

Geokunststoffummantelte Sandsäulen - ein neues Gründungsverfahren im Verkehrswegebau

Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert, FG Geotechnik, Universität GH Kassel
Dipl.-Ing. P. Wallis, Fa. Josef Möbius Bau-Gesellschaft GmbH & Co, Hamburg

1 Einleitung

Ausgehend von den bekannten Verfahren wie Rüttelstopf- oder vermörtelte Säulen, zur Verbesserung des Trag- und Verformungsverhalten von weichen bindigen Böden und Torf im Untergrund von Verkehrswegen, wurde ein Gründungsverfahren entwickelt, bei dem insgesamt ein flexibles Auflager für den Verkehrsweg gegeben ist, aber gleichzeitig Nachsetzungen sehr schnell abklingen. Das Gründungssystem besteht aus rasterförmig angeordneten Sandsäulen, die mit einem zugfesten Geokunststoff ummantelt werden. Die Säulendurchmesser betragen derzeit 0,6 und 1,5 m und werden im Verdrängungsverfahren bzw. im Greiferverfahren hergestellt. Das Tragverhalten der Säulen ergibt sich aus der Mobilisierung der Bodenreaktion in den Weichschichten in Verbindung mit den sich einstellenden Ringzugkräften im Geokunststoff.

2 Ausgeführte Projekte

Inzwischen wurde die neue Gründungsform bei zwei verschiedenen Bauprojekten (1) und (2) ausgeführt. Erstmals wurde das Verfahren bei der Gründung der Verbreiterung eines etwa 6 m hohen Eisenbahndammes auf einem bis 7 m mächtigem weich-breiigem Untergrund aus Klei und Torf ausgeführt. Die Säulen mit einem Durchmesser von 1,5 m wurden im Dreiecksraster mit Achsabständen in Dammquerrichtung von 2,2 - 3,0 m und in Dammlängsrichtung von 1,25 m angeordnet. Bei dem zweiten Projekt lag die Gründung eines Dammes von 2,0 m Höhe auf einer Wechsellagerung von Torf-, Schluff- und Tonschichten vor. Die Säulen haben hier einen Durchmesser von 0,6 m und einen Achsabstand von 1,25 m. Als Säulenummantelung kamen im Projekt (1) ein Verbundmaterial aus Polyestergerewebe und Vliesstoff (Comtrac 200/50 B 30, Kurzzeitzugfestigkeit $F = 200 \text{ kN/m}$) und im Projekt (2) ein Polyestergerewebe (C 10.340, Kurzzeitzugfestigkeit $F = 70 \text{ kN/m}$) zum Einsatz.

Die besonderen Randbedingungen der Baumaßnahmen lagen insbesondere beim erstgenannten Projekt darin, daß der Eisenbahnbetrieb kurzfristig

nach der Bauzeit auf dem neuen Dammteil wieder aufgenommen werden sollte, so daß die Forderung an das Gründungsverfahren nach nur sehr geringen Nachsetzungen ab Fertigstellung der Dammschüttung bestand. Bild 1 zeigt dazu Ergebnisse von Setzungen und Horizontalverschiebungen aus der Dammverbreiterung, wonach sich für den Endzustand ein mittleres Setzmaß von 17 cm und Horizontalverformungen in den Säulenköpfen von 6 - 8 cm ergaben. Dabei ist zu beachten, daß sich unter dem in Bild 1 angedeutetem Altdamm, der seinerzeit ohne Gründungsmaßnahmen auf dem weichen Untergrund aufgesetzt wurde, bereits eine 1,2 m bis 1,5 m tiefe Setzungsmulde eingestellt hatte.

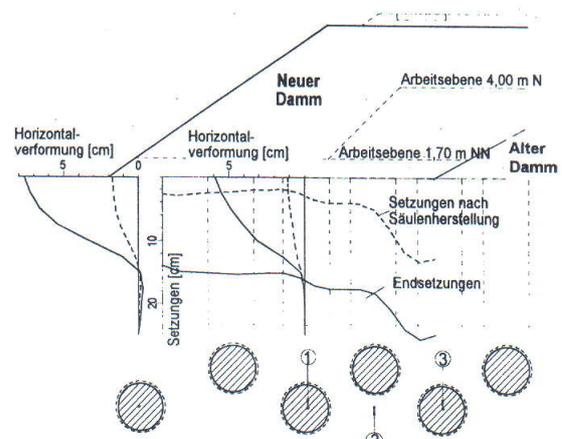


Bild 1: Gründungssituation mit Dammsetzungen und Horizontalverschiebungen der Säulen beim Projekt 1

3 Beschreibung der Herstellungsverfahren

3.1 Bodenersatzverfahren

Die Herstellung der geokunststoffummantelten Sandsäulen nach dem Bodenersatzverfahren kann in fünf aufeinanderfolgende Arbeitsschritte unterteilt werden (Bild 2).

- Zunächst wird die zur Herstellung erforderliche Verrohrung, bestehend aus einem Stahlrohr mit über 1,5 m Durchmesser, mit Hilfe eines mäklergeführten Rüttlers in den anstehenden trag-

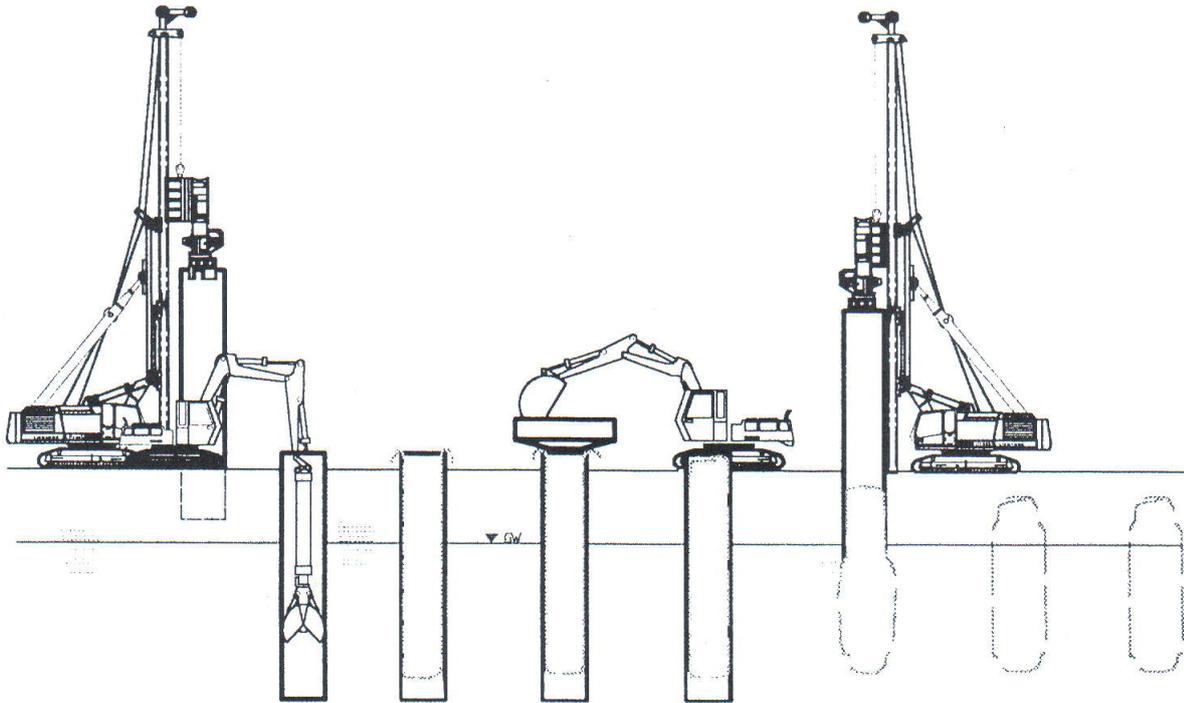


Bild 2: Herstellungsablauf geokunststoffummantelter Sandsäulen im Bodenaustauschverfahren, Durchmesser $\geq 1,5$ m

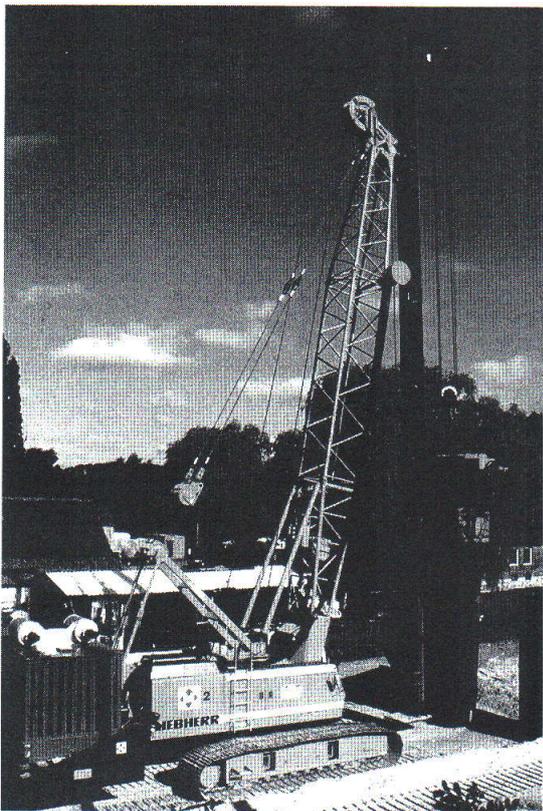


Bild 3: Einvibrieren der Verrohrung beim Bodenaustauschverfahren

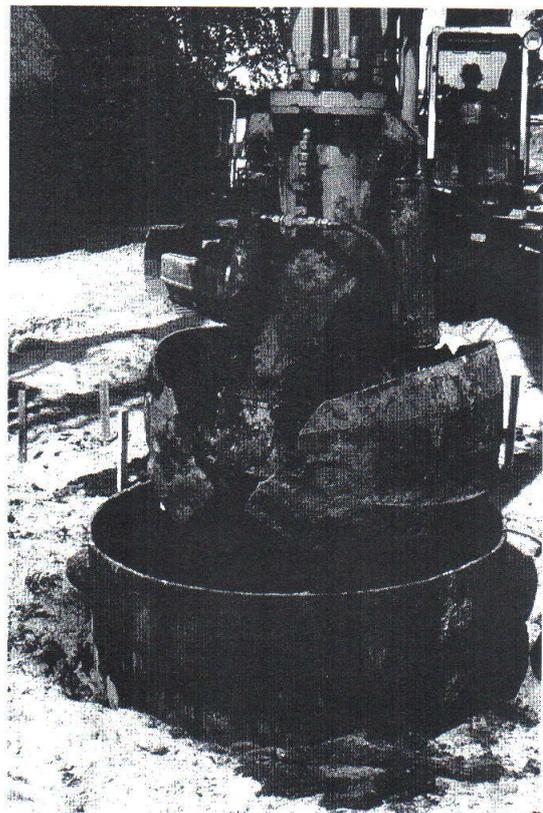


Bild 4: Bodenaushub mit Halbschalengreifer

fähigen Untergrund eingebracht (siehe Bild 3). Hierbei kommt ein Rüttler mit einer Fliehkraft von 2000 kN und einer Vibrationsfrequenz in vertikaler Richtung von über 30 Hz zum Einsatz. Das Einvibrieren der Verrohrung kann auch durch eine am Rohrende mitgeführte Hochdruckspülung unterstützt werden.

- b) Der Bodenaushub im Rohr erfolgt dann bis ca. 0,50 m tief in den tragfähigen Sand. Der unter der Aushubsohle verbleibende etwa 1 m mächtige Mittelsand im Rohr bildet in der Regel für die Dauer des Herstellungsprozesses einen Pfropfen gegen das drückende Grundwasser. Für den bis in große Tiefen erforderlichen Bodenaushub kommt ein speziell konstruierter und auf den Rohrdurchmesser abgestimmter Halbschalengreifer zum Einsatz (siehe Bild 4).
- c) Nach dem Bodenaushub wird die vorkonfektionierte Geokunststoffummantelung in das Rohr eingelegt. Der Geokunststoff wird werksmäßig mit einer Naht zu einem Schlauch mit einem um ca. 10 cm größeren Durchmesser als der Rohrinne Durchmesser gefertigt und als Ballen aufgerollt angeliefert. Durch die Wahl eines größeren Durchmessers des Schlauches wird eine Aktivierung des Bodenwiderstandes infolge der Umfangvergrößerung sichergestellt. Die Schläuche werden auf der Baustelle in die erforderlichen Längen geschnitten und jeweils mit einer Fußnaht verschlossen.
- d) Nach Einlegen des Schlauches wird das Säulenmaterial eingefüllt. Das Schüttmaterial bestand beim ausgeführten Projekt aus einem Mittelsand. Zum Verfüllen wird das obere Schlauchende mit Spanngurten an der Verrohrung befestigt, ein Trichter auf die Verrohrung gesetzt und der Sand in die Säule gefüllt.
- e) Als letzter Arbeitsschritt wird die Verrohrung mit dem Rüttler aus dem Boden gezogen und durch das Vibrieren der Verrohrung der Sand in den Säulen verdichtet.

3.2 Verdrängungsverfahren

Bei der Herstellung der geokunststoffummantelten Sandsäulen nach dem Verdrängungsverfahren lassen sich vier verschiedene aufeinanderfolgende Herstellungsschritten unterscheiden

- a) Zunächst wird die Verrohrung in den Boden eingebracht. Im Gegensatz zum Bodenersatzverfahren besteht die Verrohrung aus einem Stahlrohr mit einem sehr viel kleineren Durch-

messer, im ausgeführten Projekt (2) $d = 0,6$ m. Dieses Rohr wird mit Hilfe eines mäklergeführten Rüttlers bis auf den anstehenden tragfähigen Untergrund nach dem Verdrängungsprinzip eingebracht, wobei der Boden beim Einrütteln mit Hilfe eines konischen Verschlusses am Rohrfuß zur Seite verdrängt wird. Die verwendeten Rüttler arbeiteten im Hochfrequenzbereich. Die Exzentergewichte werden erst bei Erreichen der maximalen Frequenz zugeschaltet, dadurch werden Schwingungen beim Durchfahren von kritischen Frequenzbereichen vermieden (siehe Bild 5).

- b) Das Einlegen der vorkonfektionierten Geokunststoffummantelung erfolgt analog wie beim Bodenersatzverfahren. Der einzige Unterschied besteht aus einem stärker dem Rohraußendurchmesser angepaßten Schlauchdurchmesser, da durch die Verdrängung von einer weitgehenden Voraktivierung des Bodenwiderstandes ausgegangen werden kann. Das Geokunststoff wird mit werksseitiger Naht als Ballen aufgerollt angeliefert und auf der Baustelle längenmäßig abgeschnitten.

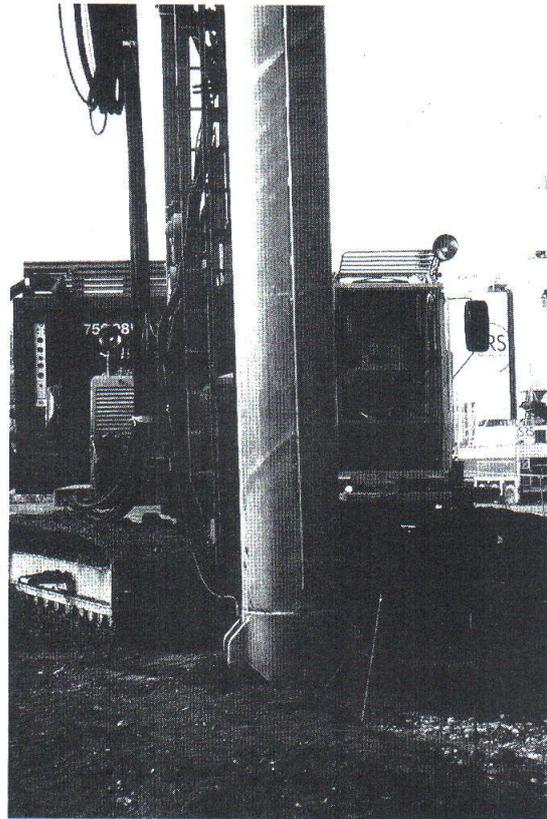


Bild 5: Einbringen der Verrohrung beim Verdrängungsverfahren

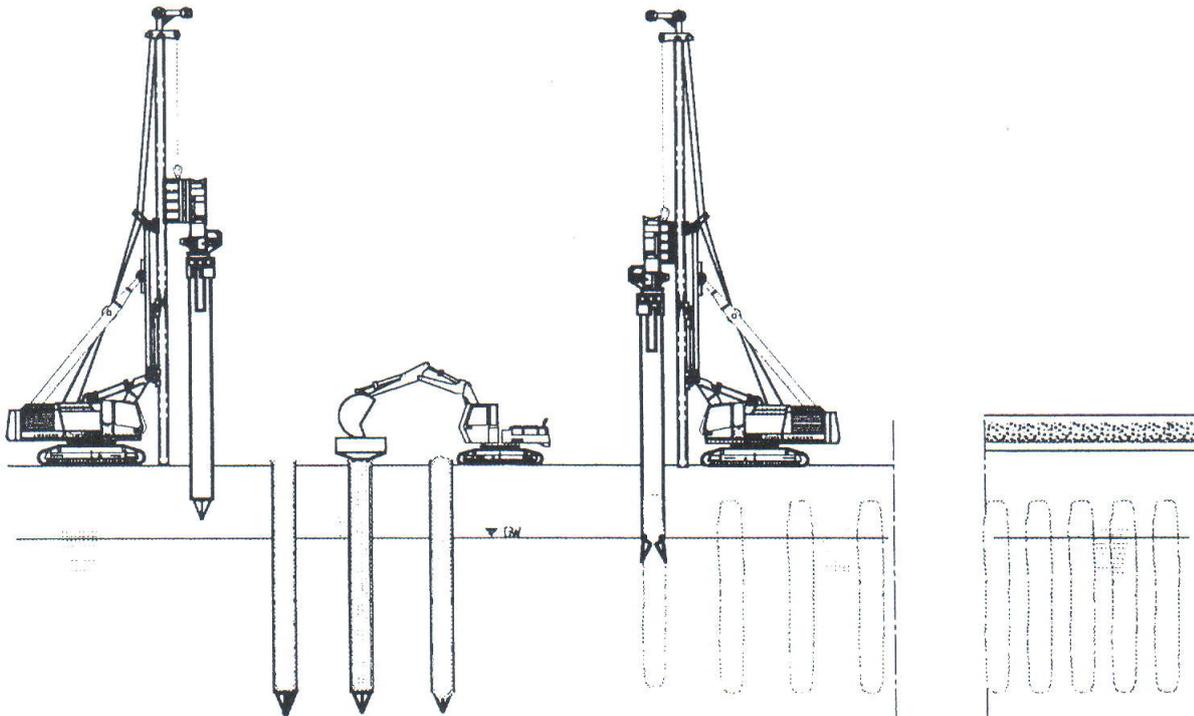


Bild 6: Herstellungsablauf geokunststoffummantelter Sandsäulen im Verdrängungsverfahren, Durchmesser $\leq 1,0$ m



Bild 7: Verfüllen des Rohres mit dem Schüttmaterial beim Verdrängungsverfahren

- c) Nach dem Einlegen des Schlauches wird die Säule mit dem Schüttmaterial verfüllt. Zum Verfüllen wird das obere Ende der Geokunststoffummantelung an der Verrohrung mit Spanngurten befestigt, ein Trichter auf die Verrohrung gesetzt und Sand in die Säule gefüllt (siehe Bild 7).
- d) Abschließend erfolgt das Ziehen der Verrohrung mit dem Rüttler, wobei sich die Verschlusskappe automatisch öffnet und durch die Vibration die Verdichtung des Schüttmaterials erfolgt.

Der Vorteil gegenüber dem Bodenaustauschverfahren beruht beim Verdrängungsverfahren auf der schnelleren und damit wirtschaftlicheren Herstellung der Säulen. In der Regel wird erfahrungsgemäß auch nur noch die Anwendung des Verdrängerverfahrens zugelassen, da in diesem Fall keine kontaminierten Böden ausgebaut und entsorgt werden müssen. Beim Verdrängungsverfahren müssen die Verformungen, die durch das zu verdrängende Bodenvolumen entstehen, beachtet werden. Ggf. sind zusätzliche Maßnahmen (z.B. Vorbohrtechnik) erforderlich. Wenngleich das Gründungssystem im Regelfall nur in weichen

Böden zur Anwendung kommt, müssen dennoch alle vom Verdrängungsverfahren bodenspezifisch unterschiedlich abhängigen Einflüsse sowohl bei der Ausführung, wie auch bei der bodenmechanischen Beurteilung und Berechnung berücksichtigt werden. Einbringungshilfen durch Luft- oder Wasserhochdruck sind auch bei diesem Verfahren möglich.

4 Ausgewählte Meßergebnisse

Bei den bisher ausgeführten beiden Projekten wurde jeweils ein umfangreiches Meßprojekt ausgeführt. In Bild 1 sind in einem Querschnitt die Dammsetzungen und die Horizontalverschiebungen der Säulen infolge Spreizwirkung dargestellt. Für die im Bild gekennzeichneten Punkte 1 - 3 sind in Bild 8 die Zeit-Setzungskurven aufgetragen.

Jede Zunahme der Belastung aus den jeweiligen Dammschüttstufen führt zu einer kurzfristigen Erhöhung des Porenwasserüberdrucks in den Weichschichten und zu einer weiteren Setzung des Dammquerschnitts. Nach der Lastaufbringung baut sich der Porenwasserüberdruck wieder ab. Die Setzungsgeschwindigkeit nimmt schnell ab. Dies resultiert erwartungsgemäß aus der Dränwirkung der Sandsäule und führt zu einer günstigen Konsolidation in der Weichschicht.

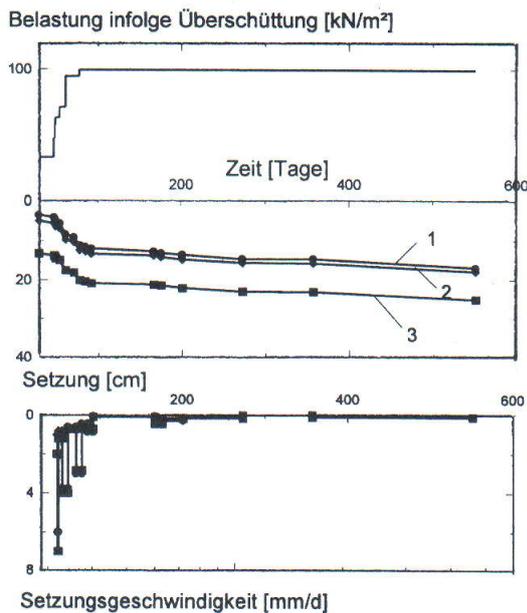


Bild 8: Setzungen und Setzungsgeschwindigkeiten an Meßpunkten unterhalb des Damms

5 Berechnung der Gründung und der Geokunststoffe

Bei der Berechnung des Gründungsverfahrens mit geokunststoffummantelten Sandsäulen wurde von zwei Grenzbetrachtungen zur Standsicherheit und zum Tragverhalten des Gründungssystems ausgegangen.

a) Grenzbetrachtung 1:

Das Gesamtsystem stellt ein Böschungs- bzw. Grundbruchproblem dar und kann mit diesen Mechanismen untersucht werden. Die Sandsäulen gehen in die Berechnung mit der tatsächlich wirkenden Scherfestigkeit ein. Der Geokunststoff der Säulenummantelung wird in geringem Umfang zur rechnerischen Standsicherheitserhöhung mit herangezogen.

b) Grenzbetrachtung 2:

Die Säulen und die umgebenden Weichschichten nehmen die Überschüttungslasten unmittelbar auf. Es bildet sich eine Art Tragsystem bzw. wirkt eine Baugrundverbesserung. Das System ist insoweit „selbstregulierend“, als bei einem Nachgeben der Säulen die Überschüttungslasten auf die Weichschichten umgelagert und damit gleichzeitig der die Säulen stabilisierende Bodenwiderstand in den Weichschichten erhöht wird. Zusätzlich wirkt der die Säulen ummantelnde Geokunststoff als Filtertrennelement und zur Aufnahme von Ringzugkräften. Die vorhandenen Ringzugkräfte sind in Bild 9 beispielhaft für einen Säulendurchmesser von 0,6 m dargestellt. Dabei ist E_s der Steifemodul der Weichschicht und F das Flächenverhältnis Säulenfläche zu Säuleneinflußfläche (Rasterabstand).

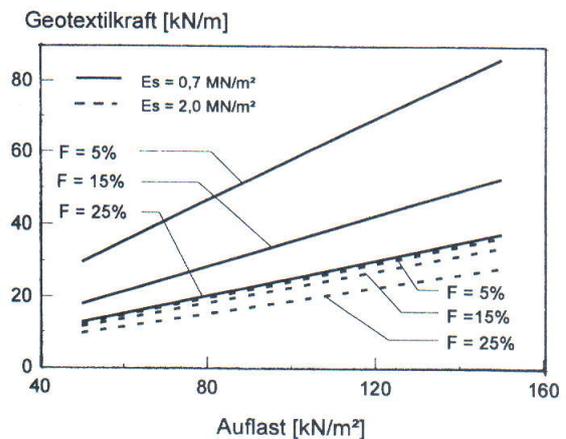


Bild 9: Zugkraft im Geokunststoff bei einem Säulendurchmesser von 0,6 m

6 Schlußfolgerungen und Ausblick

Das neue Gründungsverfahren „geokunststoffummantelte Sandsäulen“ hat sich bei den bereits ausgeführten Projekten bewährt. Die durchgeführten baubegleitenden Messungen haben das zunächst angenommene Trag- und Verformungsverhalten bestätigt. Die Setzungen und Porenwasserüberdrücke klingen schnell ab.

Im Zusammenhang mit den Meßergebnissen und Erfahrungen bei der Bauausführung sind noch einige Fragen zum Trag- und Verformungsverhalten offen. Um weitere Erkenntnisse zu gewinnen und um die Gebrauchstauglichkeit der ausgeführten Bauwerke zu überprüfen, werden an den installierten Meßquerschnitten längerfristige Messungen vorgenommen. Darüberhinaus werden Modellversuche unter zyklischer Belastung durchgeführt, um Verkehrslasten zu simulieren. Insgesamt ist der gegenwärtige Kenntnisstand zum neuen Gründungsverfahren so weit fortgeschritten, daß für vergleichbare Randbedingungen mit den dargestellten Berechnungsmodellen wirklichkeitsnahe Prognosen über die zu erwartenden Verformungen und Kräfte möglich sind.

Zusammenfassend sind nachfolgend einige wesentliche Vorteile des neuen Gründungsverfahrens mit geokunststoffummantelten Sandsäulen zusammengestellt:

- a) Die Geotextilummantelung bewirkt eine gute Filterstabilität zwischen der Weichschicht und dem Säulenmaterial.
- b) Durch die Ummantelung sind die Säulengründungen auch ausführbar in extrem weichen Böden mit $c_u < 15 \text{ kN/m}^2$, wo andere Säulenverfahren oftmals nicht ausgeführt werden dürfen.
- c) Aufgrund der Überschüttungs-/Säulen-/Weichschicht-Interaktion verhält sich das Gründungssystem flexibel und weitgehend „selbstregulierend“. Starre Auflagerpunkte mit einer möglichen Durchstanzgefahr werden dabei vermieden.
- d) Bei hohen Dammschüttungen passen sich die Säulen den Verschiebungen infolge Spreizwirkung an und stellen keine starren und damit biegebeanspruchten Elemente dar.
- e) Dammverbreiterungen können setzungsarm gegründet werden, ohne daß angrenzende Altdambereiche mit Nachsetzungen belastet oder in ihrer Standsicherheit eingeschränkt werden. Altdambereiche bleiben deshalb während der Bauzeit für den laufenden Verkehr uneingeschränkt verfügbar.

- f) Die bisherigen Ergebnisse zeigen, daß durch die Geokunststoffummantelung in Verbindung mit der Konsolidierungsbeschleunigung nur noch geringe Nachsetzungen zu erwarten sind, was insbesondere bei Sanierungsmaßnahmen vorteilhaft ist.

7 Schrifttum

- [1] *Kempfert, H. - G.*: Embankment foundation on geotextile-coated sand columns in soft ground. Proceedings of the First European Geosynthetics Conference; Geosynthetics: Applications, Design and Construction, pp 245 - 250. Balkema, Rotterdam.
- [2] *Kempfert, H. - G., Jaup, A., Raithel, M.*: Interactive behaviour of a flexible reinforced sand column foundation in soft subsoil, XIVth International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering 1997 (zur Veröffentlichung eingereicht)