

Marc Raithel  
Volker Küster  
Dimitter Alexiew

## 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen für Erdbauwerke auf gering tragfähigen Böden wurden vor rund 20 Jahren in der Geotechnik eingeführt und sind in Deutschland mittlerweile Stand der Technik. Das System bietet eine geotechnische Lösung für Gründungen in stark verformbaren, sehr gering scherfesten Böden, in denen traditionelle Verfahren der Bodenverbesserung ihre Anwendungsgrenzen erreichen. In diesem Beitrag werden das System der geokunststoffummantelten Säulen, die Berechnungsverfahren und insbesondere die Ergebnisse von Langzeitmessungen beschrieben. Weitere Informationen betreffen die laufende Weiterentwicklung des Systems nach den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen großer Tiefbauprojekte sowie weitere potenzielle Anwendungsmöglichkeiten.

**20 years of foundation systems with geotextile encased columns.** Foundation systems using geotextile encased columns for earth structures (e.g. embankments) on soft subsoil with a low bearing capacity were established in geotechnical engineering about 20 years ago and today are state-of-the-art in Germany. The system offers a geotechnical solution for foundations even in highly deformable soils of extremely low shear strength, in which traditional soil improvement techniques reach their limit of practicability. This paper gives a description of the system of geotextile encased columns, of design and construction procedures and in particular of the results of long-term measurements. Further information is given on ongoing developments of the system corresponding to technical and economical requirements of major geotechnical projects as well as further application options.

### 1 Einführung

Die Josef Möbius Bau-GmbH begann 1993 in Zusammenarbeit mit der Huesker Synthetic GmbH und dem Fachgebiet Geotechnik der Universität Kassel sowie mit Kempfert + Partner Geotechnik, ein System für die Gründung von Erdbauwerken auf stark verformbaren, sehr gering scherfesten Böden zu entwickeln. Die Grundidee von Herrn Werner Möbius bestand darin, eine Alternative zu konventionellen Pfahl- oder Säulengründungen anzubieten und gleichzeitig den Einbau und die dauerhafte Stabilität von Säulen aus verdichtetem granularem Füllmaterial auch in sehr weichen Böden zu ermöglichen, die eine unzureichende seitliche Stützung bieten (Bild 1).

Granulare Säulen finden wegen der erforderlichen seitlichen Bodenstützung in weichen, bindigen und organischen Böden mit einer undrained Kohäsion von mindestens  $c_u \geq 15$  kPa ihren Einsatz. Die Lösung für Böden



Bild 1. GEC-Herstellung in extrem weichem Schlick von Pontons (Quelle: Josef Möbius Bau-GmbH)  
Fig. 1. GEC production from pontoons in very soft/fluid mud (Source: Josef Möbius Bau-GmbH)

mit geringerer Scherfestigkeit besteht in der durchgehenden Ummantelung des verdichteten, nichtbindigen Säulenmaterials durch einen dehnsteifen Geokunststoff. Die allgemeine Funktionsweise der geokunststoffummantelten Säulen ist in Bild 2 dargestellt.

In den 1990er-Jahren ging die Entwicklung von Technologie, Bemessungsverfahren [1] und geeigneten Geokunststoffen Hand in Hand; das erste Projekt wurde schließlich 1995 in Deutschland erfolgreich ausgeführt. Seit der Einführung des Systems konnten mehr als 30 Projekte in verschiedenen Ländern, darunter Deutschland, Schweden, Niederlande, Polen, Spanien und Brasilien erfolgreich abgeschlossen werden.

### 2 Systembeschreibung

Die geokunststoffummantelten Säulen werden in einem gleichmäßigen Raster angeordnet. Basierend auf dem Konzept der Einheitszelle (Bild 3) kann eine einzelne Säule in einem unendlich ausgedehnten, dreiecksförmigen Säulenraster betrachtet werden. Die zu einer einzelnen Säule mit einer Querschnittsfläche  $A_S$  gehörende Einflussfläche  $A_E$  ist ein sechseckiges Element, das in einen flächengleichen Kreis  $D_E$  umgewandelt werden kann (unit cell design concept).

Durch die Gesamtbelastung und die Spannungskonzentration über den Säulenköpfen wird in den Säulen eine nach außen gerichtete, radiale Horizontalspannung her-

M. Raithel/V. Küster/D. Alexiew - 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

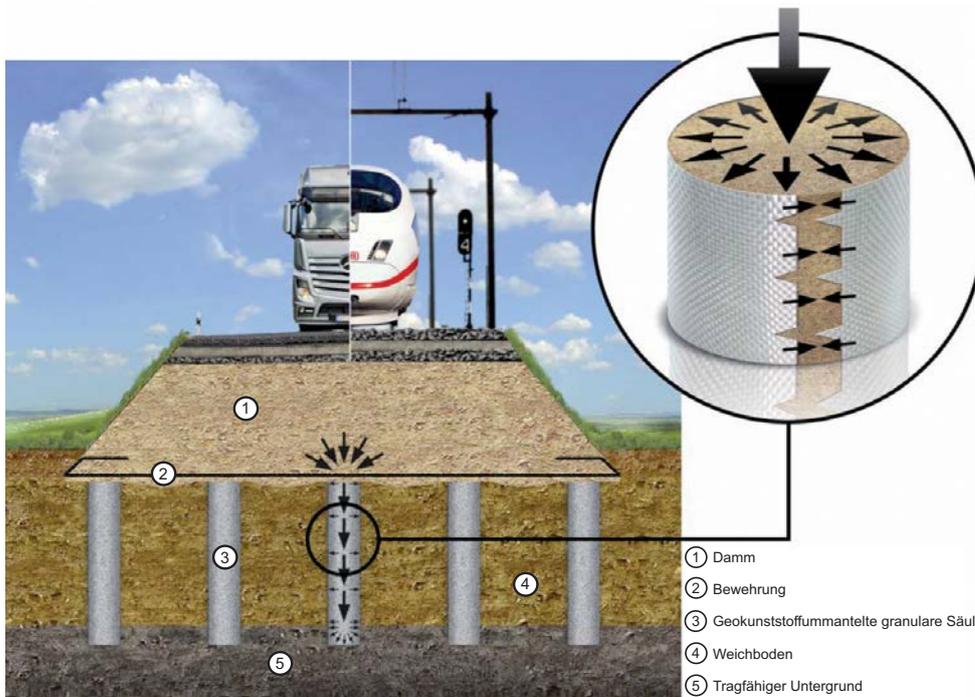


Bild 2. Funktionsprinzip von geokunststoffummantelten Säulen für Dämme auf weichen Böden (Quelle: Huesker Synthetic GmbH)

Fig. 2. Functional principle of geotextile-encased columns for embankments on soft soils (Source: Huesker Synthetic GmbH)

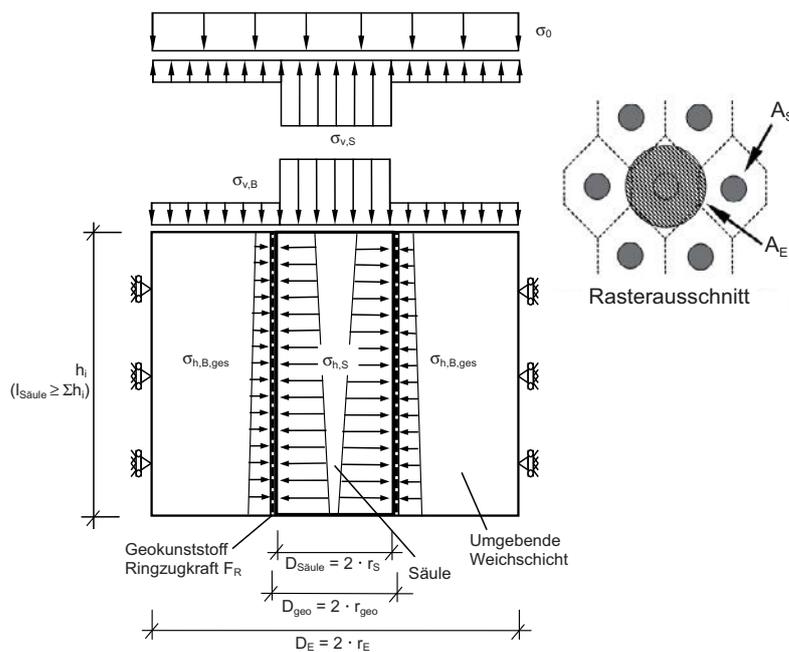


Bild 3. Tragsystem und Berechnungsmodell geokunststoffummantelter Säulen (aus [1])

Fig. 3. Bearing system and calculation model geotextile-encased columns (from [1])

M. Raithel/V. Küster/D. Alexiev · 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

vorgerufen. Das Spezifische am System ist, dass dieser Spannung nicht nur eine nach innen gerichtete Gegenpressung vom Weichboden entgegenwirkt, sondern auch maßgeblich eine radiale Gegenpressung von der entsprechend dehnstifen, geotextilen Umhüllung. Dabei werden in der Ummantelung signifikante Ringzugkräfte bei einer Dehnung in Ringrichtung zwischen 1 und 4 % mobilisiert, die die Säule radial zusammenhalten, letztendlich auch langfristig das Gleichgewicht des Systems gewährleisten und die Anwendung auch bei sehr weichen Böden ermöglichen.

Es entsteht ein duktiles Tragsystem, wobei ein Knicken bei den auftretenden Säulenbeanspruchungen nicht auftritt. Durch den Einsatz von geokunststoffummantelten Säulen werden die Absolutsetzungen und Setzungsunterschiede stark reduziert und die Standsicherheit im Bau- und Endzustand signifikant erhöht. Weil die Säulen als langfristig (durch die Umhüllung) filterstabile Vertikaldränagen wirken, werden der Setzungsverlauf und die Konsolidierung beschleunigt. Die im Wesentlichen durch Verkehrslasten und Kriechvorgänge initiierten Nachsetzungen sind gering und können im Bedarfsfall weitgehend durch temporäre Überschüttungen vorweggenommen werden.

Eine ausführliche Beschreibung der wesentlichen theoretischen und ausführungstechnischen Belange des Systems mit geokunststoffummantelten Säulen findet sich in [2]. Dort wird auch explizit auf die unterschiedlichen, zu diesem Zeitpunkt existierenden, System- und Ausführungsoptionen eingegangen. Mit diesen normenähnlichen Regelungen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik wird das Verfahren zur Gründung von Erdbauwerken mit geokunststoffummantelten Säulen als Stand der Technik definiert.

### 3 Berechnung und Bemessung

Das Berechnungsverfahren spiegelt das Spannungs- und Verformungsverhalten des Systems, bestehend aus der Säulenfüllung, dem umgebenden Weichboden und der Geokunststoffummantelung, wider. Folglich beinhalten die Ergebnisse nicht nur die radiale Ringzugfestigkeit und Ringdehnsteifigkeit der Ummantelung, sondern z. B. auch die Setzung der Säulenköpfe, die schließlich die Setzung des darüber liegenden Damms bestimmt.

Die Analyse und Berechnung einer Gründung für Erdbauwerke auf geokunststoffummantelten Säulen beinhaltet in der Regel zwei Phasen.

Am Anfang steht eine, mitunter als vertikal bezeichnete, Bemessung, die sich vor allem auf das vertikale Trag- und Verformungsverhalten des Systems konzentriert und Fragen der Gesamtstabilität vorläufig außer Acht lässt.

Im zweiten Schritt muss die Gesamtstabilität unter Berücksichtigung der Ergebnisse der ersten Phase und einer geeigneten horizontalen Geokunststoffbewehrung über den Säulen nachgewiesen werden.

Die Bemessung der Horizontalbewehrung über den Säulenköpfen (Bild 2) ergibt sich aus der globalen Standsicherheitsberechnung und unterliegt in der Regel nicht den Anforderungen an geotextile Bewehrungen über pfahlähnlichen, deutlich steiferen Traggliedern (Membranwirkung). Neben der Gewährleistung der Gesamtsta-

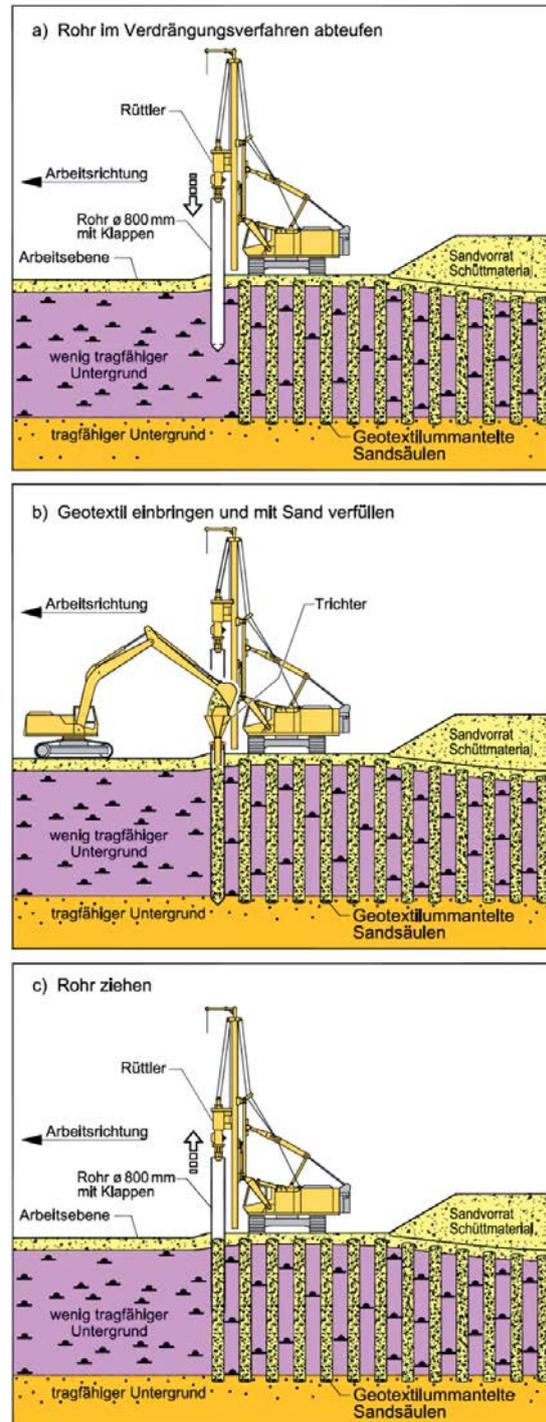


Bild 4. Herstellung im Verdrängungsverfahren (Quelle: Josef Möbius Bau-GmbH)  
Fig. 4. Production by displacement method (Source: Josef Möbius Bau-GmbH)

M. Raithe/V. Küster/D. Alexiew · 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

bilität nimmt die horizontale Geokunststoffbewehrung im Bedarfsfall Spreizkräfte auf und trägt zu einer Vergleichmäßigung der Beanspruchung und der Setzungen in der Gründungsebene bei.

Die Bemessung von Gründungen auf geokunststoffummantelten Säulen erfolgt entweder analytisch oder durch numerische Verfahren. Am häufigsten wird jedoch die analytische Methode verwendet, die ausführlich in [2] beschrieben wird.

#### 4 Herstellungsverfahren

Zur Herstellung der geokunststoffummantelten Säulen wurden bis heute vorwiegend zwei Verfahren eingesetzt. Das erste ist das Verdrängungsverfahren (Bild 4). Hierbei wird unterschieden in Verdrängung des Bodens bei der Säulenherstellung durch eine am Fuß geschlossene Verrohrung oder durch den Einsatz eines Tiefenrüttlers.

Bei Verwendung eines an der Spitze verschlossenen Stahlrohrs (Klappen, Fußplatte) wird nach dem Erreichen des tragfähigen Bodens die zylindrische Geokunststoffummantelung eingelegt und diese mit nichtbindigem Material verfüllt. Anschließend wird das Rohr mit geöffnetem Querschnitt am Fuß unter Vibration gezogen und die Säulenfüllung dabei verdichtet (Bild 4).

Bei der Anwendung eines Tiefenrüttlers wird die geotextile Ummantelung auf die Außenhülle des Rüttlers gezogen und durch die Weichschicht bis auf den tragfähigen Horizont mitgeführt. Der Einbau des Säulenmaterials erfolgt über die Materialschleuse beim sukzessiven Ziehen des Tiefenrüttlers, wobei die Verdichtung über gezielte Stopfvorgänge erreicht wird. Bei diesem Verfahren ist die mögliche Beschädigung der geotextilen Ummantelung beim Einbauprozess projektabhängig zu bewerten und durch Festlegung des entsprechenden Abminderungsfaktors zu berücksichtigen.

Das Verdrängungsverfahren ist die Standardmethode zur Herstellung der geokunststoffummantelten Säulen. Mit ihr lässt sich die Gründung wirtschaftlich und kontrolliert qualitativ hochwertig installieren.

Die zweite Methode ist das Aushubverfahren (Bild 5). Bei diesem wird ein offenes Rohr in den Boden eingebracht und der Boden während oder nach dem Einbringen mithilfe spezieller Vorrichtungen (Bohrschnecke, Greifer) aus dem Rohr ausgehoben. Nach dem Einhängen der Geotextilummantelung und der Befüllung wird das offene Rohr unter Vibration gezogen. Das Aushubverfahren wird bei Böden mit hohen Eindringwiderständen (z. B. Sandauffüllungen und -zwischenlagen) eingesetzt oder wenn Vibrationen aufgrund der Nähe zu baulichen Anlagen gering zu halten sind.

#### 5 Langzeitmessungen und Kriechverhalten

Zur Festlegung der Restsetzung nach Beendigung der Bauphase müssen sowohl die Primärsetzung als auch die Sekundär- oder Kriechsetzung berücksichtigt werden. Diese bestimmen meist das Setzungsverhalten der Säulengründung unter Betrieb, da der Primärsetzungsverlauf durch die Wirkung der geokunststoffummantelten Säulen als große Vertikaldränagen beschleunigt wird und im Regelfall schon während der Bauzeit beendet ist.

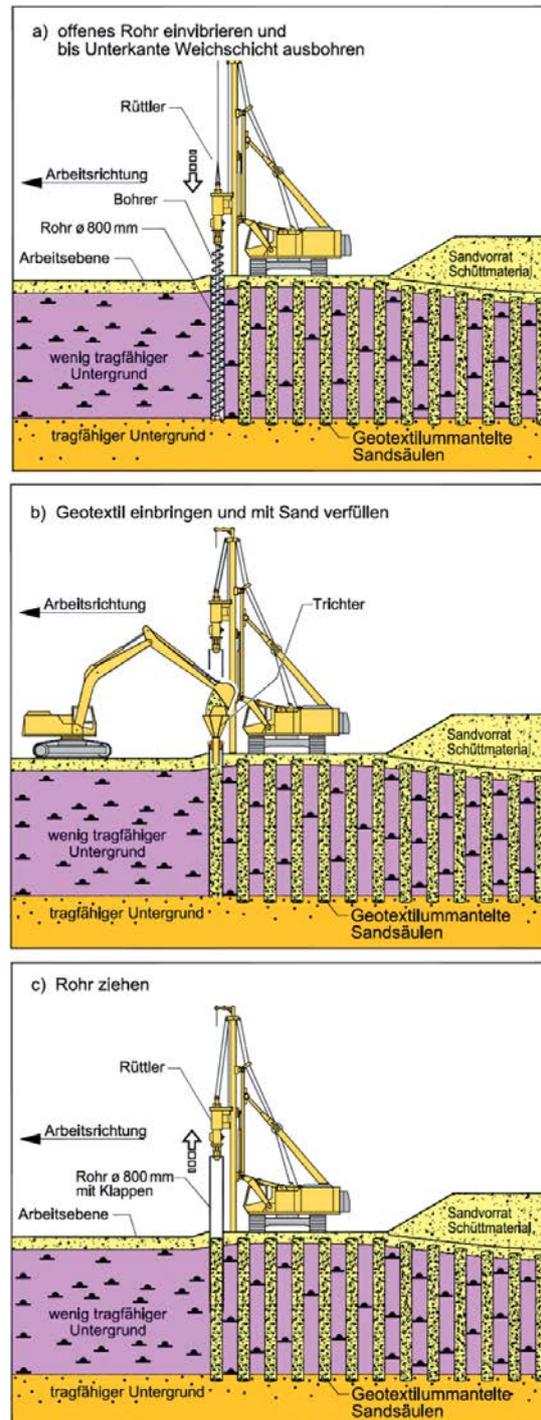


Bild 5. Herstellung im Aushubverfahren (Quelle: Josef Möbius Bau-GmbH)

Fig. 5. Production by excavation method (Source: Josef Möbius Bau-GmbH)

M. Raithel/V. Küster/D. Alexiew · 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

In [3] und [4] wird beschrieben, wie sich Kriechsetzungen proportional zu den Belastungsänderungen ergeben, welche die Deformation erzeugen. Da die Weichschicht durch die Spannungskonzentration über den Säulenköpfen geringer belastet wird, ist im Vergleich zum unverbesserten Baugrund durch den Einsatz der ummantelten Säulen generell von einer Kriechsetzungsreduktion auszugehen. Zudem unterliegt die Weichschicht, wenn Kriechsetzungen berücksichtigt werden, einer stärkeren Setzung als die Säule, und entzieht sich somit der Belastung.

Demzufolge kommt es durch das interaktive Tragsystem zu einer Lastumlagerung in Richtung ummantelter Säule und zu einem neuen Gleichgewichtszustand mit einem noch niedrigeren Spannungsniveau in der Weichschicht. Somit wird eine weitere Reduktion der Kriechsetzungen im Vergleich zum unverbesserten Zustand erreicht.

Der Effekt der Kriechsetzungsreduktion wurde durch Langzeitmessungen bestätigt. Nachfolgend sind exemplarisch die Langzeitmessungen bei der Airbus-Erweiterung in Hamburg-Finkenwerder dargestellt, welche zwischen 2001 und 2004 realisiert wurde (vgl. auch Bild 1). Der 2.500 m lange Umschließungsdeich um die Erweiterungsfläche wurde auf insgesamt ca. 60.000 geokunststoffummantelten Säulen gegründet und im September 2002 fertiggestellt. Im Rahmen der erdstatischen Nachweise wurden die Standsicherheits- und Verformungsprognosen durch baubegleitende Messungen geprüft. Das umfangreiche Messprogramm umfasste u. a. Horizontal- und Vertikalinklinometer, Setzungspegel und Messmarken sowie Wasserdruck- und Porenwasserdruckgeber. Ein Großteil der Messelemente wurde für eine fortlaufende messtechnische Überwachung nach Fertigstel-

lung des Deichs ausgebildet. Die Bilder 6 und 7 zeigen typische Messergebnisse.

Die erste Überprüfung der Deichüberhöhung zum Ausgleich von Langzeitsetzungen erfolgte nach etwa einem Jahr und dem näherungsweise vollständigem Abschluss der Primärsetzungen. Dabei wurde eine rechnerische Prognose der zukünftigen Kriechsetzungen vorgenommen. Eine weitere Überprüfung im Jahr 2004 ergab deutlich geringere Kriechsetzungen als anfänglich prognostiziert. Daraufhin erfolgte eine neue Prognose anhand von Kriechbeiwerten, die von den Messungen unter Zugrundelegung von logarithmischen Regressionsfunktionen abgeleitet wurden. Im Jahr 2006 wurden dann die Setzungsprognosen nach weiteren Setzungsmessungen erneut korrigiert. Seit über ca. 10 Jahren ermöglichen sie eine zuverlässige Modellierung des gemessenen Kriechsetzungsverlaufs. Die Gründung des Finkenwerder Vordeichs auf geokunststoffummantelten Säulen, Letzterer eine Fortsetzung des Umschließungsdeichs der Airbus-Werkserweiterung, zeigt ein ähnliches Verhalten. Die Bilder 6 und 7 zeigen, dass für beide Maßnahmen eine Anpassung der Kriechsetzungsprognosen mit einer Reduzierung der Restsetzungen erforderlich wurde.

Bild 8 enthält eine zusammenfassende Auswertung der gemessenen und der auf Grundlage der im Baugrundgutachten vorgegebenen Kriechbeiwerte berechneten Kriechsetzungen. Die für die Berechnung angesetzten Kriechbeiwerte können dabei als realitätsnah angesehen werden, da im Bereich der Flächenaufhöhung ohne geokunststoffummantelte Säulen die Prognosewerte anhand der Messungen bestätigt werden konnten.

Anhand der Setzungsmessungen konnte somit nachgewiesen werden, dass der Ansatz von Kriechbeiwerten,

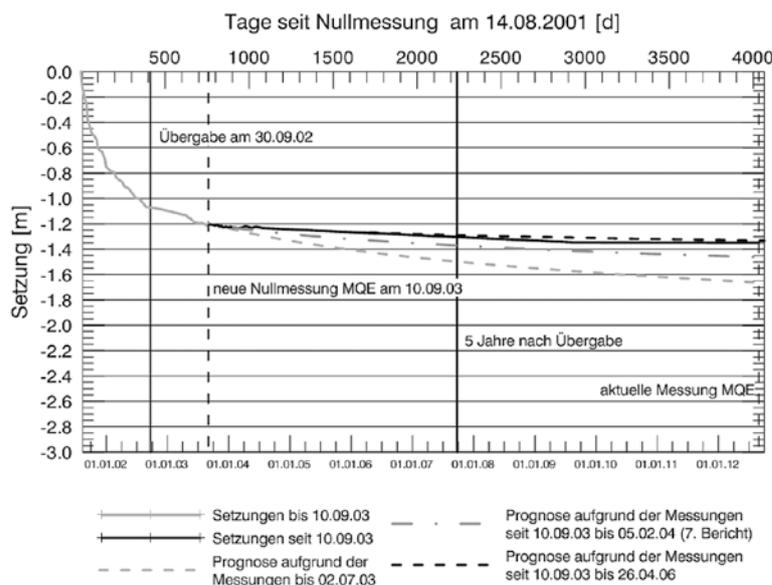


Bild 6. Ergebnisse von Langzeitmessungen und Vergleich der Kriechsetzungsprognosen für die Deichgründung zur Erweiterung der Flugzeugwerft in Hamburg-Finkenwerder (Quelle: Kempfert + Partner Geotechnik)

Fig. 6. Results of long-term measurements and comparison of creep settlement prognoses for the dyke foundation for the aircraft works expansion in Hamburg-Finkenwerder (Source: Kempfert + Partner Geotechnik)

M. Raithel/V. Küster/D. Alexiev - 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

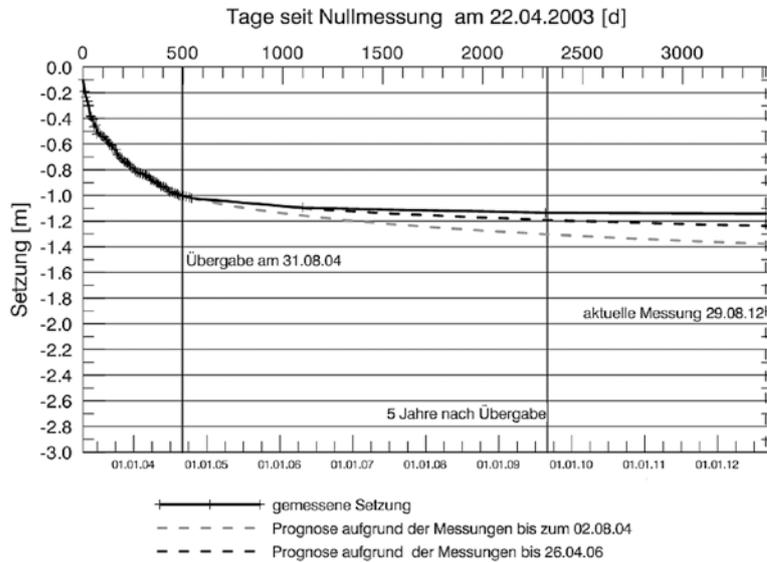


Bild 7. Ergebnisse von Langzeitmessungen und Vergleich der Kriechsetzungsprognosen für die Gründung des Finkenwerder Vordeichs (Quelle: Kempfert + Partner Geotechnik)  
Fig. 7. Results of long-term measurements and comparison of creep settlement prognoses for the foundation of the Finkenwerder outer dyke (Source: Kempfert + Partner Geotechnik)

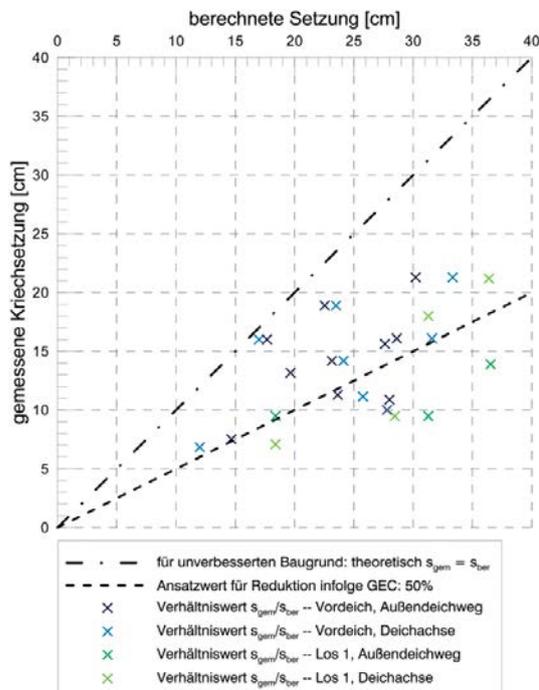


Bild 8. Zusammenfassende Auswertung und Gegenüberstellung der gemessenen und der ohne geokunststoffummantelte Säulen berechneten Kriechsetzungen (Quelle: Kempfert + Partner Geotechnik)  
Fig. 8. Combined analysis and comparison of measured creep settlement and creep settlement calculated without geotextile-encased columns (Source: Kempfert + Partner Geotechnik)

die für den unverbesserten Baugrund (d. h. ohne Säulengründung) angegeben bzw. aus diesen abgeleitet wurden, zu einer deutlichen Überschätzung der Kriechsetzungen im Vergleich zum tatsächlichen Setzungsverhalten einer Gründung auf geokunststoffummantelten Säulen führt. Für eine realistische Prognose der Langzeitverformungen und Kriechsetzungen scheinen somit geeignete Laborversuche (Kriechversuche) erforderlich. Diese würden eine Ableitung des Kriechverhaltens von Weichschichten unter verschiedenen Belastungsrandbedingungen und -stufen ermöglichen und so den kriechsetzungsreduzierenden Effekt der Säulengründungen ermitteln.

Sofern geeignete Versuchsergebnisse fehlen, wird häufig näherungsweise ein Reduktionsfaktor auf die für den unverbesserten Baugrund ermittelten Kriechsetzungen verwendet, der aus den Messergebnissen abgeleitet wurde.

Durch den Vergleich von rechnerischen Prognosen und Messungen konnte dieser Reduktionsfaktor auf die Kriechsetzungen des unverbesserten Baugrunds anhand Bild 8 zu etwa 0,5 ermittelt werden, d. h. durch die Gründung auf geokunststoffummantelten Säulen wurden die Kriechsetzungen um 50 % reduziert. Je nach Projektparametern können die Reduktionsfaktoren sogar Werte bis etwa 0,25 annehmen (vgl. auch [5] und [6]). Des Weiteren kann eine weitere Reduzierung der Kriechsetzungen durch eine Vorbelastung bzw. temporäre Überschüttung erreicht werden, was im vorliegenden Fall allerdings nicht erforderlich war.

## 6 Weiterentwicklung des Systems

### 6.1 Dichtung gegen aufsteigendes Grundwasser

Werden die geokunststoffummantelten Säulen in einem wasserführenden Sand-Kieshorizont abgesetzt, entsteht

M. Raithel/V. Küster/D. Alexiew · 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

durch das granulare Füllmaterial der Gründungselemente eine hydraulische Verbindung zwischen der Geländeoberfläche und dem Aquifer. Neben dem Risiko des Versickerns grundwassergefährdender Stoffe im Untergrund kann es bei artesischem Druck zu einer dauerhaften, aufwärts gerichteten Grundwasserströmung und einem Ausfließen an der Geländeoberfläche kommen. Die Wasserwegigkeit in den Säulen kann durch den Einbau einer lokalen, mindestens einen Meter hohen Dichtung aus einem Sand-Bentonit-Gemisch im Säulenkörper minimiert werden. Bild 9 zeigt einen Ausschnitt aus der Ausführungsplanung einer Gründung auf geokunststoffummantelten Säulen für einen Straßendamm. In diesem Fall wurde die 1 m hohe wasserdichte Schicht am Fuß der Säulen eingebaut. Die Höhenlage der Dichtung kann an die konkrete Baugrundsichtung angepasst werden (z. B. im Kopfbereich bei wasserführenden Sandzwischenlagen).

## 6.2 Geokunststoffummantelung

Die Weiterentwicklung und Optimierung des Gründungssystems mit geokunststoffummantelten Säulen führte unter anderem auch zur Weiterentwicklung der Geokunststoffummantelung als wichtiges bewehrendes Tragelement. Sie besitzt großen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten der Säule und des Gesamtsystems. Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an Integrität, Dauerbeständigkeit, Robustheit, mechanisches Kurz- und Langzeitverhalten usw. Von besonderer Bedeutung sind die Dehnsteifigkeit (Zugmodul) und die Zugfestigkeit in Ringrichtung, sowohl kurz- wie auch langfristig (geringes Kriechen). Aus baupraktischer Sicht sollen die Ummantelungen leicht zu transportieren und einzubauen sein. Unter Beachtung all dieser Aspekte wurde z. B. die Produktfamilie Ringtrac entwickelt. Es stehen derzeit drei

nahtlose Ringtrac-Familien aus unterschiedlichen Polymeren mit Durchmessern von 50 bis 100 cm, Kurzzeitfestigkeiten im Ring von 400 kN/m und mehr sowie Ringdehnsteifigkeiten von 1.000 bis zu 8.000 kN/m zur Verfügung. Durch die Wahl des Polymeren ist eine hohe Beständigkeit, z. B. auch in alkalischen Milieus, gewährleistet. Die breite Palette der Produkteigenschaften bietet ein hohes Potenzial zur Systemoptimierung.

## 6.3 Säulenlänge

Für ein Bauprojekt in Polen war die Herstellung von geokunststoffummantelten Säulen mit einer maximalen Länge von knapp 30 m erforderlich. Diese, bisher noch nicht ausgeführten, Säulenlängen konnten dank gerätetechnischer Weiterentwicklungen realisiert werden. Die im Dezember 2011 dem Verkehr übergebene Autobahn A2 verbindet die polnische Stadt Poznan mit der deutsch-polnischen Grenze und führt über eine ca. 300 m lange Rinne mit organischen Sedimenten. Der gering tragfähige Boden aus Torf und Gytja mit undrained Scherfestigkeiten von teilweise deutlich unter 10 kN/m<sup>2</sup> steht in einer Stärke von bis zu 28 m unter Geländeoberkante an. Die längsten Säulen mit einem Durchmesser von 800 mm konnten mit einem offenen Rohr und verlornen Fußplatte im Verdrängungsverfahren dank eines leistungsstarken Gürtelrüttlers hergestellt werden (Bild 10). Hierbei wurde zur Reduzierung der Reibungskräfte zwischen Verdrängungsrohr und Säule eine Innenschmierung mit einer sehr mageren Bentonitsuspension eingesetzt.

## 6.4 Probelastung einer Säulengruppe

Im Jahr 2011 wurde zur gezielten Überprüfung und Fortentwicklung der vorhandenen Berechnungsverfahren der

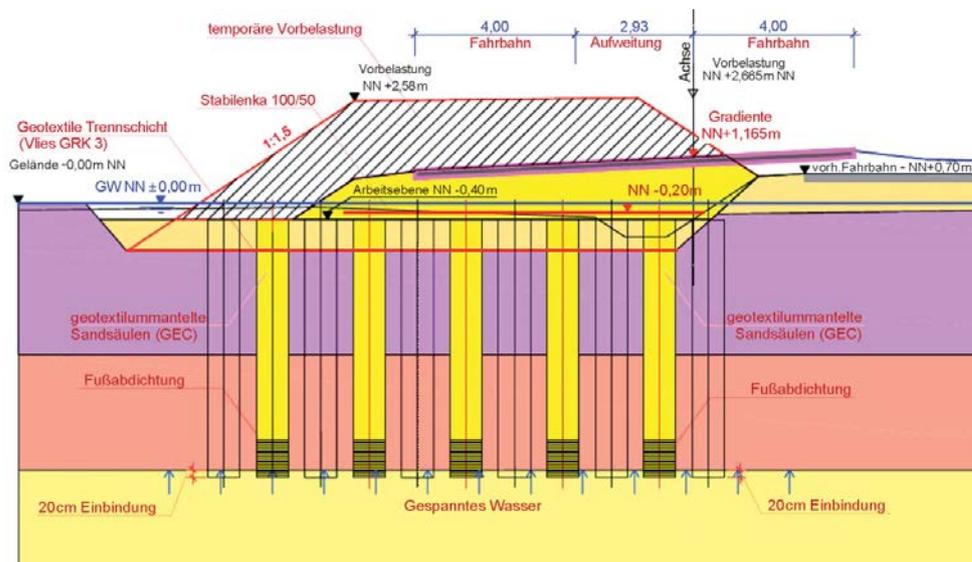


Bild 9. Geokunststoffummantelte Sandsäulen mit Fußabdichtung (Quelle: Josef Möbius Bau-GmbH)  
Fig. 9. Geotextile-encased columns with base sealing (Source: Josef Möbius Bau-GmbH)

M. Raithel/V. Küster/D. Alexiew · 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen



Bild 10. LRB 255 mit 30 m langem Verdrängungsrohr auf einer Baustelle in Polen (Quelle: Josef Möbius Bau-GmbH)  
Fig. 10. Pile driver LRB 255 with 30 m-long displacement pipe at a site in Poland (Source: Josef Möbius Bau-GmbH)

Großversuch Berne (Belastungsgrößversuch) durchgeführt (Bild 11). Die ersten Ergebnisse und Analysen wurden zwischenzeitlich publiziert [7].

Anhand dieses Großversuchs konnten zum einen die vorhandenen Bemessungsansätze und Berechnungsverfahren in Bezug auf die Ringzugkraftbemessung des Geokunststoffs sowie auf die Setzungsprognosen bestätigt werden.

Zum anderen zeigte sich jedoch, dass in Bezug auf die Berechnung der globalen Standsicherheiten und Geländebruchnachweise in situ noch deutliche Tragreserven des Systems im Vergleich zu dem rechnerisch ermittelten Standsicherheitsniveau vorhanden sind. Selbst bei direkter Erfassung der tatsächlich gemessenen Spannungskonzentration über den Säulen und unter Berücksichtigung zusätzlicher räumlicher Effekte wurden dabei rechnerisch Bruchzustände ermittelt, obwohl diese in situ nicht auftraten. Diese Beobachtung korreliert mit den Erfahrungen im Zuge der Projektausführung, dass das tatsächlich vorhandene Standsicherheitsniveau offenbar bei Anwendung der üblichen Berechnungsverfahren häufig unterschätzt wird. Derzeit erfolgt daher auf Grundlage der neuen Erkenntnisse eine weitere Optimierung der Berechnungsverfahren zur Erfassung der globalen Standsicherheit. Um auch mit den gebräuchlichen, analytischen 2-D-Berechnungsverfahren künftig eine möglichst realitätsnahe, wirtschaftliche, aber auch handhabbare Bemessung des Gründungssystems zu entwickeln, wird aktuell eine schrittweise Nachrechnung des Großversuchs vom genauesten Verfah-

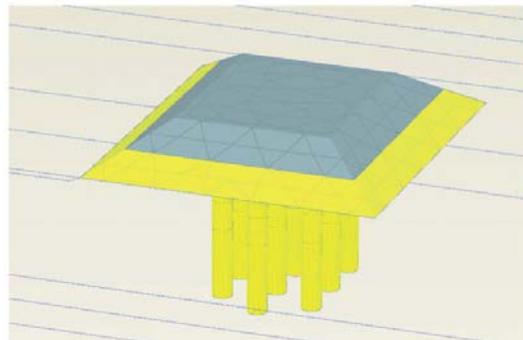
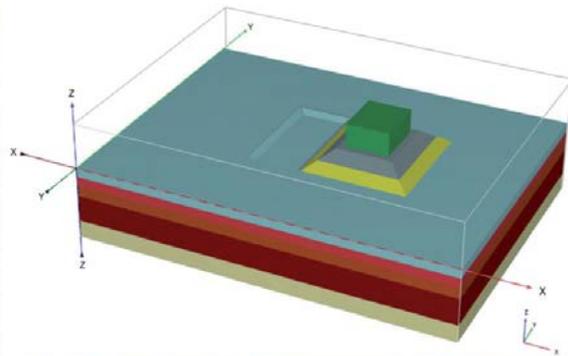


Bild 11. Großversuch zur Belastung einer Säulengruppe; systembedingte Maximallast [links] (Quelle: Josef Möbius Bau-GmbH) und Ausschnitt aus 3-D-FE-Modell [rechts] (Quelle: Kempfert + Partner Geotechnik)  
Fig. 11. Large-scale load test on a column group; systemic maximum load [left] (Source: Josef Möbius Bau-GmbH) and detail of FE model [right] (Source: Kempfert + Partner Geotechnik)

M. Raithe/V. Küster/D. Alexiew - 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen



Bild 12. Verdrängungsrohr mit Messtechnik für Erfassung akustischer Signale (Quelle: Josef Möbius Bau-GmbH)  
 Fig. 12. Displacement pipe with instrumentation for measuring acoustic signals (Source: Josef Möbius Bau-GmbH)

ren, der numerischen 3-D-Berechnung, über eine numerische 2-D-Berechnung, hin zur analytischen 2-D-Berechnung vorgenommen. Zunächst werden mittels numerischer 3-D-Berechnungen (FEM) die Ergebnisse des Großversuchs mit einer möglichst detaillierten Eingabe der Systemrandbedingungen rechnerisch nachvollzogen. Dabei werden die Einzelsäulen mit ihrer tatsächlichen Geometrie eingegeben, d. h. die Geokunststoffummantelung wird mit dem tatsächlichen, ringförmigen Querschnitt und der entsprechenden axialen und radialen Steifigkeit/Festigkeit eingegeben, sodass auch die maßgebende Fläche der Säulen/Geokunststoff bei einem Standsicherheitsversagen wirklichkeitsgetreu abgebildet wird. In einem nächsten Schritt findet die Überführung der Berechnungsergebnisse aus dem 3-D-Modell in ein 2-D-Modell statt, in welchem die Säulen analog zu den analytischen Berechnungen vereinfacht, mittels flächengleicher Ersatzwandscheiben, dargestellt werden. Mit diesem Bearbeitungsschritt kann die Umrechnung des tatsächlichen Kreisquerschnitts in Ersatzwandscheiben kalibriert werden. Schließlich erfolgt die Überführung der Berechnungsergebnisse aus den numerischen 2-D-Berechnungen in ein analytisches Berechnungsmodell. Am Ende steht die Generierung eines vereinfachten, analytischen Ansatzes mit Ersatzparametern zur Abbildung der standsicherheitserhöhenden Effekte, welcher anhand der vorangegangenen, numerischen Berechnungen abgesichert ist.

### 6.5 Akustische Verfahren zur Baugrunderkundung

In der Planungsphase werden üblicherweise zusätzliche Baugrunderkundungen zur Verifizierung der Oberfläche des tragfähigen Baugrunds durchgeführt. Während der Herstellung der Säulen wird die Übereinstimmung der spezifizierten Absetztiefe mithilfe der Geräteparameter kontrolliert. In der Regel lassen diese eine eindeutige Aussage über das Erreichen des ausreichend tragfähigen Bodens zu. In Ausnahmefällen, wie sehr eng gestuften, locker gelagerten Feinsanden, lässt sich der Absetzhorizont nicht eindeutig bestimmen. Dadurch werden Mehrlängen der Säulen und weitere Prüfungen zur Tragfähigkeit, z. B. durch zusätzliche Baugrunduntersuchungen, erforderlich.

In den Jahren 2010/2011 wurde von der Josef Möbius Bau-GmbH in Zusammenarbeit mit der TU Clausthal ein akustisches Verfahren zur Identifikation ausreichend tragfähigen Bodens zur Einsatzreife gebracht. Dabei werden von einem Beschleunigungsaufnehmer an der Spitze des Rohrs über ein geschütztes Kabel Signale an einen Sender am Rohrkopf und von dort über eine Funkverbindung in das Führerhaus gesendet. Diese werden mit einer speziellen Software gefiltert und zeigen dem Geräteführer über eine einfache optische Anzeige den Bodentyp an, in dem sich die Rohrspitze befindet (Bild 12). Das Verfahren stellt eine zuverlässige und wirtschaftliche Lösung dar.

M. Raithel/V. Küster/D. Alexiew · 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

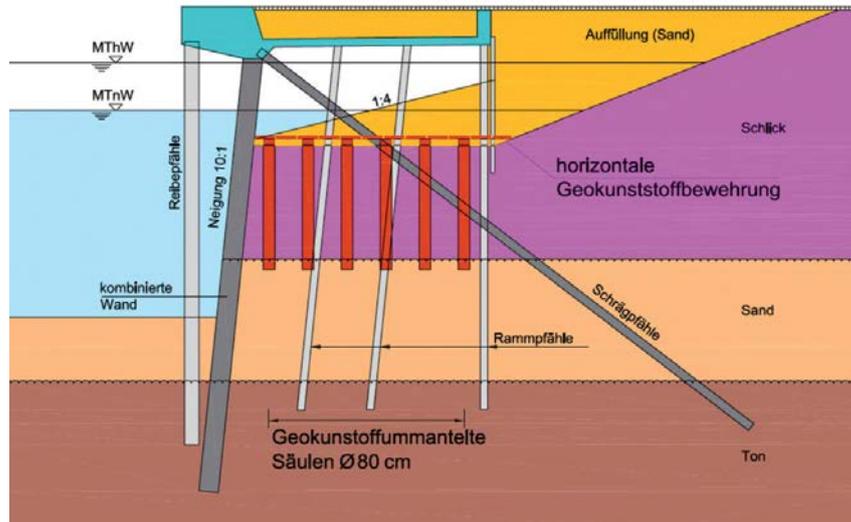


Bild 13. Geokunststoffummantelte Sandsäulen hinter einer neuen Kaimauer im Hamburger Hafen (Quelle: Josef Möbius Bau-GmbH)

Fig. 13. Geotextile-encased columns behind a new quay wall in Hamburg Harbour (Source: Josef Möbius Bau-GmbH)

## 6.6 Einbau hinter Kaimauern

Für Hafenbauprojekte sind, bei neu zu bauenden Wänden, häufig Hinterfüllungen einzubringen und dabei oft gering scherfeste und stark inkompressible Weichschichten zu überschütten. Die in solchen Fällen typischerweise hohen Erd- und Porenwasserdrücke erfordern eine kompakte Wandausbildung.

Im Anfangszustand, d. h. vor Beginn der Setzungen und vor Einsetzen der konsolidationsabhängigen Lastumlagerung, bewirken die geokunststoffummantelten Säulen durch den Sandanteil in der Weichschicht bereits eine Bodenverbesserung. Die daraus resultierende, höhere Scherfestigkeit wird in den Konstruktionsberechnungen der weiteren Bauzustände berücksichtigt.

Darüber hinaus wird ein Teil der Hinterfüllungsbelastung über die Säulen in den tragfähigen Baugrund abgeleitet, ohne einen horizontalen Erddruck auf die Wand zu erzeugen. Damit dieser Effekt ausgenutzt werden kann, ist allerdings eine genaue Steuerung der Hinterfüllung erforderlich. Der Einbau muss lagenweise mit entsprechenden Konsolidierungszeiten erfolgen. Die so erreichte Reduzierung des Erddrucks führt zu einer optimierten und wirtschaftlichen Konstruktion der Kaimauer. Bild 13 zeigt schematisch einen Kaimauerquerschnitt unter Einbeziehung des Gründungssystems mit geokunststoffummantelten Säulen zur Optimierung des Wandquerschnitts.

## 6.7 Erdbebengebiete

Bei der Untersuchung der Wirkungsweise des Gründungssystems mit geokunststoffummantelten Säulen in Erdbebengebieten muss zwischen den Mechanismen bei verschiedenen Untergrundbedingungen unterschieden werden.

Bei Böden mit höherem grobkörnigen Anteil, wie schluffigen oder eng gestuften Sanden, die bei Erdbebenbeanspruchungen aufgrund ihrer Kornabstufung und lockeren Lagerungsdichte zur Verflüssigung neigen, ist der Einsatz von Bodenverbesserungsmaßnahmen, wie Rüttelstopfsäulen (zur Verbesserung der Tragfähigkeit und Lagerungsdichte), mittlerweile Stand der Technik.

Mit steigender Intensität und Dauer des Erdbebens, höherem Grundwasserstand und insbesondere bei geringerer Lagerungsdichte nimmt das Verflüssigungsrisiko zu. Daher wird eine Verbesserung schon durch die Verdichtung der anstehenden Böden beim Einbringen des Verdrängungskörpers für den Einbau der geokunststoffummantelten Säulen im Verdrängungsverfahren erreicht.

Zusätzlich zu diesem Effekt ist maßgebend, dass im Erdbebenfall ein entscheidender Anteil der Belastung bzw. Beanspruchung von den steiferen Säulen direkt aufgenommen bzw. die Intensität der Beanspruchung auf die vorliegenden Böden zwischen den Säulen geringer wird. Auf diesem Ansatz basieren verschiedene Verfahren in der Literatur (z. B. [8]), wobei das einwirkende seismische Spannungsverhältnis im Erdbebenfall (ableitbar aus der Richterskala und den auftretenden Erdbebenbeschleunigungen) durch einen Faktor reduziert wird. Der Vorteil von geokunststoffummantelten Säulen gegenüber herkömmlichen Rüttelstopfsäulen liegt darin, dass aufgrund der Ummantelung die Spannungskonzentration in der Säule und damit die Entlastung des vorliegenden Baugrunds größer sind. In Bild 14 ist dies exemplarisch auf der Grundlage von [8], [9] und [10] dargestellt.

Ein weiterer Anwendungsbereich zur Erdbebensicherung liegt im Einsatz der geokunststoffummantelten Säulen in weichen, bindigen oder organischen Böden, die grundsätzlich nur eine geringe seitliche Stützung der Säulen aufweisen. Der Einsatz von nicht ummantelten, granu-

M. Raithel/V. Küster/D. Alexiew - 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

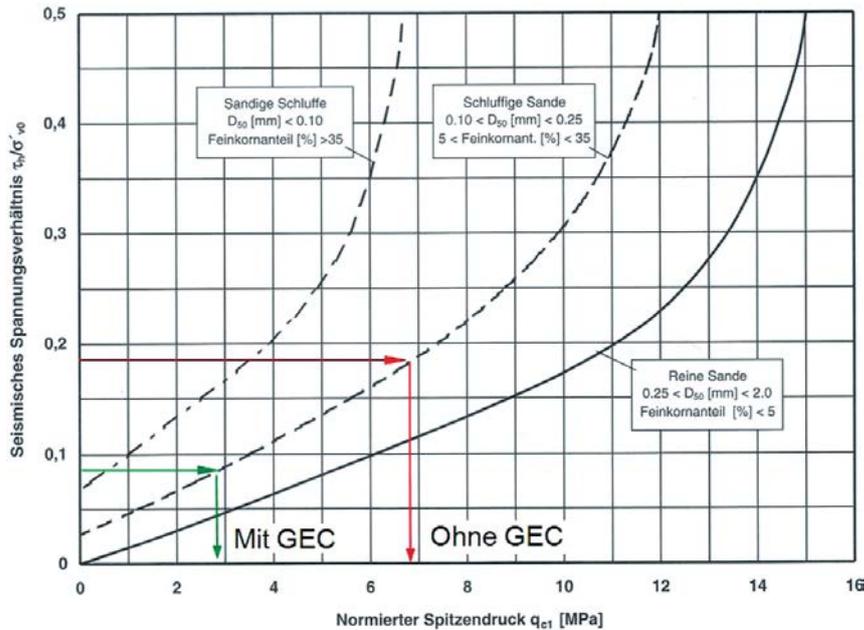


Bild 14. Beispiel für die Verringerung des seismischen Spannungsverhältnisses durch den Einsatz von geokunststoffummantelten Säulen und erforderlicher Spitzendruck bei sandigen Böden zur Vermeidung von Verflüssigungserscheinungen (nach [8] [9] [10])

Fig. 14. Example of reduction of the seismic stress ratio through the use of geotextile-encased columns and necessary end pressure for sandy soils to avoid the occurrence of liquefaction (according to [8] [9] [10])

laren Säulen bewirkt in diesen Böden im Erdbebenfall keine Erhöhung der Tragfähigkeit, da die Säulen aufgrund der unzureichenden seitlichen Stützung einen mehr oder weniger vollständigen Verlust ihrer Tragfähigkeit erfahren können. Mit geokunststoffummantelten Säulen wird durch die Stützwirkung der Ummantelung, selbst bei einem starken Abfall der seitlichen Bodenbettung während des Erdbebens, eine ausreichende Kurzzeit-Tragfähigkeit und Integrität sichergestellt, vgl. auch [11]. Zusätzlich zu den bekannten Vorteilen im Tragverhalten ermöglichen Gründungen auf geokunststoffummantelten Säulen somit auch eine höhere Erdbebensicherheit.

### 6.8 Erhöhung der dynamischen Gebrauchstauglichkeit von Bahnstrecken

Bei der Bewertung von Erdbauwerken im Hinblick auf besondere Anforderungen bei zyklischen und dynamischen Beanspruchungen aus dem Eisenbahnverkehr spielt der Begriff der dynamischen Stabilität eine wichtige Rolle. Er wird auch für die mit der Zeit zunehmende Setzung des Gleises verwendet, die durch das Bodenverhalten bei dynamischer Beanspruchung infolge von Eisenbahnverkehr auftritt, obwohl dies weniger ein Stabilitätsversagen als eher einen allmählichen Verlust der Gebrauchstauglichkeit bedeutet.

Wie aus Erfahrungswerten und [12] hervorgeht, gelten weiche bindige Böden sowie organische und organogene Böden, insbesondere Torfe, hinsichtlich der dynamischen Stabilität bzw. Gebrauchstauglichkeit als kritisch.

Die unter einer dynamischen Einwirkung im Boden auftretende Scherdehnung [13] wird als Schlüsselparameter für die Beurteilung der dynamischen Langzeitstabilität und der dynamischen Gebrauchstauglichkeit angesehen. Dabei ist zu untersuchen, ob unter dynamischen Einwirkungen aus dem Eisenbahnverkehr die volumetrische zyklische Scherdehnungsgrenze  $\gamma_{tv,U}$  erreicht wird. Bei deren Überschreitung ist schon nach kurzer Zeitdauer mit Verformungen zu rechnen, die sich nicht mehr kompensieren lassen. Die Berechnungsmodelle für diese Situation sind aufgrund der Interaktion zwischen gleisdynamischen Berechnungen und bodendynamischen FEM-Berechnungen [14] relativ komplex.

Durch den Einsatz von geokunststoffummantelten Säulen in vorhandenen Weichschichten wird eine Reduzierung der dynamischen Einwirkungen in den schwingungsempfindlichen Böden erreicht (Bild 15). Das bewirkt eine deutliche Verbesserung der dynamischen Stabilität und Gebrauchstauglichkeit und ermöglicht auch Geschwindigkeitserhöhungen.

Dank ihrer höheren Flexibilität und des angepassten Reaktionsverhaltens des Untergrunds an den Gleisoberbau und die dynamischen Lasten des rollenden Materials bieten geokunststoffummantelte Säulen durch ihr eher duktileres Verhalten gegenüber starren Systemen, wie Pfählen oder Betonsäulen, Vorteile. Des Weiteren minimieren sie Probleme an den Übergängen von verbesserten und nicht verbesserten Bereichen. Anders als nicht ummantelte Säulen aus nichtbindigem Material (z. B. Rüttelstopfsäulen) sind geokunststoffummantelte Säulen durch die

M. Raithel/V. Küster/D. Alexiew · 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

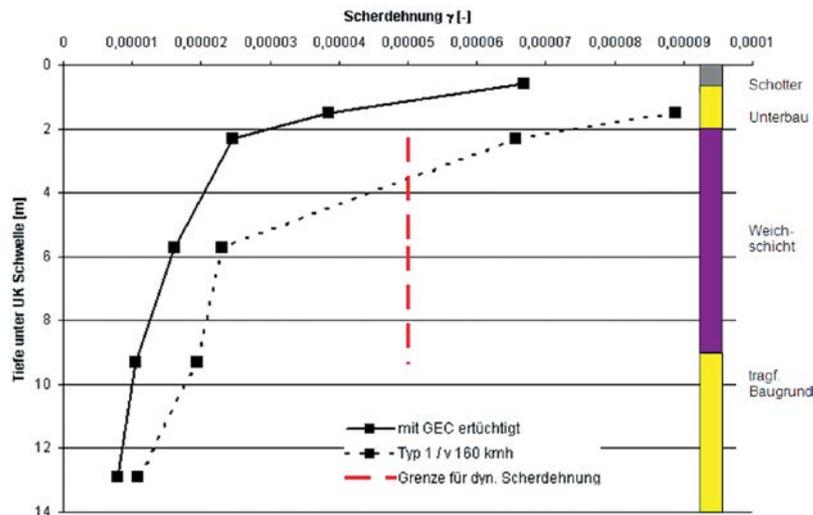


Bild 15. Beispiel für die Reduzierung der dynamischen Scherdehnungen im Unterbau/Untergrund von Eisenbahnverkehrswegen durch Einsatz von geokunststoffummantelten Säulen (Quelle: Kempfert + Partner Geotechnik)

Fig. 15. Example of reduction of dynamic shear strain in the substructure/subsoil of railway traffic routes through the use of geotextile-encased columns (Source: Kempfert + Partner Geotechnik)

Filterstabilität der geotextilen Ummantelung über ihre gesamte Lebensdauer, auch unter dynamischen Einwirkungen aus dem Eisenbahnverkehr, gegen ein Einwandern des umgebenden Bodens geschützt.

## 7 Zusammenfassung

Mit den geokunststoffummantelten Säulen steht etwa 20 Jahre nach der Markteinführung ein ausgereiftes und theoretisch sowie praktisch vollständig beherrschbares Gründungssystem für Erdbauwerke zur Verfügung. Die rechnerische Prognose des Systemverhaltens ist durch praktische Erfahrungen und zahlreiche Messergebnisse abgesichert.

Aufgrund der Eigenschaften der Ummantelung kann das System mit geokunststoffummantelten Säulen selbst in sehr weichen Böden (mit undrained Scherfestigkeiten unter  $c_v = 2 \text{ kN/m}^2$ ) eingesetzt werden. Auch das Langzeitverhalten des Gründungssystems lässt sich heute unter Berücksichtigung der üblichen Toleranzen für Kriechsetzungsberechnungen bei Gründungen auf organischen Böden zuverlässig vorhersagen.

In Deutschland erfolgt die Regelung des Gründungssystems mit geokunststoffummantelten Säulen in Abschnitt 10 der aktuellen Fassung der EBGEO (Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen [2]) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT). Darin sind Terminologie, Verfahren, Anwendungen, Herstellungsmethoden, Bemessungsempfehlungen, Materialien, Berechnungsmethoden und Prüfkriterien beschrieben. In Deutschland sind geokunststoffummantelte Säulen mittlerweile als Stand der Technik anzusehen. Der Weiterentwicklung des Systems widmen sich zurzeit mehrere For-

schungs- und Entwicklungsarbeiten auf der Basis der EBGEO, die zu einer Verbesserung der Ausführungssicherheit und der Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten für das Gründungssystem mit geokunststoffummantelten Säulen führen sollen.

## Literatur

- [1] Raithel, M.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Gesamthochschule Kassel, H. 6, Kassel, 1999.
- [2] DGGT (Hrsg.): Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO). Berlin, Ernst & Sohn, 2010.
- [3] Edil, T. B., Fox, P. J., Lan, L.-T.: Stress-Induced One-Dimensional Creep of Peat. Advances in Understanding and Modeling the Mechanical Behaviour of Peat. Balkema, Rotterdam, 1994.
- [4] Krieg, S.: Viskoses Bodenverhalten von Mudden, Seeton und Klei. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, H. 150, 2000.
- [5] Küster, V., Raithel, M., Alexiew, D.: Zum Langzeitverhalten von Gründungen mit geokunststoffummantelten Säulen. Österreichische Geotechnik-Tagung 2011. Vortragsband, S. 245–248, 2011.
- [6] Raithel, M., Kirchner, A.: Calculation techniques and dimensioning of encased columns – Design and state of the art. Proceedings of the 4th Asian Regional Conference on Geosynthetics, Shanghai, pp. 718–724, 2008.
- [7] Raithel, M., Werner, S., Küster, V., Alexiew, D.: Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens einer Gruppe geokunststoffummantelter Säulen im Großversuch. Bautechnik 88 (2011), H. 9, S. 593–691.
- [8] Priebe: Rüttelstopfverdichtung zur Vorbeugung gegen Bodenverflüssigung bei Erdbeben. Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, H. 39, S. 79–92, 1998.

M. Raithe/V. Küster/D. Alexiew - 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen

- [9] Technical Report TR-2077-SHR: Seismic Design Criteria for Soil Liquefaction. US Navy, June 1997.
- [10] *Stark, T. D., Olson, S. M.*: Liquefaction Resistance Using CPT and Field Case Histories. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 121 (1995), pp. 856–869.
- [11] *Guler, E., Alexiew, D., Abbaspour, A., Koc, M.*: Seismic Performance of Stone Columns and Geosynthetic Encased Columns. Proceedings of the International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Istanbul, pp. 1–4, 2013.
- [12] DB Netz AG: Ril 836 – Erdbauwerke planen, bauen und instand halten. 20.12.1999.
- [13] *Vucetic, M.*: Cyclic threshold shear strain soils. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 120 (1994), pp. 2208–2228.
- [14] *Kempfert, H.-G., Raithe, M., Krist, O.*: Fahrweggründungen – Nachweise und Untersuchungen zur dynamischen Stabilität (Foundations for Permanent Railways – Investigation and Verification of Dynamic Stability). ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (Railway Technical Review), Vol. 07+08/2010, S. 469–472.

**Autoren**

Dr.-Ing. Marc Raithe  
Kempfert Geotechnik GmbH  
Goerdelerstraße 4  
97084 Würzburg  
m.raithe@kup-geotechnik.de

Dipl.-Ing. Volker Küster  
IAG  
Deichstraße 6  
25335 Elmshorn  
volker.kuester@iag-kuester.de

Dr.-Ing. Dimitar Alexiew  
HUESKER Synthetic GmbH  
Fabrikstraße 13–15  
48712 Gescher  
dalexiew@huesker.de

Eingereicht zur Begutachtung: 27. Juni 2013  
Überarbeitet: 30. August 2013  
Angenommen zur Publikation: 30. August 2013