BERECHNUNGSVERFAHREN UND BEMESSUNG VON UMMANTELTEN SÄULEN – ENTWICKLUNG UND AKTUELLER STAND

Dr.-Ing. M. Raithel Kempfert + Partner Geotechnik Würzburg/Kassel

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert Institut für Geotechnik und Geohydraulik Universität Kassel

Dipl.-Ing. A. Kirchner Kempfert + Partner Geotechnik Würzburg/Kassel

KURZFASSUNG:

Bei der 5. Informations- und Vortragsveranstaltung über Kunststoffe in der Geotechnik KGEO wurde 1997 in München erstmals in Deutschland über die erfolgreiche Anwendung eines Gründungssystems mit geokunststoffummantelten Säulen berichtet. Ein entsprechend umfassendes analytisches Berechnungsverfahren zur Bemessung der Ummantelung und zur Setzungsprognose wurde parallel entwickelt und 1999 veröffentlicht. Zwischenzeitlich wurde eine Vielzahl von Dämmen und Deichen mit geokunststoffummantelten Säulen gegründet. Im folgenden Beitrag sollen nach der Darstellung der Entwicklung des Gründungs- und Berechnungsverfahrens besondere Aspekte und Randbedingungen erläutert werden, die, aufgrund der zwischenzeitlich gewonnenen Projekterfahrungen und neuerer Forschungen und Entwicklungen bei Entwurf und Bemessung einer Gründung mit ummantelten Säulen, zusätzlich zu berücksichtigen sind. Abschließend wird der aktuelle Stand der Bearbeitung der Empfehlungen 6.10 der EBGEO – "Gründungssystem mit geokunststoffummantelten Säulen Entwurfes dargestellt.

1 EINLEITUNG

Das Gründungsverfahren "geokunststoffummantelte Säulen" wird bereits seit ca. 10 Jahren im In- und Ausland vornehmlich im Verkehrswegebau, aber zunehmend auch im Wasserbau zur Baugrundverbesserung eingesetzt, wenn z.B. mit einem unverträglichen Setzungsverhalten zu rechnen ist und sich die Standsicherheit von Dämmen als unzureichend erweist. Bei diesem Gründungsverfahren werden Säulen aus grobkörnigem Material bis auf tragfähige Schichten abgeteuft und mit einem Geokunststoff ummantelt, welcher die Filterstabilität sicherstellt und die horizontale Stützung im Verbund mit dem umgebenden weichen Boden vergrößert.

Im Folgenden soll zunächst ein kurzer historischer Abriss über die Entwicklung des Gründungsverfahrens gegeben werden, wobei insbesondere die Entwicklung des Bemessungsverfahrens, vom vereinfachten Modell der freistehenden Säule unter Vernachlässigung der Stützwirkung der Weichschicht bis zum komplexen Berechnungsverfahren unter Berücksichtigung des interaktiven Tragverhaltens zwischen Säule und Boden, erläutert werden soll.

Des Weiteren werden wichtige Projekterfahrungen bei der Herstellung im Aushub- und Verdrängungsverfahren sowie Aspekte vorgestellt, die aufgrund neuerer Erkenntnisse bei der Bemessung des Gründungsverfahrens zusätzlich zu berücksichtigen sind.

Dies betrifft z.B. die Erfassung der Aktivierung der Ummantelung und Randbedingungen bei der Säulenherstellung sowie Erfahrungen im Hinblick auf das Kriechverhalten einer Gründung mit geokunststoffummantelten Säulen. Des Weiteren besteht in jüngerer Zeit die Tendenz die Steifigkeit der Säulen (z.B. durch modifizierte Herstellungstechniken oder sehr dehnsteife Ummantelungen) stark zu erhöhen. Dadurch ergibt sich die Problematik, dass aufgrund der Steifigkeitsverhältnisse zwischen den Säulen und dem umgebenden Boden horizontale Bewehrungslagen über den Säulen erforderlich werden, um die entsprechende Lasteinleitung in die Säulen zu gewährleisten bzw. um größere Durchstanzeffekte zu vermeiden. In diesem Zusammenhang wird die Interaktion zwischen Säulenbemessung, inkl. des daraus resultierenden Steifigkeitsverhältnisses, und der Bemessung der geogitterbewehrten Tragschicht dargestellt. Abschließend wird der aktuelle Stand der Bearbeitung der Empfehlungen 6.10 der EBGEO – "Gründungssystem mit geokunststoffummantelten Säulen" erläutert und die wesentlichen Inhalte des aktuellen Entwurfes vorgestellt.

2 INTERAKTIVES TRAGSYSTEM

Die Wirksamkeit einer rasterförmigen Säulengründung bezüglich einer Setzungsreduktion und Standsicherheitserhöhung beruht im wesentlichen auf der Spannungskonzentration über den Säulenköpfen verbunden mit einer Entlastung der Weichschichten, welche durch eine Gewölbewirkung in der Überschüttung ermöglicht wird (Abbildung 2-1).

Bei ummantelten Säulen wird das Steifigkeitsverhältnis 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. 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. Raithel 1999). Dies hat zwar zunächst zur Folge, dass sich im Gegensatz zu "starren" pfahlähnlichen Elementen bei ummantelten Säulen eine etwas geringere Lastumlagerung bzw. Spannungskonzentration über den Säulenköpfen ergibt. Zur Lasteinleitung sind dadurch im Regelfall aber keine zusätzlichen Maßnahmen, wie beispielsweise auf Membrankräfte bemessene geokunststoffbewehrte Tragschichten (z.B. nach Zaeske/Kempfert 2002) über den Säulenköpfen erforderlich (vgl. Abschnitt 7).

Durch die Spannungskonzentration wird in den Säulen Horizontalspannung bzw. ein Erddruck eine σ_{hS} hervorgerufen, welcher eine entsprechende Stützwirkung σ_{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 Durchmesservergrößerung (Ausbauchung) der Säulen mobilisiert. Dies bedingt bei sehr weichen Böden erhebliche Verformungen. Beim System der ummantelten Säulen wird die radiale, horizontale Stützung der Säulen durch eine Spannungsaufnahme der Geokunststoffummantelung $\sigma_{h,qeo} = f(F_R)$ im Verbund mit der Stützwirkung der umgebenden Weichschicht sichergestellt, wodurch der Einsatz auch in sehr weichen Böden ermöglicht wird.



Abbildung 2-1: Schematische Darstellungen zum Tragverhalten des Gründungssystems

Insgesamt ergeben sich nach der Bauzeit nur noch geringe Setzungen, was einerseits auf die Setzungsreduktion durch die Spannungskonzentration über den Säulen und die damit verbundene 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. Des Weiteren werden, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, die Kriech- bzw. Sekundärsetzungen reduziert.

3 ENTWICKLUNG DES GRÜNDUNGSVERFAHRENS

Die Idee Sand- oder Kiessäulen bzw. Vertikaldräns mit einem flexiblen Material, insbesondere mit Geokunststoffen, zu ummanteln, wurde 1986 von van Impe beschrieben, ohne jedoch auf Herstellungsverfahren bzw. die daraus resultierenden Auswirkungen auf das Tragverhalten ein Higgebeinwurden auch Ansätze zur Berechnung der Ringzugkräfte dargestellt, wobei die in van Impe (1986, 1989) dargestellten Formeln aber nur den Grenzfall widerspiegeln, bei dem die gesamte Last über die Säule abgetragen wird und die daraus resultierende gesamte horizontale Spannung aus der Säule von der Ummantelung aufgenommen werden muss. Insofern wurde die horizontale Stützwirkung in der Weichschicht bzw. das interaktive Tragverhalten zwischen Weichschicht und Säule vernachlässigt.

Die Gleichungen von van Impe sind somit für den Fall einer freistehenden Säule anwendbar und ergeben sich als Sonderfall (bei völliger Vernachlässigung der umgebenden Weichschichten) auch aus dem Berechnungsverfahren von Raithel (1999). In Abbildung 3-1 ist ein Vergleich von Modellversuchsergebnissen an freistehenden Säulen aus Paul/Schwedt (2003) mit Berechnungsergebnissen nach Raithel (1999) dargestellt, wobei die Eigenkompressibilität des Säulenmaterials vernachlässigt wurde.

Es ist zu erkennen, dass die Versuchsergebnisse mit den genannten Berechnungsmodellen gut nachvollzogen werden können.



Abbildung 3-1: Vergleich von Modellversuchsergebnissen an freistehenden Säulen mit Berechnungsergebnissen

Die völlige Vernachlässigung der Stützwirkung der Weichschichten stellt aber einen unrealistischen Grenzfall dar, da bereits aufgrund der Eigengewichtswirkung und der Vorspannung (bei Anwendung von Verdrängungsverfahren) eine Stützwirkung in den Weichschichten aktiviert wird. Selbst bei sehr steifen Säulen wird somit das tatsächliche Tragverhalten zu stark vereinfacht, mit der Folge, dass die Ringzugkräfte erheblich zu hoch ermittelt werden und eine Aussage über das realitätsnahe Verformungsverhalten nicht möglich ist.

Während bei van Impe die theoretische Tragwirkung der Säulen im Vordergrund stand, wurden parallel erste Anwendungen ausgeführt, die eine Annäherung an das beschriebene Gründungssystem der ummantelten Säulen darstellten. So wurde in den achtziger Jahren beim Kaimauerbau in Hamburg eine Bodenverbesserung aus Kiessäulen, die mit einem Geokunststoff ummantelt wurden, erwähnt (Sass 1990 und Patentschrift 1991). Die Säulen sollten hierbei v.a. die Konsolidierung der Weichschichten beschleunigen und die Belastung der Kaimauern vermindern. Die dargestellten Messungen zeigen eine deutliche Lastanziehung der Säulen, wobei die Ummantelung nur konstruktiv vorgesehen war, ohne darauf bemessen zu sein.

Sidak/Strauch (2003) berichten darüber, dass Anfang der 90iger Jahre im Rahmen der Sanierung eines Hochwasserschutzdammes bei Hollern in Österreich geokunststoffummantelte Dränagesäulen (Ø 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 das Geokunststoffmaterial auch bewusst so dehnweich gewählt, dass eine wesentliche Stützwirkung der Säule nicht zu erwarten war.

Eine vergleichbare Anwendung stellt nach Geuder/Bräu (1997) auch der Einsatz von sog. geotextilummantelten Kiessäulen im Zuge des Umbaues der BAB A8 in den Jahren 1993/1994 dar, wobei zur Dränage 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 Airports in Tokio, Japan eingesetzt. Nach Nakada et al. (1997) wurden bis 1994 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 Geokunststoff ummantelt wurden. Auch bei diesem Projekt war 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 wurden, sondern in Weichschichten endeten.

Somit waren bis Mitte der neunziger Jahre zwar erste Erfahrungen zur Herstellung von Sand- und Kiessäulen mit Ummantelung vorhanden, die erforderlichen Techniken zur Herstellung eines vollständigen, selbstregulierenden bzw. interaktiven Tragsystems aus ummantelten Säulen und die dafür erforderlichen Berechnungsmodelle wurden aber erst ab ca. 1994 entwickelt. 1994 erfolgten in Deutschland erste Belastungsversuche an freistehenden ummantelten Tragsäulen (siehe Abbildung 3-2), 1996 wurde das Gründungsverfahren geokunststoffummantelte Sandsäulen zur Verbreiterung eines Eisenbahndammes auf Torf- und Kleierstmals eingesetzt böden Hamburg in (val. Kempfert/Wallis 1997 und Abbildung 3-3).



Abbildung 3-2: Herstellungs- und Belastungsversuche an freistehenden ummantelten Säulen, 1994 (Bild: Fa. Möbius Bau-AG)

Das entsprechende Bemessungsverfahren unter Berücksichtigung der verschiedenen Interaktionen zwischen Weichschicht, Ummantelung und Säule zur realitätsnahen Berechnung der Ringzugkräfte und Setzungen wurde parallel entwickelt und in Raithel (1999) veröffentlicht. In Abbildung 3-4 sind das Tragsystem und das auf Grundlage des Modells der Einheitszelle (vgl. Abbildung 2-1) abgeleitete rotationsymmetrische Berechnungsmodell "geokunststoffummantelte Säule" dargestellt.



Abbildung 3-3: Feldmessungen bei der Verbreiterung eines Eisenbahndammes in Hamburg 1996 (rechts), großmaßstäbliche Modellversuche 1997

Die entsprechenden Berechnungsgleichungen können durch Iteration gelöst werden, wobei der Steifemodul der Weichschicht $E_{S,B}$ möglichst wirklichkeitsnah in Abhängigkeit der jeweils herrschenden Spannung, z.B. mit der Potenzfunktion nach Ohde eingeführt wird. Für weitere Erläuterungen sei auf Raithel/Kempfert (1999) und Raithel (1999) verwiesen.

Durch die vorliegenden Messergebnisse bei über 20 durchgeführten Projekten konnte generell bestätigt werden, dass bei Verwendung dieses analytischen Berechnungsverfahrens eine sichere Bemessung der Ummantelung und realistische Setzungsprognosen ermöglicht werden. Die im jeweiligen Anwendungsfall vorliegenden Randbedingungen sind hierbei unter Berücksichtigung der Herstellungstechnik jeweils möglichst realitätsnah zu erfassen. In diesem Zusammenhang konnten aus den vorliegenden Projekterfahrungen und den zugehörigen Messungen differenzierte Erkenntnisse gewonnen werden, wodurch die Genauigkeit der Prognosen weiter erhöht werden konnte (vgl. Abschnitt 5).



Abbildung 3-4: Rotationssymmetrisches Trag- und Berechnungsmodell

In jüngerer Zeit wird vermehrt über eine Erprobung von sog. geogitterummantelten Mineralstoffsäulen berichtet (z.B. Paul/Schwedt 2003, Trunk et al. 2004, Heerten 2004b), einem System, dessen Grundzüge bereits Smoltczyk (1999) vorgestellt hat.

Bislang liegen aber über eine größere baupraktische Anwendungen dieses Verfahrens zur Herstellung von Tragsystemen wenig Erfahrung vor. Heerten (2004a) berichtet in diesem Zusammenhang zwar über ein Projekt in Berlin, 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 hinsichtlich der Lastaufnahme mehr zuzurechnen ist.

Bei diesem Herstellungsverfahren, aber auch bei Verwendung von Ummantelungsmaterialien mit sehr hohen Dehnsteifigkeiten, können Säulen hergestellt werden, deren Tragverhalten sich dem von pfahlähnlichen Elementen annähert. In diesem Fall sind gegenüber der herkömmlichen Bemessung des Gründungssystems zusätzliche Nachweise zu führen (vgl. Abschnitt 5.3).

Unabhängig von den verschiedenen Herstellungsverfahren und Ausführungsformen kann mit dem vorstehenden Bemessungsverfahren nach Raithel (1999) aber auch mit numerischen Methoden (FEM) eine wirklichkeitsnahe Bemessung aller Systeme gewährleistet werden (s.a. Abschnitt 7).

4 HERSTELLUNGSVERFAHREN

Für die praktische Bauausführung wurden im Grundsatz zwei Herstellungsverfahren entwickelt, die als Aushubverfahren und Verdrängungsverfahren bezeichnet werden (vgl. Abbildung 4-1).

Der Hauptunterschied beider Verfahren besteht in der Herstellung des von den Säulen im Untergrund einzunehmenden Hohlraumes. Während beim Aushubverfahren die einvibrierten Stützrohr vorhandenen in einem Weichschichten mit einem Greifer oder einer Schnecke bei ausgehoben werden, wird Anwendung von Verdrängungsverfahren die Weichschicht seitlich verldräleg Baupraxis fanden bisher im Wesentlichen nur das von der Möbius Bau-AG entwickelte Aushub- bzw. Verdrängungsverfahren mit Verrohrung (Doppelklappenrohr, vgl. Abbildung 4-2) Anwendung. Neuere Entwicklungen gehen dahin, ummantelte Säulen mit dem Tiefenrüttler herzustellen. Dazu werden durch verschiedene Firmen Anstrengungen unternommen, ein entsprechend optimiertes Herstellungsverfahren zu entwickeln (vgl. Abbildung 4-3).



Abbildung 4-1: Herstellungstechniken



Abbildung 4-2: Aushubverfahren und Verdrängungsverfahren mit Doppelklappenrohr (Bilder: Fa. Möbius Bau-AG)





Das Aushubverfahren ist insbesondere bei Böden mit hohen Eindringwiderständen zu bevorzugen bzw., wenn Erschütterungseinwirkungen auf angrenzende Bauten, Verkehrsanlagen usw. minimiert werden müssen.

Der Vorteil der Verdrängungsverfahren gegenüber dem Aushubverfahren beruht auf der schnelleren und wirtschaftlicheren Herstellung der Säulen und der Einleitung einer Vorspannung in die Weichschicht, außerdem müssen keine Böden ausgebaut und entsorgt werden.

Zur Verdrängung sind spezielle Geräte bzw. Verrohrungen notwendig, deren Anwendung verfahrensspezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Allerdings sind in den Weichschichten auftretende Porenwasserüberdrücke, Erschütterungen und Verformungen zu berücksichtigen.

Bei der Herstellung mit Tiefenrüttler sind insbesondere die Vordehnungen im Geokunststoff infolge des Ausstopfens wirklichkeitsnah zu erfassen sowie entsprechende Abminderungen der Zugfestigkeit der außen liegenden Ummantelung beim Einfahren des Tiefenrüttlers zu berücksichtigen.

Insgesamt bestehen bei Anwendung des Verdrängungsverfahrens erhöhte Anforderungen an Erfahrung und Sorgfalt bei der Bemessung und Ausführung, um die Tragfähigkeit bzw. Qualität der Gründung sicherzustellen (vgl. Abschnitt 5).

5 BESONDERE ASPEKTE BEI ENTWURF UND BEMESSUNG EINER GRÜNDUNG MIT UMMANTELTEN SÄULEN

5.1 Auswirkungen der Verdrängung bei der Säulenherstellung

Durch die zunehmenden Erfahrungen bei der Säulenherstellung im Verdrängungsverfahren wurde im Laufe der Weiterentwicklung des Bemessungsverfahrens festgestellt, dass bei der Verdrängung Wirkungen in der umgebenden Weichschicht ausgelöst werden, die zahlenmäßig zunächst nur schwer exakt zu erfassen sind, aber bei der Bemessung der Säulen berücksichtigt werden müssen.

Im Folgenden werden im Wesentlichen die Erfahrungen bei der Herstellung und Bemessung von ummantelten Säulen im Verdrängungsverfahren mit Verrohrung behandelt.

In Bezug auf die Herstellung mit Tiefenrüttlern liegen weniger Erfahrungen vor. Für die Bemessung ist hierbei insbesondere auf die erforderliche Erfassung der Beanspruchungen des außenliegenden Geokunststoffes beim Einbau hinzuweisen (z.B. durch Entnahme von entsprechenden Proben an freigelegten Testsäulen). In wesentlichen Punkten gelten die nachfolgenden Punkte aber auch für diese Verfahren.

5.1.1 Einschnürung und Aktivierungssetzungen

Durch umfangreiche Messungen, insbesondere bei zwei Testfeldern in den Niederlanden und zwei Testfeldern in Deutschland, konnte nachgewiesen werden, dass die Säulen bei Anwendung des Verdrängungsverfahrens mit Klappenrohren infolge der horizontalen Verdrängungsspannung in den Weichschichten bis unter den Innendurchmesser des Verdrängungsrohres eingeschnürt wurden (vgl. Abbildung 5-1).

Um eine unwirtschaftliche Festlegung der Ummantelungsfestigkeiten und eine Unterschätzung der auftretenden Setzungen zu vermeiden, ist bei der Bemessung daher der Durchmesser der Säule vor Belastung durch das Bauwerk im Verhältnis zum Durchmesser der gewählten Geokunststoffummantelung zu berücksichtigen.

Dies erfolgt in der Regel durch den Ansatz einer einheitlichen Durchmesserdifferenz (ggf. auch oberer und unterer Grenzwerte) unter Zugrundelegung von Messungen der Einschnürung bei vergleichbaren Herstellungsrandbedingungen und Bodenarten.



Abbildung 5-1: Durch Extensometer gemessene Einschnürung der Säule beim Verdrängungsverfahren (Testfeld Krempe)

Sofern nicht ausgeschlossen werden kann, dass auch nach der Bauzeit noch Aktivierungsverformungen auftreten, können numerische Berechnungen vorgenommen werden, wobei nach Simulation der Verdrängung auch die unterschiedliche Einschnürung Δr_0 in geschichteten Böden berücksichtigt werden kann (vgl. Abbildung 5-2). Da allerdings die genaue Modellierung des Herstellungsverfahrens (Verdrängung beim Einfahren unter Vibrationswirkung) auch mit numerischen Methoden kaum exakt erfasst werden kann, ist es notwendig die Berechnungsergebnisse an vorliegenden Messwerten zu kalibrieren.



Abbildung 5-2: Numerisch berechnete Einschnürung einer Säule (\varnothing 80 cm) in geschichtetem Boden

5.1.2 Scherfestigkeit / Porenwasserüberdruck

Während des Abteufens des Verdrängungsrohres kommt es in den Weichschichten zu einem Anstieg des Porenwasserüberdrucks. Um dessen Einfluss auf die Festigkeit der Weichschichten zu quantifizieren, wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt.

In Raithel (1999) sind Ergebnisse von in situ Messungen dargestellt, die zeigen, dass zu Beginn des Rüttelvorgangs eine Erhöhung des Porenwasserüberdrucks stattfindet, die Spitzenwerte aber schnell abgebaut werden. Maybaum/Mühlmann (2002) stellen Ergebnisse von großmaßstäblichen Modellversuchen und numerischen Berechnungen vor, die ebenfalls zeigen, dass es während des Eindringvorgangs zu einem kontinuierlichen Anstieg des Porenwasserüberdrucks kommt. Die Maximalwerte treten dabei im direkten Bereich der Säule auf, großräumige hydro-dynamisch bedingte Gefügestörungen, wie z.B. eine Verflüssigung der Weichschichten, wurden nicht festgestellt.

Vergleichende Flügelsondierungen zeigen, dass die bodenmechanischen Eigenschaften, insbesondere die undränierte Scherfestigkeit, durch das Einbringen der Verdrängungsrohre verbessert werden. Anhand der o.g. großmaßstäblichen Versuche unter Berücksichtigung einer Einzelsäule konnte eine Verbesserung um den Faktor 1,5 bis 2,0 gemessen werden. Bei Abbildung eines 15%-Säulenrasters (A_s/A_E = 15%) in kleinmaßstäblichen Versuchen (Maßstab 1:10), konnten unter Berücksichtigung der Modellgesetze sogar Verbesserungsfaktoren 3 bis 3,5 nachgewiesen (Kempfert + Partner Geotechnik 2001) werden. Umfangreiche in situ Messungen zur Scherfestigkeitsentwicklung sind aus dem Hamburger Segelschiffhafen (Testfeld) und aus der Baumaßnahme im Mühlenberger Loch (DA-Erweiterung) vorhanden, wodurch ebenfalls ein minimaler Verbesserungsfaktor von ca. 1,5 bis 2,0 bestätigt werden konnte (Abbildung 5-3). Somit liegen die bisherigen Berechnungsansätze, welche eine gleichbleibende Scherfestigkeit voraussetzen, auf der sicheren Seite.



Abbildung 5-3: Gemessene undränierte Scherfestigkeit vor und unmittelbar nach Säulenherstellung

5.1.3 Aufwuchs

Beim Verdrängungsverfahren kommt es durch die Verdrängung des weichen Bodens beim Säuleneinbau zu einer Anhebung des weichen Bodens im Bereich der Säulen. Dieser Effekt ist insbesondere bei Nachbarbebauung zu berücksichtigen und kann z.B. bei der Berechnung einer Dammschüttung zu einer Verringerung der zu berücksichtigenden Belastungen aufgrund der geringeren Schüttmengen bis zum Erreichen der Gradiente führen.

Die Geländeaufwölbung kann in situ augenscheinlich beobachtet werden. Zu deren Quantifizierung wurden umfangreiche in situ-Messungen im Rahmen eines Testfeldes, aber auch klein- und großmaßstäbliche Versuche (vgl. Geduhn et al. 2001 und Maybaum/Mühlmann 2002) durchgeführt. In Abbildung 5-5 ist exemplarisch für die Herstellung der 3. Säulenreihe die anhand kleinmaßstäblicher Versuche (Maßstab 1:10) ermittelte Aufwölbung dargestellt (vgl. Abbildung 5.4). Aufgrund der vorliegenden Erfahrungen kann die zu erwartende Aufwölbung mit ca. 5 bis 10% der Weichschichtmächtigkeit abgeschätzt werden.



Abbildung 5-4: Kleinmaßstäblicher Modellversuch (Maßstab 1:10)



Abbildung 5-5: Verformung der Weichschichtoberfläche nach Herstellung der 3. Säulenreihe

5.2 Langzeitsetzungsverhalten (Kriechen)

Wie in Abschnitt 3 dargestellt, beruht die Wirksamkeit einer rasterförmigen Säulengründung bezüglich einer Setzungsreduktion im Wesentlichen auf einer Spannungskonzentration über den Säulenköpfen, verbunden mit einer Entlastung der Weichschichten, welche durch eine Gewölbewirkung in der Überschüttung ermöglicht wird. Die Primärsetzungen treten hierbei nach den Gesetzen der Konsolidationstheorie ein, wobei eine erhebliche Setzungsbeschleunigung durch die Wirkung der ummantelten Säulen als große Vertikaldränagen gegeben ist. Im Regelfall klingt ein großer Teil der Primärsetzungen daher während der Bauzeit ab und kann ausgeglichen werden.

Bei der Ermittlung von Restsetzungen sind neben den Primärsetzungen aber auch die Sekundär- oder Kriechsetzungen zu berücksichtigen.

In der Literatur (siehe z.B. Edil 1994 und Krieg 2000) ist beschrieben, dass sich Kriechverformungen in Abhängigkeit derjenigen Belastungsänderung ergeben, welche die Deformation erzeugt. Da die Weichschicht durch die Spannungskonzentration über den Säulenköpfen geringer belastet wird, ist somit durch den Einsatz der ummantelten Säulen generell von einer Kriechsetzungsreduktion im Vergleich zum unverbesserten Baugrund auszugehen. Zudem unterliegt die Weichschicht bei Berücksichtigung von Kriechsetzungen einer stärkeren Setzung als die Säule. Demzufolge kommt es im Regelfall durch das interaktive Tragsystem zu einer Veränderung der Lastumlagerung und letztlich zu einem neuen Gleichgewichtszustand. Somit wird durch die Säulengründung eine weitere Reduktion der Kriechsetzungen im Vergleich zur unverbesserten Situation erreicht.

Dieser Effekt konnte messtechnisch auch beim Vorliegen von Langzeitmessungen bestätigt werden. In Abbildung 5-6 sind Messergebnisse der Deichgründung zur Erweiterung des Werksgeländes der Flugzeugwerft in Hamburg-Finkenwerder (vgl. auch Kempfert et al. 2002 und Raithel et al. 2002) im Vergleich mit rechnerischen Prognosen der Kriechsetzungen dargestellt. Daraus ist abzuleiten, dass bei Ansatz der Kriechbeiwerte, welche für den unverbesserten Baugrund (d.h. ohne Säulengründung) angegeben bzw. abgeleitet wurden, deutlich größere Kriechsetzungen im Vergleich zu den Messergebnissen prognostiziert wurden. Durch eine rechnerische Prognose unter Verwendung eines Korrekturfaktors von 0,5 auf die Kriechsetzungen des unverbesserten Baugrundes können die Messergebnisse dagegen gut nachvollzogen werden.



Abbildung 5-6: Ergebnisse von Langzeitmessungen und Vergleich der zu erwartenden Kriechverformungen ohne Säulengründung

Im Hinblick auf eine umfassende Prognose der Langzeitverformungen bzw. der Kriechsetzungen sind somit entsprechende Laborversuche vorauszusetzen (Kriechversuche unter verschiedenen Belastungsrandbedingungen und -stufen). Aufgrund des Fehlens von geeigneten Versuchsergebnissen wird aber häufig näherungsweise ein Reduktionsfaktor auf die für den unverbesserten Baugrund ermittelten Kriechsetzungen verwendet, welcher auf Grundlage von Messergebnissen abgeleitet wurde.

5.3 Tragverhalten von Säulen mit hohen Steifigkeiten

Wie in Abschnitt 2 erläutert, ist zur Lasteinleitung in die ummantelten Säulen im Regelfall die Gewölbewirkung in der Überschüttung ausreichend. Die Anordnung einer horizontalen Bewehrung erfolgt dann konstruktiv bzw. zur Reduzierung von Spreizverformungen bei hohen Dämmen.

Durch die Verwendung von hochzugfesten Ummantelungen und modifizierten Herstellungsverfahren können aber zwischenzeitlich Säulen ausgeführt werden, deren Tragverhalten sich dem von pfahlähnlichen Elementen annähert. Damit können in Abhängigkeit von den Systemparametern Steifigkeitsverhältnisse zwischen den Säulen und dem umgebenden Boden auftreten (vgl. Abbildung 5-8), die zur Stabilisierung der hohen Lasteinleitung in die Säulen Membrankräfte in der horizontalen Bewehrung erfordern. Dadurch ist eine Bemessung der horizontalen Bewehrungen, z.B. nach Zaeske/Kempfert (2002)eingeflossen in den Entwurf der EBGEO (dort Abschnitt 6.9), erforderlich, um die Wirksamkeit des Gründungssystems sicherzustellen, vgl. Abbildung 5-7.

Es ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt aber noch nicht geklärt, ab welcher Steifigkeit der Säulen im Vergleich zur Steifigkeit der umgebenden Weichschichten (Bettungsmodulverhältnis $k_{S,B}/k_{S,B}$; vgl. Abbildung 5-7) eine entsprechende Bemessung einer geokunststoffbewehrten Tragschicht über den Säulen zwingend erforderlich wird. Dies ist darin begründet, dass bis zu einer bestimmten Steifigkeitsgrenze (zum gegenwärtigen Kenntnisstand in der Größenordnung $k_{S,S}/k_{S,B} = 50$ bis 80) aufgrund des in einem Übergangsbereich immer noch möglichen selbstregulierenden Tragverhaltens der Säulen schlagartige Setzungszunahmen und Veränderungen des Tragverhaltens selbst bei einer Unterbemessung der horizontalen Geokunststoffbewehrung nicht zu erwarten sind. Infolge einer dann geringeren möglichen Spannungskonzentration in den Säulenköpfen können jedoch größere Setzungen als berechnet auftreten, wodurch eine Bemessung der horizontalen Bewehrungslagen sinnvoll ist.



Abbildung 5-7: Lasteinleitung über die Membranwirkung in der horizontalen Geokunststoffbewehrung bei ummantelten Säulen mit hoher Steifigkeit

Bei noch höheren Steifigkeitsverhältnissen ist die Wirksamkeit des Säulengründungssystems ohne Bemessung der horizontalen Bewehrung nach dem schon veröffentlichten Entwurf des Abschnitts 6.9 "Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern" der EBGEO nicht mehr sichergestellt. Dies ist im Hinblick auf die horizontale Geokunststoffbewehrung bemessungstechnisch nach der Empfehlung bzw. Zaeske (2001) zu berücksichtigen, siehe auch Tabelle 5-1 und den Entwurf der Empfehlung 6.10 der EBGEO "Gründungssystem mit geokunststoffummantelten Säulen" (zur Zeit in Bearbeitung).



Abbildung 5-8: Abschätzung von vorhandenen Steifigkeitsverhältnissen bei Anwendung von ummantelten Säulen bei Belastungen von 50 bis 150 kN/m²

Tabelle 5-1: Bemessung von horizontalen Bewehrungen in Abhängigkeit des Steifigkeitsverhältnisses nach aktuellem Stand der Bearbeitung des Abschnittes 6.9 der EBGEO

Bereich	Steifigkeits- verhältnis	Bemessung der horizonta- len Geokunststoffbeweh- rung
I	$k_{s,T}/k_s \le 50$	nicht erforderlich
П	$50 < k_{s,T}/k_s \le 75$	im Einzelfall empfohlen
Ш	k _{s,T} /k _s > 75	erforderlich

6 AUFNAHME VON HORIZONTALEN LASTEN, BIEGEMOMENTEN UND DÜBELWIRKUNG

Beim Einsatz von ummantelten Säulen wird neben der Setzungsreduktion und Setzungsbeschleunigung eine Erhöhung der Sicherheit gegen Gelände- und Grundbruch erreicht. Somit wird die Standsicherheit z.B. von Geländeversprüngen entscheidend erhöht.

Die Erhöhung der Gesamtstandsicherheit ist hierbei auf verschiedene Wirkungsweisen zurückzuführen:

- Scherfestigkeitserhöhung im Untergrund durch den Einbau eines nicht bindigen Säulenmaterials mit hoher Scherfestigkeit.
- Hohe Spannungskonzentration bei aktiver Ummantelung über den Säulen und damit Erhöhung des Scherwiderstandes infolge der hohen spannungsabhängigen Scherfestigkeit des Säulenmaterials.
- Erhöhung der Scherfestigkeit der Weichschichten durch die schnelle Konsolidation und Abbau des Porenwasserüberdruckes.
- Erhöhung der Scherfestigkeit der Weichschichten bei Einsatz des Verdrängungsverfahrens (vgl. Abs. 5).
- Aktivierung von rückhaltenden Kräften und Momenten in der Säule, insbesondere infolge der vertikalen Zugfestigkeit und Steifigkeit der Geokunststoffummantelung.

Die Erfassung der standsicherheitserhöhenden Einflüsse aus der Scherfestigkeitserhöhung im Untergrund, der Spannungskonzentration bei aktiver Ummantelung und der Scherfestigkeitserhöhung in den Weichschichten infolge Konsolidation kann in Geländebruchberechnungen durch schon bekannte Berechnungsansätze erfolgen (siehe Raithel 1999).

Zur Erfassung der rückhaltenden Kräfte und Momente infolge der vertikalen Zugfestigkeit und Steifigkeit der Geokunststoffummantelung von ummantelten Säulen wurden am Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel Modellversuche an der Einzelsäule (Großversuche im Maßstab ca. 1:3, vgl. Abbildung 6-1 und 6-2) durchgeführt

Um die Randbedingungen im Hinblick auf den möglichen Einsatz des Verfahrens wirklichkeitsgetreu abzubilden, wurden Versuche mit zwei unterschiedlichen Böden durchgeführt.

Die Steifigkeit der gewebten Ummantelung wurde unter Berücksichtigung modelltheoretischer Beziehungen gewählt. Unter Zugrundelegung der Bruchdehnung und Zugfestigkeit ergibt sich bei Übertragung der Modellgesetze eine Ummantelungssteifigkeit von J = 2550 kN/m, was ca. einem Ringtrac 100/400[®] entspricht. Insgesamt wurde auf möglichst realitätsnahe Verhältnisse zur Erfassung der auftretenden Setzungen bei Einbau und Konsolidation geachtet. Die Versuche wurden mit Modelltorf und Schlick aus dem Hamburger Hafen durchgeführt.

Exemplarische Versuchsergebnisse sind in Abbildung 6-3 dargestellt.



Abbildung 6-1: Scherversuchsanlage nach Aufbringen der Scherkraft



Abbildung 6-2: Ummantelte Säule beim Einbau der Weichschicht und nach dem Abschervorgang

Die Aufnahme von Zugkräften in vertikaler Richtung der Ummantelung (Längsfäden) konnte eindeutig durch Zugkraftmessungen am Säulenfuß nachgewiesen werden.

Anhand der Versuchsergebnisse konnte somit festgestellt werden, dass der beobachtete scherfestigkeitserhöhende Einfluss bei Einsatz einer Ummantelung im Vergleich zu einer nicht ummantelten Säule durch die vertikale Zugfestigkeit und Steifigkeit der Geokunststoffummantelung erfolgt. Eine Erhöhung infolge einer höheren Spannungskonzentration beim Auftreten von Ringzugkräften war zu vernachlässigen, da die vertikale Auflast im Versuch zur Aktivierung von maßgebenden Ringzugkräften als nicht ausreichend zu bewerten ist. Auf dieser Grundlage konnten vorläufige Bemessungsansätze abgeleitet werden, die u.a. unter Berücksichtigung der Säulenlängen eine Erfassung der standsicherheiterhöhenden Wirkung durch die Aufnahme der vertikalen Zugkräfte in der Ummantelung ermöglichen.

Weitere Versuche bezüglich der möglichen Aufnahme von Momentenbeanspruchungen sind in Paul/Schwedt (2003) dargestellt, wobei geogitterummantelte Mineralstoffsäulen exzentrisch belastet wurden. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass durch eine hochzugfeste Ausbildung der Ummantelung in Längsrichtung der Säulen durchaus auch Biegemomente bzw. Querkräfte infolge horizontaler Belastungen durch ummantelte Säulen aufgenommen werden können. Bemessungsansätze liegen hierzu aber nicht vor.

In Verbindung mit den von Smoltczyk (1999) veröffentlichten Großversuchen an der Universität Stuttgart wird auf diese Weise gegenwärtig untersucht, ob ummantelte Säulen in Zukunft auch in anderen Anwendungsbereichen wie z.B. Baugrubensicherungen oder zur dübelartigen Sicherung von Kriech- bzw. Rutschhängen angewendet werden können.



Abbildung 6-3: Scherkraft-Verformungsdiagramm der Versuche mit und ohne Säule

ZUM ABSCHNITT 6.10 DER EBGEO "GRÜNDUNGS-7 SYSTEM MIT GEOKUNSTSTOFFUMMANTELTEN SÄULEN" (ENTWURF)

Zur Zeit wird in einem Arbeitskreis der DGGT an der Erstellung des Abschnitts 6.10 der EBGEO "Gründungssystem mit geokunststoffummantelten Säulen" gearbeitet. Ein erster Entwurf dieser Empfehlung liegt bereits vor.

Grundsätzlich sollen hierbei Empfehlungen zur Konstruktion, Berechnung und Ausführung von geokunststoffummantelten Säulengründungen erarbeitet werden, bei deren Einhaltung die Wirksamkeit der Gründung sichergestellt wird. Die Gliederung des aktuellen Entwurfes umfasst die Bereiche:

- Beariffe 1)
- 2) Wirkungsweise und Anwendungsbereiche
- 3) Herstellungsverfahren
- Entwurfsempfehlungen und Konstruktionshinweise 4) 5) Baustoffe
- Hinweise zur Berechnung und Bemessung 6)
- 7) Prüfkriterien, Toleranzen und Qualitätssicherung

Im Hinblick auf die Berechnung und Bemessung ist vorgesehen, in Abschnitt 6.10 zunächst kein Berechnungsbeispiel aufzunehmen, da das empfohlene analytische Berechnungsverfahren nach Raithel (1999) bzw. Raithel/ Kempfert (1999) umfangreiche Iterationen zur Erfassung der interaktiven Tragwirkung erfordert und somit nur rechnergestützt anzuwenden ist. Im Abschnitt 6.10 werden aber die Mindestanforderungen an das Berechnungsmodell genannt und Hinweise im Hinblick auf die bei der Bemessung zu berücksichtigenden Randbedingungen gegeben. In diesem Zusammenhang wird auch der Bezug zur Empfehlung 6.9 "Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienför-

migen Traggliedern" hergestellt, sofern die Steifigkeit der Säulen eine Bemessung von horizontalen Bewehrungslagen erfordert (vgl. Abschnitt 5.3).

Einen Schwerpunkt der Empfehlung werden neben der Beschreibung der charakteristischen Merkmale bzw. Vorund Nachteile der verschiedenen Herstellungsverfahren, insbesondere die Definition der Anwendungsbereiche (Weichschichteigenschaften, Säulenlängen) sowie die Entwurfsempfehlungen und Konstruktionshinweise (Mindestüberdeckung, Steifigkeit und Zugfestigkeiten der Ummantelung, Säulendurchmesser, Säulenraster, horizontale Bewehrungslagen, Liegezeiten bzw. temporäre Überschüttungen, messtechnische Überwachung usw.) darstellen.

Des Weiteren werden die Anforderungen an die Geokunststoffummantelung und die Säulenfüllung sowie Hinweise zur Herstellung definiert. In Abschnitt 7 der Empfehlung sollen dann Angaben und Hinweise zur Qualitätssicherung, Prüfkriterien und Toleranzen enthalten sein, die bei der Herstellung einer Gründung mit geokunststoffummantelten Säulen einzuhalten sind. Die Empfehlung soll sich auf alle derzeit bekannten ummantelten Säulensysteme beziehen.

8 LITERATUR

- 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.
- Geduhn, M., Raithel, M., Kempfert, H.-G., Practical Aspects of the Design of Deep Geotextile Coated Sand Columns for the Foundation of a Dike on Very Soft Soils. International Symposium Earth Reinforcement, 14-16 November, Fukuoka, Japan; Landmarks in Earth Reinforcement, Swets & Zeitlinger, 2001.
- Geuder, S., Bräu, G., Geotextile Bauweisen beim Umbau der BAB A8 München-Salzburg im Bereich des Chiemsees. Tiefbau 12, 1997.
- Heerten, G. et al., Geogitterummantelte Mineralstoffsäulen ein neues System für Gründung und Baugrundverbesserung. Vorträge der Baugrundtagung. Leipzig 2004a.
- Heerten, G., Q- und R-Matten aus Kunststoff für Bewehrungsaufgaben in der Geotechnik. Bautechnik 81, Heft 9, 2004b.
- Kempfert + Partner Geotechnik, DA-Erweiterung Mühlenberger Loch, Machbarkeitsstudie, 2000 (unveröffentlicht).
- 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.
- Kempfert, H.G.; Raithel, M.; Möbius, W.; Wallis, P., Polderumschließung durch einen auf geokunststoffummantelten Sandsäulen gegründeten Deich, 27. Baugrundtagung, Mainz, 2002.
- Krieg, S., Viskoses Bodenverhalten von Mudden. Seeton und Klei: Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 150, 2000.
- Maybaum, G., Mühlmann, J., Porenwasserdruck-, Festigkeits- und Verschiebungsentwicklung bei Verdrängungsbohrungen in bindigen Böden. Syposium "Messsen in der Geotechnik", Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig, Heft 68, 2002.
- Nakada, H. et al., Haneda Airport offshore expansion project. Proc. Instn Civ. Engng; Civil Engenieering 120, 1997.
- Patentschrift DE 37 00 866: Verfahren zur Herstellung einer Kaimauer. 1991.
- 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.
- Van Impe, W., Improving of the Bearing Capacity of Weak Hydraulic Fills by Means of Geotextile. Third International Conference on Geotextiles, Vienna, 1986.
- Van Impe, W., Soil Improvement Techniques and their Evolution. A.A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1989.
- Raithel, M., Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen; Heft 6, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, 1999.
- Raithel, M., Kempfert, H.-G., Bemessung von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Die Bautechnik 76, Heft 12, 1999.

- Raithel, M.; Kempfert, H.-G.; Möbius, W.; Wallis, P.; Gründungsmaßnahmen zur Tragfähigkeitserhöhung und Setzungsreduktion beim Projekt Mühlenberger Loch – Los1, Geotechnik 2002/1, 2002.
- Sass, H.-H., Neubau einer Kaimauer mit baubegleitendem Messprogramm. Bautechnik 67, Heft 12, 1990.
- Sidak, N., Strauch, G., Herstellung geotextilummantelter Kiestragsäulen mit Keller-Tiefenrüttler. 4. Österreichische Geotechniktagung Wien, 2003.
- Smoltczyk, U., Geogitter schafft biegesteife Schottersäulen. Bauen mit Textilien Heft 1, 1999.
- Trunk, U. et al., Geogrid wrapped vibro stone columns. EUROGEO3 München, 2004.
- Zaeske, D., Kempfert, H.-G., Berechnung und Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten auf punkt- und linienförmigen Traggliedern. Bauingenieur 77, 2002.
- Zaeske, D., Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen, Heft 10, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, 2001.