

Horizontalspannungsänderungen verursacht durch Vibrationsverdichtung von rolligen Böden (Teil 1)

K. R. Massarsch

ZUSAMMENFASSUNG Ein wichtiges Ziel der Vibrationsverdichtung von rolligen Böden ist die Verminderung von Setzungen. Der Verdichtungseffekt kann durch die Drucksonde (CPT) und das Flachdilatometer (DMT) gemessen werden. Diese beiden Verfahren zeigen auch die Veränderung der Horizontalspannung, die durch die Vibrationsverdichtung von rolligen Böden entstehen. Eine erhöhte Horizontalspannung bedeutet, dass der verdichtete Boden vorbelastet wurde. Die Veränderung der Bodenspannungen durch die Vibrationsverdichtung wird beschrieben. Bei der Setzungsberechnung von verdichteten Böden muss der Vorbelastungseffekt berücksichtigt werden. In der Literatur vorgeschlagene empirische Beziehungen zwischen dem Vorbelastungsgrad und der Änderung der Horizontalspannung, ausgehend von CPT Versuchen, wurden mit neu ausgewerteten DMT-Versuchen in einer Druckkammer in Teil 1 des Beitrags verglichen. Mittels empirischer Beziehungen kann der Vorbelastungsgrad in rolligen Böden mit ausreichend Genauigkeit abgeschätzt werden. Fünf in der Literatur beschriebene Vibrationsverdichtungsprojekte, bei denen unterschiedliche Verdichtungsverfahren zur Anwendung kamen, werden darauf aufbauend in Teil 2 des Beitrags neu analysiert.

STICHWÖRTER

Bemessung, Grundbau, Bodenverbesserung, Gründungstechnik

1 Einleitung

Im vorliegenden Beitrag wird zuerst beschrieben, wie die Drucksonde (CPT) oder das Dilatometer (DMT) bei Verdichtungsprojekten verwendet werden können. Aus CPT- und DMT-Messungen kann die Veränderung der Horizontalspannung ermittelt werden. Ausgehend von der Erhöhung der Horizontalspannung können der Vorbelastungsgrad und die Vorbelastungsspannung berechnet werden. DMT-Versuche in einer Druckkammer wurden neu ausgewertet, um diese mit empirischen Beziehungen zwischen dem horizontalen Effektivdruck und der Vorbelastungsspannung zu vergleichen. In Teil 2 werden die veröffentlichten Daten von fünf Vibrationsverdichtungsprojekten neu analysiert, wobei unterschiedliche Vibrationsverdichtungsverfahren zur Anwendung kamen: Fallgewicht (Polen), Vibroflotation (Polen), VibroWing (Schweden), Resonanzverdichtung mit steifer Verdichtungsbohle (Kanada) und Resonanzverdichtung mit flexibler Verdichtungsbohle (Belgien). Die Änderung der Horizontalspannung wurden mittels CPT- und DMT-Messung er-

Preloading of granular soils caused by deep vibratory compaction (Part 1)

ABSTRACT An important objective of deep vibratory compaction is to reduce settlement. The compaction effect can be monitored by cone penetrometer (CPT) and dilatometer (DMT) tests. Both methods can be used to determine changes in horizontal stresses. Relationships between changes in horizontal stresses and overconsolidation ratio have been proposed in the literature. The results of DMT investigations in a calibration chamber have been re-analyzed in part 1 of the paper and show good agreement with existing empirical correlations based on CPT. An increase in horizontal stress implies that the soil has been preloaded. In part 2 of the paper five case histories were re-analyzed, where CPT and DMT investigations were reported before and after treatment. In spite of the variable soil conditions and different compaction methods, deep vibratory compaction resulted in all cases in a marked increase of horizontal stresses. This increase implies that the treated soil deposit has been preloaded, an effect which should be considered in settlement analyses.

mittelt. Wie in Teil 2 gezeigt wird, kann daraus der Vorbelastungsgrad nach der Vibrationsverdichtung ermittelt werden.

2 Ermittlung der Horizontalspannungsänderung im Boden

Bei Vibrationsverdichtungsprojekten werden als Verdichtungsziele oft der Sondierwiderstand oder die bezogene Lagerungsdichte vorgegeben. Die Rammsondierung ist hierbei eine weitverbreitete Untersuchungsmethode, da diese einfach auszuführen, und auch in grobkörnigen, dicht gelagerten Böden eingesetzt werden kann. Bei der Rammsonde wird der Schlagwiderstand der Sonde gemessen. Die Horizontalspannung kann jedoch nicht bestimmt werden. Dagegen können die Drucksonde (CPT) oder das Flachdilatometer (DMT) Veränderungen des Seitendrucks indirekt messen. Auch das Menard Pressiometer (PMT) und dessen Weiterentwicklungen ermöglichen die Abschätzung der Veränderung des horizontalen Erddrucks. Die verschiedenen Sondierverfahren sind in der einschlägigen Literatur beschrieben [1].

2.1 Drucksonde

Die Drucksonde (CPT) ist bei Bodenverdichtungsprojekten in Europa das häufigst verwendete Sondierverfahren. Neben dem Spitzenwiderstand q_c wird auch der Mantelwiderstand f_s (auch als „örtliche“ oder „bezogene Mantelreibung“ bezeichnet) gemessen. Zusätzlich kann der Porenwasserdruck u gemessen werden. Die Korrektur des Spitzenwiderstandes in Bezug auf den Porenwasserdruck ist jedoch aufgrund des hohen Spitzenwiderstandes bei Verdichtungsprojekten vernachlässigbar. Beispielsweise ist der hydrostatische Wasserdruck in 10 m Tiefe geringer als 100 kPa. Dagegen ist der Spitzenwiderstand auch in locker gelagerten rolligen Böden bedeutend höher als 3 MPa (3 000 kPa).

Der Spitzenwiderstand ist in erster Linie abhängig von der Bodenfestigkeit. Empirische Beziehungen werden verwendet, um eine Beziehung zwischen dem Spitzenwiderstand q_c und der bezogenen Lagerungsdichte I_D herzustellen, oder um vom Spitzenwiderstand auf die Bodensteifigkeit (Kompressionsmodul) zu schließen [2]. Der Mantelwiderstand f_s wird jedoch bei Verdichtungsprojekten selten direkt angewendet. In erster Linie dient er zur Berechnung des Reibungsverhältnisses f_s/q_c (%), welches Rückschlüsse auf den Feinkornanteil im Boden zulässt und damit zur Identifizierung von Bodenschichten verwendet werden kann [1]. In der vorliegenden Untersuchung wird der gemessene Mantelwiderstand zur Beurteilung der veränderten Horizontalspannung im Boden verwendet und kann mittels folgender Beziehung abgeschätzt werden:

$$\frac{K_1}{K_0} \approx \frac{f_{s1} \tan(\phi'_0)}{f_{s0} \tan(\phi'_1)} \quad (1)$$

Wobei gilt: K_0 = Erddruckbeiwert vor der Verdichtung; K_1 = Erddruckbeiwert nach der Verdichtung; f_{s0} = Mantelwiderstand vor der Verdichtung; f_{s1} = Mantelwiderstand nach der Verdichtung; ϕ'_0 = Reibungswinkel vor der Verdichtung; ϕ'_1 = Reibungswinkel nach der Verdichtung. Die Erhöhung des Reibungswinkels aufgrund der Vibrationsverdichtung kann mittels empirischer Beziehungen abgeschätzt werden [1]. In der Praxis kann jedoch angenommen werden, dass sich der Reibungswinkel aufgrund der Verdichtung um circa 5° erhöht, was in Gleichung (1) durch einen Korrekturfaktor (ca. 0,85) berücksichtigt werden kann. Daraus ergibt sich folgende Beziehung zur Abschätzung der Änderung der horizontalen Effektivspannung aus dem Mantelwiderstand:

$$\frac{K_1}{K_0} \approx 0,85 \frac{f_{s1}}{f_{s0}} \quad (2)$$

Der Korrekturfaktor kann jedoch projektspezifisch mittels Gleichung (1) gewählt werden. Es ist daher möglich, eine Veränderung der Horizontalspannungen durch die Messung des Mantelwiderstandes abzuschätzen.

2.2 Flachdilatometer

Das von Marchetti entwickelte Flachdilatometer (DMT) besteht aus einer spatenähnlichen Messdose, die in den Boden eingedrückt wird. Messausrüstung und Verfahren sind standardisiert [3]. Beim DMT-Versuch wird das Messgerät stufenweise jeweils um 0,2 m in den Untergrund eingedrückt, angehalten und intermittierend der Seitendruck gemessen. Hierfür wird eine Membrane seitlich 1,1 mm gegen den Boden gepresst und der dazu benö-

tigte Druck registriert. Aus diesen Spannungsmessungen werden danach die Druckwerte p_0 (Messwert zu Beginn des Versuches), p_1 (Maximalwert) und p_2 (Messwert nach Abschluss des Versuches) ermittelt, womit folgende Parameter berechnet werden können:

$$I_D = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u_0} \quad (3)$$

$$K_D = \frac{p_0 - u_0}{\sigma'_{v0}} \quad (4)$$

$$E_D = 34,7(p_1 - p_0) \quad (5)$$

Wobei gilt: I_D = Materialindex (nicht zu verwechseln mit der bezogenen Lagerungsdichte); K_D = Horizontalspannungsindex; E_D = Dilatometermodul; u_0 = hydrostatische Porenwasserdruck (in rolligen Böden gleichgesetzt mit p_2) und σ'_{v0} = vertikale Effektivspannung. I_D kann nach [3] zur Klassifizierung von Böden wie folgt verwendet werden: Ton: $0,1 < I_D < 0,6$; Schluff: $0,6 < I_D < 1,8$; Sand: $1,8 < I_D < (10)$. In rolligen Böden kann der Horizontalspannungsindex K_D zur Ermittlung der Horizontalspannungsänderung folgendermaßen verwendet werden:

$$\frac{K_1}{K_0} \approx \frac{K_{D1}}{K_{D0}} \quad (6)$$

Wobei gilt: K_0 = Ruhedruckbeiwert vor der Verdichtung; K_1 = Ruhedruckbeiwert nach der Verdichtung; K_{D0} = Horizontalspannungsindex vor der Verdichtung; K_{D1} = Horizontalspannungsindex nach der Verdichtung. Beim DMT-Versuch kann daher die Veränderung von K_D direkt gemessen werden.

3 Einwirkung der Vibrationsverdichtung auf rollige Böden

Bei der Vibrationsverdichtung entstehen zyklische Bodenschwingungen. Wenn ein Wert der kritischen Scherdehnung (ca. 0,001 %) überschritten wird, vermindert sich das Porenvolumen [1]. Aufgrund der hohen Durchlässigkeit von rolligen Böden entsteht kein – oder nur geringer – Porenwasserüberdruck und die Verdichtung geschieht kurzfristig.

Erfahrungen haben gezeigt, dass bei Berechnungen die gemessenen Setzungen oft überschätzt werden. Die in den Setzungsrechnungen angenommene Erhöhung der Bodensteifigkeit alleine scheint nicht ausreichend zu sein um den Verdichtungseffekt korrekt zu beschreiben. Ein wichtiger, oft nicht beachteter Effekt ist, dass außer der Erhöhung der Steifigkeit auch die Effektivspannungen permanent verändert werden [4]. Nachstehend werden kurz die Spannungsänderungen sowie die Kompression des Porenvolumens bei der Vibrationsverdichtung von rolligen Böden beschrieben. Als Beispiel wird die vertikale Vibrationsverdichtung (Aufsatzrüttler mit vertikal schwingender Verdichtungsbohle) verwendet. Andere Vibrationsverdichtungsverfahren können ähnlich analysiert werden [4].

3.1 Veränderung der Effektivspannungen

Bei der vertikalen Vibrationsverdichtung wird die Zentrifugalkraft des Vibrators von der Bohle in der Form von vertikalen und horizontalen Schwingungen in den Boden übertragen [2], [5]. Die Änderungen der Effektivspannungen sind bei der Vibrations-

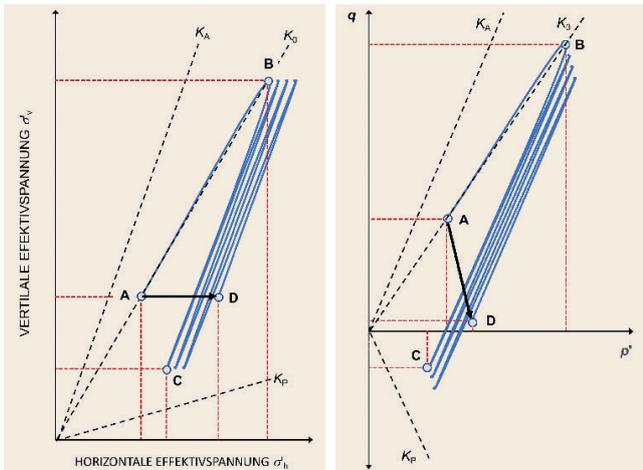


Bild 1. Prinzip der Effektivspannungsveränderung bei der vertikalen Vibrationsverdichtung *Abb.: K. R. Massarsch*
 Fig. 1. Principle of effective stress changes due to vertical vibratory compaction *Source: K. R. Massarsch*

verdichtung komplex, können aber vereinfacht beschrieben werden. Das linke Diagramm in **Bild 1** zeigt die Beziehung zwischen der vertikalen Effektivspannung σ'_v und der horizontalen Effektivspannung σ'_h . Das rechte Diagramm beschreibt den entsprechenden Spannungspfad in einem $p' - q$ Diagramm, mit folgenden Definitionen:

$$p' = \frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} \quad q = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2} \quad (7)$$

In **Bild 1** wird die Spannungsänderung nach vier Schwingungszyklen von Punkt A auf Punkt D beschrieben. Ausgangspunkt ist Punkt A, der den Spannungszustand im nicht vorbelasteten Boden (vor Beginn der Verdichtung) beschreibt. Die Kennlinien für den aktiven Erddruck K_A , passiven Erddruck K_P und den Erdruhedruck K_0 sind angezeigt. Beim ersten Belastungszyklus verändert sich sowohl die vertikale als auch die horizontale Effektivspannung längs der K_0 -Linie von Punkt A nach Punkt B. Bei der Entlastung von Punkt B auf Punkt C vermindert sich die vertikale Effektivspannung. Dagegen verbleibt ein Teil der horizontalen Effektivspannung, verglichen mit dem Ausgangswert in Punkt A. Die Vibrationsverdichtung verursacht eine große Anzahl von Spannungswechseln im Boden. Bei einer Verdichtungsdauer von circa zehn Minuten und einer Vibrationsfrequenz von 20 Hz entstehen mindestens 10 000 Schwingungszyklen.

Die Veränderung des Spannungszustandes kann auch in einem $p' - q$ Diagramm dargestellt werden, das den Zusammenhang zwischen der mittleren Effektivspannung p' und der Deviatorspannung q zeigt. Vor der Verdichtung liegt Spannungspunkt A an der K_0 -Linie. Durch die zyklische Be- und Entlastung bei der Vibrationsverdichtung (von Punkt A auf Punkt D) erhöht sich die mittlere Effektivspannung p' schrittweise während die Scherspannung q deutlich absinkt. Der Spannungszustand in Punkt D entspricht dem eines vorbelasteten Bodens. Eine ähnliche Änderung des Spannungszustandes tritt auch bei anderen Vibrationsverdichtungsverfahren auf, wie näher in [4] beschrieben.

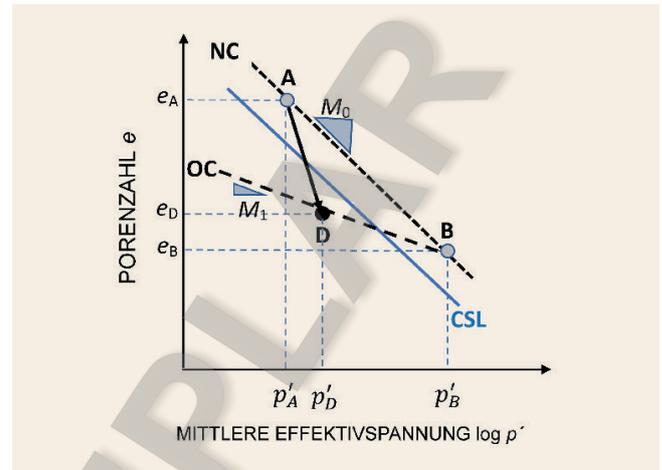


Bild 2. Zusammenhang zwischen mittlere Effektivspannung p' und Porenzahl e sowie der Bodensteifigkeit M für verschiedene Zustandslinien (NC, OC, CSL) *Abb.: K. R. Massarsch*
 Fig. 2. Relationship between mean effective stress p' and void ratio e as well as stiffness M for different states (NC, OC, CSL) *Source: K. R. Massarsch*

3.2 Kompression des Porenvolumens

Das Konzept der kritischen Zustände (Critical State – CS) eignet sich, um die Verformungseigenschaften eines rolligen Bodens bei der Vibrationsverdichtung zu veranschaulichen. Es beschreibt die zustandsabhängige Steifigkeit und Scherfestigkeit. Eine nähere Beschreibung des CS-Konzeptes ist im Rahmen dieses Beitrages jedoch nicht möglich, kann aber in [1] nachgelesen werden. Die Porenzahl e wird in Abhängigkeit von der mittleren Effektivspannung p' in einem halb-logarithmischen Diagramm gezeigt, **Bild 2**. Die Erstbelastungslinie NC, die Vorbelastungslinie OC sowie die kritische Zustandslinie CSL sind eingezeichnet. Die Bodensteifigkeit M_0 des normalbelasteten Bodens (NC) sowie die Steifigkeit M_1 des vorbelasteten Bodens (OC) sind angegeben.

Bei der Erstbelastung (von Punkt A nach Punkt B) erhöht sich die mittlere Effektivspannung und die Porenzahl vermindert sich (der Boden wird komprimiert). Bei der Entlastung sinkt die mittlere Effektivspannung, verbleibt aber höher als im Ausgangszustand, Punkt A. Nach abgeschlossener Verdichtung erreicht der Boden den Zustand in Punkt D – der Boden wurde vorbelastet (OC). Die Bodensteifigkeit steigt von M_0 auf M_1 an. Durch die zyklische Belastung wird der Boden verdichtet (Porenzahl vermindert) aber gleichzeitig auch vorbelastet (mittlere Effektivspannung wurde erhöht). Umfassende Untersuchungen haben bestätigt, dass durch die Vibrationsverdichtung nicht nur die Bodensteifigkeit, sondern auch die Horizontalspannung erhöht wird [6], [7], [8], [9].

4 Horizontalspannungsänderung durch Vorbelastung

4.1 Horizontalspannungen in nicht vorbelasteten Böden

Die Begrenzung von Setzungen und Setzungsunterschieden ist eine der wichtigsten Anwendungen der Vibrationsverdichtung. Eine Zunahme der Horizontalspannung bewirkt, dass der Boden in Bezug auf die vorherrschende vertikale Effektivspannung σ'_v vorbelastet wird. Die horizontale Effektivspannung σ'_h ist dabei wie folgt definiert:

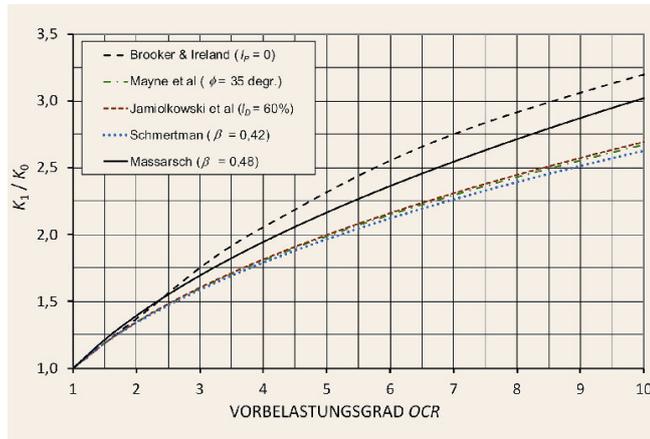


Bild 3. Beziehung zwischen der Veränderung des Ruhedruckes und dem Vorbelastungsgrad Abb.: K. R. Massarsch
 Fig. 3. Relationship between change in lateral earth pressure and overconsolidation ratio Source: K. R. Massarsch

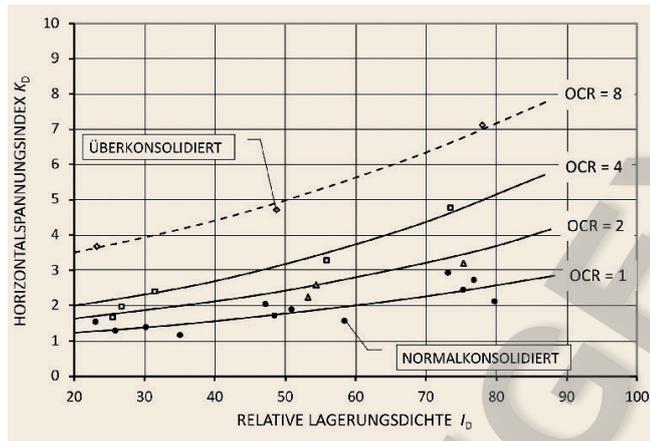


Bild 4. Einfluss der Spannungsgeschichte auf die Horizontalspannung, ermittelt durch DMT in einer Kompressionskammer Abb.: nach [19]
 Fig. 4. Influence of stress history on horizontal stress, determined by DMT in calibration pressure chamber Source: derived from [19]

$$\sigma'_h = K_0 \sigma'_{vh} \quad (8)$$

Wobei gilt: σ'_v = vertikale Effektivspannung; K_0 = Ruhedruckbeiwert. In nicht vorbelasteten rolligen Böden (Böden vor der Verdichtung) kann der Ruhedruckbeiwert K_0 , nach [10] wie folgt abgeschätzt werden:

$$K_0 \sim 1 - \sin(\phi') \quad (9)$$

Wobei gilt: ϕ' = effektiver Reibungswinkel. Für unverdichtete, locker gelagerte rolligen Böden kann als typischer Wert $K_0 = 0,46$ angenommen werden ($\phi \approx 33^\circ$).

4.2 Horizontalspannungen in vorbelasteten Böden

Der Vorbelastungsgrad OCR beschreibt die Spannungsgeschichte einer Bodenschicht:

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} = \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'}{\sigma'_{v0}} \quad (10)$$

Wobei gilt: σ'_{v0} = vertikale Effektivspannung; σ'_p = Vorbelastungsspannung und $\Delta\sigma'$ = Vorbelastungsspannung ($\sigma'_p - \sigma'_{v0}$). OCR ist auf die vertikale Effektivspannung bezogen und kann nahe der Bodenoberfläche aufgrund der geringen Werte der vertikalen Effektivspannung stark schwanken. Es empfiehlt sich daher, neben OCR auch die Vorbelastungsspannung $\Delta\sigma'$ zu bestimmen, da diese ein zuverlässigeres Bild der Vorbelastung gibt. Umfassende Laborversuche haben gezeigt, dass sich als Folge der Vorbelastung die horizontale Effektivspannung σ'_h erhöht [11]. Folgender Zusammenhang zwischen OCR und der Veränderung der Horizontalspannungen bei der Entlastung wird in der Literatur empfohlen:

$$\frac{K_1}{K_0} = OCR^\beta \quad (11)$$

Wobei gilt: K_0 = Ruhedruckbeiwert (nicht vorbelastet); K_1 = Ruhedruckbeiwert (vorbelastet); β = empirischer Exponent. OCR kann daher aus der Veränderung der Horizontalspannungen wie folgt berechnet werden:

$$OCR = \left(\frac{K_1}{K_0}\right)^{1/\beta} \quad (12)$$

Dieser Zusammenhang zwischen der horizontalen Bodenspannung und dem Vorbelastungsgrad wurde in [11] formuliert. Druckkammeruntersuchungen mit rolligen Böden ergaben den empirischen Exponenten: $\beta = 0,42$ [12]. Ein ähnlicher Wert ($\beta = 0,45$) wird in [13] und [14] angeführt. Der Exponent β wird durch die bezogene Lagerungsdichte I_D (nicht zu verwechseln mit dem Materialindex I_D von DMT-Versuchen) beeinflusst [15]. In rolligen Böden mit $I_D = 0,6$ ergab sich als Mittelwert bei zwei Versuchsserien (Ticino und Hokksund Sand), $\beta = 0,43$. Dieser Wert nahm jedoch mit verminderter Lagerungsdichte bis auf $\beta = 0,38$ ab. Die genannten β -Werte werden in **Bild 3** verglichen.

4.3 Ergebnisse von Dilatometerversuchen

In [16] wurden DMT-Versuche an Sand in einer Kompressionskammer beschrieben, wobei der Horizontalspannungsindex K_D gemessen wurde. K_D wurde bei unterschiedlichen Lagerungsdichten I_D und Vorbelastungsgraden OCR gemessen, **Bild 4**.

Diese Kompressionskammerversuche wurden in vorliegender Untersuchung neu ausgewertet, um den Spannungsexponenten β entsprechend Gleichung (12) zu bestimmen. **Bild 5** zeigt den Zusammenhang zwischen OCR und K_D , ausgehend von den Daten in Bild 4 [16]. Es besteht eine deutliche Beziehung zwischen K_D und OCR für verschiedene Lagerungsdichten I_D (40 %, 60 % und 80 %). Werte von OCR für I_D : 50 % und 70 % wurden interpoliert.

Der Horizontalspannungsindex, K_D in Bild 5 kann mit dem Referenzwert von K_D bei OCR = 1, $K_{D,ref}$ normalisiert werden ($K_D/K_{D,ref}$). Die Beziehung von OCR und $K_D/K_{D,ref}$ ist in Bild 6 entsprechend Gleichung (12) dargestellt.

Bild 6 zeigt eine gute Übereinstimmung der Messdaten mit Gleichung (11). Wenn $\beta = 0,48$ (1/2,1) angenommen wird, ergibt sich folgende Beziehung:

$$OCR = \left(\frac{K_D}{K_{D,ref}}\right)^{2,1} \quad (13)$$

Wobei gilt: OCR = Vorbelastungsgrad; K_D = Horizontalspannungsindex; $K_{D,ref}$ = Horizontalspannungsindex bei $OCR = 1$; Exponent: $2,1 = 1/\beta$. Gleichung (12) ist auch in Bild 3 eingezeichnet und ergibt konservative Werte von OCR . In den nachstehenden Untersuchungen wird daher generell $\beta = 0,48$ zur Abschätzung von OCR aus CPT- und DMT-Messungen verwendet.

5 Schlussfolgerungen

Die Vibrationsverdichtung wird in Europa hauptsächlich zur Verminderung von Setzungen und Setzungsunterschieden verwendet. Ein wichtiger Faktor bei Setzungsberechnungen ist die Wahl realistischer Eingangsparameter, wie dem Steifemodul und der Vorbelastungsspannung. In der Literatur sind verschiedene Berechnungsverfahren zur Setzungsberechnung beschrieben [6]. Der Steifemodul kann mittels CPT-Sondierungen abgeschätzt werden [5], [9]. Dagegen wird bei der Setzungsberechnung von verdichteten Böden der Einfluss der Vorbelastung nur selten beachtet. Ziel vorliegender Studie war zu untersuchen, ob durch die Vibrationsverdichtung – unabhängig vom gewählten Verfahren – in rolligen Böden die Horizontalspannung im Boden permanent erhöht wurde.

Der Einfluss der Vibrationsverdichtung auf die Effektivspannungen im Boden kann mittels des Spannungspfadverfahrens beschrieben werden. Damit kann schematisch gezeigt werden, dass durch die wiederholten Spannungswechsel die horizontale Effektivspannung ansteigt. Das Konzept der kritischen Zustände (Critical State – CS) beschreibt, wie die Verformungseigenschaften eines rolligen Bodens bei der Vibrationsverdichtung verändert werden. Aufgrund der Vibrationsverdichtung erhöht sich sowohl die Bodensteifigkeit als auch die mittlere Effektivspannung – der Boden wird vorbelastet.

Aus der Zunahme der Horizontalspannung kann der Vorbelastungsgrad (OCR) nach Gleichung (11) berechnet werden. Die erneute Auswertung von DMT-Versuchen in einer Druckkammer ergaben in Sandböden einen Spannungsexponenten von $\beta = 0,48$, der mit in der Literatur angegebenen Werten übereinstimmt, Bild 4. Wenn die Horizontalspannung um einen Faktor von 2-3 zunimmt, steigt OCR auf 4 bis 10 an. Dieser Vorbelastungseffekt ist von praktischer Bedeutung und sollte bei Setzungsberechnungen berücksichtigt werden.

Es ist möglich, die Veränderung der Horizontalspannung mittels CPT-Sondierungen aus der Veränderung des Mantelwiderstandes abzuleiten, Gleichung (2). DMT-Messungen können zur Ermittlung der Spannungsveränderung verwendet werden, da der Horizontalspannungsindex K_D von den Horizontalspannungen im Boden abhängt, Gleichung (6).

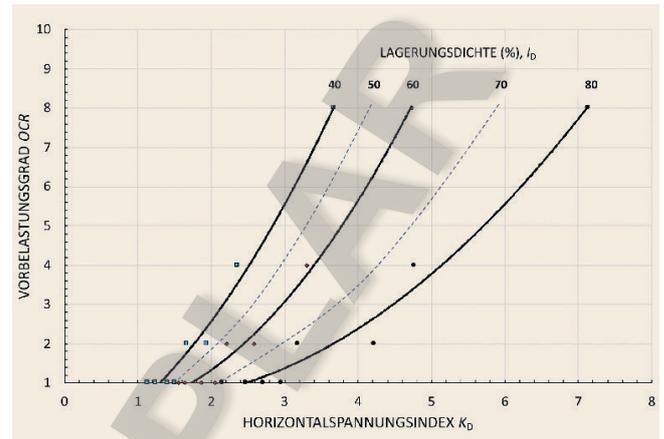


Bild 5. Abhängigkeit des Horizontalspannungsindex vom Vorbelastungsgrad. Die interpolierten Werte für OCR bei I_D 50 und 70 % sind gestrichelt angezeigt. Daten aus Bild 4 wurden verwendet [16] *Abb.: K. R. Massarsch* Fig. 5. Relationship between horizontal stress index and overconsolidation ratio. The interpolated values of OCR for I_D 50 and 70 % are indicated by dashed lines. Data from Fig. 4 [16] *Source: K. R. Massarsch*

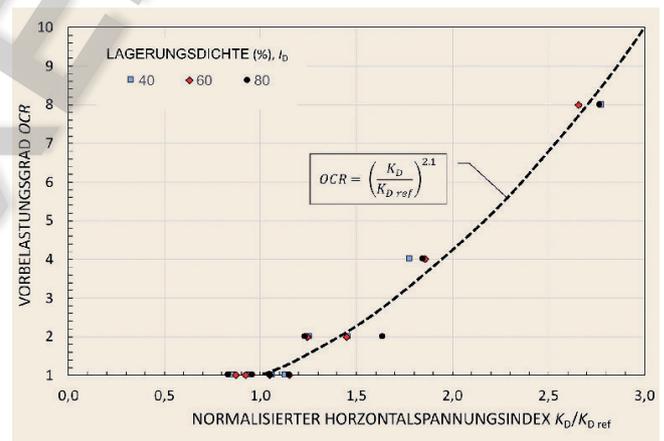


Bild 6. Vorbelastungsgrad in Abhängigkeit des normalisierten Horizontalspannungsindex. Daten von Bild 5 *Abb.: K. R. Massarsch* Fig. 6. Overconsolidation ratio as function of normalized horizontal stress index. Data from Fig. 5 *Source: K. R. Massarsch*

DANKSAGUNG

Bild 4 wurde mit Erlaubnis von Elsevier (Nr. 427580110968) wiedergegeben. Der Verfasser möchte sich bei den Gutachtern des Manuskriptes für die detaillierten Kommentare und wertvollen Verbesserungsvorschläge bedanken.

Literatur

- [1] Witt, K. J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Baugrundverbesserung 1. 7 Auflage. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, 2008.
- [2] Massarsch, K. R.; Fellenius, B. H.: Evaluation of resonance compaction of sand fills based on cone penetration tests. In: Ground Improvement. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 170 (2017), Iss. 3, pp. 149-158.
- [3] Marchetti, S.; Monaco, P.; Totani, G. et al.: The Flat Dilatometer Test (DMT). In: Soil Investigations. Report by ISSMGE Committee TC16. Proc. IN SITU 2001, Int. Conf. On In situ Measurement of Soil Properties, Bali, Indonesia, May 2001.
- [4] Massarsch, K. R.: Das Setzungsverhalten von vibrationsverdichteten, rolligen Böden. geotechnik. Ernst und Sohn, Heft 3/2019.
- [5] Massarsch, K. R.: Grundlagen der Rüttelverdichtung. In: 31. Christian Veder Kolloquium: Baugrundverbesserung, 31. März-1. April 2016. Tagungsbericht, S. 109-125.
- [6] Howie, J. A.; Daniel, C.; Asalemi, A. A. et al.: Combinations of In Situ Tests for Control of Ground Modification in Silts and Sands. In: Geo-Denver 2000, August, 2000, Denver, Colorado, United States, American Society of Civil Engineers.

- [7] *Massarsch, K. R.; Fellenius, B. H.*: Deep vibratory compaction of granular soils. In: *Indranatna, B.; Jian, C. (Hrsg.): Ground Improvement-Case Histories*. Elsevier, pp. 633-658.
- [8] *Balachowski, L.; Kurek, N.*: Deep Compaction control of sandy soils. In: *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 36 (2014), Iss. 2.
- [9] *Massarsch, K. R.; Fellenius, B. H.*: In situ tests for settlement design of compacted sand. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, Vol. 172 (2019), Iss. 3, pp. 207-217.
- [10] *Jaky, J.*: Earth pressure in silos. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, ICSMFE, Rotterdam*, Vol. 1, pp. 103-107.
- [11] *Brooker, E. W.; Ireland, H. O.*: Earth pressures at rest related to stress history. In: *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 2 (1965), Iss. 1, pp. 1-5.
- [12] *Schmertmann, J. H.*: Measurement of in-situ shear strength. In: *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Geotechnical Division, Specialty Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, NC, Vol. 2 (1974), pp. 57-138.
- [13] *Mayne, P. W.; Kulhawy, F. H.*: K_0 -OCR relationship in soil. In: *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 108 (1982), Iss. 6, pp. 851-872.
- [14] *Lunne, T.; Christophersen, H. P.*: Interpretation of cone penetrometer data for offshore sands. In: *Proceedings of the Offshore Technology Conference, Richardson, Texas, Paper No. 4464*.
- [15] *Jamiolkowski, M.; Ghionna, V. N.; Lancelotta, R. et al.*: New correlations of penetration tests for design practice. In: *Proc. of Symposium on Penetration Testing. ISOPT-1, Orlando, Florida, 1988*, pp. 263-296.
- [16] *Lee, M.; Choi, S., Kim, M. et al.*: Effect of Stress History on CPT and DMT results in Sand. In: *J. Engng. Geology*, Vol. 117 (2011), Iss. 3, pp. 259-265.



Dr. Karl Rainer Massarsch

rainer.massarsch@georisk.se
 Geo Risk & Vibration Scandinavia AB
 Ferievägen 25, SE 168 41 BROMMA, Schweden

Abb.: GRV AB

IMPRESSUM

ISSN 0005-6650, 95. Jahrgang 2020

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger (Sprecher)
 Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen

Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam
 Institut für Geotechnik, TU Wien

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Shervin Haghsheini
 Institut für Technologie und Management
 im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie

Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak
 Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau
 Brandenburgische Universität (BTU)

Prof. Dr.-Ing. Peter Wriggers
 Institut für Kontinuumsmechanik
 Leibniz Universität Hannover

Alle Hauptaufsätze sind durch die
 Herausgeber begutachtet und rezensiert.

verantwortlich für

Hauptaufsätze:

Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
 Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen
 Mies-van-der-Rohe-Straße 1
 52074 Aachen

Tel. 02 41 / 80 25 170
 jhegger@imb.rwth-aachen.de

Produkte & Projekte:

Heike van Ooyen, Redaktion
 VDI Fachmedien GmbH & Co. KG
 VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf
 Tel. 02 11 / 61 03-484
 hvanooyen@vdi-fachmedien.de

Anne Katrin Breckenkamp,
 Redaktionssekretariat
 Tel. 02 11 / 61 03-171
 abreckenkamp@vdi-fachmedien.de

Der Bauingenieur ist offizielle Organzeitschrift des VDI-Fachbereichs Bautechnik.

Hinweise für Autoren und Veröffentlichungsgrundlagen
 finden Sie im Internet unter
www.bauingenieur.de
 (Auswahl: Hinweise für Autoren).

Verlag

VDI Fachmedien GmbH & Co. KG
 Unternehmen für Fachinformationen
 VDI-Platz 1, 40468 Düsseldorf
 Postfach 10 10 22, 40001 Düsseldorf
 Commerzbank AG, BLZ 300 800 00,
 Kontonummer: 02 121 724 00
 SWIFT/BIC-Code: DRES DE FF 300,
 IBAN: DE69 3008 0000 0212 1724 00

Geschäftsführung

Ken Fouhy, B.Eng.

Layout

Alexander Reiß

Druck

KLIEMO printing, Hütte 53, 4700 Eupen, Belgien

Copyright

Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge und
 Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des
 Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des
 Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbe-
 sondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen,
 Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und
 Verarbeitung in elektronischen Systemen. Für
 unverlangt eingesandte Manuskripte kann keine
 Gewähr übernommen werden.

Vertrieb und Leserservice

Leserservice VDI Fachmedien,
 65341 Eltville
 Tel. 06123 9238-202
 Fax 06123 9238-244
 vdi-fachmedien@vdi-fachmedien.de
 Vertriebsleitung: Ulrike Gläsele

Bezugspreis

11 Ausgaben (davon 7/8 als Doppelheft)
 Jahresabonnement: € 440,-
 VDI-Mitglieder: € 396,-
 Studenten: € 110,- (gegen Studienbescheinigung)
 Preise Inland inkl. MwSt., Ausland exkl. MwSt.
 zzgl. Versandkosten (Inland: € 14,50, Ausland: € 35,-,
 Luftpost auf Anfrage)
 Einzelheft: € 48,- inkl. MwSt. zzgl. Versandkosten
 Der Bezugszeitraum beträgt mindestens ein Jahr.
 Das Abonnement verlängert sich um ein weiteres
 Jahr, wenn es nicht 6 Wochen vor Ablauf des
 berechneten Bezugszeitraumes schriftlich
 gekündigt wird.



Leitung Media Sales
 Sarah-Madeleine Simon
 simon@vdi-fachmedien.de
 Tel. 0211 / 61 03-166

Anzeigenverkauf

Verlagsbüro Siegfried Pachinger
 Tel. 0521 / 977 998-80
 Fax 0521 / 977 998-90
 sven.pachinger@verlagsbuero-pachinger.de

Es gilt der Anzeigentarif vom 1. Januar 2020.

Weitere Informationen unter
www.bauingenieur.de