

Zum Langzeitverhalten von Gründungen mit geokunststoffummantelten Säulen

Dipl.-Ing. Volker Küster,
Josef Möbius Bau-Aktiengesellschaft; Hamburg
Dr.-Ing. Marc Raithel,
Kempfert + Partner Geotechnik, Würzburg
Dr.-Ing. Dimitter Alexiew,
Huesker Synthetic GmbH, Gescher

KURZFASSUNG

Das Gründungssystem „Geokunststoffummantelte Säulen“ (auch GEC = geotextile encased columns) für Erdbauwerke auf gering tragfähigen Böden ist in Deutschland nach seiner Markteinführung vor ca. 15 Jahren mittlerweile Stand der Technik. Nach einer kurzen Systembeschreibung wird näher über neuere Erkenntnisse aus Setzungsmessungen berichtet und die entsprechenden Konsequenzen für die Berechnung und die Setzungsprognosen beschrieben. Das System wurde ständig nach den wirtschaftlichen und fachlichen Ansprüchen der Bauherren weiterentwickelt. Deswegen wird auch über die neuesten Erfahrungen, Weiterentwicklungen, aktuellen Möglichkeiten und Forschungsansätze, sowie über den aktuellen Stand der normativen Regelung des Systems in Deutschland berichtet.

1. EINLEITUNG UND SYSTEMBESCHREIBUNG

Zur Gründung von Erdbauwerken auf gering tragfähigem Untergrund wurde das Gründungssystem „Geokunststoffummantelte Säulen“ (auch GEC = Geotextile Encased Columns) entwickelt. Das Gründungssystem besteht aus gleichmäßig angeordneten Säulen aus nichtbindigem Material mit einer Geokunststoffummantelung, die die Bauwerkslasten in den tragfähigen Untergrund ableiten (Abb. 1). Durch die Gesamtbelastung und die Spannungskonzentration über den Säulenköpfen wird in den Säulen eine nach außen gerichtete, radiale Horizontalspannung hervorgerufen. 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 dehnsteifen geotextilen Umhüllung. Dabei werden in der Ummantelung signifikante Ringzugkräfte generiert, die die Säule radial zusammenhalten, letztendlich das Gleichgewicht des Systems gewährleisten und die Anwendung auch bei sehr weichen Böden ermöglichen (Abb. 1). Es entsteht ein duktileres 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 erhöht. Weil die Säulen auch als filterstabile (durch die Umhüllung) Megadräns funktionieren, werden der Setzungsverlauf und die Konsolidierung beschleunigt. Die z.B. durch Verkehrslasten initiierten Nachsetzungen sind gering und können im Bedarfsfall weitgehend durch temporäre Überschüttungen vorweggenommen werden.

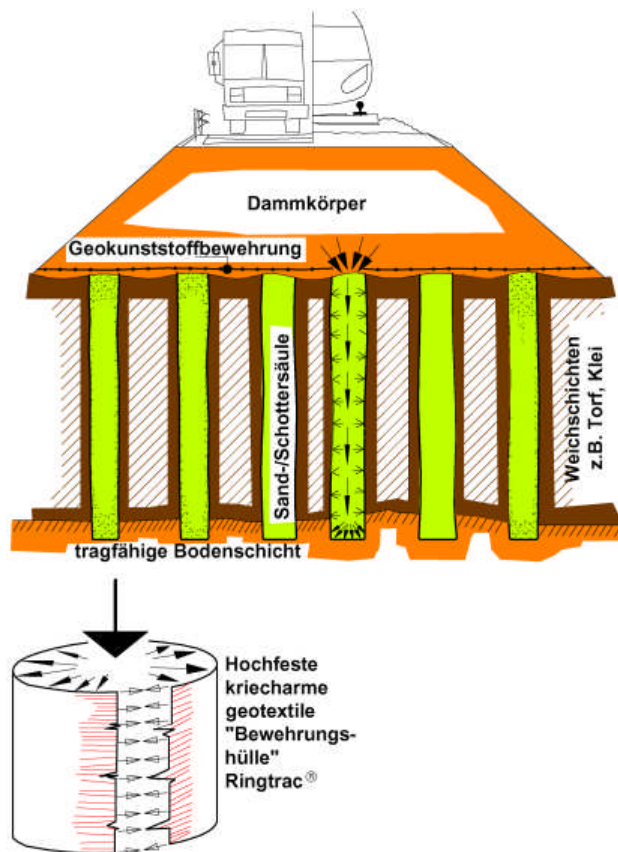


Abb. 1: Funktionsprinzip und Herstellung mit dem Verdrängungsverfahren

Die Herstellung erfolgt mit inzwischen bewährten Verfahren, die als Aushub- bzw. Verdrängungsverfahren bezeichnet werden. In der Praxis wird auf Grund der wirtschaftlichen Vorteile überwiegend das Verdrängungsverfahren angewandt.

Weitergehende Informationen zum grundsätzlichen Tragverhalten, zur Bemessung und Ausführung, sowie Erfahrungen und Empfehlungen sind z.B. in RAITHEL/KEMPFERT 2001, KEMPFERT et al. 2002, ALEXIEW et al. 2007 und EBGEO 2010 enthalten.

2. LANGZEITSETZUNGSMESSUNGEN

2.1. Allgemeines

Bei der Ermittlung von Restsetzungen sind neben den Primärsetzungen auch die Sekundär- oder Kriechsetzungen zu berücksichtigen. Diese werden meist bestimmend für das Setzungsverhalten der Gründung unter Betrieb, da die Primärsetzungen durch die Wirkung der ummantelten Säulen als große Vertikaldränagen und die damit verbundene Setzungsbeschleunigung im Regelfall schon während der Bauzeit abgeklungen sind.

In der Literatur (siehe z.B. EDIL 1994 und KRIEG 2000) ist beschrieben, dass sich Kriechverformungen in Abhängigkeit derjenigen Belastungsänderung ergeben, welche die Deformation erzeugt. Da die Weichschicht durch die Spannungskonzentration über den Säulenköpfen geringer belastet wird, ist somit durch den Einsatz der ummantelten Säulen generell von einer Kriechsetzungsreduktion im Vergleich zum unverbesserten Baugrund

auszugehen. Zudem unterliegt die Weichschicht bei Berücksichtigung von Kriechsetzungen einer stärkeren Setzung als die Säule. Demzufolge kommt es im Regelfall durch das interaktive Tragsystem zu einer Veränderung der Lastumlagerung Richtung ummantelter Säule und letztlich zu einem neuen Gleichgewichtszustand mit einem noch niedrigeren Spannungsniveau im Weichboden. Somit wird eine weitere Reduktion der Kriechsetzungen im Vergleich zur unverbesserten Situation erreicht.

Der Effekt der Kriechsetzungsreduktion konnte messtechnisch durch Langzeitmessungen bestätigt werden.

2.2. AIRBUS-Erweiterung in Hamburg-Finkenwerder „Mühlenberger Loch“

Die bereits auf der österreichischen Grundbautagung 2001 vorgestellte Baumaßnahme wurde zwischen 2001 und 2004 erfolgreich realisiert. Der Umschließungsdeich um die Erweiterungsfläche mit einer Länge von 2.500m wurde auf insgesamt ca.60.000 GEC gegründet und im September 2002 fertig gestellt. Im Rahmen der erdstatischen Nachweise wurden die Standsicherheits- und Verformungsprognosen durch baubegleitende Messungen gesichert. Hierzu wurde ein umfangreiches Messprogramm eingerichtet, welches u.a. Horizontalinklinometer, Vertikalinklinometer, Setzungspegel bzw. Messmarken sowie Porenwasserdruck- und Wasserdruckgeber umfasste. Ein Großteil der Messelemente wurde dabei so ausgebildet, dass auch nach Fertigstellung des Deiches eine weitere messtechnische Überwachung möglich war.

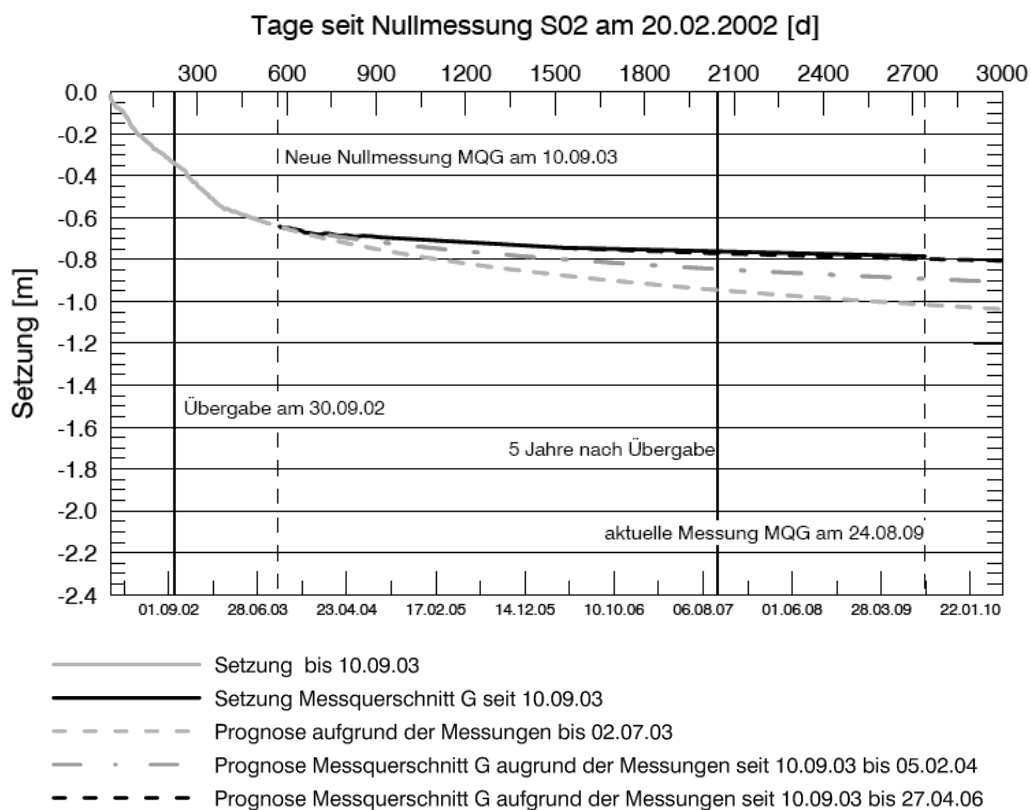


Abb. 2: Ergebnisse von Langzeitmessungen und Vergleich der Kriechsetzungsprognosen bei der Deichgründung zur Erweiterung des Werksgeländes der Flugzeugwerft in Hamburg-Finkenwerder (MQ G = Messquerschnitt G)

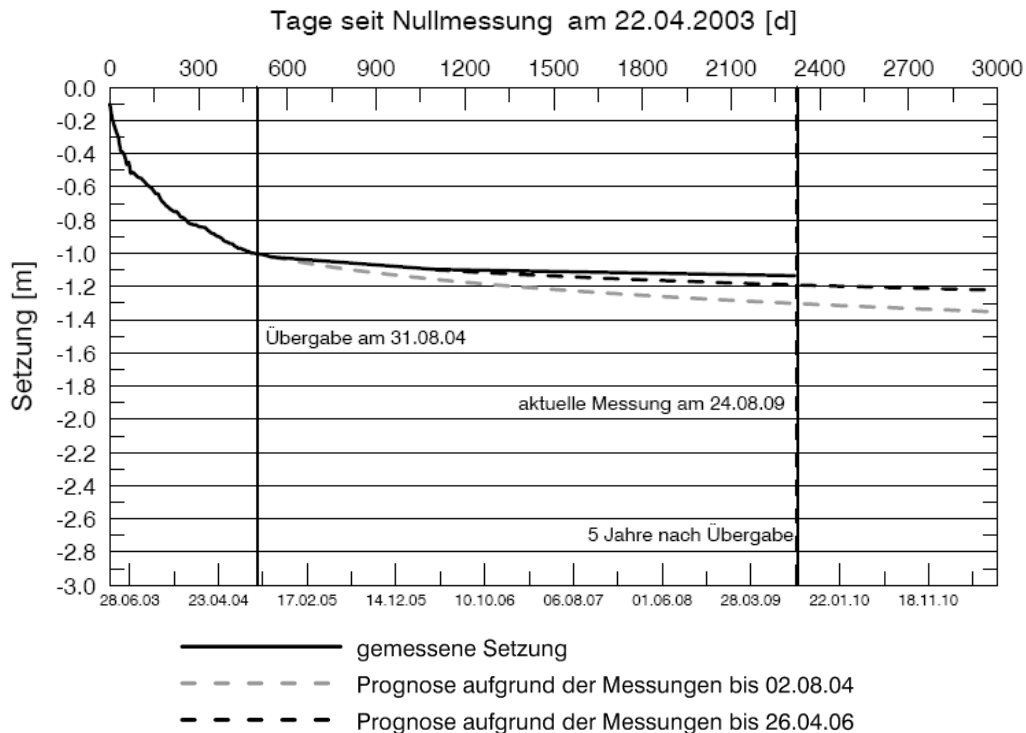


Abb. 3: Ergebnisse von Langzeitmessungen und Vergleich der Kriechsetzungsprognosen bei der Gründung des Finkenwerder Vordeiches auf GEC

Eine erste Überprüfung der Deichüberhöhung zur Kompensation der Langzeitsetzungen erfolgte nach näherungsweise vollständigem Abschluss der Primärsetzungen nach etwa einem Jahr; wobei eine rechnerische Prognose der weiteren Kriechsetzungen erfolgte. Eine Überprüfung im Jahr 2004 zeigte dann schon deutlich geringere Kriechsetzungen als zunächst prognostiziert, so dass eine neue Prognose unter Zugrundelegung von anhand der Messungen rückgerechneten Kriechbeiwerten unter Zugrundelegung von logarithmischen Regressionsfunktionen erfolgte. Im Jahr 2006 wurde dann aufgrund der weiteren Setzungsmessungen eine nochmalige Überarbeitung der Setzungsprognosen vorgenommen, welche nunmehr den bis heute über ca. 8 Jahre gemessenen Kriechsetzungsverlauf gut beschreibt. Ein analoges Verhalten wurde bei der GEC-Gründung des Finkenwerder Vordeiches in der Verlängerung des eigentlichen Umschliessungsdeiches beobachtet. Die Abbildungen 2 und 3 zeigen, dass für beide Maßnahmen eine Anpassung der Kriechsetzungsprognosen mit einer Reduzierung der Restsetzungen erforderlich wurde.

2.3. Verbreiterung Autobahndamm der BAB A115 bei Saarmund

Die Autobahn BAB A115 südlich von Potsdam wurde ab dem Sommer 1998 sechsspurig ausgebaut. Über eine Länge von etwa 300 Meter quert der Straßendamm eine Niederung mit organischen Böden. Für den Bau des bestehenden Dammes wurde das Moorsprengverfahren eingesetzt. Für die Verbreiterung des Dammes im Niederungsbereich wurden GEC mit einem Durchmesser von 80cm in einem 10 %-Raster eingebaut.

Zur Überprüfung des Verformungsverhaltens des Dammes wurden in der Bauphase Vertikal- und Horizontalinklinometer installiert. Zwei der horizontalen Inklinometer werden bis heute gemessen. Die Abbildung 4 zeigt eine typische Zeit-Setzungskurve, wonach in den

zurückliegenden 7 Jahren Kriechsetzungen in der Größenordnung von maximal 1-2cm gemessen wurden.

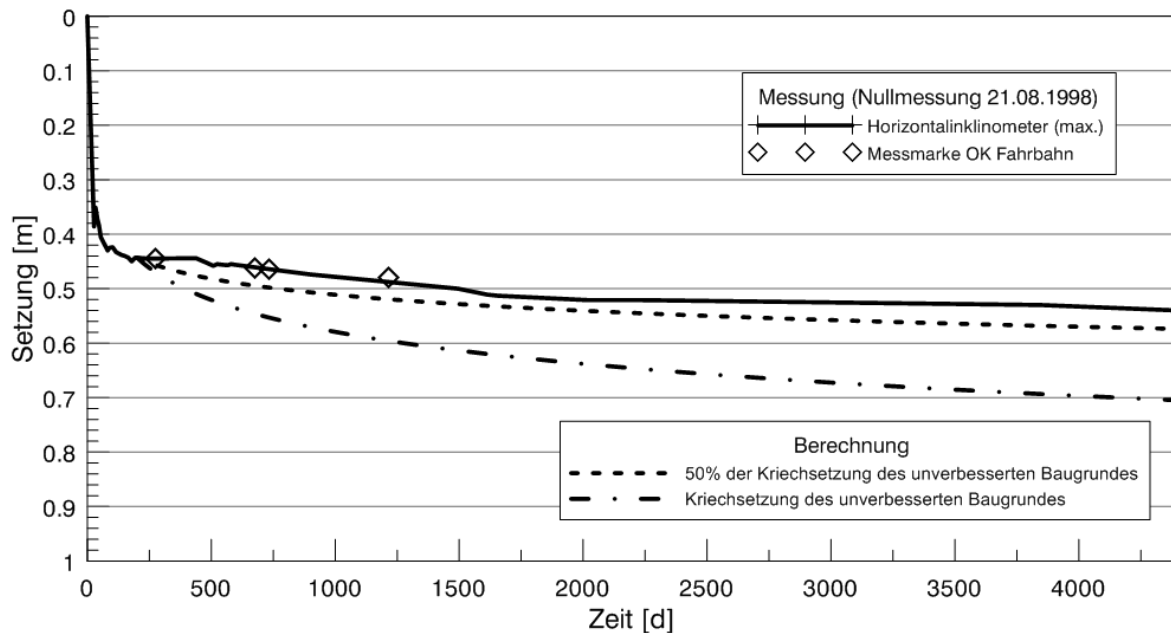


Abb. 4: Zeit-Setzungskurven eines repräsentativen Querschnittes der A115 bei Saarmund

2.4. Kriechsetzungen bei GEC-Gründung

Anhand der dargestellten und weiterer Setzungsmessungen ist abzuleiten, dass bei Ansatz der Kriechbeiwerte, welche für den unverbesserten Baugrund (d.h. ohne Säulengründung) angegeben bzw. abgeleitet wurden, deutlich zu große Kriechsetzungen im Vergleich zu dem tatsächlichen Setzungsverhalten prognostiziert werden. Im Hinblick auf eine zutreffende Prognose der Langzeitverformungen bzw. der Kriechsetzungen wären somit entsprechende Laborversuche vorauszusetzen (Kriechversuche), die die Kriecherscheinungen von Weichschichten unter verschiedenen Belastungsrandbedingungen und -stufen ableiten lassen und so den kriechsetzungsreduzierenden Effekt der GEC-Säulengründung erfassen. Aufgrund des Fehlens von geeigneten Versuchsergebnissen wird aber häufig näherungsweise ein Reduktionsfaktor auf die für den unverbesserten Baugrund ermittelten Kriechsetzungen verwendet, welcher auf Grundlage von Messergebnissen abgeleitet wurde. Dieser Reduktionsfaktor auf die Kriechsetzungen des unverbesserten Baugrundes konnte durch den Vergleich von rechnerischen Prognosen und Messungen auf einen Wert von 0,25 bis 0,50 je nach Projekttrandbedingung festgelegt werden, d.h. durch die Gründung auf ummantelten Säulen werden ca. 50 bis 75% der Kriechsetzungen vermieden.

3. WEITERENTWICKLUNGEN DES SYSTEMS

3.1. Dichtung gegen aufsteigendes Grundwasser

Für den Fall eines wasserführenden Sandes/Kieses als Absetzhorizont der GEC-Gründung entsteht durch die Säulen eine hydraulische Verbindung zwischen der Geländeoberfläche und dem Aquifer. Neben einer etwaigen Versickerung von grundwassergefährdenden

Stoffen im Untergrund kann es bei artesischem Druck des Grundwassers zu einer dauerhaften, aufwärts gerichteten Grundwasserströmung und einem druckbegrenzenden Ausfließen an der Geländeoberfläche kommen. Zur Minimierung der Wasserdurchlässigkeit der GEC kann im Säulenkörper ein Sand-Bentonit-Gemisch eingebaut werden; wobei die dehnsteife Geotextilmantelung den Vorgang begünstigt bzw. überhaupt erst ermöglicht. Dieses Verfahren wurde durch die Fa. J. Möbius Bau-AG durch umfangreiche Versuchsreihen in-situ getestet und bei mehreren Straßenbaumaßnahmen in Norddeutschland bereits erfolgreich zum Einsatz gebracht.

Die Abbildung 5 zeigt den Auszug einer Ausführungsplanung einer GEC-Gründung eines Straßendamms. Im konkreten Fall wurde die 1 m hohe Dichtungsschicht am Fuß der Säulen angeordnet. Die Höhenlage der Dichtung kann an die konkrete Baugrundschiichtung angepasst werden (z.B. Kopfbereich bei wasserführenden Sandzwischenlagen).

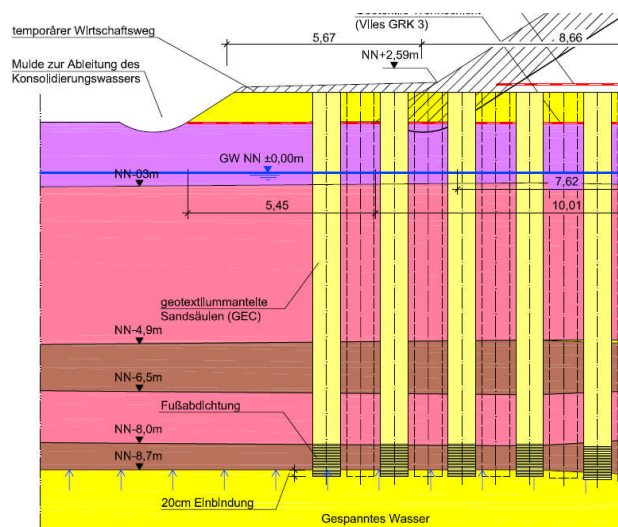


Abb. 5: GEC mit Fußdichtung - Auszug Ausführungsplan Straßenbaumaßnahme

3.2. Die Geokunststoffummantelung

Im Zuge der Weiterentwicklung und Optimierung des GEC-Systems wurde auch die Geokunststoffummantelung (Ringtrac^R) weiterentwickelt und optimiert. Sie ist ein wichtiges bewehrendes Tragelement und beeinflusst signifikant das Trag- und Verformungsverhalten der Säule und des Gesamtsystems. Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an das mechanische Verhalten, Integrität, Dauerbeständigkeit, Robustheit etc. Spezifisch ist, dass nicht nur die Zugfestigkeit, sondern auch die Dehnsteifigkeit (Zugmodul) in Ringrichtung eine entscheidende Rolle spielt (ALEXIEW et al. 2007). Erhebliche Freiräume für die Optimierung des Systems können nur durch eine breite Palette von verfügbaren Ringtrac^R-Durchmessern, Zugfestigkeiten und Ringzugmodule geschaffen werden, wobei auch die Zeit (Dauerbelastung, Kriechen, Kriechdehnung) eine Rolle spielt. Deswegen stehen inzwischen drei nahtlose Ringtrac^R-Familien aus unterschiedlichen Polymeren zur Verfügung mit Durchmessern von 50 cm bis 100 cm, Kurzzeitfestigkeiten im Ring von 400 kN/m und mehr, und Ringdehnsteifigkeiten (Ringzugmodule) von 1000 kN/m bis zu 8000 kN/m. Durch die Wahl des Polymers ist auch eine hohe Beständigkeit z.B. auch in alkalischen Milieus gegeben. Somit ist ein starkes praktisch frei wählbares Werkzeug zur Systemoptimierung vorhanden.

3.3. Länge der Säulen

Für eine Baumaßnahme in Polen ergab sich die Erfordernis der Herstellung von geokunststoffummantelten Säulen mit einer maximalen Länge von knapp 30m Länge. Durch gerätetechnische Weiterentwicklungen war es möglich, diese bisher noch nicht ausgeführten Dimensionen zu realisieren. Die derzeit im Bau befindliche Autobahn A2 zwischen der deutsch-polnischen Grenze und Poznan quert eine ca. 300m lange Rinne mit organischen Sedimenten. Der Torf und die Gytja mit undränierten Scherfestigkeiten von teilweise deutlich unter 10kPa stehen dort in einer Mächtigkeit von maximal 28m unter Gelände an.

Durch den Einsatz eines leistungsstarken Gürtelrüttlers konnten die längsten Säulen mit einem offenen Rohr und verlörener Fußplatte im Verdrängungsverfahren und einem Durchmesser von 800mm hergestellt werden. Für die längsten Säulen wurde unterstützend zur Reduzierung der Reibungskräfte zwischen Säule und Verdrängungsrohr eine Rohrinnschmierung mit einer sehr mageren Bentonitsuspension eingesetzt.



Abb. 6: Trägergerät LRB 255 mit 30 m langem Verdrängungsrohr auf einer Baustelle in Polen

3.4. Probelastung einer Säulengruppe

Zum weiteren Verständnis des Systemverhaltens wird derzeit eine Probelastung einer Gruppe geokunststoffummantelter Säulen vorbereitet. Die Belastung der aus 10 Säulen bestehenden Gruppe soll bis zum Erreichen eines Grenzzustandes gesteigert werden. Mit den bekannten Rechenverfahren wurden rechnerisch Größen der Einwirkung für das Erreichen der Grenzzustände „Grundbruch“ und „Versagen der geotextilen Ummantelung“ ermittelt. Der Versuch wird nach den Vorgaben der Berechnung geführt. Das Systemverhalten wird während des Versuches messtechnisch umfangreich überwacht und

anschließend mit den Ergebnissen der Berechnungen verglichen. Mit dieser Vorgehensweise sollen Tragreserven des Systems erkannt und quantifiziert werden.

3.5. Akustische Verfahren zur Baugrunderkundung

Die erforderlichen Absetztiefen der Säulen werden in der Planungsphase durch zusätzliche Baugrunderkundungen ermittelt. Während der Installation der Säulen erfolgt eine Kontrolle der vorgegebenen Absetztiefe anhand der Geräteparameter. Diese lassen i.d.R. eine eindeutige Interpretation des Erreichens des ausreichend tragfähigen Bodens zu. In Ausnahmefällen, z.B. bei sehr eng gestuften, locker gelagerten Feinsanden, kann der Absetzhorizont nicht eindeutig erkannt werden. Das führt zu Mehrlängen der Säulen und zu erhöhtem Nachweisaufwand z.B. durch zusätzliche Baugrundaufschlüsse.

Als ein zusätzliches Verfahren zur Identifikation des ausreichend tragfähigen Baugrundes wird derzeit von der Fa. J. Möbius in Zusammenarbeit mit der TU Clausthal der Einsatz eines akustischen Verfahrens zur Baugrunderkundung entwickelt. Hierbei wird an der Spitze des Rohres ein Beschleunigungsaufnehmer installiert. Über ein geschütztes Kabel werden die Signale an einen Sender am Rohrkopf und von dort über eine Funkverbindung in das Führerhaus gesendet. Hier wird durch eine spezielle Software eine Filterung vorgenommen, so dass der Geräteführer über eine einfache optische Anzeige erkennen kann, in welchem Bodentyp sich die Rohrspitze aktuell befindet.



Abb. 7: Ausrüstung eines Verdrängungsrohres mit Messtechnik für Erfassung akustischer Signale

4. NEUE EINSATZMÖGLICHKEITEN

4.1. Einsatz hinter Uferwänden

Im Hafenbau stellt sich häufig die Aufgabe der Hinterfüllung einer neu zu erstellenden Wand. Hierbei werden dann oftmals gering scherfeste und stark kompressible Weichschichten überschüttet. Die resultierenden hohen Erd- und Porenwasserdrücke können bei diesen Randbedingungen zu einer sehr kompakten Wandausbildung führen.

Für den Anfangszustand ohne Geotextilmantelung wirken die GEC durch den Sandanteil in der Weichschicht als reine Bodenverbesserung. Dieser Effekt wird für die weiteren Bauzustände ebenfalls berücksichtigt. Zusätzlich wird ein Teil der Hinterfüllungsbelastung über die GEC in den tragfähigen Baugrund abgetragen, ohne einen horizontalen Erddruck auf die Wand zu erzeugen. Zur Ausnutzung dieses Effektes ist allerdings eine optimierte Steuerung der Hinterfüllung erforderlich. Der Einbau der Hinterfüllung hat lagenweise mit entsprechenden Konsolidierungszeiten zu erfolgen. Die so zu erreichende Reduzierung des Erddruckes führt zwingend zu einer Optimierung der Uferwand und letztlich zu einer wirtschaftlichen Lösung. Die Abbildung 8 zeigt den Ausführungsquerschnitt einer neuen Kaimauer im Hamburger Hafen (Europakai).

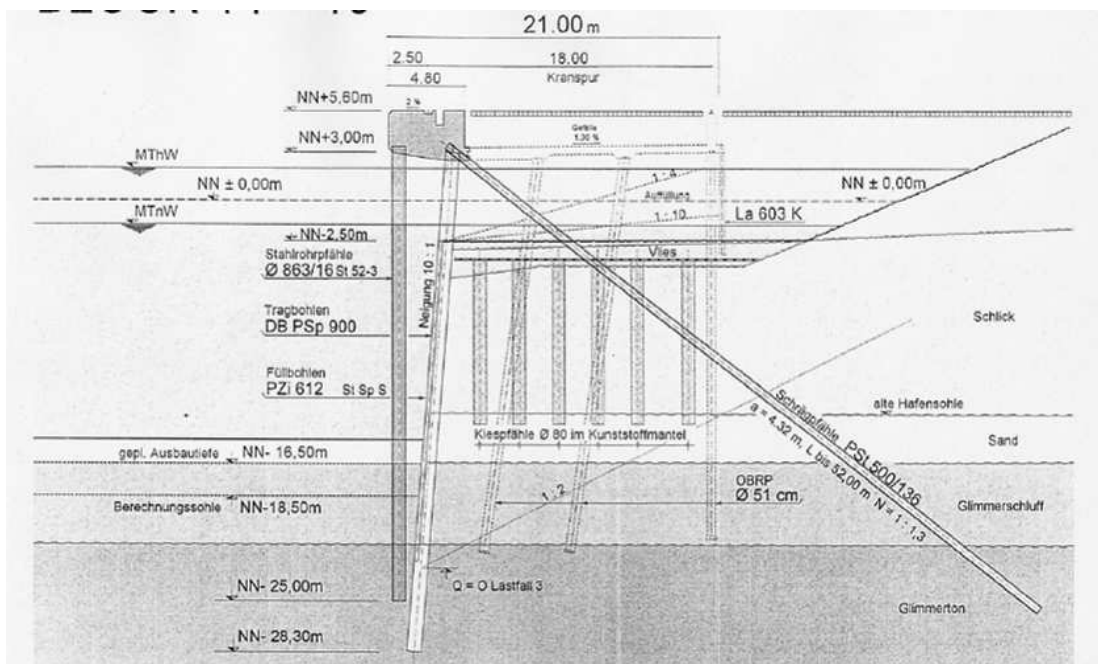


Abb. 8: GEC hinter einer neuen Kaimauer im Hamburger Hafen

4.2. Erdbebengebiete

Hinsichtlich der Wirkungsweise von GEC-Säulen in Erdbebengebieten ist zwischen dem Einsatz in verschiedenen Untergrundrandbedingungen zu unterscheiden.

Bei Böden mit höherem grobkörnigen Anteil, wie schluffigen Sanden, welche bei Erdbebenbeanspruchungen aufgrund ihrer Kornzusammensetzung und lockeren Lagerungsdichte zur Verflüssigung neigen, ist der Einsatz von Baugrundverbesserungsmaßnahmen wie Schottersäulen (zur Verbesserung der Lagerungsdichte und der Tragfähigkeit) Stand der Technik. Beim Einsatz von ummantelten

Säulen gelten grundsätzlich die bekannten Wirkungsweisen wie beim Einsatz von Schottersäulen, welche durch die Ummantelung noch verstärkt werden können:

- a) Erhöhung der Geländebruch- bzw. Böschungsbruchsicherheit bei Erdbeben
- b) Verringerung der Porenwasserüberdrücke aufgrund der Drainage des Baugrundes zur Vermeidung von Verflüssigungseffekten beim Vorliegen von verflüssigungsgefährdeten Böden (z.B. locker gelagerte Feinsande) in Verbindung mit
- c) Reduktion der seismischen Scherspannungen im Baugrund durch die Säulen und Verbesserung der Dämpfungseigenschaften des Baugrundes ergeben.

Unabhängig von diesen Wirkungsweisen ist zu berücksichtigen, dass die Verflüssigungsgefahr mit steigender Intensität und Dauer des Erdbebens, mit der Höhe des Grundwasserstandes und bei geringerer Lagerungsdichte anwächst. Daher ist eine Verbesserung alleine schon darin zu sehen, dass durch das Einbringen der Verrohrung eine Verdichtung der anstehenden Böden erfolgt, wobei dieser Effekt bei Anwendung des Verdrängungsverfahrens stärker zu bewerten ist im Vergleich zur Anwendung des Aushubverfahrens. Nach dem Einbau einer Säulengründung ergibt sich somit ein Zusammenwirken der verbessernden Faktoren da die Herstellung der Säulen auch zur Verdichtung des umgebenden Bodens führt.

Ein weiterer Anwendungsbereich zur Erdbebensicherung liegt beim Einsatz der GEC-Säulen in weichen, bindigen oder organischen Böden, die grundsätzlich nur eine geringe seitliche Stützung der Säulen aufweisen.

Im Erdbebenfall ist aufgrund der seismischen Beanspruchungen in diesen Böden mit einem weitgehenden, nahezu vollständigen Strukturversagen zu rechnen, was ohne zusätzliche Gründungsmaßnahmen unweigerlich ein Versagen von aufgehenden Bauwerken zur Folge hat. Durch einen Einsatz von Schottersäulen oder anderer nicht ummantelter Systeme wird keine zusätzliche Tragfähigkeitserhöhung bedingt, da diese aufgrund der dann unzureichenden seitlichen Stützung im Erdbebenfall ebenfalls näherungsweise einen vollständigen Verlust Ihrer Tragfähigkeit erleiden. Pfähle wären dagegen zwar in sich tragfähig, sind aber dann hochgradig knickgefährdet.

Durch die GEC-Säulen wird auch bei einem möglichen Abfall der seitlichen Stützung der Säulen während des Erdbebens kurzzeitig eine ausreichende Tragfähigkeit durch die Stützwirkung der Ummantelung sichergestellt, um so neben den bekannten Vorteilen im statischen Tragverhalten auch eine Optimierung im Hinblick auf die Erdbebensicherheit zu erreichen.

4.3. Erhöhung der dynamischen Gebrauchstauglichkeit von Bahnstrecken

Für die Bewertung von Erdbauwerken unter besonderer Berücksichtigung der zyklisch/dynamischen Einwirkungen aus dem Eisenbahnverkehr hat sich in der Vergangenheit der Begriff „dynamische Stabilität“ eingebürgert. Hierunter wurde aber auch eine mit der Zeit zunehmende Setzung des Gleises verstanden, die durch das Bodenverhalten bei dynamischer Beanspruchung infolge Eisenbahnverkehr auftrat, obwohl dies nicht mit einem Stabilitätsversagen sondern eher mit einem allmählichen Verlust der Gebrauchstauglichkeit gleichzusetzen ist.

Weiche bindige Böden sowie organische und organogene Böden, insbesondere Torfe sind hinsichtlich der dynamischen Stabilität bzw. der dynamischen Gebrauchstauglichkeit anhand der allgemeinen Erfahrungswerte, Literatur und der Ril 836 als kritisch anzusehen. Insbesondere im Hinblick auf die häufig vorkommende Problemstellung von Strecken mit erhöhten Instandhaltungsaufwendungen infolge eines nicht regelkonformen Unterbaus bzw. mit schwingungsempfindlichen Böden im Untergrund sowie ggf. einer geplanten Erhöhung der Streckengeschwindigkeit und/oder Streckenbelastung ist im Regelfall die Beurteilung der dynamischen Stabilität des Untergrundes als maßgebend für die Wahl von geeigneten Ertüchtigungsverfahren zu bewerten.

Als maßgebendes Kriterium für die Beurteilung der dynamischen Langzeitstabilität bzw. der dynamischen Gebrauchstauglichkeit wird die unter einer dynamischen Einwirkung im Boden auftretende Scherdehnung γ nach VUCETIC bewertet. Es ist hierbei zu untersuchen, ob unter dynamischen Einwirkungen aus dem Eisenbahnverkehr die volumetrische zyklische Scherdehnungsgrenze $\gamma_{v,U}$ erreicht wird, bei deren Überschreitung mit großen Verformungen schon nach kurzer Zeitdauer zu rechnen ist, die z.B. nicht mehr durch Stopfen zu kompensieren sind. Die entsprechenden Berechnungen stellen sich hierbei als relativ komplex dar und stellen eine Interaktion zwischen gleisdynamischen Berechnungen (vgl. KNOTHE 2001) und bodendynamischen FEM-Berechnung dar, vgl. auch KEMPFERT et al. 2010.

Durch den Einsatz der GEC-Säulen in vorhandenen Weichschichten wird eine Verringerung der dynamischen Einwirkungen in diesen schwingungsempfindlichen Böden erreicht, so dass die dynamische Stabilität und Gebrauchstauglichkeit entscheidend erhöht wird und/oder Geschwindigkeitserhöhungen ermöglicht werden.

Ein besonderer Vorteil der GEC-Säulen besteht dabei auch darin, dass durch den Geokunststoff und dessen linear-elastisches Materialverhalten über die gesamte Lebensdauer die Integrität der Säule und ein selbst regulierendes, flexibles Tragverhalten der Säulen gewährleistet werden.

Gegenüber starren Systemen wie Pfählen oder Betonsäulen lassen sich Vorteile für das Fahrwegverhalten infolge der höheren Flexibilität und des angepassten Reaktionsverhaltens des Untergrundes im Hinblick auf die Fahrdynamik und die Interaktion mit dem Oberbau folgern. Des Weiteren werden Übergangsprobleme beim Übergang von den ertüchtigten auf nicht ertüchtigte Bereiche minimiert.

Im Gegensatz zu nicht ummantelte granulare Säulen, wie z.B. Rüttelstopfsäulen ist darauf hinzuweisen, dass über die gesamte Nutzungsdauer durch die Sicherstellung der Filterstabilität mit der Ummantelung ein Einlagern/Einwandern des umgebenden Bodens auch unter Berücksichtigung der dynamischen Einwirkungen aus dem Zugverkehr vermieden wird. Dadurch ist beim GEC-Säuleneinsatz eine Sicherstellung der dynamischen Stabilität und Gebrauchstauglichkeit während der gesamten Nutzungsdauer bzw. Lebensdauer (d.h. 50 bis 100 Jahre) sichergestellt.

5. NORMATIVE REGELUNG DES SYSTEMS

Das Gründungssystem mit geokunststoffummantelten Säulen ist im Abschnitt 10 der aktuellen Ausgabe der Empfehlungen zur Bewehrung mit Geokunststoffen (EBGEO) der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik DGGT geregelt. Hier werden Begriffe, Wirkungsweise, Anwendungsbereiche, Herstellungsverfahren, Entwurfsempfehlungen, Baustoffe,

Berechnungen und Prüfkriterien beschrieben. In Deutschland stellen die geokunststoffummantelten Säulen damit endgültig den aktuellen Stand der Technik dar.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Mit den geokunststoffummantelten Säulen steht etwa 15 Jahre nach der Markteinführung ein ausgereiftes und theoretisch sowie praktisch vollständig beherrschbares Gründungssystem für Erdbauwerke zur Verfügung. Insbesondere das Langzeitverhalten des Gründungssystems kann zum heutigen Zeitpunkt gegenüber den üblichen Genauigkeiten für Kriechsetzungsberechnungen für Gründungen auf organischen Böden verlässlich prognostiziert werden.

Die Vorteile des GEC-Systems, insbesondere bei extrem gering scherfesten Weichschichten, können nicht nur rechnerisch dargestellt werden sondern sind durch entsprechende Messergebnisse belegt.

Die Weiterentwicklung des Systems erfolgt heute auf der Basis der in Deutschland gültigen normativen Regelungen der EBGEO. Durch mehrere Forschungs- und Entwicklungsverfahren werden sowohl die Ausführungssicherheit erhöht als auch die Einsatzgrenzen für dieses Tragsystem ständig erweitert.

LITERATUR

- Alexiew, D.; Brokemper, D.; Sobolewski, J. (2007): *Geokunststoffummantelte Säulen: Einflussfaktoren, Nomogramme für den Vorentwurf und Vorstellung eines aktuellen Bauwerks*. 7. Österreichische Geotechniktagung. Wien.
- DB Netz AG: *Ril 836 – Erdbauwerke planen, bauen und instand halten*. Fassung vom 20.12.1999.
- EBGEO (2010): *Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen*. DGGT - Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Essen, Ernst & Sohn, Berlin.
- Edil, T. B., Fox, P. J., Lan, L.-T. (1994): *Stress-Induced One-Dimensional Creep of Peat*. Advances in Understanding and Modelling the Mechanical Behaviour of Peat, Balkema, Rotterdam.
- Kempfert, H.-G.; Raithel, M.; Krist, O. (2010): *Fahrweggründungen – Nachweise und Untersuchungen zur dynamischen Stabilität*. ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 07+08/2010
- Kempfert, H.G.; Raithel, M.; Möbius, W.; Wallis, P. (2002): *Polderumschließung durch einen auf geokunststoffummantelten Sandsäulen gegründeten Deich*, 27. Baugrundtagung, Mainz.
- Knothe, K. (2001): *Gleisdynamik*. Ernst & Sohn Verlag; Auflage: 1. Aufl.
- Krieg, S. (2000): *Viskoses Bodenverhalten von Mudden, Seeton und Klei*. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe, Heft 150.
- Raithel, M.; Kempfert, H.-G. (2001): *Erfahrungen mit dem Gründungsverfahren „geokunststoffummantelte Sandsäulen“*. 3. Österreichische Geotechniktagung. Wien.
- Vucetic, M. (1994): Cyclic threshold shear strain soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120, 12.