

Erfahrungen mit dem Gründungsverfahren „geokunststoffummantelte Sandsäulen“

Dr.-Ing. Marc Raithel

Kempfert + Partner Geotechnik, Mannheim

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert

Fachgebiet Geotechnik, Universität Gh Kassel

1. EINFÜHRUNG

Das Gründungsverfahren „geokunststoffummantelte Sandsäulen“ wird nun seit ca. 5 Jahren vornehmlich im Verkehrswegebau 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 nicht bindigen Material bis auf tragfähige Schichten abgeteuft und mit einem Geokunststoff ummantelt werden, welcher die Filterstabilität sicherstellt und die horizontale Stützung der Sandsäulen durch den Geokunststoff im Verbund mit dem umgebenden weichen Boden vergrößert. Dieses Verfahren kann somit im Gegensatz zu herkömmlichen Säulengründungen auch in sehr weichen und organischen Böden eingesetzt werden, da die radiale Stützung der Säulen durch die Ummantelung im Verbund mit dem umgebenden Boden sichergestellt wird, wobei der Geokunststoff durch Ringzugkräfte beansprucht wird. Die zwischenzeitlich bei zahlreichen Projekten im Verkehrswegebau und bei derzeit laufenden Anwendungen im Wasserbau gewonnenen Erfahrungen werden im folgenden dargestellt. Des weiteren wird das Bauverfahren, sowie das durch umfangreiche Messungen überprüfte Tragverhalten und die Bemessung kurz erläutert.

2. SYSTEMBESCHREIBUNG UND TRAGVERHALTEN

Das Gründungsverfahren „geokunststoffummantelte Sandsäulen“ stellt eine Weiterentwicklung der herkömmlichen Säulengründungen wie Schottersäulen bzw. Stopfsäulen dar. Die Sandsäulen werden i.d.R. in dreiecksförmigen Rastern angeordnet und bis auf eine trag-

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 F_R hervorruft. Die Größe der bei der jeweiligen Belastung des Systems hervorgerufenen Ringzugkräfte wird durch das linear-elastische Materialverhalten des Geokunststoffs (Geokunststoffsteifigkeit J) bestimmt und folgt somit direkt aus der weiteren Horizontalverformung der Säule.

Die erforderliche Stützwirkung in der Weichschicht $\sigma_{h,B,ges}$, welche wesentlich von der Größe der Auflastspannung über der Weichschicht $\sigma_{v,B}$ bestimmt wird, wird somit reduziert. Die vertikale Belastung $\sigma_{v,B}$ über der Weichschicht wird infolge einer Gewölbewirkung in der Überschüttung vermindert und die Auflastspannung über der Säule $\sigma_{v,S}$ erhöht. Es wird eine Spannungskonzentration über den Säulenköpfen hervorgerufen, womit wiederum die Horizontalspannung aus der Säule $\sigma_{h,S}$ erhöht werden. Letztlich ergibt sich damit ein flexibles und selbstregulierendes Tragverhalten, da sich die Lasten zur Erreichung eines neuen Gleichgewichtszustandes neu umlagern können. Gleichzeitig wird eine Setzungsbeschleunigung durch die Wirkung der Sandsäulen als Vertikaldränagen gegeben. Insgesamt ergeben sich infolge der Setzungsreduktion und Setzungsbeschleunigung nach der Bauzeit nur noch geringe Setzungen.

3. HERSTELLUNGSVERFAHREN

Für die praktische Bauausführung wurden von der Josef Möbius Bau-Gesellschaft GmbH & Co. / Hamburg zwei Herstellungsverfahren entwickelt, die als Bodenersatzverfahren und Verdrängungsverfahren bezeichnet werden. Der Hauptunterschied der Verfahren besteht in der Herstellung des von den Säulen im Untergrund einzunehmenden Hohlraumes. Während beim Bodenersatzverfahren eine nach unten offene Verrohrung ($D \approx 0,8$ 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 durch Klappen geschlossenes Stahlrohr mit in der Regel kleinerem Durchmesser ($D \approx 0,6$ bis $0,8$ m, in weichen Schlickböden bis $1,0$ m) nach dem Verdrängungsprinzip eingebracht.

Der Geokunststoff aus Polyestergerewebe wird rundgewebt oder werksseitig mit einer Naht zu einem Schlauch konfektioniert und weist in der Regel einen etwas größeren Durchmesser als den Einbaudurchmesser der Säule auf.

Das Verdrängungsverfahren mit einem Säulendurchmesser von ca. 80 cm stellt zur Zeit die Standardherstellung dar. Der Vorteil gegenüber dem Bodenaustauschverfahren beruht auf der schnelleren und wirtschaftlicheren Herstellung der Säulen und der Einleitung einer Vorspannung in der Weichschicht, außerdem müssen keine Böden ausgebaut und entsorgt werden. Allerdings sind in den Weichschichten auftretende Porenwasserüberdrücke und Verformungen zu berücksichtigen. Die beim Verdrängungsverfahren aufgrund der geringeren Säulendurchmesser in der Regel herzustellende größere Anzahl Säulen wird durch die einfachere Säulenherstellung und durch die bereits erwähnten wirtschaftlichen Vorteile kompensiert. Das Aushubverfahren wird bei Böden mit hohem Eindringwiderstand bevorzugt bzw. wenn Erschütterungseinwirkungen auf angrenzende Bauten, Verkehrsanlagen usw. minimiert werden müssen. Weiteres zur Herstellung ergibt sich aus [1] und [2].

Die typische Abfolge der Herstellung nach dem Verdrängungsverfahren zeigt Bild 2:

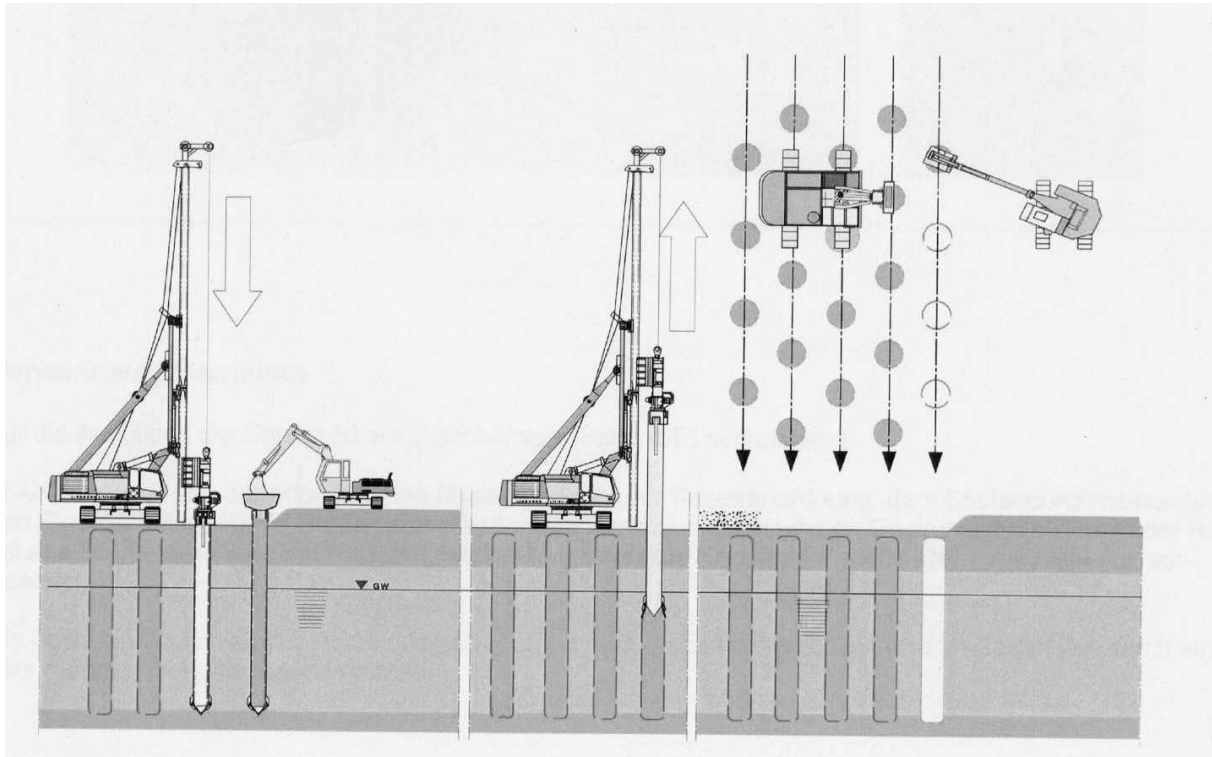


Bild 2: Herstellung von geokunststoffummantelten Sandsäulen im Verdrängungsverfahren

- a) Die Verrohrung wird mit Hilfe eines mäklergeführten Rüttlers bis auf den anstehenden tragfähigen Untergrund eingebracht, wobei der Boden durch am Rohrfuß konisch angeordnete Doppelklappen zur Seite verdrängt wird. Die verwendeten Rüttler arbeiteten hierbei im Frequenzbereich > 35 Hz. Die Exzentergewichte werden erst bei Erreichen entsprechend hoher Drehzahlen zugeschaltet, dadurch werden Schwingungen in kritischen Frequenzbereichen vermieden.

- b) Nach dem Einbringen der Verrohrung wird die Geokunststoffummantelung in das Rohr eingelegt. Der Geokunststoff wird in Ballen aufgerollt angeliefert und auf der Baustelle nach den Erfordernissen abgelängt und konfektioniert.
- c) Zum Verfüllen wird das obere Ende der Geokunststoffummantelung an der Verrohrung, bzw. an einer in die Verrohrung abzulassende Halterung, befestigt und nichtbindiges Material (Sand, Kies) über einen Trichter in die Säule gefüllt.
- d) Abschließend erfolgt das Ziehen der Verrohrung mit dem Rüttler, wobei sich die Verschlusskappen automatisch öffnen und durch die Vibration die Verdichtung des Schüttmaterials erfolgt.

Das Gründungssystem ist unter der Bezeichnung Geokunststoffummanteltes Säulensystem Möbius (GSM) auf dem deutschen Markt und unter der Bezeichnung Geotextile Coated Columns (GCC) auf dem internationalen Markt eingeführt.

4. BERECHNUNGSVERFAHREN UND RANDBEDINGUNGEN

4.1. Allgemeines

Am Fachgebiet Geotechnik der Universität Gh Kassel wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens numerische und analytische Berechnungsverfahren [3] [4] entwickelt, die eine praxisgerechte Bemessung ermöglichen. Die numerischen Analysen unter Verwendung des Programmsystems PLAXIS wurden sowohl unter Zugrundelegung von rotationssymmetrischen, als auch von ebenen Berechnungsmodellen durchgeführt. Da im ebenen Modell (auch der Standsicherheitsberechnung) der Einfluß der Ummantelung auf die Spannungen in der Säule nicht direkt simuliert werden kann, wurden hierfür Ersatzbodenparameter hergeleitet.

Ausgehend von den bekannten Berechnungs- und Bemessungsverfahren für konventionelle Stopfsäulen, welche durch die Einbeziehung der Geokunststoffummantelung erweitert bzw. ergänzt wurden, wurde ein analytisches, rotationssymmetrisches Berechnungsmodell entwickelt. Betrachtet wird hierbei jeweils eine Säule mit ihrem Einflußbereich (Einheitszelle) und den auftretenden Spannungen und Kräften, wie sie im Bild 1 dargestellt werden. Durch den Vergleich von Ergebnissen aus Feldmessungen mit denen durchgeführter Modellversuche [5] und der Feldmessungen [2] [3] [6], wie sie nachfolgend noch beschrieben werden, konnte festgestellt werden, daß bei beiden Berechnungsverfahren (numerisch und analytisch) eine

gute Annäherung an die Meßwerte hinsichtlich der Verformungen und der Kräfte in der Um-mantelung erreicht wird.

4.2. Bemessungsrandbedingungen beim Verdrängungsverfahren

Durch die zunehmende Erfahrung mit dem Gründungsverfahren „geokunststoffummantelte Sandsäulen“ wurde im Laufe der Weiterentwicklung des Bemessungsverfahrens festgestellt, daß die richtige und exakte Festlegung der Randbedingungen bei der Bemessung von im Verdrängungsverfahren hergestellten geokunststoffummantelten Sandsäulen sich schwieriger als bei Betrachtung des Bodenersatzverfahrens gestaltet, da mit der Verdrängung eine Wirkung in der umgebenden Weichschicht ausgelöst wird, die zahlenmäßig nur schwer exakt zu erfassen ist. Durch umfangreiche Messungen, insbesondere bei zwei Testfeldern in den Niederlanden und zwei Testfeldern in Deutschland konnte nachgewiesen werden, daß sich die Verfahren auch im Verhalten der Säule während des Herstellungsvorganges unterscheiden. Während sich die Säulen bei Anwendung des Bodenersatzverfahrens im Zuge des Ziehens der Verrohrung infolge ihres relativ hohen Eigengewichtes (Wichte des nichtbindigen Füllmaterials im Vergleich zur Wichte der Weichschicht) bis zum Außendurchmesser der Verrohrung ausdehnen, werden die Säulen bei Anwendung des Verdrängungsverfahrens durch die unter Spannung gesetzten Weichschichten bis unter den Innendurchmesser des Verdrängungsrohres eingeschnürt.

Demnach sind beim Verdrängungsverfahren nach Lastaufbringung zusätzliche Aufweitungswege durch die Einschnürung der Säulen vorhanden, bevor die Geokunststoffhülle aktiviert wird. Somit sind die festgestellten (gemessenen) Setzungen nicht nur aus dem Aufweitungsweg vom Rohrinne Durchmesser zum Konfektionsdurchmesser der Geokunststoffumhüllung entstanden, sondern beinhalten auch einen Anteil aus einem Aufweitungsweg zur Rückbildung der Einschnürung. Der Geokunststoff wird damit geringer ausgenutzt, als dies nach der Bemessung zunächst vorgesehen würde. In Bild 3 sind typische Messergebnisse (Testfeld Krempe) dargestellt.

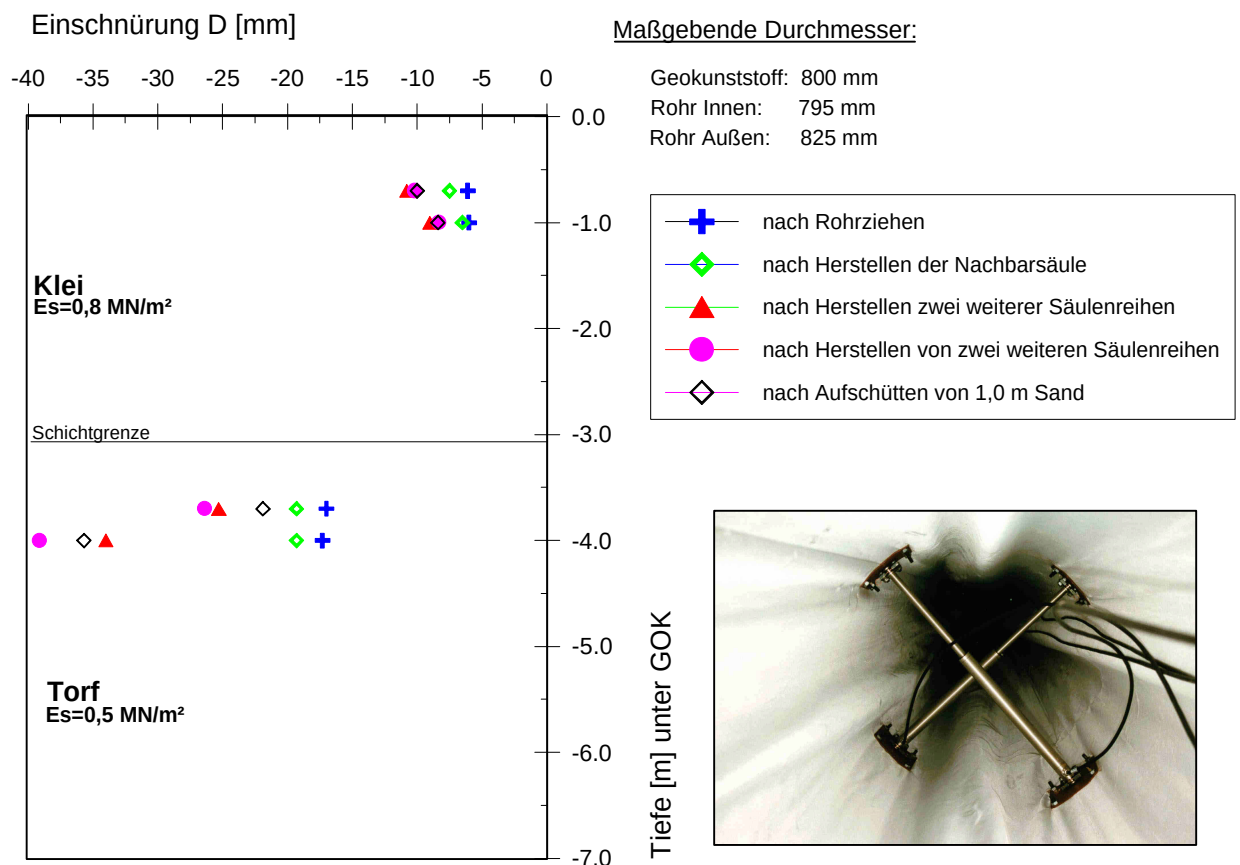


Bild 3: Durch Extensometer gemessene Einschnürung der Säule beim Verdrängungsverfahren

Da die beim Verdrängungsverfahren entstehende Einschnürung durch zahlreiche Meßergebnisse nun belegt ist und statistisch auch in der Größenordnung bekannt ist, wird diese nun bei der Berechnung und Bemessung durch die Festlegung eines oberen und unteren Grenzwertes einbezogen (siehe auch Abschnitt 5.2). Um die Geokunststoffummantelung dann optimal ausnutzen zu können, werden die Erfahrungen dann bei der Wahl des Durchmessers der Geokunststoffummantelung berücksichtigt.

5. ANWENDUNGEN IM VERKEHRSWEGEBAU

5.1. Ausgeführte Projekte

Wie schon erwähnt, wurde das Gründungsverfahren zwischenzeitlich vornehmlich im Verkehrswegebau eingesetzt. Insgesamt liegen zur Zeit zehn Referenzprojekte vor, wobei auch

umfangreiche Verformungsmessungen vorgenommen wurden. Die Projekte sind im einzelnen mit einer Kurzbeschreibung nachfolgend dargestellt.

Tabelle 1: Ausgeführte Projekte im Verkehrswegebau

Jahr	Projekt-nahme	Kurzbeschreibung	Säulen gründung	Raster [%] [A_S/A_E]	Ummante- lung J [kN/m] ca.
1996	Hamburg - Walterhof	Verbreiterung eines Eisenbahndammes; Dammhöhe bis ca. 5 m; Weichschichtmächtigkeit bis ca. 5 m	Ø 154 cm im Aushubverf.	25 bis 30	2000
1996	Baden - Baden	Verbreiterung der Bahnstrecke Karlsruhe-Basel; Dammhöhe ca. bis 4 m; Weichschichtmächtigkeit bis ca. 5 m	Ø 65 cm im Verdr.verf.	20	800
1998	Bruchsal	Neubau Ortsumgehung; Dammhöhe bis ca. 13 m; Weichschichtmächtigkeit bis ca. 5 m	Ø 80 cm im Verdr.verf.	20	3500
1998	Grafing	Verbreiterung der Bahnstrecke München-Rosenheim; Dammhöhe bis ca. 3 m; Weichschichtmächtigkeit bis ca. 1 m	Ø 80 cm im Verdr.verf.	17	2000
1998	Berlin-Saarmund	Verbreiterung eines Autobahndammes der A 115; Dammhöhe bis ca. 5,5 m; Weichschichtmächtigkeit bis ca. 10 m	Ø 80 cm im Verd.verf.	10	2000
1998	Berlin-Niederlehme	Verbreiterung eines Autobahndammes der A 10; Dammhöhe bis ca. 5m; Weichschichtmächtigkeit bis ca. 7 m	Ø 80 cm im Verd.verf.	14	1500
1999	Lübeck-Hernburg	Sanierung eines Bahndammes; Dammhöhe ca. 4 m; Weichschichtmächtigkeit ca. 11 m	Ø 80 cm im Aushubverf.	15	2000
1999	Tessenitz-Tal	Neubau eines Autobahndammes der A 20; Dammhöhe bis ca. 5 m; Weichschichtmächtigkeit bis ca. 11 m	Ø 80 cm im Verd.verf.	10	1000
2000	Krempe	Anrampung einer Straßenbrücke; Dammhöhe bis ca. 8m; Weichschichtmächtigkeit bis ca. 7m	Ø 80 cm im Verd.verf.	12,5 bis 20	2000
2000	Sinzheim	Verbreiterung der Bahnstrecke München-Rosenheim; Dammhöhe bis ca. 2 m; Weichschichtmächtigkeit bis ca. 6,5 m	Ø 80 cm im Aushubverf.	15	1000

Des weiteren wurden noch verschiedenen Testfelder ausgeführt, wobei insbesondere in zwei Testfeldern in den Niederlanden (Testfeld „Hoeksche Ward“ und Testfeld „Wijngaarden“) umfangreiche Messergebnisse gewonnen werden konnten.

5.2. Ausgewählte Messergebnisse

Stellvertretend für ein typisches Verformungsverhalten einer Dammgründung auf geokunststoffummantelten Sandsäulen ist im Bild 5 die durch Horizontalinklinometer gemessene Setzungsmulde beim Projekt Berlin-Saarmund dargestellt.

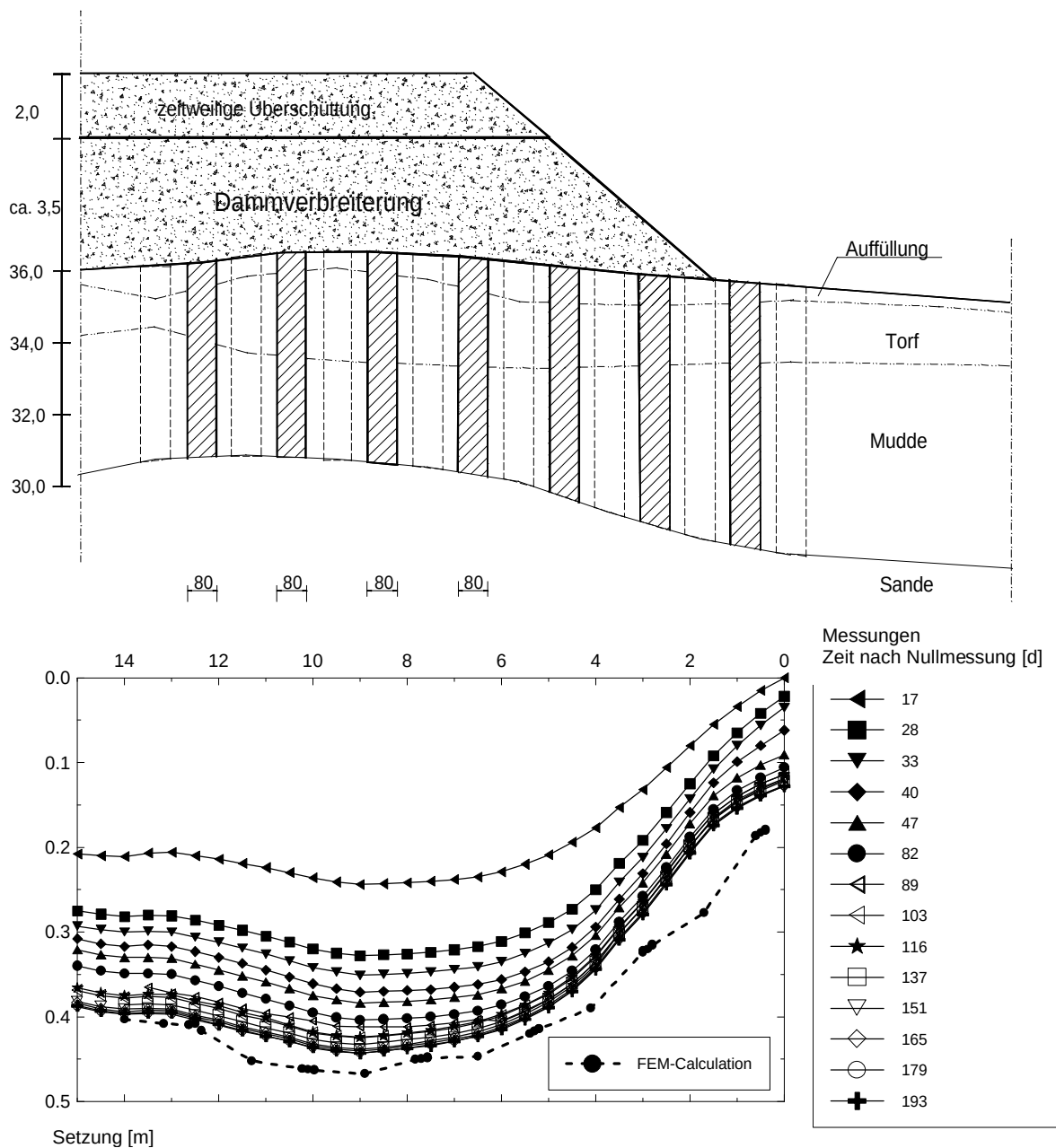


Bild 5: Gemessene und berechnete Setzungsmulde beim Projekt Berlin-Saarmund

In Bild 6 ist der Zeit-Setzungsverlauf beim Projekt Berlin-Saarmund und die sich daraus ergebende Setzungsgeschwindigkeit stellvertretend für ein typisches Setzungsverhalten einer Gründung auf geokunststoffummantelten Sandsäulen dargestellt.

Im Regelfall kann somit die auftretende Setzung schon während der Bauzeit durch Ausgleichmaßnahmen kompensiert werden, so daß unverträgliche Setzungen nach der Bauzeit i.d.R. ausgeschlossen werden können.

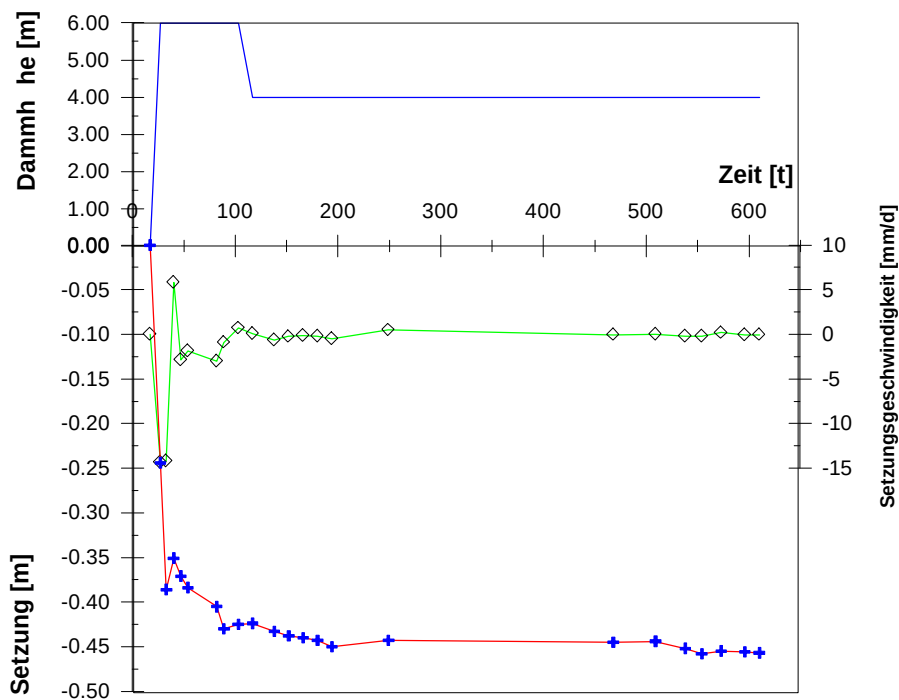


Bild 6: Zeit-Setzungsverlauf und Setzungsgeschwindigkeit beim Projekt Berlin-Saarmund

Beim Projekt Hamburg-Waltershof wurden im angrenzenden Bauabschnitt des beschriebenen Hafenbahndammes statt der geokunststoffummantelten Bodensäulen Vertikaldränagen (Banddräns) mit temporärer Auflastüberschüttung eingesetzt.

Somit können die Verformungsmessungen dieses Ausbauabschnittes, aufgrund der analogen Baugrundverhältnisse, als direkte Referenzmessungen zum davor angewandten Gründungsverfahren mit geokunststoffummantelten Säulen verwendet werden. Ein Vergleich der Setzungen ist in Bild 7 dargestellt.

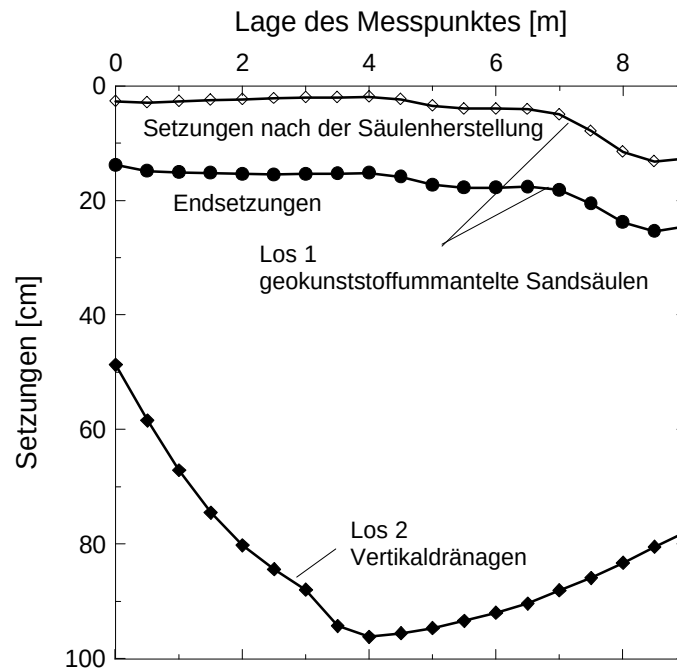


Bild 7: Vergleich der Setzungen beim Einsatz von geokunststoffummantelten Bodensäulen und Banddräns

Die durch das Gründungsverfahren „geokunststoffummantelte Sandsäulen“ ergebende Setzungsreduktion auf etwa 20% ist aus dieser Darstellung deutlich erkennbar, wobei zu beachten ist, daß die Setzungen im Dammabschnitt mit Banddräns bzw. Vertikaldränagen mit der bisher vorliegenden Meßfolge noch nicht vollständig erfaßt wurden, da sich aus der nach erst 20 Monaten erreichten planmäßigen Schütthöhe des neuen Dammes noch weitere Setzungen ergaben. Im Vergleich hierzu betrug die Schüttzeit der Dammverbreiterung in dem Streckenabschnitt mit geokunststoffummantelten Bodensäulen nur etwa. 2 Monate. Letztlich sind bei der Gründung mit Banddräns analoge Setzungen zum Altdamm von etwa 1,2 m zu erwarten.

Neueste Messergebnisse können durch das Projekt Krempe dargestellt werden. Zudem wird nachfolgend gezeigt, daß mit Hilfe des analytischen Berechnungsmodells die Berechnungsannahmen auf ein in situ mittels des Verdrängungsverfahrens ausgeführtes Projekt zutreffend sind. Dabei wird der max. gemessene Setzungsverlauf für das Testfeld "Krempe-Westrampe" prognostiziert und nachvollzogen.

In Bild 8 sind die berechneten Setzungsverläufe der max. gemessenen Setzung gegenübergestellt. Dabei ist zu erkennen, daß unter Zugrundelegung der unteren Grenze von $DD_{\min} = 10 \text{ mm}$ und der tatsächlich vorhandenen, gemessenen und gemittelten Einschnürung vom $DD_{\text{mittel}} = 20 \text{ mm}$ der berechnete dem derzeit gemessenen Setzungsverlauf gut nachvollzogen werden kann.

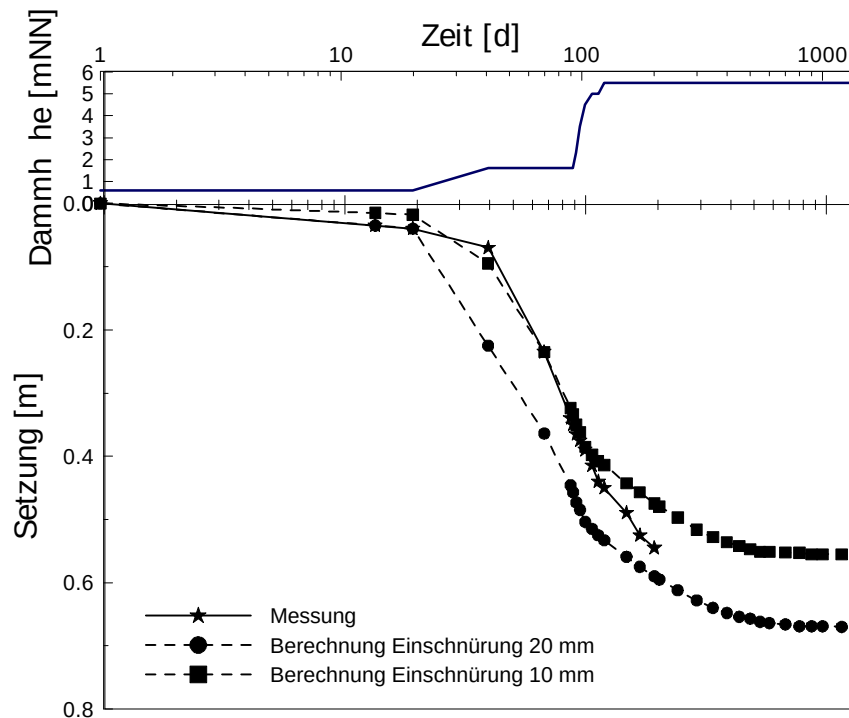


Bild 8: Berechnete und gemessene Setzungen beim Projekt Krempe in Abhängigkeit der Zeit

Anhand der ausgeführten Projekte kann somit grundsätzlich festgestellt werden, daß sich das Gründungsverfahren „geokunststoffummantelte Sandsäulen“ bei den ausgeführten Projekten bewährt hat. Die durchgeführten baubegleitenden Messungen haben das zunächst angenommene Trag- und Verformungsverhalten bestätigt. Die Setzungen und Porenwasserüberdrücke klingen schnell ab. Die Setzungsanforderungen konnten eingehalten werden. Die Säulen passen sich den Verschiebungen infolge Spreizwirkung an, im Gegensatz zu starren und damit biegebeanspruchten Elementen. Durch den Vergleich der Messungen mit den Ergebnissen der Berechnung konnten zudem die Berechnungsverfahren weiterentwickelt und überprüft werden.

5.3. Einsatz des Verfahrens bei außergewöhnlichen Randbedingungen

5.3.1. Gespanntes Grundwasser und Verhinderung einer Durchströmung

Um das Verformungsverhalten einer Dammgründung auf geokunststoffummantelten Sandsäulen zu messen wurden 1998 und 1999 Probedämme in den Niederlanden (Testfeld „Hoek-sche Ward“ und Testfeld „Wijngaarden“) gegründet. Beim Beginn der Gründungsarbeiten war das Aushubverfahren gebräuchlich. Während der Ausführungsarbeiten der ersten Sandsäulen

im Aushubverfahren stellte man hydraulische Grundbrüche im offenen Rohr, kurz vor Erreichen des unteren Sandhorizontes, fest. Dies war auf den gespannten Grundwasserspiegel im unteren Aquifer und durch die lokale Verflüssigung des pleistozänen Sandhorizontes durch das Einvibrieren der Verrohrung zurückzuführen. Daher wurde damals kurzfristig die Entscheidung getroffen, die übrigen Bereiche mit ummantelten Sandsäulen im Verdrängungsverfahren mit verschließbaren Klappen auszuführen. Die Säulenherstellung war dann ohne weitere Probleme möglich. Insgesamt wurde jedoch festgestellt, daß die Restsetzungen relativ groß waren, da die Umschaltung vom Bodenaustauschverfahren auf das Bodenverdrängungsverfahren zum damaligen Zeitpunkt noch mit großen Unsicherheiten behaftet war, die zudem einen wesentlichen Einfluß auf das damalige Bemessungs- und Entwurfsverfahren ausgeübt haben.

Neben der Überprüfung des Trag- und Verformungsverhaltens der Gründung sollte in der Testfeldern jedoch auch eine mögliche Durchströmung der Sandsäulen infolge des unteren gespannten Aquifers verhindert und überprüft werden. Um eine Durchströmung der Säulen zu vermeiden, wurde ein Bentonit-Sand-Gemisch als Fuß- oder Kopfdichtungen eingebaut, deren ausreichende Wirksamkeit durch die Feldversuche nachgewiesen werden konnte.

5.3.2. Steil abfallende Untergrundschichtung

Bei der Verbreiterung der Eisenbahnstrecke München-Rosenheim (-Innsbruck) wurde eine Säulengründung im Bereich eines Hangschnittes ausgeführt. Aufgrund von durch Nacherkundungen ermittelten stark abweichenden Untergrundschichtungen sowie einer weitgehend hangparallelen Sickerlinie kam es zur Schiefstellung der Säulen mit grundbruchartigen Erscheinungen. Nachdem eine Gefahr für das Bestandsgleis nicht mehr ausgeschlossen werden konnte, wurden die Arbeiten zunächst eingestellt und nachfolgend eine Mischgründung aus 12 m langen Stahlrohren und geokunststoffummantelten Sandsäulen ausgeführt. Damit konnte dann eine sichere Gründung mit minimalen Verformungen erreicht werden.

Die ausgeführte Situation und die nach dem Einbringen der Stahlrohre berechnete Standsicherheit im Anfangszustand zeigt Bild 9.

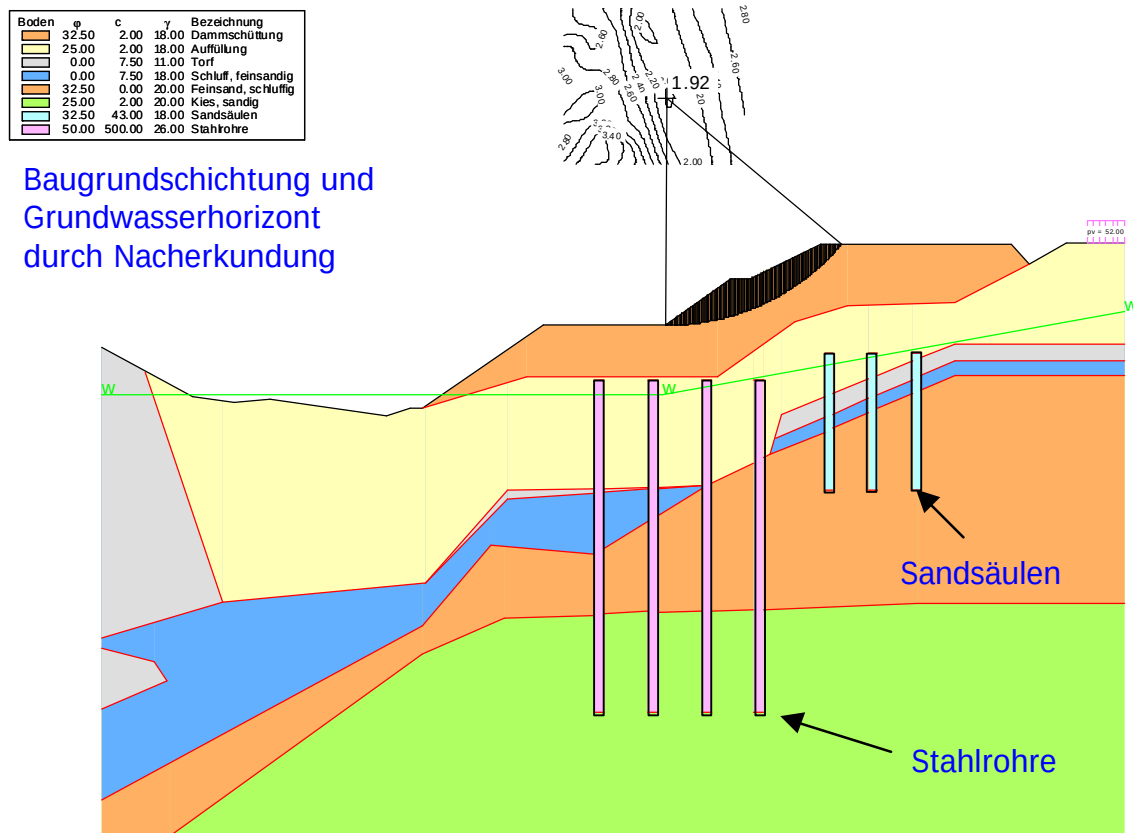


Bild 9: Ausgeführte Situation und Standsicherheit nach dem Einbringen der Stahlrohre

Es bleibt aber festzuhalten, dass die ummantelte Säulengründung bei stark schräg verlaufenden Schichten aufgrund der Flexibilität der Säulen Risiken beinhalten kann.

5.3.3. Hoher Eindringwiderstand

Beim Projekt Sinzheim wurden nach der Fertigstellung der zum Bestandsgeleis drei nächstgelegenen Säulenreihen im Aushubverfahren (geringe Erschütterungen) Probesäulen in verschiedenen Bereichen hergestellt, um die Eignung des Verdrängungsverfahrens zur Herstellung der weiteren Säulenreihen zu untersuchen. Es wurde jedoch festgestellt, dass überschlägig nur 3 Säulen bis auf den tragfähigen Baugrund abgeteuft werden konnten und das Arbeitsplanum trotz Auflockerungsbohrung teilweise nicht durchstoßen wurde. Gleichzeitig wurden erhebliche Erschütterungen in der Umgebung ausgelöst.

Um den Ursachen der beschriebenen Schwierigkeiten nachzugehen, wurde sodann ein offenes Rohr über eine im Verdrängungsverfahren hergestellte Probesäule eingebracht und anschließend ausgebohrt. Hierbei wurde festgestellt, daß unter dem Säulenfuß Material der Arbeits-

ebene in einer Mächtigkeit von ca. 0,5 bis 0,8 m und kein Weichschichtmaterial mehr angetroffen wurde. Aufgrund dessen wurde gefolgert, dass beim Einbringen im Verdrängungsverfahren trotz Auflockerungsbohrung Material der Arbeitsebene unter der Spitze des Rohres bis an den tragfähigen Baugrund geführt und nicht an die Seiten der Verrohrung verdrängt wurde. Somit entstand unter dem Fuß der ummantelten Sandsäule ein Pfropfen aus dem Material der Arbeitsebene, dessen Einfluß auf die späteren Setzungen nicht kalkuliert werden konnte. Da zuvor bei der Probereinbringung der Säulen im Verdrängungsverfahren vor der Bauausführung keine Probleme auftraten, wurde vermutet, dass die dargestellten Probleme auf den Aufbau und die Beschaffenheit der vorliegenden Arbeitsebene (ähnlich Mineralbeton) bzw. Bodenaustausch zurückzuführen waren.

Aufgrund dieser dargestellten Beobachtungen und der Ergebnissen der Erschütterungsmessungen wurden die weiteren Säulen im Aushubverfahren hergestellt. Somit ist festzustellen, daß bei einer geplanten Anwendung des Verdrängungsverfahrens im Vorweg das Material der Arbeitsebene anhand einschlägiger Erfahrungen festgelegt werden muß bzw. Eignungsprüfungen oder Einbringversuche vorzusehen sind. Treten trotzdem Probleme bei der Einbringung ein, so ist das Aushubverfahren anwendbar.

6. ANWENDUNGEN IM WASSERBAU

6.1. Prüffeld Segelschiffhafen

Wie zuvor erläutert, ist die Herstellung von geokunststoffummantelten Sandsäulen nach dem System Möbius ist ein an Land, insbesondere beim Bau von Verkehrswegen, erprobtes und erfolgreiches Verfahren. Mit einer geplanten Herstellung vom schwimmenden Gerät unter Tideeinfluß, z.T. unter Wasser, wird zur Zeit im Hinblick auf verschiedene geplante Baumaßnahmen ein neues Anwendungsfeld erschlossen.

Zur Erprobung des Gründungsverfahrens im Wasserbau unter Tideeinfluß wurde im Jahr 2000 ein Versuchsfeld ausgeführt, wobei u.a. durch ein umfangreiches Meßprogramm die Anwendbarkeit des Verfahrens unter wirklichkeitsnahen Bedingungen im Hamburger Hafen nachgewiesen und offene Fragestellungen geklärt werden sollten. Bild 10 zeigt die Gerätekonfiguration im Prüffeld auf einem Katamaranponton.



Bild 10: Gerätekonfiguration im Prüffeld Segelschiffhafen

Im Bild 10 ist auch der wasserseitig der Schute festgemachte Bohrponton zu erkennen, auf dem geotechnische Meßgeräte und Geräteschaften für die Baugrunderkundung vorgehalten wurden.

Auf der Grundlage der erzielten Meßergebnisse sowie Erkenntnisse bei den Arbeiten im Prüffeld wurde eine Vorgehensweise zur Herstellung von GSM im Wasserbau erarbeitet, wobei die verschiedenen im Vorfeld diskutierten Verfahrensrisiken untersucht wurden.

- Eine Instabilität des Säulenkopfes bei der Herstellung der ummantelten Säule konnte nicht festgestellt werden. Nach Fertigstellung einer bzw. mehrerer Säulen konnte eine geringfügige Schiefstellung am Säulenkopf festgestellt werden (rund 1% der Säulenlänge). Die gemessenen Horizontalverformungen konnten als lagestabil bewertet werden.
- Durch den Einbau der ummantelten Sandsäulen im Verdrängungsverfahren unter Vibration bleibt die Scherfestigkeit des Schlicks i.M. unverändert. Es konnten keine Verflüssigungseffekte des organischen Bodens festgestellt werden.
- Durch das Herstellen des Säulenrasters wurde insgesamt ein Aufwuchs von 1% bis 2 % der Säulenlänge beobachtet. Es ist jedoch davon auszugehen, daß der Aufwuchs durch eine höhere Anzahl von in den Boden eingebrachten Sandsäulen noch etwas weiter ansteigt.

- Aus Extensometermessungen innerhalb der Säulen konnte die schon zuvor erwähnte Einschnürung infolge Bodenverdrängung nach Rohrziehen auch in der schon beobachteten Größenordnung bestätigt werden.
- Der gemessene Porenwasserdruckverlauf folgte dem Tideverlauf der Elbe. Die Herstellung einer Säule im Verdrängungsverfahren ist mit einem Anstieg des Porenwasserdruckes verbunden, wobei sich die Porenwasserüberdrücke sehr schnell über einem Zeitraum von 2 Tagen um bis zu 90% auf eine Größenordnung von 1 kN/m² wieder abbauen.

In Anbetracht der Ergebnisse aus dem Prüffeld konnte somit die Anwendbarkeit des Gründungsverfahrens "Geokunststoffummantelte Sandsäulen" im Wasserbau unter Tideeinfluß unter wirklichkeitsnahen Bedingungen nachgewiesen werden.

6.2. DASA-Erweiterung in Hamburg-Finkenwerder „Mühlenberger Loch“

Im Zuge eines Nebenangebotes für das Projekt DASA - Erweiterung in Hamburg - Finkenwerder „Mühlenberger Loch (Los 1) – ist die Bietergemeinschaft Mittelstand DASA-Erweiterung unter Federführung der Josef Möbius Bau-Gesellschaft GmbH & Co. ungeachtet der bis zum jetzigen Zeitpunkt unklaren juristischen Situation beauftragt, eine Polderumschließung durch einen auf geokunststoffummantelten Sandsäulen gegründeten Deich herzustellen.

Die technischen Ausführungsplanungen werden zur Zeit vorgenommen.

Der Grundgedanke des Nebenangebotes ist durch das Bild 11 ersichtlich. Das für die Ausführung numehr festgelegte Konzept sieht einen Ersatz der temporären Umschließung der geplanten Erweiterungsfläche mittels einer Spundwand durch die Erstellung eines Deiches in der gleichen Bauzeit vor.

Dieser Deich entspricht im Endausbauzustand dem Hochwasserschutzdeich (Deichprofilierung, Deichhöhe und sonstigen Randbedingungen), welcher in den Ausschreibungsunterlagen nachrichtlich dargestellt wird und im Schutze der temporären Spundwandumschließung hergestellt werden sollte.

[illegible]

The diagram shows a cross-section of a slope. A yellow area labeled 'Geogitter' represents the reinforcement material. Below it, a series of vertical lines represent the geogitter strips. A green line indicates the ground surface, and a grey line indicates the reinforcement layer. A small triangle is shown at the top left of the geogitter area, indicating the slope angle.

Das Mühlenberger Loch stellt eine Binnenwattfläche (GOK ca. $-2,5$ mNN bis ca. $+ 1,0$ mNN) dar, wodurch die Einbringergerätschaften teilweise schwimmen und teilweise auf der Schlickoberfläche aufsitzen. Daher werden aufbauend auf den durch das Prüffeld Segelschiffhafen gewonnenen Erkenntnissen spezielle Gerätekonfigurationen z.T. auf Pontons geplant. Eine Draufsicht auf die geplante Erweiterungsfläche mit der Darstellung des geplanten Deiches mit einer Breite von über 100 m ist in Bild 12 dargestellt.

Die Ausführung der Gründung und Deicherstellung ist bei den vorliegenden geotechnischen und terminlichen Randbedingungen mit erheblichen technischen Anforderungen verbunden. So müssen innerhalb eines Zeitraumes von ca. 5 Monaten über 40.000 Säulen hergestellt werden (Flächenraster A_S/A_E 10 bis 20 %) und es muß eine Deichhöhe erreicht sein, daß innerhalb des Polders ein Aufstau auf +3,0 mNN ermöglicht werden kann.

18

ber/November 2001 eine Deichhöhe bis 7,5 mNN bzw. 7,9 mNN zu erreichen, um die Sturmflutsicherheit im Winter 2001/2002 zu gewährleisten.

Für die Ummantelung der Säulen ist ein rundgewebtes Polyestergewebe mit Kurzzeitfestigkeiten bis 400 kN/m (RINGTRAC) vorgesehen.

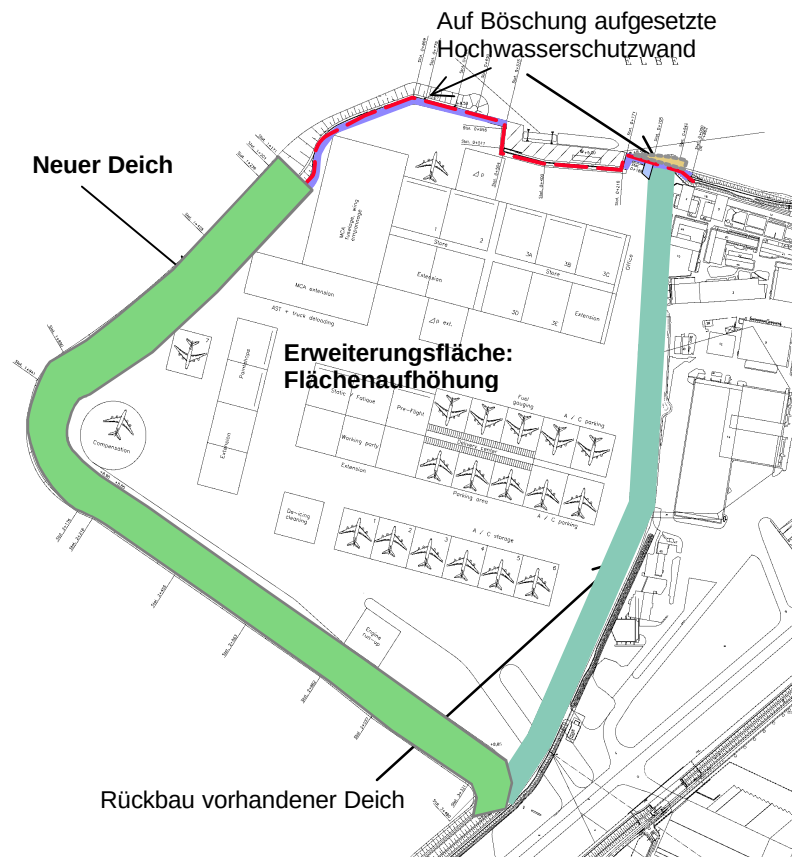


Bild 12: Draufsicht auf DASA Erweiterungsfläche mit geplanter Umschließung

In den ebenfalls in Bild 12 dargestellten Abstellflächen des geplanten Großraumflugzeuges A3XX bzw. A380 bestehen erhöhte Setzungsanforderungen. Auch hier könnten geokunststoffummantelte Sandsäulen eingesetzt werden, wobei in Anbetracht der Fläche nochmals ca. 50.000 Säulen eingesetzt werden müssten.

7. SCHLUSSBEMERKUNG UND AUSBLICK

Durch die zwischenzeitlich gewonnenen Erfahrungen und die darauf basierende stetige innovative Weiterentwicklung des Gründungsverfahrens „geokunststoffummantelte Sandsäulen“ und der geotechnischen Berechnungsverfahren liegt nun ein praxisgerechtes Gründungssystem vor, welches sich durch wesentliche Vorteile auszeichnet.

- Das Gründungssystem ist in sehr weichen und organischen Böden ($c_u < 15 \text{ kN/m}^2$) ausführbar.
- Es wird im Vergleich zu den konventionellen Baugrundverbesserungen eine erhebliche Setzungsreduktion und Setzungsbeschleunigung, mit sehr geringen Setzungen nach der Abschluß der Bauzeit im Gebrauchszustand, erreicht.
- Durch das Säulenmaterial und die Ummantelung ergibt sich eine Vergrößerung der Scherfestigkeit und damit eine Vergrößerung der Sicherheit gegen Grund- oder Geländebruch.
- Die Ummantelung stellt die Filterstabilität der Weichschichtumgebung gegen das Säulenmaterial sicher.
- Das Gründungssystem verhält sich flexibel und 'selbstregulierend'.
- Bei hohen Dammschüttungen passen sich die Säulen den Verschiebungen infolge Spreizwirkung an und stellen keine starren und damit biegebeanspruchten Elemente dar.

Da das hiermit beschriebene Gründungsverfahren neben seinen geotechnischen Vorteilen auch eine sehr wirtschaftliche Lösung von Gründungsproblemen in sehr weichen Böden bietet und sich neuerdings weitere Anwendungen im Hafenbau und Küstenschutz ergeben, kann mit einem verstärkten Einsatz dieses relativ neuen Verfahrens gerechnet werden.

8. LITERATUR

- [1] Kempfert H.-G. & Wallis P. (1997): Geokunststoffummantelte Sandsäulen - ein neues Gründungsverfahren im Verkehrswegebau. 5. Informations- und Vortragsveranstaltung über „Kunststoffe in der Geotechnik“. Sonderheft Geotechnik.
- [2] Raithel, M., Kempfert, H.-G. (2000): Geokunststoffummantelte Bodensäulen. HANSA International Maritime Journal, 137. Jahrgang, Nr. 10, Seiten 44 - 47.
- [3] Raithel, M. (1999): Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Gh Kassel, Heft 6.
- [4] Raithel, M. / Kempfert, H.-G. (1999): Bemessung von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Die Bautechnik, 76. Jahrgang (1999), Heft 12.
- [5] Kempfert, H.G. / Raithel, M./ Jaup, A. (1999): Model tests for analysis of the bearing and deformation behaviour of column foundations; Geotechnical Engineering for Transporta-

tion Infrastructure. XIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam.

- [6] Raithel, M. / Henne J. (2000): Design and numerical calculation of a dam foundation with geotextile coated sand columns; Proceedings of the 4th International Conference on Ground Improvement Geosystems, Helsinki.