

Optimierung der Rütteldruckverdichtung – Ein Modellversuchsstand

M. Hell^{1,2}, J. Wehr¹

¹ Institut für Geotechnik, Fachhochschule Erfurt <marylin.hell@fh-erfurt.de>

² Engineering Team, Keller Holding GmbH, Offenbach

KURZFASSUNG

Die Rütteldruckverdichtung ist eine effektive Methode der Bodenverbesserung locker gelagerter grobkörniger Böden. Das Verfahren wird bisher ohne Steuerung eingesetzt und hauptsächlich nach der Stromaufnahme des Rüttlermotors und der Erfahrung des Personals geregelt. Neben der Untersuchung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers sowie des Verdichtungs- und Verflüssigungsverhaltens des Bodens steht die Entwicklung eines multikriteriellen Steuerungsalgorithmus im Fokus der Forschung. Dazu wurde ein eigener maßstäblicher Modellversuchsstand entwickelt. Ziel ist es die Rütteldruckverdichtung ganzheitlich zu optimieren. Der Modellversuchsstand wird in diesem Paper näher beschrieben und die verwendete Sensorik wird vorgestellt, die zur Aufzeichnung der Rüttler-Boden-Interaktion dient. Die wichtigsten Einflussparameter werden kurz erläutert.

Schlagerworte: Rütteldruckverdichtung, Modellversuch, Bodendynamik, Sensorik

1 EINLEITUNG

In den 1930er Jahren wurde die Rütteldruckverdichtung zur Bodenverbesserung grobkörniger Böden von der Firma Johann Keller GmbH entwickelt. Das Verfahren wurde im Laufe der Jahre immer weiterentwickelt, jedoch sind immer noch viele grundlegende Fragestellungen offen. Die eingestellten Frequenzen oder der Spüldruck beruht in vielen Fällen auf Erfahrungswerten und sind bisher nicht ausreichend wissenschaftlich nachgewiesen. Deshalb wurde ein Modellversuchsstand entwickelt und in der Laborhalle der Fachhochschule Erfurt in einem Kooperationsforschungsprojekt mit der Firma Keller Holding GmbH aufgebaut. Dieses Projekt ist Teil einer Reihe von Forschungsprojekten zur Optimierung des Verfahrens. Hierzu zählen auch Großversuche mit sensortechnisch ausgestatteten Tiefenrüttlern, die dann in kleinem Maßstab im Modellversuchsstand

nachempfunden werden. Somit kann der Maßstabeffekt genau untersucht werden.

1.1 Der Modellrüttler

Nach (Pregl 2000) lassen sich Modellversuche in drei Kategorien einteilen. Dieser Versuchsstand ist ein „Modellversuch zur Ermittlung von Mechanismen“. Der Modellrüttler ist einem Tiefenrüttler der Firma Keller maßstabsgerecht nachempfunden. Er besitzt eine Spülung und die Auflast sowie Unwucht können variiert werden. Die Spülung kann entweder mit Wasser oder Luft betrieben werden. Der Rüttler ist mit Sensorik im Inneren ausgestattet, um das Bewegungsverhalten des Rüttlers genau aufzuzeichnen, siehe Abbildung 1. Dazu gehören vier Beschleunigungssensoren (orange) auf zwei Ebenen, eine Kraftmessdose und ein Hall-Sensor (violett) zur Bestimmung des Vorlaufwinkels. Die Sensoranordnung im Tiefenrüttler orientiert sich an (Fellin 2000) und wurde

bereits bei (Nagy 2018) im Feldeinsatz getestet. Die Beschleunigungssensoren sind hier möglichst weit voneinander entfernt angebracht, um das Bewegungsverhalten bestmöglich untersuchen zu können.

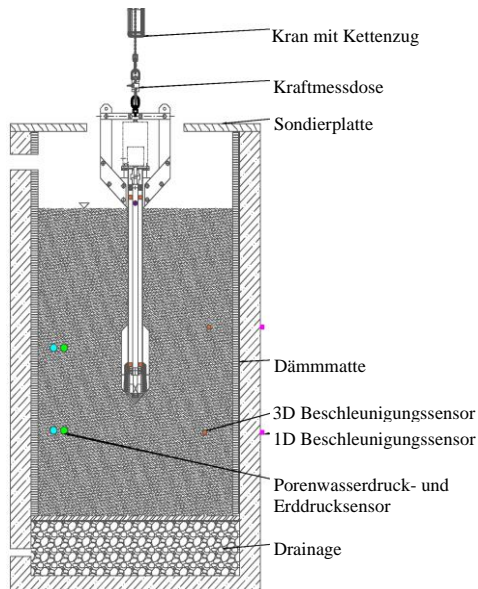


Abbildung 1: Versuchsschacht mit Modellrüttler

1.2 Der Modellversuchsstand

Der Modellversuchsstand besteht aus zwei Stahlbetonschächten. Diese sind über Rohrleitungen des Drainagesystems und einen Überlauf miteinander verbunden. Die Stahlplattform wurde eigens für den Modellversuchsstand gebaut. Wie in Abbildung 2 zu sehen, ist der linke Behälter der Lagerschacht und der rechte Behälter der Versuchsschacht. Der Lagerschacht ist lediglich mit einer Drainage ausgestattet. Der Versuchsschacht ist, wie in Abbildung 1 dargestellt, mit Sensorik ausgestattet sowie einer Dämmmatte.

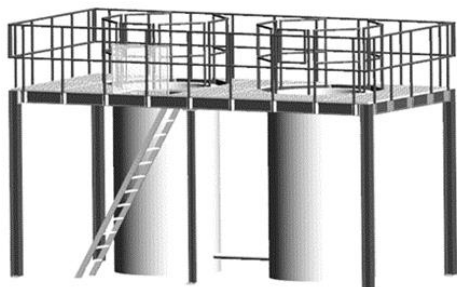


Abbildung 2: Modellversuchsstand, links Lagerschacht, rechts Versuchsschacht

Es befinden sich jeweils ein Porenwasserdrucksensor (blau), ein Erddrucksensor (grün), ein 3D Beschleunigungssensor (orange) und ein 1D Beschleunigungssensor (pink) je auf einer Ebene. Zusätzlich befindet sich am Spülzulauf ein Durchflusssensor sowie am Kettenzug ein Sensor zur Messung der Geschwindigkeit. Diese kann ebenfalls über die Tiefenmessung mittels Laser erfolgen. Außerdem werden die Stromstärke und die Spannung des Rüttlermotors aufgezeichnet. Auf dem Versuchsschacht befindet sich eine „Sondierplatte“, die einerseits zur Befestigung von Sensoren dient und andererseits als Schablone für die immer gleichen Punkte zur Rammsondierung.

1.3 Versuchssand

Im Forschungsprojekt wird zunächst ein stark kiesiger Sand untersucht und später ein leicht kiesiger Mittelsand. Beide Sande eignen sich nach (Kirsch und Kirsch 2010) sehr gut zur Verdichtung.

2 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Versuchsdurchführung kann man in die drei folgenden Kapitel unterteilen. Hierfür wurde eine immer gleiche Prozedur erarbeitet, um die Vergleichbarkeit der Versuche sicherzustellen.

2.1 Einbau des Versuchssandes

Der Versuchssand wird im Einspülverfahren mit einer Pumpe eingebaut. Die Porenwasserdruck- und Erddrucksensoren sind dabei vormontiert. Die Beschleunigungssensoren werden beweglich gelagert eingebaut mit der immer gleichen Ausrichtung des Koordinatensystems. Nachdem der Sand komplett eingebaut ist, wird das Wasser an der Oberfläche mit einer weiteren Pumpe abgesaugt. Die Drainage wird hierzu nicht genutzt, da sich dadurch das Material bereits verdichten würde. Es ist somit zu Versuchsbeginn immer in einer sehr lockeren Lagerung. Der Sand ist zudem vollständig gesättigt und stellt somit realitätsnahe Verhältnisse dar, da die Rütteldruckverdichtung oft unterhalb des Grundwasserspiegels eingesetzt wird.

2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung beginnt mit der Vermessung der Sandoberfläche, um diese nach Versuchsende vergleichen zu können. Die

Rütteldruckverdichtung wird im Modell gleich der Verdichtung im Feld durchgeführt. Die Wasser- oder Luftspülung wird gestartet und der Motor auf die gewünschte Frequenz gefahren. Der Tiefenrüttler vibriert in den Boden ein bis auf eine Endtiefe von ca. 1,2 m. Nun folgt die eigentliche Verdichtung, dabei werden drei verschiedene Methoden verglichen. Die erste Methode ist das Pilgerschrittverfahren. Der Rüttler bleibt auf einer Verdichtungsstufe nicht konstant, sondern wird wieder abgesenkt, es wird gestopft. Die zweite Methode ist die stufenweise Verdichtung. Hierbei wird der Rüttler konstant auf einer Stufe gehalten, entsprechend der bauüblichen Zeiten, und dann wieder angehoben. Die dritte Methode ist das konstante Ziehen, wobei langsamer als bei den beiden vorherigen Methoden mit konstanter Geschwindigkeit gezogen wird. Bei allen Methoden wird darauf geachtet, dass die Verdichtungszeiten vergleichbar sind.

2.3 Verdichtungskontrolle

Nach Versuchsende erfolgt die Verdichtungskontrolle nach einer Wartezeit von 30 Minuten. Die Verdichtung wird einerseits über die Volumenverringerung bzw. die Oberflächensetzung sowie mit Ausstechzylindern bestimmt. Andererseits geschieht das über die Durchführung von Rammsondierungen. Hierfür wurde eine eigene Rammsonde DPSL gebaut, da die üblich DPH wesentlich zu schwer ist. Die DPSL hat eine Fallhöhe von 50 cm und der Rammbar ist 5 kg schwer. Die Rammsonde wurde mit dem eingesetzten Material kalibriert. Korrelationen zwischen Schlagzahlen und der Lagerungsdichte wie z.B. in (Prinz und Strauß 2011) enthalten, erwiesen sich als zu variabel.

3 VERSUCHSAUSWERTUNG

Ziel der Versuchsauswertung ist es in erster Linie Parameter bzw. Verhaltensmuster der Rüttler-Boden-Interaktion zu finden, die sich besser eignen als die momentan verwendeten Steuerungsgrößen. Die Stromaufnahme des Motors, die bereits in Arbeiten von (Fellin 2000; Nagy 2018) untersucht wurde, soll durch weitere Parameter ergänzt bzw. ersetzt werden. Diese sollen in einem multikriteriellen Steuerungsalgorithmus implementiert werden und die Effektivität des Verfahrens wesentlich erhöhen.

3.1 Bewegung an der Luft

Die Bewegung an der Luft ist der erste entscheidende Schritt, um die Rütteldruckverdichtung naturgetreu im Modellversuchsstand durchführen zu können. Deshalb sollte die Bewegung an der Luft möglichst kreisförmig sein, wie in Abbildung 3 dargestellt.

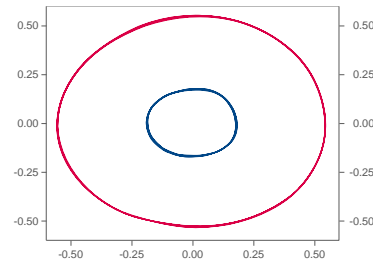


Abbildung 3: Rüttlerbewegung an der Luft [mm]

Dieses Bewegungsverhalten konnte nur durch eine symmetrische Aufhängung und eine ausreichend große Masse des Rüttlers erzeugt werden. Der Vorlaufwinkel ist hier an der Luft annähernd 180° und somit realistisch. Die rote Linie ist die untere Sensorebene in Abbildung 1 und die blaue Linie die Obere. Diese Maßnahmen waren zwar für niedrigere Frequenzen < 30 Hz nicht nötig, jedoch sollten auch höhere Frequenzen > 50 Hz analysiert werden. Das ist vor allem wichtig für die Übertragung auf Feldversuche, da die Frequenzen im Modell nicht den Frequenzen im Feld entsprechen. Die Auswertung bzw. die physikalische und bodendynamische Modellvorstellung orientiert sich an dem Fundamentmodell von (Fellin 2000) und wurde ebenfalls in (Nagy 2018) eingesetzt.

3.2 Bewegung im Boden

Die Bewegung im Boden ist von vielen Parametern abhängig. Grundlegend kommt es auf die Tiefe und die Lagerungsdichte an. Parameter, die den Verdichtungserfolg des Verfahrens maßgebend beeinflussen, sind die Amplitude, die Verdichtungsmethode, die Verdichtungszeit, die Anpresskraft und der Spüldurchfluss. Bisher wurden über 40 Versuche durchgeführt, wobei jeweils einer der genannten Parameter variiert wurde. Eine der größten Einflussmöglichkeiten auf die Verdichtung bietet die Amplitude. Diese kann bei dem Modelltiefenrüttler entweder durch die Änderung der Unwucht, der Verdichtungs-frequenz oder der Auflast erzeugt werden.

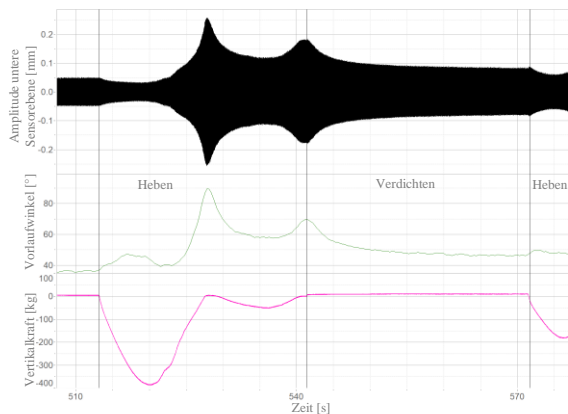


Abbildung 4: Verdichtung bei 25 Hz in schrittweiser Verdichtung bei 1 kg Unwuchtmasse

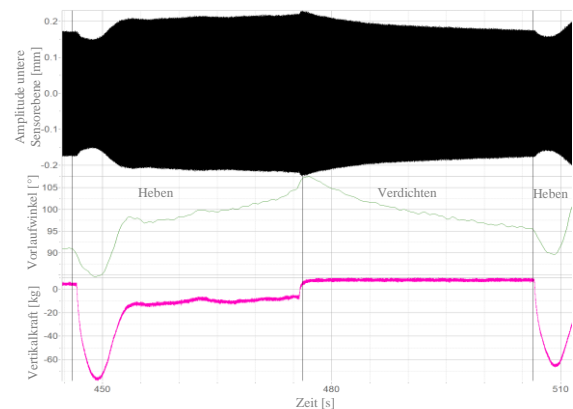


Abbildung 5: Verdichtung bei 45 Hz in schrittweiser Verdichtung bei 1 kg Unwuchtmasse

Der Einfluss der Amplitude ist gut im Vergleich von Abbildung 4 und Abbildung 5 erkennbar. Während bei der Verdichtung mit 45 Hz sich die Amplitude weniger stark ändert, ist die Änderung bei 25 Hz sehr groß. In der Phase des Hebens bei 25 Hz sinkt die Amplitude zunächst, während die Vertikalkraft und Vorlaufwinkel steigen. Sobald die mitschwingende Bodenmasse „abfällt“ hat der Rüttler Bewegungsfreiheit bis weiteres Material nachfällt. Die Vertikalkraft ist in diesem Fall wesentlich höher als das Eigengewicht. Vorlaufwinkel und Amplitude sinken. Sobald die Verdichtung beginnt, sinkt die Amplitude und erreicht sehr schnell ein konstantes Minimum, was sich ebenfalls im Vorlaufwinkel widerspiegelt. Das dieser zu Beginn sehr niedrig ist lässt darauf schließen, dass die Bewegung des Rüttlers stark eingeschränkt ist. Die Lagerungsdichte ist nach Versuchsende teilweise noch locker und der Verdichtungsbereich ist $< 0,5$ m. Anders ist das Verhalten bei 45 Hz. Hier sinkt die Amplitude beim Heben zunächst ab, woraufhin die mitschwingende Bodenmasse abfällt und die Amplitude und der Vorlaufwinkel steigen. Der Vorlaufwinkel und die Amplitude sinken ab, sobald die Verdichtung beginnt. Es wird kein konstanter Wert erreicht. Die Lagerungsdichte wird stark erhöht, teilweise wird eine dichte Lagerung erreicht. Der Einwirkungsradius ist > 1 m. Im Vergleich ist die maximale Amplitude bei beiden Versuchen gleich, jedoch ist die Änderung der Amplitude stark unterschiedlich. Die Verdichtung bei 25 Hz stellt eine zu niedrige Frequenz für diesen Sand dar. Die Verdichtung mit 30 s bei 45 Hz ist zeitlich nicht optimal, da Amplitude und Vorlaufwinkel keinen konstanten Wert erreichen.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Der Modellversuchsstand bietet viele Möglichkeiten Mechanismen im Rüttler-Boden-System zu erforschen. Es wurde ein Vergleich zweier Frequenzen gezeigt. Ein entscheidender Parameter ist die Amplitude und deren Änderung bei der Verdichtung. Dennoch sollten der Phasenwinkel und die Vertikalkraft zusätzlich berücksichtigt werden. Ist der Phasenwinkel und die Amplitude zu niedrig und die Vertikalkraft zu Beginn des Hebens zu groß, findet keine ausreichende Verdichtung bzw. Bewegung des Rüttlers statt. Mit der Vertikalkraft kann die mitschwingende Bodenmasse punktuell abgeschätzt werden. In weiteren Veröffentlichungen wird näher auf die übrigen Parameter und deren Einfluss bzw. Interaktion untereinander eingegangen.

DANKSAGUNG

Für die Förderung der Keller Holding GmbH wird sich an dieser Stelle bedankt.

LITERATURVERZEICHNIS

- Fellin, W. (2000). *Rütteldruckverdichtung als plastodynamisches Problem*. Dissertation an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck.
- Kirsch, K.; Kirsch, F. (2010): *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods*. Spon Press.
- Nagy, P. (2018): *Rütteldruckverdichtung. Dynamische Verdichtungskontrolle auf Basis der Rüttlerbewegung*. Dissertation an der Technischen Universität Wien.
- Pregl, O. (2000). *Handbuch der Geotechnik*. Band 1 Eigenverlag des Instituts für Geotechnik der Universität für Bodenkultur Wien.
- Prinz, H.; Strauß, R. (2011). *Ingenieurgeologie*. 5. Auflage. Spektrum.