



Grundlagen zur Optimierung der Rütteldruckverdichtung

Principles for optimising vibratory compaction

An der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
eingereichte

Dissertation

vorgelegt von:

Marylin Veronika Hedwig Hell, M.Sc.

geboren am 07. Juli 1992 in Merzig

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wehr
Prof. Dr.-Ing. Roberto Cudmani

Termin der Einreichung: 07.09.2023

Termin der Verteidigung: 09.02.2024

KURZFASSUNG

Das Thema der Optimierung der Rütteldruckverdichtung ist seit vielen Jahrzehnten Gegenstand der Forschung. In dieser Arbeit werden die bisher untersuchten Mechanismen und Erkenntnisse zusammengefasst. Es ergeben sich jedoch einige Fragestellungen, aus denen sich die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit ableiten lassen. Die meisten Erkenntnisse sind theoretischer Natur und vieles wurde in der Praxis noch nicht nachgewiesen. Aus diesem Grund wurde ein Modellversuchsstand aufgebaut, der die Rütteldruckverdichtung mit einem Modellrüttler realitätsnah abbilden kann. Die darin eingebaute Sensorik wird im Rahmen einer Parameterstudie eingesetzt, bei der Standardversuche zur Rütteldruckverdichtung mit Parametervariationen durchgeführt werden. Mit der Parameterstudie konnten einige Vermutungen aus der praktischen Anwendung bzw. die bisher nur theoretischer Natur waren, erstmals nachgewiesen werden. Dazu gehören ein großer Einfluss der Schwingwegamplitude auf die Verdichtung sowie ein starker Einfluss der eingestellten Verdichtungsfrequenz. Diese Parameter sollten optimiert und nicht maximiert werden, da dies die Verdichtung wieder verschlechtern kann. Darüber hinaus hat sich der Vorlaufwinkel als geeigneter Regelparameter erwiesen, da er ein reproduzierbares Verhalten in gleichen Tiefenlagen zeigt. Darüber hinaus zeigt er das Ende eines Verdichtungsschrittes in der jeweiligen Tiefenlage an, wenn er einen nahezu konstanten Wert erreicht. Zudem konnte durch den Vergleich verschiedener Verdichtungsverfahren die schrittweise Verdichtung gegenüber dem Pilgerschrittverfahren und dem konstanten Ziehen als beste Methode identifiziert werden. Auf Basis der Auswertungen wurde ein neuer Regelparameter eingeführt. Mit Hilfe des Sensorphasenwinkels kann das Bewegungsverhalten des Rüttlers erfasst und ein un rundes Bewegungsverhalten erkannt werden. Des Weiteren konnte ein Einfluss der Spülmethode, des Spüldurchsatzes und der Kornzertrümmerung festgestellt werden. Eine optimierte Verdichtungskontrolle und ein optisches Verfahren zur qualitativen Bewertung der Verdichtung wurden erstmals eingesetzt. Kern der vorliegenden Arbeit ist die Optimierung der Rütteldruckverdichtung. Hierzu konnten geeignete Regelparameter identifiziert und in Form eines multikriteriellen Regelalgorithmus umgesetzt werden. Dieser wurde für das Eindringen und Heben vorgeschlagen und erstmals für die Verdichtung angewendet. Der Modellrüttler passte seine Frequenz anhand der aufgezeichneten Sensordaten an die umgebenden Bodeneigenschaften an. Die dabei verwendeten Regelparameter wurden variiert und mit Großversuchen verglichen, um Wege und Potentiale aufzuzeigen, die im Großgerät Anwendung finden sollten. Die vorliegende Arbeit legt den Grundstein, um die gewonnenen Erkenntnisse in weiteren Modellversuchen anzuwenden und die neu entstandenen Forschungsfragen zu beantworten. Dadurch kann die Rütteldruckverdichtung optimiert werden, um in Zukunft ressourcenschonender und intelligenter eingesetzt zu werden.

ABSTRACT

The topic of optimising vibratory compaction has been present in research for many decades. To date, many mechanisms have been investigated and insights gained, which are summarised in this thesis. This results in many question marks, from which the research questions of this thesis are derived. Some of the research findings are inconsistent with or contradict practical experience. In most cases, the findings are of a theoretical nature and much has not yet been proven in practice, or various researchers disagree on the mechanisms that contribute to optimised compaction. For this reason, a model test rig was set up that can realistically reproduce vibratory compaction with a model vibrator. The sensors installed in it are used as part of a parameter study in which standard tests on deep vibratory compaction are carried out with parameter variations. This was the first time that several assumptions about practical applications or theoretical frameworks had been proven. These include a major influence of the vibration amplitude on compaction and a strong influence of the set compaction frequency. These parameters should be optimised and not maximised, as this can worsen the compaction. In addition, the phase angle has proven to be a suitable control parameter, as it shows reproducible behaviour at the same depths. Furthermore, it indicates the end of a compaction step in the respective depth position when it reaches an almost constant value. The recorded vertical force, which represents the currently measured force minus the vibrator mass, can help to increase accuracy here. In addition, by comparing different compaction methods, stepwise compaction was identified as the best method compared to the pilgrim step method and constant pulling. A new control parameter was introduced based on the analyses. With the help of the sensor phase angle, the movement behaviour of the vibrator can be recorded and non-circular movement behaviour can be detected. Furthermore, an influence of the flushing method, the flushing output and the grain crushing could be determined. An optimised compaction control and an optical method for qualitative evaluation of the compaction were used for the first time. The core of this work is the optimisation of vibratory compaction. For this purpose, suitable control parameters were identified and implemented in the form of a multi-criteria control algorithm. This was suggested for penetration and lifting and was used for the first time for compaction. The model vibrator adapted its frequency to the surrounding soil properties based on the recorded sensor data. The control parameters were varied and compared with large-scale tests in order to identify ways and potentials that can be applied in large-scale applications. The present work lays the foundation for implementing the knowledge gained in further model tests and answering the new research questions that have arisen. As a result, vibratory compaction can be optimised for more resource-efficient and intelligent use in the future.