

Horizontalspannungsänderungen verursacht durch Vibrationsverdichtung von rolligen Böden (Teil 2)

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 entsteht. 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. Verdichtungsverfahren, die zur Anwendung kamen, wurden in Teil 2 des Beitrags neu analysiert. In allen Fällen lagen die Ergebnisse von CPT- und DMT-Versuchen vor und nach der Vibrationsverdichtung vor. Trotz der unterschiedlichen Versuchsvoraussetzungen, Bodenverhältnisse und angewendeten Verdichtungsverfahren erhöhte sich in allen Fällen die Horizontalspannung deutlich. Diese Zunahme der Horizontalspannung bedeutet, dass die Böden durch die Vibrationsverdichtung nicht nur verdichtet, sondern auch vorbelastet wurden. Dieser Effekt sollte bei Setzungsrechnungen beachtet werden.

Preloading of granular soils caused by deep vibratory compaction (Part 2)

ABSTRACT An important objective of deep vibratory compaction is to reduce settlement. The compaction effect can be monitored by cone penetrometer (CPT) and the 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.

STICHWÖRTER

Bemessung, Grundbau, Bodenverbesserung, Gründungstechnik, Setzung

1 Vibrationsverdichtungsverfahren

Als Vibrationsverdichtung werden Verfahren bezeichnet bei denen zyklische oder impulsartige Schwingungen von einem Verdichtungsgerät in den Boden übertragen werden. Diese dynamischen Verfahren kommen hauptsächlich in rolligen Böden (schluffigen Sanden, Sanden, Kiesen) zur Anwendung. Die Verdichtungsenergie kann entweder an der Bodenoberfläche mittels einer schwingenden Platte oder einem Fallgewicht, oder direkt in tiefere Bodenschichten mithilfe eines entsprechenden Verdichtungsgeräts, eingeleitet werden.

Bei der sogenannten „Dynamische Intensivverdichtung“ fällt ein Gewicht (mit Masse von 5-50 t) aus großer Höhe (10-30 m) mehrmals in einem rechteckigen Raster auf die Bodenoberfläche. Die Tiefenwirkung hängt von der Plattengröße und der entwickelten Verdichtungsenergie ab. Um einen hohen Verdichtungseffekt auch in größerer Tiefe zu erreichen, können Tiefenrüttler verwendet werden, bei denen die Schwingungsenergie durch die horizontale Pendelbewegung des Rüttlers in den Boden übertra-

gen wird. Dieses Verfahren wird in der Baupraxis oft als Rüttel-druckverdichtung (Vibroflotation) bezeichnet. Ein weiteres Vibrationsverdichtungsverfahren verwendet einen Aufsatzrüttler, der eine Bohle (Stahlrohr oder Stahlprofile) in vertikale Schwingungen versetzt. Für die Verdichtung mittels Aufsatzrüttlern wurden verschiedene Bohlenprofile entwickelt. Bei Tiefenrüttlern wird im Allgemeinen mit konstanter Schwingungsfrequenz gearbeitet. Bei der Tiefenverdichtung mit Aufsatzrüttlern wird die Schwingungsfrequenz den Verdichtungsverhältnissen angepasst. Bei der sogenannten „Resonanzverdichtung“ wird der Vibrationsverstärkungseffekt ausgenutzt, der bei der Verdichtung nahe der Resonanzfrequenz des Vibrator-Bohle-Bodensystems auftritt. Die verschiedenen Verdichtungsverfahren sind in der einschlägigen Literatur beschrieben [1], [2]. Vibrationsverdichtungssysteme, Geräte und deren Anwendung sind in europäischen Normen festgelegt [3].

In den letzten Jahrzehnten wurden kraftvolle Verdichtungsmaschinen entwickelt, die eine effektive Ausführung von Vibrationsverdichtungsprojekten ermöglichen. Dies gilt besonders für elek-

tronisch gesteuerte Vibratoren, die eine Optimierung des Verdichtungsvorganges ermöglichen. Dadurch erhöht sich die Konkurrenzfähigkeit der Vibrationsverdichtung. Beispiele von Neuentwicklung im maschinentechnischen Bereich sind in der Literatur beschrieben [4], [5].

Ein wichtiger Anwendungsbereich der Vibrationsverdichtung ist die Verminderung von Setzungen und Setzungsunterschieden. Bei Pfahlgründungen legen die Planer großen Wert auf die Optimierung der Anzahl von Pfählen und die Berechnung der Pfahltragfähigkeit. Bei der Vibrationsverdichtung, dagegen, werden Verdichtungskriterien oft auf Basis von empirisch ermittelten Faustregeln festgelegt. Wahl des Verfahrens, sowie Planung und Durchführung der Verdichtungsarbeiten, werden häufig Spezialtiefbauunternehmen überlassen. Oft wird angestrebt, den Boden so stark wie möglich zu verdichten, wobei nicht beachtet wird, dass dadurch die ökonomischen und technischen Vorteile der Vibrationsverdichtung verloren gehen können. Ein Grund für diese nicht zufriedenstellende Vorgangsweise ist das unzureichende Verständnis des Verdichtungsvorganges, sowie das mangelnde Verständnis, wie Setzungen in rolligen Böden berechnet werden können. Außerdem werden die durch die Vibrationsverdichtung verursachten Spannungsänderungen im Boden selten beachtet. Ohne dieses Kenntnis ist es schwierig, Verdichtungsprojekte optimal zu projektieren und zu dimensionieren. In der geotechnischen Literatur sind praktisch anwendbare Setzungsberechnungsverfahren beschrieben [6]. Das Hauptproblem bei deren Anwendung ist jedoch die Wahl von relevanten Eingangsparametern. Ein wichtiger Aspekt bei jeder Setzungsberechnung ist die Beurteilung der Vorbelastungsspannung. Wie nachfolgend gezeigt wird, erhöht sich – unabhängig vom gewählten Vibrationsverdichtungsverfahren – die Horizontalspannung im Boden. Dies bedeutet, dass rollige Böden durch die Vibrationsverdichtung vorbelastet werden.

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. Danach wurden 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 wurde mittels CPT- und DMT-Messung ermittelt. Daraus konnte der Vorbelastungsgrad nach der Vibrationsverdichtung ermittelt werden.

2 Fallstudien mit verschiedenen Verdichtungsverfahren

Im Folgenden wurden die veröffentlichten Ergebnisse von fünf Vibrationsverdichtungsprojekten in überwiegend rolligen Böden neu analysiert, bei denen sowohl CPT- als auch DMT-Messungen zur Verfügung standen: a) Fallgewicht (Gdansk, Polen); b) Vi-

broflotation (Gdynia, Polen); c) VibroWing mit Vibrationsplatte (Värnamo, Schweden); d) Resonanzverdichtung mit steifer Y-Bohle (Annacis Island, Kanada) und e) Resonanzverdichtung mit flexibler, doppelter Y-Bohle (Antwerpen, Belgien). Die Vibrationsverdichtungsprojekte, verwendete Verfahren, geotechnischen Voraussetzungen und Ergebnisse der Sondierungen sind in den angegebenen Referenzen näher beschrieben. Hauptziel der vorliegenden Studie war zu untersuchen, ob der Einsatz der Vibrationsverdichtung eine Veränderung der Horizontalspannungen bewirkte. Folgende Vorgangsweise wurde bei der Analyse der Fallstudien angewendet: Die zugänglichen CPT- und DMT-Daten wurden digitalisiert und danach einheitlich ausgewertet und zusammengestellt. Um den Einfluss von Bodenschichtungen auf die CPT-Messungen (q_c und f_s) zu begrenzen, wurde der geometrische Mittelwert der Sondierwerte über ein Tiefenintervall von circa 0,4 m (Erfahrungswert) berechnet. Bei den CPT-Versuchen wurde der Spitzenwiderstand q_c und der Mantelwiderstand f_s sowohl vor als auch nach der Verdichtung für das jeweilige Tiefenintervall gewählt. Für die DMT-Versuche wurden der Materialindex I_D und der Horizontalspannungsindex K_D ermittelt. Abschließend wurde die Veränderung der Horizontalspannung, ausgehend von CPT- und DMT-Versuchen, bestimmt.

3 Fallgewicht – Gdansk, Polen

Im Vistula Delta bei Gdansk wurden Verdichtungsversuche mit einem Fallgewicht ausgeführt [7]. Der Untergrund bestand aus Sanden mit zwischengelagerten organischen Schichten. Bis zu 6 m Tiefe wurden locker gelagerte Fein- und Mittelsande mit einem Schluffanteil unter 6 % angetroffen. Organische Anteile traten zwischen 6 m und 16 m Tiefe auf. Die Verdichtung erfolgte mit einem Fallgewicht von 18 t aus einer Fallhöhe von 18 m und wurde in zwei Phasen durchgeführt. Zuerst wurde in einem rechteckigen Raster von 7,5 m x 7,5 m Abstand verdichtet. Nach acht Tagen erfolgte die Verdichtung in den Diagonalepunkten. Durch jeweils 13 Schläge wurde die angestrebte Verdichtungsenergie von 1 500 kJ/m² erreicht. Der Verdichtungseffekt wurde mittels CPT- und DMT-Untersuchungen gemessen. Bild 1 zeigt die Ergebnisse der CPT-Sondierung vor der Verdichtung, einen

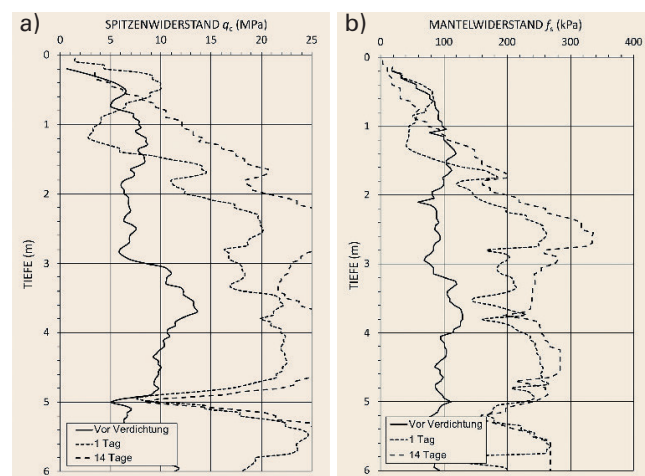


Bild 1. Ergebnisse der CPT-Untersuchungen vor und nach der Verdichtung mittels Fallgewicht, Gdansk. Abb.: K. R. Massarsch

Fig. 1. Results of CPT investigation before and after compaction by falling weight, Gdansk. Source: K. R. Massarsch

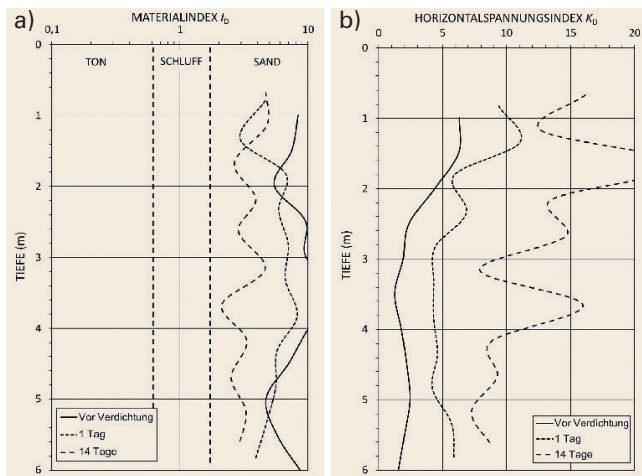


Bild 2. Ergebnisse der DMT-Messungen: Materialindex I_D und Horizontalspannungsindex K_D vor und nach der Verdichtung mittels Fallgewicht, Gdansk. Abb.: K. R. Massarsch

Fig. 2. Results of DMT investigation: Material index I_D and horizontal stress index K_D before and after compaction by falling weight, Gdansk.

Source: K. R. Massarsch

Tag nach der Verdichtung sowie 14 Tage nach der Verdichtung. Die wechselnden Bodenverhältnisse nahe der Oberfläche und in circa 5 m Tiefe sind am Spitzenwiderstand erkennbar. Vor der Verdichtung lag der Spitzenwiderstand zwischen 6-12 MPa und stieg einen Tag nach der Verdichtung auf 15 MPa bis 22 MPa an. 14 Tage nach der Verdichtung hatte der Spitzenwiderstand um weitere circa 5 MPa zugenommen. Der Mantelwiderstand war vor der Verdichtung circa 100 kPa und konnte durch die Verdichtung auf circa 200 kPa erhöht werden. Innerhalb von 14 Tagen nahm der Mantelwiderstand um weitere 50 kPa bis 100 kPa zu.

DMT-Messungen wurden ebenfalls vor der Vibrationsverdichtung, einen Tag sowie 14 Tage nach der Verdichtung durchgeführt. **Bild 2** zeigt I_D und K_D vor und nach der Verdichtung.

I_D verringerte sich nach der Verdichtung, was aber nicht bedeutet, dass die Bodenart durch die Verdichtung verändert wurde. Die Auswertung von I_D wird durch die Änderung der Horizontalspannung beeinflusst. Anhand von **Bild 2** kann gezeigt werden, dass durch die Vibrationsverdichtung die Horizontalspannungen deutlich erhöht wurden. K_D verdoppelte sich einen Tag nach der Verdichtung und stieg innerhalb von 14 Tagen weiter stark an. In **Bild 3** wurden die Veränderungen der Horizontalspannungen aus CPT und DMT verglichen. Sowohl CPT als auch DMT-Messungen zeigen, dass sich einen Tag nach der Verdichtung der Mantelwiderstand um den Faktor 2-3 erhöht hatte. Es besteht eine gute Übereinstimmung zwischen den CPT- und DMT-Messungen. Innerhalb der folgenden 14 Tage zeigten sowohl CPT als auch DMT eine weitere Zunahme der Horizontalspannung. Diese war jedoch bei den DMT-Messungen bedeutend grösser, was durch die unterschiedlichen Versuchsbedingungen (Abstand von der Sondierung zum Verdichtungspunkt) und die veränderlichen Bodenverhältnisse erklärt werden kann.

4 Vibroflotation – Gdynia, Polen

In der Nähe des President Harbour in Gdynia wurden Gebäude auf holozänen Bodenschichten gegründet. Der Untergrund bestand aus locker gelagerten Sanden mit organischen Einlagerun-

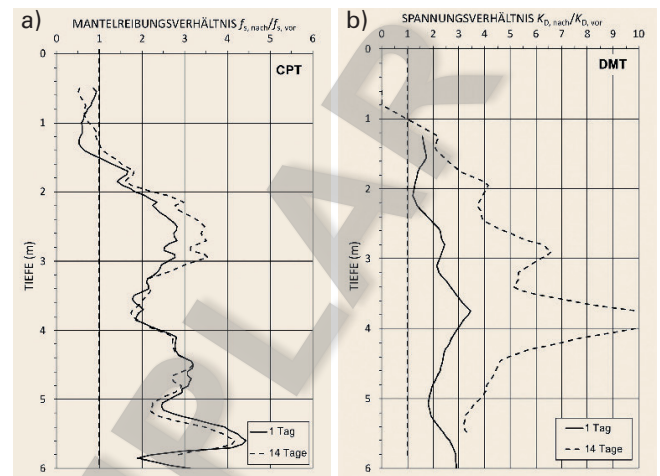


Bild 3. Veränderung des Horizontalspannungsindex durch die Vibrationsverdichtung 1 und 14 Tage nach Verdichtung mittels Fallgewicht, Gdansk. Abb.: K. R. Massarsch

Fig. 3. Changes of horizontal stress index due to deep compaction, 1 and 14 days after treatment by falling weight, Gdansk. Source: K. R. Massarsch

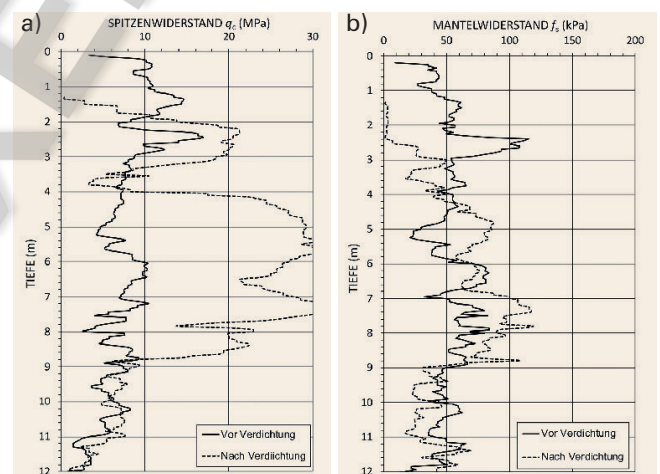


Bild 4. Ergebnisse der CPT-Untersuchungen vor und nach der Verdichtung mittels Vibroflotation, Gdynia. Abb.: K. R. Massarsch

Fig. 4. Results of CPT investigation before and after compaction by vibroflotation, Gdynia. Source: K. R. Massarsch

gen. Die oberste Sandschicht war locker bis mitteldicht gelagert und hatte einen Schluffanteil von unter 7 %. Das Projekt ist in [8] näher beschrieben. Als Verdichtungsverfahren wurde die Vibroflotation mit einem Tiefenrüttler mit einer Leistung von 120 kW und einer Frequenz von 30 Hz verwendet. Die Schwingamplitude des freihängenden Rüttlers war 20 mm. Die Vibratorleistung sowie die Setzung an der Bodenoberfläche wurden kontinuierlich registriert. Die Verdichtung erfolgte in einem rechteckigen Raster von 3 m x 3 m. Vor, sowie nach der Verdichtung wurden CPT- und DMT-Messungen in den Diagonalepunkten des Verdichtungsrastrers durchgeführt. Die Ergebnisse der CPT-Sondierungen vor und nach der Verdichtung sind in **Bild 4** gezeigt.

Der zu verdichtende Boden war teilweise geschichtet, was aus dem Verlauf des Spitzenwiderstand erkennbar ist. Sowohl der Spitzenwiderstand als auch der Mantelwiderstand erhöhten sich aufgrund der Verdichtung zwischen einer Tiefe von 2 m beziehungsweise 4 m bis 8,5 m. Nahe der Bodenoberfläche konnte hingegen eine gewisse Auflockerung beobachtet werden. Aus den

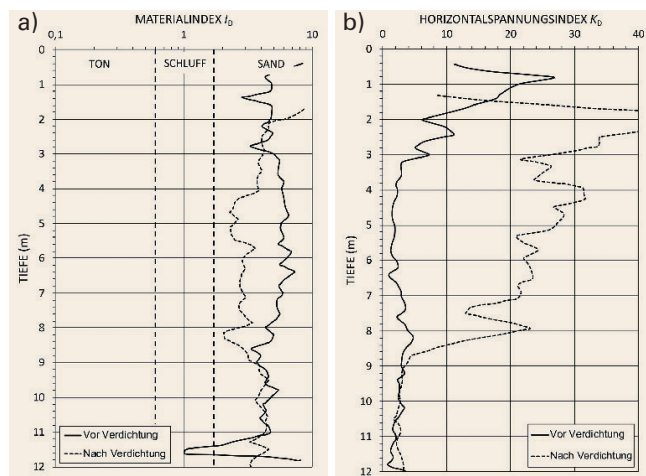


Bild 5. Ergebnisse der DMT-Untersuchungen: Materialindex I_D und Horizontalspannungsindex K_D vor und nach der Verdichtung mittels Vibroflotation, Gdynia. Abb.: K. R. Massarsch

Fig. 5. Results of DMT investigations: Material index I_D and horizontal stress index K_D before and after compaction by vibroflotation, Gdynia. Source: K. R. Massarsch

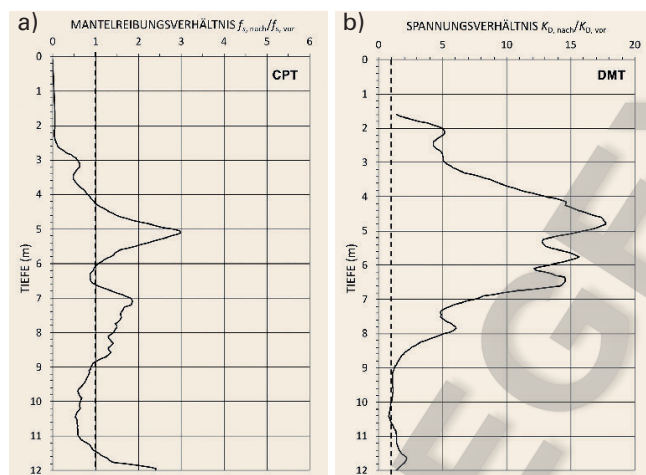


Bild 6. Veränderung des Horizontalspannungsindex nach der Verdichtung mittels Vibroflotation, Gdynia. Abb.: K. R. Massarsch

Fig. 6. Changes in horizontal stress index due to deep compaction by vibroflotation, Gdynia. Source: K. R. Massarsch

Unterlagen ging nicht hervor, ob die Setzung der Bodenoberfläche bei der Auswertung der Sondierungen nach der Verdichtung berücksichtigt wurde.

Die Ergebnisse der DMT-Untersuchungen vor und nach der Vibrationsverdichtung sind in **Bild 5** dargestellt. Der Materialindex I_D charakterisiert den Boden vor der Verdichtung als Sand, verringerte sich jedoch nach der Verdichtung, was auf die Veränderung der Horizontalspannung zurückzuführen ist. K_D war vor der Verdichtung gering (2-4), erhöhte sich aber nach der Verdichtung im Bereich von 2,5 m bis 8,0 m Tiefe auf sehr hohe Werte (15-35). Unter 8 m Tiefe konnte keine Veränderungen von I_D und K_D festgestellt werden. In **Bild 6** wird die abgeleitete Veränderung der Horizontalspannung aus CPT und DMT verglichen. Zwischen 4,5 m und 8 m stieg der Mantelwiderstand um einen Faktor von 1,5 bis 3. Noch stärker erhöhte sich das Horizontalspannungsverhältnis (> 10). Eine Ursache dieser starken Zu-

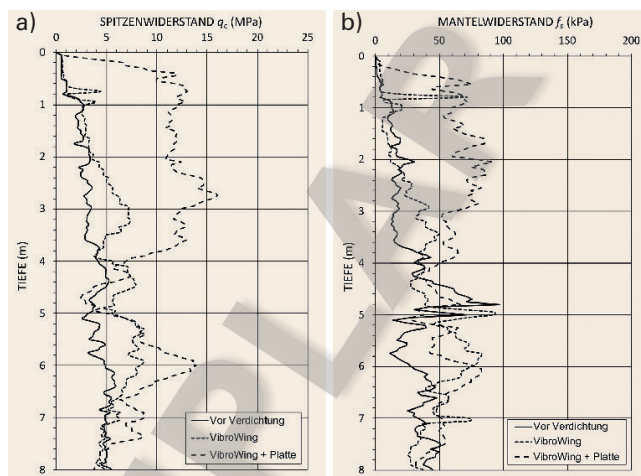


Bild 7. Ergebnisse der CPT-Untersuchungen vor und nach der VibroWing-Verdichtung, Värnamo. Abb.: K. R. Massarsch

Fig. 7. Results of CPT investigation before and after VibroWing compaction, Värnamo. Source: K. R. Massarsch

nahme war mit größerer Wahrscheinlichkeit der niedrige Ausgangswert von K_D vor der Verdichtung.

5 VibroWing – Värnamo, Schweden

Das VibroWing Verfahren wurde zur Bodenverbesserung im Zuge der Herstellung von Wohnhäusern in der Stadt Värnamo in Südschweden eingesetzt. Der Untergrund bestand aus schluffigen, locker gelagerten Sanden. Das Gelände war nahezu horizontal und der Grundwasserspiegel wurde in 3 m Tiefe angetroffen. Anstelle einer Pfahlgründung bot sich die Vibrationsverdichtung als kostengünstige Alternative an. Die Gründung der Gebäude erfolgte mittels Plattenfundamenten auf dem verdichteten Boden. Um die Durchführung der Verdichtung zu optimieren, wurden zu Beginn des Projektes umfangreiche Verdichtungsversuche durchgeführt [9]. Der Einfluss des Rasterabstandes der Verdichtungspunkte und die Dauer der Verdichtung wurden variiert. Zur Verdichtungskontrolle wurden CPT- und DMT-Messungen verwendet. Das Verdichtungsgerät bestand aus einem 11 m langen Rohr (Durchmesser 200 mm), an dem im Abstand von 0,5 m über der Spitze 0,8 m breite Flügel angeschweißt waren („VibroWing“). Als Aufsatzrüttler wurde ein elektrischer Vibrator vom Typ Tommen VM2-5000 verwendet. Die Verdichtung erfolgte mit einer Frequenz von 20 Hz. Die VibroWing-Methode ist in [10] beschrieben. Die Verdichtungsversuche wurden in einem dreieckigen Raster mit 2,2 m Seitenlänge durchgeführt. Die erforderliche Verdichtungstiefe im Probefeld war 8 m. Nach der VibroWing-Verdichtung erfolgte eine Oberflächenverdichtung mittels einer 2,5 m x 3,0 m großen Vibroplatte [10]. Bei der Plattenverdichtung wurde der gleiche Vibrator wie beim VibroWing Verfahren verwendet. In **Bild 7** sind die Ergebnisse der CPT-Untersuchungen im Probefeld dargestellt. Messungen wurden vor der VibroWing-Verdichtung, einen Tag nach der VibroWing-Verdichtung sowie drei Monate nach der Oberflächenverdichtung durch die Vibroplatte durchgeführt.

Wie aus den Messungen des Spitzenwiderstandes und des Mantelwiderstandes hervorgeht, war der schluffige Sand vor der Verdichtung – teilweise bedingt durch den hohen Schluffanteil –

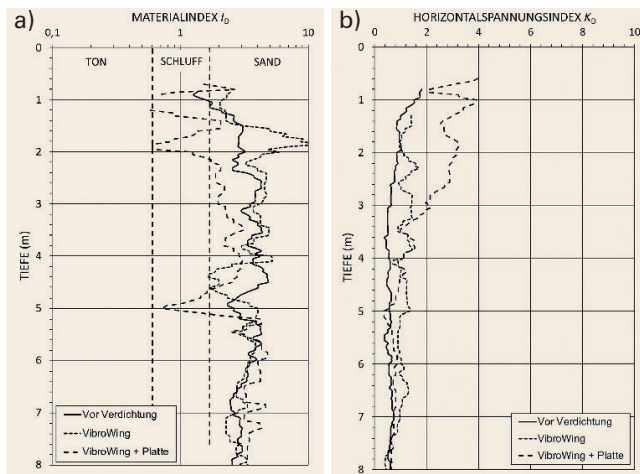


Bild 8. Ergebnisse der DMT-Messungen: Materialindex I_D und Horizontalspannungsindex K_D vor und nach der VibroWing-Verdichtung, Värnamo. Abb.: K. R. Massarsch

Fig. 8. Results of DMT investigation: Material index I_D and horizontal stress index K_D before and after VibroWing compaction, Värnamo.

Source: K. R. Massarsch

sehr locker gelagert. Nach der VibroWing-Verdichtung stieg der Sondierwiderstand (Spitzenwiderstand und Mantelwiderstand) nur geringfügig an, obwohl bereits Setzungen von mehreren Dezimetern an der Bodenoberfläche beobachtet wurden. Daher wurde beschlossen, eine zusätzliche Oberflächenverdichtung mit einer Vibroplatte durchzuführen. Sondierungen erfolgten drei Monate nach Abschluss der Oberflächenverdichtung. Aus Bild 7 geht deutlich hervor, dass durch die Oberflächenverdichtung sowohl der Spitzenwiderstand als auch der Mantelwiderstand bis in eine Tiefe von 4 m stark erhöht wurde. Die Verdichtungstiefe entspricht etwa der Seitenlänge der Vibrationsplatte. Da die abschließenden Sondierungen drei Monate nach der Vibrationsverdichtung ausgeführt wurden trug mit großer Wahrscheinlichkeit auch eine Rekonsolidierung (Ausgleich des Porenwasserdrucks) in den schluffigen Sandschichten zu dieser Erhöhung bei. Die DMT-Versuche zeigen ähnliche Ergebnisse wie die CPT-Untersuchungen, **Bild 8**.

I_D zeigte vor der Verdichtung einen sandigen Boden an, verringerte sich aber nach der Plattenverdichtung, was auf den Einfluss der Horizontalspannung zurückzuführen ist. K_D nahm aufgrund der Änderung der Vibrationsverdichtung zu, wobei die Oberflächenverdichtung bis zu 3 m Tiefe einen deutlichen Einfluss hatte.

Bild 9 zeigt das Verhältnis der Horizontalspannungen vor und nach der Vibrationsverdichtung mittels VibroWing und der Oberflächenverdichtung mittels Vibroplatte. Die niedrigeren Werte des Spannungsverhältnisses in rund 5 m Tiefe wurde wahrscheinlich durch die veränderlichen Bodenverhältnisse im Versuchsbereich verursacht.

Aus den CPT- und DMT-Versuchen ist deutlich erkennbar, dass durch die Vibrationsverdichtung die Horizontalspannungen erhöht wurden. Die Messungen vor allem verursacht durch die Vibrationsplatte drei Monate nach der Vibrationsverdichtung zeigen, dass die Horizontalspannungen bis auf 3 m Tiefe um einen Faktor 3-4 angestiegen sind. Zwischen 3,5 m und 7 m Tiefe haben sich die Horizontalspannungen durch die Verdichtung mittels VibroWing mit Vibrationsplatte mehr als verdoppelt.

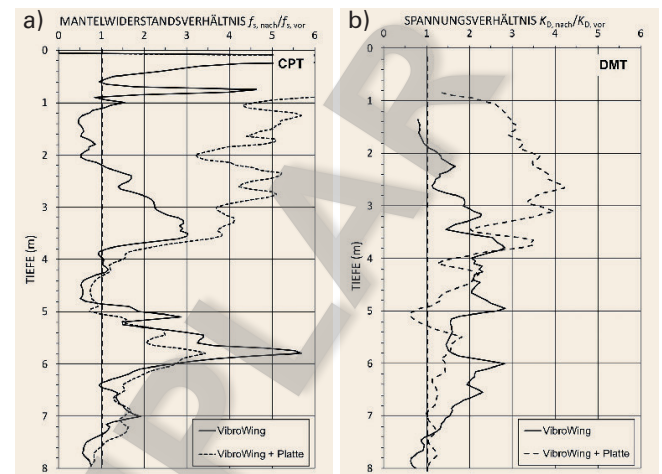


Bild 9. Veränderung der Horizontalspannungen nach der Verdichtung mittels VibroWing und Verdichtungsplatte, Värnamo. Abb.: K. R. Massarsch
Fig. 9. Changes in horizontal stresses following compaction by VibroWing and compaction plate, Värnamo. Source: K. R. Massarsch

6 Tri Star-Resonanzverdichtung – Annacis Island, Kanada

Vibrationsverdichtung wurde im Delta des Frazer River nahe Vancouver in Kanada durchgeführt [11]. Der Grundwasserspiegel lag circa 2 m unter der Geländeoberfläche. Das Ziel der Bodenverbesserung war, das Risiko der Bodenverflüssigung (Liquefaction) infolge eines möglichen Erdbebens zu verringern. Die Vibrationsverdichtung wurde bis zu einer Tiefe von maximal 11 m ausgeführt. Dazu wurde eine steife Bohle von 12 m Länge verwendet. Die Verdichtungsbohle hatte einen Y-Querschnitt („Tri-Star“) mit drei Flügeln, 500 mm breit und 20 mm stark. Ein Rüttler mit variabler Frequenz (ICE 812) und einem statischen Moment von 46 kgm wurde verwendet. Bei einer maximalen Schwingungsfrequenz von 26 Hz wurde eine Zentrifugalkraft von 1 110 kN entwickelt. Die Verdichtungsbohle wurde mit maximaler Frequenz (26 Hz) eingerüttelt. Danach wurde die Frequenz schrittweise vermindert, bis Resonanz des Vibrator-Bohlen-Bodensystems eintrat („Resonanzverdichtung“). Die Vibrationsverdichtung wurde mit einer Frequenz von 13 Hz bis 16 Hz durchgeführt.

Der Boden bestand aus locker gelagerten, schluffigen Sanden. Vor Beginn des Verdichtungsprojektes wurden umfangreiche Sondierungen durchgeführt. Nach Abschluss der Verdichtungsarbeiten wurde von der University of British Columbia (UBC), Vancouver, ein Forschungsprojekt gestartet, um den Einfluss der Vibrationsverdichtung auf die Horizontalspannungen im Boden zu untersuchen [12]. Eine der zu beantwortenden Fragen war, ob die Vibrationsverdichtung eine permanente Änderung der Horizontalspannungen verursachte, das heißt ob diese drei Monate nach der Verdichtung noch vorhanden waren.

CPT-Sondierungen wurden vor der Verdichtung, sowie 67 und zusätzlich 82 Tage nach der Verdichtung ausgeführt. Die Ergebnisse der CPT-Untersuchung sind in **Bild 10** dargestellt. Die obersten Bodenschichten waren bis 2 m Tiefe dicht gelagert. Darunter lag der Spitzenwiderstand vor der Verdichtung zwischen 1 MPa und 6 MPa. Auch der Mantelwiderstand war vor der Verdichtung sehr gering und lag zwischen 2 kPa und 15 kPa. Anhand

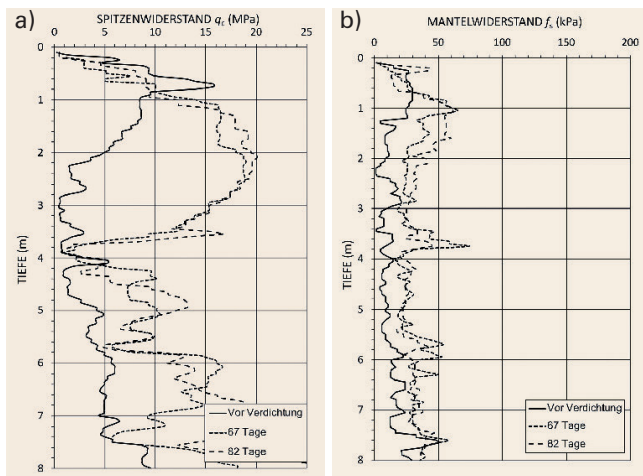


Bild 10. Ergebnisse der CPT-Untersuchungen vor und 67 respektive 82 Tage nach der Verdichtung mittels TriStar Verfahren, Annacis Island. Abb.: K. R. Massarsch
Fig. 10. Results of CPT investigations before, 67 and 82 days after compaction by TriStar method, Annacis Island. Source: K. R. Massarsch

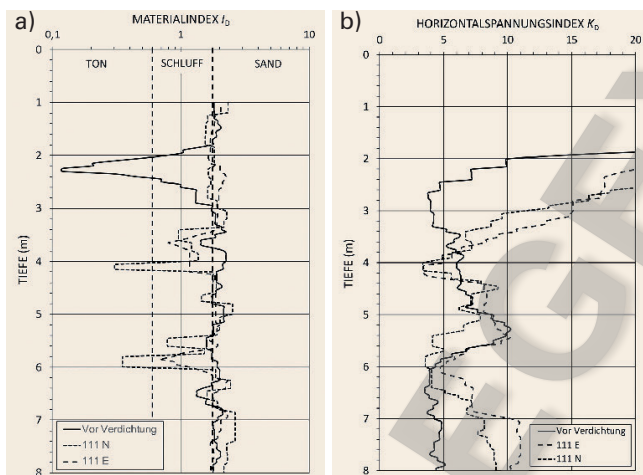


Bild 11. Ergebnisse der DMT-Messungen vor und 82 Tage nach der Vibrationsverdichtung. Bezeichnungen E: Messrichtung Ost; N: Messrichtung Nord, Annacis Island. Abb.: K. R. Massarsch
Fig. 11. Results of DMT investigation before and 82 days after compaction. Term E: measurement direction East; N: measuring direction North, Annacis Island. Source: K. R. Massarsch

der CPT-Sondierungen ist erkennbar, dass in dem sandigen Boden feinkörnige (tonige und schluffige) Schichten eingebettet waren. Aufgrund der Vibrationsverdichtung stieg der Spitzenwiderstand innerhalb der ersten 67 Tage nach der Verdichtung bis auf 15-20 MPa an. Auch der Mantelwiderstand nahm durch die Verdichtung deutlich zu. Bei der darauffolgenden Messung, welche 82 Tage nach der Verdichtung erfolgte, ist örtlich noch eine zusätzliche geringe Zunahme des Sondierwiderstandes erkennbar.

DMT-Versuche konnten von der UBC nur 82 Tage nach der Verdichtung ausgeführt werden. Um die Verhältnisse vor der Verdichtung zu simulieren, wurden DMT-Versuche zusätzlich in einem nahegelegenen, nicht verdichteten Bereich mit ähnlichen Bodenverhältnissen, durchgeführt. Die Ergebnisse der DMT-Messungen vor, sowie 82 Tage nach der Vibrationsverdichtung sind in **Bild 11** dargestellt. Um einen eventuellen Richtungseinfluss

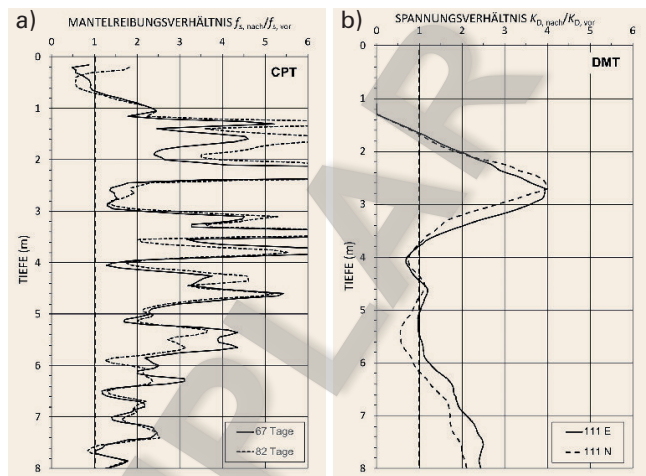


Bild 12. Veränderung des Horizontalspannungsindex durch die Vibrationsverdichtung. CPT-Versuche 67 und 82 Tage nach der Verdichtung mittels TriStar-Verfahren, Annacis Island. Abb.: K. R. Massarsch
Fig. 12. Changes in Horizontal Stress Index due to deep compaction. CPT investigation 67 and 82 days after treatment. DMT investigations 82 days after treatment. Source: K. R. Massarsch

der Vibrationsverdichtung zu untersuchen, wurden DMT-Messungen in zwei Richtungen (N: nördlich; E: östlich) durchgeführt.

Der Verlauf von I_D in **Bild 11** zeigt die Veränderlichkeit der Bodenschichten und das Vorkommen von Ton – und Schluffschichten im Sand. Nach der Verdichtung war der I_D -Wert niedriger als vor der Verdichtung, was einem mehr feinkörnigen Boden entspricht. Da der Boden jedoch nicht verändert wurde, kann angenommen werden, dass dieser Effekt durch die Veränderung der Horizontalspannungen im Boden verursacht wurde. Aufgrund der Vibrationsverdichtung wurde K_D , ausgenommen in den weichen, feinkörnigen Bodenschichten, generell erhöht. Es konnte kein Richtungseinfluss der Verdichtung auf die K_D -Messungen festgestellt werden.

Bild 12 zeigt die Veränderung der Horizontalspannungen, abgeleitet aus CPT- und DMT-Messungen.

CPT-Sondierungen zeigen einen deutlichen Anstieg des Mantelwiderstandes, der auch noch im Zeitraum zwischen 67 Tage und 82 Tage nach der Verdichtung weiter zunahm. Der Mantelwiderstand erhöhte sich um einen Faktor von 2 bis 5. Die starken Variationen erklären sich durch die veränderlichen Bodenverhältnisse in den verschiedenen Versuchspunkten. Auch der mittels DMT gemessene Horizontalspannungsindex hat 82 Tage nach der Verdichtung deutlich zugenommen. Die Messungen bestätigen die permanente Veränderung der horizontalen Effektivspannungen im Boden aufgrund der Vibrationsverdichtung.

7 Resonanzverdichtung – Antwerpen, Belgien

Das Resonanzverdichtungsverfahren wurde im Zusammenhang mit dem Bau eines Containerhafens in Antwerpen angewendet, um die geotechnischen Eigenschaften einer circa 6 m bis 11 m mächtigen Sandfüllung hinter einer Kaimauer zu verbessern [13]. Ziel der Vibrationsverdichtung war, Setzungen und Setzungsunterschiede bei einer statischen Last von 60 kPa zu begrenzen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde

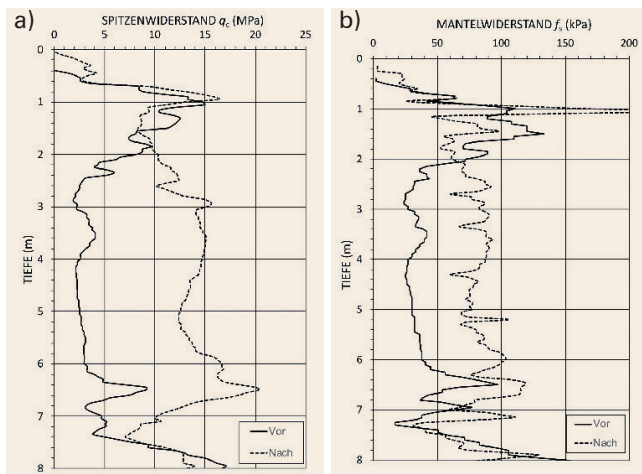


Bild 13. Ergebnisse der CPT-Untersuchungen vor und nach der Resonanzverdichtung, Antwerpen. Abb.: K. R. Massarsch
Fig. 13. Results of CPT investigation before and after resonance compaction, Antwerp. Source: K. R. Massarsch

vorgeschrieben, einen CPT-Spitzenwiderstand von mindestens 6 MPa nach der Verdichtung zu erreichen. Zu Beginn des Projektes wurden Verdichtungsversuche durchgeführt, um das Verdichtungsverfahren, die Resonanzfrequenz und den optimalen Rasterabstand zu ermitteln. Die Probeverdichtung wurde in einem dreieckigen Rasterabstand mit einer Seitenlänge von 2 m bis 5 m durchgeführt. Die Dauer der Verdichtung war abhängig von der Mächtigkeit der zu verdichtenden Bodenschicht und variierte zwischen zehn und 15 Minuten pro Verdichtungspunkt. Im Probefeld war die Mächtigkeit der Sandaufschüttung circa 7 m. Die Verdichtung wurde mit einem Aufsatzrüttler (MS 50HFV) mit einem statischen Moment von 50 kgm und variabler Frequenz durchgeführt. Die 12 m lange Verdichtungsbohle hatte einen doppelten Y-Querschnitt mit einer Flügellänge von 0,6 m. Außerdem wurde die Steifigkeit der Bohle durch circa 0,5 m weite Öffnungen in den Flügeln und dem Mittelsteg reduziert. Dadurch wurde eine erhöhte Übertragung der Vibrationsenergie von der Bohle in den Boden erreicht [14]. Die Frequenz konnte zwischen 10 Hz und 30 Hz verändert werden. Die Verdichtungsbohle hatte eine maximalen Schwingwegamplitude (freihängend) von 26 mm. Der Rüttler erzielte bei 30 Hz eine Fliehkraft von 1 500 kN. Sondierungen mittels CPT und DMT wurden vor, während und nach der Probeverdichtung durchgeführt. **Bild 13** zeigt den mit CPT gemessenen Spitzenwiderstand und Mantelwiderstand vor und einige Tage nach der Resonanzverdichtung.

Der Spitzenwiderstand der locker gelagerten Sandfüllung lag vor der Verdichtung bei 3 MPa und wurde durch die Verdichtung auf 10 MPa bis 15 MPa erhöht. Der Mantelwiderstand war vor der Verdichtung gering (30 kPa). Nach der Verdichtung erhöhte sich dieser auf 70 kPa-90 kPa. Die Ergebnisse der DMT-Messungen sind in **Bild 14** gezeigt.

Der Materialindex I_D charakterisierte den Boden vor der Verdichtung als schluffigen Sand. Nach der Verdichtung erhöhte sich jedoch I_D auf Werte, die typisch für einen Sandboden sind. Es ist jedoch auszuschließen, dass der Boden durch die Resonanzverdichtung verändert wurde. Dies zeigt – ähnlich wie das Reibungsverhältnis bei CPT-Messungen – dass der Materialindex I_D bei

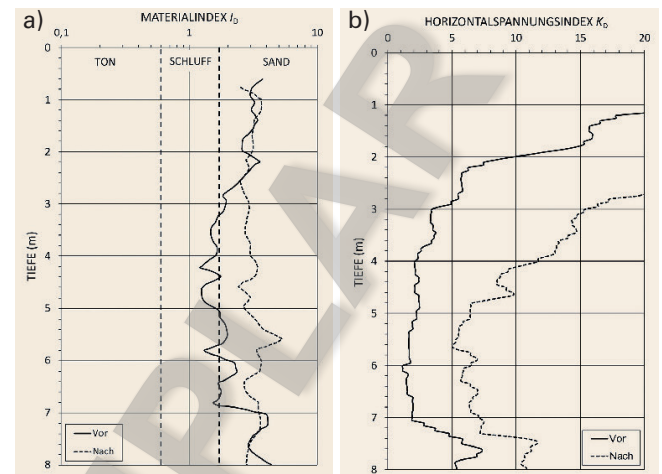


Bild 14. Ergebnis der DMT-Untersuchung: Materialindex I_D und Horizontalspannungsindex K_D vor und nach der Resonanzverdichtung, Antwerpen. Abb.: K. R. Massarsch
Fig. 14. Results of DMT investigation: Material Index I_D and Horizontal Stress Index K_D before and after resonance compaction, Antwerp. Source: K. R. Massarsch

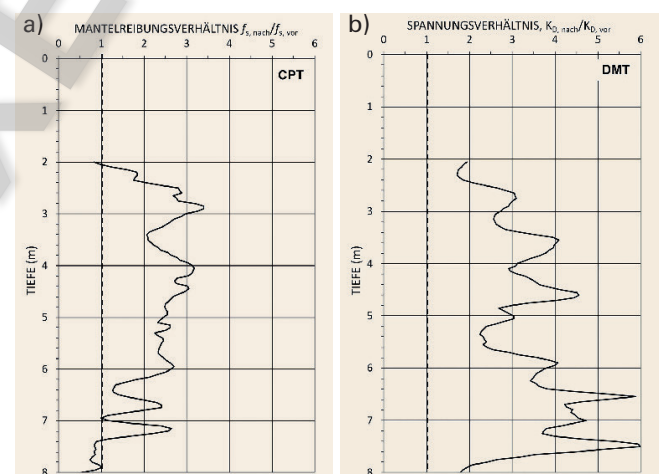


Bild 15. Veränderung der Horizontalspannungen durch die Resonanzverdichtung, Antwerpen. Abb.: K. R. Massarsch
Fig. 15. Changes in horizontal stresses due to resonance compaction, Antwerp. Source: K. R. Massarsch

Vibrationsverdichtungsprojekten mit Vorsicht interpretiert werden muss. K_D war vor der Vibrationsverdichtung in der dicht gelagerten, oberflächennahen Schicht sehr hoch (> 25) was durch den Betrieb schwerer Transportfahrzeuge vor der Verdichtung erklärt werden kann. Unter 3 m Tiefe war K_D vor der Verdichtung gering (3-4). Nach der Resonanzverdichtung stieg K_D auf Werte zwischen 5-15 an.

Die Veränderung der mittels CPT und DMT abgeleiteten Horizontalspannungen ist in **Bild 15** gezeigt.

Da die oberflächennahe Bodenschicht schon vor der Verdichtung sehr dicht gelagert war, sind die Veränderungen erst unter 2 m Tiefe von Interesse. Sowohl CPT- als DMT-Messungen zeigten, dass durch die Resonanzverdichtung der Mantelwiderstand deutlich erhöht wurde; bei CPT-Versuchen um einen Faktor von 2-3 und bei DMT-Versuchen um einen Faktor von 2,5-5.

8 Schlussfolgerungen

Fünf in der Literatur beschriebene Vibrationsverdichtungsprojekte wurden neu ausgewertet. Bei den Projekten kamen unterschiedliche Verdichtungsmethoden zur Anwendung: Fallgewicht; Vibroflotation; VibroWing, Resonanzverdichtung mit steifer Bohle (TriStar) und Resonanzverdichtung mit flexibler Verdichtungsbohle. In allen Fällen waren CPT- und DMT-Untersuchungen vor und nach der Verdichtung angegeben. Die vorliegende Analyse dieser fünf Projekte mit unterschiedlichen geotechnischen Voraussetzungen zeigt, dass – unabhängig vom Verdichtungsverfahren – in allen untersuchten Fällen die Horizontalspannungen im Boden deutlich erhöht wurden.

Die Horizontalspannung nahm nach der Verdichtung im Durchschnitt um einen Wert von 2 bis 6 zu. Als unterer Grenzwert der Erhöhung der Horizontalspannung kann ein Faktor von 2-3 angenommen werden. Dies bedeutet, dass alle verdichteten Böden durch die Vibrationsverdichtung stark vorbelastet wurden.

Abschließend kann festgestellt werden, dass das Anwendungspotenzial der Vibrationsverdichtung noch nicht voll ausgeschöpft ist. Wenn Verdichtungskriterien – ausgehend von geforderten Setzungen – derart gewählt werden, dass die durch die Vibrationsverdichtung hervorgerufene Vorbelastung beachtet wird, kann das Ausmaß der geforderten Vibrationsverdichtung optimiert werden und eine nicht erforderliche Überverdichtung vermieden werden. Dies würde zu einer ökonomischeren Anwendung und damit zu einer verbesserten Konkurrenzfähigkeit der Vibrationsverdichtung führen.

DANKSAGUNG

Der Verfasser möchte sich bei den Gutachtern des Manuskriptes für die detaillierten Kommentare und wertvollen Verbesserungsvorschläge bedanken.

Literatur

- [1] *Karl Josef Witt (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 2: Geotechnische Verfahren. Abschnitt 2.2 Baugrundverbesserung. 1. Nachdruck. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011.*
- [2] *Massarsch, K. R.: Grundlagen der Rüttelverdichtung. In: 31. Christian Veder Kolloquium: Baugrundverbesserung. 31. März-1. April, 2016, Tagungsbericht, S. 109-125.*
- [3] *DIN EN 14731:2005-12. Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttelverfahren; Deutsche Fassung EN 14731:2005. Ausgabe: Dezember 2005.*
- [4] *Nagy, P.: Rüttelverdichtung – Dynamische Verdichtungskontrolle auf Basis der Rüttlerbewegung. TU Wien, Institut für Geotechnik, Dissertation, 2018.*
- [5] *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.*
- [6] *Karl Josef Witt (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 1: Geotechnische Grundlagen. Baugrundverbesserung. Ernst & Sohn Verlag, 1. Auflage, Berlin, 2008.*
- [7] *Kurek, N.; Balachowski, L.: CPTU/DMT Control of Heavy Tamping Compaction of Sands. In: Conference: DMT'15 3rd International Conference on the Flat Dilatometer. Rome, Italy, June 2015.*
- [8] *Balachowski, L.; Kurek, N.: Vibroflotation Control of Sandy Soils using DMT and CPTU. In: DMT'15 3rd International Conference on the Flat Dilatometer. Rome, Italy, June 2015.*
- [9] *Jendebj, L.: Djuppackning med vibro-sond av typ vibro-wing. In: Nordiske Geoteknikermøde, NGM-92, 11. Vol. 1 (1992), pp. 19-24.*
- [10] *Massarsch, K. R.; Broms, B. B.: Soil Compaction by VibroWing Method. In: 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, Vol. 1 (1983), pp. 275-278.*
- [11] *Massarsch, K. R.; Fellenius, B. H.: Liquefaction assessment by full-scale vibratory testing. In: Proceedings of the 70th Annual Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, 2017, Paper 147.*
- [12] *Brown, D. F.: Evaluation of the Tri Star Compaction Probe. University of British Columbia, Doctoral Thesis, 1989.*
- [13] *Van Impe, V. F.; De Cock, F.; Massarsch, K. R.; et al.: Recent experiences and developments of the resonant vibrocompaction technique. In: International conference on soil mechanics and foundation engineering, New Delhi, 13. Vol. 3 (1994), pp. 1151-1156.*
- [14] *Massarsch, K. R. et al.: Neue Erfahrungen bei der Vibrationsverdichtung. In: 12. Österreichische Geotechniktagung, Theorie & Praxis des Spezialtiefbaus Tagungsbeiträge, 31.01-1.02. 2019, S. 261-271.*



Dr. Karl Rainer Massarsch

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

Abb.: GRV AB