

Im Gegensatz zu herkömmlichen Säulengründungen können ummantelte Säulen zur Baugrundverbesserung auch in sehr weichen Böden eingesetzt werden, da die radiale Stützwirkung durch die Ummantelung im Verbund mit dem umgebenden Boden sichergestellt wird, wobei der Geokunststoff durch Ringzugkräfte beansprucht wird. Beim Vorliegen von weichen bindigen oder organischen Böden wie Torf wird dieses Bauverfahren daher zunehmend zur Gründung von Bauwerken, insbesondere von Dämmen, eingesetzt. Es werden numerische und analytische Berechnungsverfahren vorgestellt, mit denen eine Berechnung und Bemessung des Gründungsverfahrens möglich ist.

**Dimensioning of geotextile coated sand columns.** *As against conventional column foundations, coated columns can be used as ground improvement in very soft soils. The radial support is guaranteed through the composite between the coating and the surrounding soil, while the geotextile is under ring tension forces. Therefore this foundation system will be employed widely to found buildings, especially embankments on very soft or organic soils like peat. Numerical and analytical models for calculation and design of the new foundation system will be reflectet.*

## 1 Einleitung

Beim Vorliegen von weichen Böden wird bei Gründung von Dämmen z. B. für Verkehrswege häufig ein Bodenaustausch der weichen Schichten oder eine Baugrundverbesserung mit vermörtelten oder nicht vermörtelten Schottersäulen oder Sandsäulen im allgemeinen unter Anwendung der Rüttelstopfverdichtung ausgeführt. Die Säule stellt eine steife, tragfähige Komponente dar, die von der Weichschicht seitlich gestützt wird. Die Säulen bewirken einerseits eine Setzungsreduktion und andererseits eine Setzungsbeschleunigung durch ihre Eigenschaften als Vertikaldränagen.

Generell sind Schotter- oder Sandsäulen als Tragelemente zum Einsatz in sehr weichen organischen oder bindigen Böden, insbesondere in normalkonsolidierten Böden, wenig geeignet, da hier eine ausreichende horizontale Stützung der Säule nicht gegeben ist. Als Maß für die Anwendbarkeit wird i. d. R. eine undranierte Scherfestigkeit  $c_u$  größer 15 kN/m<sup>2</sup> angegeben.

Bei dem neuen Gründungsverfahren „geokunststoffummantelte Sandsäulen“ werden rasterförmig angeordnete Sandsäulen bis auf eine tragfähige Schicht abgeteuft. Diese Tragsäulen werden von einem Geokunststoff ummantelt, welcher die Filterstabilität zwischen Säulenmaterial und dem umgebenden Boden sicherstellt. Die radiale Stützung der Sandsäulen wird durch den Geokunststoff im Verbund mit dem umgebenden weichen Boden erreicht, wobei die Ummantelung durch Ringzugkräfte beansprucht wird.

Durch den Einsatz dieses neu entwickelten Gründungsverfahrens kann eine setzungsarme Gründung von Bauwerken, insbesondere von Dämmen und Verkehrswegen, auf weichen bindigen oder organischen Böden ermöglicht werden.

## 2 Bauverfahren

Für die praktische Bauausführung wurden von der Firma Möbius Baugesellschaft GmbH, Hamburg, zwei Herstellungsverfahren entwickelt, die als Bodenersatzverfahren und Verdrängungsverfahren bezeichnet werden. Der Hauptunterschied der Verfahren besteht in der Herstellung des zur Säulenerstellung notwendigen Hohlraums. Während beim Bodenersatzverfahren eine Verrohrung (i. d. R. ca. 0,8 bis 1,5 m) mit Hilfe eines mäklergeführten Rüttlers bis in den anstehenden tragfähigen Untergrund eingebracht wird und danach ein Bodenaushub im Rohr erfolgt, wird beim Verdrängungsverfahren ein Stahlrohr mit einem kleineren Durchmesser (i. d. R. ca. 0,6 bis 0,8 m) nach dem Verdrängungsprinzip eingebracht, wobei der Boden beim Einrütteln mit Hilfe eines konischen Verschlusses am Rohrfuß zur Seite verdrängt wird.

Danach wird die vorkonfektionierte, entweder rundgewebte oder werkssseitig mit einer Naht zu einem Schlauch gefertigte Geokunststoffummantelung (Polyestergewebe) eingelegt. Die Ummantelung weist in der Regel einen etwas größeren Durchmesser als den Einbaudurchmesser der Säule auf. Dies hat einerseits herstellungstechnische Gründe, andererseits ermöglicht die Aktivierungsaufweitung, d. h., die unter Belastung vor der Aktivierung von Ringzugkräften stattfindende Vergrößerung des Durchmessers der Säule, die sichere Mobilisierung eines Anteils des Erdwiderstandes über den Erdruhedruck hinaus. Nach dem Einlegen der Ummantelung und dem Einfüllen des Säulenmaterials werden die Einbaurohre dann unter Vibration gezogen, wodurch der Sand in den Säulen verdichtet wird.

Die geokunststoffummantelten Sandsäulen werden im Normalfall in regelmäßigen Rastern, wie in Bild 1 dargestellt, angeordnet. Weitere Angaben zur Herstellung und Ausführungsbeispiele finden sich in [1] und [2].

## 3 Tragverhalten

Während bei einer nicht ummantelten Säule der nach außen wirkenden Horizontalspannung aus der Säule eine gleich große Horizontalspannung in der

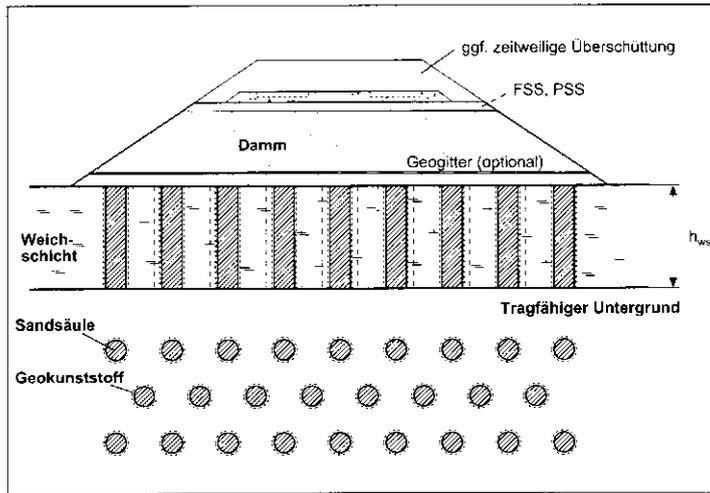


Bild 1. Dammgründung mit geokunststoffummantelten Sandsäulen

Fig. 1. Embankment foundation with geotextile coated sand columns

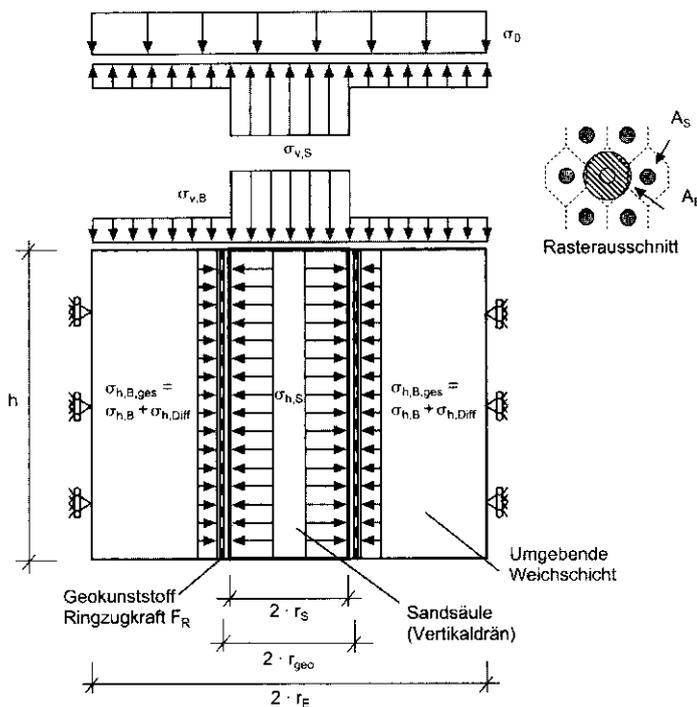


Bild 2. Tragsystem und Berechnungsmodell „geokunststoffummantelte Sandsäule“

Fig. 2. Bearing system and calculation model „geotextile coated sand column“

Weichschicht zur Stützung entgegenstehen muß, kann bei einer ummantelten Säule ein erheblicher Anteil der Horizontalspannung aus der Säule  $\sigma_{h,s}$  durch Ringzugkräfte  $F_R$  in der Ummantelung aufgenommen werden. Da die Stützwirkung der Weichschicht einer Teilaktivierung des passiven Erdwiderstandes entspricht und dessen Größe sich stark verformungsabhängig darstellt, wird bei Verwendung eines ummantelten Systems gegenüber der herkömmlichen Säulengründung eine merkliche Verformungsreduktion erreicht.

Bei dem System „geokunststoffummantelte Sandsäule“ wird die radiale, horizontale Stützung der Säulen somit durch die Geokunststoffummantelung  $\sigma_{h,geo} = f(F_R)$  im Verbund mit der Stützwirkung der umgebenden Weichschicht  $\sigma_{h,b,ges}$  sichergestellt, da die Durchmesserergrößerung der Säule nach dem Erreichen des Einbaudurchmessers der Ummantelung zu Dehnungen im Geokunststoff führt und damit Ringzugkräfte hervorruft. Die jeweilige Größe der auftretenden Ringzugkräfte wird durch das linear-elastische Materialverhalten des Geokunststoffs bestimmt und ist somit direkt von der weiteren Horizontalverformung der Säule abhängig.

Neben der Säulenverformung wird die Größe des Bodenwiderstands auch wesentlich von der Größe der Auflastspannung  $\sigma_{v,b}$  über der Weichschicht bestimmt. Die Auflastspannungen über der Weichschicht werden infolge einer Gewölbewirkung in der Überschüttung vermindert, bzw. es wird eine Spannungskonzentration über den Säulenköpfen hervorgerufen.

Letztlich ergibt sich ein flexibles und selbstregulierendes Tragverhalten, da sich bei einem Nachgeben der Säulen die Lasten auf die Weichschichten umlagern. Gleichzeitig wird damit der die Säulen stützende Bodenwiderstand erhöht, infolgedessen wird eine Rückumlagerung ermöglicht, und die Säulen können somit wieder mehr Last aufnehmen. Die Setzungen treten hierbei nach den Gesetzen der Konsolidationstheorie ein, wobei eine erhebliche Setzungsbeschleunigung durch die Wirkung der Sandsäulen als größere Vertikaldränagen gegeben ist.

Insgesamt ergeben sich nach der Bauzeit nur noch geringe Setzungen, was einerseits auf die Setzungsreduktion durch die Spannungskonzentration über den Säulen und der damit verbundenen Reduktion der Spannungen über den Weichschichten, andererseits auf die Setzungsbeschleunigung zurückzuführen ist, da ein Großteil der Setzungen schon während der Bauzeit ausgeglichen werden kann.

In Bild 2 ist das Tragsystem schematisch für eine Einheitszelle („unit cell“) dargestellt. Die Einheitszelle läßt sich durch die Umwandlung der Einflußfläche  $A_E$  in einen flächengleichen Kreis definieren (siehe Bild 2 – Rasterausschnitt), wodurch sich ein rotationssymmetrisches Berechnungsmodell ergibt.

#### 4 Berechnungsverfahren

##### 4.1 Numerische Berechnung mittels der FEM

Für die numerischen Analysen wurde das FEM-Programmsystem PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analyses) verwendet. Eine wesentliche Eigenschaft des Programmsystems ist die Möglichkeit der Verwendung von verschiedenen Stoffgesetzen. Im einzelnen wurde für die Weichschichten das Soft Soil Model (SSM), ein Stoffgesetz des Cam-Clay-Typs und für die Sande und Kiese des Säulenmaterials und der Überschüttung das Hard Soil Model (HSM), ein modifiziertes Stoffgesetz auf der Grundlage des Duncan/Chang-Typs, verwendet.

Eine Gründung mit dem System „geokunststoffummantelte Sandsäulen“ stellt zunächst ein räumliches Problem dar. Mit dem Programmsystem PLAXIS können aber z. Z. nur rotationssymmetrische oder ebene Probleme untersucht werden. Andererseits ist aber auch davon auszugehen, daß in der Praxis nur in seltenen Fällen ein dreidimensionales Berechnungsmodell verwendet werden kann. Daher wurde die numerische Analyse durch die Verbindung eines rotationssymmetrischen mit einem ebenen Modell vorgenommen. Der Berechnungsausschnitt des rotationssymmetrischen Modells entspricht einer Einheitszelle. Bei der Planung von ausgeführten Projekten ergibt dieses Modell die Bemessungskraft für den Geokunststoff und eine Setzungsabschätzung. Um das Verformungsverhalten eines Gesamtsystems, z. B. Dammgründung, in einem Querschnitt zu untersuchen, wird das System in einem Quermodell abgebildet. Da hierbei die Geokunststoffummantelung nicht simuliert werden kann, wird zuvor mit Hilfe des rotationssymmetrischen Modells ein Ersatzscherparameter ermittelt, der dem Säulenmaterial nach dem Aktivierungszeitpunkt zugewiesen wird. Die Definition und Herleitung des Ersatzscherparameters sowie Vergleichsberechnungen sind in [1] dargestellt.

## 4.2 Analytisches Berechnungsverfahren

### 4.2.1 Annahmen und Randbedingungen

Ausgehend von den bekannten Berechnungs- und Bemessungsverfahren für Schotter- oder Sandsäulen z. B. [3], [4] und [5], welche durch die Einbeziehung der Geokunststoffummantelung erweitert bzw. ergänzt wurden, wurde ein analytisches Berechnungsmodell entwickelt. Betrachtet wird hierbei jeweils eine Säule mit ihrem Einflußbereich (Einheitszelle). In diesem rotationssymmetrischen Modell wird zunächst nur eine einzelne, homogene Schicht (= Scheibe) betrachtet. Das sich ergebende Berechnungsmodell mit seinen Randbedingungen ist in Bild 2 dargestellt.

Für die Bemessung ist der Endzustand maßgebend, da dann die maximalen Setzungen und damit Ringzugkräfte erreicht werden. Die in der Folge behandelten Zusammenhänge bzw. Gleichungen beziehen sich daher auf den Zustand nach Beendigung der Konsolidation. Die analytische Berechnung der Konsolidation bzw. Setzungsbeschleunigung durch Vertikaldräns wird nicht behandelt, hierzu sei auf die bekannten Berechnungsverfahren z. B. [6] verwiesen. Im einzelnen liegen dem Modell die folgenden Randbedingungen zugrunde:

- Die Setzungen an der Oberfläche des Bodens und der Säule sind gleich.
- Am Rand sind die radiale Verformung und die Schubspannung gleich Null.
- Die Setzungen und Dehnungen im Geokunststoff werden durch eine Vertikalspannung in der Säulenkopfebene  $\sigma_0$ , die ausschließlich aus der Auflast resultiert, und durch die unterschiedlichen Wichten von Säulenmaterial und Weichschicht nach Säuleinbau ausgelöst.

- Die Zunahmen der vertikalen Spannungen aus der Auflast und die Spannungen infolge der Bodeneigengewichte über die Scheibenhöhe sind konstant.
- Es herrscht ein Gleichgewicht zwischen der Auflast und den entsprechenden Lastanteilen auf der Säule bzw. der Weichschicht (Lastverteilung).
- Das Säulenmaterial ist näherungsweise inkompressibel.
- Unter der Säulenfußebene ist ein tragfähiger Baugrund vorhanden, dessen Setzungen im Vergleich zur Gesamtsetzung vernachlässigbar gering sind.
- Die Scherverformungen am Säulenumfang sind vernachlässigbar klein.
- Die Säule ist über die gesamte Höhe plastifiziert, es herrscht der aktive Erddruckbeiwert  $K_{a,S}$ .
- Vor dem Aufbringen der Auflast herrschen bei der Anwendung des Bodenersatzverfahrens Erdruckverhältnisse mit  $K_B = K_{0,B} = 1 - \sin \varphi$ , bei der Anwendung des Verdrängungsverfahrens erhöhte Erddruckbeiwerte  $K_B = K_{0,B}^*$ .
- Die Ummantelung hat einen planmäßig größeren Durchmesser als den Einbaudurchmesser.
- Die Geokunststoffummantelung hat ein linear-elastisches Materialverhalten.

### 4.2.2 Herleitung

Die folgende Herleitung basiert auf den bekannten Bemessungsverfahren für Schottersäulen, wobei insbesondere die Verfahren in [3], [4] und [5] zugrundegelegt wurden.

Unter der Annahme des Gleichgewichts zwischen der Belastung in Säulenkopfebene  $\Delta\sigma_0$  und den entsprechenden Vertikallasten über der Säule  $\Delta\sigma_{v,S}$  und der Weichschicht  $\Delta\sigma_{v,B}$  ergibt sich:

$$\Delta\sigma_0 \cdot A_E = \Delta\sigma_{v,S} \cdot A_S + \Delta\sigma_{v,B} \cdot (A_E - A_S) \quad (1)$$

Aus den Vertikalspannungen infolge der Auflast und der Bodeneigengewichte ergeben sich Horizontalspannungen, wobei  $\sigma_{ü,S}$  und  $\sigma_{ü,B}$  für die Überlagerungsspannung in der Säule bzw. in der Weichschicht stehen (bei Anwendung des Bodenersatzverfahrens ist  $K_{0,B}^*$  durch  $K_{0,B}$  zu ersetzen):

$$\Delta\sigma_{h,S} = \Delta\sigma_{v,S} \cdot K_{a,S} + \sigma_{ü,S} \cdot K_{a,S} \quad (2)$$

$$\Delta\sigma_{h,B} = \Delta\sigma_{v,B} \cdot K_{0,B} + \sigma_{ü,B} \cdot K_{0,B}^* \quad (3)$$

Die Geokunststoffummantelung (Einbauradius  $r_{geo}$ ) zeichnet sich durch ein linear-elastisches Materialverhalten mit der Steifigkeit  $J$  aus:

$$\Delta F_R = J \cdot \Delta r_{geo} / r_{geo} \quad (4)$$

Über die Kesselformel läßt sich die Ringzugkraft in eine Horizontalspannung  $\Delta\sigma_{h,geo}$  umrechnen, die dem Geokunststoff zugewiesen wird:

$$\Delta\sigma_{h,geo} = \Delta F_R / r_{geo} \quad (5)$$

Aus den einzelnen Horizontalspannungen ergibt sich eine Differenzspannung  $\Delta\sigma_{h,Diff}$ . Diese entspricht der Mobilisierung einer zusätzlichen Erddruckkomponente in der Weichschicht, bis ein Gleichgewicht der Horizontalspannungen erreicht

wird. Der Zusammenhang ist in Bild 3 qualitativ dargestellt:

$$\Delta\sigma_{h,Diff} = \Delta\sigma_{h,S} - (\Delta\sigma_{h,B} + \Delta\sigma_{h,geo}) \quad (6)$$

Aus der Differenzspannung resultiert die Ausdehnung der Säule. Die Horizontalverformung  $\Delta r_S$  und die Setzung der Weichschicht  $s_B$  mit dem Steifemodul  $E_{S,B}$  werden nach [5] abgeleitet für einen radial und longitudinal belasteten Hohlzylinder ( $\nu_B$  Querdehnzahl der Weichschicht):

$$\Delta r_S = \frac{\Delta\sigma_{h,Diff}}{E^*} \cdot \left(\frac{1}{a_S} - 1\right) \cdot r_S \quad (7)$$

$$s_B = \left(\frac{\Delta\sigma_{v,B}}{E_{S,B}} - 2 \cdot \frac{1}{E^*} \cdot \frac{\nu_B}{1 - \nu_B} \cdot \Delta\sigma_{h,Diff}\right) \cdot h \quad (8)$$

mit

$$E^* = \left(\frac{1}{1 - \nu_B} + \frac{1}{1 + \nu_B} \cdot \frac{1}{a_S}\right) \cdot \frac{(1 + \nu_B) \cdot (1 - 2\nu_B)}{(1 - \nu_B)} \cdot E_{s,B}$$

und  $a_S = A_S/A_E$

Zwischen der Setzung der Säule  $s_S$  und der Ausbauchung  $\Delta r_S$  herrscht bei Volumenkonstanz des Säulenmaterials folgende Beziehung:

$$s_S = \left(1 - \frac{r_0^2}{(r_0 + \Delta r_S)^2}\right) \cdot h_0 \quad (9)$$

Hierbei ist zu beachten, daß Gl. (9) lediglich einen geometrischen Zusammenhang ausdrückt, d. h., wenn die Berechnung in mehreren Abschnitten (Lastinkrementen) durchgeführt wird, müssen der Ausgangsradius  $r_0$  und die Ausgangshöhe  $h_0$  jeweils neu berechnet werden.

Es muß die Verträglichkeit der horizontalen Verformungen gegeben sein, wobei die Aktivierungsaufweitung zu berücksichtigen ist:

$$\Delta r_S = \Delta r_{geo} + (r_{geo} - r_S) \quad (10)$$

Zwischen der Säule und der umgebenden Weichschicht treten keine Relativsetzungen auf:

$$s_S = s_B \quad (11)$$

Es ergeben sich somit insgesamt 11 Bestimmungsgleichungen. Aus (4), (5) und (10) ergibt sich:

$$\Delta\sigma_{h,geo} = \frac{J \cdot [\Delta r_S - (r_{geo} - r_S)]}{r_{geo}^2} \quad (12)$$

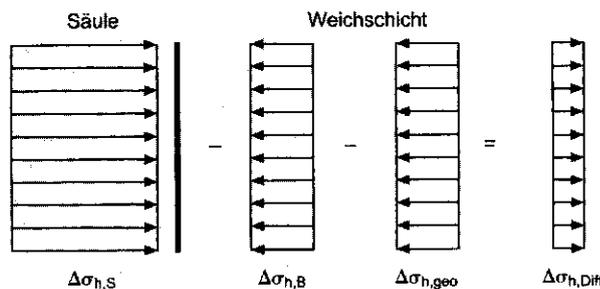


Bild 3. Auftretende Horizontalspannungen  
Fig. 3. Horizontal stresses

Die Gl. (12) eingesetzt in Gl. (7) ergibt mit der Differenzspannung Gl. (6):

$$\Delta r_S = \left\{ K_{a,S} \cdot (\Delta\sigma_{v,S} + \sigma_{ü,S}) - K_{0,B} \cdot \Delta\sigma_{v,B} - K_{0,B}^* \cdot \Delta\sigma_{ü,B} - \frac{J \cdot [\Delta r_S - (r_{geo} - r_S)]}{r_{geo}^2} \right\} \cdot \frac{1}{E^*} \cdot \left(\frac{1}{a_S} - 1\right) \cdot r_S \quad (13)$$

Mit Gl. (1) eingesetzt in Gl. (13) ergibt sich für die horizontale Verformung am Säulenrand:

$$\Delta r_S = \frac{1}{\frac{E^*}{(1/a_S - 1) \cdot r_S} + \frac{J}{r_{geo}^2}} \times \left[ K_{a,S} \cdot \left(\frac{1}{a_S} \cdot \Delta\sigma_0 - \frac{1 - a_S}{a_S} \cdot \Delta\sigma_{v,B} + \sigma_{ü,S}\right) - K_{0,B} \cdot \Delta\sigma_{v,B} - K_{0,B}^* \cdot \sigma_{ü,B} + \frac{(r_{geo} - r_S) \cdot J}{r_{geo}^2} \right] \quad (14)$$

Mit der Einbaugeometrie in Gl. (9) und Einsetzen von Gl. (9) und (8) in Gl. (11) ergibt sich dann:

$$\left\{ \frac{\Delta\sigma_{v,B}}{E_{s,B}} - \frac{2}{E^*} \cdot \frac{\nu_B}{1 - \nu_B} \times \left[ K_{a,S} \cdot \left(\frac{1}{a_S} \cdot \Delta\sigma_0 - \frac{1 - a_S}{a_S} \cdot \Delta\sigma_{v,B} + \sigma_{ü,S}\right) - K_{0,B} \cdot \Delta\sigma_{v,B} - K_{0,B}^* \cdot \sigma_{ü,B} + \frac{(r_{geo} - r_S) \cdot J}{r_{geo}^2} - \frac{\Delta r_S \cdot J}{r_{geo}^2} \right] \right\} \cdot h = \left[ 1 - \frac{r_S^2}{(r_S + \Delta r_S)^2} \right] \cdot h \quad (15)$$

Mit  $\Delta r_S$  nach Gl. (14) enthält Gl. (15) als unbekannte Größe nur noch  $\Delta\sigma_{v,B}$ . Die Bestimmungsgleichung kann iterativ, durch Vorschätzen von  $\Delta\sigma_{v,B}$  und nachfolgendes Einsetzen in Gl. (15), gelöst werden. Aufgrund des relativ großen Rechenaufwandes empfiehlt sich hierbei der Einsatz von Rechenprogrammen.

Der Steifemodul der Weichschicht  $E_{S,B}$  sollte möglichst wirklichkeitsnah in Abhängigkeit der herrschenden Spannung  $p^*$  eingeführt werden. Es wird eine einfache Potenzfunktion nach *Ohde*, mit einem Referenzsteifemodul  $E_{s,B,ref}$  bei einer Bezugsspannung  $p_{ref}$  und einem Steifeexponenten  $m$  (bei normalkonsolidierten bindigen und organischen Böden = 1) verwendet:

$$E_{s,B} = E_{s,B,ref} \cdot \left(\frac{p^*}{p_{ref}}\right)^m \quad (16)$$

Während im Oedometerversuch die Horizontalspannung durch den Erdruchdruckbeiwert definiert wird, herrscht in der umgebenden Weichschicht bei einer geokunststoffummantelten Sandsäule eine um die Differenzspannung erhöhte horizontale Spannung. Die Vernachlässigung dieser Erhöhung führt

zu einer Berechnung auf der sicheren Seite. Eine näherungsweise Erfassung der Auswirkungen auf die jeweilige Größe des Steifemoduls und die Berücksichtigung der Kohäsion wird in [1] beschrieben.

**4.3 Vergleichsberechnungen**

Unter Zugrundelegung der beschriebenen Bestimmungsgleichungen wurden ein Berechnungsprogramm erstellt und damit Vergleichsberechnungen zu großmaßstäblichen Modellversuchen (Maßstab 1:1) und zu numerischen Analysen vorgenommen. Die Belastung wurde hierbei in Lastinkrementen von jeweils 1 kN/m<sup>2</sup> bis zum Erreichen der Gesamtlast aufgebracht. Die verwendeten Eingabewerte sind in Tabelle 1 dargestellt, weitere Angaben finden sich in [1] und [7].

In Bild 4a ist die analytisch berechnete Last-Setzungslinie, in Bild 4b die analytisch berechnete Last-Dehnungs-Linie jeweils im Vergleich zu den Messungen und numerisch berechneten Ergebnissen dargestellt.

Zusätzlich wurde mittels des entwickelten analytischen Berechnungsverfahrens eine Parameterstudie für ein System mit definierten Randbedingungen durchgeführt. Die gewählten Ausgangsparameter sind ebenfalls in Tabelle 1, die Ergebnisse in den Bildern 5 und 6 dargestellt.

Insgesamt ist bei den Berechnungen eine relativ gute Übereinstimmung der Last-Setzungslinien und Last-Dehnungslinien festzustellen. Lediglich bei geringen Lasten, vor der Aktivierung des Geokunststoffs, sind merkliche Differenzen zu beobachten, was letztlich in einer etwas geringeren Aktivierungslast bei der analytischen Berechnung resultiert. Die etwas geringere Aktivierungslast hat zunächst eine Verschiebung der analytisch berechneten Last-Dehnungslinie in Richtung niedrigerer Belastungen zur Folge. Nach der Aktivierung der Ummantelung zeigen die Last-Dehnungslinien einen näherungsweise linearen Verlauf, da das linear-elastische Materialverhalten des Geokunststoffs das Systemverhalten maßgeblich beeinflusst. Die analytisch und numerisch berechneten Last-Dehnungslinien und Last-Setzungslinien nähern sich im weiteren Verlauf an, wodurch in realen Lastbereichen nur noch geringe prozentuale Differenzen festzustellen sind. Somit kann im Gebrauchslastbereich von einer befriedigenden Prognose ausgegangen werden.

Anhand der Parameterstudien kann gezeigt werden, daß die Ringzugkräfte und Setzungen von der Steifigkeit des verwendeten Geokunststoffs und dem gewählten Raster der geokunststoffummantelten Sandsäulen entscheidend beeinflusst werden. Dies ist bestimmend für den Entwurf einer Grün-

Tabelle 1. Gewählte Ausgangsparameter für Vergleichsberechnungen  
Table 1. Chosen parameters for comparable calculations

$a_s$ [-]	$h$ [m]	$r_s$ [m]	$r_{geo} - r_s$ [m]	$J$ [kN/m]	$E_{s,ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c_B$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi_B$ [°]	$\varphi_S$ [°]	$\gamma_B/\gamma_S$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$K_{0,B}$ [-]	$P_{ref}/m/\nu$ [kN/m <sup>2</sup> ][ <sup>-</sup> ]
großmaßstäblicher Modellversuch (Modellmaßstab 1:1)											
0,125	1,25	0,3375	0,0125	800	725	9	24	38	8/18	0,59	100/1/0,4
Parameterstudie											
Bild 5	2,0	0,5	0,015	Bild 6	725	5	20	37,5	3/10	0,66	100/1/0,4

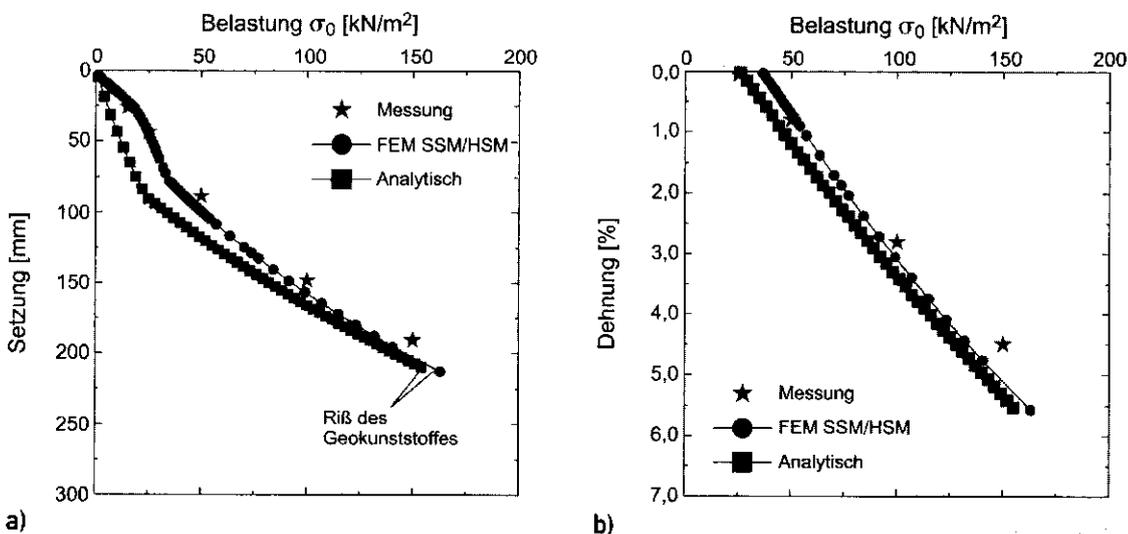


Bild 4. Vergleichsberechnungen – großmaßstäblicher Modellversuch, a) Last-Setzungslinie, b) Last-Dehnungslinie

Fig. 4. Comparative calculation – large scale model test, a) load-settlement curve, b) load-strain curve

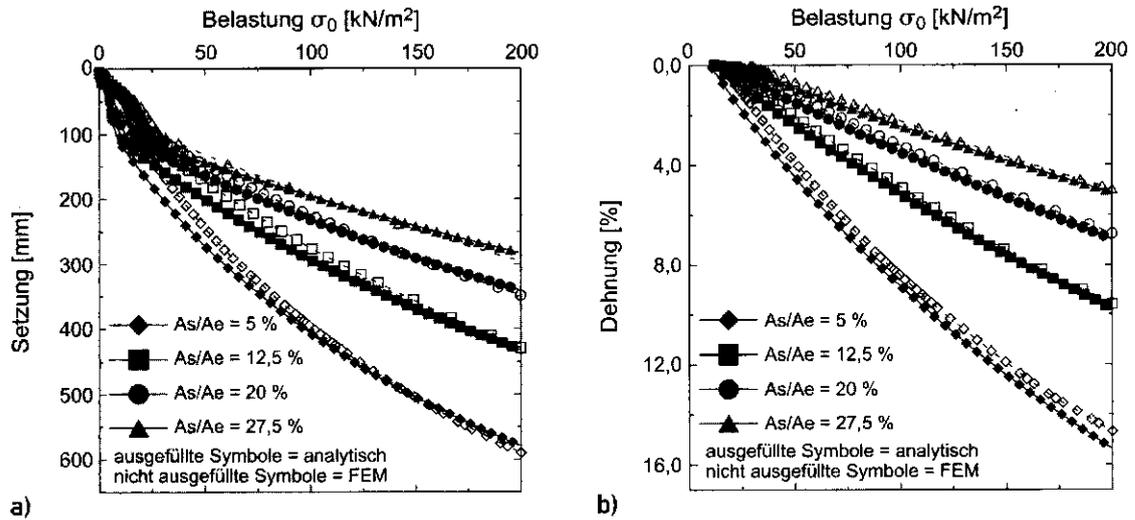


Bild 5. Parameterstudie: Variation des Flächenverhältnisses  $a_s = A_s/A_e$  für  $J = 1000$  kN/m, a) Last-Setzungslinien, b) Last-Dehnungslinien  
 Fig. 5. Parameter study: Variation of the area ratio  $a_s = A_s/A_e$  for  $J = 1000$  kN/m, a) load-settlement curve, b) load-strain curve

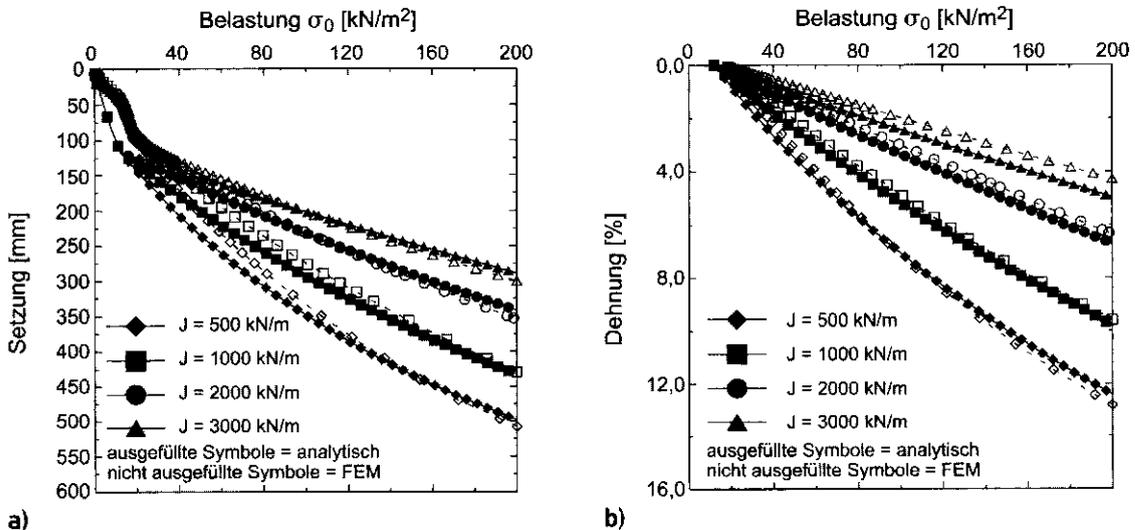


Bild 6. Parameterstudie: Variation der Geokunststoffsteifigkeit  $J$  für  $a_s = 12,5\%$ , a) Last-Setzungslinien, b) Last-Dehnungslinien  
 Fig. 6. Parameter study: Variation of the geotextile tensile stiffness  $J$  for  $a_s = 12,5\%$ , a) load-settlement curve, b) load-strain curve

dung mit geokunststoffummantelten Sandsäulen, da sich bei einem gegebenen Baugrund und einem festgelegten Geokunststoff ein Mindestraster ergibt, welches dem Entwurf zugrundezulegen ist.

Für die Bodenkenngrößen gilt, daß die Größe des Steifemoduls die Berechnungsergebnisse ebenfalls maßgebend bestimmt, so daß auf dessen wirklichkeitsnahe Ermittlung größte Sorgfalt zu verwenden ist.

#### 4.4 Erweiterung des analytischen Berechnungsverfahrens auf mehrere Schichten

Die horizontale Stützwirkung der Weichschicht beruht auf verschiedenen Erddruckanteilen. Eine Scheibengrenze muß also bei jedem Wechsel der charakteristischen Kenngrößen, Scherparameter oder Ver-

formungsparameter vorgesehen werden. Eine Aufteilung in verschiedene Scheiben ist zudem dann zu empfehlen, wenn große Säulenhöhen und hohe effektive Wichten vorhanden sind, da die Erddruckanteile infolge der Bodeneigengewichte dann mit der Tiefe stark zunehmen. Hinsichtlich dieser Erweiterung auf mehrere Schichten sind zwei verschiedene Ansätze zu unterscheiden, wobei jeweils eine zusätzliche Annahme getroffen werden muß. Beim ersten Ansatz (Fall 1), besteht die Bedingung, daß zwischen der Säule und dem umgebenden Boden keine Relativsetzungen auftreten können. Beim zweiten Ansatz (Fall 2) besteht dagegen die Forderung einer konstanten Lastverteilung über die Tiefe, wobei nur an der Geländeoberkante Setzungsgleichheit gefordert wird.

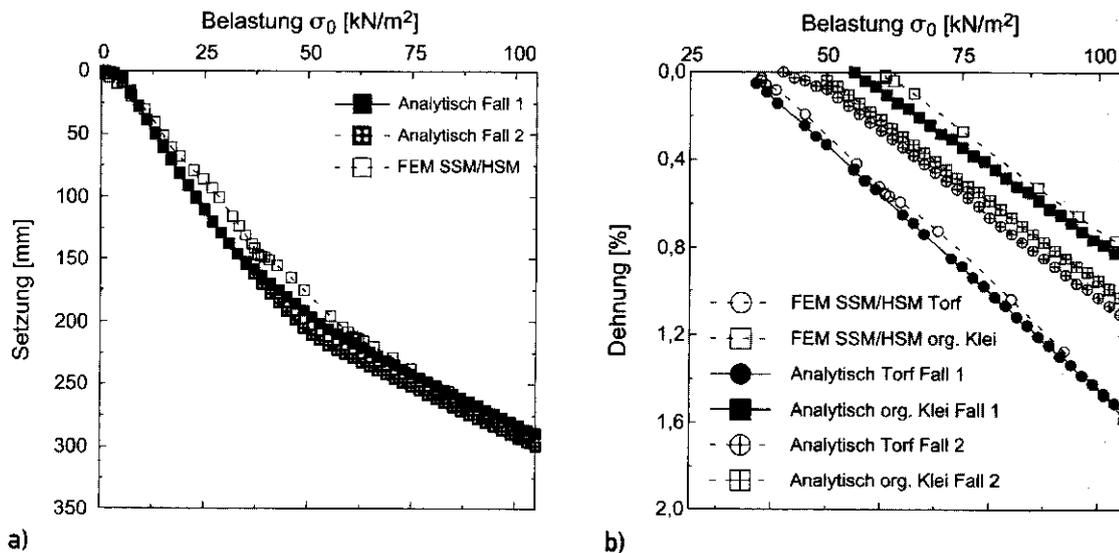


Bild 7. Berechnung bei geschichteten Böden, a) Last-Setzunglinie, b) Last-Dehnungslinie  
 Fig. 7. Calculation with stratified soil, a) load-settlement curve, b) load-strain curve

In der Realität werden beide Annahmen nicht vollständig zu erfüllen sein. Wie Vergleichsberechnungen in Bild 7 aber zeigen, differieren die berechneten Setzungen bei Überprüfung beider Fälle nur gering. Bei der Berechnung der Dehnungen in der Ummantelung stimmen die Berechnungsergebnisse bei Annahme von Fall 1 (keine Relativsetzungen) gut mit einer numerischen Vergleichsberechnung überein, währenddessen beim Ansatz von Fall 2 erhebliche Differenzen zu beobachten sind. Daher wird für die praktische Bemessung die Annahme des Falles 1 empfohlen. Die Berechnung der einzelnen Scheiben kann dann getrennt erfolgen.

Um die Genauigkeit der analytischen Berechnung bei einem geschichteten Boden zu untersuchen, wurde eine ca. 5 m hohe Dammgründung auf ca. 5 m mächtigen Torf- und Kleischichten für Vergleichsberechnungen ausgewählt (nähere Angaben sind in [1] und [2] enthalten). In Bild 7 sind die berechneten Last-Setzungs- und Last-Dehnungslinien aufgetragen.

#### 4.5 Vereinfachtes analytisches Berechnungsverfahren

Das vorgestellte analytische Verfahren ist aufgrund seiner Komplexität mittels einer Handrechnung nur unter hohem Berechnungsaufwand anzuwenden. Um eine Abschätzung der Setzungen und Ringzugkräfte auch mittels einer Handrechnung zu ermöglichen, wird im folgenden ein vereinfachtes analytisches Verfahren vorgestellt. Die Herleitung des Verfahrens bedingt einige Vereinfachungen in den Bestimmungsgleichungen auf der Basis des Verfahrens nach Priebe [3].

Die Setzung der Säule ergibt sich wie folgt als Funktion der Vergrößerung des Radius:

$$s_S = 2 \cdot \frac{\Delta r_S}{r_S} \cdot h \quad (17)$$

Die Gleichungen für die Ausdehnung eines Hohlzylinders infolge der Differenzspannung und für die Setzung eines nur radial belasteten Hohlzylinders lauten:

$$\Delta r_S = \Delta \sigma_{h, \text{Diff}} \cdot \frac{r_S}{E_S} \cdot f \quad (18)$$

$$s_B = \frac{\Delta \sigma_{v, B}}{E_{s, B}} \cdot h \quad (19)$$

mit

$$f = \frac{1 - \nu^2}{1 - \nu - 2\nu^2} \cdot \frac{(1 - 2\nu)(1 - a_S)}{1 - 2\nu + a_S}$$

Die Berechnung einer Gründung auf geokunststoffummantelten Sandsäule muß in mindestens zwei Berechnungsschritte unterteilt werden. Eine Berechnung ohne aktive Ummantelung im Anfangsbereich und nachfolgend eine Berechnung mit aktiver Ummantelung mit Laststeigerung bis zur Endlast.

Die Sandsäule kann bis zur Aktivierung des Geokunststoffes wie eine Schottersäule betrachtet werden. Mit der Vorgabe einer Aufweitung der Säule bis zur Aktivierung lassen sich somit folgende Gleichungen herleiten, die die Setzung  $s_{\Delta r}$  und die Auflast am Ende der Aufweitung  $\Delta \sigma_{0, \Delta r}$  angeben:

$$s_{\Delta r} = 2 \cdot \frac{r_{\text{geo}} - r_S}{r_S} \cdot h \quad (20)$$

$$\Delta \sigma_{v, B \Delta r} = \frac{s_{\Delta r} \cdot E_{s, B}}{h} \quad (21)$$

$$\Delta \sigma_{v, S \Delta r} = \left( \frac{E_{s, B} \cdot (r_{\text{geo}} - r_S)}{f \cdot r_S} + K_{0, B} \cdot \sigma_{v, B \Delta r} + K_{0, B}^* \times \right. \\ \left. \times \sigma_{\bar{u}, B} - K_{a, S} \cdot \sigma_{\bar{u}, S} \right) \cdot \frac{1}{K_{a, S}} \quad (22)$$

$$\Delta \sigma_{0 \Delta r} = a_S \cdot \Delta \sigma_{v, S \Delta r} + (1 - a_S) \cdot \Delta \sigma_{v, B \Delta r} \quad (23)$$

Unter Zugrundelegung der vereinfachten Bestimmungsgleichungen und der Voraussetzung der unveränderten Einbaugeometrie ergibt sich dann die Vertikalspannung auf dem Boden mit aktiver Ummantelung und letztlich die Gesamtsetzung:

$$s_B = s_S = K_{a,S} \cdot \frac{1}{a_S} \cdot (\Delta\sigma_0 - \Delta\sigma_{0\Delta r})$$

$$= \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{f} + \frac{J}{E_{s,B} \cdot r_{geo}} \right) + \left( \frac{1 - a_S}{a_S} \right) \cdot K_{a,S} + K_{0,B} \right] \times$$

$$\times \frac{h}{E_{s,B}} + s_{\Delta r} \tag{24}$$

Anhand der ermittelten Setzungen kann die Ringzugkraft wie folgt berechnet werden:

$$F_R = J \cdot \frac{s_S - s_{\Delta r}}{2 \cdot (h - s_{\Delta r})} \tag{25}$$

Bei Berechnungen mit dem dargestellten vereinfachten Verfahren ist die wirklichkeitsnahe Berechnung und Einführung des Steifemoduls ebenso wie beim ursprünglichen Verfahren zu beachten. Mit dem vereinfachten Verfahren wurde das der Parameterstudie zugrundegelegte Ausgangssystem berechnet.

In Bild 8 sind die Berechnungsergebnisse dargestellt. Durch die getroffenen Vereinfachungen wird eine deutliche Zunahme der berechneten Setzungen bedingt. Bei den berechneten Dehnungen sind dagegen nur geringe Differenzen festzustellen. Dies ist auf den vereinfachten Zusammenhang zwischen den Verschiebungen des Säulenrandes und den Setzungen der Säule gemäß Gl. (17) zurückzuführen.

**4.6 Geländebruchnachweis**

Für eine analytische Standsicherheitsberechnung können die in der Literatur beschriebenen Verfahren für herkömmliche Säulengründungen verwendet werden, welche die Spannungskonzentration über der Säule und damit die Erhöhung der Gesamtscherfestigkeit berücksichtigen. Für die Abschätzung einer Tragfähigkeitserhöhung werden im allgemeinen Ansätze verwendet, die mittlere Kennwerte für einen homogenen Untergrund bestimmen. In [4] werden Ersatzwerte für Wichte, Kohäsion und Reibungswinkel vorgeschlagen. In einem genaueren Ansatz in [8] wird dagegen die Erhöhung der Gesamtscherfestigkeit aus der Addition der Anteile von Säule und Weichschicht bestimmt. Um eine Berechnung mit mittleren Scherparametern für den gesamten Untergrund zu vermeiden, können anhand des vorliegenden Ansatzes ebenso Ersatzscherparameter abgeleitet werden, bei deren Ansatz sich eine entsprechende Gesamtscherfestigkeit ergibt. Für das Säulenmaterial ergibt sich durch die Spannungskonzentration eine Erhöhung der Scherparameter. Da die Auflastspannung über der Weichschicht reduziert wird, ergibt sich eine Verminderung der Scherparameter der Weichschicht, falls nicht ein Anfangszustand mit  $\varphi_{B,u} = 0$  berechnet wird. Nähere Angaben sind in [1] enthalten.

**5 Bemessung der Geokunststoffummantelung**

Die Bemessung der Geokunststoffummantelung kann in Anlehnung an [9] bzw. [10] so vorgenommen werden, daß die Kurzzeitfestigkeit  $F_k$  durch verschiedene Faktoren  $A_i$  ( $A_1$  für das Kriechen,  $A_2$  für

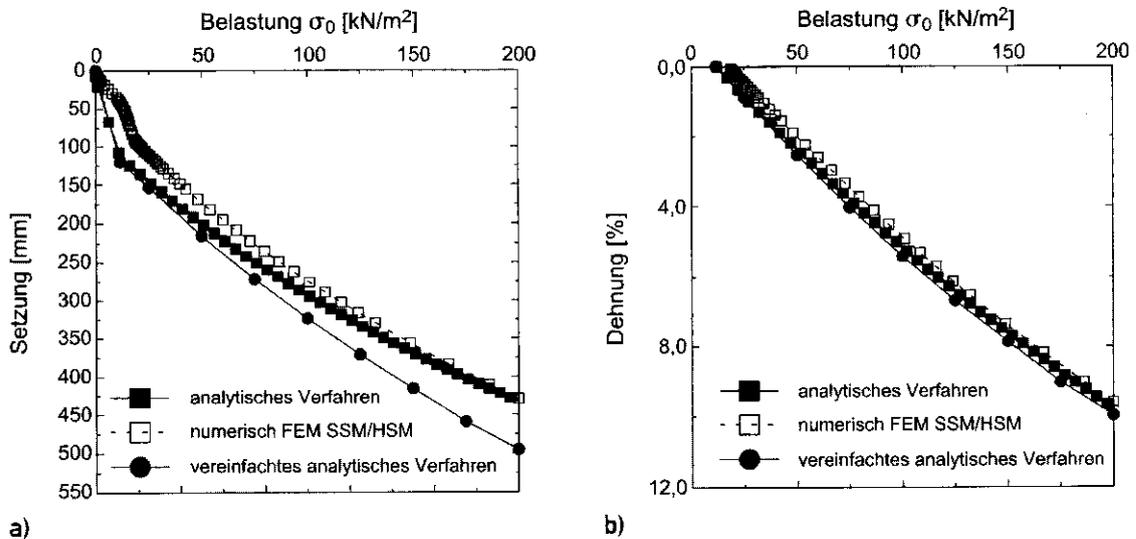


Bild 8. Berechnung mit dem vereinfachten Verfahren im Vergleich, a) Last-Setzungslinien, b) Last-Dehnungslinien  
 Fig. 8. Calculation with the simplified model, a) load-settlement curve, b) load-strain curve

Einbaubeschädigungen,  $A_3$  für die Verarbeitung,  $A_4$  für Umgebungseinflüsse und  $A_{\text{dyn}}$  zur Berücksichtigung dynamischer Belastungen) und den Sicherheitsbeiwert  $\gamma$  abgemindert und den berechneten Ringzugkräften gegenübergestellt wird. Der Bemessungswert der Langzeitfestigkeit der Ummantelung ergibt sich dann wie folgt:

$$F_d = \frac{F_k}{A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_{\text{dyn}} \cdot \gamma} \quad (26)$$

Der Abminderungsfaktor  $A_{\text{dyn}}$  ist nur bei hohen Verkehrslasteinwirkungen (z. B. bei Eisenbahnstrecken) anzusetzen. Der Abminderungsfaktor  $A_3$  wird entscheidend davon bestimmt, ob eine rundgewebte Ummantelung oder eine mittels Naht gefertigte Ummantelung vorliegt, da die Naht nur ca. die Hälfte der Kurzzeitfestigkeit des Polyestergewebes aufweist.

## 6 Schlußbemerkung

In diesem Beitrag wurden numerische wie analytische Berechnungsverfahren vorgestellt, welche bei einer gegebenen Gründungssituation eine Prognose der Verformungen und der Ringzugkräfte in der Geokunststoffummantelung ermöglichen. Weitere Hinweise zur Prognose von Setzungsmulden und Horizontalverformungen sowie Ansätze zur Erfassung von Kriecherscheinungen und zyklischen Belastungen werden in [1] gegeben.

Der Hauptvorteil des Gründungsverfahrens „geokunststoffummantelte Sandsäulen“ ist, daß dieses Verfahren auch bei sehr weichen, bindigen oder organischen Böden anwendbar ist, da die radiale Stützwirkung durch die Ummantelung im Verbund mit dem umgebenden Boden sichergestellt wird. Durch den Einsatz von geokunststoffummantelten Sandsäulen wird einerseits eine Reduktion der Setzungen bei gleichzeitiger Beschleunigung des Konsolidationsvorgangs, andererseits eine Vergrößerung der Gesamtscherfestigkeit des Baugrundes erreicht. Somit liegen die besonderen Vorteile dieses Gründungsverfahrens darin, daß hohe Dämme in sehr kurzer Schüttzeit aufgebracht werden können und sich gleichzeitig nur noch geringe Nachsetzungen ergeben.

## Literatur

- [1] Raithel, M.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen. H. 6 (1999), Schriftenreihe Geotechnik, Universität Gesamthochschule Kassel.
- [2] Kempfert, H.-G., Wallis, P.: Geokunststoffummantelte Sandsäulen – ein neues Gründungsverfahren im Verkehrswegebau. 5. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, Sonderheft Geotechnik (1997) S. 41–46.
- [3] Priebe, H.: Abschätzung des Setzungsverhaltens eines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes. Die Bautechnik 53 (1976) H. 5, S. 160–162.
- [4] Goughnour, R. R., Bayuk, A. A.: Analysis of Stone Column-Soil Matrix Interaction under Vertical Load. C. R. Colloque int. sur le reforcement des sols: Terre armée et autres méthodes, Paris, Vol. I (1979), p. 271–277.
- [5] Ghionna, V., Jamiolkowski, M.: Colonne di ghiaia, X Ciclo di conferenze dedicate ai problemi di meccanica dei terreni e ingegneria delle fondazioni metodi di miglioramento dei terreni. Politecnico di Torino Ingegneria, atti dell'istituto di scienza delle costruzioni, n°507 (1981).
- [6] Feuerlein, P.: Die Konsolidation planparalleler, unendlich ausgedehnter und wassergesättigter Tonschichten unter starren Lastflächen mit Hilfe von Sanddräns. Die Bautechnik 42 (1965), S. 120–125.
- [7] Kempfert, H.-G., Raithel, M., Jaup, A.: Model tests for analysis of the bearing and deformation behaviour of column foundations; Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure. Proceedings of the XIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam (1999), S. 1521–1526.
- [8] Bergado, D. T., Chai, J. C., Alfaro, M. C., Balasubramaniam, A. S.: Improvement Techniques of Soft Ground in Subsiding and Lowland Environment. A. A. Balkema, Rotterdam 1994.
- [9] FGSV: Merkblatt für die Anwendung von Geotextilien und Geogittern im Erdbau des Straßenbaus; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 1994.
- [10] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik DGGT: Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO (1997); Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

## Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Marc Raithel, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Universität Gh Kassel, Mönchebergstraße 7, 34125 Kassel