

Stichting Postacademisch Onderwijs

ZETTINGARME EN ZETTINGVRIJE CONSTRUCTIES

25/26.05.2004

Gründungen mit Geokunststoffummantelten Säulen Erfahrungen und Stand der Technik

Dr.-Ing. Marc Raithel

Kempfert + Partner Geotechnik

Sternstrasse 22

34123 Kassel

Tel.: 0049 (0) 561 70786-0

Fax.: 0049 (0) 0561 70786-50

Kempfert + Partner Geotechnik

Franz-Ludwig-Strasse 9

97072 Würzburg

Tel.: 0049 (0) 931 79039-0

Fax.: 0049 (0) 931 79039-20

e-mail: m.raithel@kup-geotechnik.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Tragsystem	3
2	Entwicklung des Gründungsverfahrens	4
3	Berechnungsverfahren	7
3.1	Allgemeines	7
3.2	Numerische Berechnung mittels der FEM	8
3.3	Analytisches Berechnungsverfahren	9
3.4	Vergleichsberechnungen	10
4	Projekterfahrungen	11
4.1	Verkehrswegebau	11
4.2	Projekterfahrungen im Wasserbau	14
4.3	Zusammenfassende Auswertung	16
5	Neue Entwicklungen und aktuelle Forschungen	17
5.1	Herstellungstechnik	17
5.2	Frühzeitige Aktivierung der Ummantelung	18
5.3	Tragverhalten von Säulen mit hohen Steifigkeiten	18
6	Empfehlungen	20
7	Schlussbemerkung	22

1 Einleitung und Tragsystem

Die Wirksamkeit einer rasterförmigen Säulengründung bezüglich einer Setzungsreduktion und Standicherheitserhöhung beruht im wesentlichen auf Spannungskonzentration über den Säulenköpfen verbunden mit einer Entlastung der Weichschichten, welche durch eine Gewölbewirkung in der Überschüttung ermöglicht wird, vgl. Bild 1.

Bei ummantelten Säulen wird das Steifigkeitsverhältnis hierbei zwischen den Säulen und der umgebenden Weichschicht im Regelfall so abgestimmt, dass sich ein flexibles und selbstregulierendes Tragverhalten bei näherungsweise Setzungsgleichheit zwischen Säule und umgebender Weichschicht ergibt, d.h. bei einem Nachgeben der Säulen können sich die Lasten zunächst auf die Weichschichten umlagern, womit sich der die Säule stützende Bodenwiderstand erhöht und eine interaktive Rückumlagerung ermöglicht wird, vgl. [2]. Dies hat zwar zur Folge, dass sich im Gegensatz zu „starren“ pfahlähnlichen Elementen bei ummantelten Säulen eine geringere Lastumlagerung bzw. höhere Gesamtsetzungen ergibt, dadurch sind zur Lasteinleitung im Regelfall aber keine zusätzlichen Maßnahmen, wie z.B. auf Membrankräfte bemessene geokunststoffbewehrte Tragschichten nach [3] über den Köpfen erforderlich, vgl. Abschnitt 4.3.

Durch die Spannungskonzentration wird in den Säulen eine Horizontalspannung bzw. Erddruck $\sigma_{h,s}$ hervorgerufen, welcher eine entsprechende Stützwirkung $\sigma_{h,B,ges}$ in gleicher Größe in der Weichschicht erfordert. Bei nicht ummantelten Säulen wird diese Stützwirkung in voller Größe durch den Erdwiderstand in den Weichschichten bei Durchmesserergrößerung (Ausbauchung) der Säulen mobilisiert. Dies bedingt bei sehr weichen Böden erhebliche Verformungen. Beim System der geokunststoffummantelten Säulen wird die radiale, horizontale Stützung der Säulen durch eine Spannungsaufnahme der Geokunststoffummantelung $\sigma_{h,geo} = f(F_R)$ im Verbund mit der Stützwirkung der umgebenden Weichschicht sichergestellt, wodurch der Einsatz auch in sehr weichen Böden ermöglicht wird. 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 durch die Wirkung der Säulen als Vertikaldräns zurückzuführen ist, so dass ein Großteil der Setzungen schon während der Bauzeit ausgeglichen werden kann.

Dieses Tragsystem und ein darauf beruhendes umfassendes analytisches Berechnungsverfahren zur Bemessung von geokunststoffummantelten Säulen wurde erstmals 1999 in [1] und [2] beschrieben. In Bild 1 ist das Tragsystem und rotationsymmetrische Berechnungsmodell 'geokunststoffummantelte Säule' mit dem Flächenverhältnis $a_S = A_S/A_E$ dargestellt. Nähere Erläuterungen werden in Abschnitt 3 gegeben.

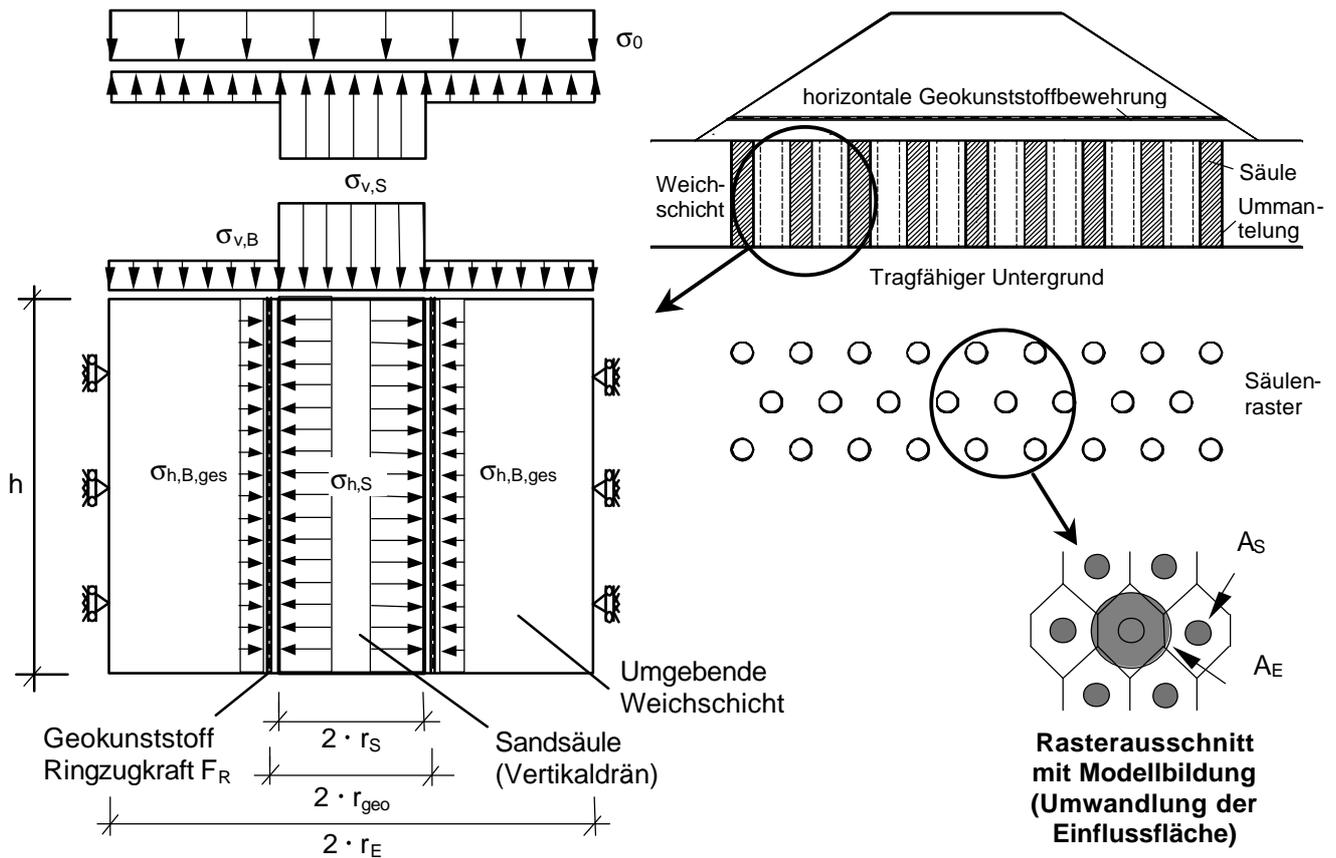


Bild 1: Schematische Darstellung des Gründungssystems und des Berechnungsmodells

2 Entwicklung des Gründungsverfahrens

Die Idee Sand- oder Kiessäulen bzw. Vertikaldräns mit einem flexiblen Material, insbesondere mit Geokunststoffen zu ummanteln, wurde schon von mehreren Autoren genannt.

Die Erfordernis einer Bemessung auf die auftretenden Ringzugkräfte bei vertikalen Lastabtrag über die Säulen wurde 1986 von van Impe in [5] erläutert. Hierbei wurden auch wesentliche Ansätze zur Berechnung der Ringzugkräfte dargestellt, ohne jedoch auf die Auswirkungen aus dem Herstellungsverfahren auf die Bemessung einzugehen.

Im wesentlichen ist aber festzustellen, dass die in [5] und [6] dargestellten Formeln nur den Grenzfall widerspiegeln, dass die gesamte Last über die Säule abgetragen wird und die daraus resultierende gesamte horizontale Spannung aus der Säule von der Umman-telung aufgenommen werden muss, d.h. die horizontale Stützwirkung in der Weichschicht (Teilaktivierung des passiven Erdwiderstandes) bzw. das interaktive Tragverhalten zwischen Weichschicht und Säule wurde vernachlässigt.

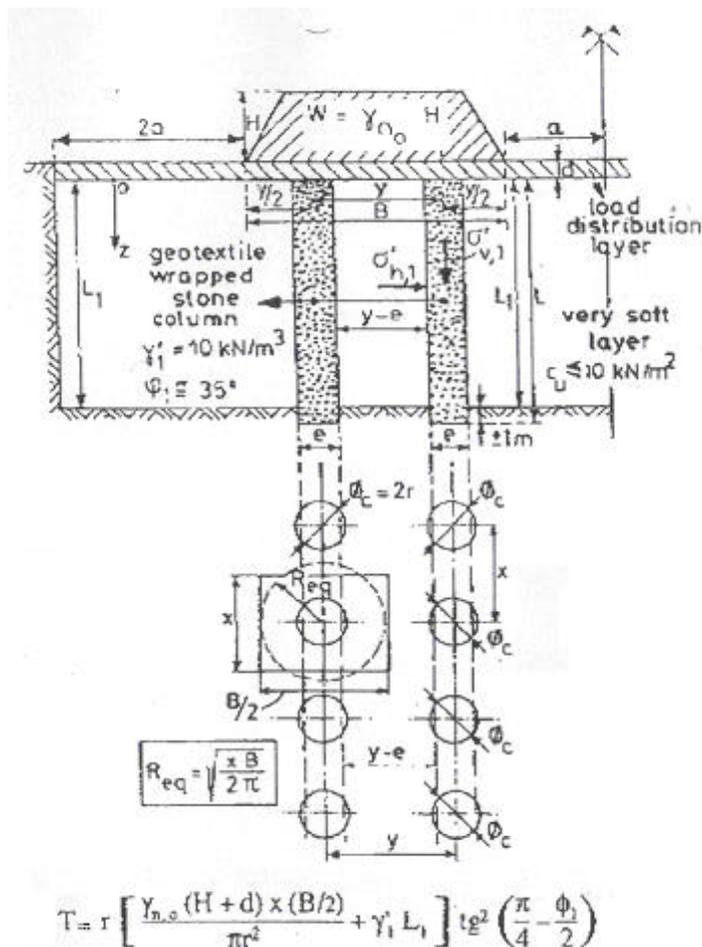


Bild 2: Berechnung von ummantelten Säulen bei vollständiger Vernachlässigung der Stützwirkung und Auflast der Weichschicht nach [5] und [6]

Es ergibt sich damit die in Bild 2 dargestellte Gleichung, wobei T für die Ringzugkraft steht. Diese entspricht folgender Gleichung, die sich als entsprechender Grenzfall auch dem Bemessungsverfahren nach Abschnitt 3 ergibt ($\Delta\sigma_{v,B}$, $\sigma_{ü,B}$ und $E^* = 0$):

$$\Delta F_R = K_{a,S} \cdot (\Delta\sigma_0 \cdot A_E/A_S + \sigma_{ü,S}) \quad (1)$$

Dadurch war dieses Berechnungsverfahren zwar sehr einfach zu handhaben, jedoch wurde das tatsächliche Tragverhalten zu stark vereinfacht, mit der Folge, dass die Ringzugkräfte erheblich zu hoch ermittelt wurden und eine Aussage über das realitätsnahe Verformungsverhalten nicht möglich war.

Während in [5] und [6] die theoretische Tragwirkung der Säulen im Vordergrund stand, wurden parallel erste Anwendungen ausgeführt, die eine Annäherung an das beschriebene Gründungssystem der ummantelten Säulen darstellten, wobei die Tragwirkung der Säulen im Hintergrund stand. In [7] wurde eine Bodenverbesserung aus Sandsäulen im Zuge einer Kaimauererstellung erwähnt, die mit einem Geotextil ummantelt werden. Die Säulen sollten hierbei allerdings v. a. den Porenwasserüberdruck auf die Kaimauer reduzieren, wobei die Ummantelung nur konstruktiv vorgesehen wurde, d.h. die Bemessung auf Ringzugkräfte war nicht vorgesehen.

In [8] wurde darüber berichtet, dass Anfang der 90iger Jahre im Rahmen der Sanierung eines Hochwasserschutzdammes bei Hollern in Österreich geotextilummantelte Dränagesäulen (\varnothing 1 bis 1,5 m) mit einem Tiefenrüttler hergestellt wurden. Die Ummantelung hatte bei diesem und zwei Nachfolgeprojekten allerdings ebenfalls nur die Aufgabe die Dränagewirkung der Säulen sicherzustellen und wurde nicht auf Ringzugkräfte bemessen. Daher und aufgrund der möglichen Beanspruchungen beim Einbau wurde die Geokunststoffmaterial auch bewusst so dehnweich gewählt, dass eine wesentliche Stützwirkung der Säule nicht zu erwarten war.

Eine vergleichbare Anwendung stellt nach [9] auch der Einsatz von sog. geotextilummantelten Kiessäulen im Zuge des Umbaus der BAB A8 in den Jahren 1993/1994 dar, wobei zur Drainage des Baugrundes Kiessäulen mit einem Durchmesser von 20 cm mit einem hochfesten Filtergewebe ummantelt wurden. Aufgrund des geringen Durchmessers war aber auch hierbei nicht mit nennenswerten Ringzugkräften und damit von einem Lastabtrag über die Säulen in den tragfähigen Untergrund auszugehen.

Neben diesen Anwendungen in Europa wurden ummantelte Säulen in großem Umfang im Zuge der Baugrundverbesserungsarbeiten zur Gründung des Haneda Airport in Tokio, Japan eingesetzt. Nach [10] wurden bis 1994 in Verbindung mit Banddräns, Sanddräns mit einem Durchmesser von 50 cm hergestellt, welche aufgrund des Vorliegens von extrem weichen Böden (u.a. Schlick) zur Sicherstellung der Funktionsweise mit einem Geotextil ummantelt wurden. Nach [10] war aber auch bei diesem Projekt das Ziel die Konsolidierung des Untergrundes zu beschleunigen und nicht einen direkten Lastabtrag über die Säulen zu ermöglichen, was u.a. auch dazu führte, dass die Säulen nicht bis auf einen tragfähigen Untergrund geführt werden, sondern in Weichschichten enden.

Somit waren bis Mitte der neunziger Jahre zwar erste Erfahrungen zur Herstellung von ähnlichen Systemen vorhanden, die erforderlichen Techniken zur Herstellung eines vollständigen, selbstregulierenden bzw. interaktiven Tragsystems aus ummantelten Säulen und die dafür erforderlichen Berechnungsmodelle wurden aber erst seit ca. 1994 entwickelt. 1994 erfolgten in Deutschland erste Belastungsversuche an freistehenden ummantelten Tragsäulen und 1996 wurde das Gründungsverfahren zur Verbreiterung eines ca. 5 m Eisenbahndammes auf Torf- und Kleiböden in Hamburg erstmals ausgeführt, vgl. Bild 3 und [11].

Das entsprechende Bemessungsverfahren unter Berücksichtigung der verschiedenen Interaktionen zwischen Weichschicht, Ummantelung und Säule zur realitätsnahen Berechnung der Ringzugkräfte und Setzungen wurde parallel entwickelt; vgl. Abschnitt 3.2.

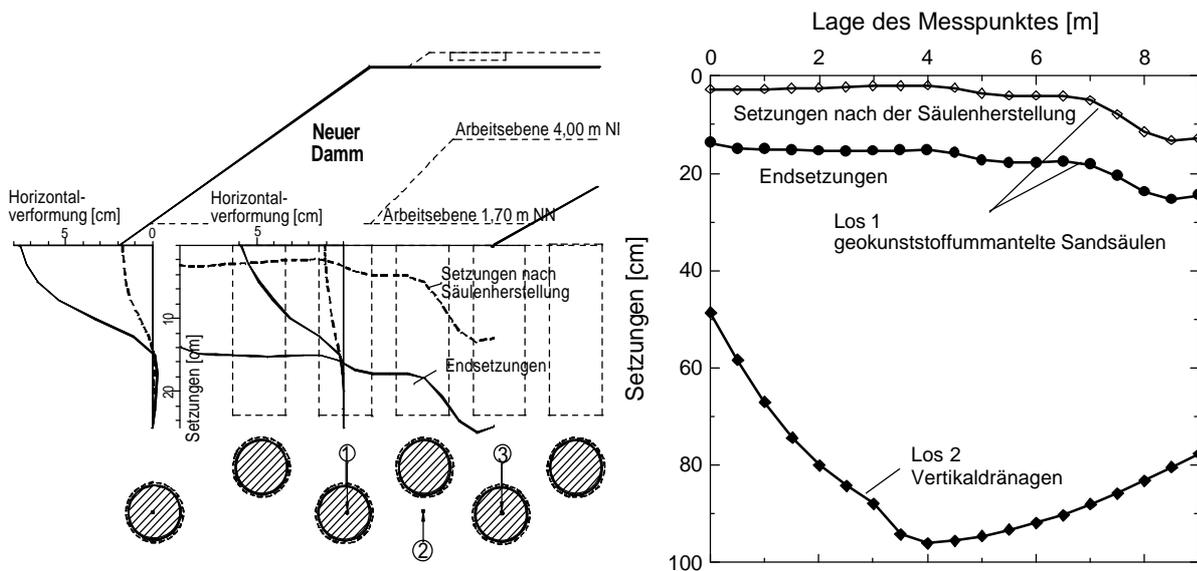


Bild 3: Anwendung des Gründungssystems in Hamburg 1995/1996 und Vergleich der gemessenen Setzungen im benachbarten Los 2.

3 Berechnungsverfahren

3.1 Allgemeines

Zur Berechnungsmodell kann ein numerisches oder analytisches Modell verwendet werden. Unabhängig von der Wahl des Berechnungsverfahrens sind aber Mindestanforderungen an das Berechnungsmodell einzuhalten:

- Das interaktive Tragverhalten, d.h. die zeit- und belastungsabhängige Spannungskonzentration über den Säulenköpfen muss erfasst sein.
- Für die Berechnung des zeitlichen Setzungsverlaufes muss die Konsolidierung der Weichschichten unter Berücksichtigung der Säule als Vertikaldrän erfasst werden.
- Die Steifigkeit der Weichschicht muss in Abhängigkeit von der herrschenden effektiven Spannung berücksichtigt werden (spannungsabhängiger Steifemodul).
- Bei Vorliegen einer Aktivierungsaufweitung (Differenz zwischen Ummantelungsdurchmesser und Einbaudurchmesser der Säule nach Bild 1) muss die erforderliche Belastung und Verformung vor der Aufnahme die Ringzugkräften in der Ummantelung korrekt erfasst werden.
- Bei Anwendung von Verdrängungsverfahren zur Säulenherstellung muss die Wirkung der Verdrängung auf das Spannungsniveau der Weichschicht berücksichtigt werden.
- Bei geschichteten Untergrundverhältnissen sind alle maßgebenden Bodenschichten getrennt mit ihren jeweiligen Bodenkenngößen zu berücksichtigen (ein Zusammenfassen bzw. eine Mittelung von Kennwerten einzelner Bodenschichten ist nicht zulässig).

- Falls im Zuge der Herstellung Verdichtungswirkungen innerhalb der Ummantelung, ohne stützende Aussenverrohrung des Säulenmaterials erzeugt werden (z.B. Ausstopfen durch Tiefenrüttler), muss die dadurch stattfindende Belastung der Ummantelung sicher berücksichtigt werden.
- Die folgenden Größen mit maßgebendem Einfluss auf die zu berechnenden Ringzugkräfte und Setzungen sind in die Berechnungen einzuführen:

Flächenverhältnis a_s

Radius der Säule r_s und der Geokunststoffummantelung r_{geo}

Steifigkeit der Geokunststoffummantelung J

Mächtigkeit der maßgebenden Weichschichten h_i

Spannungsabhängige Steifigkeiten der Weichschichten (z.B. Steifemodul $E_{s,i}$)

Scherparameter der Weichschichten ϕ'_B ; c_B und des Säulenmaterials ϕ'_S

Wichten der Weichschichten γ_B und des Säulenmaterials γ_S

Erdruchdruckbeiwerte $K_{O,B}$ bzw. Primärspannungszustand der Weichschicht (ggf. aufgrund einer Verdrängungswirkung erhöht)

Auflastspannung σ

3.2 Numerische Berechnung mittels der FEM

Für die numerische Analyse kann 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 werden für die Weichschichten das Soft Soil Model (SSM), ein Stoffgesetz des Cam-Clay Typs, und für die Sand und Kiese des Säulenmaterials und der Überschüttung das Hard Soil Model (HSM), ein modifiziertes Stoffgesetz auf der Grundlage des Duncan/Chang Typs, verwendet.

Im Regelfall erfolgt die numerische Analyse durch die Verbindung eines rotationssymmetrischen mit einem ebenen Modell. 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 Gesamtsystemes, 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.

3.3 Analytisches Berechnungsverfahren

Das analytische Berechnungsmodell wurde ausgehend von den bekannten Berechnungs- und Bemessungsverfahren für Schotter- oder Sandsäulen entwickelt, welche durch die Einbeziehung der Geokunststoffummantelung erweitert bzw. ergänzt wurden. Betrachtet wird hierbei jeweils eine Säule mit ihrem Einflußbereich (Einheitszelle) nach Bild 1. In diesem rotationssymmetrischen Modell wird zunächst nur eine einzelne, homogene Schicht (= Scheibe) betrachtet. 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 verwiesen. Im einzelnen liegen dem Modell die folgenden Randbedingungen zugrunde.

Unter der Zugrundelegung des Gleichgewichtes 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:

$$\Delta\sigma_0 \cdot A_E = \Delta\sigma_{v,S} \cdot A_S + \Delta\sigma_{v,B} \cdot (A_E - A_S) \quad (2)$$

Aus den Vertikalspannungen infolge der Auflast und der Bodeneigengewichte ergeben sich Horizontalspannungen, wobei $\sigma_{\ddot{u},S}$ und $\sigma_{\ddot{u},B}$ für die Überlagerungsspannung in der Säule bzw. in der Weichschicht stehen:

$$\Delta\sigma_{h,S} = \Delta\sigma_{v,S} \cdot K_{a,S} + \sigma_{\ddot{u},S} \cdot K_{a,S} \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_{h,B} = \Delta\sigma_{v,B} \cdot K_{0,B} + \sigma_{\ddot{u},B} \cdot K_{0,B}^* \quad (4)$$

Aus den einzelnen Horizontalspannungen ergibt sich unter Annahme des aktiven Erddruckbeiwertes $K_{a,S}$ in der Säule eine Differenzspannung $\Delta\sigma_{h,Diff}$. Diese entspricht der Mobilisierung einer zusätzlichen Erddruckkomponente in der Weichschicht bis ein Gleichgewicht der Horizontalspannungen erreicht wird. Aus der Differenzspannung resultiert die Ausdehnung der Säule.

$$\Delta\sigma_{h,Diff} = \Delta\sigma_{h,S} - (\Delta\sigma_{h,B} + \Delta\sigma_{h,geo}) \quad (5)$$

Es wird vorausgesetzt, dass die Ummantelung (Radius r_{geo}) ein linearelastisches Materialverhalten mit der Steifigkeit J aufweist, wodurch die Ringzugkraft ΔF_R in eine horizontale Spannung bzw. Stützwirkung $\Delta\sigma_{h,geo}$ umgerechnet werden kann:

$$\Delta F_R = J \cdot \Delta r_{geo} / r_{geo} \quad \text{and} \quad \Delta\sigma_{h,geo} = \Delta F_R / r_{geo} \quad (6)$$

Die Horizontalverformung Δr_S und die Setzung der Weichschicht s_B werden nach [4] abgeleitet für einen radial und longitudinal belasteten Hohlzylinder (ν_B = Querdehnzahl der Weichschicht; $K_{0,B}^*$ = Erdruhedruckbeiwert in der Weichschicht). Unter der Annahme der Setzungsgleichheit zwischen Weich-

schicht und Säule (Überlagerungsspannung in der Säule bzw. in der Weichschicht $\sigma_{\dot{u},S}$ und $\sigma_{\dot{u},B}$) können dann die folgenden Berechnungsgleichung abgeleitet werden.

$$\left\{ \frac{\Delta\sigma_{v,B}}{E_{s,B}} - \frac{2}{E^*} \cdot \frac{v_B}{1-v_B} \left[K_{a,S} \cdot \left(\frac{1}{a_S} \cdot \Delta\sigma_0 - \frac{1-a_S}{a_S} \cdot \Delta\sigma_{v,B} + \sigma_{\dot{u},S} \right) - K_{0,B} \cdot \Delta\sigma_{v,B} - K_{0,B}^* \cdot \sigma_{\dot{u},B} + \frac{(r_{geo} - r_S) \cdot J}{r_{geo}^2} - \frac{\Delta r_S \cdot J}{r_{geo}^2} \right] \right\} \cdot h = \left[1 - \frac{r_S^2}{(r_S + \Delta r_S)^2} \right] \cdot h \quad (7)$$

$$\Delta r_S = \frac{K_{a,S} \cdot \left(\frac{1}{a_S} \cdot \Delta\sigma_0 - \frac{1-a_S}{a_S} \cdot \Delta\sigma_{v,B} + \sigma_{\dot{u},S} \right) - K_{0,B} \cdot \Delta\sigma_{v,B} - K_{0,B}^* \cdot \sigma_{\dot{u},B} + \frac{(r_{geo} - r_S) \cdot J}{r_{geo}^2}}{\frac{E^*}{(1/a_S - 1) \cdot r_S} + \frac{J}{r_{geo}^2}} \quad (8)$$

$$\text{mit } E^* = \left(\frac{1}{1-v_B} + \frac{1}{1+v_B} \cdot \frac{1}{a_S} \right) \cdot \frac{(1+v_B) \cdot (1-2v_B)}{(1-v_B)} \cdot E_{s,B} \quad (9)$$

Die Gleichungen können durch Iteration gelöst werden. 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 Steifeexponent m (bei normalkonsolidierten bindigen und organischen Böden ≈ 1) verwendet.

$$E_{s,B} = E_{s,B,ref} \cdot \left(\frac{p^*}{p_{ref}} \right)^m \quad (10)$$

3.4 Vergleichsberechnungen

Unter Zugrundelegung der beschriebenen Bestimmungsgleichungen wurde 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/m² bis zum Erreichen der Gesamtlast aufgebracht, weitere Angaben finden sich in [1]. 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.

Insgesamt ist bei den Berechnungen eine relativ gute Übereinstimmung der Last-Setzungslinien und Last-Dehnungslinien festzustellen. Lediglich bei geringen Lasten, vor der Aktivierung des Geokunststoffes, 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.

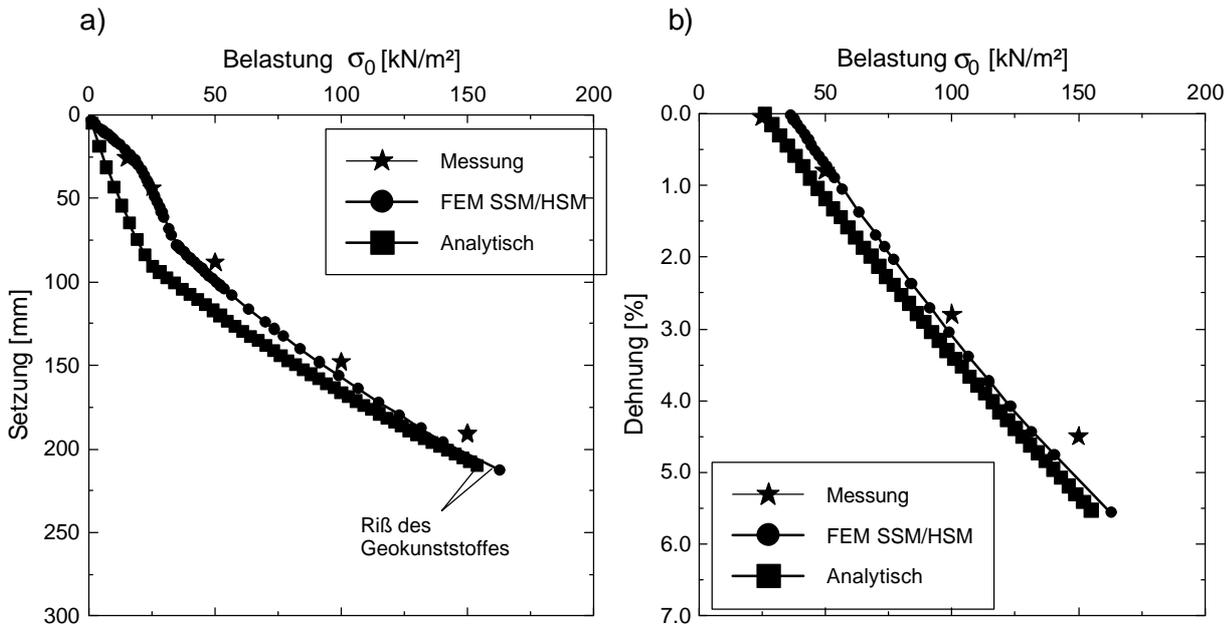


Bild 4: Vergleichsberechnungen - großmaßstäblicher Modellversuch
a) Last-Setzungslinie b) Last-Dehnungslinie

4 Projekterfahrungen

4.1 Verkehrswegebau

Wie schon erwähnt, wurde das Gründungsverfahren zwischenzeitlich vornehmlich im Verkehrswegebau eingesetzt. Insgesamt liegen zur Zeit über 15 Referenzprojekte in Deutschland, den Niederlanden und Schweden vor, wobei auch umfangreiche Verformungsmessungen vorgenommen wurden, vgl. auch Bild 3. Diese Projekte wurden mit den bewährten, in [1] und [2] beschriebenen Herstellungsverfahren, die als Bodenersatzverfahren und Verdrängungsverfahren bezeichnet werden, ausgeführt. Während beim Bodenersatzverfahren eine Verrohrung (i.d.R. ca. 0,8 - 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 - 0,8 m) nach dem Verdrängungsprinzip eingebracht, wobei der Boden beim Einrütteln mit Hilfe eines konischen Verschlusses am Rohrfuß zur Seite verdrängt wird, vgl. Bild 5.

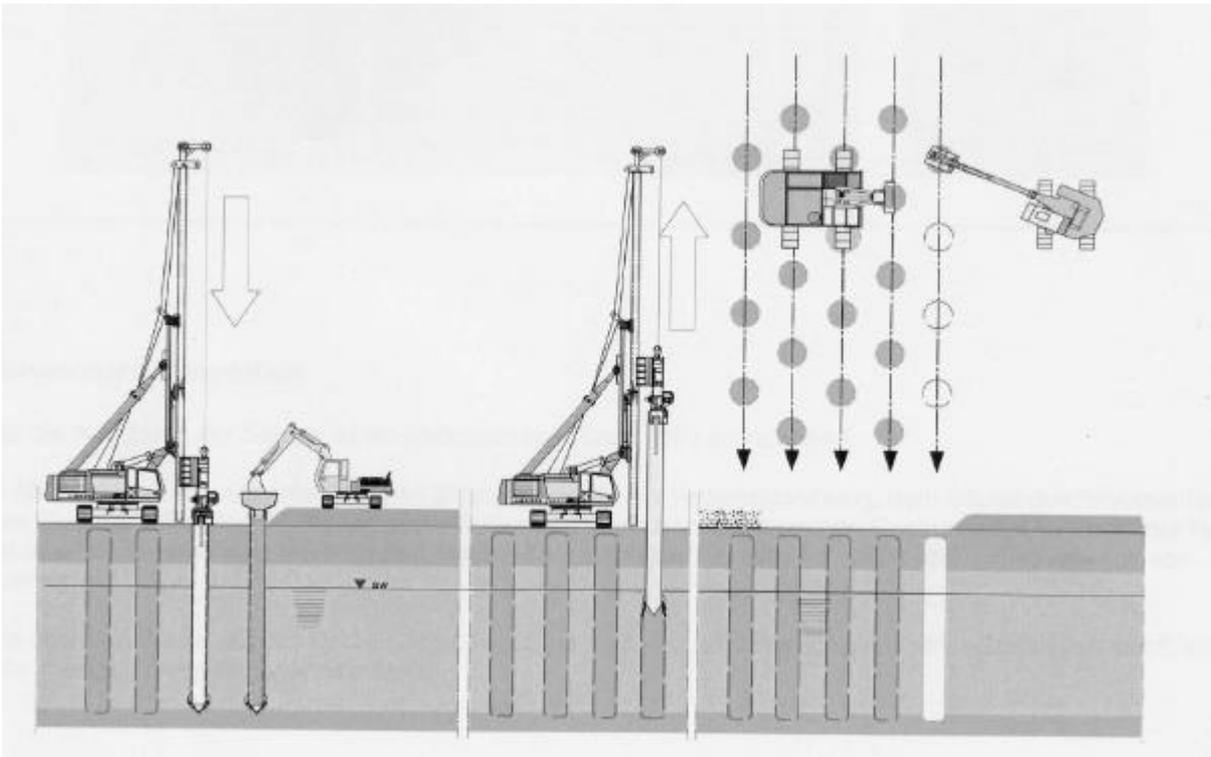


Bild 5: Herstellung von ummantelten Sandsäulen im Verdrängungsverfahren mit Außenverrohrung

Anhand der ausgeführten Projekte konnte grundsätzlich festgestellt werden, dass sich das Gründungsverfahren bei den ausgeführten Projekten bewährt hat. In [12] wurde eine erste Zusammenstellung von Erfahrungen gegeben.

Exemplarisch wird im folgenden die Baugrundverbesserung beim Ausbau der DB-Strecke Karlsruhe-Basel dargestellt. Bei diesem Projekt lag die Gründung eines Dammes von 1,0 bis 2,0 m Höhe auf einer ca. 7 m mächtige Wechsellagerung von Torf-, Schluff- und Tonschichten vor. Bodenmechanische Kennwerte sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Bodenkenngrößen Projekt ABS/NBS Karlsruhe-Basel

Bodenschicht	Kote [m NN]	γ/γ' [kN/m ³]	k [m/s]	E_s [MN/m ²]	ϕ' [°]	c' [kN/m ²]
Schluff, tonig	123,3 bis 121,8	19/10	$8 \cdot 10^{-10}$	2,5	26	5
Wechsellagerung Ton/Schluff z.T.org.	121,8 bis 119,3	17/7	$7,5 \cdot 10^{-10}$	2,3	29	4,5
Torf	119,3 bis 117,5	11/1	$1 \cdot 10^{-7}$	0,7	20	11
Sand, z.T. schluffig	ab 117,5	19/10	$4 \cdot 10^{-6}$	20	33	1

Hierbei wurden sowohl Säulen mit einem Durchmesser von 60 cm im Verdrängungsverfahren als auch mit 80 cm Durchmesser im Aushubverfahren (zur Vermeidung von Erschütterungen im Bestandsgleis)

hergestellt. Die Situation ist im Bild 6 dargestellt. Typische Messergebnisse sind ebenfalls in Bild 5 dargestellt.

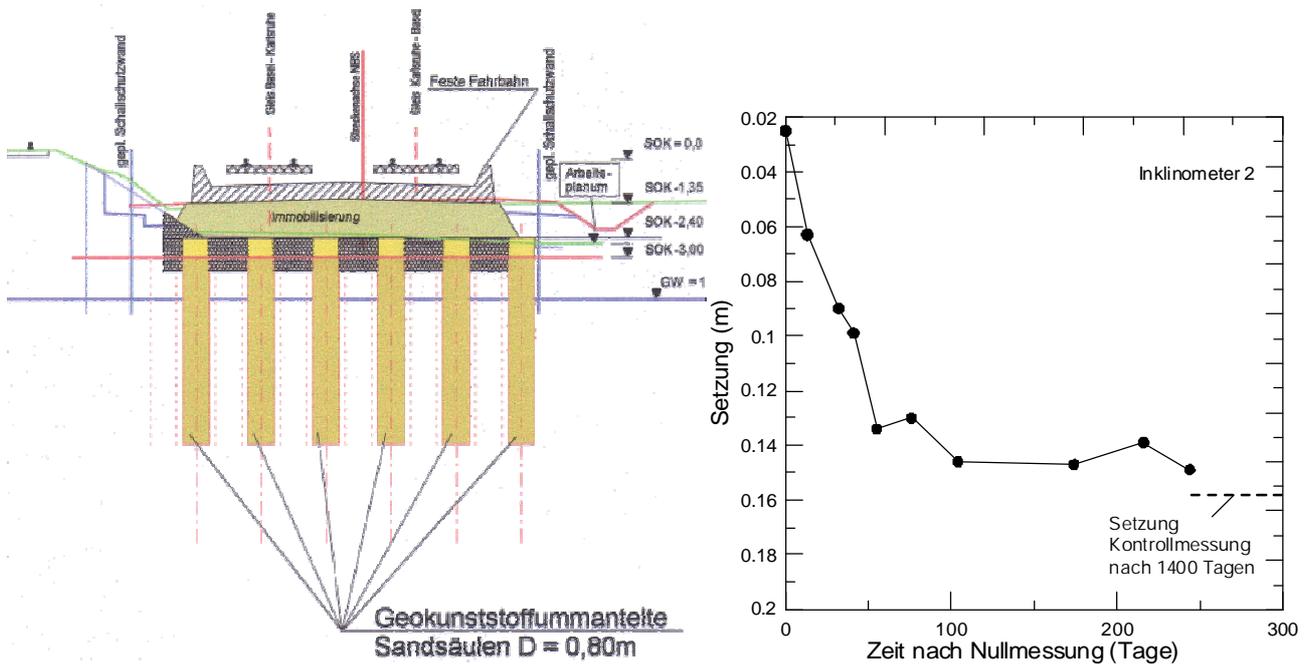


Bild 6: Gründung und typische Messergebnisse beim Projekt ABS/NBS Karlsruhe-Basel

Bei einer Dammverbreiterung der A115 im Raum Saarmund wurden ummantelte Säulen in einem 10%-Raster mit 80 cm Durchmesser über den Säulenköpfen eingesetzt. In Bild 7 ist die Gründung und Messergebnisse über den Dammquerschnitt dargestellt.

Es hat sich hierbei gezeigt, dass zur Setzungsvorwegnahme eine temporäre Überschüttung des Verkehrsdammes mit einer Auflast entsprechend der späteren Verkehrsbelastung erfolgen sollte und dass bei Dammgründungen zur Verringerung der Setzungen immer eine hochzugfeste horizontale Bewehrungslage über den Säulenköpfen konstruktiv angeordnet werden sollte.

Die Messungen bei diesem Projekt belegen allerdings auch, dass wesentliche Anteile der Nachsetzungen auf Kriecherscheinungen des Baugrundes beruhen und diese ohne die ummantelten Säulen noch stärker zu erwarten gewesen wären. Dies ist in der zwischenzeitlichen Erkenntnis (siehe z.B. [14] und [15]) bedingt, dass die Kriechverformungen u.a. mit der Größe der Belastungsänderung zunehmen und die Weichschicht durch die Spannungskonzentration über den Säulenköpfen geringer belastet wird. Zudem unterliegt die Weichschicht bei Berücksichtigung von Kriechsetzungen zunächst einer stärkeren Setzung als die Säule und es kommt zu einer weiteren Lastumlagerung auf die Säule. Durch die auch bei anderen Projekten erhaltenen Messergebnisse und Erfahrungen hat sich so gezeigt, dass die Kriechsetzungen des unverbesserten Baugrundes deutlich (um mindestens ca. 50%) reduziert, aber nicht vollständig vermieden werden können.

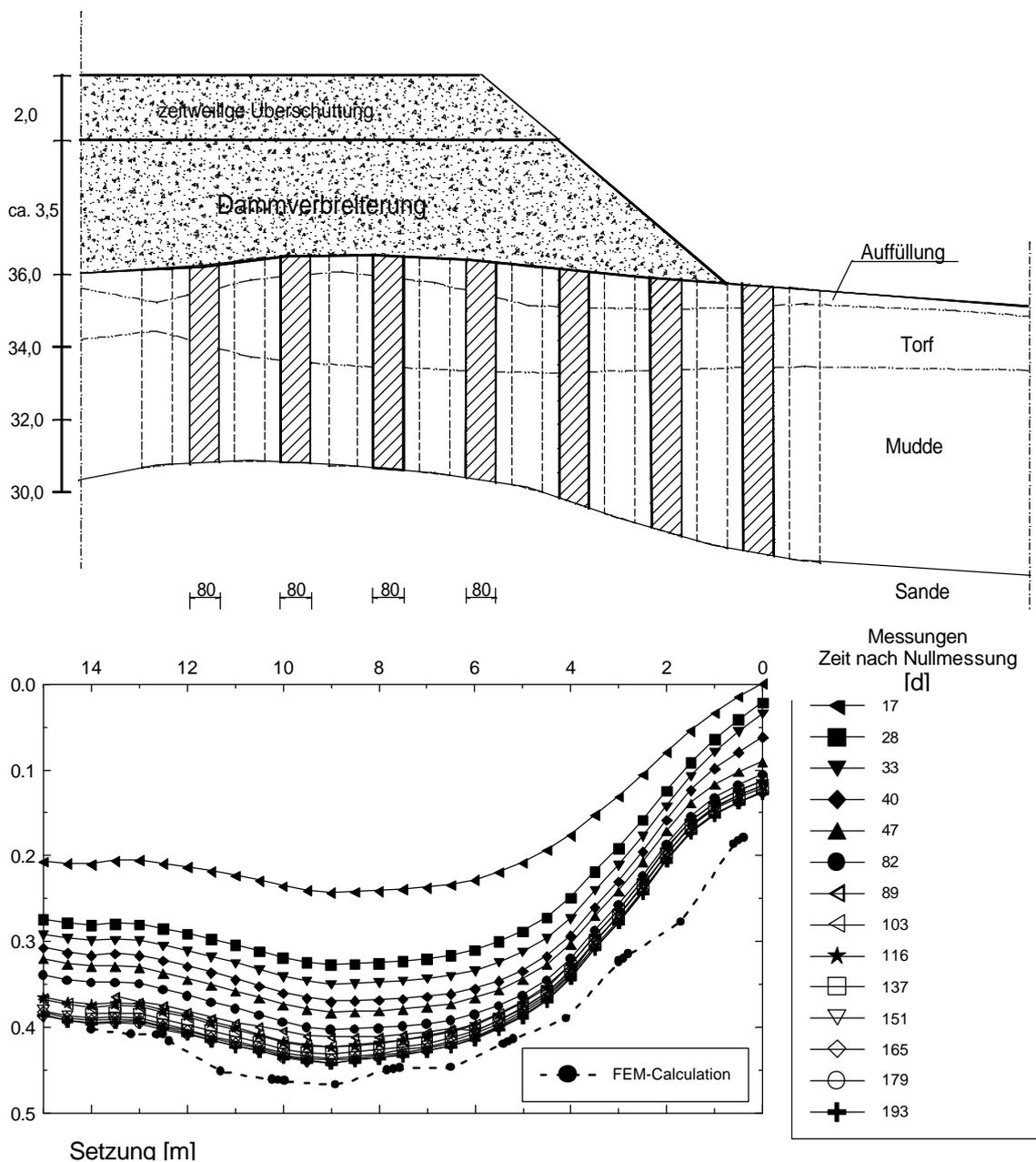


Bild 7: Gemessene und berechnete Setzungsmulde beim Projekt Berlin-Saarmund

4.2 Projekterfahrungen im Wasserbau

Neben der Anwendung des Gründungsverfahrens im Verkehrswegebau liegen zwischenzeitlich auch Erfahrungen mit Großanwendungen im Wasserbau vor. Hierbei ist insbesondere die Erweiterung des Wertgeländes der DASA-Flugzeugwerft in Hamburg-Finkenwerder um ca. 140 ha zum Bau des neuen Airbus A 380 zu nennen. Die dazu notwendige Flächenerweiterung erfolgt in dem westlich an das Gelände angrenzende Mühlenberger Loch. Als Voraussetzung für die gleichmäßige Geländeaufhöhung wurde die vorgesehene Erweiterungsfläche zunächst u.a. mit einem ca. 2,4 km langen Umschließungsdamm eingefasst, um in der entstehenden Polderfläche den Aufstau eines konstanten Wasserspiegels zu ermöglichen. Der Umschließungsdamm wurde auf ca. 60.000 ummantelte Säulen mit einem Durchmesser von 80 cm und Längen zwischen 4 und 14 m gegründet und stellt zugleich den

neuen Hochwasserschutzdeich des Werksgeländes dar. Des Weiteren wurde zur Verlegung des vorhandenen Finkenwerder Vordeiches in Richtung Elbe nochmals über 10.000 Säulen eingesetzt, um Schlickverdrängungen zu verhindern, die Standsicherheit zu erhöhen und um die Deichkrone setzungsarm zu gründen. Die Situation und typische Baugrundrandbedingungen sind in Bild 8 dargestellt.

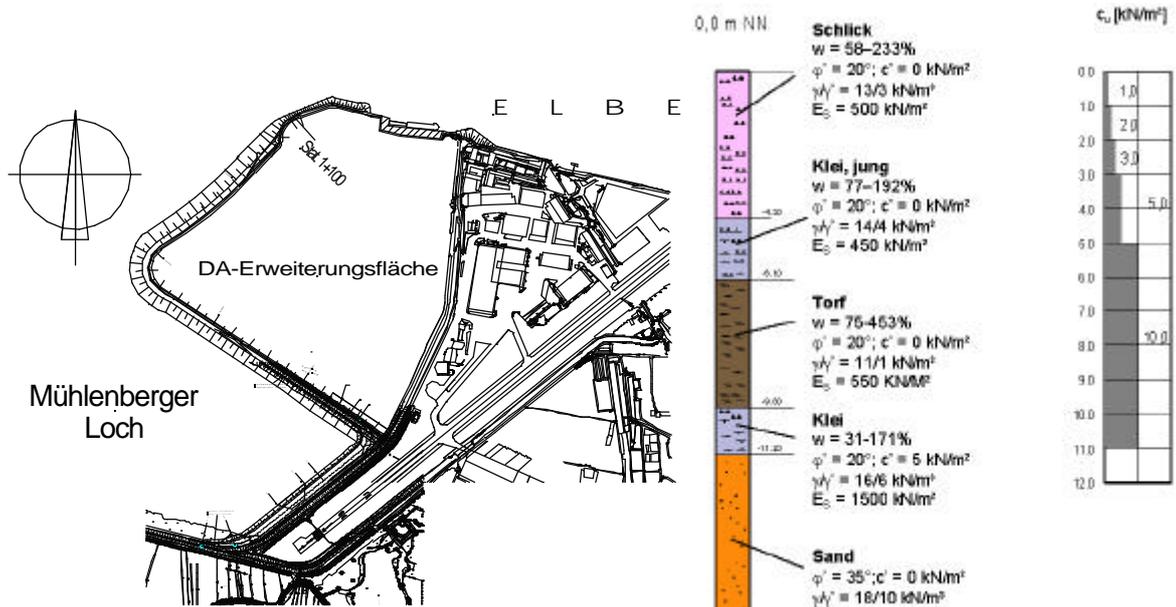


Bild 8: Überblick über die Deichbauprojekte im Rahmen der Flächenerweiterung der Flugzeugwerft in Hamburg-Finkenwerder und typische Baugrundrandbedingungen

Die Herstellung der geokunststoffummantelten Sandsäulen im Verdrängungsverfahren wurde im wesentlichen vom Pontons aus mit mäklergeführten Rammen (Bild 9) vorgenommen. Zur Lagestabilisierung der Säulenköpfe im Weichboden wurde bei der Einbringung der Säulen eine sofortige Überschüttung des Säulenkopfes von ca. 0,5 m bis max. 1,0 m durchgeführt.

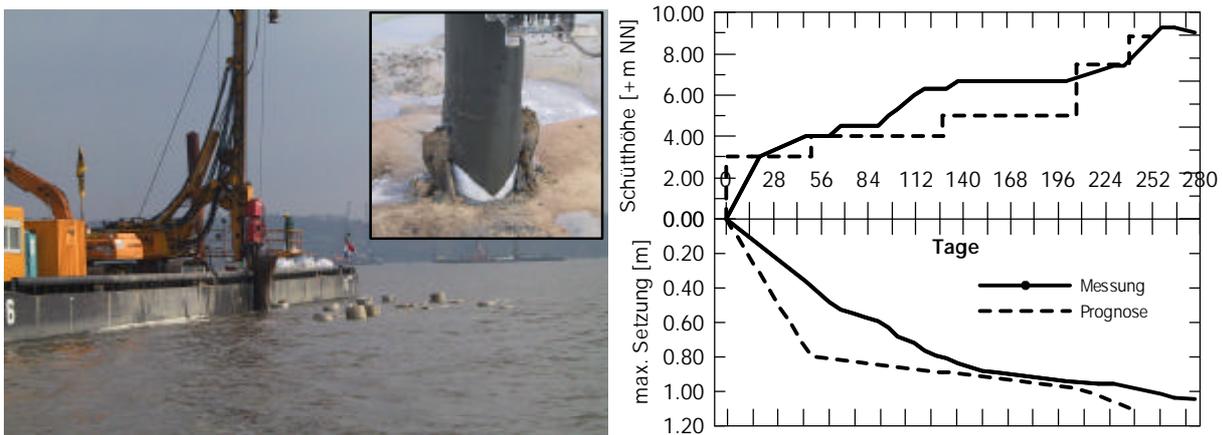


Bild 9: Säulenherstellung vom Ponton und typische Messergebnisse bei der Aufbringung des Umschließungsdeiches

Der Finkenwerder Vordeich wurde nur teilweise auf ummantelten Säulen gegründet. In Bild 10 ist ein typisches Messergebnis dargestellt, wobei die Setzungsreduktion im Bereich der ummantelten Säulen

im Vergleich zum Bereich der Vertikaldräns zu ersehen ist. Das Gründungssystem hat sich hierbei durch eine hohe Flexibilität in der Ausführung und durch schnelle Konsolidierungszeiten ausgezeichnet, so dass die einzelnen Schüttlagen nahezu fortlaufend mit geringen Zwischenliegezeiten aufgebracht werden konnten.

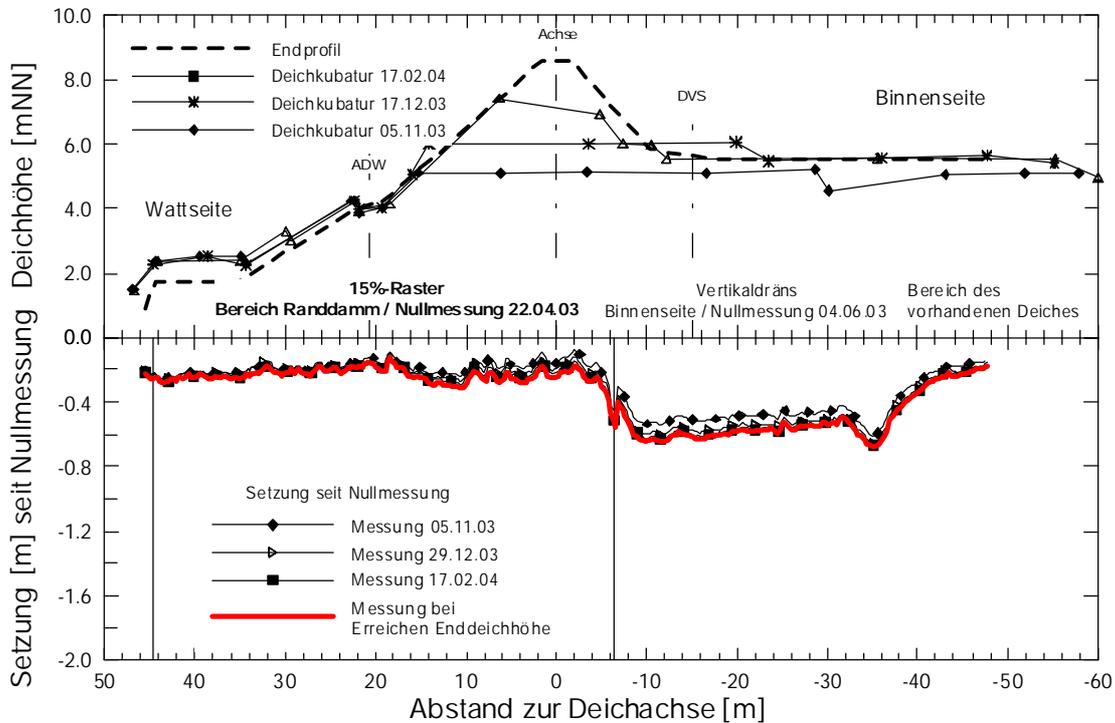


Bild 10: Setzungsmessung bei der Verlegung Finkenwerder Vordeich (exemplarisch)

Durch die Gründung auf geokunststoffummantelte Sandsäulen konnte so der Umschließungsdeich innerhalb einer Bauzeit von rund 9 Monaten bis in eine Höhe von ca. 7 m hochwassersicher aufgebracht werden. Zur vollständigen Herstellung der bis ca. 10 m hohen Deiche war inklusive Kleianddeckung jeweils eine Bauzeit von nur ca. 15 Monaten erforderlich. Für detailliertere Angaben und Beschreibungen über den Einsatz der ummantelten Säulen bei diesem sei auf [17] und [18] verwiesen.

4.3 Zusammenfassende Auswertung

Wie erwähnt liegen zur Zeit ca. 15 Referenzprojekte vor, wobei auch umfangreiche Verformungsmessungen vorgenommen wurden. Um die Wirksamkeit von ummantelten Säulen mit derjenigen von Schottersäulen zu beurteilen, wurden die Ergebnisse von Modellversuchen aus [2] und ausgeführten Projekten mit in der Literatur [19] veröffentlichten Ergebnissen bei nichtummantelten Stopfsäulengründungen verglichen. Obwohl sicherlich exakt nicht vergleichbare Randbedingungen vorausgesetzt werden können, wurden die ermittelten Baugrundverbesserungsfaktoren β (Setzung des unbehandelten Bodens/Setzung nach Baugrundverbesserung) näherungsweise in Abhängigkeit des Flächenverhältnisses in Bild 11 zusammenfassend dargestellt. Die Baugrundverbesserungsfaktoren bei ummantelten

matische Feldversuche durchgeführt. In [21] wurde auch über ein Projekt in Berlin berichtet, bei welchem eine entsprechende Geogitterummantelung in Verbindung mit Betonrüttelsäulen zum Einsatz kam. Die Funktion dieser Ummantlung war allerdings auf den Herstellungsvorgang der Betonrüttelsäulen begrenzt, da nach dem Erhärten des Betons der Ummantelung keine Wirkung mehr zuzurechnen ist.

5.2 Frühzeitige Aktivierung der Ummantelung

Bei kurzen Bauzeiten und geringen Überschüttungshöhen ist dafür Sorge zu tragen, dass in der Ummantelung möglichst frühzeitig Ringzugkräfte aktiviert werden. In diesem Zusammenhang wurden verschiedene Entwicklungen in jüngerer Zeit vorgenommen, die unabhängig vom Herstellungsverfahren die Frühaktivierung sicherstellen sollen.

Bei Anwendung des Aushubverfahrens (vgl. Abschnitt 4.1) ist die Frühaktivierung i.d.R. schon dadurch sichergestellt, dass die Ummantelung so gewählt wird, dass deren Durchmesser dem Durchmesser der Verrohrung entspricht. Bei Anwendung von Verdrängungsverfahren wird dieses Ziel z.T. dadurch erschwert, dass die Säulen infolge der Vorspannung in der Weichschicht eingeschnürt werden können und somit vor der Aktivierung von Ringzugkräften ggf. zunächst eine Durchmesserergrößerung der Säulen stattfinden muss. Beim herkömmlichen Verdrängungsverfahren unter Verwendung einer durch Klappen geschlossenen Aussenverrohrung wird daher eine Ummantelung mit einem optimierten Durchmesser eingelegt und z.T. eine zusätzlich Auflast auf der Säule im Zuge der Herstellung aufgebracht. Die genaue Festlegung des Ummantelungsdurchmessers erfolgt unter Zugrundelegung von Erfahrungswerten bezüglich der Vorspannungseffekte und Einschnürungen in den Weichschichten, welche durch Messungen gewonnen wurden.

Bei der Herstellung mit dem Tiefenrüttler kann die Einschnürung durch eine sehr dichte Verdichtung des Säulenmaterial im Zuge des Ausstopfens vermindert bzw. vermieden werden. Allerdings sind dann die Beanspruchungen der Ummantelung während des Stopfvorganges zu berücksichtigen.

5.3 Tragverhalten von Säulen mit hohen Steifigkeiten

Durch die o.g. neueren Verfahren zur Frühaktivierung der Ummantelung und durch hochzugfeste Ummantelungen können zwischenzeitlich mit den genannten Herstellungsverfahren Säulen ausgeführt werden, deren Tragverhalten sich dem von pfahlähnliche Elemente annähert. Hierbei nimmt die Stützwirkung des umgebenden Bodens bei entsprechender Zunahme derjenigen der Ummantelung ab. Modellversuche sind in [22] dargestellt. Die völlige Vernachlässigung der Stützwirkung der Weichschichten, wie z.B. in [22] beschrieben, ist aber schon aufgrund der Eigengewichtswirkung und der Vorspannung (bei Anwendung von Verdrängungsverfahren) in den Weichschichten nicht korrekt, sondern stellt einen unrealistischen Grenzfall dar. Zur Ermittlung von realitätsnahen Ringzugkräften ist

berechnet auftreten, wodurch bei den beschriebenen steifen Säulen eine Bemessung der horizontalen Bewehrungslagen zur Sicherstellung der Lasteinleitung sinnvoll ist.

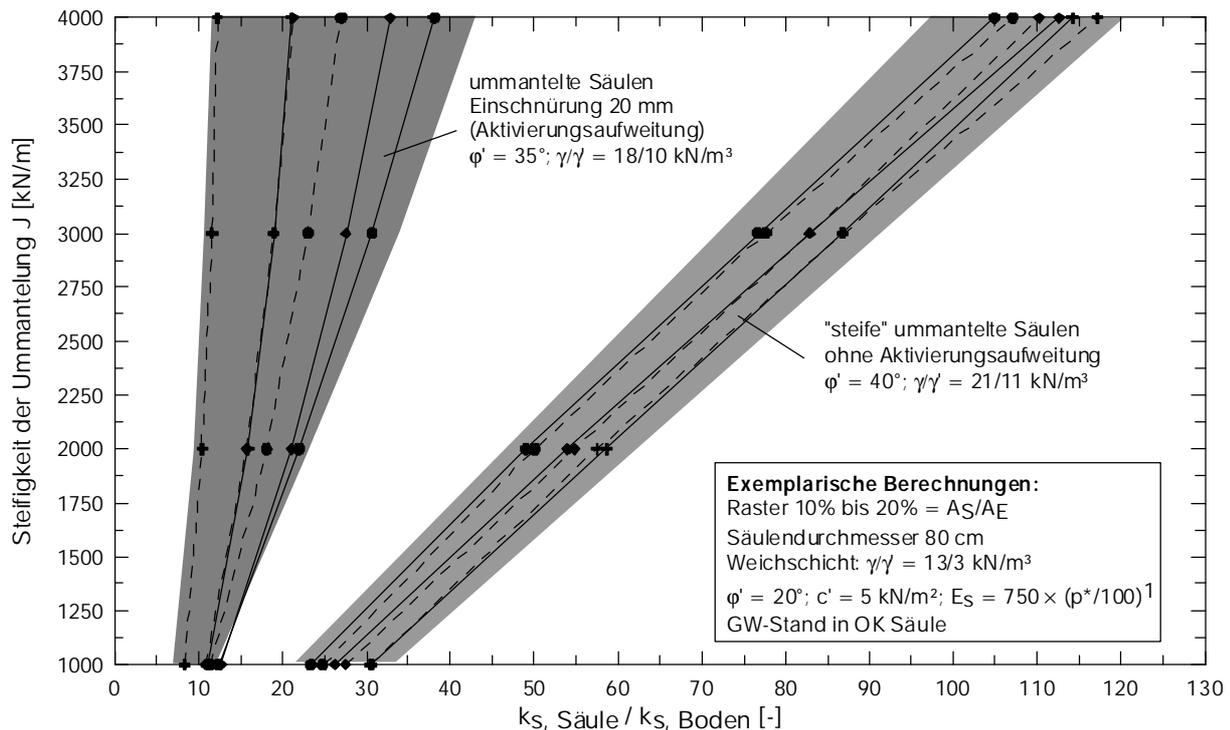


Bild 13: Abschätzung von vorhandenen Steifigkeitsverhältnissen bei der Anwendung von ummantelten Säulen

In diesem Zusammenhang werden zur Zeit weitere Forschungen vorgenommen, die eine Berechnung der Membrankräfte in der entstehenden geokunststoffbewehrten Tragschicht über den Säulen auch unter Einbeziehung der Steifigkeit des Traggliedes bzw. des Steifigkeitsverhältnisses zwischen Säule und umgebenden Boden ermöglichen.

6 Empfehlungen

- Für den Entwurf einer Gründung mit geokunststoffummantelten Säulen ist zunächst zu berücksichtigen, dass das Tragsystem zur Aktivierung der erforderlichen Ringzugkräfte Verformungen aufweisen muss und somit systemimmanent bei sehr setzungsempfindlichen Bauwerken nicht oder nur unter Berücksichtigung von bestimmten Randbedingungen (z.B. längere Liegezeiten, temporäre Überschüttungen) angewendet werden sollte.
- Bei Bodenschichten mit hohen Steifigkeiten können in der Geokunststoffummantelung keine maßgebenden Ringzugkräfte aktiviert werden, da die Stützwirkung des umgebenden Bodens sehr viel höher sein kann als die erforderliche Stützwirkung der Ummantelung. Daher ist nur die Anwendung in weichen Böden wirtschaftlich. Bei extrem weichen Böden müssen Sonderverfahren eingesetzt werden (z.B. um die Säulen während und nach dem Herstellungsvorgang zu

stabilisieren). Der übliche Anwendungsbereich lässt sich in Abhängigkeit des Steifemoduls der Weichschichten, bei einer Referenzspannung von 100 kN/m², wie folgt angeben:

$$500 \text{ kN/m}^2 < E_{s,100 \text{ kN/m}^2} < 3000 \text{ kN/m}^2$$

Die gängigen Anwendungsgrenzen lassen sich auch wie folgt definieren.

$$3 \text{ kN/m}^2 < c_u < 50 \text{ kN/m}^2$$

Bei Anwendung von technologischen Sondermaßnahmen sind der Einsatz und die Herstellung von geokunststoffummantelten Säulen auch in Weichschichten mit $c_u < 3 \text{ kN/m}^2$ möglich.

- Die geokunststoffummantelten Säulen sind, um die beschriebene Wirkungsweise des Gründungssystems sicherzustellen, bis auf einen tragfähigen Untergrund abzusetzen. Die Steifigkeit der tragfähigen Schicht sollte mindestens um den Faktor 10 höher sein als die Vergleichswerte in der überlagernden Weichschicht. Der tragfähige Untergrund kann i.d.R. vereinfacht durch folgende Kennwerte definiert werden

$$E_{s, \text{ Untergrund}} > 5.000 \text{ kN/m}^2 \text{ (bei Referenzspannung } 100 \text{ kN/m}^2) \text{ und}$$

$$\varphi'_{s,k, \text{ Untergrund}} > 30^\circ$$

- Die Säulenlängen und die im Anwendungsfall maximal beherrschbare Weichschichtmächtigkeit ergibt sich i.A. aus den maschinentechnischen Grenzbedingungen. Übliche Herstellungslängen sind $3 \text{ m} < l_{\text{Säule}} < 20 \text{ m}$.
- Das nichtbindige, grobkörnige Säulenmaterial sollte einen effektiver Reibungswinkel $\varphi_k' \geq 30^\circ$ aufweisen. Die Durchlässigkeit sollte größer als $k = 10^{-5} \text{ m/s}$ sein, jedoch mindestens zwei Zehnerpotenzen durchlässiger als die umgebende Weichschicht.
- Der Säulendurchmesser hängt u.a. auch vom Herstellungsverfahren ab. Mit steigendem Säulendurchmesser nehmen die Auflasten je Säule und damit die Ringzugkraft zu. Zur Aktivierung von maßgebenden Ringzugkräften wird ein Mindestdurchmesser von 40 cm empfohlen. Übliche Grenzen für den Säulendurchmesser sind $0,5 \text{ m} < D_{\text{Säule}} < 1,5 \text{ m}$. Die Aktivierungsaufweitung, d.h. die Differenz zwischen dem Einbaudurchmesser der Säule und dem Geokunststoffdurchmesser nach Bild 1 sollte ca. 3% des Säulendurchmessers nicht überschreiten, um die Verformungen des Systems bis zur Aktivierung der Ummantelung zu begrenzen.
- Die Größe der Dehnsteifigkeit der Ummantelung ist zunächst nicht begrenzt, hat aber einen maßgeblichen Einfluss auf das Steifigkeitsverhältnis zwischen Säulen und umgebenden Boden. Falls auf eine Bemessung der horizontalen Bewehrungen verzichtet werden soll, ist die Dehnsteifigkeit der Säulen entsprechend anzupassen. Im Regelfall beträgt die Dehnsteifigkeit J zwischen 1000 und 3000 kN/m. Die radiale Bemessungsfestigkeit sollte größer als 30 kN/m betragen.

- Über den Säulen sollte eine Mindestüberdeckung aus nicht bindigen Boden vorhanden sein, die Höhe der Mindestüberdeckung sollte hierbei ca. dem lichten Säulenabstand entsprechen, mindestens jedoch ca. 1 m betragen.
- Ein Mindestsäulenraster von $a_s = 10\%$ sollte nicht unterschritten werden.
- In ca. 0,2 bis 0,5 m über den Säulenköpfen sollte eine horizontale Geokunststoffbewehrung mit einer Bemessungsfestigkeit größer als 30 kN/m zur Sicherstellung der Lasteinleitung in die Säulen und ggf. zur Reduktion von Horizontalverformungen angeordnet werden, dies muss ggf. bemessen werden, vgl. Abschnitt 5.3.
- Beim Vorliegen von Setzungsanforderungen sollten Liegezeiten unter Belastung eingeplant werden, da die Setzungen des Gründungssystems entsprechend der Konsolidation (Vertikaldräns) zeitverzögert eintreten.
- Während der Bauzeit sollten Überschüttungen des Systems mindestens in Höhe der späteren Belastung vorgenommen werden. Die notwendigen Liegezeiten können verkürzt werden, wenn temporäre Überschüttungen mit zusätzlichen Auflasten erfolgen.
- Im Einzelfall ist zu überprüfen, ob das Verformungsverhalten der Gründung bei und nach der Belastung durch ein angepasstes Messprogramm überwacht bzw. kontrolliert werden sollte.

Unabhängig von den o.g. Empfehlungen ist das Gründungssystem unter Einbeziehung der bodenmechanischen Verhältnisse, des Einbauverfahrens und der Belastungsrandbedingungen für jeden Einzelfall zu bemessen und in besonderen Fällen auch eine Prüfinstanz einzubeziehen.

7 Schlussbemerkung

In diesem Beitrag wurde nach der Erläuterung des grundsätzlichen Tragverhaltens ein umfassender Überblick über die Entwicklung des Gründungsverfahrens mit ummantelten Säulen und der Stand der Technik sowie wesentliche Erfahrungen aus ausgeführten Projekten dargestellt. Auch nach ca. 10jähriger positiver Erfahrungen mit dem Gründungssystem sind noch Weiterentwicklungen des Verfahrens zu erwarten, die auch durch fortlaufende Optimierungen der Verfahrenstechniken und weitere Forschungsvorhaben unterstützt werden.

Durch Anordnung von geokunststoffummantelten Säulen in Verbindung mit horizontalen Geokunststoffbewehrungen können somit zwischenzeitlich Gründungen auch bei noch schwierigeren Untergrundverhältnissen erfolgreich ausgeführt werden. Bei Durchführung von geeigneten und abgestimmten Labor- und Feldversuchen kann die Wirksamkeit bzw. Setzungsreduktion mit den nun vorhandenen Berechnungsmethoden mit ausreichender bzw. großer Sicherheit prognostiziert werden.

Literatur

- [1] Raithel M., Kempfert H.-G.: Bemessung von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Die Bautechnik 76, Heft 12 (1999).
- [2] Raithel, M.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen; Heft 6, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Gesamthochschule Kassel 1999.
- [3] Zaeske, D., Kempfert, H.-G.: Berechnung und Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten auf punkt- und linienförmigen Traggliedern. Bauingenieur 77 (2002).
- [4] 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.
- [5] Van Impe, W.: Improving of the Bearing Capacity of Weak Hydraulic Fills by Means of Geotextile. Third International Conference on Geotextiles, Vienna 1986.
- [6] Van Impe, W.: Soil Improvement Techniques and their Evolution. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1989.
- [7] Patentschrift DE 37 00 866: Verfahren zur Herstellung einer Kaimauer. 1991.
- [8] Sidak, N., Strauch, G.: Herstellung geotextilummantelter Kiestragsäulen mit Keller-Tiefenrüttler. 4 Österreichische Geotechniktagung, Wien 2003.
- [9] Geuder, S., Bräu, G.: Geotextile Bauweisen beim Umbau der BAB A8 München-Salzburg im Bereich des Chiemsees. Tiefbau 12 (1997).
- [10] Nakada, H. et al.: Haneda Airport offshore expansion project. Proc. Instn Civ. Engng; Civil Engineering 120 (1997).
- [11] Kempfert, H.-G., Wallis, P.: Geokunststoffummantelte Sandsäulen - ein neues Gründungsverfahren im Verkehrswegebau. Geotechnik Sonderheft zur 5. Informations- und Vortragsveranstaltung über Kunststoffe in der Geotechnik, München 1997.
- [12] Raithel, M., Kempfert, H.-G.: Erfahrungen mit dem Gründungssystem ‚geokunststoffummantelte Sandsäulen‘. 3. Österreichische Geotechniktagung. Wien 2001.
- [13] Schüßler, M.: Anwendung neuer, innovativer Gründungslösungen – ist das Risiko für den Auftraggeber überschaubar? Vorträge der Baugrundtagung. Mainz 2002.
- [14] Edil, T. B., Fox, P. J., Lan, L.-T.: Stress-Induced One-Dimensional Creep of Peat; Advances in Understanding and Modelling the Mechanical Behaviour of Peat, Balkema, Rotterdam 1994.

- [15] Krieg, S.: Viskoses Bodenverhalten von Mudden, Seeton und Klei; Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericana in Karlsruhe, Heft 150, 2002.
- [16] Heidig, G.: Verbreiterung eines Autobahndammes auf wenig tragfähigem Baugrund beim 6-streifigen Ausbau der Bundesautobahn A115 – Bauvorbereitung. Vorträge der Baugrundtagung. Stuttgart 1998.
- [17] Kempfert, H.G. et al.: Polderumschließung durch einen auf geokunststoffummantelten Sandsäulen gegründeten Deich. Vorträge der Baugrundtagung. Mainz 2002.
- [18] Raithel, M. et al.: Gründungsmaßnahmen zur Tragfähigkeitserhöhung und Setzungsreduktion beim Projekt Mühlenberger Loch – Los1. Geotechnik 2002/1.
- [19] 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.
- [20] Patentschrift DE 100 25 966 C2: Stützschauch-Säulen 2002.
- [21] Trunk, U. et al.: Geogrid wrapped vibro stone columns. EUROGEO3 München 2004.
- [22] Paul, A.; Schwedt, S.: Untersuchungen zum Tragverhalten vertikaler Gründungselemente aus gelegten Geogittern – Perspektiven für neue Anwendungsmöglichkeiten im Tiefbau. 3. Geokunststoff-Kolloquium der Fa. Naue. 2003
- [23] Paul, A., Ponomarjow, A.: The bearing Behaviour of geogrid reinforced crushed stone columns in comparison to non-reinforced concrete pile foundations. EUROGEO3, München 2004.

Anmerkung: Teile diesen Beitrags sind einem Entwurf zum Abschnitt 6.10 „Ummantelte Säulen“ der EBGEO sowie einem Manuskript entnommen, welches zur Veröffentlichung in der Bautechnik 09/2004 eingereicht wurde.