

**04**  
**2023**

# Konstruktiver Ingenieurbau

## **Geotechnik**

Bemessung  
von Lastverteilungsschichten  
über Stabilisierungssäulen zur  
Optimierung von Bodenplatten

## **Stahlbau**

Altstahl Identifikations Modul

## **Mauerwerksbau**

Neue DIN EN 1996-1-2  
„Tragwerksbemessung  
für den Brandfall  
bei Mauerwerksbauten“

## **Holzbau**

Druckspannungsnachweis  
nach prEN 1995-1-1  
– Good to know

Holzskelett  
mit doppeltem Boden

## **Bauphysik**

Schallschutz in Tiefgaragen





# Geo technik



Hannah Brandt, Johannes Kirstein, Christopher Tinat

# Bemessung von Lastverteilungsschichten über Stabilisierungssäulen zur Optimierung von Bodenplatten

*Ziel von Lastverteilungsschichten (LVS) ist es, die Stabilisierungssäulen von dem Bauwerk zu entkoppeln und die Bemessung der aufgelagerten Konstruktion, wie z. B. Bodenplatten gegenüber Pfahlgründungen, technisch und wirtschaftlich zu optimieren. Dabei ist die Interaktion zwischen den Säulen, der LVS und der Konstruktion zu berücksichtigen, denn mit einer Lastverteilungsschicht sind bis zur kritischen Höhe zusätzliche Biegemomente in der darüber liegenden Bodenplatte zu berücksichtigen, welche mit einer Verringerung der LVS-Mächtigkeit zunehmen. Es werden Hinweise zur Ausführung von Lastverteilungsschichten für die Baupraxis vorgestellt.*

(LVS) oberhalb der Säulen. Eine LVS unter Bodenplatten (starre Lasteinleitung) ist in der Regel 0,5m bis zu 1 m mächtig und kann granular ungebunden oder zementverfestigt ausgeführt werden. Unter Dammbauwerken (schlaffe Lasteinleitung) ist zudem eine geogitterbewehrte Ausführung gemäß Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO) [11] üblich. Bei der Bemessung des Gesamtsystems ist zu beachten, dass Interaktionsmechanismen zwischen Säulen, LVS und der aufgelagerten Konstruktion eintreten. Diese Interaktionsmechanismen werden im vorliegenden Beitrag am Beispiel einer Bodenplatte vorgestellt und die Bedeutung einer entsprechenden Bemessung der LVS herausgearbeitet.

- 1 Einleitung
- 2 Stabilisierungssäulen, hier Nassmörtelsäulen System CMC®
- 3 Tragverhalten von Stabilisierungssäulen mit Lastverteilungsschicht
- 4 Ausführungsvarianten von Lastverteilungsschichten
  - 4.1 Geogitterbewehrte LVS
  - 4.2 Granulare ungebundene LVS
  - 4.3 Hydraulisch gebundene Tragschichten
- 5 Bemessung von Lastverteilungsschichten
- 6 Einfluss auf die aufgelagerte Konstruktion
- 7 Zusammenfassung

## 1 Einleitung

Baugrundverbesserungssäulen mit hoher Steifigkeit und einer signifikanten Festigkeit werden international als *rigid inclusions* und national als Stabilisierungssäulen bezeichnet. Diese schließen die Lücke zwischen klassischen Baugrundverbesserungen und konventionellen Tiefgründungen. In Deutschland behandelt der Arbeitskreis 2.8 der DGGT die Stabilisierungssäulen (STS).

Stabilisierungssäulen werden häufig in einem gleichmäßigen Raster zur flächigen Baugrundverbesserung eingesetzt. Sie unterscheiden sich von klassischen Tiefgründungen u.a. durch den Einbau einer Lastverteilungsschicht

## 2 Stabilisierungssäulen, hier Nassmörtelsäulen System CMC®

Unter die in der Einleitung genannten Stabilisierungssäulen (STS) fallen Trockenmörtelsäulen (TMS), Nassmörtelsäulen (NMS), hydraulisch gebundene Stopfsäulen (HSS) und Bodenmischsäulen (BMS) [1]. Zu den Nassmörtelsäulen (NMS) gehört das CMC®-Verfahren, welches seit mehr als 20 Jahren international ausgeführt wird. Die Abkürzung steht für Controlled Modulus Columns. Das Vollverdrängungssystem wird aufgrund der erschütterungsarmen Bauausführung und wirtschaftlichen Vorzügen häufig als



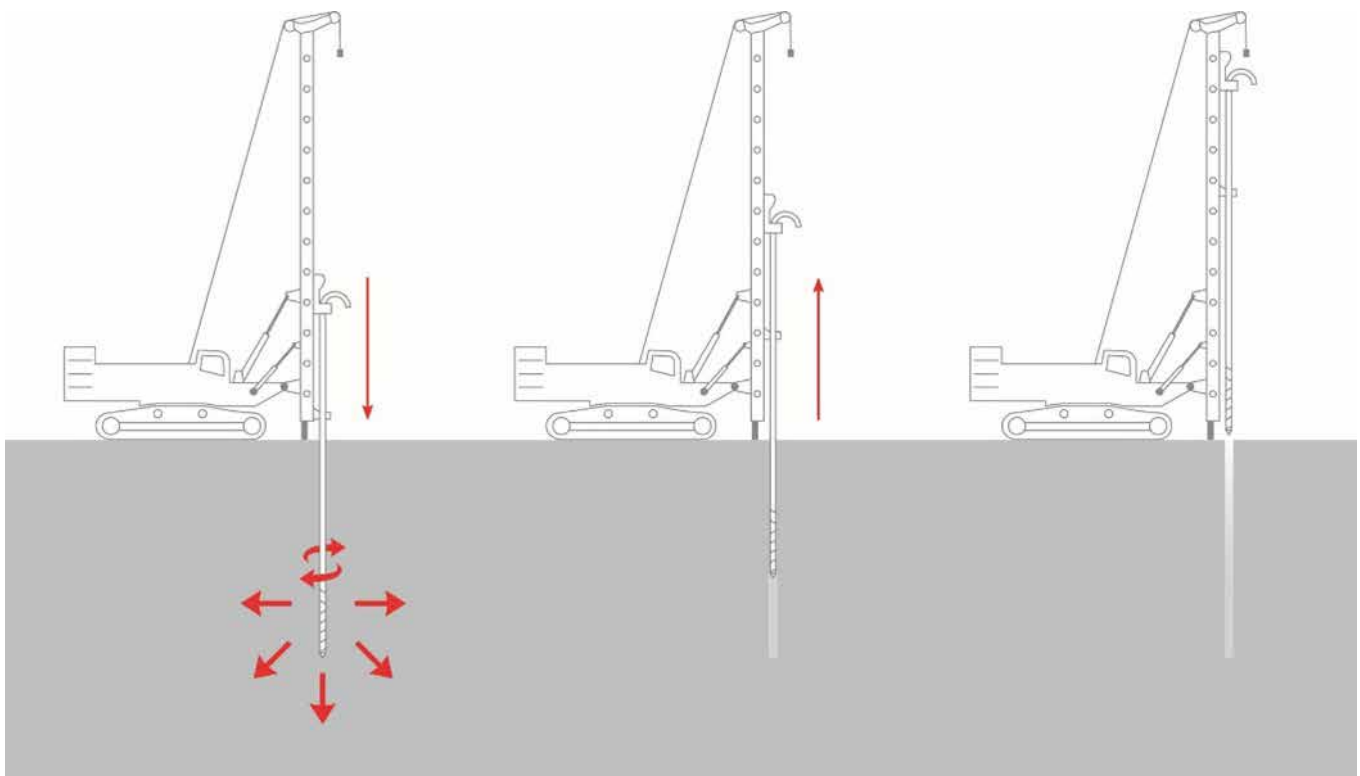


Bild 1: Herstellung der CMC® (© menard)

Alternative zu klassischen Bohrpfahlgründungen ausgeführt. Abgesehen von einer leichten Aufwölbung an der Oberfläche der Arbeitsebene wird kein Boden gefördert. Die Bezeichnung „Controlled Modulus Columns“ ergibt sich aus der aufeinander abgestimmten Geräteeinheit.

Die üblicherweise auf einem Kettengerät installierte Betonpumpe ist mechanisch sowie elektronisch mit dem Trägergerät verbunden und sorgt für den passenden Betonüberdruck gegen den umgebenden Boden. Das Kontraktorverfahren ermöglicht auch das Betonieren gegen drückendes Wasser.

In der zentralen Kontrolleinheit werden alle Ausführungsparameter gesteuert und protokolliert. Der tragfähige Horizont wird anhand der Aufzeichnungsparameter während des Absenkens detektiert. Bei der häufig rasterförmigen Anordnung der CMC® wird der Baugrund durch die Aufzeichnung verschiedener Bohrparameter engmaschig in Ergänzung zu den vorliegenden Erkundungen aufgeschlossen. Auf geologische Schwankungen kann während der Herstellung reagiert und die Säulenlänge entsprechend angepasst werden. Hierdurch wird auch bei kleinräumig

wechselnden oder stark geschichteten Baugrundbedingungen ein gleichmäßiges Lastsetzungsverhalten der CMC® sichergestellt, wodurch kritische Differenzsetzungen im späteren Gebrauchszustand des Bauwerks vermieden werden.

Die kontinuierlichen Messintervalle visualisieren auch während der Betonage den entstehenden CMC®-Querschnitt.

Die CMC®-Tragelemente unterscheiden sich hinsichtlich des Durchmessers und der Einbindung von klassischen Pfählen. Nach dem Durchteufen der kompressiblen Schichten sind bereits geringe Einbindungen in den tragfähigen Baugrund ausreichend, um die Setzungen zu reduzieren. Die Verdrängung bewirkt eine Verbesserung des umliegenden Bodens. Mit unterschiedlichen Durchmessern von 24, 28, 32, 36 und 40 cm, dem üblichen Spektrum der Lieferbetone von C8/10XA0 bis C35/45XA3 je nach chemischem Angriffsgrad und Beanspruchungen sowie alternativ auch ökologischen Baustoffen ist das CMC®-Verfahren in allen Böden einsetzbar. Vor allem aus diesen Gründen wurde das Verfahren für die Beispiele in diesem Artikel gewählt.

### 3 Tragverhalten von Stabilisierungssäulen mit Lastverteilungsschicht

Die Bodenplatte, die Lastverteilungsschicht, die Säulen und der Boden zwischen den Säulen interagieren und bilden ein kombiniertes Säulensystem. Die auf einer Bodenplatte wirkenden Punkt- oder Flächenlasten werden über die Lastverteilungsschicht in die Säulen und auf den zwischen den Säulen befindlichen Boden übertragen. Eine bewehrte Betonplatte oberhalb der LVS stellt eine starre Lasteinleitung dar. D.h., die Verformungen der Bodenplatte sind gleichmäßig und es treten nahezu keine Differenzsetzungen an der Oberkante der LVS auf. Aufgrund der behinderten Verformungen treten Spannungsdifferenzen auf. Die Spannungen in der Bodenplatte ergeben sich in Abhängigkeit der Bettungssteifigkeiten. Entsprechend kommt es aufgrund der höheren Steifigkeit der Säulen zu einer Spannkonzentration über den Säulenköpfen. Diese ist von dem Rasterabstand der Säulen, der Weichschicht und der Lastverteilungsschicht abhängig. Die Lastverteilungsschicht hat die Funktion, Spannungen zwischen den Säulen in den Boden einzuleiten. Durch die Kompression

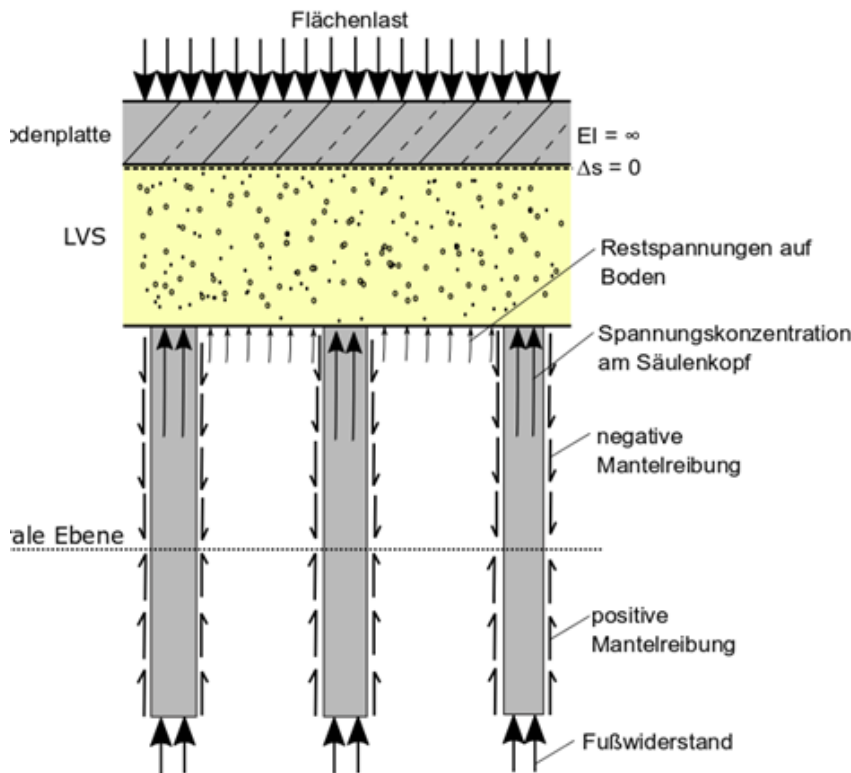


Bild 2: Prinzip der Lasteinleitung von einer Betonplatte (starre Lasteinleitung) in die Stabilisierungssäulen (© Naue GmbH)

des Bodens zwischen den Säulen werden die Säulen im oberen Bereich zusätzlich durch negative Mantelreibung beansprucht, bis die Verformungen des Bodens die Verschiebung der Säule unterschreiten und eine positive Mantelreibung eintritt (neutrale Ebene). Die Lasten eines kombinierten Säulensystems werden über positive Mantelreibung unterhalb der neutralen Ebene und Spitzendruck am Säulenfuß in den Baugrund ähnlich einer Tiefgründung bzw. kombinierten Pfahl-Plattengründung (KPP) eingeleitet (siehe Bild 2).

#### 4 Ausführungsvarianten von Lastverteilungsschichten

Lastverteilungsschichten können aus einer Tragschicht gut verdichteten granularen Materials (ungebunden), aus bindemittelstabilisiertem (bindigen oder nichtbindigen) Material (gebunden) oder einer bewehrten Tragschicht (bewehrt) bestehen.

##### 4.1 Geogitterbewehrte LVS

Beim schlaffen Lasteintrag im Verkehrswegebau werden Geokunststoffe eingesetzt und für die Aufnahme von Membran- und Spreizkräften bemessen. Mit dem bewehrten

Erdkörper sollen die Einleitung der Lasten durch Lastumverteilung innerhalb des bewehrten Erdkörpers in die Tragglieder sichergestellt werden. Für die Aktivierung von Geogittern werden Verformungen vorausgesetzt, welche in der erforderlichen Größenordnung lediglich bei schlaffer Lasteinleitung auftreten können. Die Bewehrung „überbrückt“ durch eine Membranwirkung den wenig tragfähigen Boden zwischen den Traggliedern. Die zweidimensionale Geokunststoffbewehrung wird von der infolge Gewölbewirkung reduzierten senkrechten Auflast zwischen den Traggliedern belastet. Der Reaktionsdruck des Bodens unterhalb der Bewehrung übernimmt einen Teil der Lasten.

##### 4.2 Granulare ungebundene LVS

Bei starrem Lasteintrag, wie bei Betonplatten oder Einzelfundamenten, wird auf eine Geogitterbewehrung verzichtet, weil die Aktivierungsverformungen nicht auftreten können. Die Ausführung der ungebundenen Schicht erfolgt i.d.R. aus gut verdichtbaren Kies-, Sand- oder Schottermaterial. Auch Recycling-Materialien eignen sich hierfür, sofern diese aus umwelttechnischen Ge-



Bild 3: Zweilagige Geogitter-Verlegung innerhalb des vor Kopf über den CMC eingebauten Sandpolsters [10] (© menard)

sichtspunkten eingesetzt werden dürfen. Die Bemessung der aufgelagerten Konstruktion erfolgt i.d.R. elastisch gebettet unter Ansatz des Steifemodul- oder Bettungsmodulverfahrens. Damit diese Modellannahme erfüllt wird, ist die LVS entsprechend darauf zu bemessen, auszubilden und die Aufnahme der Spannungen am Säulenkopf nachzuweisen, siehe Abschnitt 4.

#### 4.3 Hydraulisch gebundene Tragschichten

Hydraulisch gebundene Tragschichten, die mit ihren Festigkeiten in den Bereich der Magerbetone reichen, bewirken als Druckkörper einen starren Lasteintrag in die vertikalen Tragelemente. Sie kommen bei erhöhten Setzungsanforderungen und bei sehr weichen Böden zum Einsatz, wenn ein Bettungsausfall der Weichschicht berücksichtigt werden muss.

Die gebundenen Tragschichten bieten gegenüber Geokunststoffen aufgrund ihrer räumlichen Eigenschaften und der entfallenden Verankerungslängen Vorteile. Nur zur Rückverankerung von Gewölbeschub an den Rändern der Fläche werden sie eingesetzt, wenn ausreichend seitlicher Erdwiderstand oder andere Nachweismöglichkeiten nicht bestehen.

#### 5 Bemessung von Lastverteilungsschichten

Ansätze zur Beschreibung der Interaktion zwischen Säulen und LVS im Grenzzustand der Tragfähigkeit basieren auf der klassischen Grundbruchtheorie. Gemäß [8] wird von einem Grundbruchmechanismus basierend auf den Annahmen von [6] ausgegangen,

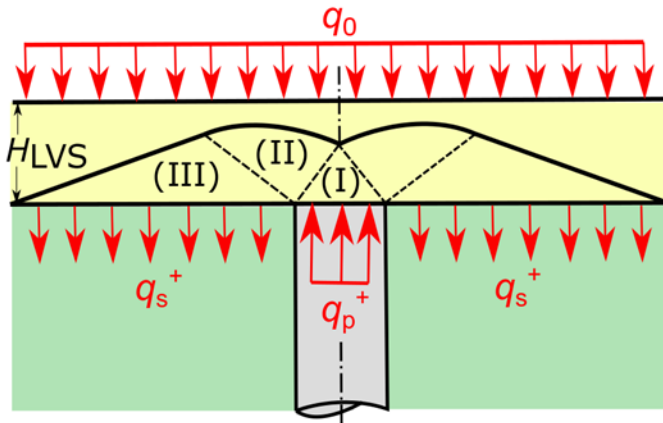


Bild 4: Grenzzustand der LVS bei starrem Lasteintrag (Prandtl-Mechanismus) [2]

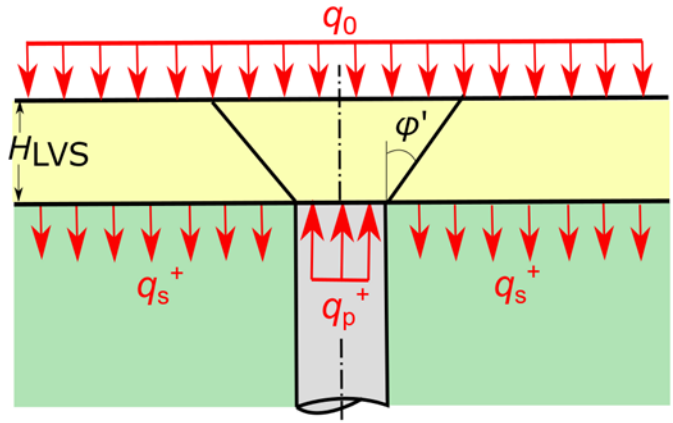


Bild 5: Grenzzustand der LVS bei schlaffem Lasteintrag (Punching) [2]

sofern auf der Lastverteilungsschicht ein nahezu starres Element, wie eine Betonplatte, gelagert ist. Praktisch handelt es sich um einen umgekehrten Grundbruch, welcher durch die Spannungskonzentration an den Säulenköpfen hervorgerufen werden kann. Analog der konventionellen Grundbruchberechnung wird vorausgesetzt, dass der Grundbruch in Form einer ausgeprägten Gleitfläche auftritt.

Liegt ein schlaffer Lasteintrag vor, wie es z. B. beim Straßenbau in Asphaltbauweise ohne starren Unterbau der Fall ist, wird der Grenzzustand des Systems zusätzlich durch den sog. Scherkegel-Mechanismus begrenzt, welcher ein Durchstanzen des Säulenkopfes zur Folge haben kann. Dieser Versagenszustand (int. „Punching“) kann im Fall einer aufliegenden Bodenplatte (starre Lasteinleitung) zwar ausgeschlossen werden, jedoch sind zusätzliche Biegemomente in der aufgelagerten Konstruktion möglich. Der Durchstanzmechanismus bzw. die Biegemomente treten erst dann ein, wenn die Mächtigkeit der LVS die sog. kritische Höhe  $H_{krit}$  unterschreitet.

Zur Bestimmung der kritischen Höhe existieren verschiedene, teilweise weit auseinandergehende empirische Ansätze in der Literatur. Verbreitet ist die in [2] und auch im British Standard BS 8006 [9] vorgeschlagene Gleichung (1).

$$H_{krit} = 0,7(s-a) \quad (1)$$

$s$  stellt den Achsabstand der Säulen und  $a$  die äquivalente Quadratseitenlänge des Säulendurchmessers  $D_c$  dar ( $a = 0,886 D_c$ ).

In [7] wird mit experimentellen Untersuchungen unter Berücksichtigung von zyklischen auftretenden Verkehrslasten gezeigt, dass Differenzsetzungen bis zu einer Dicke der LVS von  $1,5(s-a)$  ohne Verkehrslasten und  $1,8(s-a)$  bei zyklischen Verkehrslasten auftreten können.

Die geometrischen Vorgaben der EBGE0 [4] für bewehrte Erdkörper auf punktförmigen Traggliedern lassen auf eine kritische Höhe von  $0,8(s-D_c)$  bei vorwiegend ruhender Beanspruchung und  $2,0(s-D_c)$  bei veränderlichen Beanspruchungen schließen.

In der Baupraxis werden häufig Lastverteilungsschichten ausgeführt, die gering mächtiger sind, als die kritische Höhe, weshalb der Mechanismus in der Regel maßgebend und zu berücksichtigen ist: bei starrer Lasteinleitung in Form von aufzunehmenden Biegemomenten in der Konstruktion, bei schlaffer Lasteinleitung in Form von Differenzsetzungen an der Oberfläche der LVS.

In [8] wird das Nachweisschema für granulare Lastverteilungsschichten über Stabilisierungssäulen bei starrer Lasteinleitung, z. B. aus bewehrten Bodenplatten, nach den französischen ASIRI-Empfehlungen unter Berücksichtigung des konventionellen Grundbruchnachweises nach DIN 4017 vorgestellt. In einer Parameterstudie werden Einflussgrößen auf die Grenzspannung der LVS bewertet. Hierzu werden ergänzend die Ergebnisse von FE-Berechnungen an einer rotationssymmetrischen Einheitszelle mit einer Steifigkeitsreduktion des Bodens zwischen den Säulen herangezogen.

Die Ergebnisse zeigen neben einer guten Übereinstimmung zwischen FE-Analyse und analytischen Berechnungsmethoden die Gewölbeausbildung in der LVS und die Ausbildung einer potenziellen Bruchfigur bei Überschreitung der Grenzspannung, siehe Bild 6.

## 6 Einfluss auf die aufgelagerte Konstruktion

Mit einer ungebundenen Lastverteilungsschicht sind bis zur kritischen Höhe zusätzliche Biegemomente in der darüber liegenden Bodenplatte zu berücksichtigen, welche mit einer Verringerung der LVS-Mächtigkeit zunehmen, siehe Bild 7.

In weiteren Parameterstudien wurden verschiedene Einflussparameter auf die Größe des Biegemoments in der Platte untersucht. Die Analyse zeigt, dass insbesondere die Mächtigkeit der LVS in Kombination mit dem Raster maßgebend ist. Im Gegensatz dazu nehmen die Scherparameter der LVS sowie die Steifigkeit des umgebenden Bodens nur untergeordnet Einfluss, bestimmen aber die Grenzspannung, welche am Säulenkopf aufgenommen werden kann, siehe Abschnitt 4.

Es konnte folgende Rangfolge der auf das Biegemoment einflussnehmenden Parameter identifiziert werden.

1. Mächtigkeit  $H_{LVS}$  der LVS und Raster  $s$  der Säulen
2. Scherparameter der LVS
3. Steifigkeit des Bodens zwischen den Säulen
4. Durchmesser der Säule

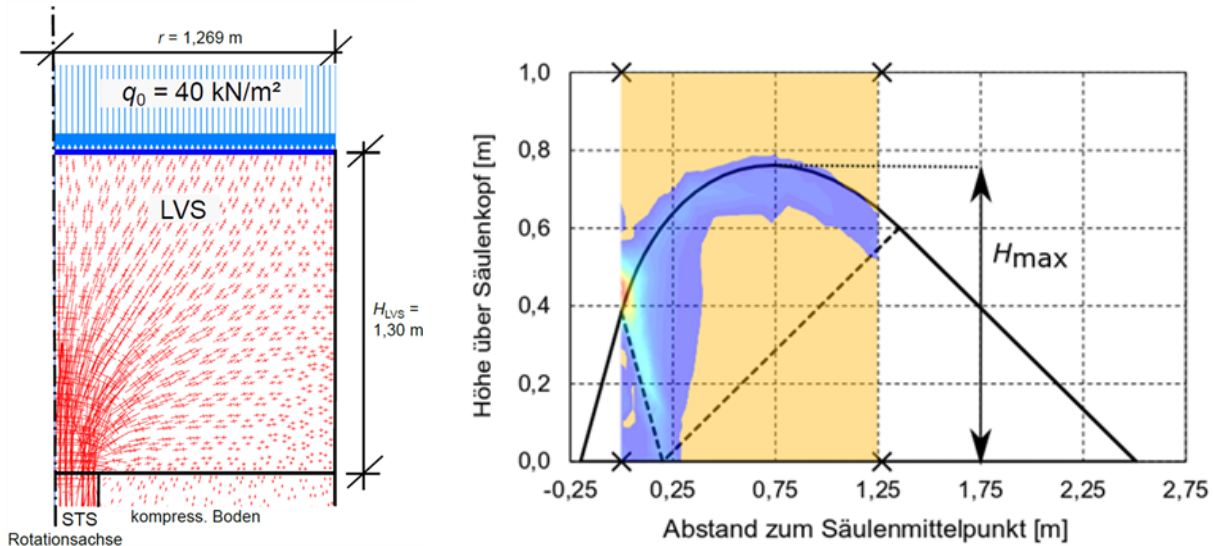


Bild 6: Erkennbare Gewölbewirkung im FE-Modell (links) und Geometrie des Bruchkörpers im Grenzzustand der Tragfähigkeit (rechts) [8]

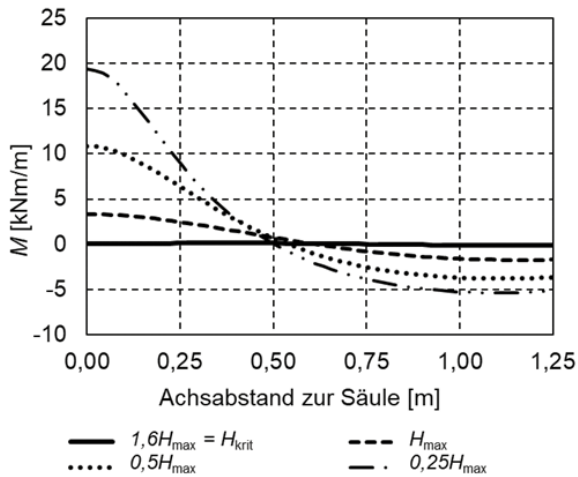


Bild 7: Biegemomente in der Bodenplatte bei Variation der LVS-Mächtigkeit gemäß FE-Berechnung [8]

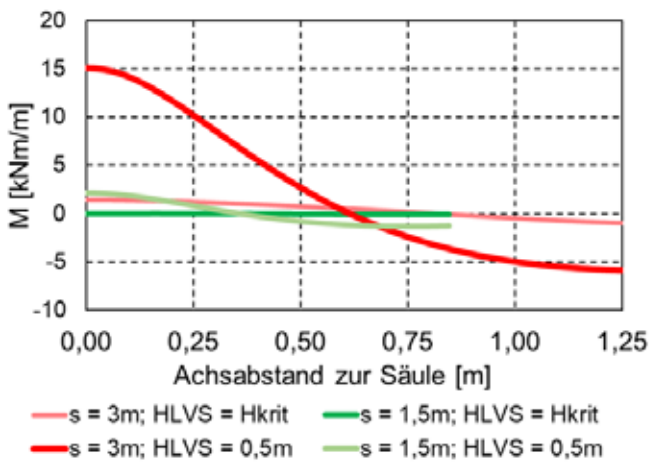


Bild 8: Biegemomente in der Bodenplatte bei Variation des Säulenrasters (© menard)

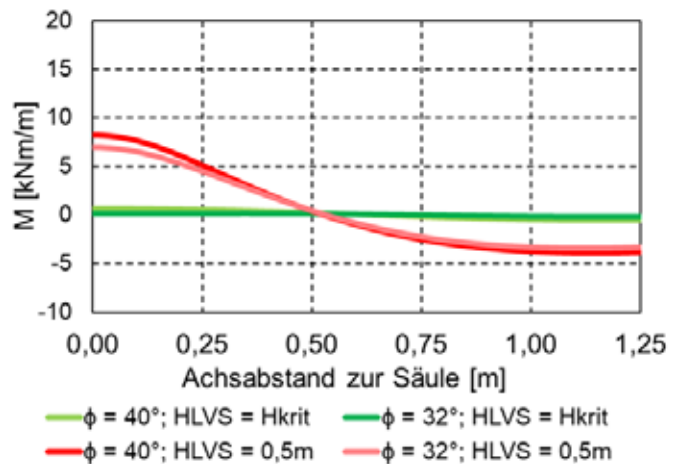


Bild 9: Biegemomente in der Bodenplatte bei Variation des Reibungswinkels des LVS-Materials (© menard)

In beiden Bildern wird deutlich, dass bei einer LVS-Mächtigkeit, die der kritischen Höhe  $H_{krit}$  entspricht, keine nennenswerten Biegemomente innerhalb einer praxisrelevanten Parametervariation eintreten. In der Baupraxis werden jedoch häufig Lastverteilungsschichten eingebaut, die gering mächtiger sind. Die Parametervariation an der 0,5m mächtigen LVS (ca. 40% von  $H_{krit}$ ) zeigt zu berücksichtigende Biegemomente in der Bodenplatte und entsprechende Sensitivität auf die variierten Parameter mit o.g. Rangfolge.

### 7 Zusammenfassung

Die Lastverteilungsschicht über Stabilisierungssäulen ist ein wesentliches Element des kombinierten Säulensystems. Der Einbau eines qualitätsgesicherten Materials unter Kenntnis der Scherparameter ist die Voraussetzung dafür, dass die Spannungen an den Säulenköpfen sicher aufgenommen werden können. Anderenfalls wären plastische Verformungen am Übergang zum Säulenkopf und eine Lastumlagerung auf den umgebenden Boden zu berücksichtigen.

Insbesondere die Mächtigkeit der LVS im Zusammenspiel mit dem Raster der Säulen ist maßgebend dafür, ob zusätzliche Biege-

momente bei der statischen Nachweisführung der aufgelagerten Konstruktion und möglicherweise eine zusätzliche Bewehrung zu berücksichtigen sind.

In der Baupraxis entscheiden häufig wirtschaftliche Aspekte über das Raster und den Durchmesser der Säulen sowie die Qualität und Einbaustärke der LVS. Hierbei sind die aus den Interaktionsmechanismen entstehende Mehrkosten für die Bewehrung der Bodenplatte gegenüber den Einsparungen abzuwägen. Aufgrund der Interaktionsmechanismen gehört dazu unterhalb der kritischen Höhe die passende Bemessung der Bodenplatte. Im Vergleich zu einer Pfahlgründung mit direkter Stützung sind die Platten schlank. Die ggf. erforderliche Bewehrung ist ebenfalls gering, aber bei der Bemessung zu berücksichtigen.

### Literatur

- [1] Neidhart, T. (2016): Stabilisierungssäulen – Abgrenzung, Wirkungsweise und Bemessung in: Vorträge 34. Baugrundtagung. DGGT [Hrsg.], Bielefeld, S. 127–134.
- [2] Irex (2012): Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements. ASIRI National Project.
- [3] Bohn, C.; Vogt, N. (2018): Lasttransfermethode zur Berechnung von Gründungen und Baugrund-

verbesserung mit starren Säulen in: Bautechnik, H. 9, S. 597–606.

- [4] EBGEO (2010): Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen, herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). Verlag Ernst & Sohn, 2. Aufl.
- [5] Zaeske, D. (2001): Zur Wirkungsweise von unbewehrten und mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, H. 10.
- [6] Prandtl, L. (1920): Über die Härte plastischer Körper, Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften, Berichte der mathem.-physikal. Klasse, Berlin, S. 74–85.
- [7] Filz, G.; Sloan, J. (2013): Load distribution on geosynthetic reinforcement in column-supported embankments. In: Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III, S. 1822–1830.
- [8] Tinat, Ch.; Kirstein, J.; Grabe J. (2021): Zur Tragfähigkeit von granularen Lastverteilungsschichten über Stabilisierungssäulen. Geotechnik 44, H. 2, S. 92–101.
- [9] BS 8006-1:2010 (2010) Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
- [10] Iken, M.; Kirstein, J.; Hoyme, H. (2019): Aufgeständerte Gründungspolster mit hochzugfesten Gittern über CMC am Beispiel der Wilhelmshurger Reichstraße mit Bewehrter-Erde.
- [11] Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO). 2., vollständig überarb. und erw. Auflage, April 2010, ISBN: 978-3-433-02950-3.



**Christopher Tinat M.Sc.**  
MENARD GmbH  
[www.menard.gmbh](http://www.menard.gmbh)



**Dipl.-Ing. Johannes Kirstein**  
MENARD GmbH  
[www.menard.gmbh](http://www.menard.gmbh)



**Hannah Brandt M.Sc.**  
TU Braunschweig  
[www.tu-braunschweig.de](http://www.tu-braunschweig.de)