultierenden Belastung R auf die Geokunststoffbewehrung innerhalb der Einflussfläche A_L

Fig. 13. Calculation of the resulting force R on the geogrid assigned to the load influence area A_L

In Bild 14 ist Gl. (5) in dimensionsloser Form ausgewertet. In Abhängigkeit der Dehnsteifigkeit J der Bewehrung, der resultierenden Belastung R und dem Bettungsmodul k_s der Weichschicht kann aus Bild 14 die maximale Dehnung in der Bewehrung sowie das Stichtmaß 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 14 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.

6 Berechnung einer Geokunststoffbewehrung aus Geogittern über linienförmigen Traggliedern

Neben einer Ausführung von pfahlartigen Tragelementen ist in Sonderfällen auch der Einsatz von wandartigen Traggliedern der Breite b denkbar, die im Abstand s parallel zueinander angeordnet werden. Mögliche Ausführungsformen derartiger Tragelemente können sein: Schlitzwände, Pfahlwände, Fräs-Misch-Wände, u. a. Die Spannungumlagerung in der Tragschicht wird analog zum räumlichen Gewölbe nach Abschnitt 3 durch ein ebenes Tonnengewölbe beschrieben. Die lotrechte Spannung σ_{z0} auf die Weichschicht bzw. die Bewehrung ist in Bild 15 ausgewertet.

In einer über wandartigen Tragelementen verlegten Geokunststoffbewehrung findet die Tragwirkung nur in eine Richtung statt, so dass die Berücksichtigung von Lastezugsflächen A_{Lx,y} gemäß Abschnitt 5 entfällt. Die Beanspruchungen in der Bewehrung können mit Hilfe von Bild 14 bestimmt werden, wobei für die Breite b_{Ers} des Geokunststoffstreifens hier der Wert „1“ eingesetzt wird.

7 Abschätzung der Bettungsmoduln der Weichschichten

Für eine homogene Weichschicht kann unter Vernachlässigung der Spannungsabnahme mit der Tiefe (unendliche Spannungsfläche) der Bettungsmodul der Weichschicht aus den Gleichungen

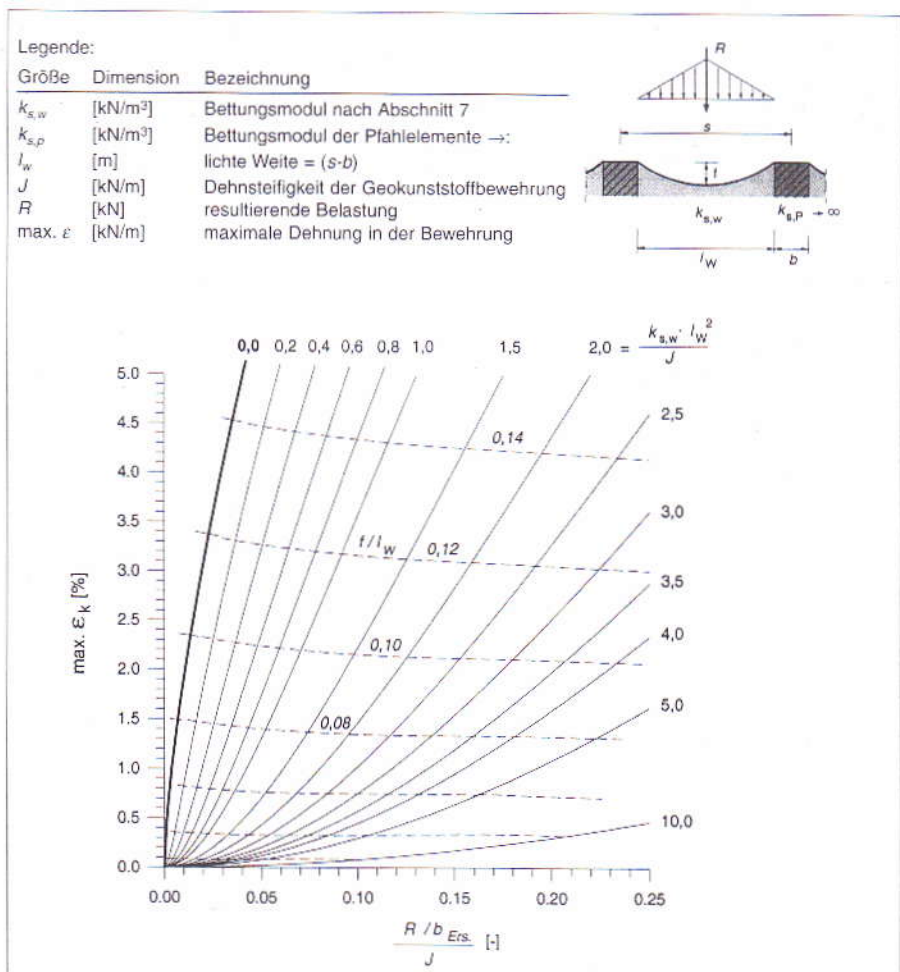


Bild 14. Maximale Dehnung der Bewehrung bei elastischer Bettung über der Weichschicht und starrer Stützung auf den Pfählen

Fig. 14. Maximum strains in a geogrid with elastic subgrade reaction and rigid support on the piles

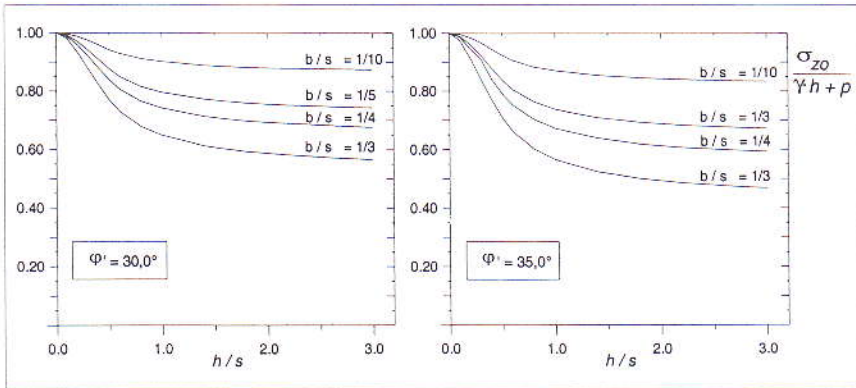


Bild 15. Lotrechte Spannung auf die Weichschicht bzw. Geokunststoffbewehrung bei linienförmigen Traggliedern
Fig. 15. Vertical stress on the soft soil or the geosynthetic-reinforcement, line-elements

chungen (7a und 7b) abgeleitet werden, wobei s_w die Setzung der Weichschicht unter der Geokunststoffbewehrung und $E_{s,w}$ der Steifemodul der Weichschicht ist, die in einer Mächtigkeit t_w ansteht.

$$\left. \begin{aligned} s_w &= \frac{\sigma_z \cdot t_w}{E_{s,w}} \\ k_{s,w} &= \frac{\sigma_z}{s_w} \end{aligned} \right\} k_{s,w} = \frac{E_{s,w}}{t_w} \tag{7a}$$

Mehrere Bodenschichten i unter der Bewehrung lassen sich näherungsweise durch einen im Verhältnis der Schichtdicken t_i gewichteten mittleren Bettungsmodul $k_{s,w,m}$ gemäß Gl. (7b) erfassen, siehe auch **Bild 16**.

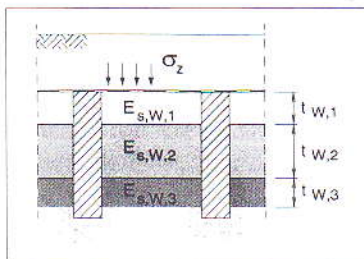


Bild 16. Abschätzung des Bettungsmoduls bei geschichtetem Untergrund unter der Bewehrung
Fig. 16. Estimation of the modulus of subgrade reaction of the stratified soil beneath the geogrid

Für drei Bodenschichten unter der Geokunststoffbewehrung ($i = 3$) ergibt sich der Bettungsmodul $k_{s,w,m}$ beispielsweise zu:

$$k_{s,w,m} = \frac{E_{s,w,1} \cdot E_{s,w,2} \cdot E_{s,w,3}}{t_{w,1} \cdot E_{s,w,2} \cdot E_{s,w,3} + t_{w,2} \cdot E_{s,w,1} \cdot E_{s,w,3} + t_{w,3} \cdot E_{s,w,1} \cdot E_{s,w,2}} \tag{7b}$$

8 Zusätzliche Beanspruchungen bei Dammbauwerken

Im Böschungsbereich von Dammbauwerken treten infolge Spreizwirkung zusätzliche Horizontalkräfte auf, die über Schubspannungen in den Untergrund abgeleitet werden müssen, siehe **Bild 17**.

Zur Vermeidung planmäßiger Horizontalbelastungen auf die Tragglieder, empfiehlt sich die rechnerische Zuweisung der Spreizkräfte auf die Geokunststoffbewehrung. Über Verbundwirkung wird eine zusätzliche Zugkraft ΔS_p in die Bewehrung geleitet, die näherungsweise aus dem aktivierten Erddruck entsprechend **Bild 17** abgeleitet und zu

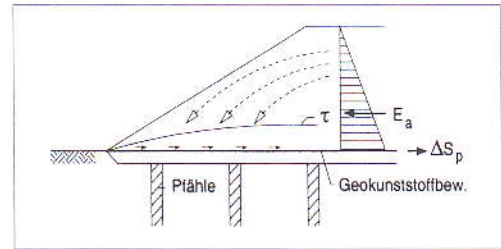


Bild 17. Zusätzliche Beanspruchungen der Geokunststoffbewehrung bei Dämmen
Fig. 17. Additional stresses in a geosynthetic-reinforcement in embankments

den Beanspruchungen nach Abschnitt 5 bzw. 6 superpositioniert wird. Vergleichsberechnungen an einem ebenen FE-System zeigen, dass mit dieser Vorgehensweise die Spreizwirkung auf der sicheren

Seite liegt abgedeckt werden kann [2], [3], [4].

9 Konstruktive und rechnerische Hinweise

Die nachfolgenden Hinweise sind auf eine Anwendung im Verkehrswegebau ausgerichtet und tragen den bisherigen Erfahrungen bei der Ausführung des Systems Rechnung.

Untergrund/Planum

Die Forderung nach einem ausreichend tragfähigen Arbeitsplanum ergibt sich i. d. R. bereits aus dem notwendigen Geräteeinsatz zur Herstellung der Tragglieder. In der Ebene der untersten Bewehrungslage wird ein Verformungsmodul $E_{v2} > 20 \text{ MN/m}^2$ empfohlen.

Geokunststoffbewehrung

Aus Feldbeobachtungen und den Modellversuchen geht hervor, dass die Beanspruchungen in einer ausgeführten Geokunststoffbewehrung relativ gering ausfallen. Das abgeleitete Berechnungsmodell trägt dem Rechnung. Da mit einer Geokunststoffbewehrung aber wirkungsvoll Sicherheitsreserven, insbesondere gegen Durchstanzen der Pfähle durch die Tragschicht, eingeführt werden können, wird die Festlegung einer konstruktiven Mindestbewehrung mit einer Mindestkurzzeitzugfestigkeit $\geq 60 \text{ kN/m}$ bei einer zugehörigen Dehnung $\leq 12 \%$ angeraten.

Tragglieder

Die Entlastung setzungsempfindlicher Bodenschichten nimmt mit dichter werdendem Raster, bzw. größerem Querschnitt der Tragglieder zu. Konstruktiv festgelegte Höchstabstände sollten in Abhängigkeit der geplanten Bauwerksnutzung definiert werden. Für Eisenbahnverkehrsbauewerke mit punktförmigen Traggliedern wurden bisher mindestens 3 Reihen je Gleis, in Sonderfällen bei Sanierungsmaßnahmen auch 2 Reihen von Traggliedern für erforderlich gehalten, wobei ein Achsabstand von 1,75 m nicht überschritten werden sollte. Auf die Gewölbeausbildung in der Tragschicht wirkt sich ein Rechteckraster vorteilhaft aus, da der maßgebliche Pfahlabstand s_g bei gleicher Anzahl der Tragglieder geringer als bei einem Dreieckraster ist, vgl. **Bild 11**. Aus fahrdynamischen Gründen wird aber oftmals Letzteres bevorzugt.

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. Eine Begrenzung der Mindesttragschichthöhe h erscheint zumindest im Verkehrswegebau sinnvoll, da das Verhalten unter wechselnden Lasten nicht abschließend geklärt ist, und die Anwendung des abgeleiteten Tragmodells für Extrembedingungen (sehr geringe Tragschichthöhe) nicht durch Erfahrung abgesichert ist. Da sich eine Spannungumlagerung maßgeblich bis in eine Tragschichthöhe $\frac{1}{2} \cdot s_d$ oberhalb der pfahlartigen Tragelemente einstellt (vgl. Bild 8), sollte dieses Maß für die baupraktische Anwendung als Mindesthöhe der Überschüttung eingehalten werden.

Verkehrslasteinwirkungen

Das vorgestellte Berechnungsmodell wurde auf der Grundlage von statischen Einwirkungen abgeleitet, die Auswirkungen von zyklischen oder veränderlichen Lasten auf das Tragsystem sind noch nicht abschließend erforscht. In [4] wird empfohlen, den veränderlichen Verkehrslastanteil durch eine erhöhte statische Ersatzlast abzubilden, was nach den bisher vorliegenden Erfahrungen auch zu einer auf der sicheren Seite liegenden Bemessung der Gründungskonstruktion führt. Bis zum Vorliegen weiterer Erkenntnisse wird daher empfohlen, Verkehrslasteinwirkungen in Anlehnung an [4] rechnerisch zu berücksichtigen.

10 Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Förderung des Forschungsprojektes. Weiterhin bedanken wir uns für die Unterstützung seitens der Bauindustrie, insbesondere für die Förderung durch die Firma Keller Grundbau GmbH und die Firma HUESKER Synthetic GmbH.

Literatur

- [1] *Sondermann, W.; Jøbe, W.*: Methoden zur Baugrundverbesserung für den Neu- und Ausbau von Bahnstrecken auf Hochgeschwindigkeitslinien. Vorträge der Baugrundtagung in Berlin, DGGT (1996) 259-279.
- [2] *Zaeske, D.*: Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 10, Diss. 2001.
- [3] British Standard 8006: Code of Practice for Strengthened/Reinforced Soils and other Fills, Chapter 9. 1994.
- [4] *Kempfert, H.-G.; Stadel, M.; Zaeske, D.*: Berechnung von geokunststoffbewehrten Tragschichten über Pfahlelementen. Bautechnik (75), Heft 12 (1997) 818-825.

BUCHBESPRECHUNG

Peter J. Pahl, Rudolf Damrath: Mathematische Grundlagen der Ingenieurinformatik. Berlin [u. a.]: Springer-Verlag; 2000; XVIII; 1046 Seiten; gebunden; ISBN 3-540-60501-0; 249,00 DM

Zunächst ist festzuhalten, was das Buch ‚Mathematische Grundlagen der Ingenieurinformatik‘ *nicht* ist. Es handelt sich um *keine* Einführung in die Ingenieurinformatik, bei der Programmier- und CAD-Techniken oder auch elementare Algorithmen und Datenstrukturen im Vordergrund stünden. Es ist auch *keine* Einführung in eine (rechnerorientierte) Ingenieurmathematik, wie sie, meist mit Schwerpunkt auf Infinitesimalrechnung, Differentialgleichungen und numerischen Methoden heute vielfach als ‚Höhere Mathematik für Ingenieure‘ angeboten wird. Vielmehr haben es sich die Autoren zum Ziel gesetzt, vor allem die in der üblichen Ingenieurausbildung bisher zu kurz kommenden mathematischen Grundlagen mit großer Systematik zusammenzufassen und damit „die Grundlage für einen produktiven Dialog zwischen Ingenieuren und Mathematikern“ herzustellen.

Das Buch ist mit mehr als 1000 Seiten in 10 Kapitel gegliedert. Jedem Kapitel ist ein einführender Abschnitt vorangestellt, in dem die wichtigsten Begriffe und Ideen zusammengefasst werden. Kapitel 1 beginnt mit Grundlagen der Logik als *der* zentralen Basis der Mathematik. Mengen werden in Kapitel 2 eingeführt und in den Kapiteln 3, 4 und 5 mit algebraischen, ordinalen und topologischen Grundstrukturen versehen. Algebraische Strukturen ‚verknüpfen‘ Elemente von Mengen, ordinale Strukturen vergleichen und ordnen Mengen, und topologische Strukturen beschreiben Begriffe wie den Abstand zwischen Elementen einer Menge oder den Zusammenhang von geometrischen Objekten. In Kapitel 6 werden schließlich Zahlensysteme mit ihren unterschiedlichen mathematischen Gesetzmäßigkeiten besprochen. Mit Kapitel 7 und einer Einführung in die Gruppentheorie, die heute z. B. als Grundlage von geometrischen Modellen eine wichtige Rolle spielt, schließt der erste, anwendungsneutrale Teil des Buches ab.

Die zweite Hälfte des Buches stellt weitergehende Bezüge zu den Ingenieurwissenschaften her. In Kapitel 8 werden Relationen und Gra-

phen besprochen, die gleichermaßen unverzichtbare Grundlage für Datenbanken, für computergestütztes Projektmanagement und für die Verkehrswissenschaften sind. In Kapitel 9 wird die in der computerorientierten Mechanik zentrale Tensoranalysis besprochen, während Kapitel 10 mit einer Einführung in Zufallsprozesse weit über die meist im Grundstudium einer ‚HM-Vorlesung für Ingenieure‘ vermittelte Wahrscheinlichkeitsrechnung hinausgeht. Es erübrigt sich fast darauf hinzuweisen, dass der Berücksichtigung von zufälligen Ereignissen im Bauingenieurwesen ständig wachsende Bedeutung zukommt.

Worin liegt also die Bedeutung der in diesem Buch besprochenen, überwiegend nicht numerisch orientierten mathematischen Grundlagen für das (Bau-)Ingenieurwesen? Mit einem kleinen historischen Vergleich sei der Versuch einer Einschätzung gewagt. In der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts haben numerische Methoden, aufbauend auf der mathematischen Analysis, der Infinitesimalrechnung, der Theorie der (partiellen) Differentialgleichungen und der Funktionalanalysis die technischen Grundlagen der Ingenieurwissenschaften geradezu revolutioniert. Welches große Brückenbauwerk, welches leichte Flächentragwerk wäre heute ohne die Methode der Finiten Elemente denkbar! Für die *planerischen* Fächer hingegen sind die geeigneten mathematischen Grundlagen noch weitgehend unerschlossen. Es spricht einiges dafür, dass die nächste tief greifende Umwälzung im Bauwesen von *diesen* Grundlagen getragen sein wird. Hierzu stellt das Buch von Pahl und Damrath in einer bisher nicht verfügbaren Vollständigkeit das notwendige Werkzeug bereit. Es ist sicherlich nicht für einen Leser gedacht, der die Mathematik bestenfalls als ‚notwendiges Übel‘ betrachtet und hinter jeder Definition, jeder mathematischen Aussage sofort die unmittelbare Anwendung im Bauingenieurwesen vorgestellt bekommen möchte. Sehr wohl ist es jedoch demjenigen zu empfehlen, der sein ingenieurmathematisches Wissen auf eine breite Grundlage stellen und heutige und künftige Aufgaben des Bauingenieurwesens einer computerorientierten Lösung zuführen möchte.

E. Rank, München