

Neue Erfahrungen bei der Vibrationsverdichtung

Dr.techn. Karl Rainer MASSARSCH
Geo Risk & Vibration Scandinavia AB, Stockholm, Schweden

KURZFASSUNG

Trotz der weitverbreiteten Anwendung der Vibrationsverdichtung zur Baugrundverbesserung sind grundlegende Faktoren der Tiefenverdichtung noch unzureichend beschrieben. Dies gilt vor allem bei der Festlegung von Verdichtungskriterien für die Verminderung von Total- und Differenzsetzungen. Die Messergebnisse von einer Fallstudie werden vorgestellt, wo ein Reibungsboden mittels des Resonanzverdichtungsverfahrens verbessert wurde. Seismische Messungen zeigen, dass beim vertikalen Einrütteln der Bohle starke Bodenschwingungen in vertikaler und horizontaler Richtung hervorgerufen werden. Der Verdichtungseffekt wurde mittels der Drucksonde (CPT) und dem Flachdilatometer (DMT) gemessen. Beide Verfahren bestätigen, dass durch die Vibrationsverdichtung die Horizontalspannungen erhöht werden. Dieser Vorkonsolidierungseffekt ist von Bedeutung für die Setzungsberechnung von verdichteten Böden. Die Erhöhung der Horizontalspannung kann durch die starken horizontalen Bodenschwingungen erklärt werden, die von der Verdichtungsbohle ausgestrahlt werden.

1. VIBRATIONSVERDICHTUNG

Tiefenverdichtung mittels Vibrationsverfahren wird allgemein zur Verbesserung der geotechnischen Eigenschaften von Reibungsböden verwendet. Oft ist das Ziel, Totalsetzungen und Setzungsunterschiede auf ein zulässiges Maß zu begrenzen. In Erdbebengebieten kann die Vibrationsverdichtung auch zur Vermeidung der Bodenverflüssigung („Liquefaction“) in locker gelagerten, wassergesättigten Böden verwendet werden. Trotz der weitverbreiteten Anwendung der Vibrationsverdichtung ist das grundlegende Verständnis der Mechanismen, die das Vibrationsverdichten beeinflussen, noch unzureichend.

Bei der Planung und Durchführung von Verdichtungsprojekten muss zu folgenden Fragen Stellung genommen werden: a) Verdichtbarkeit des Bodens; b) Abschätzung der Setzungen ohne Verdichtung; c) Erforderlicher Verdichtungsgrad zur Einhaltung der zulässigen Setzungen; d) Ausführung der Tiefenverdichtung (Gerät und Verfahren) und e) Nachweis des erzielten Verdichtungserfolges.

Vor Beginn des Projektes müssen Verdichtungskriterien festgelegt werden, die den gestellten Anforderungen (z.B. zulässige Setzungen) gerecht werden. Auch bei Großprojekten wird die Planung, Ausführung und Überwachung oft routinemäßig durchgeführt, ohne projektspezifische Verhältnisse zu berücksichtigen. Dies gilt vor allem bei der Wahl der Verdichtungskriterien und der Frage, ob überhaupt - und in welchem Ausmaß - Tiefenverdichtung erforderlich ist. Dabei ist auch zu vermeiden, dass zu konservative Kriterien gewählt werden, die eine unökonomische und damit zeitaufwendige Überverdichtung ergeben. Oft wird als Verdichtungskriterium die bezogene Lagerungsdichte, I_D gewählt - ein geotechnischer Parameter, der nur indirekt bei Setzungsberechnungen verwendet werden kann. Ein möglicher Grund dafür kann die mangelhafte Kenntnis sein, wie Setzungsberechnungen (vor und nach der Verdichtung) durchgeführt werden sollen. Dies gilt vor allem bei der Berechnung von Setzungen in verdichteten Reibungsböden. Die einschlägige Literatur enthält nur wenige, gut dokumentierte Fallstudien, wo der Verdichtungsprozess und der Verdichtungseffekt eingehend beschrieben ist, obwohl gerade

Massarsch, K.R. Neue Erfahrungen bei der Vibrationsverdichtung (New experiences from vibratory compaction). 12. Österreichische Geotechniktagung, Theorie & Praxis des Spezialtiefbaus Tagungsbeiträge, 31 Jänner + 1 Februar 2019, pp. 261 – 271.

praktische Erfahrungen von großem Nutzen für die Weiterentwicklung der Vibrationsverdichtung sind. In der Folge wird ein Projekt beschrieben, bei dem umfassende geotechnische Untersuchungen und seismische Messungen durchgeführt wurden, die den Verdichtungsprozess dokumentieren und den erzielten Verdichtungseffekt messen. Obwohl eine spezifische Verdichtungsmethode (Resonanzverdichtung) verwendet wurde, gelten die Schlussfolgerungen auch für andere Vibrationsverdichtungsverfahren.

2. TIEFENVERDICHTUNGSPROJEKT ANTWERPEN

In vorliegendem Projekt wurden zu Beginn der Baudurchführung umfassende Messungen durchgeführt, um das Verdichtungssystem zu optimieren. Von besonderer Interesse war die Ermittlung der Horizontalspannung, die bei der Vibrationsverdichtung entsteht.

2.1. Projektbeschreibung

Im Zuge des Ausbaus des Containerhafens in Antwerpen, Belgien, wurde 1992 eine Kaimauer, bestehend aus Betonzylindern, errichtet [van Impe et al. 1994]. Die Aufschüttung hinter der Kaimauer bestand aus locker gelagertem Sand mit einer Mächtigkeit von 7 bis 12 m. Der Grundwasserspiegel befand sich ca. 5,5 m unter der Kaioberfläche. Es war vorgeschrieben, dass der Sand zur Setzungsverminderung und der Reduzierung des Erddrucks verdichtet werden sollte. Die Kaimauer war für eine Bodenbelastung von 60 kPa dimensioniert. Als Zielwert der Verdichtung wurde ein Drucksondierungswiderstand (CPT) von $q_c > 6$ MPa vorgegeben.

2.2. Resonanzverdichtung

Als Tiefenverdichtungsmethode wurde die Resonanzverdichtung gewählt. Dieses Verfahren geht vom Prinzip aus, dass bei Resonanz des Rüttler-Bohle-Bodensystems die Bodenschwingungen im umgebenden Boden verstärkt werden. Dadurch ergibt sich eine mehr effektive Übertragung der Schwingungsenergie vom Rüttler in den Boden. Die Resonanzverdichtung ist in der einschlägigen Literatur beschrieben [Massarsch, 2016, Grundbau-Taschenbuch, 2017, Massarsch und Fellenius, 2017]. In der Probephase wurden zwei Verdichtungsbohlen mit einer Länge von jeweils 12 m benutzt: ein steife Bohle („TriStar“) mit drei 0,5 m breiten Y-Flügeln sowie eine flexiblen Bohle („Flexiprobe“) mit doppelten Y-Y-Flügeln (0,6 m Breite) und einem Mittelsteg, vgl. Abb. 1.

Die Probeverdichtung wurde mit einem Verdichtungsabstand von 2, 5 m durchgeführt. Die Dauer der Verdichtung war abhängig von der Mächtigkeit der zu verdichteten Bodenschicht und variierte zwischen 10 und 15 Minuten pro Verdichtungspunkt. Im Probefeld war die Mächtigkeit der Sandaufschüttung ca. 7 m. In vorliegendem Bericht werden ausschließlich die Ergebnisse von der Verdichtung mittels der Flexiprobe beschrieben. Weitere Informationen über das Projekt sind in van Impe et al. [1994] gegeben. Die Verdichtung wurde mit einem Rüttler MS 50HFV mit variabler Frequenz durchgeführt, Tab. 1.

2.3. Prozesssteuerung

Zur Resonanzverdichtung wurde ein elektronisches Mess- und Prozesssteuerungssystem (Monitoring and Process Control System, MPCs) verwendet. Das MPCs diente zur Dokumentation des Verdichtungs Vorganges sowie der Steuerung des Rüttlers und der Bohlenbewegung (Abdrücken/Ziehen). Die Messwerte sowie die Bohlenbewegung wurden dem Maschinisten auf einem Bildschirm angezeigt. Außerdem erhielt der Maschinist Instruktionen

bezüglich der Durchführung der Verdichtungsvorganges (Dauer der Verdichtung, Abdrücken oder Ziehen der Bohle, Änderung der Rüttlerfrequenz, Grenzwerte der Bodenschwingung), vgl. Abb. 2.



a) TriStar Bohle



b) Flexiprobe Bohle

Abb. 1 Verdichtungsbohlen bei der Resonanzverdichtung

Tab. 1 Kennwerte des Rüttlers MS 50 HFV

Kennwerte	Einheit	Größe
Fliehkraft, F (max.)	kN	1500
Statisches Moment, M stat.	kgm	50
Frequenz, f (max.)	Hz	30
Zugkraft, F Zug (max.)	kN	500
Gewicht dynamisch ohne Zange	kg	3820
Gewicht gesamt ohne Zange	kg	8050
Schwingweite (Doppelamplitude) ohne Zange/ohne Bohle	mm	26

2.4. Seismische Messungen

Ein wichtiges Ziel der Feldversuche war die Messung der vertikalen und horizontalen Bodenschwingungen während des Verdichtens. Diese Informationen beschreiben die Übertragung der Verdichtungsenergie von der Bohle in den Boden, und die Effektivität des Verdichtungsprozesses. Für die seismischen Messungen wurden dreiaxige Geophone verwendet, die in 2,5 m Abstand von der Verdichtungsbohle an der Bodenoberfläche eingebaut wurden, vgl. Abb. 3. Geophone messen die Schwinggeschwindigkeit (RMS-Wert) in drei Richtungen. Aus den Messungen kann die Vibrationsamplitude (mm/s) und die Schwingungsfrequenz (Hz) ermittelt werden.

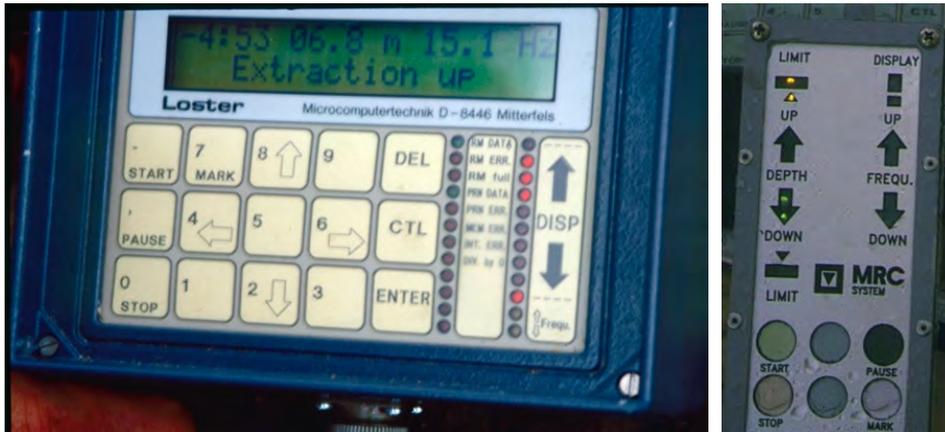


Abb. 2 Anzeige verschiedener Verdichtungsparameter im MPCS. Links: Bildschirm mit Anzeige der Verdichtungsparameter. Rechts: Pfeilsymbole zur Unterstützung des Maschinisten bei der Verdichtungsausführung



a) Feldversuche mit Flexiprobe



b) Dreiachsiger Schwingungsgeber

Abb. 3 Schwingungsmessungen bei Verdichtung mit Flexiprobe mittels dreiaxsigem Geophon im Probefeld. Tiefenmesssystem und MPCS-Einheit am Verdichtungsgerät (Hintergrund)

2.5. Resonanzbestimmung

Zu Beginn des Projektes wurden Probeverdichtungen durchgeführt und die Bodenschwingungen gemessen wurden. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel der Resonanzmessung mit der 12 m langen Flexiprobe. Die Rüttlerfrequenz wurde zwischen 8 und 23 Hz variiert und die vertikale Schwinggeschwindigkeit in einem Abstand von 2,5 m von der Bohle gemessen. Die vertikale Schwingungsfrequenz steigt bei Resonanz markant an und liegt im aktuellen Fall bei 15 Hz. Mit zunehmender Verdichtung wird der Resonanzeffekt deutlich. Die Resonanzfrequenz steigt im verdichteten Boden an, da die Bodensteifigkeit (der Schermodul) zunimmt. Dieser Effekt kann vom Maschinenführer Dank des MPCS erkannt und schrittweise angepasst werden.

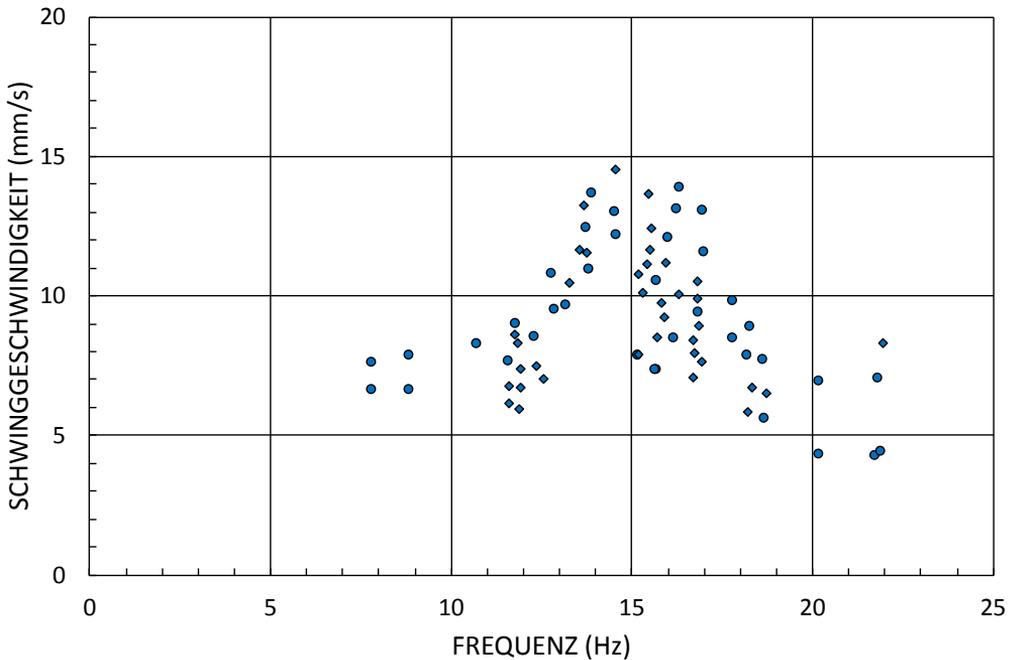


Abb. 4 Resonanzversuch mit Flexiprobe: vertikale Schwinggeschwindigkeit (RMS) in Abhängigkeit der Rüttlerfrequenz. Messung in 2,5 m Abstand von der Bohle, vgl. Abb. 3

2.6. Bodenschwingungen

Die vertikal oszillierende Bohle verursacht sowohl vertikale als auch horizontale Schwingungen im Boden, [Massarsch, 2002], Abb. 5. Längs des Bohlenmantels entstehen zylindrische Wellen, die sich als Scher- (S) Wellen mit vertikaler Amplitude ausbreiten. Messungen von Krogh und Lindgren [1997] haben gezeigt, dass die vertikale Amplitude der Scherwellen nahezu konstant mit der Tiefe ist, und bis zur Bohlenspitze auftritt.

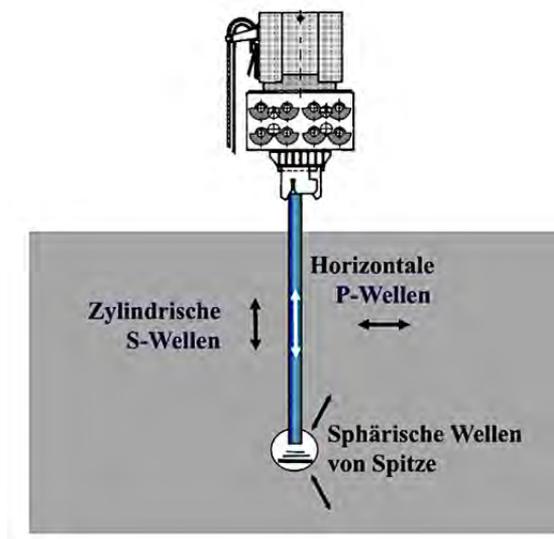


Abb. 5 Schwingungsausstrahlung einer vertikal oszillierenden Bohle

Durch die Mantelreibung entstehen auch horizontale Schwingungen die sich als Kompressions- (P) Wellen fortpflanzen. Diese horizontal oszillierende Schwingungskomponente ist für den Verdichtungseffekt von Bedeutung, da durch die zyklische Belastung die Horizontalspannung im Boden schrittweise erhöht wird. Die dritte Schwingungsquelle ist die Bohlenspitze, von wo sphärischen Wellen (P- und S-Wellen) ausgestrahlt werden.

Im Zusammenhang mit der Probeverdichtung wurde das Schwingungsverhalten des Bodens beim Einrütteln und Ziehen der Verdichtungsbohle untersucht. Dreiachsige Schwingungsmessungen wurden in 2,5 m Abstand von der Bohle durchgeführt. Die Schwingungsfrequenz des Rüttlers war ca. 15 Hz. Abbildung 6 zeigt die Bewegung der Verdichtungsbohle sowie die vertikale und horizontale (radiale) Vibrationsgeschwindigkeit (RMS) in Abhängigkeit von der Zeit.

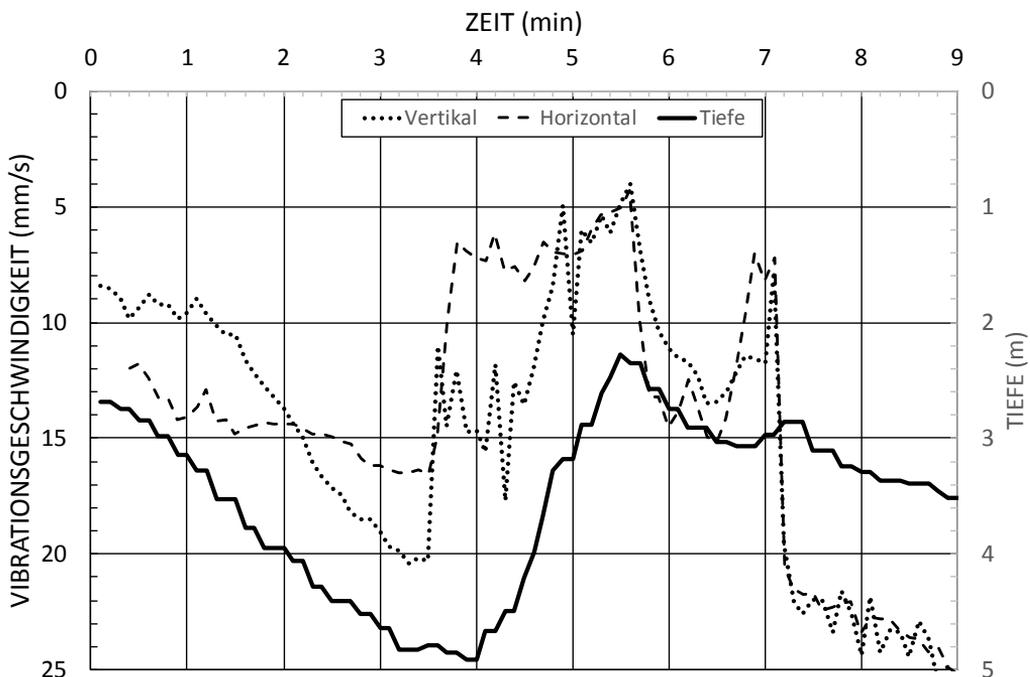


Abb. 6 Bohlenbewegung (Absenken und Ziehen) sowie Vibrationsgeschwindigkeit (vertikal und radial) während des Eindringens und Ziehens der Verdichtungsbohle

Die Messungen zeigen, dass die Bodenschwingungen (und damit der Verdichtungseffekt) beim Absenken der Bohle entsteht. Wenn die Bohle gezogen oder stillgehalten wird, sinkt die vertikale und die radiale Schwinggeschwindigkeit deutlich ab. Es außerdem erkennbar, dass die vertikale und die radiale Schwingungskomponente ungefähr gleich groß sind.

3. DRUCKSONDIERUNG (CPT)

Verdichtungsprojekte werden oft mittels Drucksondierung (CPT) geplant und überwacht, wobei der Spitzenwiderstand, q_c und der Mantelwiderstand, f_s gemessen werden. Leider wird in vielen Fällen die praktische Bedeutung des Mantelwiderstandes nicht berücksichtigt, obwohl dieser – wie nachstehend gezeigt wird – wichtige Informationen über den Verdichtungseffekt anzeigt.

Typische Sondierwerte, gemessen zwischen den Verdichtungspunkten, sind in Abb. 7 dargestellt. Im Probefeld wurde der Boden bis auf 7 m Tiefe verdichtet. Die ca. 2,5 m mächtige oberflächennahe Schicht war schon vor Beginn der Verdichtungsarbeiten dicht gelagert. Dies geht sowohl aus den q_c - und f_s -Messungen hervor, vgl. Abb. 7. In dieser Schicht ist keine nennenswerte Bodenverbesserung zu erkennen. Zwischen 2,5 und 7 m Tiefe kann ein deutlicher Verdichtungseffekt beobachtet werden. Sowohl die q_c - als auch die f_s -Werte wurden deutlich erhöht. Da die Verdichtungsbohle nur bis 7 m Tiefe abgesenkt wurde, wo eine feste Tonschichte angetroffen wurde, wurde darunter kein Verdichtungseffekt erzielt. Es ist deutlich, dass durch die Resonanzverdichtung sowohl q_c als auch f_s deutlich erhöht wurden. Der Effekt des erhöhten Mantelwiderstandes wird in der Praxis beschrieben. Massarsch und Fellenius [2015] haben gezeigt, dass die Erhöhung des Mantelwiderstandes (und damit der Horizontalspannung) eine Vorbelastung im Boden verursacht. Die Vorbelastung ist von praktischer Bedeutung vor allem für Setzungsanalysen. Die Veränderung der Horizontalspannung kann durch Feldversuche nachgewiesen werden. Der Mantelwiderstand von der CPT Messung ist ein indirektes Maß der Horizontalspannung im Boden. Die absolute Größe der Horizontalspannung kann nur indirekt mittels CPT gemessen werden, da die Messung der Mantelreibung mit Unsicherheiten behaftet ist. Dagegen zeigt eine Veränderung des Mantelwiderstandes mehr zuverlässig die Veränderung der Horizontalspannung an [Massarsch und Fellenius, 2014].

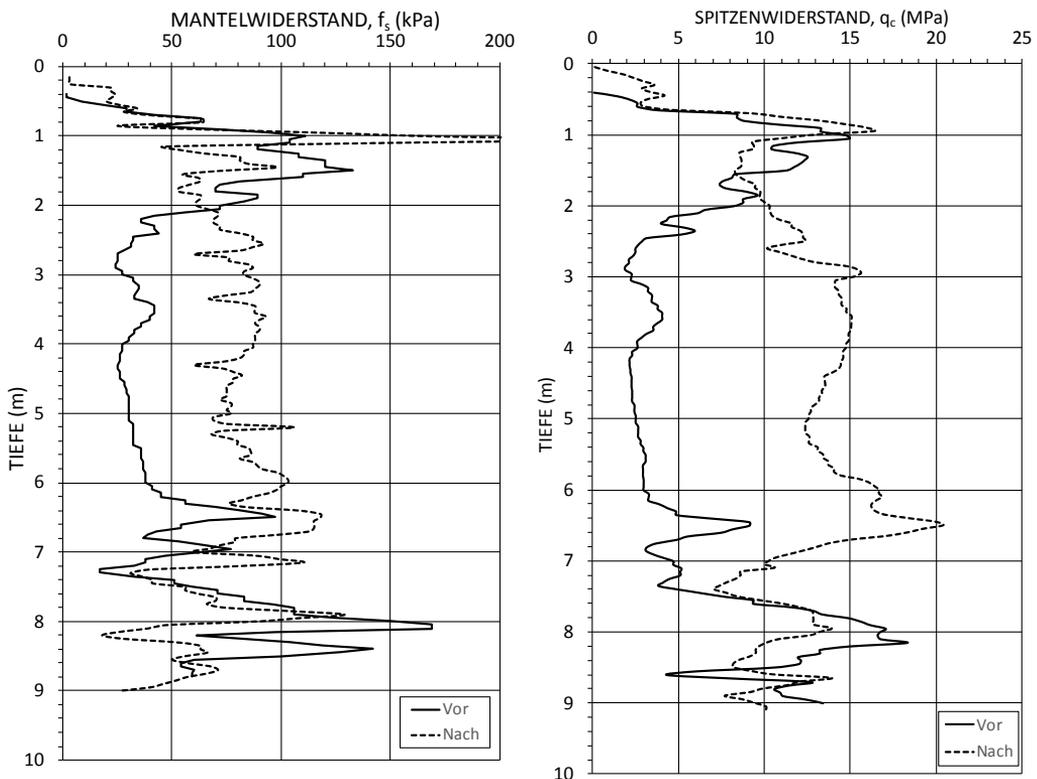


Abb. 7 Spitzenwiderstand, q_c und Mantelwiderstand, f_s vor und nach der Vibrationsverdichtung

3.1. Ermittlung der Vorbelastung

Wenn die Mantelreibung vor der Verdichtung, f_{s0} sowie nach der Verdichtung, f_{s1} gemessen wird, kann die Veränderung der Horizontalspannung approximativ aus folgender Beziehung ermittelt werden, [Massarsch und Fellenius, 2002]

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

mit den Bezeichnungen: K_0 = Erddruckkoeffizient vor der Verdichtung, K_1 = Erddruckkoeffizient nach der Verdichtung, ϕ'_0 = Reibungswinkel vor der Verdichtung, ϕ'_1 = Reibungswinkel nach der Verdichtung. Aufgrund der Verdichtung erhöht sich der Reibungswinkel um ca. 3 – 5 Grad, was bedeutet, dass sich K_1/K_0 um ca. 15% vermindert.

In natürlich gelagerten Bodenschichten ist es oft schwierig zu beurteilen, ob der Untergrund normal- oder vorkonsolidiert ist. Bei der Bodenverdichtung kann jedoch angenommen werden, dass locker gelagerte oder aufgeschüttete Böden nicht - oder nur gering - vorbelastet sind. Die Erhöhung der Horizontalspannung bedeutet, dass der Boden vorkonsolidiert wird. Aus dem Verhältnis der Ruhedruckkoeffizienten, K_1/K_0 ergibt sich der Konsolidierungskoeffizient, OCR

$$\frac{K_1}{K_0} = OCR^\beta \quad (\text{Gl. 2})$$

wobei β = Spannungsexponent (Mayne und Kulhawy, 1982). Aus Gl. (2) kann OCR abgeschätzt werden

$$OCR = \left(\frac{K_1}{K_0}\right)^{\frac{1}{\beta}} \approx \left(\frac{K_1}{K_0}\right)^{2,3} \quad (\text{Gl. 3})$$

Laboruntersuchungen haben typische Werte von $\beta \approx 0,40 - 0,45$ ($1/\beta \approx 2,3$) gezeigt [Massarsch und Fellenius, 2002]. Dies bedeutet, dass eine relativ geringe Zunahme der Horizontalspannung (z. B. $K_1/K_0 \approx 2$) den Konsolidierungskoeffizienten, OCR auf ≈ 5 erhöht. Bei Setzungsanalysen empfiehlt sich jedoch, anstelle von OCR (σ'_p/σ'_0) die Vorbelastungsspannung, $\Delta\sigma$ ($\sigma'_p - \sigma'_0$) zu verwenden. Außerdem empfiehlt sich, einen konservativen Mittelwert der Vorbelastungsspannung zu wählen.

Abbildung 8a zeigt das Verhältnis des Mantelwiderstandes vor und nach der Verdichtung. Im Tiefenintervall 2 – 7 m wurde der Mantelwiderstand mit einem Faktor von 2 – 3 (Mittelwert: 2,5) erhöht. Nun kann der Konsolidierungskoeffizient mit Hilfe von Gl. 1 ermittelt werden. Die Erhöhung des Reibungswinkels wurde berücksichtigt (Korrektionsfaktor: 0,85). Mit einem Spannungsexponent, $\beta = 2,3$ ergeben sich OCR -Wert nach Abb. 8b. Der durch den Mantelwiderstand ermittelte Konsolidierungskoeffizient, OCR liegt zwischen 4 – 10, mit einem Mittelwert um ca. 6.

4. FLACHDILATOMETER (DMT)

Der DMT wird in zunehmendem Maß bei Tiefenverdichtungsprojekten eingesetzt. Die Ausrüstung und das Verfahren sind standardisiert [Marchetti et al. 2001]. Ein wichtiger Unterschied des DMT im Vergleich zu anderen Sondierverfahren ist, dass vor allem die Bodeneigenschaften in der horizontalen Richtung gemessen werden. Im Messgerät wird eine Membrane aufgeblasen und zwei Werte der Horizontalspannung p_0 (Initialspannung), und p_1 (Endspannung) gemessen. Aus diesen Messwerten können DMT Indexwerte berechnet werden.

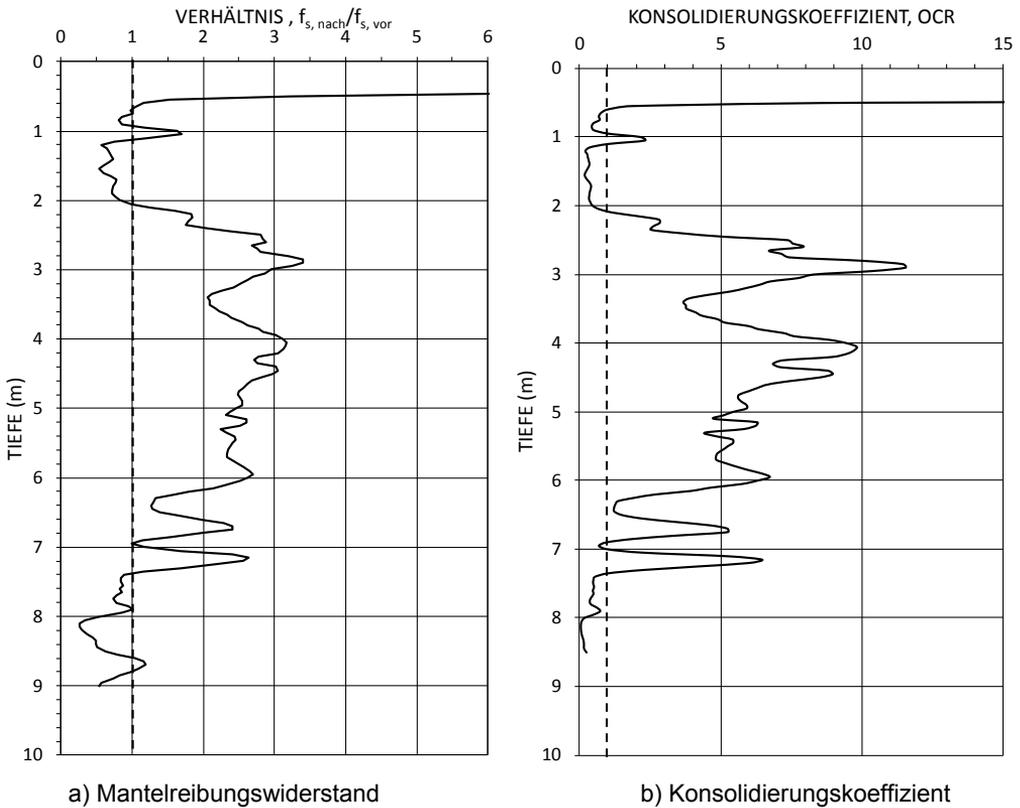


Abb. 8 Verhältnis der Mantelreibung, und Konsolidierungskoeffizient, Gl. 3

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

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

mit den Bezeichnungen: I_D = Materialindex; K_D = Horizontalspannungsindex; u_0 = hydrostatische Porenwasserdruck (gleich p_0); σ'_{v0} = vertikale Effektivspannung. Der Materialindex, I_D wird zur Beurteilung der Bodenart verwendet.

In Abb. 9 sind der Horizontalspannungsindex, K_D und der Materialindex, I_D vor und nach der Verdichtung gezeigt. Die Messwerte bis zu einer Tiefe von 2,5 m können vernachlässigt werden, da in dieser Schicht der Boden schon vor der Vibrationsverdichtung fest gelagert war. Der Materialindex, I_D zeigt vor der Verdichtung einen schluffigen Sand an, der sich aufgrund der Verdichtung von schluffig zu sandig verändert. Diese Veränderung der Bodenschicht ist jedoch nicht korrekt, da die Bodenart durch die Verdichtung nicht beeinflusst wurde.

Von besonderem Interesse für die Bodenverdichtung ist der Horizontalspannungsindex, K_D . Wenn K_D vor (Index: 0) und nach der Vibrationsverdichtung (Index: 1) gemessen wird, können Veränderungen der Horizontalspannung ermittelt werden

$$\frac{K_1}{K_0} = \frac{K_{D1}}{K_{D0}} \quad (\text{Gl. 5})$$

mit den Bezeichnungen: K_{D0} = Horizontalspannungsindex vor der Verdichtung; K_{D1} = Horizontalspannungsindex nach der Verdichtung. Die Veränderung der Horizontalspannung, ausgehend von K_D -Werte, kann als mehr zuverlässig angesehen werden, als die Messung durch den CPT Mantelwiderstand.

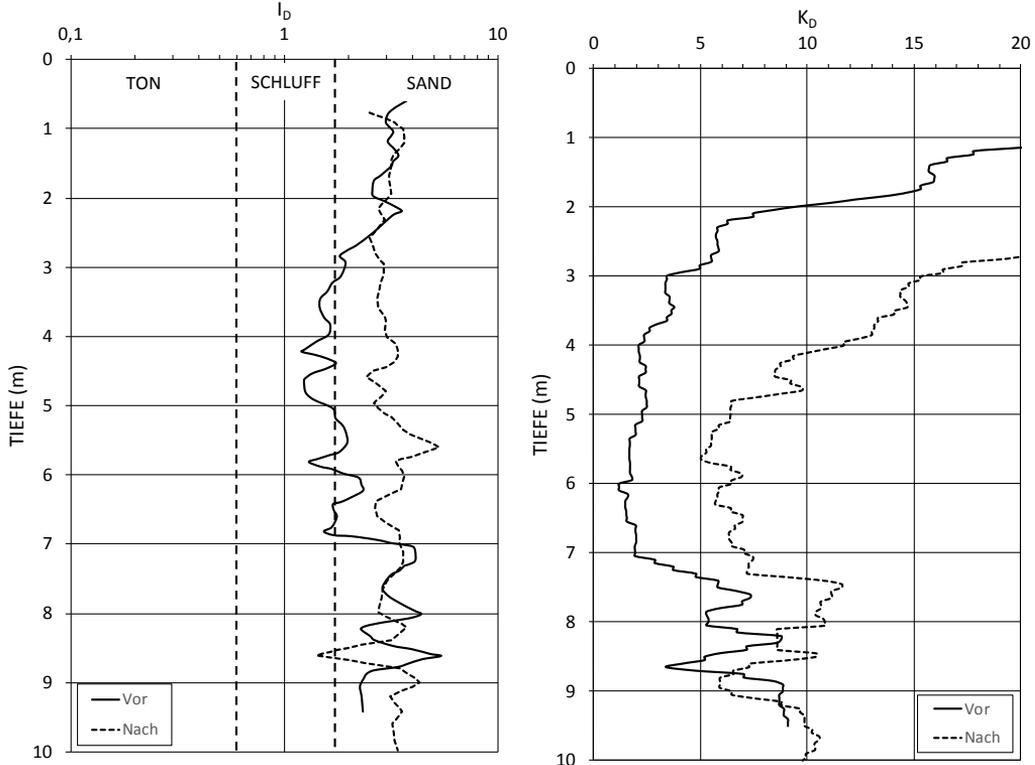


Abb. 9 Materialindex, ID und Horizontalspannungsindex, KD vor und nach der Vibrationsverdichtung

In Abb. 10 ist das Verhältnis des Horizontalspannungsindex (K_{D1}/K_{D0}) nach und vor der Verdichtung angezeigt. Die Horizontalspannung erhöhte sich mit 2 – 4, und einem Mittelwert von 3. Die Spannungszunahme, gemessen mit dem DMT ist daher etwas höher als der mit dem CPT ermittelte Wert (2 – 3), vgl. Abb. 8a.

Der Konsolidierungskoeffizient, OCR kann nach Gl. 3 berechnet werden ($\beta = 2,3$) und ist in Abb. 10 dargestellt. Die Veränderung der Horizontalspannung, mit dem DMT gemessen, muss als genauer angesehen werden als die Messung über den CPT Mantelwiderstand. Trotzdem gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen CPT und DMT Messungen.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit der zunehmenden Anwendung von modernen geotechnischen Untersuchungsmethoden können wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, die für die effektive Planung und Durchführung von Tiefenverdichtungsprojekten von Nutzen sein können. In vorliegendem Bericht wurden die

Erfahrungen von einem Vibrationsverdichtungsprojekt beschrieben, wo umfassende geotechnische Feldmessungen (CPT und DMT) und seismische Messungen durchgeführt wurden. Die Untersuchungen haben folgende Erkenntnisse ergeben:

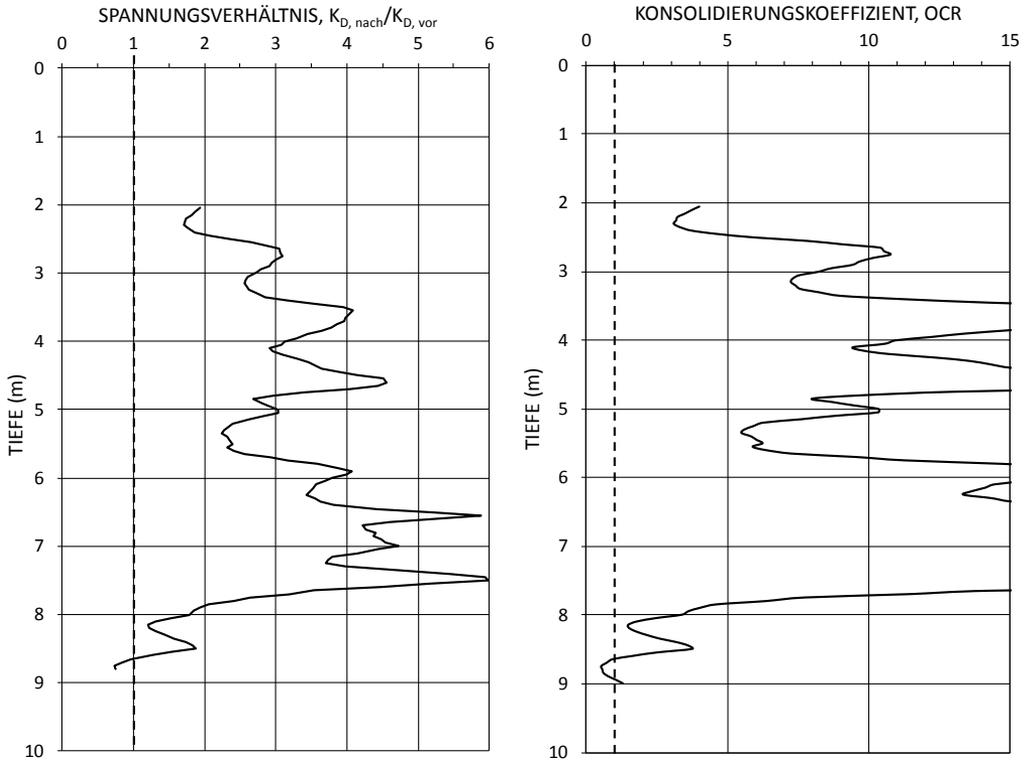


Abb. 10 Verhältnis des Horizontalspannungsindex und des Konsolidierungskoeffizienten

- Bei der Resonanzverdichtung wird die Rüttlerfrequenz des Rüttler-Bohle-Bodensystems so verändert, dass durch Resonanz ein erhöhter Verdichtungseffekt entsteht. Die Resonanzverdichtung wird mit Hilfe eines Mess- und Kontrollsystems optimiert.
- Im Rahmen einer Probeverdichtung wurden seismische Messungen (der Schwinggeschwindigkeit) durchgeführt. Die Resonanzfrequenz der vertikalen Schwingungskomponente (RMS) lag bei 15 Hz.
- Die stärksten Bodenschwingungen entstehen beim Eindringen der Verdichtungsbohle und sinken beim Ziehen stark ab. Die Schwingungsmessungen zeigen, dass beim Verdichten sowohl vertikale als die horizontale (radial) Schwingungen entstehen. Die vertikalen, zylindrischen Scherwellen tragen zur Bodenverdichtung bei. Die horizontale Schwingungskomponente erzeugt Kompressionswellen, die zur Erhöhung der Horizontalspannung im Boden beitragen.
- Sondierungen wurden mit der Drucksonde (CPT) vor und nach der Verdichtung durchgeführt, wobei sowohl der Spitzen- als auch der Mantelwiderstand gemessen wurde. Neben dem erwarteten Anstieg des Spitzenwiderstandes erhöhte sich auch der Mantelwiderstand mit vergleichbaren Werten. Aus der Zunahme des Mantelwiderstandes kann der Vorkonsolidierungskoeffizient, OCR abgeschätzt werden.

- Mit dem Flachdilatometer (DMT) kann die Veränderung von Horizontalspannungen im Boden mit größerer Zuverlässigkeit messen, als mit der Drucksonde (CPT). Aus der Zunahme der Horizontalspannung kann der Vorkonsolidierungskoeffizient abgeschätzt werden. Die Vorkonsolidierung ist von praktischer Bedeutung bei der Setzungs-berechnung.
- Die Erhöhung der Horizontalspannung im Boden kann durch die starken horizontalen Bodenschwingungen erklärt werden, die von der Verdichtungsbohle ausgestrahlt werden.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die in der Fallstudie erhaltenen Erfahrungen von allgemeiner Gültigkeit sind, da auch andere Verdichtungsverfahren (z. B. Tiefenrüttler) hohe Horizontalspannungen verursachen.

6. DANKSAGUNG

Die Verdichtungsversuche in Antwerpen wurden in naher Zusammenarbeit zwischen Franki International und der Universität Ghent, unter Leitung von Prof. W. van Impe durchgeführt. Das MPCs System wurde mit großer Kompetenz von der Firma Loster GmbH, Mitterfels, entwickelt. Abschließend muss die wertvolle Zusammenarbeit mit Dr. Bengt H. Fellenius anerkannt werden.

LITERATUR

- Grundbau-Taschenbuch. (2017): Teil 2: Geotechnische Verfahren. Verlag Ernst und Sohn. Witt, K. J. (Hrsg.). ISBN: 978-3-433-03152-0, 1094 S.
- Krogh, P. und Lindgren, A. (1997): Dynamic field measurements during deep compaction at Changi Airport, Singapore, Master's thesis No. 97/9. Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 88 S.
- Marchetti S., Monaco P., Totani G. und Calabrese M. (2001): 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, 41 S.
- Massarsch, K.R. (2002): Effects of Vibratory Compaction. TransVib 2002 – International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction. Louvain-la-Neuve. Keynote Lecture, S. 33 – 42.
- Massarsch, K.R. und Fellenius, B.H. (2002): Vibratory compaction of coarse-grained soils. Canadian Geotechnical Journal 39(3), S. 695-709.
- Massarsch, K.R. und Fellenius, B.H. (2014): Use of CPT for design, monitoring and performance verification of compaction projects. Proceedings Edited by P.K. Robertson and K.L. Cabal, May 13-14, 2014, Las Vegas, Nevada, USA. Printed by Omnipress; ISBN: 978-0-615-98835, Paper # 3-50, S. 1187-1200.
- Massarsch, K.R. (2016): Grundlagen der Rüttelverdichtung. 31. Christian Veder Kolloquium: Baugrundverbesserung, März 31 – April 1, 2016. Veröffentlichung, S. 109 – 125.
- Massarsch, K.R. and Fellenius, B.H.F. (2017): Evaluation of resonance compaction of sand fills based on cone penetration tests. Ground Improvement. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Paper 1700004, Volume 170, Issue 3, August, 2017, S. 149-158.
- Mayne, P. W., Kulhawy, F. H. (1982): K_0 -OCR-Relationships in Soil. Journal Geotech. Eng. Div. ASCE, Vol. 108, 1982, S. 851–872.