# Bemessung von Nassmörtelsäulen System CMC® hinsichtlich umweltrelevanter Aspekte

B. Knabe<sup>1)</sup>, C. Tinat<sup>1)</sup>, B. Tödter<sup>2)</sup>, M. Rosenberg<sup>2)</sup>

1)Menard GmbH

2)TU Braunschweig

# 1 Einleitung

Der Klimawandel und die damit verbundene globale Erwärmung ist eine Krise, für die insbesondere Industriegesellschaften eine Verantwortung tragen und welche diese vor große Herausforderungen stellt. Die globale Erwärmung ist nachweislich das Resultat aus Emissionen von Treibhausgasen (THG). Die Baubranche verursacht weltweit etwa 8 bis 10 % der Treibhausgasemissionen. Auf europäischer Ebene besteht seit dem Jahr 2021 das Ziel, die THG-Emissionen bis 2030 gegenüber dem Ausstoß von 1990 um 55 % zu mindern und bis 2050 klimaneutral zu sein, was auch im EU-Klimaschutzgesetz gesetzlich verankert ist. Resultierend steigt auch der Handlungsdruck auf die Bauindustrie, Lösungen unter Berücksichtigung von umweltrelevanten Aspekten zu finden.

In der Geotechnik und den damit verbundenen Spezialtiefbauprojekten gewinnen Emissionen von Bauprozessen und Einbaumaterialien mehr und mehr an Bedeutung. Die Variantenwahl und Vergabe erfolgen momentan zum Großteil auf Basis von wirtschaftlichen und technischen Aspekten. Die Einbeziehung von Umweltauswirkungen im Vergabeprozess von Bauleistungen ist jedoch sowohl im privaten als auch im öffentlichen Bau in naher Zukunft zu erwarten. Diese Umweltauswirkungen können zum Beispiel anhand einer Ökobilanz quantifiziert werden, mit der die THG-Emissionen ermittelt werden. Die THG-Emissionen werden durch das globale Erwärmungspotenzial (GWP) in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten angegeben. Dies ist die Maßeinheit zur Vereinheitlichung der Klimawirkung für Treibhausgase. Eine solche Ökobilanz kann bereits in frühen Planungsphasen durchgeführt werden und dann in die Variantenwahl und Dimensionierung einfließen.

Im vorliegenden Artikel wird die Bemessung von Stabilisierungssäulen unter Berücksichtigung dieser Umweltauswirkungen behandelt. Es werden Variantenuntersuchungen an zwei Projektbeispielen vorgestellt. Im ersten Projektbeispiel erfolgt der Vergleich sowie die Optimierung einer Baugrundverbesserung mit Nassmörtelsäulen System CMC im Vergleich zu einer klassischen Bohrpfahlgründung. Dabei wird das Gesamtsystem unter Berücksichtigung der aufgehenden Konstruktion bewertet.

Im zweiten Projektbeispiel werden drei Methoden zur Baugrundverbesserung miteinander verglichen und optimiert. Die Rüttelstopfverdichtung (RSV), DYNIV-Säulen und Nassmörtelsäulen System CMC werden durch eine multidisziplinäre Bewertungsmethode hinsichtlich der Umweltwirkung sowie der technischen Aspekte, wie dem Verformungsverhalten, optimiert. Dieses Projektbeispiel betrachtet nicht nur die Umweltwirkungen durch den Materialverbrauch der Verfahren, sondern bezieht auch den Herstellungsprozess mit ein.

# 2 Nassmörtelsäulen im CMC®-Verfahren

## 2.1 Verfahrensbeschreibung

Unter den in der Einleitung genannten Stabilisierungssäulen (STS) fallen Trockenmörtelsäulen (TMS), Nassmörtelsäulen (NMS), hydraulisch gebundene Stopfsäulen (HSS) und Bodenmischsäulen (BMS) (Neidhart, 2016). Zu den Nassmörtelsäulen (NMS) gehört das CMC-Verfahren, welches seit mehr als 20 Jahren international ausgeführt wird. Die Abkürzung steht für *Controlled Modulus Columns* (Abb. 1).

Das CMC-Verfahren mit Vollverdrängersystem wird aufgrund der erschütterungsarmen Bauausführung und wirtschaftlichen Vorzügen häufig als Alternative zu klassischen Bohrpfahlgründungen oder alternativ zu granularen Säulensystemen (wie Rüttelstopfsäulen) ausgeführt. Abgesehen von einer leichten Aufwölbung an der Oberfläche der Arbeitsebene wird kein Boden gefördert, was auch ein maßgebender Faktor in der Ökobilanz sein kann, weil Bodentransporte eingespart werden.

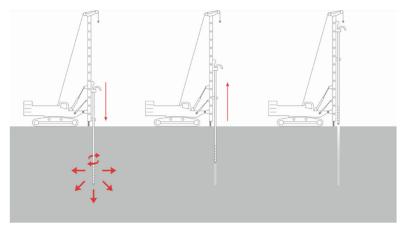


Abb. 1: Herstellung von Nassmörtelsäulen im CMC®-Verfahren

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 Last-Setzungsverhalten sichergestellt. Die Säulenlänge entspricht den lokalen Anforderungen, ohne Überlängen herstellen zu müssen, welche aus Unwägbarkeiten aus dem Baugrund resultierten.

Die CMC-Tragelemente unterscheiden sich hinsichtlich des Durchmessers und der Einbindung von klassischen Pfählen. Diese sind mit Säulendurchmessern zwischen 24 cm und 40 cm vergleichweise schlank. Nach dem Durchteufen der kompressiblen Schichten sind bereits geringe Einbindungen in den tragfähigen Baugrund ausreichend, um die häufige Funktion der Setzungsreduktion des Gebäudes zu realisieren. Die Verdrängung bewirkt eine Verbesserung des umliegenden Bodens und die Erhöhung der Gesamtsteifigkeit.

## 2.2 Tragverhalten des Gesamtsystems

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 Lastverteilungsschicht (LVS) stellt eine starre Lasteinleitung dar. Folglich sind die Verformungen der Bodenplatte gleichmäßig und es treten nahezu keine Differenzsetzungen an der Oberkante der LVS auf.

Aufgrund der starren Bodenplatte treten ggf. Spannungsdifferenzen auf. Die Spannungen in der Bodenplatte ergeben sich in Abhängigkeit der Bettungssteifigkeiten. Entsprechend kommt es aufgrund der höheren Steifigkeit der Säulen zu einer Spannungskonzentration über den Säulenköpfen.

Die Lastverteilungsschicht hat die Funktion, Spannungen zwischen den Säulen auch in den Boden einzuleiten. Durch die Kompression 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 Abb. 2).

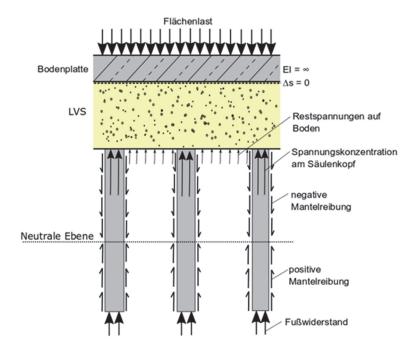


Abb. 2: Tragverhalten des kombinierten Säulensystems mit LVS

## 2.3 Modelle zur Lastaufteilung

Analytische Ansätze zur Bestimmung des Lastanteils von Säulen und Boden werden in den französischen ASIRI-Empfehlungen (Irex, 2012) und beispielsweise von Spirkl/Neidhart (2023) vorgestellt. Für großflächige Säulenraster, wie sie unter Bodenplatten in der Regel ausgeführt werden, wird das System am Modell einer Einheitszelle berechnet. Diese stellt einen Ausschnitt des Säulenfeldes für eine Säule mit dem rasterabhängig zugordneten umgebenden Boden dar.

In Frankreich wird häufig auf die Methode von Glandy/Frossard (2022) zurückgegriffen, welche auch in den ASIRI-Empfehlungen enthalten ist. Die Einheitszelle wird hierbei in die zwei Berechnungsmodelle Säule und Boden eingeteilt. Der Lastanteil auf den Säulen und auf dem Boden wird so lange in einem iterativen Verfahren verändert, bis die Setzungen der beiden Berechnungsmodelle (Säule und Boden) übereinstimmen, d.h. die Bedingung einer gleichmäßigen Setzung bei starrer Lasteinleitung erfüllt ist.

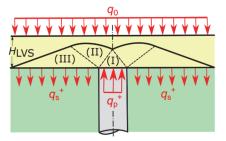
Die Interaktion zwischen den Säulen und dem Boden wird anhand der mobilisierten Scherspannung am Säulenmantel beschrieben, welche aus der Relativverschiebung zwischen Säule und Boden in der jeweiligen Tiefe resultiert. Die Verschiebung der Säule wird dabei anhand der Lasttransferkurven nach Frank/Zhao (1984) basierend auf Pressiometerparametern ermittelt, die gemäß Tinat et al. (2019) eine sehr gute Übereinstimmung mit dem in Feldversuchen gemessenen Last-Setzungsverhalten von Vollverdrängungssäulen nach dem CMC-Verfahren liefern.

Das ebenfalls iterative Verfahren von Bohn (2018) basiert auf den gleichen Grundannahmen zur Lastverteilung. Das Widerstand-Setzungsverhalten der Säulen wird jedoch aus Feldversuchen rein empirisch abgeleiteten Kubikwurzeloder Hyperbelfunktionen beschrieben.

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Lastaufteilung zwischen Säule und Boden stellen numerische Methoden dar.

## 2.4 Bemessung der Lastverteilungsschicht

Ansätze zur Beschreibung der Interaktion zwischen Säulen und LVS im Grenzzustand der Tragfähigkeit basieren auf der klassischen Grundbruchtheorie. Gemäß Tinat et al. (2021) wird von einem klassischen Grundbruchmechanismus ausgegangen, welcher die aufnehmbaren Spannungen am Säulenkopf begrenzt (Kompatibilitätsprüfung). Praktisch handelt es sich um einen umgekehrten Grundbruch.



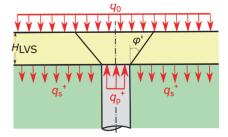


Abb. 3: Grenzspannungen q<sub>p</sub>+ aus potenziellen Versagenszuständen in der LVS

Liegt ein schlaffer Lasteintrag vor, kann es zum Durchstanzen des Säulenkopfes kommen. Dieser Versagenszustand (*Punching*) kann im Fall einer aufliegenden Bodenplatte (starre Lasteinleitung) zwar ausgeschlossen werden, jedoch sind zusätzliche Biegemomente in der aufgelagerten Konstruktion möglich. Der Durchstanzmechanismus bzw. Biegemomente treten erst dann ein, wenn die Mächtigkeit der LVS die sogenannte kritische Höhe H<sub>krit</sub> unterschreitet.

Zur Bestimmung der kritischen Höhe existieren verschiedene, teilweise weit auseinandergehende empirische Ansätze in der Literatur. Verbreitet ist die in den ASIRI-Empfehlungen und auch im British Standard BS 8006 vorgeschlagene Gleichung (1).

$$H_{krit} = 0.7(s - a) \tag{1}$$

s stellt den Achsabstand der Säulen und a die äquivalente Quadratseitenlänge des Säulendurchmesser  $D_c$  dar (a = 0,886Dc). Filz/Sloan (2013) zeigen in experimentellen Untersuchungen, 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 EBGEO für bewehrte Erdkörper auf punktförmigen Traggliedern lassen auf eine kritische Höhe von 0,8(s - D<sub>c</sub>) bei

vorwiegend ruhender Beanspruchung und 2,0(s - D<sub>c</sub>) bei veränderlichen Beanspruchungen schließen.

#### 2.5 Bettung der aufgelagerten Konstruktion

Eine analytische Methode zur Berechnung der Biegemomente in der Bodenplatte wird in den ASIRI-Empfehlungen vorgestellt. Dabei wird die Interaktion zwischen der Platte und dem kombinierten System (Säulen und LVS) durch lineare Federn unterhalb der Platte modelliert. Mit anderen Worten wird die Platte einer Einheitszelle auf die Bettungsbereiche  $k_i$  und  $k_s$  aufgelagert. Der Bettungsmodul  $k_i$  beschreibt den Bereich oberhalb des Säulenkopfes im Radius  $r_k$ . Der Bettungsmodul  $k_s$  wird für den übrige Bereich der Einheitszelle angesetzt:

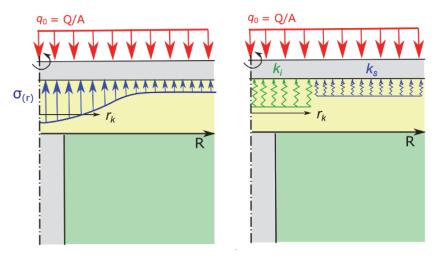


Abb. 4: Schematische Darstellung des Bettungsmodells nach ASIRI

$$0 < r < r_k \qquad \qquad k_{(r)} = k_i \tag{2}$$

$$r_k < r < R \qquad k_{(r)} = k_s \tag{3}$$

Die Bettungsmoduln  $k_i$  und  $k_s$  werden durch die allgemein bekannte Spannungs-Verformungsbeziehung  $\sigma/s$  ermittelt, wobei die Setzungen bei starrer Lasteinleitung in beiden Bereichen identisch sind. Die Spannung zwischen den Säulen  $\sigma_s$  kann mittels Lasttransfermethode, wie oben beschrieben, ermittelt werden. Die mittlere Spannung oberhalb der Säule  $\sigma_i$  kann näherungsweise mit Hilfe des Lasterhaltungsgesetzes der Einheitszelle bestimmt werden, siehe Gl. 4.

$$\sigma_i = (Q - \sigma_s \pi (R - r_k^2)) / (\pi r_k^2) \tag{4}$$

Durch das Modell der unterschiedlichen Bettungsziffern können dann die Biegemomente nach der Theorie der elastisch gebetteten Platte abgeschätzt werden. In der Regel wird die Biegemomentverteilung für die gleichmäßig verteilte Flächenlast und eine kreisförmige Platte mit dem Radius R auf den Federn  $k_i$  über das Intervall  $[0, r_k]$  und  $k_s$  über das Intervall  $[r_k, R]$  berechnet.

Der geometrische Wert  $r_k$  wurde in empirischen Untersuchungen in Abgleich mit numerischen Berechnungen festgelegt. Es zeigt sich, dass die Lastausbreitung von 1/5 auf der sicheren Seite liegt, d.h. in der Regel größere Biegemomente als in genaueren, numerischen Berechnungen ermittelt werden.

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 (Tinat et al., 2021), siehe Abb. 5.

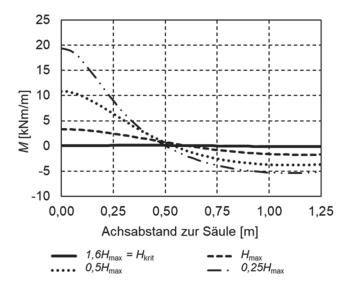


Abb. 5: Biegemomente in der Bodenplatte bei Variation der LVS-Mächtigkeit gemäß 2D FE-Berechnung am rotationssymmetrischen Modell (Tinat et al., 2021)

In mehreren 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 untergeordnet Einfluss, bestimmen jedoch die Grenzspannung, welche am Säulenkopf aufgenommen werden kann, siehe Abschnitt 2.4.

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

- 1. Mächtigkeit H<sub>LVS</sub> der LVS und Raster s der Säulen
- 2. Scherparameter der LVS
- 3. Steifigkeit des Bodens zwischen den Säulen
- 4. Durchmesser der Säule

In Abb. 6 wird deutlich, dass bei einer LVS-Mächtigkeit, die der kritischen Höhe H<sub>krit</sub> entspricht, keine nennenswerten Biegemomente innerhalb einer praxisrelevanten Parametervariation eintreten. In der Baupraxis werden jedoch häufig Lastverteilungsschichten realisiert, die gering mächtiger sind. Die

Parametervariation an der 0,5 m mächtigen LVS (ca. 40% von H<sub>krit</sub>) zeigt zu berücksichtigende Biegemomente in der Bodenplatte und entsprechende Sensitivität auf die variierten Parameter mit o.g. Rangfolge.

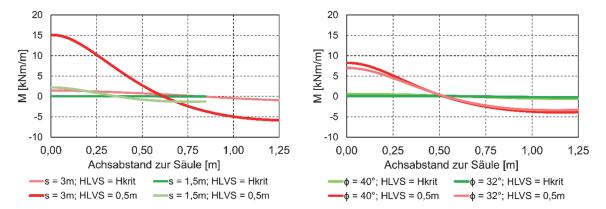


Abb. 6: Biegemomente in der Bodenplatte bei Variation des Säulenrasters (links) und des Reibungswinkels der LVS (rechts) (Tinat et al., 2023)

### 2.6 Umwelttechnische Aspekte von STS

Eine Methode zur Quantifizierung der umwelttechnischen Aspekte von NMS bietet die Ökobilanz. In einer Ökobilanz wird bspw. das Erwärmungspotenzial (GWP) über Äquivalentwerte aus Datenbanken oder Umweltproduktdeklarationen (EPD) berechnet. **EPDs** Umweltwirkungen eines Bauproduktes bzw. Baustoffes je definierter Einheit. Sie ermöglichen, durch die Verifizierung der Daten von unabhängigen Dritten sowie durch ihre Rechtssicherheit, vertrauenswürdige und transparente Aussagen zu der Umweltperformance der betrachteten Baustoffe. In die Ökobilanz fließen sowohl der Materialbedarf als auch die Herstellung (Bauprozess) mit ein.

Die Materialmenge und die Bauzeit werden bestimmt von dem Raster, dem Durchmesser und der Länge der Säulen. Da die Gründung stets in Interkation mit der aufgelagerten Konstruktion steht, ist bei umwelttechnischen Überlegungen das Gesamtsystem zu betrachten. Entsprechend sind auch der Materialbedarf und Herstellungsaufwand von Bodenplatten und Fundamentkörpern in die Analyse einzubeziehen.

Bei NMS hat in der Regel der Beton im Vergleich zu dem Herstellungsprozess einen maßgebenden Anteil am GWP, sodass der Herstellungsprozess bei der Betrachtung eine vergleichsweise untergeordnete Rolle spielt, wie in Abb. 7 bei den *Controlled Modulus Columns* (CMC) zu erkennen ist.

Der Materialbedarf der Bodenplatte wird durch die aufzunehmenden Biegemomente bestimmt. Je nach Größe der Biegemomente ist die Dicke der Bodenplatte und die Bewehrung zu dimensionieren. Diese Biegemomente werden wiederum durch die Einflussparameter in Abschnitt 2.5 bestimmt.

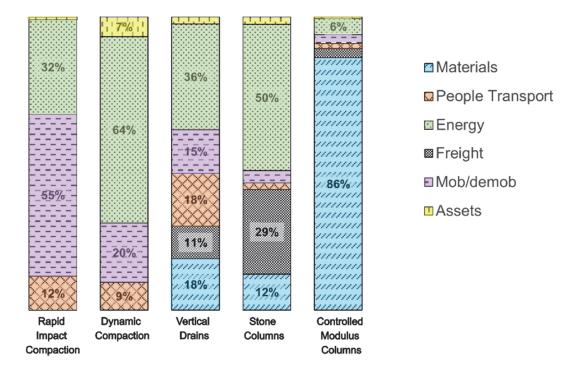


Abb. 7: Prozentuale Aufschlüsslung des GWP von Baugrundverbesserungsverfahren (Bunieski et. al., 2023)

Der maßgebende Faktor für die Höhe des GWP von NMS ist der Materialbedarf, da deren Hauptmaterialien zementgebundene Baustoffe sind. Für eine Reduzierung des GWP ist somit die Optimierung hinsichtlich des Materialbedarfs entscheidend. Wohingegen bei anderen Verfahren, ohne Beton und Stahleinsatz auch der Betrieb der Baumaschinen ein entscheidender Faktor sein kann.

# 3 Ökobilanz von CMC an Projektbeispielen

# 3.1 Projekt Brennstofflager

# 3.1.1 Projektbeschreibung

Bei dem Fallbeispiel handelt es sich um die Gründung der Bodenplatte eines Brennstofflagers für eine Energieerzeugungsanlage. In der Planungsphase wurde eine Bohrpfahlgründung als Basislösung bemessen und auch die auflagernde Bodenplatte entsprechend ausgelegt.

Die Gründung der Bohrpfähle mit bewehrter Bodenplatte wird als Basisvariante mit einem gesamten GWP von 220 t CO<sub>2</sub>eq angesehen. Die Aufteilung des GWP in Beton und Bewehrung der Bodenplatte und der Pfähle ist in Abb. 8 dargestellt.

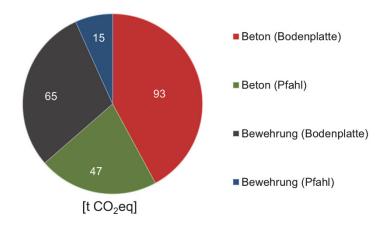


Abb. 8: GWP Bohrpfahl Basisvariante nach Materialbedarf

# 3.1.2 Vergleich Bohrpfähle vs. CMC

Der Lastabtrag von Bohrpfahl- und CMC-Gründung wird in Abb. 9 vereinfacht gegenübergestellt. Beide Verfahren haben gemein, dass die Lasten über die Mantelreibung und den Spitzenwiderstand der Tragelemente in die tieferliegende, tragfähige Bodenschichten abgetragen werden. Jedoch trägt beim CMC-Verfahren ebenso der umgebende Boden einen Teil der Lasten ab und die Auslegung des Säulenrasters wird durch die Gebrauchstauglichkeitsanforderungen der Bodenplatte bestimmt, d.h. max. zulässige Setzungen, weil die Standsicherheit der auch ohne Sondermaßnahmen gegeben ist.

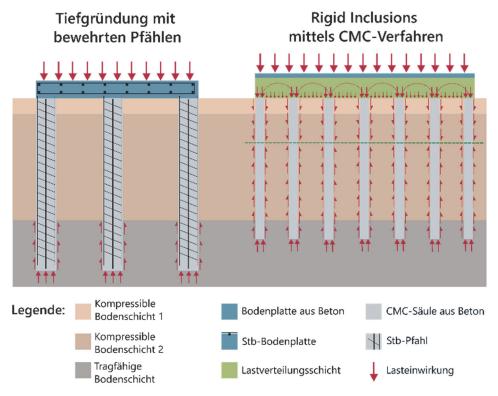


Abb. 9: Schematischer Aufbau einer Bohrpfahlgründung und einer CMC-Säulen-Gründung

Darüber hinaus unterscheiden sich beide Gründungsverfahren hinsichtlich des Verbunds und des Lastabtrags der einzelnen Systemelemente zueinander, der Bodenplattenbewehrung sowie der Durchmesser, Länge und Anzahl der Pfähle bzw. Säulen (Tab. 1).

Tab. 1: Allgemeine Gegenüberstellung technischer Aspekte des Lastabtrages von Bohrpfahl- und CMC-Gründungen

Bohrpfahl-Gründung	CMC-Gründung
Starres System	Kein starres System
Direkte Auflagerung der Platte	Granulare Lastverteilungsschicht
mit Anschlussbewehrung	
Starre, bewehrte Bodenplatte	Starre, schwächer bewehrte oder nicht
	zwingend bewehrte Bodenplatte oberhalb der
	kritischen Höhe
Durchmesser des Pfahls bzw. der Säule: Ø Pfahl > Ø CMC	
Anzahl der	Pfähle < Anzahl der Säulen
Lastabtrag:	Lastabtrag:
100 % über die Pfähle	50 % bis 95 % über die CMC-Säulen,
	5 % bis 50 % über den umgebenden Boden

Bei dem direkten Vergleich der Basislösung zur CMC-Gründung im kombinierten System mit LVS wird ersichtlich, dass das GWP der Bohrpfahlgründung um ein Dreifaches höher ist (Abb. 10). Bei der CMC-Gründung handelt es sich um Säulen mit einem Durchmesser von 28 cm und einem Achsabstand von 2,5 m mit einer LVS Dicke von 0,5 m. Im Rahmen der Bohrpfahlgründung entstehen allein aus dem Betonvolumen der Bodenplatte ein größeres GWP als der Gesamtbedarf der CMC-Gründung.

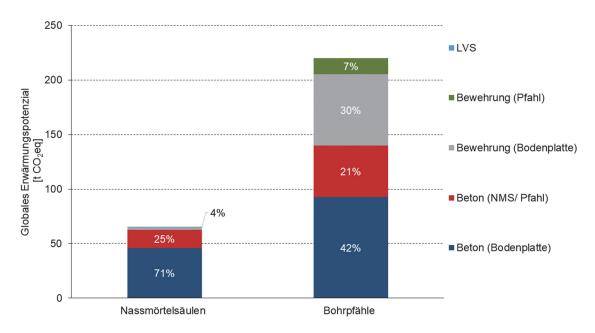


Abb. 10: Vergleich des absoluten GWP der Gründungsaufgabe, untergliedert nach Gründungsverfahren für das Projektbeispiel

Bei einer klassischen Tiefgründung mittels Bohrpfählen weist die Bodenplatte aufgrund der direkten Auflagerung und großen Biegezugspannungen meist einen hohen Bewehrungsgrad auf. Maßgebendes Unterscheidungsmerkmal von Nassmörtelsäulen zu Pfählen ist die nicht vorhandene Verbindung zur aufgelagerten Konstruktion in Form einer Anschlussbewehrung, wodurch eine Optimierung der Bodenplatte ermöglich wird.

### 3.1.3 Optimierung des CMC-Verfahrens

In einer Optimierung des CMC-Verfahrens hinsichtlich des GWP wurde der Einfluss der geometrischen Eingangsparameter untersucht: Höhe der LVS, das Rastermaß und der Säulendurchmesser.

Im ersten Schritt wurde der Einfluss der Höhe der LVS auf die benötigte Bewehrungsmenge der Bodenplatte bewertet. Bei gleichbleibendem Rastermaß und Säulendurchmesser wird die Höhe der LVS variiert und das resultierende Biegemoment in der Bodenplatte nach Abschnitt 2.5 berechnet. Da das Betonvolumen unverändert bleibt, resultieren die Änderungen des GWP allein aus den Bewehrungsmengen. Das GWP des Materials der LVS ist vernachlässigbar klein. In Abb. 11 sind die Biegemomente, die Setzung, die Bewehrungsmenge als auch das GWP in Abhängigkeit von der Dicke der LVS dargestellt.

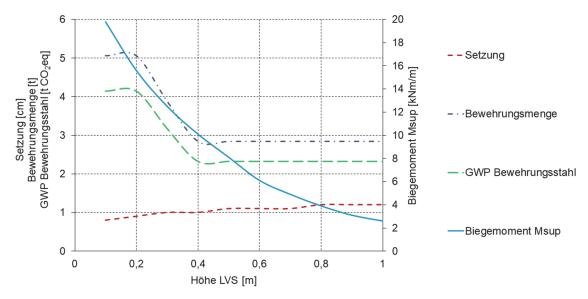


Abb. 11: Einfluss der LVS-Höhe auf das Biegemoment M<sub>sup</sub>, die Bewehrungsmenge und das GWP der CMC-Gründung (Säulendurchmesser von 32 cm und Achsabstand von 2 m)

Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus Abschnitt 2.5, dass mit Zunahme der LVS-Mächtigkeit die Biegemomente in der Bodenplatte und entsprechend der erforderliche Bewehrungsgehalt abnehmen. Die hier betrachteten Höhen der LVS sind kleiner als die kritische Höhe, bei der die Biegemomente in der Bodenplatte vernachlässigbar klein wären und theoretisch unbewehrter Beton (wie Walzbeton) zum Einsatz kommen könnte.

In Abhängigkeit des Biegemomentes verringert sich bei zunehmender Höhe der LVS die Menge des Bewehrungsstahls. Jedoch wird für den in der Studie betrachtete Parametersatz der CMC-Gründung (Säulendurchmesser 32 cm und Achsabstand 2 m) bereits ab einer LVS-Höhe von 0,4 m die kleinste Lagermatte eingesetzt, sodass sich die Menge des Bewehrungsstahls nicht weiter verringert.

Anschließend wurden weitere Varianten berechnet mit verschiedenen Rastermaßen und Säulendurchmessern. Für diese wird das GWP berechnet und in Abhängigkeit von der Setzung in Abb. 12 dargestellt.

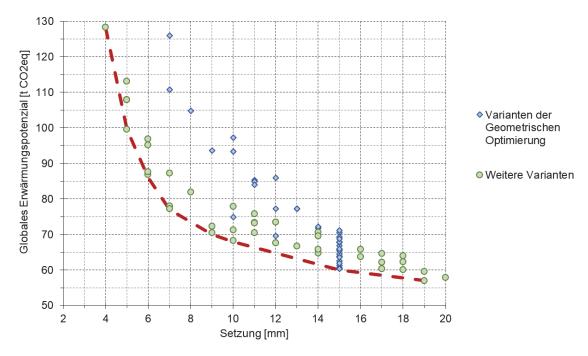


Abb. 12: Zusammenhang zwischen Setzungen und GWP von verschiedenen CMC-Gründungslösungen am Fallbeispiel

Deutlich erkennbar ist der Zusammenhang zwischen GWP und rechnerischer Setzung des Gesamtsystems nach Anwendung der Lasttransfermethode. Für das Projekt wurde ein Setzungskriterium vom 15 mm festgelegt. Bei Einhaltung liegt das kleinstmögliche GWP bei rund 60 t CO<sub>2</sub>eq. Sollen die Setzungen auf 4 mm begrenzt werden, beträgt das GWP wiederum rund 128 t CO<sub>2</sub>eq. Die in Abb. 12 dargestellte rote Linie verbindet die optimalen Lösungen. Deutlich wird, dass der CO<sub>2</sub>-Bedarf der Gründung vom akzeptierten Maß der Restsetzungen bestimmt wird. Diese Entscheidung wird künftig durch den Bauherrn zu treffen sein.

#### 3.2 Projekt Levis

### 3.2.1 Projektbeschreibung

Bei diesem Projektbeispiel handelt es sich um die Gründung eines Logistikzentrums, für die eine Baugrundverbesserungsmaßnahme erforderlich war. In Dorsten-Wulfen entstand auf einem ehemaligen Zechengelände ein Hochregallager für Levi Strauss & Co. Das sog. *Positive Footprint Wearhouse*®

ist ein repräsentatives Beispiel für nachhaltiges Bauen. Für den Bau werden möglichst ressourcenschonende Materialen und Herstellverfahren angewendet und der Rohbau wird nach dem *Cradle-to-Cradle*<sup>®</sup> Leitgedanken realisiert.

Zur Erreichung der erforderlichen Baugrundsteifigkeit im Bereich des Hochregallagers wurde eine Baugrundverbesserung gesucht, die dem *Positive Footprint Wearhouse®* gerecht wird. Hierzu wurde eine multikriterielle Optimierung durchgeführt, welche die drei Baugrundverbesserungsverfahren hinsichtlich Setzung und GWP optimiert. Eine Ausführliche Beschreibung der Optimierung ist in Knabe et al. (2023) veröffentlicht. Es wurden Nassmörtelsäulen, Rüttelstopfverdichtung (RSV) und DYNIV-Säulen betrachtet.

Bei der Optimierung wurden die Säulenlänge, der Säulendurchmesser und der Säulenabstand variiert. Das Optimierungsproblem wird in der Software *Matlab* durch einen eigens entwickelten Algorithmus gelöst. Dieser berechnet jede mögliche Parameterkombination der drei variierenden Parameter. Für jede mögliche Parameterkombination werden die Setzung und das GWP berechnet. Hier wurden neben dem Materialverbrauch auch die Bauprozesse mit in das GWP einbezogen. Da, wie in Abschnitt 2.6 erläutert, bei granularen Säulen nicht nur das Material ausschlaggebend für die Höhe des GWP ist.

# 3.2.2 Vergleich RSV/DYNIV/CMC

Die Ergebnisse der Optimierung lassen sich durch eine sog. Pareto-Front darstellen. Diese enthält alle Lösungen, die sich in einem Kriterium nicht verbessern lassen, ohne das andere Kriterium zu verschlechtern.

Die Abb. 13 zeigt in Blau die Lösungen für jede mögliche Parameterkombination und in Rot hervorgehoben die pareto-optimalen Lösungen in der Pareto-Front für die Rüttelstopfverdichtung.

Die *RSV multi 3* wurde zuvor ohne Optimierung berechnet und stellt keine paretooptimale Lösung dar. Bei fast gleicher Setzung konnten durch die Pink markierte Variante über 200 t CO<sub>2</sub>-Äquivalent eingespart werden.

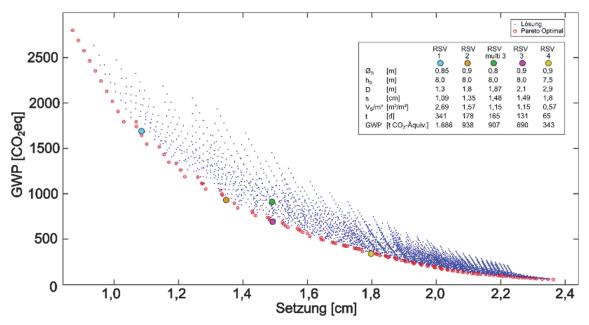


Abb. 13: Ergebnis der Optimierung der Rüttelstopfverdichtung (Knabe et al., 2023) Die Pareto-Fronten der drei Baugrundverbesserungsverfahren aus der entwickelten multikriteriellen Optimierung sind in der Abb. 14 dargestellt.

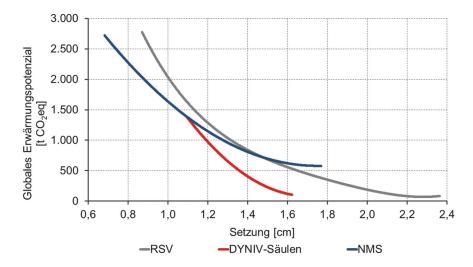


Abb. 14: Gegenüberstellung der Pareto-Fronten

Sowohl mit der RSV als auch mittels DYNIV-Säulen werden granulare Säulen hergestellt, wobei die DYNIV in verdichtbaren Böden zusätzlich eine signifikante Verbesserung der Bodeneigenschaften unterhalb des Säulenfußes erzeugt. An dem Projektbeispiel zeigen die Analyseergebnisse daher Vorteile der DYNIV hinsichtlich der Umweltwirkungen. Bei dem im Rahmen dieser Untersuchung definierten Setzungskriterium von 1,5 cm können die DYNIV-Säulen im Vergleich zu der RSV bis zu 60 % des GWP einsparen. Lässt man größere Setzungen zu, könnten die Umweltwirkungen beider Verfahren weiter reduziert werden. Wie bereits erwähnt, wird diese Entscheidung künftig durch die Bauherren zu treffen sein.

Der Unterschied des GWP der RSV und der NMS ist im Bereich von Setzungen über 1,4 cm lediglich minimal. Das GWP der RSV ist in diesem Bereich geringer. Bei hohen Setzungsanforderungen, d.h. bei einem kleinen Restsetzungsmaß, stellen die NMS das Verfahren mit dem geringeren GWP dar. Die NMS haben den Vorteil, dass diese auf Grund der geringen Verformbarkeit der Einzelsäule trotz des geringen Säulendurchmesser auch bei einem vergleichsweise großen Rastermaß die Setzung auf ein Minimum reduzieren können.

## 4 Fazit

Bei der Bewertung des CO<sub>2</sub>-Bedarfs von Nassmörtelsäulen ist es essenziell, das Gesamtsystem inkl. Lastverteilungsschicht und Bodenplatte zu betrachteten. Dabei ist die Dicke der Bodenplatte und die Bewehrung so zu dimensionieren, dass die auftretenden Biegemomente aus der Gründung aufgenommen werden können.

Die Lastverteilungsschicht über Stabilisierungssäulen ist ein wesentliches Element des kombinierten Säulensystems. Insbesondere die Mächtigkeit der LVS ist im Zusammenspiel mit dem Säulenabstand maßgebend dafür, ob zusätzliche Biegemomente 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 und schwächer bewehrt.

Im Vergleich zu granularen Baugrundverbesserungen schneiden die NMS vor allem bei sehr hohen Setzungsanforderungen gut ab, da sie eine deutlich höhere Eigensteifigkeit haben und so die Setzung auf ein Minimum auch bei vergleichsweise großen Säulenrastern und kleinem Durchmesser der Säule reduzieren können.

# 5 Literatur

- Bohn, C., Vogt, N., 2018. Lasttransfermethode zur Berechnung von Gründungen und Baugrundverbesserung mit starren Säulen. Bautechnik, H. 9, S. 597-606.
- Bunieski, S., Boyd, G., Isenegger, N., 2023. *Methodology to calculate and compare Embodied Carbon associated with Ground Improvement techniques*. Geo Saskatoon 2023, Saskatoon, Canada.

- BS 8006-1:2010, 2010. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills.
- EBGEO, 2010. Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunsstoffen. Herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). Verlag Ernst & Sohn, 2. Aufl.
- Filz, G., Sloan, J., 2013. *Load distribution on geosynthetic reinforcement in column-sup-ported embankments*. Geo-Congress 2013: Stability and Performance of Slopes and Embankments III, S. 1822-1830.
- Frank, R., Zhao, S.-R., 1982. Estimation par les paramètres pressiometriques de l'enforcement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. Bulletin de liaison des LPC, Nr. 119, S. 17-24.
- Glandy M., Frossard A., 2002. *Justification d'une fondation superficielle sur un sol renforcé*. Annales des l'IBTP, Nr. 1, S. 45-53.
- Irex, 2012. Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements. ASIRI National Project.
- Knabe, B., Tinat, C., Rosenberg, M., 2023. *Klimabezogene Optimierung von Baugrundverbesserungen Multidisziplinärer Ansatz zur Verknüpfung von Ökobilanz und technischen Aspekten*. Geotechnik, 46: 89-99. https://doi.org/10.1002/gete.202200019
- Neidhart, T., 2016. *Stabilisierungssäulen Abgrenzung, Wirkungsweise und Bemessung*. Vorträge 34. Baugrundtagung. DGGT [Hrsg.], Bielefeld, S. 127-134.
- Racinais, J., Maucotel, F., Varaksin, S., Hamidi, B., 2017. Beneficial Use of Pressuremeter Tests for Accurate Modelling by Finite Elements of a Rigid Inclusion Ground Improvement Solution. Proceedings of ICSMGE, Seoul, S. 2635-2638.
- Spirkl F., Neidhart T., 2022. Lastaufteilung in Lastverteilungsschichten über Stabilisierungssäulen. 13. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Fachtagung über aktuelle Herausforderungen der Geotechnik, Ostfildern.
- Tinat, C., Diedenhoven, L., Chaumeny, J.-L., 2019. Anwendung einer Lasttransfermethode auf Basis der Ménard-Pressiometrie zur Bemessung von Vollverdrängungssäulen System CMC validiert an Probebelastungen. Mitteilungen des Institutes und Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt, H. 105, Darmstadt, S. 4-17.

- Tinat, C., Kirstein, J., Grabe J., 2021. *Zur Tragfähigkeit von granularen Lastverteilungsschichten über Stabilisierungssäulen*. Geotechnik 44, H. 2, S. 92-101.
- Tinat C., Kirstein, J., Brandt, H., 2023. Bemessung von Lastverteilungsschichten über Stabilisierungssäulen zur Optimierung von Bodenplatten. Konstruktiver Ingenierbau (KI), 04/23, S.5-10.