

# Geokunststoff-ummantelte Bodensäulen

M. Raithel, H.-G. Kempfert

Der Baugrund im norddeutschen und niederländischen Küstenbereich wird weitgehend durch mächtige Schlick, Torf- und Kleischichten charakterisiert. Bei Gründungen im Hafenbau und Küstenschutz stellen sich auf diesen sehr weichen Böden besondere Probleme, da mit einem extremen Setzungsverhalten zu rechnen ist und sich die Standsicherheit, z.B. von Deichen, oftmals als unzureichend erweist. Diese Randbedingungen erfordern in der Regel Tiefgründungen oder Baugrundverbesserungsmaßnahmen. Die bewährte Baugrundverbesserung mittels Schotter- bzw. Stopfsäulen kann jedoch oftmals nicht eingesetzt werden, da die horizontale Stützung in den weichen Böden nicht ausreicht. Im Gegensatz zu herkömmlichen Stopfsäulengründungen können »Geokunststoffummantelte Bodensäulen« auch in sehr weichen und organischen Böden eingesetzt werden, da die radiale Stützung der granularen Säule durch die Ummantelung im Verbund mit dem umgebenden Boden sichergestellt wird. In dem vorliegenden Beitrag wird das neue Gründungsverfahren vorgestellt und Anwendungsmöglichkeiten im Hafenbau und Küstenschutz aufgezeigt.

## 1 Tragverhalten und Berechnungsverfahren

Die geokunststoffummantelten Bodensäulen werden bis auf den tragfähigen Untergrund abgeteuft und stellen im Verbund mit den sie umgebenden Weichschichten eine besonders tragfähige Komponente dar. Während bei einer nicht ummantelten Säule der nach außen wirkenden Horizontalspannung aus der Säule eine gleich große Horizontalspannung in der Weichschicht zur Stützung entgegenstehen muß, wird bei einer ummantelten Säule ein erheblicher Anteil durch Ringzugkräfte der Ummantelung aufgenommen. Da somit die Stützwirkung der Weichschicht, die wesentlich von der Größe der Auflastspannung über der Weichschicht bestimmt wird, geringer sein kann als bei nichtummantelten Säulen, kommt es zu einer erheblichen Spannungs-konzentration über den Säulenköpfen, verbunden mit einer Reduktion der Spannungen und Setzungen der Weichschicht. Hierdurch wird bei Verwendung eines ummantelten Systemes,

gegenüber der herkömmlichen Stopfsäulengründung, eine deutlich Verformungsreduktion erreicht. Letztlich ergibt sich damit auch ein flexibles und selbstregulierendes Tragverhalten, da sich die Lasten bis zum Erreichen des neuen Gleichgewichtszustandes entsprechend umlagern. Gleichzeitig wird eine Setzungsbeschleunigung durch die Wirkung der Bodensäulen als Vertikaldränagen gegeben. Insgesamt ergeben sich infolge der Setzungsreduktion und Setzungsbeschleunigung nur noch geringe Setzungen nach der Bauzeit. Ein weiterer wesentlicher Vorteil liegt darin, daß unmittelbar nach Herstellung dieses Gründungssystems hohe Lasten, z.B. aus Dämmen, vollständig aufgebracht werden können.

Am Fachgebiet Geotechnik der Universität Gh Kassel wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens numerische und analytische Berechnungsverfahren [1] [2] entwickelt, die eine praxisingerechte Bemessung ermöglichen. Die numerischen Analysen wurden sowohl unter Zugrundelegung von rotationssymmetrischen, als auch von ebenen Berechnungsmodellen durchgeführt. Da im ebenen Modell 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). Durch den Vergleich von Ergebnissen aus Feldmessungen mit denen durchgeführter Modellversuchen [3] konnte festgestellt werden, daß bei beiden Berechnungsverfahren (numerisch und analytisch) eine gute Annäherung an die Meßwerte hinsichtlich der Verformungen und der Kräfte in der Ummantelung erreicht wird.

## 2 Bauverfahren

Für die praktische Bauausführung wurden von der Josef Möbius Bau-Gesellschaft (GmbH & Co.), Hamburg, zwei Herstellungsverfahren entwickelt, die als Bodenersatzverfahren und Verdrängungs-

verfahren 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 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. Die betreffenden Herstellungsverfahren unterscheiden sich auch dadurch, daß sich die Säulen bei Anwendung des Bodenersatzverfahrens im Zuge des Ziehens der Verrohrung zufolge ihres relativ hohen Eigengewichtes (Wichte des nichtbindigen Füllmaterials) bis zum Außendurchmesser der Verrohrung ausdehnen, während die Säulen bei Anwendung des Verdrängungsverfahrens durch die unter Spannung gesetzten Weichschichten bis unter den Innendurchmesser des Verdrängungsrohres eingeschnürt werden. Die beim Verdrängungsverfahren entstehende Einschnürung ist durch zahlreiche Meßergebnisse belegt und wird bei der Berechnung sowie bei der Dimensionierung der Geokunststoffummantelung berücksichtigt.

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 brauchen 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. Wei-

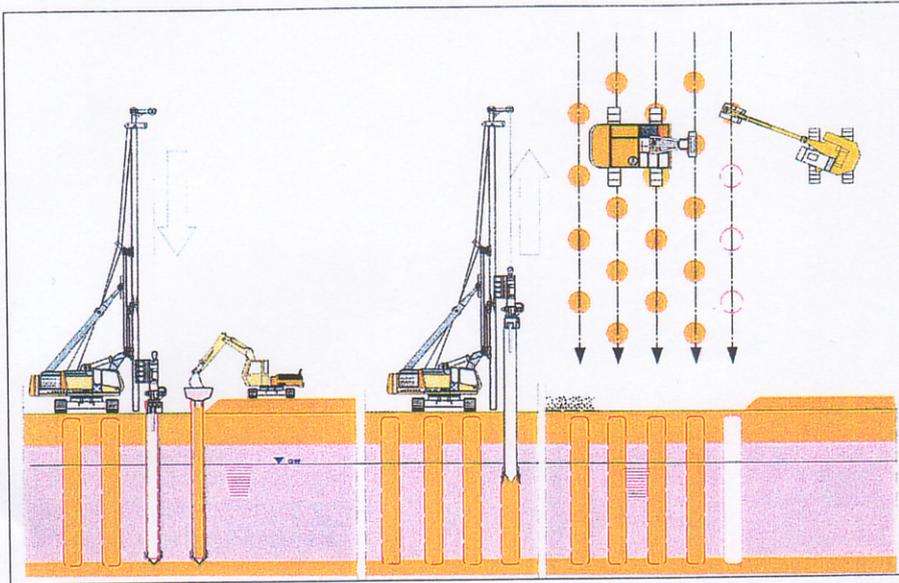


Abb.1: Herstellung von geokunststoffummantelten Bodensäulen beim Verdrängungsverfahren

teres zur Herstellung ergibt sich aus [4]. Die Abfolge der Herstellung von geokunststoffummantelten Bodensäulen nach dem Verdrängungsverfahren zeigt Abb. 1.

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 (siehe Abb. 2). Bei sehr weichen Böden können auch Rohre größeren Durchmessers eingebracht werden. Die verwendeten modernen Rüttler arbeiten 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 vorkonfektionierte Geokunststoffummantelung in das Rohr eingelegt. Das Geokunststoff wird mit werksseitiger Naht, oder rundgewebt, 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. Wenn eine Wasserdurchgängigkeit der Säulen vermieden werden soll, wird ein Bentonit-Sand-Gemisch als Fuß- oder Kopfdichtungen eingebaut, deren ausreichende Wirksamkeit durch Labor- und Feldversuche nachgewiesen wurde.

d) Abschließend erfolgt das Ziehen der Verrohrung mit dem Rüttler, wobei sich die Verschlussklappen (siehe Abb. 3) automatisch öffnen und durch die Vibration die Verdichtung des Schüttmaterials erfolgt.

### 3 Ausgeführte Projekte und Feldmessungen

Inzwischen wurde das neue Gründungsverfahren bei mehreren Baumaßnahmen mit Erfolg eingesetzt, wobei sich insbesondere auch Anwendungen im Verkehrswegebau ergaben. Durch Feldmessungen konnte die generelle Wirksamkeit des Systems nachgewiesen werden.

In Abb. 4 ist beispielhaft die Gründung mit den gemessenen Verformungen eines etwa 6 m hohen Bahndammes im Hamburger Hafengebiet auf bis zu 7 m mächtigen Klei- und Torf Schichten dargestellt.

Die Setzungsbeträge sind, im Vergleich zu ausgeführten Dämmen mit Banddräns, sehr niedrig. Die Horizontalverschiebungen sind ebenfalls geringer. Die Setzungsgeschwindigkeit nimmt wegen der Wirkung der Säulen als Vertikaldränen schnell ab, somit konnten Forderungen nach sehr geringen Nachsetzungen erfüllt werden. Die Säulen passen sich den Verschiebungen infolge Spreizwirkung an, im Gegensatz zu starren und damit biegebeanspruchten Elementen.

Im angrenzenden Bauabschnitt des beschriebenen Hafenbahndammes wurden statt der geokunststoffummantelten Bodensäulen Vertikaldränen (Banddräns) mit temporärer Auflastüberschüttung eingesetzt, so daß die Verformungsmessungen dieses Ausbauabschnittes, aufgrund der analogen Baugrundverhältnisse, als direkte Referenzmessungen zum davor angewandten Gründungsverfahren mit Geokunststoffummantelten Säulen verwendet werden können. Ein Vergleich der Setzungen ist in Abb. 5 dargestellt.

Die durch sich durch das neue Gründungsverfahrens bereits ergebende Setzungsreduktion auf etwa 20 % ist aus diesen Aufzeichnungen deutlich erkennbar, wobei zu beachten ist, daß die Setzungen im Dammschnitt mit Vertikaldränen mit der bisher vorliegenden Meßfolge noch nicht vollständig erfaßt wurden, da sich aus der nach erst 20 Monaten erreichten planmäßigen Schütthöhe des neuen Damms noch weitere Setzungen ergeben. Im Vergleich hierzu betrug die Schüttzeit der Dammverbreiterung in dem Streckenabschnitt mit geokunststoffummantelten Bodensäulen nur etwa zwei Monate. Letztlich sind bei der Gründung mit Banddräns analoge Setzungen zum Altdamm von etwa 1,2 m zu erwarten. Demgegenüber ergaben sich beim Einsatz von geokunststoffummantelten Bodensäulen nach der Herstellung der Säulen nur Setzungen von ca. 0,20 m (4 cm je



Abb. 2: Einbringung der Verrohrung



Abb. 3: Detail - Klappen beim Verdrängungsverfahren

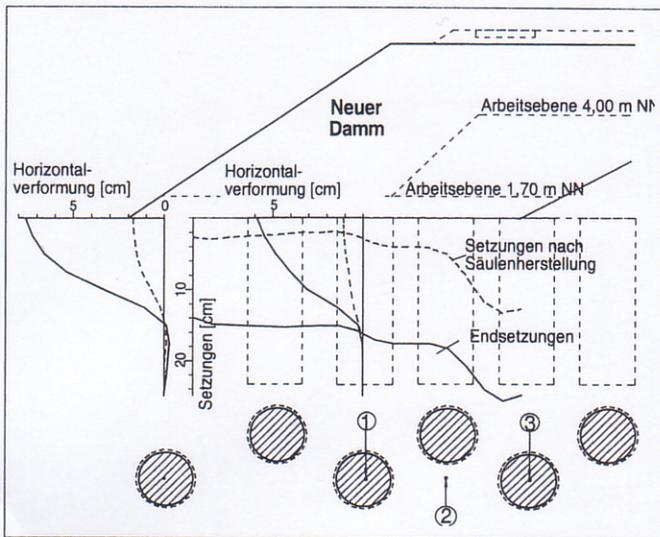


Abb. 4: Gründungssituation mit gemessenen Verformungen

Meter Schütthöhe), die jedoch weitgehend in der Bauzeit eingetreten waren und bereits im Zuge der Dammaufhöhung ausgeglichen werden konnten.

### 5 Anwendungen im Küstenschutz und im Hafenaufbau

Bislang lag der Anwendungsbereich des neuen Gründungsverfahrens hauptsächlich im Verkehrswegebau. Aufgrund der neuen Herausforderungen im Küstenschutz, Hafenaufbau und auch bei der Landgewinnung in See- und Binnenwasserbereichen sind neue Verfahren zur Baugrundverbesserung notwendig, da die Anforderungen an das Setzungsverhalten (hinsichtlich Grenzsetzungswerten und Zeitsetzungsverlauf) oftmals mit herkömmlichen Verfahren nicht eingehalten werden können. So bietet sich eine Anwendung des neuen Verfahrens insbesondere dann an, wenn Schlick, Torf- oder Kleischichten erheblicher Mächtigkeiten vorliegen und neben einer Setzungsreduktion auch eine Bauzeitverkürzung erreicht werden soll, da durch die hohe Tragfähigkeit und durch die vertikale Drän-

wirkung die Schüttzeiten für Dämme stark verkürzt werden können. Folgende Anwendungen sind denkbar:

- Deichbau, insbesondere wenn hohe Deiche auf weichem Untergrund in kurzer Zeit aufgebracht werden sollen.
- Baufeldumschließung, z.B. wenn Randdämme aufgeschüttet werden sollen, um entweder einen Schutz des Baufeldes vor Hochwasserereignissen oder eine Verrieselung im Baufeld durch Aufstau eines konstanten Wasserspiegels zu erreichen.
- Dämme auf weichem Untergrund, insbesondere für Verkehrswege (z.B. Bahnlinien) um eine bestehende Infrastruktur im Hafengebiet zu sanieren oder zu erweitern, ohne in angrenzend bestehenden Bauwerken Nachsetzungen zu erzeugen.
- Stabilisierung von Böschungen, insbesondere wenn im Zuge von Ausbaumaßnahmen steilere Böschungsneigungen an Uferböschungen geplant werden,

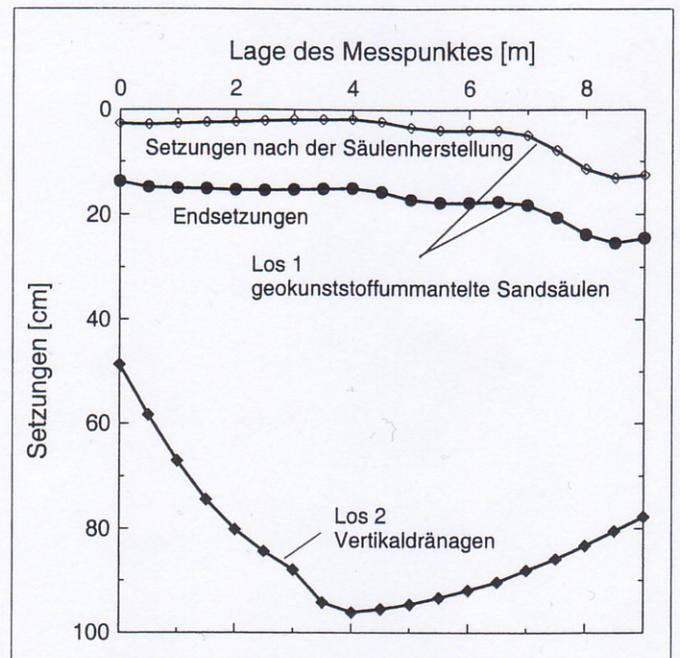


Abb. 5: Vergleich der Setzungen beim Einsatz von geokunststoffummantelten Bodensäulen und Vertikaldränagen

oder wenn schon eine instabile Situation vorliegt und z.B. eine instabile Abtragsböschung stabilisiert werden soll.

- Verfüllung von Hafenbecken, wenn z.B. nach der Verfüllung Anforderungen an die Restsetzung bestehen, die eine Setzungsreduktion und eine Setzungsbeschleunigung erfordern, oder wenn durch die Setzungsreduktion Füllmaterial in erheblichen Größenordnungen gespart werden kann.

Einige typische Anwendungen sind in den Abb. 6, 7 und 8 schematisiert dargestellt.

### 6 Zusammenfassung

Durch die stetige innovative Weiterentwicklung des Bauverfahrens und die gleichzeitige wissenschaftliche Untersuchung des Tragverhaltens mit Entwicklung der zugehörigen geotechnischen Berechnungen (Bemessung und Standsicherheit) konnten ein praxisgerechtes Gründungssystem aus Geokunststoffummantelten Säulen entwickelt werden, welches sich durch wesentliche Vorteile auszeichnet. Dieses 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 und wird zusammenfassend wie folgt dargestellt:

- Das GSM-Gründungssystem ist in weichen bis breiigen ( $c_u < 15 \text{ kN/m}^2$ ) und organischen Böden ausführbar.
- Es wird im Vergleich zu bisher möglichen konservativen Baugrundverbesserungen eine erhebliche Setzungsreduktion und Setzungsbeschleunigung, mit sehr geringen Setzungen nach der

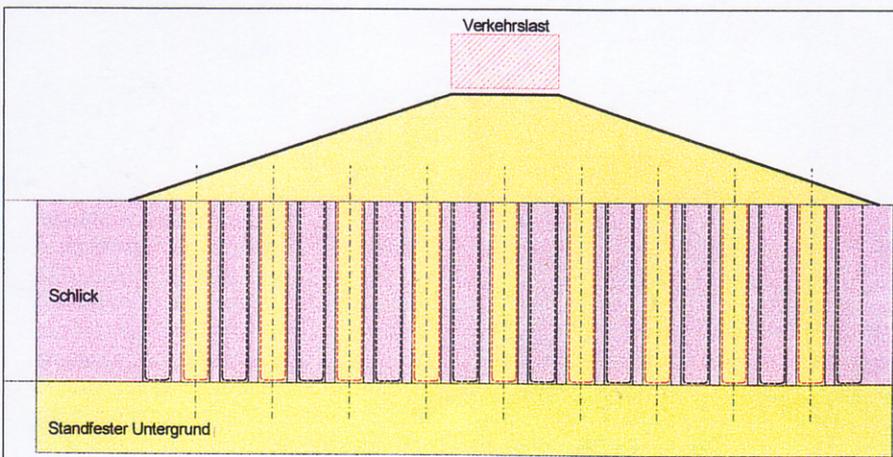


Abb. 6: Deichbau - Baufeldumschließung - Verkehrswegedamm auf weichem Untergrund

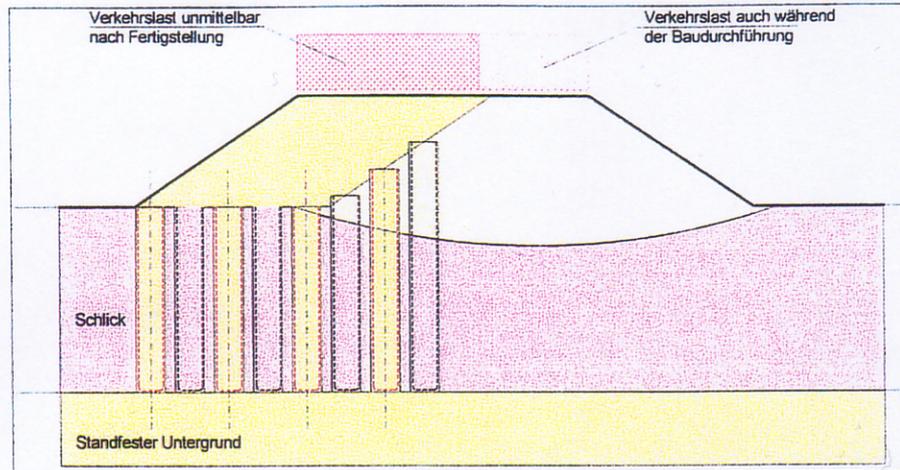


Abb. 7: Verbreiterung eines bestehenden und unter Verkehr befindlichen Verkehrswegedammes auf weichem Untergrund

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. Hohe Dämme können nahezu durchgehend, ohne daß Liegezeiten einzelner Schüttstufen das Bauzeitende beeinträchtigen, aufgebracht werden.
- 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 neue Gründungsverfahren neben seinen geotechnischen Vorteilen auch eine sehr wirtschaftliche Lösung von Gründungsproblemen in sehr weichen Böden bietet und sich durchaus vielfältige Anwendungen im Hafenaufbau und Küstenschutz ergeben, kann mit einem verstärkten Einsatz dieses neuen Verfahrens im Küstenschutz und Hafenaufbau gerechnet werden. Zur Zeit werden Modell-

versuche und Testfelder bei verschiedenen Standorten geplant und auch bereits ausgeführt, um Anwendungen im Wasserbau, auch unter Tideeinfluß, zu erproben. Mit den bisher vorliegenden Ergebnissen ist die grundsätzliche Eignung des Verfahrens im Wasserbau bereits belegt.

### 6 Literatur

- [1] Raithel, M. (1999): Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Bodensäulen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Gesamthochschule Kassel (1999), Heft 6
- [2] Raithel, M., Kempfert, H.-G.: Bemessung von geokunststoffummantelten Bodensäulen. Die Bautechnik, 76. Jahrgang (1999), Heft 12
- [3] 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. XIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam (1999)
- [4] Kempfert, H.-G., Wallis, P.: Geokunststoffummantelte Bodensäulen - ein neues Gründungsverfahren im Verkehrswegebau. 5. Informations- und Vortragsveranstaltung über »Kunststoffe in der Geotechnik«, Sonderheft Geotechnik (1997)

Dr.-Ing. M. Raithel, Kempfert und Partner Geotechnik, Mannheim; Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert, Fachgebiet Geotechnik, Universität Gh Kassel

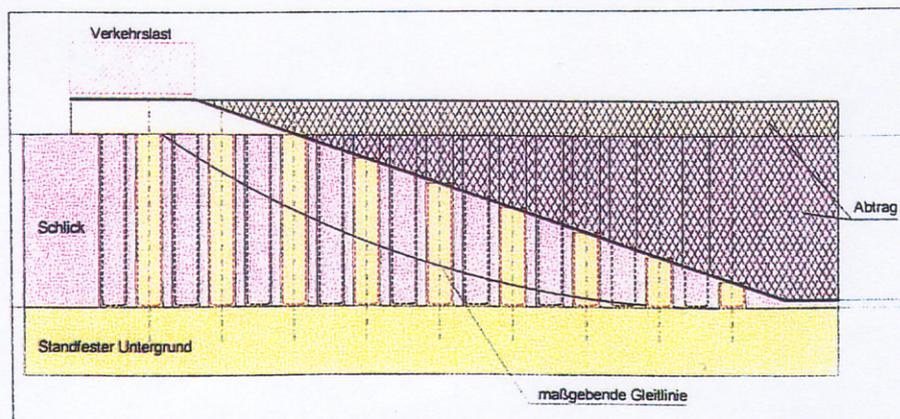


Abb. 8: Stabilisierung einer instabilen Abtragschöpfung