

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Gescher, Dimiter Alexiew**

## **Geokunststoffummantelte Säulen – warum, wo, wann und wie?**

BAWMitteilungen

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104395>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Gescher, Dimiter Alexiew (2017): Geokunststoffummantelte Säulen – warum, wo, wann und wie?. In: BAWMitteilungen 101. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 99-109.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



# Geokunststoffummantelte Säulen – warum, wo, wann und wie?

## Geotextile-encased Columns – Why, Where, When and How?

Dr.-Ing. Dimiter Alexiew, Gescher<sup>1</sup>

Das System „geokunststoffummantelte Säulen“ (auch GEC: geotextile-encased columns) für Dämme und Deiche auf weichem Untergrund startete vor ca. zwanzig Jahren und gilt inzwischen als Stand der Technik in Deutschland und zunehmend weltweit. Die GECs bestehen aus verdichtetem nichtbindigem Füllboden, ähnlich den „konventionellen“ Sand- oder Schottersäulen, mit einem entscheidenden Unterschied: sie sind in einem geotextilen Zylinder (Ummantelung) „gepackt“; er besteht meistens aus nahtlosem hochfesten Geotextil und steuert entscheidend das Verhalten der Säule.

**Warum:** Warum begann man mit der Entwicklung vor zwanzig Jahren? Was waren die Motivation und die Idee? Was waren auch die Gründe, während der Jahre Berechnungsverfahren, Materialien etc. weiterzuentwickeln?

**Wo und wann:** Was sind die typischen geotechnischen und logistischen Umstände für eine optimale Anwendung? Wann und wo macht das Sinn? Was sind die Einschränkungen, falls es denn welche gibt?

**Was:** Was sind die geotechnischen Mechanismen? Welche sind die passenden Materialien (Füllboden, Ummantelung)? Welche Berechnungsverfahren erscheinen plausibel und sind zu empfehlen? Was wissen wir heute und was sind die Erfahrungen? Gibt es weiteren Forschungsbedarf?

**Wie:** Wie soll man die GECs optimal und effizient einbauen? Wie gestaltet man die Qualitäts- und Zeitüberwachung? Wie löst man Probleme, falls?

*Geotextile-encased column systems, or GECs for short, for embankments and dykes on soft ground were first used around 20 years ago and are now considered as*

*state-of-the-art technology, both in Germany and increasingly worldwide. GECs comprise compacted non-cohesive fill material, similar to “conventional” sand or gravel columns, but with one significant difference: they are encased in a geotextile cylinder made mostly of a seamless, high-strength geotextile which has a decisive part to play in the behaviour of such columns.*

**Why?** *Why did development start 20 years ago? What were the motivation and the concept? What were the reasons for continuing to develop the calculation methods, materials and so on over the years?*

**Where and when?** *What are the typical geotechnical and logistical conditions for the best possible application? When and where does it make sense to use GECs? What are their limitations, if any?*

**What?** *What are the geotechnical mechanisms involved? Which materials are suitable (for the fill and casing)? Which calculation methods can be applied and recommended? What do we know today and what is our experience with GECs? Is there a need for further research?*

**How?** *What is the best and most efficient way of installing GECs? How are quality and durability to be monitored? How are problems, if any, resolved?*

## 1 Einführung Introduction

Wenn man sich mit der Gründung von Dämmen und Deichen auf weichem Untergrund befasst, so gibt es zwei Gruppen von Lösungen:

<sup>1</sup> Zurzeit der Verfassung war der Autor für HUESKER Synthetic GmbH tätig.

- A. Ungestützte „direkt gegründete“ Dämme (es gibt keinerlei stützende oder verfestigende Elemente im Gründungsboden, Bild 1); es gibt vier Optionen:
- Extrem langsamer Dammaufbau mit Abwarten der Konsolidierung nach jeder Phase;
  - kompletter oder partieller Bodenaustausch;
  - Einbau einer hochfesten geotextilen Basisbewehrung, die die globale und lokale Standsicherheit gewährleistet und einen schnelleren Aufbau erlaubt;
  - Kombination der Option c) mit vertikalen Streifendrängern, die die Konsolidierung und somit den Aufbau weiter beschleunigen.

Heutzutage kommen aus vielen Gründen nur die Optionen c) und d) infrage. Abgesehen von allen Vor- und Nachteilen: das gemeinsame Merkmal ist, dass man die Standsicherheit in den Griff bekommt (Ultimate Limit State – ULS), aber nicht die Kurz- und Langzeitsetzungen (Serviceability Limit State – SLS).

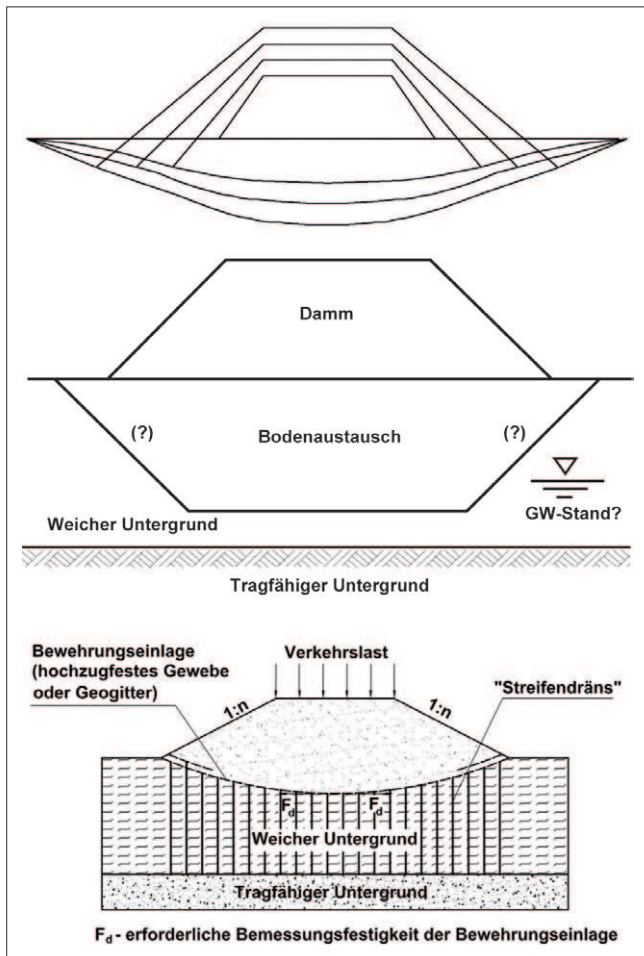


Bild 1: Ungestützte Dämme: Optionen a), b) und d) von oben nach unten  
 Figure 1: Unsupported embankments: Options a), b) and d), from top to bottom

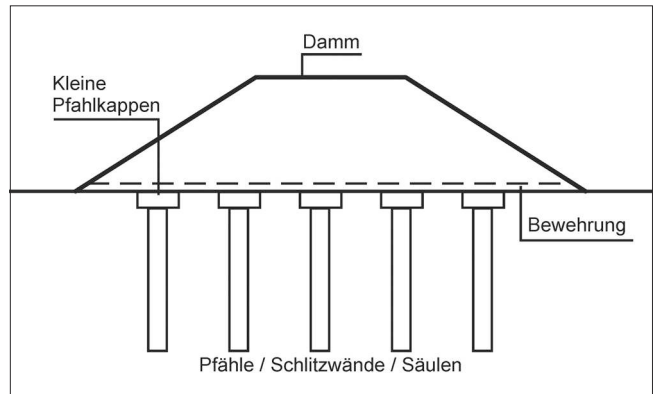


Bild 2: Gestützte Dämme auf weichem Untergrund auf „steifen“ (wie Pfähle) oder „weicheren“ Elementen („Säulen“)  
 Figure 2: Supported embankments on soft ground, placed on “rigid” elements (such as piles) or “more flexible” elements (columns)

- B. Gestützte Dämme (Bild 2): Der generelle gemeinsame Gedanke ist die Weichbodenschicht zu überbrücken; dazu dienen unterschiedliche vertikale Elemente: Pfähle, Schlitzwände etc. oder „weiche“ Lösungen wie unterschiedliche Säulen (verdichtet, verfestigt, mixed-in-place etc.). Dabei erscheint die Grenze zwischen „pfahlähnlichen Elementen“ wie Säulen und „Bodenverbesserung“ fließend und auch vom Land, Traditionen, Normung etc. abhängig.

Vor zwanzig Jahren kam eine weitere spezifische Möglichkeit dazu: die geokunststoffummantelten Säulen (GECs); sie werden hier detaillierter behandelt.

## 2 Warum GEC? Why use GECs?

Die Entwicklung des GEC-Systems begann in den frühen 90er-Jahren. Sie wurde initiiert von der Bauunternehmung Möbius aus Hamburg und weiterentwickelt in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Kempfert & Partner und der Firma Huesker Synthetic. Die Idee war, ein System mit den folgenden wichtigeren spezifischen Merkmalen zu erschaffen:

- A. Im Vergleich zu Pfählen:
- geringere Kosten
  - duktil (schadenlos nachgiebig, insbesondere seitlich)
  - wasserdurchlässig

B. Im Vergleich zu „konventionellen“ nichtbindigen Säulen, z. B. Schottersäulen (und zwar sowohl kurz-, wie auch langfristig):

- mechanische Stabilität auch in extrem weichen Böden
- hydraulische Stabilität
- Vermeidung von Weichbodeneindringung
- Nutzung auch von feinkörnigeren nichtbindigen Böden als Säulenmaterial (z. B. Sand)

Im Vergleich zu A und B: reduzierter Energiebedarf für den Einbau (wir reden heute von CO-Emissionen, „lower carbon footprint“).

Man soll sich vor Augen führen, dass um diese Zeit die Anwendung von ungebundenen Säulen bei einer undränierten unkonsolidierten Scherfestigkeit des Untergrunds von  $c_u < 15 \text{ kN/m}^2$  in Deutschland nicht zulässig war (wegen der Gefahr einer unkontrollierten seitlichen Ausbreitung während der Ausführung oder später unter Belastung); heute ist diese Begrenzung noch strikter mit  $c_u = 25 \text{ kN/m}^2$ .

Die Benutzung von Sand als Säulenmaterial war von besonderem Interesse, denn er ist eher vorhanden und billiger in typischen „Weichbodenregionen“, z. B. in Küstennähe.

Es wurde ziemlich schnell klar, dass eine geeignete geotextile Ummantelung für das Erreichen der obengenannten Ziele sehr vorteilhaft sein kann. Das Konzept ist aus Bild 3 ersichtlich.

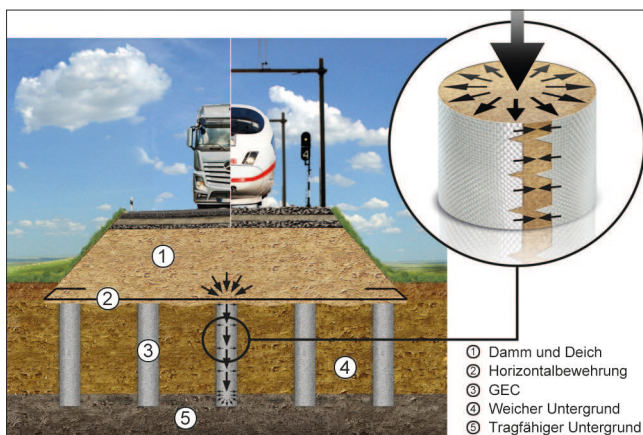


Bild 3: Übersicht der GEC-Gründung: Damm oder Deich, Horizontalbewehrung (falls erforderlich), GECs, weicher Untergrund, standfeste unterlagernde Schicht

Figure 3: Overview of a GEC foundation: embankment or dyke, horizontal reinforcement (if required), GECs, soft ground, stable underlying layer

### 3 Wie? How?

Man musste sich mit einem „Dreieck“ von Problemen befassen:

- Man brauchte ein analytisches Berechnungsverfahren zum Nachweis der Standsicherheit (ULS) und zur Analyse der Setzungen und der etwaigen seitlichen „Spreizverformung“ (SLS).
- Man brauchte eine geeignete Geotextilummantelung; sie sollte eine ausreichende seitliche/radiale Stützung der Säule sichern (ähnlich zu einer flexiblen Kompressionszelle), d.h. eine entsprechende radiale bzw. „Ring“-Zugfestigkeit und -Dehnsteifigkeit besitzen in Kombination mit Filterstabilität, Trennvermögen und Robustheit.
- Man brauchte ein Einbauverfahren; es sollte möglichst schnell, einfach und kostengünstig sein, möglichst gängige Baugeräte verwenden und die geotextile Ummantelung während des Einbaus nicht beeinträchtigen.

#### 3.1 Wie berechnen/bemessen? How are GECs designed?

In den 90er-Jahren wurde in Deutschland in der Sache intensiv theoretisch und praktisch geforscht inklusive 1 : 1 GEC Tests und Messprogramme. Es gab bereits ein vereinfachtes analytisches Berechnungsverfahren (van Impe, 1989), aber es behandelte nur die Standsicherheit (ULS, siehe oben); die Prognose von Setzungen und Verformungen (SLS) war nicht möglich. Für die ersten ausgeführten Projekte in den 90ern wurde vereinfacht das ULS nachgewiesen, die Verformungen wurden soweit möglich numerisch analysiert.

Um es kurz zu machen: letztendlich stand im Jahr 2000 ein plausibles verifiziertes Berechnungsverfahren zur Verfügung (Raithel, 1999; Raithel und Kempfert, 1999 und 2000); inzwischen wurde es nach einigen geringfügigen Modifikationen in EBGeo (2010) als Stand der Technik aufgenommen und wird systematisch verwendet, auch im Ausland. Es behandelt und führt die Nachweise „gemischt“, d.h. gleichzeitig für ULS und SLS (Standsicherheit, Bruchsicherheit und Setzungen);

„gemischt“, weil es auf der sogenannten Theorie zweiter Ordnung beruht, d. h. die Verformungen der GECs haben Einfluss auf die Spannungen im System und umgekehrt.

Wichtigere Aspekte dabei sind:

Die Berechnung/Bemessung hat zwei Phasen:

- „Vertikal“, welche nur das Vertikalverhalten einer GEC behandelt, und „horizontal“, welche die globale Standsicherheit des Damms auf GECs behandelt und bei Bedarf eine Horizontalbewehrung über den GECs ergibt (Bild 3);
- die Berücksichtigung eines gewissen variablen seitlichen (radialen) günstig wirkenden Gegendrucks vom umgebenden Weichboden auf die GEC, d. h. das Modell ist interaktiv;
- die Schlüsselrolle der Dehnsteifigkeit der Ummantelung in Ringrichtung (alias radial), die die radiale GEC-Ausweitung kontrolliert und somit auch die Vertikalverformung der GEC (d. h. letztendlich die Setzung in der Gründungsebene).

Annahmen, weitere Erklärungen, detaillierte Berechnungsempfehlungen und -gleichungen finden sich in Raithel (1999), Raithel und Kempfert (1999 und 2000), Alexiew et al. (2007 und 2012), EBGEO (2010) und Raithel et al. (2013) sowohl für die „vertikale“ wie auch für die „horizontale“ (globale) Berechnung.

### 3.2 Wie soll man die Ummantelung wählen?

#### *How is the encasement selected?*

Die Geokunststoff-Ummantelung ist eine Schlüsselkomponente und der wichtigste, entscheidende Unterschied zu „konventionellen“ Säulen, z. B. Schotter Säulen (neben der Möglichkeit auch z. B. Sand zu verwenden). Zur Berechnung/Bemessung braucht man zwei Parameter (was übrigens korrekt der physischen Realität und dem Ingenieurverstand entspricht):

- Dehnsteifigkeit (Zugmodul  $J$ , kN/m) in „Ringrichtung“;
- Bemessungsfestigkeit  $F_d$ , kN/m (neulich "Widerstand"  $R_d$ ).

Führender Faktor ist die Dehnsteifigkeit  $J$ , weil sie die seitliche GEC-Verbreiterung begrenzt und somit letztendlich auch die Setzungen, siehe oben. Je größer  $J$ , desto geringer die Setzung. Der Zugmodul  $J$  ist zeitab-

hängig wegen des Kriechens und hängt zu 80 % bis 90 % vom verwendeten Polymer ab (Alexiew et al., 1999) und zu 10 % bis 20 % vom Produktionsverfahren der Ummantelung im Werk. Wegen der zusätzlichen Anforderungen an Trennung und Filterstabilität, sowie aus Transport- und Einbaugründen, hat sich ein Geogewebe als optimale Lösung erwiesen. Um den negativen Einfluss von Nähten/Verbindungen auf die verfügbare Bemessungsfestigkeit und auf die Dehnsteifigkeit  $J$  zu vermeiden, sind moderne Ummantelungen nahtlose flexible textile Zylinder, die „flach“ als Rolle auf die Baustelle kommen (Bild 4). Die heutzutage meist verwendeten Ummantelungen beinhalten zwei Familien aus zwei unterschiedlichen Polymeren, beide kriecharm, aber mit unterschiedlichen Zugmoduli  $J$  und Festigkeiten. Ihre Kurzzeit-Höchstzugfestigkeit variiert von 100 kN/m bis 400 kN/m, die Grenzdehnung von 10 % bis 5 % und der Modul  $J$  von 1.000 kN/m bis 6.000 kN/m. Die typischen Durchmesser betragen 0,4 m bis 0,8 m.



Bild 4: Typische gewebte nahtlose Ummantelung so wie zur Baustelle geliefert vor dem Einbau

Figure 4: Typical woven seamless encasement as delivered to the construction site prior to installation

Zusammenfassend: Heutzutage ist die Wahl der Ummantelung keine Frage der Verfügbarkeit, sondern der Optimierung im Zuge der Berechnung (siehe weiter unten).

### 3.3 Wie soll man den Füllboden der GECs wählen?

#### *How is the fill for the GECs selected?*

Generell soll ein körniges nichtbindiges Material verwendet werden aus geomechanischen (Scherfestigkeit, geringe Kompressibilität, Wasserunempfindlichkeit,



Bild 5: Unterschiedliches Säulenmaterial (Füllboden) bei einem Feldversuch

Figure 5: Different types of column filling material during a field test

einfachere Verdichtbarkeit) und hydraulischen (Wasserdurchlässigkeit) Gründen. Ein wichtiger Unterschied zu den „konventionellen“ verdichteten Schotter/Kiessäulen ist die Möglichkeit, Sand zu verwenden. Typische empfohlene Anforderungen sind:

- Weniger als 5 % Feinanteile;
- Winkel der inneren Reibung  $\varphi > 30^\circ$ ;
- Ungleichförmigkeitszahl  $U (d_{60}/d_{10}) = 1.5$  bis 6;
- Wasserdurchlässigkeit  $k > 10^{-5}$  m/s und mindestens 100 x höher als  $k$  des umgebenden Bodens;
- Kompressionsmodul (ödometrisch)  $E_{oed} > 10 \times E_{oed}$  des umgebenden Bodens.

In der Praxis kann ein breites Spektrum von Materialien verwendet werden: von Sanden über Kies und Schotter bis zum recycelten (sekundären) Material, z. B. Betonbruch (Bild 5).

### 3.4 Wie kann man das System optimieren?

*How can the system be optimised?*

Normalerweise ist es Ziel der Berechnung, die Setzungen kleiner als eine vorgegebene Größe zu halten (SLS), wobei man gleichzeitig auch die Tragfähigkeit und die globale Stabilität (ULS) sichert. Bei (naturgemäß) gegebenen geotechnischen Bedingungen kann der Projektant drei Faktoren variieren (Alexiew et al., 2007; EBGEO, 2010):

- Den Prozentsatz der GECs  $a$ , % (Verhältnis GEC-Fläche zur Gesamtfläche der Dammsohle); erfahrungs-

gemäß wird  $a = 10\%$  bis  $20\%$  empfohlen; dabei werden GEC-Durchmesser und/oder deren Abstand variiert;

- den Füllboden (z. B. Sand oder Schotter);
- Ringzugmodul  $J$  und Festigkeit der Ummantelung.

Offensichtlich je größer  $a$ , je besser der Füllboden und je höher  $J$ , desto kleiner die Setzungen. Allerdings ist der Füllboden von der Verfügbarkeit in einem akzeptablen Transportabstand von der Baustelle abhängig; normalerweise findet man in Weichbodenregionen und insbesondere in flachen Küstenregionen eher Sande als Schotter.

Der GEC-Durchmesser hängt oft von der gängigen Geräteausrüstung in einer Region ab (siehe GEC-Einbau weiter unten).

Die wirklich frei wählbaren Parameter sind also der Prozentsatz  $a$  und der Zugmodul/die Festigkeit der Ummantelung; letztere lässt sich übrigens einfach und kostengünstig zu jeder Baustelle transportieren (Bild 4).

Die Bilder 6 und 7 zeigen ein Beispiel, wie die Erhöhung des Ringzugmoduls  $J$  und/oder des Prozentsatzes  $a$  die Setzung reduzieren (bei ansonsten identischen geometrischen und geotechnischen Randbedingungen).

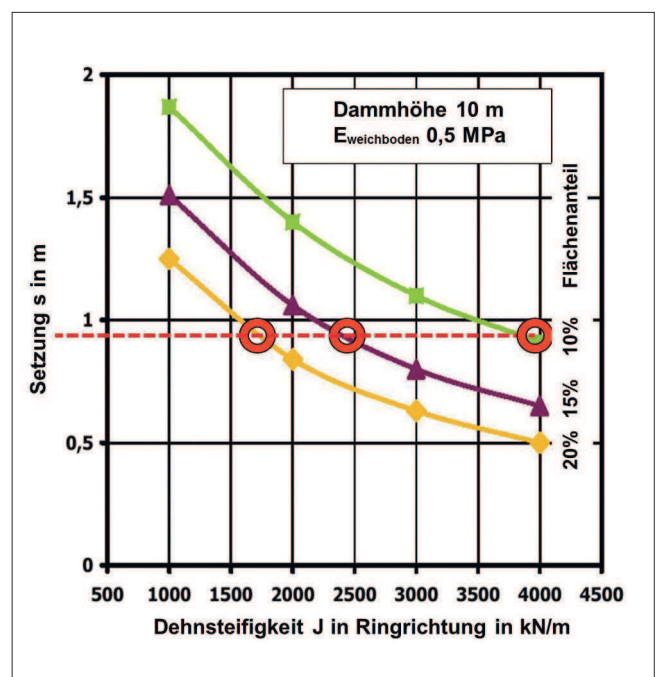


Bild 6: Gleiche Setzung durch höhere Zugmodule der Ummantelung bei abnehmenden GEC-Flächenanteilen (Prozentsätzen)

Figure 6: Same degree of settlement due to higher tensile moduli of the encasement as the percentage of the area of the GEC decreases (in percent)

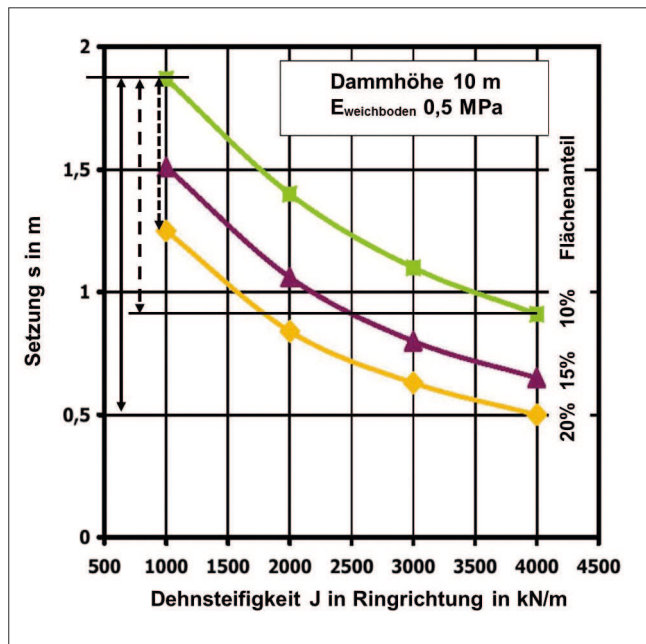


Bild 7: Reduktion der Setzung bei Erhöhung des GEC-Prozentsatzes, des Ringzugmoduls J und bei der Kombination beider Faktoren (vgl. auch Bild 6)

Figure 7: Reduction in the degree of settlement when the percentage of GEC and the tensile modulus in direction of the ring, J, are increased and when the two factors are combined (cf. also Figure 6)

Weitere vereinfachte Diagramme dieser Art zu einer ersten Orientierung bei der Systemberechnung finden sich in Alexiew et al. (2007).

Meistens ist es effizienter, einen geringeren Prozentsatz a von GECs in Kombination mit einem höheren Ringzugmodul J zu wählen. Die Ersparnisse an Säulenfüllboden, Gerätschaft, Energie, Personal, Zeit und CO/CO<sub>2</sub>-Emissionen sind beträchtlich. Als Beispiel ist aus Bild 6 ersichtlich, dass die Erhöhung von J von 1.800 kN/m auf 4.000 kN/m den Prozentsatz a von 20% auf 10% reduziert; was auf den ersten Blick als eine Änderung von nur 10% erscheint, ist aber de facto eine Halbierung der Anzahl der einzubauenden GECs.

### 3.5 Wie werden die GECs eingebaut?

#### How are GECs installed?

Die Einbaumethode wurde über die Jahre verfeinert und optimiert, ist aber generell ziemlich einfach (Alexiew et al., 2012; Raithel et al., 2013). Man versenkt mit einem Vibrator ein Stahlrohr in den Weichboden, rollt aus und installiert durch „Runterhängen“ die Ummantelung in das Rohr, bringt den Füllboden hinein und zieht



Bild 8: Beispiele ausgeführter GECs: in einer Sandplattform, in fließendem Wasser, im Schluck

Figure 8: Examples of GECs installed in a sand platform, in flowing water and in silt

unter Vibration das Rohr nach oben, wobei der Füllboden verdichtet wird: die GEC ist fertig (Bild 8).

Bei dem sogenannten Verdrängungsverfahren (Bild 9) ist das Rohr unten während des Einsenkens durch Klappen verschlossen, die sich dann beim Hochziehen öffnen; bei dem sogenannten Aushubverfahren ist das Rohr unten offen, und der Weichboden wird aus dem Rohrrinneren ausgehoben; danach ist die Prozedur identisch.

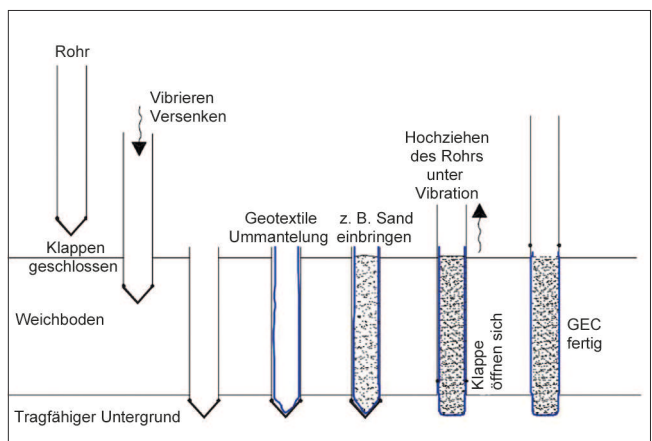


Bild 9: Schema des sogenannten Verdrängungsverfahrens  
Figure 9: Diagram illustrating the displacement method

Es ist von Vorteil, dass es überall fertige Stahlrohre als „Standardware“ gibt, die Klappen lassen sich einfach fertigen, und es ist eine breite Auswahl an Vibratoren und Trägergeräten vorhanden, d. h. die Einbauausrüstung ist nicht zu speziell oder kompliziert. Das ist ein weiterer Unterschied zu den meisten anderen „gängigen“ Säulen.

Wie kann man im Vorfeld etwaige Probleme vermeiden:

- Das Einbaustahlrohr darf nicht zu dünnwandig sein; noch in der Projektphase sind die für eine Region gängigen Stahlrohrdurchmesser (d.h. auch GEC-Durchmesser) zu berücksichtigen (es geht los schon mit Millimetern und Inches ...);
- es ist oft einfacher, die GEC-Ummantelung in der Projektphase an die Rohre anzupassen, als umgekehrt (siehe 3.4 Wie kann man das System optimieren?); die modernen Ummantelungen (Bild 4) kann man einfach projektbezogen herstellen, aber nicht die Rohre;
- die Klappen sollen aus hochwertigem Stahl bestehen;
- man soll hochfrequente Vibratoren ( $> 30$  Hz) mit ausreichender Zentrifugalkraft ( $> 2.000$  kN) und Moment ( $> 500$  Nm) verwenden; Resonanzfreiheit ist kein Muss;
- die Arbeitshöhe der Maste des Trägergerätes soll mindestens 2 m bis 3 m größer sein als die Rohrlänge;
- es kann sich lohnen, bei größeren Baustellen mit mehr als z. B. 10.000 GECs zwei bis drei unterschiedliche Vibratoren auszuprobieren, bevor es richtig losgeht;
- man soll keine Bedenken haben, eine „GEC-erfahrene“ Person oder Bauunternehmung anzusprechen, wenn man Zweifel bei der Wahl der Ausrüstung hat; das kann Nerven und Monate der Bauausführung sparen.

Seit einiger Zeit wird auch eine andere Option angewendet als Modifikation des etablierten Verfahrens „ungebundene Rüttelstopfsäulen“, und zwar in Kombination mit einer hochfesten Ummantelung, die den Anwendungsbereich solcher Säulen beträchtlich erweitert. Erste Erfahrungen liegen bereits vor (Böhle et al., 2016). Vor einigen Jahren wurde auch ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem die Ummantelung außen statt innen (vgl. Bild 9) am Einbaurohr angebracht wird.

## 4 Wo/Wann GEC?

### *Where and when should GECs be used?*

Optimale Anwendungsbereiche von GECs:

- In Weichböden mit  $c_u < 30$  kN/m<sup>2</sup>, besser  $< 25$  kN/m<sup>2</sup> (übrigens kaum eine untere Grenze, GECs sind baubar und halten erwiesenermaßen bis  $c_u = 2$  kN/m<sup>2</sup> bis 3 kN/m<sup>2</sup>) und einem Kompressionsmodul (ödometrisch)  $E_{oed} = 0,5$  MN/m<sup>2</sup> bis 3,0 MN/m<sup>2</sup>;
- bei Weichschichtmächtigkeit von 8 m bis 30 m (es wurden allerdings neulich auch Verfahren entwickelt für bis zu 35 m Tiefe, die aber noch nicht richtig getestet sind);
- für Dämme, Deiche, Schütthalden etc. mit mindestens 1,5 m Höhe;
- wenn Systemsetzungen im Bereich von 0,2 m bis z. B. 0,8 m in der Bauphase akzeptiert und kompensiert werden können (dies ist meistens der Fall); wichtig ist, dass die GECs auch als „Megadräns“ wirken, somit erfolgen Primärkonsolidierung und -setzung schnell; die Setzungen danach unter Betrieb sind dann gering (Alexiew et al., 2012; Raithel et al., 2013);
- von Interesse, falls man duktile (insbesondere seitlich) pfahlähnliche Elemente braucht, die wenig empfindlich auf einen asymmetrischen seitlichen Weichbodendruck in der Tiefe reagieren (z. B. in der Nähe von „ungestützt“, „direkt“ gegründeten Dämmen oder Deichen, siehe Kapitel 1 Einführung);
- von Interesse als duktile aktive Gründungselemente als Maßnahme gegen den oben genannten Seitendruck, indem sie durch Reduktion der vertikalen Spannungen im Weichboden auch die seitliche Spannung verringern;
- von Interesse in Erdbebengebieten, indem sie die Integrität von nicht gebundenen granularen Säulen unter „scherender“ und „biegender“ seismischer Einwirkung sichern (Güler et al., 2016);
- von Interesse, wenn eine Störung des Grundwasserregimes/der Grundwasserströmung (auch z. B. in Küstennähe) nicht zulässig ist (die GECs sind waserdurchlässig und filterstabil);
- von Interesse, wenn existierende alte Dämme (z. B. Eisenbahndämme) für höhere Geschwindigkeiten ertüchtigt werden müssen, indem der nachträgliche GEC-Einbau deren statische und dynamische Stabilität verbessert, auch unter intensiver zyklischer Belastung (Alexiew et al., 2012; de Prisco et al., 2006; de Prisco, 2011).



## 5 Was sind die GEC letztendlich? *What are GECs finally?*

Dies ist ein Versuch, einige Aspekte hinzuzufügen und ein besseres Verständnis des Systems zu vermitteln.

Die GECs sind tragende pfahlähnliche Elemente; es ist eine Frage der Philosophie (wir reden nicht nur von Deutschland), ob man sie „Pfähle“, „Säulen“ oder „System zur Untergrundverbesserung“ nennt.

Es sind Elemente, die durch Spitzendruck abtragen. Nichtsdestotrotz, wegen ihres „weicheren“ Verhaltens inklusive des Spitzenbereichs muss man sie nicht wie steife Pfähle tiefer in die tragende Bodenschicht („standfeste Unterschicht“ in Bild 3) einbinden; es genügt im Allgemeinen weniger als ein GEC-Durchmesser.

Das Verhalten der GECs kann a priori besser gesteuert werden im Vergleich zu nicht ummantelten Säulen und birgt weniger potenzielle Überraschungen wegen der entscheidenden Präsenz eines kontrolliert industriell (ohne Kennwertstreuungen) hergestellten Elements – die geotextile Ummantelung.

Die GECs sind kompressibler als z. B. steife Pfahlelemente, aber die Setzungen erfolgen größtenteils bereits in der Bauphase und können problemlos kompensiert werden; auf jeden Fall liegen die Setzungen im Dezimeterbereich im Vergleich z. B. zu ungestützten Dämmen mit Basisbewehrung und Streifendräns (Bild 1), wo sie meistens im Meterbereich liegen.

Die GECs arbeiten zusätzlich als Vertikaldräns mit extremer Dränkapazität.

Das GEC-System ist duktil und in einem beträchtlichen Ausmaß selbstregulierend und robust durch die Interaktion von Füllboden, Ummantelung, Weichboden und ggf. Horizontalbewehrung (Bild 3).

Aufgrund der Wasserdurchlässigkeit und Filterstabilität ist der Einfluß der GECs auf das hydraulische/hydrologische Umfeld marginal.

Durch die filterstabile Dränung und auch im Falle eines Einbaus mit hochfrequentem Vibrator (Bild 9) – Energiezufuhr in kleineren Portionen – ist der entstehende dynamische Porenwasserüberdruck eher moderat und

dissipiert rasch, d. h. der Weichboden wird nur begrenzt und nur kurzfristig „gestört“.

Die geotextile Ummantelung arbeitet:

- a) primär als Bewehrung (obwohl auf eine spezifische Art und Weise); sie liefert die erforderliche Ringzugkraft, die eine Schlüsselbedeutung hat;
- b) sekundär als Trennung und Filter.

Aus genereller ingenieurtechnischer Sicht positioniert sich das GEC-System bezüglich Verhalten, Spezifika und Leistung wie auf Bild 10 sehr vereinfachend dargestellt.



Bild 10: Positionierung des GEC-Systems zwischen zwei Extrema: Dämme auf steifen Elementen und Dämme ohne jegliche Stützung

*Figure 10: Position of GEC systems between two extremes: embankments on rigid elements and those without any form of support*

## 6 Was sind die Erfahrungen? *What experience is there to date?*

Die Anzahl allein der bedeutenden ausgeführten Projekte ist über dreißig, darunter auch Großprojekte von Deich- und Dammgründungen mit über 2.500 km GEC. Das populärste – es ist das deutsche – Berechnungsverfahren (Raithel, 1999; EBGEO, 2010) erscheint plausibel, funktioniert gut und wurde durch Messprogramme und durch die Baupraxis verifiziert; es ist vielleicht ein bisschen konservativ (Alexiew et al., 2012; Raithel et al., 2011), insbesondere was die Gesamtstabilität betrifft; man bemüht sich um weitere Optimierung.

Seit über zehn Jahren war es in allen Fällen möglich, eine optimale Lösung zu finden, dank des breiten Spektrums der heute vorhandenen geotextilen Ummantelungen (Durchmesser, Module, Festigkeiten, Polymere); dem Verfasser sind keine Verformungs- oder Stabilitätsprobleme bekannt, die auf die Ummantelung zurückzuführen wären.

Manchmal gab es Probleme technologischer Natur, z. B. zu langsamer Einbauvorgang; typische Ursachen sind zu leichte Vibratoren oder eine schlechte Qualität der Rohrklappen, also die Nichteinhaltung einfachster Regeln und Empfehlungen (siehe 3.5 Wie werden die GECs eingebaut?).

## 7 Wie ist der Bedarf an weiterer Forschung?

*Is there a need for further research?*

Bis ca. 2002 konzentrierten sich die Aktivitäten bei Forschung, Messprogrammen, Berechnungsverfahren etc. hauptsächlich in Deutschland. Ab 2002 bis 2003 intensivierte sich die theoretische und praktische Forschung auch international (z. B. Brasilien, Taiwan, Indien, Slowenien etc.). Das liegt daran, dass die Anwendung der GECs weltweit zunimmt; man ist auch bemüht, zusätzliche Anwendungsbereiche und -funktionen des Systems zu studieren und zu erschließen oder die Berechnungen zu optimieren. Aus Platzgründen können hier nicht alle Publikationen in diesem Zusammenhang zitiert werden. Nützliche kompakte Übersichten und Referenzen findet man z. B. in Tandel et al. (2012a, 2012b). Generell wurden die meisten Grunderkenntnisse aus den späten 90er-Jahren bestätigt (z. B. Tandel et al., 2012a und 2012b; Murugesan und Rajagopal, 2007), z. B. die Bedeutung des Ringzugmoduls der Ummantelung.

Ein noch zu erwähnender innovativer Bereich, woran zzt. intensiv gearbeitet wird, ist das Verhalten, die Vorteile (durch die „Einkapselung“) und die Berechnung der GEC unter Erdbebenbelastung (Güler et al., 2014).

An einem von den deutschen und anderen gängigen Ansätzen abweichenden Berechnungskonzept wird zur Zeit auch gearbeitet (Sirk und Pulko, 2016). Die bisherigen Überlegungen dort erscheinen plausibel. Der Schwerpunkt ist die Annahme, das zumindest ein Teil der GEC rein elastisch arbeitet (Unterschied zu Van Impe, 1989; Raithel, 1999; Raithel und Kempfert, 1999 und 2000; EBGEO, 2010).

## 8 Wie ist der Stand bei neuartigen Anwendungen?

*What is the situation in the case of new applications?*

In den letzten drei Jahren wurden die GECs erfolgreich auch als entlastendes Element zur Reduktion des seitlichen Weichbodendrucks in der Tiefe auf benachbarte empfindliche Bauwerke (manchmal auch Tshebotarioff-Effekt genannt) eingesetzt: fast zeitgleich bei Projekten in Brasilien (Schnaid et al., 2014) und in Deutschland (Alexiew et al., 2016). Dabei wurde der Seitendruck um mehr als 50 % reduziert.

## 9 Wie ist der Stand bei neueren Projekten in Deutschland?

*What is the situation in the case of recent projects in Germany?*

Hier seien unter anderem die Gründung eines Deichsegments bei Nordstrand im Zuge einer Deichertüchtigung und -erhöhung im Jahr 2015 (Bild 11) oder die Gründung von Autobahndämmen im Zuge der A26 in der Nähe von Hamburg (Sommer und Herbst 2016) genannt.



Bild 11: Nordstrand, vor Beginn und während der Bauphase am Deich (Quelle: Google Maps)  
Figure 11: Nordstrand prior to and during construction work on the dyke (Source: Google Maps)

## 10 Danksagung *Acknowledgement*

Aus Platzgründen widerspiegelt die Referenzliste hier nur einen kleinen Teil der Arbeit, die während der letzten zwanzig Jahre bezüglich ausgeführter Projekte, Berechnung, Bauerfahrungen, Forschung usw. getan wurde. Der interessierte Leser findet in den zitierten Arbeiten viele weiterführende Referenzen. Dabei haben viele Bauingenieure in unterschiedlichen Positionen und Funktionen in Deutschland, aber auch weltweit von Brasilien bis Australien, mitgewirkt. Sie alle haben zum heutigen Stand der Technik (wie hier kurz und sicherlich unvollständig dargestellt) beigetragen.

## 11 Referenzen *References*

Alexiew, D.; Sobolewski, J.; Pohlmann, H. (1999): Projektbezogene Anwendungsmöglichkeiten von Geogittern aus neuartigen Polymeren. 6. Inform.- und Vortragstagung über Kunststoffe in der Geotechnik, München, 1999. Sonderheft „Geotechnik“, DGGT, Essen, S. 199-206.

Alexiew, D.; Brokemper, D.; Sobolewski, J. (2007): Geokunststoffummantelte Säulen: Einflußfaktoren, Normprogramme für den Vorentwurf und Vorstellung eines aktuellen Bauwerkes. 6. Österreichische Geotechniktagung Tagungsbeiträge, Januar 2007, S. 227-240.

Alexiew, D.; Raithel, M.; Küster, V.; Detert, O. (2012): 15 years of experience with geotextile encased granular columns as foundation system. Proc. Int. Symposium on Ground Improvement IS-GI, ISSMGE TC 211, Brussels, CD ohne Seiten.

Alexiew, D.; Blume, K.-H.; Raithel, M. (2016): Bridge approach on geosynthetic encased columns (GEC) in northern Germany: measurement program and experience. Proc. GeoAmericas 2016, Miami Beach, 2016, S. 378-387.

Böhle, B.; Maihold, K.; Möbius, W. (2016): Weiterentwicklung der geotextilummantelten Stopfsäulen als Gründungssystem. 12. Hans Lorenz Symposium, Grundbauinstitut der TU Berlin, Heft 70, Berlin, S. 85-93.

Di Prisco, C.; Galli, A.; Cantarelli, E.; Bongiorno, D. (2006): Geo-reinforced sand columns: small scale experimental tests and theoretical modelling. Proc. 8th Int. Conf. on Geosynthetics, Yokohama, Millpress, Rotterdam, S. 1685-1688.

Di Prisco, C.; Galli, A. (2011): Mechanical behaviour of geo-encased sand columns: small scale experimental tests and numerical modelling. Geomechanics and Geoengineering, online 01 Sep 2011.

EBGEO (2010): Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen. Berlin: Ernst & Sohn.

Güler, E.; Alexiew, D.; Abbaspour, A.; Koc, M. (2014): Seismic Performance of Geosynthetic-Encased Stone Columns. Soil Mechanics 2014. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No 2462, S. 77-88.

Murugesan, S.; Rajagopal, K. (2007): Model tests on geosynthetic-encased stone columns. Geosynthetics International, 14, No 6.

Raithel, M. (1999): Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Schriftenreihe Geotechnik, Heft 6, Universität Gesamthochschule Kassel.

Raithel, M.; Kempfert, H.-G. (1999): Bemessung von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Die Bautechnik (76), Heft 12.

Raithel, M.; Kempfert, H.-G. (2000): Calculation models for dam foundations with geotextile coated sand columns. Proceedings of the International Conference on Geotechnical & Geological Engineering GeoEng 2000, Melbourne.

Raithel, M.; Werner, S.; Küster, V.; Alexiew, D. (2011): Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens einer Gruppe geokunststoffummantelter Säulen im Großversuch. Bautechnik 88, Heft 9, S. 593-600.

Raithel, M.; Küster, V.; Alexiew, D. (2013): 20 Jahre Gründungssysteme mit geokunststoffummantelten Säulen. Geotechnik 36, Heft 4, S. 205-217.

Schnaid, F.; Winter, D.; Silva, A. E. F.; Alexiew, D.; Küster, V.; Hebmüller, A. (2014): Geotextile Encased Columns (GEC) under bridge approaches as a pressure-relief system: Concept, experience, measurements. 10ICG, 21-25 September 2014, Berlin, CD ohne Seiten.

Sirk, K.; Pulko, B. (2016): Geotextile encased columns-verification of the analytical design method. Proc. 25th Europ. Young Geot. Eng. Conference, Sibiu, 2016, S. 243ff.

Tandel, Y. K.; Solanki, C. H.; Desai, A. K. (2012a): Reinforced granular column for deep soil stabilization: a review. International Journal of Civil and Structural Engineering, 2, No 3.

Tandel, Y. K.; Solanki, C. H.; Desai, A. K. (2012b): Reinforced stone column: remedial of ordinary stone column. International Journal of Advances in Engineering & Technology, No 6.

Van Impe, W. F. (1989): Soil improvement techniques and their evolution. AA Balkema / Rotterdam / Brookfield.