



Baugrundverbesserung nach dem CSV-Verfahren

Wolfgang Reitmeier

Baugrundverbesserung nach dem CSV-Verfahren

Labortechnische Untersuchungsergebnisse mit Empfehlungen zur Abschätzung des durch Trockenmörtelsäulen möglichen Verbesserungsgrades

Flachgründungen auf verbessertem Baugrund werden in der Praxis immer häufiger als technische und wirtschaftliche Gründungsalternative zu Tiefgründungen ausgeführt. Zur Quantifizierung des möglichen Verbesserungsgrades durch den Wasserentzug von Trockenmörtelsäulen, hergestellt nach dem CSV-Verfahren, wurden an der Hochschule Konstanz umfangreiche Laborversuche durchgeführt. Ziel war es, für die Praxis Bemessungsempfehlungen zu entwickeln, auf deren Grundlage der Verbesserungsgrad analytisch abgeschätzt werden kann. Nach Erläuterung der Versuchsergebnisse wird mit einem Zahlenbeispiel ein einfaches Bemessungsverfahren vorgestellt. Neben dem durch den Wasserentzug verursachten Verbesserungsgrad kann hierin auch der durch die Verdrängung resultierende Verbesserungsanteil mit quantitativer Einschränkung berücksichtigt werden. Im Ergebnis ist eine numerische Abschätzung des Verbesserungsgrades allein mithilfe von klassischen bodenmechanischen Ansätzen möglich.

Keywords Baugrundverbesserung; CSV-Verfahren; Trockenmörtelsäulen; Verbesserungsgrad; Porenzahländerung; Wasserentzug; Bezugsvolumen

Ground improvement by the CSV method – Recommendations – based on laboratory findings – how to estimate the degree of improvement of soil properties by dry mortar pillars

Increasingly, shallow foundations on improved ground are implemented as technical and economical alternatives to deep foundations. In order to quantify the degree of possible improvement by dehydrating dry mortar columns with the CSV method, extensive laboratory tests were performed at the University of Konstanz. The goal was to develop design recommendations for practical use enabling the analytical estimation of the degree of possible improvement. After discussing the experimental results, a simple design method is introduced using a numerical example. Besides the improvement caused by dehydration, the degree of improvement due to displacement can also be considered with a quantitative restriction. As a result, a numerical estimate of the degree of improvement is possible by solely using classical soil mechanics approaches.

Keywords ground improvement; CSV soil stabilization system; dry mortar columns; degree of improvement; change of void ratio; dehydration; used volume

1 Einleitung

Baugrundverbesserungen werden mit steigender Tendenz zur technischen und wirtschaftlichen Optimierung des Verformungsverhaltens von Flachgründungen ausgeführt.

Im Vergleich zu einer Pfahlgründung können bei Flachgründungen Bauwerklasten ohne aufwändige Lastverteilungen in den Baugrund eingeleitet werden. In der Regel werden Stabilisierungssäulen als Setzungsbremse zur Steuerung des Verformungsverhaltens lastproportional unter höher belasteten Gebäudebereichen angeordnet. Hinsichtlich des Trag- und Verformungsverhaltens wird nach Merkblatt der DGGT zwischen zwei ideellen Grenzfällen unterschieden. Während schwimmende Säulen ihre Lastanteile ausschließlich über Mantelreibung in den Baugrund einleiten, reduziert sich bei aufstehenden Säulen der Anteil der Mantelreibung bis hin zu einer überwiegenden Lastabtragung über den Säulenfuß. Die Übergänge beider Grenzfälle sind i. A. fließend.

Baugrundverbesserungsmethoden gelten als duktil und beinhalten damit ein geringeres Risiko bezüglich der Streuung von Boden- und Materialparametern. In der Praxis wurden in den letzten Jahrzehnten unterschiedliche Verfahren entwickelt. Zu beachten ist, dass infolge der technischen Unterschiede Erfahrungswerte nicht unbeschweren zwischen den Verfahren übertragbar sind. Sowohl in den Anwendungsmöglichkeiten als auch bei der Bemessung der Säulenabstände und erforderlichen Säulenlänge bestehen teils gravierende Unterschiede.

Bei der Baugrundverbesserung nach dem CSV-Verfahren werden Trockenmörtelsäulen im Vollverdrängungsverfahren in den Baugrund eingebracht.

Wie bei allen Vollverdrängungsverfahren wird der Boden in unmittelbarer Umgebung der Säule zunächst plastifiziert.

Bei wassergesättigten Böden und hohen Sättigungsgraden werden durch die Verdichtungswirkung im unmittelbaren Umfeld der Säule Porenwasserüberdrücke erzeugt. Diese können bei Trockenmörtelsäulen in sehr kurzen Zeitspannen wieder abgebaut werden. Gegenüber der Einbringung eines angefeuchteten oder nahezu flüssigen Mörtels werden die durch den Verdrängungsprozess ent-

*) Corresponding author: reitmeier@htwg-konstanz.de
Submitted for review: 15 March 2013
Revised: 13 June 2013
Accepted for publication: 20 June 2013

stehenden Porenwasserüberdrücke bereits kurz nach der Herstellung deutlich verringert.

Die Saugspannung der Säule bewirkt in der Umgebung der Säule eine Erhöhung der effektiven Spannungen, die neben der Entwässerung des Bodens in unmittelbarer Säulennähe auch zu einer Verdichtung des Bodens führt. Weiterhin vergrößert sich infolge der horizontalen Verspannungswirkung das Spannungsverhältnis σ'_h/σ'_z , was sowohl die Scherfestigkeit als auch das Kriechverhalten des Bodens günstig beeinflusst.

Zur Entwicklung von hohen Druckfestigkeiten ($q_u > 20 \text{ N/mm}^2$) ist es erforderlich, den Trockenmörtel mit einem möglichst hohen Verdichtungsgrad und ohne jegliche Bodeneinschlüsse einzubauen. Bei höherer Lagerungsdichte erhöht sich auch die Kapillarität des eingebauten Trockenmörtels und damit das für den Verbesserungsprozess des Bodens erforderliche Saugspannungsvermögen.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse der an der Hochschule Konstanz in den Jahren 2009 bis 2012 im Rahmen von Master- und Bachelorarbeiten durchgeführten Laborversuche vorgestellt.

Ergänzend werden für Trockenmörtelsäulen Berechnungsansätze für die Abschätzung des Verbesserungsgrades abgeleitet und anhand einfacher Beispiele zahlenmäßig erläutert.

2 Beschreibung des Versuchsstandes

Die Laboruntersuchungen konzentrieren sich ausschließlich auf den bodenmechanischen Verbesserungseffekt durch den Wasserentzug der Trockenmörtelsäule. Daher wurde zur Vermeidung von Verdrängungs- und Verdichtungswirkungen der Versuchsboden um ein Platzhalterrohr eingebaut.

Die raumzeitlichen Veränderungen der Saugspannungen (Porenwasserunterdrücke) um eine Trockenmörtelsäule können mithilfe von mechanischen Tensiometern gemessen werden. Ein Tensiometer besteht aus einem Glasrohr, an dessen unterem Ende eine poröse Keramikspitze eingelassen ist. Dieses Rohr wird in den Versuchsboden eingedrückt und mit destilliertem Wasser teilgefüllt. Am oberen Ende ist eine Membran angeordnet. Diese Membran kann für die einzelnen Messablesungen mit einer Kanüle durchstochen werden, ohne den dahinter befindlichen Unter- oder Überdruck zu stören.

Der Versuchsstand besteht aus einem massiven glasfaserverstärkten Kunststoffrohr (GFK-Rohr) mit einem Innendurchmesser von 68,7 cm und einer Höhe von 60,4 cm. In der Achse des Versuchsstandes wurde zunächst ein Platzhalterrohr angeordnet, das die Aufgabe hatte, den für den Einbau des Trockenmörtels erforderlichen Hohlraum zur Verfügung zu stellen, ohne dass der Boden

beim Einbau des Trockenmörtels horizontal verdichtet wird.

Der Außendurchmesser des Platzhalterrohrs wurde mit 12,5 cm gewählt. Dies entspricht etwa dem kleinstmöglichen Durchmesser für im CSV-Verfahren erstellte Trockenmörtelsäulen in der Praxis.

Der Versuchsboden wurde aus einem Seeton aufbereitet, der aus einer in unmittelbarer Nähe zur Hochschule gelegenen Baustelle (Neubau B33) gewonnen wurde.

Bodenmechanische Kenndaten des Ausgangsbodens:

Fließgrenze $w_L = 54,8\%$
 Ausrollgrenze $w_P = 25,3\%$
 Wassergehalt $w_n = 45,0\%$
 Konsistenz $I_c = 0,33$
 (Bodengruppe TA nach DIN 18196)

Nach einer ersten Versuchsreihe mit dem in situ entnommenen Boden [1] wurde der Boden auf einen Wassergehalt von ca. 2,5% an der Luft getrocknet und durch Siebung homogenisiert [2].

Nach Aufbereitung bzw. Wiederaufbereitung von Wasser auf einen Wassergehalt von $w_n = 46,6\%$ wurde damit gegenüber der ersten Versuchsreihe ein in seiner Zusammensetzung noch homogenerer Ausgangsboden erzeugt.

Durch den Trocknungs- und Befeuchtungsprozess haben sich die bodenmechanischen Kenndaten, wie nachfolgend angegeben, verändert:

Fließgrenze $w_L = 44,9\%$
 Ausrollgrenze $w_P = 22,2\%$
 (Bodengruppe TM nach DIN 18196)

Zur Vermeidung von Adhäsionsspannungen zwischen dem Bodenkörper und der Innenfläche des Versuchsstandes



Bild 1 Versuchsstand mit Platzhalter (KG-Rohr) und bereits eingebautem Versuchsboden
 Test station with placeholder (PVC-pipe) and prepared soil

des wurde eine wasserundurchlässige Folie mit geotextiler Hinterfüllung eingelegt. Damit war gewährleistet, dass sich der Boden während des Schrumpfungsprozesses von der Wandung lösen kann und somit keine Ablösungen zwischen Säulenoberfläche und Boden eintreten.

Nach dem Einbau der Tensiometer (Bild 2) in zwei unterschiedlichen Höhenlagen wurde der zeitliche Saugspannungsverlauf in diskreten Messpunkten (Bild 3) bis zum



Bild 2 Versuchsstand mit Tensiometern
Test station with tensiometers

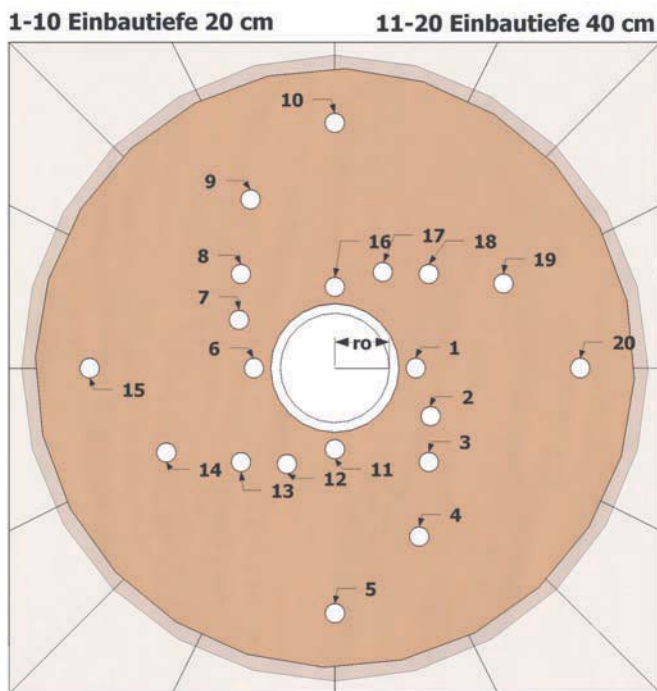


Bild 3 Versetzter Einbau der Tensiometer zur Minimierung der gegenseitigen Beeinflussung; Tensiometer Nr. 1 bis 10 (Einbautiefe 20 cm); Tensiometer Nr. 11 bis 20 (Einbautiefe 40 cm)
Staggered installation of tensiometers minimizing the mutual interference; Tensiometer No. 1 up to 10 (depth 20 cm); Tensiometer No. 11 up to 20 (depth 40 cm)

Erreichen eines nahezu stationären Zustandes nach ca. 83 Tagen gemessen.

Mit dem Einbau des Trockenmörtels startet der eigentliche Versuch.

Unter Beobachtung der Saugspannungsveränderungen wurde das Platzhalterrohr in kleinen Abschnitten von ca. 3 cm gezogen und der Trockenmörtel, entsprechend der in der Praxis erreichbaren Dichte, eingebaut.

In den Bildern 5 und 6 ist der sich sofort einstellende Anstieg der Porenwasserunterdrücke nach Einbringung der Trockenmörtelsäule zu sehen. (Nicht näher untersucht wurde der Anstieg der Saugspannungen vor und nach Einbau der Trockenmörtelsäule, der sich aus dem Abbau der Porenwasserüberdrücke ergibt, die durch den Einbau der Tensiometer entstehen bzw. entstanden sind.)

In den Bildern 7 und 8 ist die raumzeitliche Entwicklung der Saugspannungen in dem die CSV-Säulen umgebenden Boden aufgetragen.

Deutlich zu sehen ist der unmittelbar nach dem Einbau des Trockenmörtels um die Säule sich aufbauende Maximalwert der Porenwasserunterdrücke. Nach ca. zwei Tagen beginnt der Ausgleich der Saugspannungen innerhalb des gesamten Bodenkörpers. Die Bodenverbesserung erfolgt damit in zwei zeitlich aufeinander folgenden Phasen.

Während bei dem Versuch mit vorlaufender Homogenisierung des Bodens radialsymmetrisch eine einheitliche Ausbreitung gemessen wurde, waren bei der ersten Versuchsreihe ohne Aufbereitung des Bodens radialsymme-



Bild 4 Ausgebaute Trockenmörtelsäule (die gewellte Oberfläche entspricht den einzelnen Arbeitsschritten beim Einbau und Verdichten des Trockenmörtels)
Stripped dry mortar column (the rippled surface reflects the stages of fabricating and compacting dry mortar)

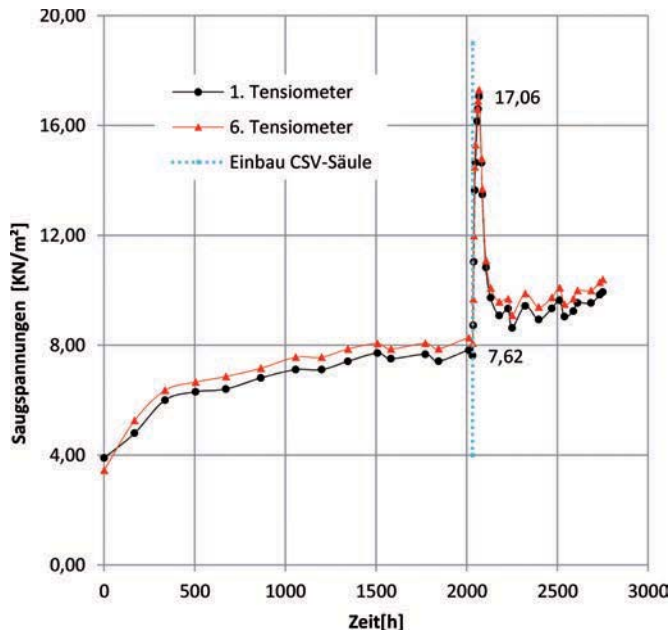


Bild 5 Zeitlicher Saugspannungsverlauf (Einbautiefe = 0,20 m) für den horizontalen Abstand von $r/r_0 = 1,5$; Tensiometer Nr. 1 und Nr. 6
Temporal process of soil water tension (depth = 0,20 m) for the horizontal distance of $r/r_0 = 1,5$; Tensiometer No. 1 and No. 6

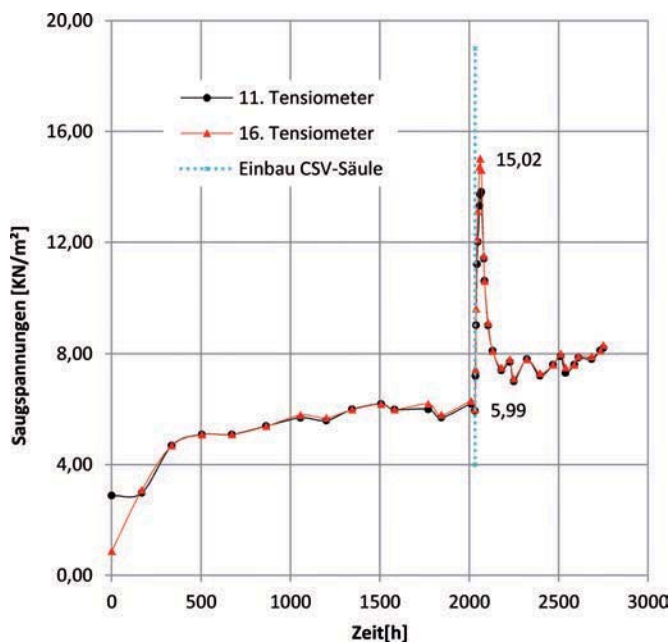


Bild 6 Zeitlicher Saugspannungsverlauf (Einbautiefe = 0,40 m) für den horizontalen Abstand von $r/r_0 = 1,5$; Tensiometer Nr. 11 und Nr. 16
Temporal process of soil water tension (depth = 0,40 m) for the horizontal distance of $r/r_0 = 1,5$; Tensiometer No. 11 and No. 16

trisch unterschiedliche Messwerte zu beobachten. Betrachtet man die Saugspannungen energetisch und wichtet den innerhalb eines Quadranten radialen Energieeintrag über die Volumina, ergeben sich für alle vier Quadranten einheitliche Werte.

Beim Ausbau des Bodens hatte sich gezeigt, dass infolge geringster Inhomogenitäten die radiale Saugspannungsausbreitung messbar beeinflusst wird. Die Versuchsergebnisse im Vergleich zeigen, dass sich die Porenwasserun-

terdrücke radial aufbauen, infolge von Schwankungen der Homogenität des Bodens aber nicht zwangsläufig radialsymmetrisch gleich sein müssen.

Das im Weiteren vorgestellte Berechnungsverfahren beruht auf einer Massenbilanzbetrachtung und zeigt eine gute Übereinstimmung von unterschiedlichen Betrachtungsweisen.

Am Beispiel der aus Regressionsbeziehungen bekannten Abhängigkeit zwischen dem Wassergehalt und der undrained Scherfestigkeit des Bodens kann gezeigt werden, dass die abgeleiteten Verbesserungsgrade in der gleichen Größenordnung liegen wie die Abschätzung des Verbesserungsgrades aus der Änderung der Porenzahl ψ .

3 Empfehlung zur Abschätzung des Verbesserungsgrades bei Trockenmörtelsäulen

Der bei Trockenmörtelsäulen mögliche Verbesserungsgrad setzt sich grundsätzlich aus zwei Anteilen zusammen. Neben der Reduzierung des Wassergehaltes wird durch die Materialeinbringung im Vollverdrängungsverfahren eine horizontale Verspannung und Verdichtung des Baugrundes bewirkt. Allerdings müssen für die Verbesserung der durch den Verdrängungsvorgang möglichen horizontalen Verdichtungswirkung besondere Randbedingungen vorliegen.

Eine bleibende Verdichtung des Bodens durch Verdrängungsvorgänge ist nur bei teilgesättigten Böden ($S_r < 100\%$) und unter einer ausreichenden Auflast möglich.

Kurz vor Erreichen des infolge der Vollverdrängung um die Säule entstehenden Sättigungszustandes entstehen radial um die Stabilisierungssäule Porenwasserüberdrücke, sodass es bei weiterem Materialeintrag zu volumenkonstanten Formänderungen kommt. Diese Formänderungen wirken sich als Hebungen aus und können erfahrungsgemäß auf Baustellen eine Größenordnung von bis zu 10 cm erreichen.

Einschnürungen oder Verengungen des Säulenquerschnittes werden infolge des höheren Scherwiderstands des Trockengranulates im Vergleich zum umgebenden Boden bei CSV-Säulen weitgehend vermieden.

Bei Verwendung von pumpfähigem Beton können in benachbarten und noch nicht verfestigten Säulen Verdrückungen des Säulenquerschnittes eintreten, die an der Oberfläche durch einen Anstieg des noch flüssigen Betons zu erkennen sind.

Der durch Saugspannungen entstehende Porenwasserunterdruck hat bereits unmittelbar nach Herstellung der Trockenmörtelsäule einen stabilisierenden Einfluss auf die Scherfestigkeit des Bodens. Infolge der Unterdruckwirkung erhöht sich die Scherfestigkeit des Bodens um

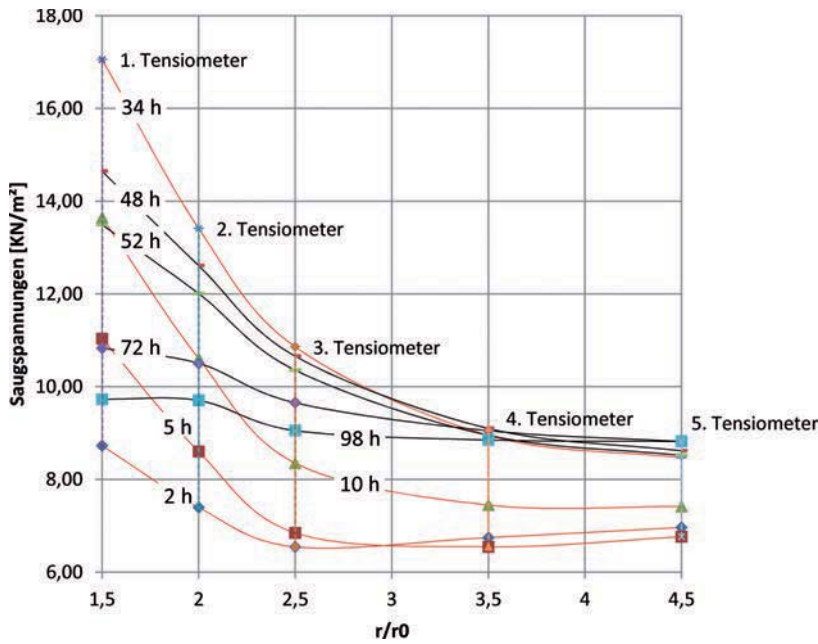


Bild 7 Raumzeitlicher Verlauf der Saugspannungen während der Abbindephase des Trockenmörtels (Tiefe = 0,20 m, Tensiometer Nr. 1 bis 5)
Spatiotemporal process of the soil water tension during the setting of the dry mortar (depth = 0.20 m, tensiometer No. 1 to 5)

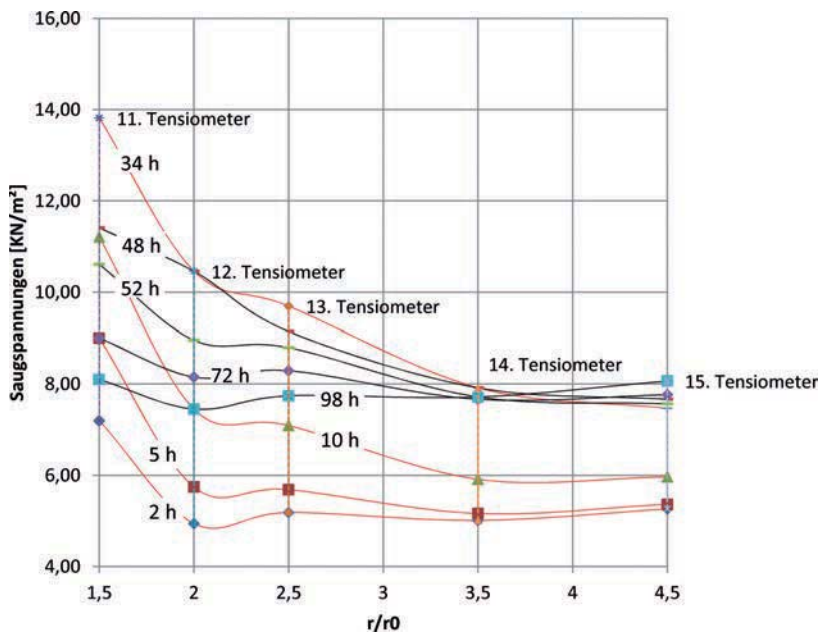


Bild 8 Raumzeitlicher Verlauf der Saugspannungen während der Abbindephase des Trockenmörtels (Tiefe = 0,40 m, Tensiometer Nr. 11 bis 15)
Spatiotemporal process of the soil water tension during the setting of the dry mortar (depth = 0.40 m, tensiometer No. 11 to 15)

die Säule und damit auch die mögliche Scherbeanspruchung des Bodens. Bei kurzen Warte- bzw. Liegezeiten kann dies z.B. für die Befahrung mit Baustellenfahrzeugen ein weiterer Vorteil sein.

Grundsätzlich werden in gesättigten Böden bei allen Vollverdrängungsverfahren Porenwasserüberdrücke erzeugt. Infolge einer temporären Reduzierung der Scherfestigkeit vermindern sich daher unmittelbar nach Herstellung auch die Tragreserven. Aus diesem Grunde sind historische Bauverfahren, wie z.B. Spickpfahlgründungen, wie sie auch im Bodenseeraum seit Jahrhunderten erfolgreich angewendet wurden, nur dann auch heute noch einsetz-

bar, wenn die Belastungsgeschwindigkeit dem Abbau der Porenwasserüberdrücke Rechnung trägt.

Bei Böden mit einem hohen Saugspannungspotenzial, wie es z.B. auch bei ausgeprägt plastischen Böden zu erwarten ist, wird durch den Verdichtungsvorgang der die Säule unmittelbar umgebende Boden zunächst gesättigt. Bis zum Erreichen eines Teilsättigungszustandes ist damit eine Wasserabgabe an den Trockenmörtel möglich.

Der Befeuchtungsprozess kann mit Erreichen eines Gleichgewichtszustandes der Saugspannungen von Säule und Boden zum Stillstand kommen. Allerdings bewirkt

dann im zeitlichen Nachlauf die Diffusion eine weitere Befeuchtung des Trockenmörtels.

In der Praxis zeigt sich dieser Zwischenzustand in Form einer ausgehärteten Kruste von einigen Zentimetern mit eingeschlossenem, noch nicht vollständig befeuchtem Kern. Die bei Teilsättigungszuständen enthaltene Bodenluft kann infolge der Durchlässigkeit des Trockenmörtels abgeführt werden.

Für eine rechnerische Abschätzung des Verbesserungsgrades ist eine möglichst genaue Kenntnis der Bodenkennwerte erforderlich. Insbesondere die Frage des Sättigungsgrades spielt für die Ermittlung der maximal möglichen Verdichtungswirkung eine zentrale Rolle.

Im Einzelnen werden benötigt:

Fließgrenze w_L
Ausrollgrenze w_P
Wassergehalt w_n
Dichte ρ bzw. Wichte γ

Die Korndichte ρ_s kann ggf. aus Erfahrungswerten, der Kompressionsbeiwert C_c

auch aus den nachfolgend angegebenen Regressionsbeziehungen abgeschätzt werden.

Regressionsbeziehung zur Abschätzung von C_c :

$$C_c = N \cdot (w_L - 10) \quad \text{mit } N = 0,007 \text{ für gestörte und } N = 0,009 \text{ für ungestörte Böden}$$

w_L in % (SKEMPTON, 1944)

$$C_c = 0,5 \cdot I_P \cdot \rho_s \quad I_P \text{ als Dezimalbruch, } \rho_s \text{ in g/cm}^3 \text{ (WROTH/WOOD, 1978)}$$

$$C_c = 0,0126 \cdot w_n - 0,162 \quad w_n \text{ in \% (LO/LOVELL, 1983)}$$

$$C_c = 0,496 \cdot e_a - 0,195 \quad e_a - \text{Anfangsporenzahl (LO/LOVELL, 1983)}$$

Mithilfe der bekannten bodenmechanischen Beziehungen werden die nachfolgenden Kennwerte berechnet:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w_n} \quad n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad S_r = \frac{w_n \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w}$$

Bezogen auf ein rechnerisches Bezugsvolumen V^* für die Massenbilanzbetrachtung werden die Feuchtmasse m_f , die Trockenmasse m_d und die Masse des darin enthaltenen Wassers m_w ermittelt.

Alle Versuche wurden mit einer qualitätsüberwachten Trockenmörtelmischung CSV-Beton C 20/25 der

Firma Hasit mit den nachfolgenden Kenndaten durchgeführt:

Schüttdichte 1,7–1,8 kg/dm³

Frishmörteldichte 2,2 bis 2,3 kg/dm³ *)

*) Die unter Baustellenbedingungen gerätetechnisch erreichbaren Dichten liegen erfahrungsgemäß an der oberen Grenze des angegebenen Streuungsbereiches.

Mörteldichte 2,0 bis 2,09 kg/dm³ (Trockenmörteldichte)
Wasserfeststoffwert 10 %

Aus der Masse des innerhalb des Bezugsvolumens eingebrachten Trockenmörtels m_{Tr} errechnet sich der gesamte Wasserentzug $m_{\Delta w}$ mit 10 % der Masse m_{Tr} . Damit können der Wassergehalt und die Konsistenz des Bodens vor und nach Einbringung der Stabilisierungssäulen berechnet werden.

Alternativ ist eine Abschätzung des Verbesserungsgrades für die undrained Scherfestigkeit c_u über eine Regressionsbeziehung zwischen der Konsistenz I_c und c_u oder die Änderung der Porenzahl $\psi = \Delta V/V^*$ möglich.

Regressionsbeziehungen zwischen dem Wassergehalt w_n bzw. der Konsistenz I_c eines Bodens und der zugeordneten undrained Kohäsion c_u wurden z. B. von KIEKBUSCH (1999) [3] für unterschiedliche Plastizitätsbereiche veröffentlicht.

Die in KIEKBUSCH angegebenen Untersuchungsergebnisse wurden im Rahmen von drei Bachelorarbeiten an der Hochschule Konstanz in Versuchsreihen an zwei leichtplastischen Böden der Bodengruppe TL und an einem ausgeprägt plastischem Boden der Bodengruppe TA nach DIN 18196 bestätigt und ergänzt.

Die Ergebnisse (LUTZ/RÜDE/LUCHT) [4, 5, 6] sind zusammen mit den Kurven von KIEKBUSCH und den von KEZDY 1969 veröffentlichten Erfahrungswerten in Bild 9 dargestellt.

Eine Abschätzung des Verbesserungsgrades durch die Reduzierung der Porenzahl kann anhand der Gln. (1) und (2) [7] erfolgen.

$$\eta = \frac{E_s}{E_{s0}} = (1 - \psi) \cdot 10^{\frac{\psi \cdot (1 + e_0)}{C_c}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{c_u}{c_{u0}} = 10^{\frac{\psi \cdot (1 + e_0)}{C_c}} \quad (2)$$

Es ist zu beachten, dass bei Wassergehalten nahe der Fließgrenze keine horizontale Verdichtung möglich ist. Der bei der Säuleneinbringung entstehende Verdrängungseffekt führt bei volumenkonstanten Formänderungsbedingungen zu einer Hebung und darf nicht in der Abschätzung des

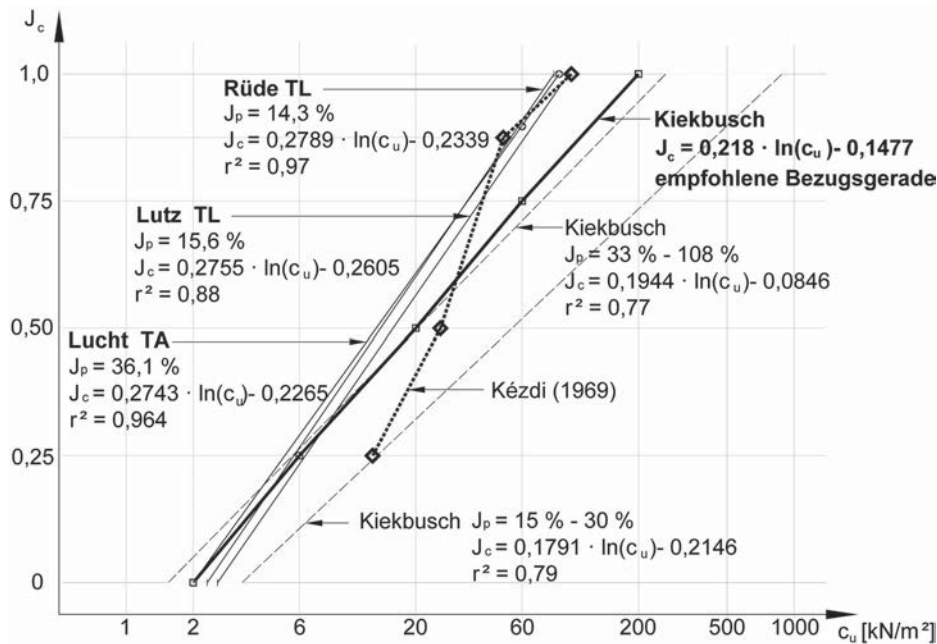


Bild 9 Ergebnisse von Regressionsbetrachtungen nach KIEKBUSCH et al.
Results of regression analysis according to KIEKBUSCH et al.

Verbesserungsgrades mit angesetzt werden. Der Grad der möglichen Reduzierung des Luftporenvolumens ist abhängig von der Überlagerungshöhe, d. h. der Tiefe unter GOK und dem lokal vorhandenen Sättigungsgrad S_r .

Als Kriterium für den rechnerisch maximal zu berücksichtigenden Verdichtungsanteil wird vorgeschlagen, die Porenzahländerung auf den vor Einbringung des Trockenmörtels vorhandenen Luftporenanteil n_a zu begrenzen.

$$n_a = 1 - \rho_d \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w_n}{\rho_w} \right) \text{ für } \psi = \frac{\Delta V}{V^*} > n_a \text{ gilt } n_a$$

Der aus den Anteilen Wasserentzug und Porenzahländerung resultierende Verbesserungsgrad kann multiplikativ verknüpft werden.

$$\eta_{res.} = \eta_{\Delta w} \cdot \eta_{\Delta e} \quad (3)$$

4 Beispielhafte Berechnung des Verbesserungsgrades

4.1 Geometrische Abmessungen und bodenmechanische Kennwerte

Die beispielhafte Vorstellung einer numerischen Abschätzung des möglichen Verbesserungsgrades erfolgt für einen Boden mit den nachfolgenden Kennwerten:

- Fließgrenze $w_L = 44,9\%$
- Ausrollgrenze $w_P = 22,7\%$
- Wassergehalt $w_n = 30,2\%$
- Konsistenz $I_c = 0,66$ (weich)
- Korndichte $\rho_s = 2,70 \text{ g/cm}^3$
- Feuchtdichte $\rho = 1,89 \text{ g/cm}^3$
- Trockenmörteldichte $\rho_{Tr} = 2,05 \text{ g/cm}^3$
(Bodengruppe TM nach DIN 18196)

Zur Ermittlung des Steifemoduls E_s und des Kompressionsbeiwertes C_c wurde an einer gestörten Probe ein Kompressionsversuch mit den nachfolgend angegebenen Kennwerten durchgeführt:

- Einbauhöhe $h_a = 19,1 \text{ mm}$
- Probendurchmesser $\varnothing = 70 \text{ mm}$
- Einbauwassergehalt $w_0 = 47,33\%$
- Ausbauwassergehalt $w_a = 27,71\%$

Abgeleitete Beziehungen (Bild 11):

$$s' = \frac{\Delta h}{h_a} = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \quad e = \frac{w}{S_r} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$$\text{für } S_r = 100\% \text{ gilt } w = e \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s}$$

$$e_0 = w_0 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad \text{bzw.} \quad e_1 = w_1 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

$$\text{damit folgt } s' = \frac{w_0 - w_1}{\frac{\rho_w}{\rho_s} + w_0}$$

Für die Anfangsporenzahl e_0 folgt mit $S_r = 100\%$
 $e_0 = 0,4733 \cdot \frac{2,70}{1,0} = 1,2779$

Die dem Ausbauwassergehalt w_a entsprechende bezogene Setzung s' berechnet sich mit

$$s' = \frac{0,4733 - 0,2771}{\frac{1,0}{2,7} + 0,4733} = 0,2326$$

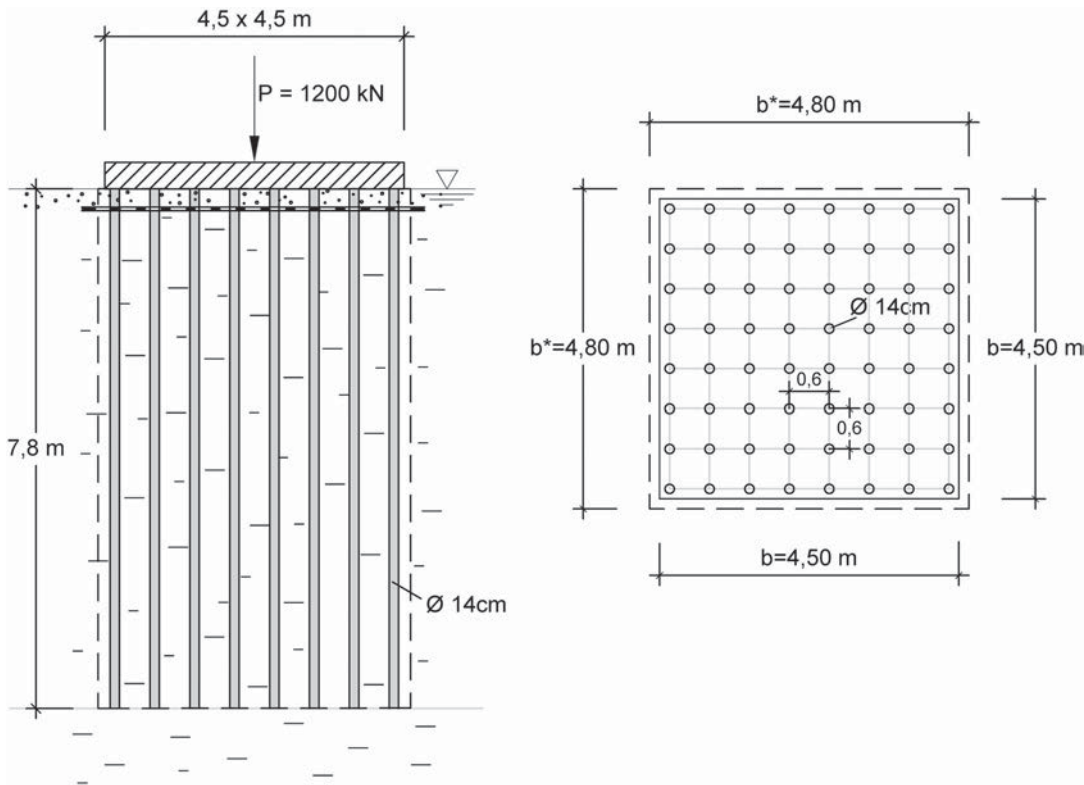


Bild 10 Stabilisierungsraaster und geometrische Abmessung einer schwimmenden Gründung
Grid of stabilization and geometrical measurement of a floating foundation

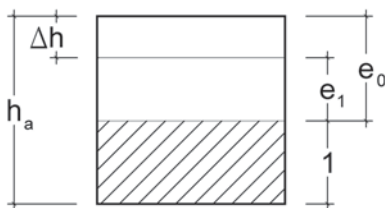


Bild 11 Einheitswürfel
Unit cube

Für die Porenzahl beim Ausbau e_a folgt mit $S_r = 100\%$

$$e_a = 0,2771 \cdot \frac{2,70}{1,0} = 0,7482$$

Näherungsweise kann durch Interpolation aus der Versuchskurve (w_0 und w_a) der für den Wassergehalt von $w_n = 30,2\%$ zugehörige Spannungsbereich mit $\sigma \approx 190 \text{ kN/m}^2$ abgeschätzt werden.

In Bild 12 sind die Versuchsergebnisse mit der Abschätzung des Spannungsbereichs zur Ermittlung des in situ anstehenden Steifemoduls $E_s = f(\sigma) = f(w_n)$ dargestellt.

Für den spannungsabhängigen Steifemodul $E_s(\sigma)$ nach dem Potenzansatz von OHDE folgt mit den Versuchsdaten des Kompressionsversuchs bei $\sigma = 190 \text{ kN/m}^2$

$$E_s = \sigma_{at} \cdot v_e \left(\frac{\sigma}{\sigma_{at}} \right)^{w_e} = 100 \cdot 14,585 \left(\frac{190}{100} \right)^{0,864} = 2.540 \text{ kN/m}^2$$

Die Berechnung des Verbesserungsgrades erfolgt für ein Bezugsvolumen, innerhalb dessen die bodenmechanischen Eigenschaften als homogen verteilt angenommen werden. Für eine numerische Abschätzung werden diese Randbedingungen durch die im Versuch gemessenen Saugspannungsverteilungen ausreichend genau bestätigt.

Bei einem einheitlichen quadratischen Säulenraaster mit dem Säulenabstand a und dem Säulendurchmesser \varnothing wird das Minimum aus Gl. (4) und (5) für die Abschätzung des Bezugsvolumens herangezogen $b^* = \min(b_1^*, b_2^*)$.

$$b_1^* = n \cdot a + a \quad (4)$$

$$b_2^* = n \cdot a + 6 \cdot \varnothing \quad (5)$$

n Anzahl der Säulenzwischenräume

Für das in Bild 10 dargestellte quadratische Einzelfundament sollen als Setzungsbremse 64 Trockenmörtelsäulen bis in eine einheitliche Tiefe von 7,80 m unter GOK ausgeführt werden.

Die weiteren Berechnungen erfolgen für einen Säulendurchmesser \varnothing von 14 cm.

4.2 Ermittlung des Bezugsvolumens

$$b_1^* = 7 \cdot 0,60 \text{ m} + 0,6 \text{ m} = 4,80 \text{ m}$$

$$b_2^* = 7 \cdot 0,60 \text{ m} + 6 \cdot 0,14 = 5,04 \text{ m}$$

maßgebend ist der kleinere Wert: $b^* = 4,80 \text{ m}$

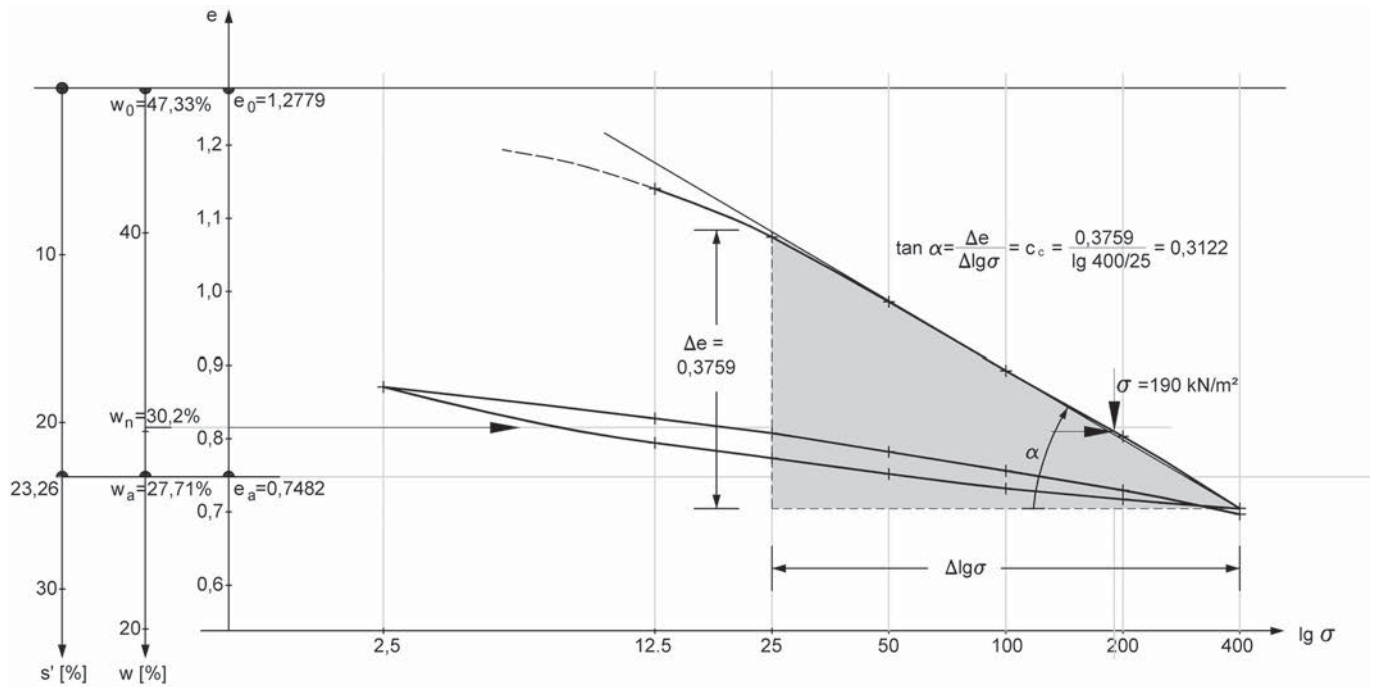


Bild 12 Kompressionsversuch
Compression test

$$V^* = b^{*2} \cdot l \cdot (4,80 \text{ m})^2 \cdot 7,80 \text{ m} = 179,71 \text{ m}^3$$

Mit der von KIEKBUSCH [3] vorgeschlagenen Regressionsbeziehung

4.3 Ermittlung der Wassergehaltsänderung

eingebauter Trockenmörtel

$$m_{Tr} = 0,07^2 \cdot \pi \cdot 7,80 \cdot 64 \cdot 2050,0 \text{ kg/m}^3 = 15753,4 \text{ kg}$$

$$I_c = 0,218 \cdot \ln(c_u) - 0,1477 \quad \text{und} \quad c_u = e^{\frac{I_c + 0,1477}{0,218}}$$

folgt für den Verbesserungsgrad, resultierend allein aus dem Wasserentzug,

gesamter Wasserentzug 10 % von m_{Tr}

$$m_{\Delta w} = 10 \% \cdot 15753,4 = 1575,3 \text{ kg}$$

$$\frac{c_u}{c_{u0}} = e^{\frac{I_c - I_{c0}}{0,218}} = e^{\frac{0,6892 - 0,6622}{0,218}} = 1,132 \text{ - fach}$$

$$m_f = V^* \cdot \rho = 179,71 \cdot 1890,0 \text{ kg/m}^3 = 339651,9 \text{ kg}$$

$$m_d = \frac{m_f}{1 + w} = \frac{339651,9}{1,302} = 260869,4 \text{ kg}$$

4.5 Abschätzung des Verbesserungsgrades aus der Porenzahländerung $\psi_{\Delta w}$ durch Wasserentzug

$$m_w = m_f - m_d = 78782,5 \text{ kg}$$

$$\psi_{\Delta w} = \frac{\Delta V}{V^*} = \frac{m_{\Delta w}}{\rho_w \cdot V^*} = \frac{1,5753}{1,0 \cdot 179,71} = 0,00877$$

$$m_w \text{ (nach Einbau des Trockenmörtels)} \\ = m_w - m_{\Delta w} = 77207,2 \text{ kg}$$

Verbesserung des Steifemoduls E_s und der undrännierten Kohäsion c_u , berechnet aus der Änderung der Porenzahl [7].

$$w_n \text{ (nach Einbau des Trockenmörtels)} \\ = \frac{77207,2}{260869,4} = 0,2960$$

$$\text{mit } \rho_d = \frac{1,89}{1,302} = 1,452 \text{ g/cm}^3 \quad n_0 = 1 - \frac{1,452}{2,70} = 0,4622$$

4.4 Änderung der Konsistenz und der undrännierten Scherfestigkeit c_u , abgeleitet aus Regressionsbeziehungen von $I_c \leftrightarrow c_u$

$$I_{c0}(w = 30,2\%) = \frac{44,9 - 30,2}{44,9 - 22,7} = 0,6622$$

$$e_0 = \frac{0,4622}{1 - 0,4622} = 0,8594$$

$$I_c(w = 29,6\%) = \frac{44,9 - 29,6}{44,9 - 22,7} = 0,6892$$

$$S_r = \frac{0,302 \cdot 2,70}{0,8594 \cdot 1,0} = 0,9488 \quad \text{und} \quad \frac{E_s}{E_{s0}} = (1 - \psi) \cdot 10^{\frac{\psi \cdot (1 + e_0)}{C_c}}$$

$$\frac{c_u}{c_{u0}} = 10^{\frac{\psi \cdot (1 + e_0)}{C_c}} \quad \text{folgt}$$

$$\frac{c_u}{c_{u0}} = 10^{\frac{0,00877 \cdot (1 + 0,8594)}{0,3122}} = 1,128 - \text{fach}$$

$$\frac{E_s}{E_{s0}} = (1 - 0,00877) \cdot 10^{\frac{0,00877 \cdot (1 + 0,8594)}{0,3122}} = 1,118 - \text{fach}$$

4.6 Verbesserungsgrad für E_s infolge der horizontalen Verdichtung (Verdrängungseinfluss), abgeschätzt aus der Porenzahländerung $\psi_{\Delta e}$

Für diese Abschätzung ist vorab zu prüfen, ob der Sättigungsgrad $S_r < 100\%$ und damit der vorhandene Luftporenanteil n_a ausreichend groß für eine Verringerung der Porenzahl zur Verfügung steht. Bei Verdrängungsanteilen über dem verfügbaren Luftporenanteil n_a bewirkt der darüber liegende Materialeintrag (Vollverdrängung) Hebungen der Baugrubensohle.

$$n_a = 1 - \rho_d \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w_n}{\rho_w} \right) = 1 - 1,452 \left(\frac{1}{2,70} + \frac{0,302}{1,00} \right) = 0,0237$$

$$\psi = \frac{\Delta V}{V^*} = \frac{0,07^2 \cdot \pi \cdot 7,8 \cdot 64}{179,71} = 0,0428 > n_a = 0,0237$$

→ n_a ist maßgebend

$$\frac{E_s}{E_{s0}} = (1 - \psi) \cdot 10^{\frac{\psi \cdot (1 + e_0)}{C_c}} = (1 - 0,0237) \cdot 10^{\frac{0,0237 \cdot (1 + 0,8694)}{0,3122}} = 1,351 - \text{fach}$$

4.7 Zusammengesetzter Verbesserungsgrad aus Wasserentzug und Verdichtung

$$\eta_{res.(E_s)} = 1,12 \cdot 1,35 = 1,51 - \text{fach}$$

4.8 Abschätzung eines Ersatzsteifemoduls aus dem Verformungswiderstand des Bodens und der Säulen für den „oberen 2/3-Bereich“ des Säulenwaldes

Sofern die Verformungsberechnung nach der Ersatzflächenmethode durchgeführt wird, kann die aus verbesserten Boden und Steifigkeit der Stabilisierungssäulen im oberen 2/3-Bereich des Säulenwaldes resultierende Ersatzsteifigkeit anhand der nachfolgenden Gl. (6) [9] abgeschätzt werden.

Gl. (6) setzt voraus, dass 100% der Säulenlasten allein über Mantelreibung im „unteren Drittel“ des Säulenwaldes in den Baugrund übertragen werden können.

$$E_{Ersatz} = \frac{A_B \cdot \eta_{\Delta w} \cdot E_s + A_s \cdot E_{Säule}}{A_B + A_s}$$

A_B Fläche des Bodens ($A_B = A^* = b^{*2}$) abzüglich der Fläche der Stabilisierungssäulen

A_s Querschnittsfläche aller Stabilisierungssäulen innerhalb der Bezugsfläche A^*

E_s Steifemodul des Bodens

$\eta_{\Delta w}$ Verbesserungsgrad aus Wasserentzug (ohne Verdrängungsanteil)

Im oberen 2/3-Bereich des Säulenwaldes kann infolge der zu geringen Auflast der Verbesserungsgrad aus dem Verdichtungsanteil nicht quantifiziert werden und sollte daher, auf der sicheren Seite liegend, vernachlässigt werden.

$E_{Säule}$ E-Modul der Trockenmörtelsäule im abge bundenen Zustand

Erfahrungswert: $1000 \text{ MN/m}^2 < E_{Säule} < 10000 \text{ MN/m}^2$

$$A_s = 0,07^2 \pi \cdot 64 = 0,9852 \text{ m}^2 \quad A_B = 4,8^2 - A_s = 22,0548 \text{ m}^2$$

$$E_{Ersatz} = \frac{22,0548 \cdot 1,12 \cdot 2,54 + 0,9852 \cdot 4000}{4,8^2} = 173,8 \text{ MN/m}^2 \quad (6)$$

4.9 Ergänzende Hinweise für die baupraktische Anwendung

Gegenüber den im Beispiel gewählten vereinfachten Randbedingungen sind in der Praxis in der Regel die Baugrundverhältnisse weder homogen noch isotrop.

Das vorgestellte Bemessungsverfahren kann aber auch auf einen geschichteten Baugrund übertragen werden.

Bei der Berechnung des „bodenmechanischen“ Verbesserungsgrades wird nur der nach Merkblatt der DGGT bezeichnete Zustand B1 (Granulat) betrachtet. Die durch den Aushärteprozess nach wenigen Tagen sich entwickelnde Druckfestigkeit q_u (Zustand B2) verändert auch die Lasteinleitung in den Baugrund.

Während im Zustand B1 vorrangig die oberen Bodenhorizonte beansprucht werden, werden bei ausreichender Druckfestigkeit der Säulen die in der Fundamentaufstandsebene „aufgenommenen“ Lastanteile in tiefere Bodenhorizonte eingeleitet. Auch für diesen Fall kann näherungsweise eine konventionelle Setzungsberechnung nach DIN 4019 mithilfe einer in der Tiefe von 2/3-l anzusetzenden Ersatzfläche durchgeführt werden.

Gegenüber einem unverbesserten Baugrund mit einer rechnerischen Endsetzung von 6,4 cm reduziert sich im vorliegenden Zahlenbeispiel die zu erwartende Verformung im Zustand B1 (granularer Zustand des Trockenmörtels – Anfangszustand) auf 5,7 cm und im Zustand B2 (abgebundener Trockenmörtel – Endzustand) auf 3,6 cm.

Die angegebene Gesamtverformung setzt sich rechnerisch aus den drei Einzelabschnitten zusammen – oberer 2/3-Säulenbereich mit Ersatzsteifemodul E_{Ersatz} ,

unterer 1/3-Säulenbereich mit Verbesserung von E_s infolge Wasserentzugs und Porenzahländerung und dem bis zur Grenztiefe nach DIN 4019 anstehenden unverbesserten Boden unter der Säuleneinbindetiefe von 7,8 m bis 8,85 m. (Die Grenztiefe wurde berechnet für eine Lasteinleitung in der Tiefe der Ersatzfläche von 5,2 m unter GOK.)

Werden die Stabilisierungssäulen bis zur Grenztiefe (DIN 4019) von 8,85 m ausgeführt, lässt sich die rechnerische Endverformung bis auf 2,8 cm reduzieren.

Literatur

- [1] KROLITZKI, S.: *Entwicklung der Porenwasserspannungen infolge des Einbaus einer Trockenmörtelsäule in Anlehnung an das CSV-Verfahren in Konstanzer Seeton*. Master-Thesis HTWG Konstanz, 2011.
- [2] OEING-HANHOFF, M.: *Labortechnische Untersuchung der Saugspannungsverteilung um eine Trockenmörtelsäule in aufbereitetem Seeton*. Bachelorarbeit HTWG Konstanz, 2011.
- [3] KIEKBUSCH, M.: *Beziehungen zwischen Konsistenzzahl und undrännierter Scherfestigkeit*. Bautechnik 76 (1999), Heft 9, S. 775–784.
- [4] LUTZ, B.: *Versuchstechnische Ermittlung der Beziehungen zwischen Wassergehalten, undrännierter Scherfestigkeit, einaxialer Druckfestigkeit und ggf. messbaren elektrischen Widerständen an aufbereiteten bindigen Böden*. Bachelorarbeit HTWG Konstanz, 2009.
- [5] RÜDE, B.: *Versuchstechnische Ermittlung der Beziehungen zwischen Wassergehalten, undrännierter Scherfestigkeit, einaxialer Druckfestigkeit an aufbereiteten bindigen Böden*. Bachelorarbeit HTWG Konstanz, 2010.
- [6] LUCHT, C.: *Versuchstechnische Ermittlung der Beziehungen zwischen Wassergehalten, undrännierter Scherfestigkeit und einaxialer Druckfestigkeit an aufbereiteten bindigen Böden*. Bachelorarbeit HTWG Konstanz, 2012.
- [7] REITMEIER, W.; ET AL.: *Baugrundverbesserung – Wirkungsweise, Unterschiede, Qualitätssicherungsaspekte mit ausgewählten Beispielen aus Baden-Württemberg*. Vorträge des 4. Kolloquiums – Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 2004.
- [8] Merkblatt für die Herstellung: *Bemessung und Qualitätssicherung von Stabilisierungssäulen zur Untergrundverbesserung Teil I – CSV-Verfahren DGGT*. 2002.
- [9] ALBER, D.: Persönliche Mitteilung, 2011.
- [10] LAUMER, R.; FÜHRER, A.: *Bodenstabilisierung nach dem CSV-Verfahren*. Bautechnik 87 (2010), Heft 12, S. A29 und A30.
- [11] REITMEIER, W.; ALBER, D.: *Wirkungsweise, Einsatzmöglichkeiten und praktische Erfahrungen bei der Untergrundverbesserung nach dem CSV-Verfahren*. Vorträge des 2. Kolloquiums – Bauen in Boden und Fels, Technische Akademie Esslingen, 2000.
- [12] EL-MOSSALLAMY, Y.: *Stabilization of Soil with Displacement Columns of Dry Sand-Cement/Lime Mix, Construction Methods, Physical Behavior and Numerical Modelling*. XVth International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 27–31 August, Istanbul, 2001.
- [13] MAISCH, K.: *Bodenstabilisierung durch Einpressen von Trockengranulaten*. Dissertation IBF Universität Karlsruhe, Heft 149, 2000.

Autor
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Reitmeier
Hochschule Konstanz mit Öffentlicher Prüfstelle
für Baustoffe und Geotechnik
Vorsitzender des Unterausschusses Trockenmörtelsäulen der DGGT
Ebenfeld 17
84307 Eggenfelden
reitmeier@htwg-konstanz.de



Laumer GmbH & Co.
CSV Bodenstabilisierung KG
Bahnhofstraße 8
D-84323 Massing
Tel. (0 87 24) 88-9 00
Fax (0 87 24) 88-8 60
info@laumer.de
www.laumer.de

