

# **Aktuelle Entwicklungen zur oberflächennahen und tiefen Baugrundverbesserung mittels dynamischer Verfahren**

**D. Adam<sup>1)</sup>, J. Pistol<sup>1)</sup>, P. Nagy<sup>1)</sup>, C. Capraru<sup>1)</sup>,  
F. Kopf<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup> Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik

<sup>2)</sup> FCP - Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, Wien

## **1 Einleitung**

In den letzten 24 Jahren wurden am Institut für Geotechnik der TU Wien an unterschiedlichen Verfahren zur oberflächennahen, mitteltiefen und tiefen dynamischen Verbesserung des Baugrunds sowie an dynamischen Verdichtungskontrollen umfangreiche grundlagen- und anwendungsorientierte experimentelle und theoretische Forschungen betrieben. In folgenden Bereichen konnten damit bedeutende Entwicklungsschritte erzielt werden:

- Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle mit Vibrationswalzen
- Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle mit unterschiedlich angeregten Walzen – Oszillationswalzen und Walzen mit Richtschwinger
- Regelkriterien und Verdichtungsoptimierung für selbstregelnde Walzen
- Verdichtungswirkung von dynamisch angeregten Polygonbandagen
- Geräteparameteroptimierung für Rüttelplatten und Anbauverdichter
- Verdichtungswirkung und -dokumentation der Impulsverdichtung
- Integrierte Verdichtungskontrolle für die Dynamische Intensivverdichtung
- Dynamischer Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät und Kalibrierung der dynamischen Lastplatte (Kalibrierstand)

Ausgehend von Arbeiten zur oberflächennahen Verdichtung und walzenintegrierten Verdichtungskontrolle mittels Vibrationswalzen, die zu neuen bahnbrechenden Erkenntnissen und Entwicklungen führte und damit den Verdichtungssektor zu einem modernen „Hightech“-Segment werden ließ, konzentriert sich die Forschung heute auf eine andere Anregungsart von dynamischen Walzen, sog. Oszillationswalzen. Über dieses Forschungsprojekt wird in Kapitel 2 dieses Beitrags berichtet.

Eine zweite Forschungsarbeit, das anschließend in Kapitel 3 vorgestellt wird, befasst sich aktuell mit der Untersuchung der dynamischen Wechselwirkung zwischen Tiefenrüttlern und dem zu verdichtenden Boden. Sowohl Rütteldruck- als auch Rüttelstopfverdichtung sind Verfahren, die aus der Verdichtungsszene nicht mehr wegzudenken sind. Die Anwendung und Festlegung der Geräteparameter hängt jedoch immer noch praktisch ausschließlich von empirischen Erfahrungswerten ab. Im Zuge des geförderten Forschungsprojektes wird das Bewegungsverhalten von Torpedorüttlern sowohl in großmaßstäblichen Experimenten als auch theoretisch mittels numerischer Simulationen untersucht.

## **2 Verdichtung mit Oszillationswalzen**

### **2.1 Einführung und Ziele des Forschungsprojektes**

Die oberflächennahe Verdichtung erfolgt heute überwiegend durch dynamische Walzen, bei denen die Bandage – der eigentliche Walzkörper – über Exzenter in Schwingungen versetzt wird, wodurch die Korn-zu-Korn-Spannung kurzfristig herabgesetzt und die Umlagerung der Bodenkörner in eine dichtere Lagerung begünstigt wird. Nach der Form der dynamischen Anregung unterscheidet man verschiedene Typen dynamischer Walzen. Die weiteste Verbreitung haben Vibrationswalzen erreicht, bei denen die Verdichtung mit entsprechend großer Tiefenwirkung in erster Linie durch dynamische Kompression erfolgt.

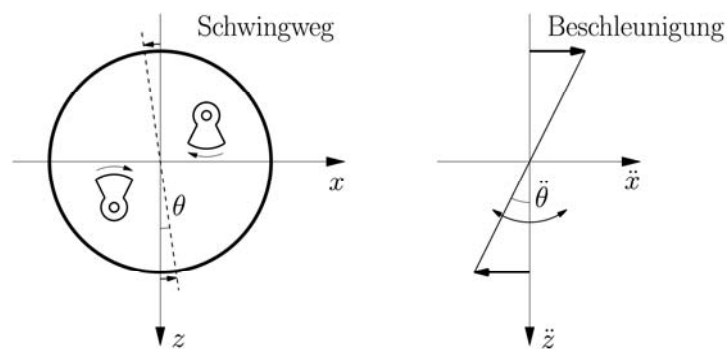
Umfangreiche Forschungsarbeiten, nicht zuletzt am Institut für Geotechnik der TU Wien, haben zur Entwicklung von Systemen zur Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) und sogenannten selbstregelnden Walzen sowie zur Optimierung der Vibrationswalzen und deren Anwendung wesentlich beigetragen.

Während de facto jeder Walzenhersteller Vibrationswalzen fertigt, wurden Oszillationswalzen bis vor kurzem nur von der Firma HAMM AG angeboten, weshalb auch die Forschungstätigkeit auf diesem Gebiet der Verdichtungstechnik gering ausfiel. Um das Konzept der oszillatorischen Bandagenanregung weiterzuentwickeln, lancierte die Firma HAMM AG in Kooperation mit der TU Wien ein Forschungsprojekt zur „Verdichtung mit Oszillationswalzen“. Dabei wurden die Untersuchung des Bewegungsverhaltens von Oszillationswalzen, die Entwicklung eines FDVK-Systems für Oszillationswalzen, die Reduktion des Bandagenverschleißes und die optimierte Anwendung von Oszillationswalzen als Ziele formuliert.

## 2.2 Grundlagen der Verdichtung und Verdichtungskontrolle mit Oszillationswalzen

### 2.2.1 Betriebszustände von Oszillationswalzen

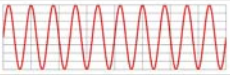
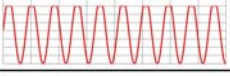
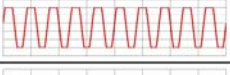

In einer Oszillationsbandage rotieren zwei zur Bandagenachse punktsymmetrische, gegenüberliegende Unwuchtmassen gleicher Größe und Exzentrizität synchron und zwingen der Bandage eine rotatorische Schwingung und damit eine rasch wechselnde Vorwärts-Rückwärts-Rotation auf, die der Fahrbewegung überlagert ist (siehe Abb. 1).



**Abb. 1:** Anregung der Bandage einer Oszillationswalze (Adam 1996)

Durch die Reibung zwischen dem Walzmantel der Bandage und der Oberfläche des zu verdichtenden Materials sowie die statische Auflast der Walze und die Oszillationsbewegung werden vorwiegend dynamische Schubkräfte in den Untergrund übertragen, wodurch der Boden vorrangig durch Schubverzerrungen verdichtet wird.

Im Gegensatz zur Vibrationswalze kommt es bei Oszillationswalzen nicht zum anregungsbedingten Abheben der Bandage vom Untergrund. Allerdings lassen sich durch die Betrachtung der Verschiebungen bzw. Verschiebungsgeschwindigkeiten zwischen dem Walzmantel der Bandage und der Oberfläche des zu verdichtenden Materials ebenfalls Betriebszustände definieren. Die Betriebszustände hängen, wie im Falle der Vibrationswalze, von der Bodensteifigkeit, der Amplitude und Frequenz der Anregung, der Fahrgeschwindigkeit und zusätzlich von den Reibungseigenschaften der Kontaktpartner Walze und Boden ab. Eine Abgrenzung der Betriebszustände ist in Abb. 2 dargestellt. Wie von Pistol (2016) gezeigt wird, ist im Falle der Oszillationswalzen eine FDVK praktisch unabhängig vom Betriebszustand möglich. Dies bedeutet einen entscheidenden Vorteil gegenüber der FDVK mit Vibrationswalzen, bei der die Betriebszustände den Messwert der FDVK beeinflussen.

Interaktion Bandage-Boden	Betriebszustand	Verlauf der horizontalen Lagerbeschleunigung	Anw. d. FDVK	Fahr-geschw.	Boden-steifigkeit	Erreger-amplitude	Erreger-frequenz
ständiger Kontakt	Haften		ja	niedrig	gering (Haften)	klein (Haften)	gering (Haften)
periodischer Kontaktverlust	Einseitiges Gleiten		ja	↓ hoch	↓ hoch (Gleiten)	↓ groß (Gleiten)	↓ hoch (Gleiten)
	Asymmetrisches Gleiten		ja				
	Symmetrisches Gleiten		ja				

**Abb. 2:** Betriebszustände einer Oszillationswalze (Pistol 2016)

Wird die Haftreibung zwischen dem Walzmantel der Bandage und dem zu verdichtenden Material zu keiner Zeit überschritten, spricht man vom Betriebszustand „Haften“. Der Boden ist dann in der Lage, der Bewegung der Bandage vollständig zu folgen. Im praktischen Baubetrieb hat dieser Betriebszustand lediglich eine geringe Relevanz; es treten im Normalfall verschiedene Formen des Gleitens auf, wobei die Haftreibung zwischen dem Walzmantel und dem zu verdichtenden Material wiederholt überwunden wird.

## 2.2.2 Prinzip der FDVK

Die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) ist eine walzen- und arbeitsintegrierte Methode der Verdichtungsprüfung zur kontinuierlichen und flächenhaften Bestimmung des Verdichtungserfolges. Dabei fungiert die dynamische Walze nicht nur als Verdichtungsgerät, sondern gleichzeitig auch als Messwerkzeug.

Das Grundprinzip der FDVK ist es, vom Bewegungsverhalten der dynamisch angeregten Bandage auf den Verdichtungszustand des zu verdichtenden Materials zu schließen; eine dynamische Walze ist demnach Voraussetzung.

## 2.2.3 Besonderheiten der FDVK mit Oszillationswalzen

Im Falle von Vibrationswalzen beeinflusst die Steifigkeit des Bodens das Bewegungsverhalten der Bandage signifikant und ruft die von Adam (1996) beschriebenen Betriebszustände hervor. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass die Interaktion zwischen der schwingenden Bandage und dem zu verdichtenden Boden im Falle von Oszillationswalzen in einem geringeren Maße ausgeprägt ist. Die Oszillationsbandage führt die durch die Anregung erzeugte Bewegung der Vorwärts-Rückwärts-Rotation aus und lässt sich dabei durch die Untergrundverhältnisse weniger beeinflussen, als dies bei Vibrationswalzen der Fall ist.

Daraus resultieren zwei Problemstellungen und somit Anforderungen an ein FDVK-System für Oszillationswalzen. Die verwendete Messtechnik zur Erfassung des Bewegungsverhaltens muss in der Lage sein, Messdaten in einer derart hohen Qualität zu liefern, dass auch geringe Änderungen im Bewegungsverhalten identifiziert werden können. Zum anderen ist der Konstruktion und Fertigung einer Oszillationsbandage besonderer Stellenwert beizumessen, um Unausgewogenheiten und Periodizitäten der Bandage zu vermeiden (Kopf 1999, Pistol 2016).

## **2.3 Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen**

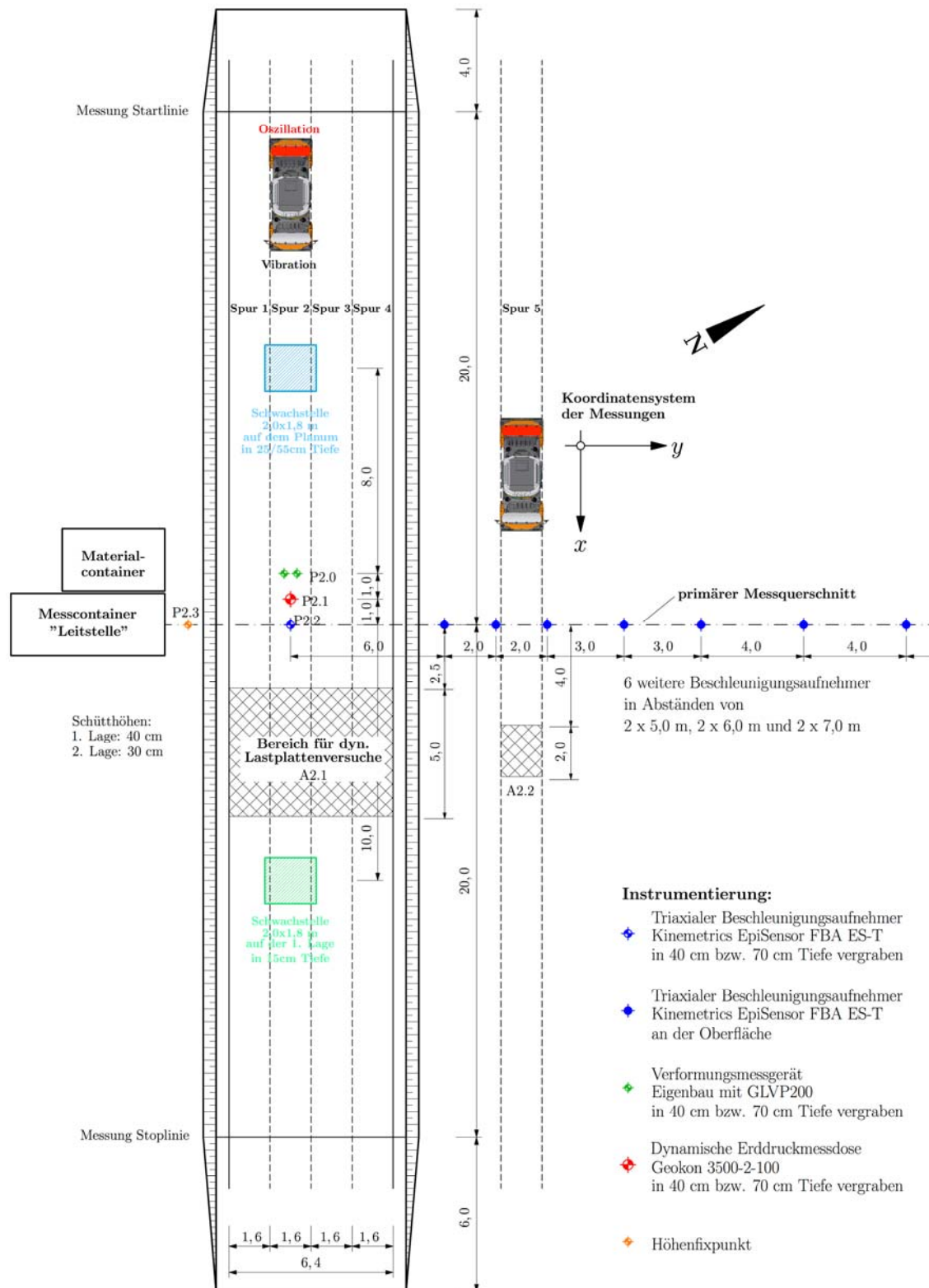
Im Zuge des Forschungsprojektes „Verdichtung mit Oszillation“ wurden mehrere großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungsreihen durchgeführt, um das Bewegungsverhalten von Oszillationswalzen und ihrer Wirkung auf den Boden als Grundlage für die Entwicklung eines FDVK-Systems zu untersuchen.

### **2.3.1 Verdichtungsgerät und messtechnische Instrumentierung des Testfeldes**

Als Verdichtungsgerät wurde eine HAMM HD<sup>+</sup> 90 VO Tandemwalze eingesetzt. Die Walze mit einem Gesamtgewicht von ca. 9,8 t besitzt eine Vibrationsbandage an der Front und eine Oszillationsbandage am Heck mit einer schwingenden Masse der Bandagen von jeweils ca. 1,9 t. Die Oszillationsbandage der Tandemwalze verfügt über eine Tangentialamplitude von 1,44 mm bei einer typischen Oszillationsfrequenz von  $f = 39$  Hz. Für Messfahrten der Vibrationsverdichtung wurde eine Amplitude von 0,34 mm bei einer Anregungsfrequenz von  $f = 50$  Hz genutzt.

### **2.3.2 Testfeld und messtechnische Instrumentierung**

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein Testfeld in einer Kiesgrube in Fischamend nahe dem Flughafen Wien Schwechat vorbereitet und messtechnisch instrumentiert. Das zu verdichtende Material, sandiger Kies, wurde in zwei Lagen mit 40 cm und 30 cm auf dem hochgradig verdichteten Unterbauplanum der Kiesgrube aufgebracht. Vier parallele Spuren mit einer Länge von 40 m und einer Breite von jeweils 1,6 m wurden eingemessen und Rampen am Beginn und Ende des Testfeldes vorgesehen. Vor dem Schütten der ersten Lage wurde eine Schwachstelle in Form zweier Matratzen aufgelegt, eine zweite Schwachstelle wurde nach Abschluss der Versuche auf der ersten Schüttlage auf ebendieser situiert und ebenso überschüttet, um den Einfluss schlecht verdichteter bzw. verdichtbarer Bereiche auf das Bewegungsverhalten der Bandage und die FDVK-Werte zu untersuchen (siehe Abb. 3).

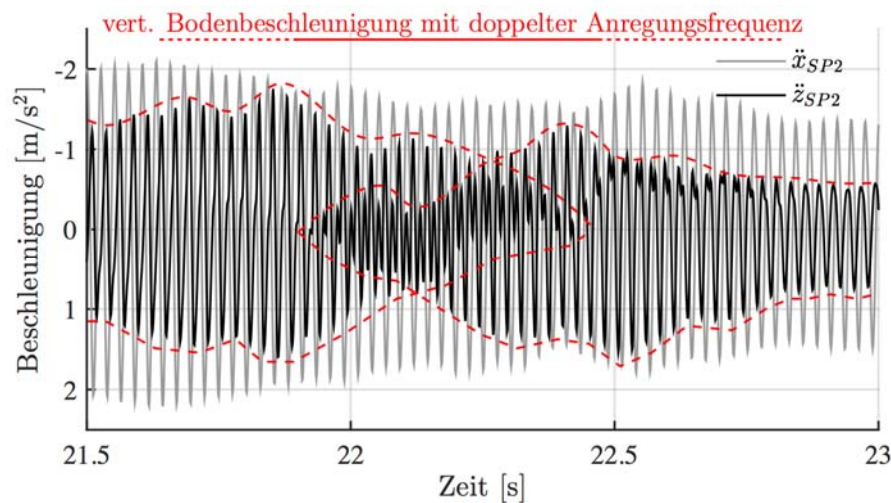


**Abb. 3:** Lageplan des Testfeldes und Instrumentierung (Pistol 2016)

Triaxiale Beschleunigungsaufnehmer wurden zwischen dem Planum und der ersten Schüttlage angeordnet (Punkt P2.2 in Abb. 3) und auf der Lagerschale der Bandagen appliziert.

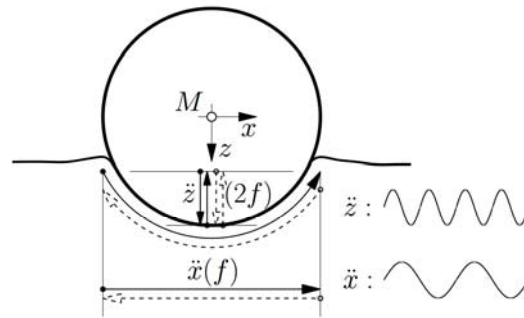
### 2.3.3 Bodenbeschleunigungen und Bewegungsverhalten der Oszillationsbandage

Die Bodenbeschleunigungen unter der zu verdichtenden Schicht wurden für alle Versuchsfahrten kontinuierlich aufgezeichnet. Dabei wurde festgestellt, dass die Beschleunigungen in vertikaler Richtung ( $\ddot{z}$ ) zum Zeitpunkt der Überfahrt der Bandage die doppelte Frequenz der Anregung ( $2f$ ) aufweisen, während die Beschleunigungen in horizontaler Richtung ( $\ddot{x}$ ) lediglich die einfache Frequenz der Anregung zeigen (siehe Abb. 4). Diese charakteristische Einwirkung einer Oszillationsbandage auf den Boden ist in der Bewegung der Bandage in ihrer Setzungsmulde begründet. Während einer Oszillationsperiode rotiert die Bandage in der Setzungsmulde einmal vor und zurück. Gleichzeitig wird die Bandage durch die Begrenzungen der Setzungsmulde, die Bugwelle in Fahrtrichtung vor der Bandage und die Heckwelle in Fahrtrichtung hinter der Bandage, gezwungen, zwei Bewegungszyklen in vertikaler Richtung auszuführen, was wiederum zu sekundären Beschleunigungen mit der doppelten Frequenz ( $2f$ ) in dieser vertikalen Richtung führt (siehe auch Prinzipdarstellung in Abb. 5).

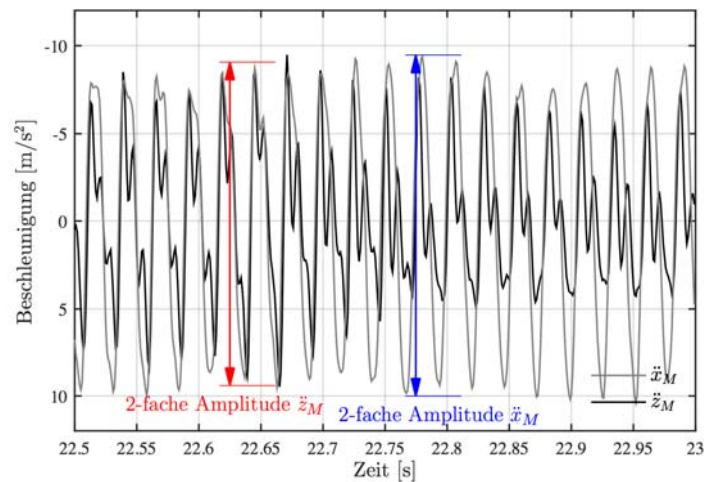


**Abb. 4:** Horizontale und vertikale Bodenbeschleunigungen unter der Einwirkung einer Oszillationsbandage (Pistol 2016)

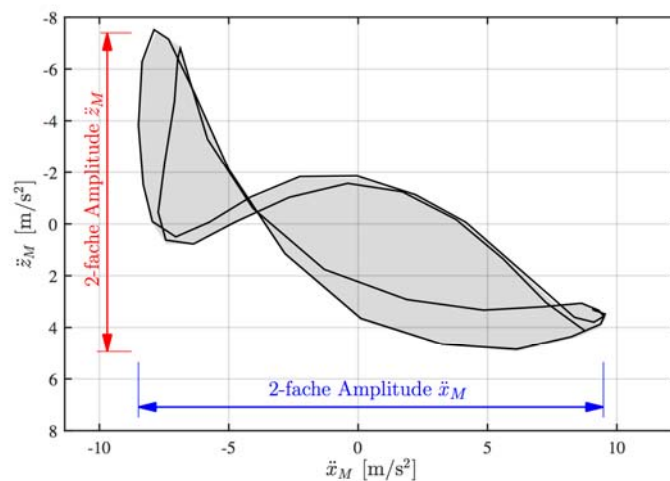
Die Bewegung der Oszillationsbandage in der Setzungsmulde führt nicht nur zu Vertikalbeschleunigungen im Boden, sondern beeinflusst auch das Bewegungsverhalten der Oszillationsbandage selbst; es kommt zu einer Verzerrung des vertikalen Beschleunigungssignales in der Lagerschale der Bandage und ebenfalls zur Ausbildung einer Schwingung mit doppelter Frequenz ( $2f$ ), wie in Abb. 6 erkennbar ist.



**Abb. 5:** Prinzipdarstellung der Bewegung einer Oszillationsbandage in ihrer Setzungsmulde (Pistol 2016)



**Abb. 6:** Horizontale und vertikale Beschleunigungen im Lager einer Oszillationsbandage (Pistol 2016)



**Abb. 7:** Beschleunigungen für zwei Perioden im Lager einer Oszillationsbandage (Pistol 2016)

In einer alternativen Darstellung, bei der die Horizontalbeschleunigungen auf der Abszisse und die vertikalen Beschleunigungen auf der Ordinate aufgetragen

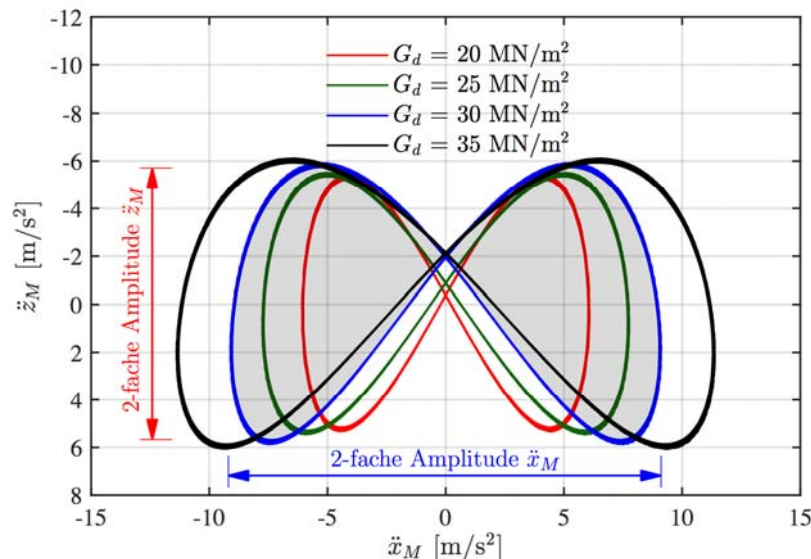


werden (siehe Abb. 7), resultiert die doppelte Frequenz in den vertikalen Lagerbeschleunigungen in einer Form, die einer liegenden Acht ähnelt. Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass die Ausbildung dieser charakteristischen Form der Lagerbeschleunigungen der Oszillationsbandage reproduzierbar ist und vom Verdichtungszustand des Bodens abhängt; die Grundbedingung für ein FDVK-System ist damit erfüllt.

## 2.4 Entwicklung und Definition eines FDVK-Wertes für Oszillationswalzen

Zur systematischen Untersuchung der Ausbildung der Lagerbeschleunigungen einer Oszillationsbandage in Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit wurde ein mechanisches Modell einer Oszillationsbandage in ihrer Setzungsmulde entwickelt. Die Bandage wird als starre Scheibe mit dem Radius  $r$ , der Masse  $m$  und der Massenträgheit  $I$  modelliert. Die Beschreibung der Bodenreaktion erfolgt über Feder-Dämpfer-Elemente mit den Federsteifigkeiten  $k_H$  und  $k_V$  sowie den Dämpfungsparametern  $c_H$  und  $c_V$ . Zusätzlich wird eine mitschwingende Bodenmasse  $\Delta m$  berücksichtigt. Die Bestimmung der Bodenparameter in Abhängigkeit vom dynamischen Schubmodul  $G_d$ , der Dichte  $\rho$  und der Querdehnzahl  $\nu$  erfolgt über das Konusmodell nach Wolf (1994).

Die Bewegungsgleichungen für das System mit drei Freiheitsgraden wurden aufgestellt und numerisch mittels MATLAB-Berechnungen gelöst.



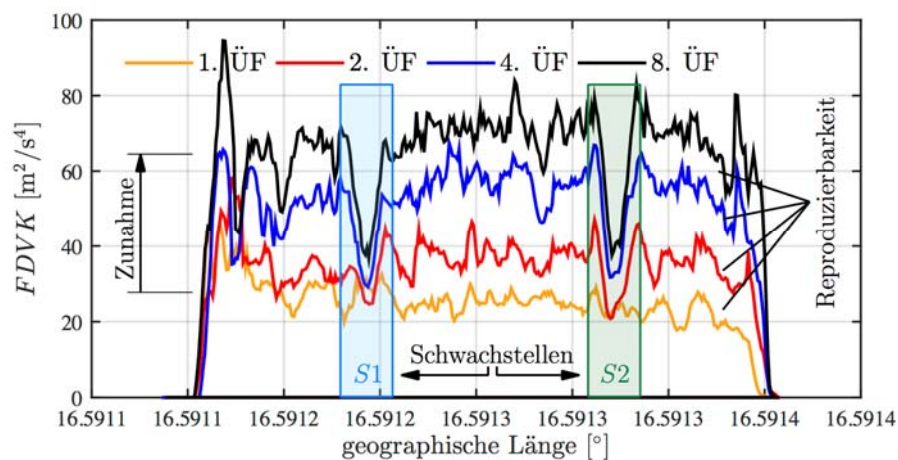
**Abb. 8:** Beschleunigungen ( $\ddot{x}_M, \ddot{z}_M$  im Mittelpunkt  $M$  der Bandage in Abhängigkeit vom dynamischen Schubmodul  $G_d$  (Pistol 2016)

In Abb. 8 sind die horizontalen ( $\ddot{x}_M$ ) und vertikalen ( $\ddot{z}_M$ ) Lagerbeschleunigungen für eine Variation des dynamischen Schubmoduls  $G_d$  dargestellt. Abb. 8 zeigt

deutlich, dass sich die Achterform aus Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen mit zunehmendem dynamischen Schubmoduls  $G_d$  des Bodens ausdehnt. Als FDVK-Wert für Oszillationswalzen wurde deshalb der Flächeninhalt der beschriebenen Achterform definiert und ein geeigneter Algorithmus (Pistol et al. 2015) zur Auswertung der Bandagenbeschleunigungen entwickelt.

## 2.5 Verifikation des FDVK-Wertes im Experiment

Der Algorithmus zur Berechnung des in Abschnitt 2.4 beschriebenen FDVK-Wertes für Oszillationswalzen wurde auf die Messdaten der experimentellen Untersuchungen angewendet.



**Abb. 9:** Verläufe des FDVK-Wertes für Oszillationswalzen für die Überfahrten 1, 2, 4 und 8 auf der zweiten Lage der Spur 2 des Testfeldes (Pistol 2016)

In Abb. 9 sind die Verläufe des FDVK-Wertes für Oszillationswalzen für die Überfahrten eins, zwei, vier und acht auf der zweiten Lage der Spur 2 des Testfeldes dargestellt. Ein Vergleich der berechneten Verläufe zeigt die Reproduzierbarkeit der Messungen und die erwartungsgemäße Zunahme der Verdichtung als Folge der steigenden Anzahl an Überfahrten. Mit steigender Verdichtung werden auch die künstlichen Schwachstellen immer besser erkannt. Während über der oberflächennahen Schwachstelle  $S1$  (ca. 15 cm Überdeckung) praktisch keine Verdichtung möglich ist, kann der Boden über der tiefliegenden Schwachstelle  $S2$  (ca. 55 cm Überdeckung) geringfügig verdichtet werden.

Weiterführende Untersuchungen (Pistol 2016) haben darüber hinaus gezeigt, dass zwischen dem FDVK-Wert für Oszillationswalzen und dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  ein Zusammenhang herausragender Güte besteht, der in einer vergleichbaren Messtiefe der Systeme zur Verdichtungskontrolle begründet ist.

## 2.6 Ausblick

Auf Grundlage des entwickelten FDVK-Wertes baute die Firma HAMM AG ein Messsystem zur walzenintegrierten Bestimmung des FDVK-Wertes für Oszillationswalzen. In einer weiteren Untersuchungsreihe wurde dieses Messsystem auf zwei Walzenzügen (H7i VIO und H13i VIO) und einer schweren Tandemwalze (HD<sup>+</sup> 140i VO) implementiert. Erste praktische Erfahrungen und vielversprechende Ergebnisse konnten gesammelt werden.

Nach erfolgreicher Validierung des FDVK-Systems für Oszillationswalzen steht die Erprobung des Systems unter Baustellenbedingungen im Vordergrund zukünftiger Untersuchungen. Darüber hinaus wird die Aufnahme der FDVK mit Oszillationswalzen in nationale Normen und Richtlinien angestrebt.

# 3 Forschungsprojekt Dynamische Verdichtung mit Tiefenrüttlern

## 3.1 Ziel des Forschungsprojektes

Das zentrale Ziel des Forschungsprojektes „Dynamische Verdichtung mit Tiefenrüttlern“ ist die Untersuchung des dreidimensionalen dynamischen Bewegungsverhaltens von Tiefenrüttlern, die bei der Rütteldruckverdichtung verwendet werden. Damit sollen die wissenschaftlichen Grundlagen für ein Online-Messwerterfassungssystem geschaffen werden, mit dem auf Basis dieses dynamischen Bewegungsverhaltens des Rüttlers ein wirtschaftlich optimierter Herstellungsprozess bei gleichzeitig dokumentierter Qualität erzielt werden kann. Das dynamische Bewegungsverhalten des Rüttlers soll dabei als Indikator dienen, mit dem Informationen über die aktuellen Eigenschaften des verbesserten Bodens generiert werden sollen. Der Bewegungsverhalten von Tiefenrüttlern wurde anhand von physikalischen Modellen erstmals von Fellin (2000, 2002) untersucht.

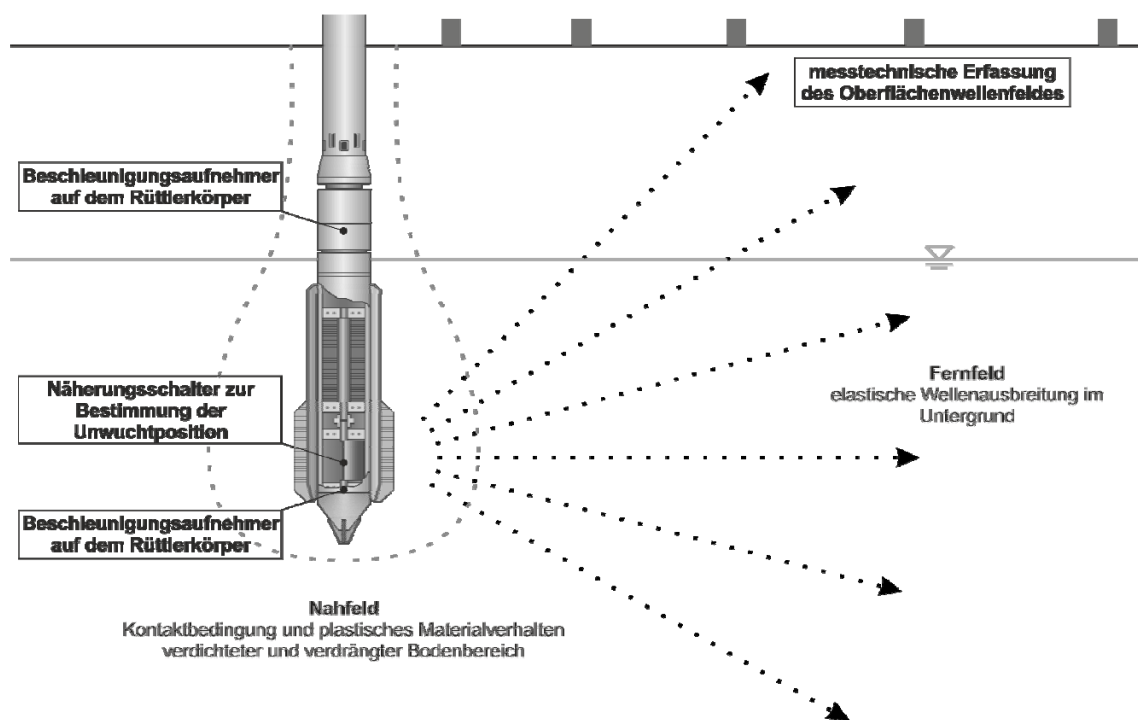
Sowohl großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen als auch numerische Simulationen auf Basis von Modellierungen der dynamischen Wechselbeziehung zwischen Rüttler und Boden stellen die Instrumente für die grundlegenden Untersuchungen dar, die schlussendlich die Basis für die Entwicklung eines Systems zur Verdichtungskontrolle für das Tiefenrüttelverfahren bilden.

Das Forschungsprojekt wird von der TU Wien am Institut für Geotechnik, gemeinsam mit den Projektpartnern Universität Innsbruck, Institut für Grundlagen der Technischen Wissenschaften, Keller Grundbau Österreich Ges.mbH und VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, abgewickelt.

Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen wurden mit der Firma Keller und einem von der Firma VCE messtechnisch ausgerüsteten Tiefenrüttler durchgeführt. An der Universität Innsbruck werden neue, theoretische und numerische Simulationsmodelle für das Rüttler-Boden-Interaktionssystem entwickelt. Die wissenschaftliche Auswertung und Interpretation der im Zuge der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen aufgezeichneten Messdaten, sowie der numerischen Berechnungsergebnisse erfolgt an der TU Wien.

### 3.2 Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen

Die großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen wurden im Sommer 2015 nahe Fischen in der Obersteiermark abgewickelt. Im Rahmen dieser Experimente wurde ein Tiefenrüttler mit einem Mess- und Datenübertragungssystem aufgerüstet und während des Verdichtungsprozesses permanent beobachtet. Mit Hilfe des Messsystems auf dem Rüttlerkörper bzw. auf der Tragraupe wurden das dreidimensionale Bewegungsverhalten des Verdichtungsgerätes und wesentliche Verfahrensparameter, wie Rüttelfrequenz, Rüttleranpressdruck und Stromaufnahme des Rüttlermotors während der Verdichtungsarbeiten aufgezeichnet. Darüber hinaus wurde das Oberflächenwellenfeld mit Hilfe von Schwinggeschwindigkeits- und Beschleunigungsaufnehmern bis zu einem Abstand von 120 m vom Rüttleransatzpunkt punktuell messtechnisch erfasst.

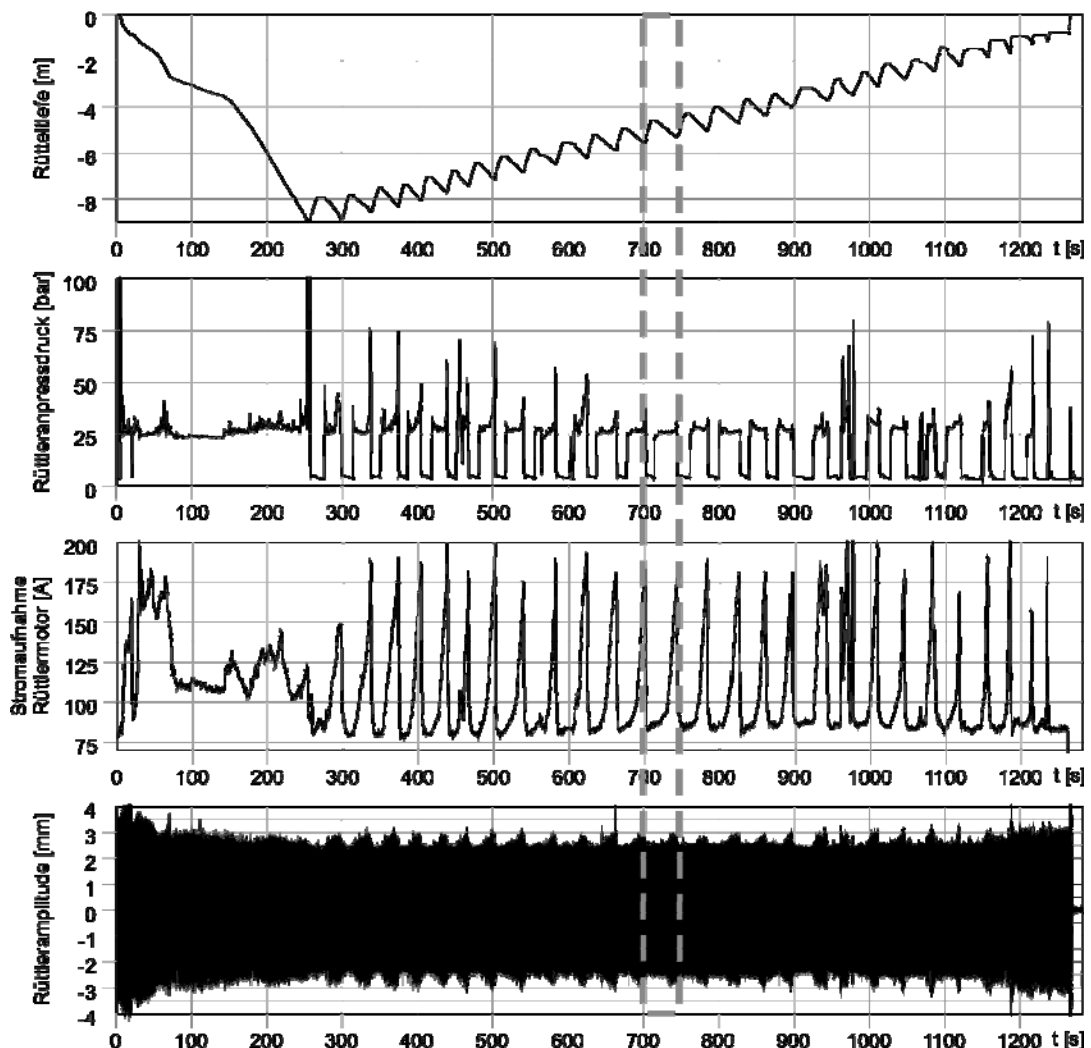


**Abb. 10:** Versuchsprinzip bei den großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen konnte ein sehr umfangreiches Messprogramm umgesetzt werden. Ein Teil der bearbeiteten Verdichtungsunkte wurde ohne jegliche Vorgabe für die Verfahrensparameter nach Ermessen eines erfahrenen Maschinisten hergestellt; ausgewählte Verdichtungsunkte wurden mit vorgegebenen nicht standardmäßigen Verfahrensparametern bearbeitet, wobei eine Variation unterschiedlicher Parameter in größtmöglicher Bandbreite erzielt wurde. Das Ziel der Variation der Verfahrensparameter war es, wesentliche Einflussparameter auf den Verdichtungsprozess zu identifizieren und auch über den standardmäßigen Betrieb hinaus zu testen.

### 3.2.1 Erste Erkenntnisse aus den Experimenten

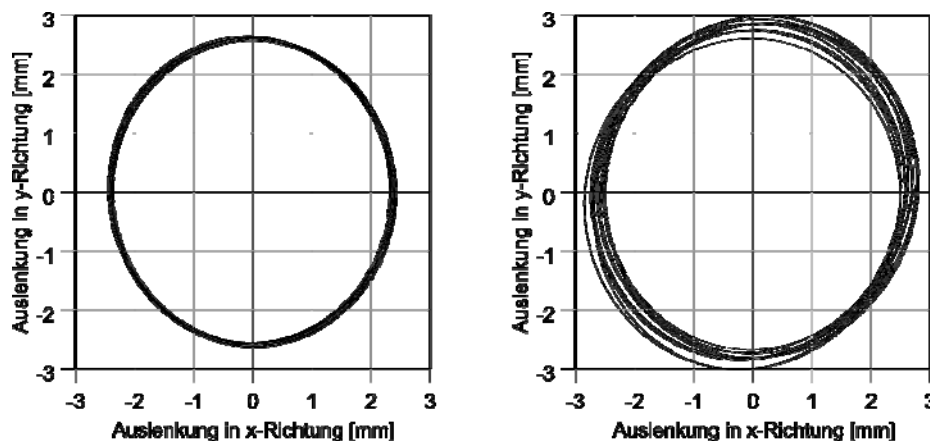
Abb. 11 zeigt ausgewählte Verfahrensparameter und die Amplitude der Rüttlerspitze während des Herstellungsprozesses eines Verdichtungsunktes im standardmäßigen Betrieb bei konstanter Rüttlerfrequenz von 50 Hz.



**Abb. 11:** Rütteltiefe, Stromaufnahme des Rüttlermotors und Rüttleramplitude während der Bearbeitung eines Verdichtungsunktes im Pilgerschrittverfahren beim standardmäßigen Rüttlerbetrieb

Die aufgezeichnete Rütteltiefe und Verdichtungsenergie (in Form von Stromaufnahme des Rüttlermotors) über die Zeit werden in den Tiefenschreiberprotokollen der Firma Keller dargestellt und dienen gemeinsam mit der Kontrolle der eingebauten Mengen an Zugabematerial zur Qualitätssicherung für die Rütteldruckverdichtung.

Im Zuge der Verdichtung wurde zuerst der Rüttler bis zur geplanten Tiefe abgeteuft. Die Verdichtung erfolgte standardmäßig von unten nach oben im Pilgerschrittverfahren, wobei der Rüttler periodisch etwa 90 cm angehoben und anschließend wieder etwa 60 cm abgesenkt wurde. In Abb. 11 ist exemplarisch ein Pilgerschritt hervorgehoben. Beim Absenken des Rüttlers steigt die Stromaufnahme des Rüttlermotors mit zunehmendem Widerstand des zu verdichtenden Bodens an und beim Heben sinkt sie wieder rasch ab. Beim Anstieg der Stromaufnahme sind gleichzeitig signifikante Änderungen in der Rüttlerbewegung (Anstieg der Rüttleramplitude) zu beobachten. Abb. 12 zeigt die Bewegung der Rüttlerspitze am Anfang und am Ende des Absenkvorgangs während des hervorgehobenen Pilgerschritts. Die Rüttlerspitze beschreibt in beiden Fällen nahezu eine Kreisform, am Ende des Absenkvorgangs wird die Amplitude an der Rüttlerspitze allerdings größer bzw. die Bewegung wird unregelmäßiger.

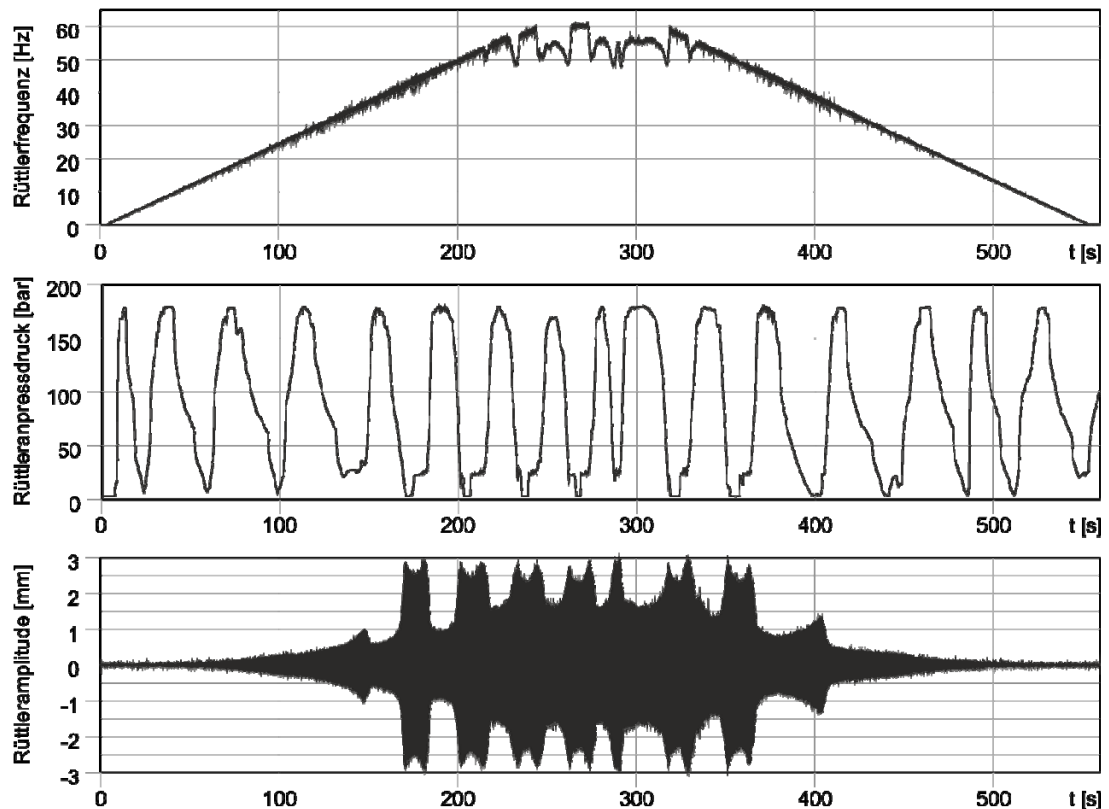


**Abb. 12:** Bewegung der Rüttlerspitze am Anfang (links) und am Ende (rechts) während des Absenkvorgangs des hervorgehobenen Pilgerschritts

Die Zusammenhänge zwischen den Verfahrensparametern und der Rüttlerbewegung lassen darauf schließen, dass die während des Absenkvorganges ansteigende Kontaktkraft einen wesentlichen Einfluss auf die Rüttlerbewegung und generell auf den Verdichtungsprozess hat.

Die Kontaktbedingung zwischen Rüttler und Boden wurde im Rahmen von Sonderversuchen eingehend untersucht. Abb. 13 zeigt ausgewählte Ergebnisse eines Sonderversuchs. Im Zuge des Versuchs wurde der Rüttler beim abermaligen Eindringen an einem fertig verdichteten Verdichtungspunkt in einer bestimmten Tiefe angehalten, die Rüttlerfrequenz wurde von Null an beginnend gleichmäßig, innerhalb von 4 Minuten auf 60 Hz gesteigert, konstant gehalten

und innerhalb von 4 Minuten wieder auf 0 Hz herabgeregelt. Während der Variation der Rüttlerfrequenz wurde der Rüttleranpressdruck in möglichst regelmäßigen Zeitintervallen manuell erhöht und wieder herabgesetzt. Aufgrund des großen Widerstandes des bereits verdichteten Bodens wurde während der Versuchsdurchführung ein deutlich höherer Rüttleranpressdruck angewendet als im standardmäßigen Betrieb.



**Abb. 13:** Rüttlerfrequenz, Rüttleranpressdruck und Rüttleramplitude während eines Versuchs mit gleitendem Frequenzgang und manuell gesteuertem Rüttleranpressdruck

In den aufgezeichneten Messdaten ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Rüttleranpressdruck und Rüttleramplitude erkennbar, der im höheren Frequenzbereich am stärksten ausgeprägt ist. Bei niedrigem Anpressdruck bewegt sich der Rüttler nahezu ungehindert in dem von ihm geschaffenen Freiraum. Bei zunehmendem Anpressdruck nimmt die Rüttleramplitude ab, der Rüttler verliert zufolge der starken Ankopplung an den Boden seine Bewegungsfreiheit. Die Versuchsergebnisse bestätigen, dass die Kontaktbedingung zwischen Rüttler und Boden das Bewegungsverhalten des Rüttlers und die Verdichtungsleistung wesentlich steuert und dass die Kontaktbedingung maßgeblich vom Rüttleranpressdruck beeinflusst wird.



### 3.2.2 Ausblick

Die im Zuge der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen aufgezeichneten Messdaten bilden eine wertvolle Grundlage für ein Verständnis jener Mechanismen, die während der Verdichtung mittels Tiefenrüttler im Rüttler-Boden Interaktionssystem passieren. Bereits die ersten Auswertungen der Experimente zeigen die Reproduzierbarkeit der Rüttlerbewegung in unterschiedlichen Betriebszuständen und damit die Potenziale für die Entwicklung eines Messsystems, mit dem in Zukunft eine laufende dynamische Kontrolle des Verdichtungserfolgs beim Tiefenrüttelverfahren ermöglicht werden sollte.

## 4 Literatur

Adam, D. (1996)

Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen. Dissertation. Technische Universität Wien.

Fellin, W. (2000)

Rütteldruckverdichtung als plastodynamisches Problem. Institut für Geotechnik und Tunnelbau. Universität Innsbruck, Balkema Publishers, Rotterdam.

Fellin, W. et al. (2002)

On-line Verdichtungskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung, Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik. Technische Universität Braunschweig, Messen in der Geotechnik 2002, Heft 68, 87-106.

Kopf, F. (1999)

Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bei der Verdichtung von Böden durch dynamische Walzen mit unterschiedlichen Anregungsarten. Dissertation. Technische Universität Wien.

Pistol, J., Kopf, F., Villwock, S. & Völkel, W. (2015)

Algorithmus und Methodik zur Auswertung von Beschleunigungssignalen zur Bestimmung eines Kennwertes für die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Oszillationswalzen. Patent: Aktenzeichen DE 10 2015 120 874.1; eingereicht: 02.12.2015.

Pistol, J. (2016)

Verdichtung mit Oszillationswalzen. Dissertation. Technische Universität Wien.

Wolf, J.P. (1994)

Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.



**Autor:**

Vorname, Name: Dietmar, Adam

Titel: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Firma, Abteilung: Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik

Adresse: Karlsplatz 13/220-2, A-1040 Wien

Tel: +4315880122100

Fax: +4315880122199

mail: dietmar.adam@tuwien.ac.at

internet: www.igb.tuwien.ac.at

**Nicht Zutreffendes bitte löschen:**

Teilnahme: ja

Vortragender: ja

**Co-Autor:**

Vorname, Name: Johannes, Pistor

Titel: Dipl.-Ing.

Firma, Abteilung: Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik

Adresse: Karlsplatz 13/220-2, A-1040 Wien

Tel: +4315880122127

Fax: +4315880122198

mail: johannes.pistor@tuwien.ac.at

internet: www.igb.tuwien.ac.at

**Nicht Zutreffendes bitte löschen:**

Teilnahme: ja

Vortragender: nein

**Co-Autor:**

Vorname, Name: Péter, Nagy

Titel: Dipl.-Ing.

Firma, Abteilung: Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik

Adresse: Karlsplatz 13/220-2, A-1040 Wien

Tel: +4315880122115

Fax: +4315880122198

mail: peter.nagy@tuwien.ac.at

internet: www.igb.tuwien.ac.at

**Nicht Zutreffendes bitte löschen:**

Teilnahme: ja

Vortragender: nein

**Co-Autor:**

Vorname, Name: Catalin, Capraru

Titel: Dipl.-Ing. Dr.techn.

Firma, Abteilung: Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik

Adresse: Karlsplatz 13/220-2, A-1040 Wien

Tel: +4315880122102

Fax: +4315880122198

mail: catalin.capraru@tuwien.ac.at

internet: www.igb.tuwien.ac.at

**Nicht Zutreffendes bitte löschen:**

Teilnahme: ja

Vortragender: nein

**Co-Autor:**

Vorname, Name: Fritz, Kopf

Titel: Priv.Do. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Firma, Abteilung: FCP - Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH

Adresse: Diesterweggasse 3, A-1140 Wien

Tel: +431902921483

Fax: +431902922483

mail: kopf@fcp.at

internet: www.fcp.at

**Nicht Zutreffendes bitte löschen:**

Teilnahme: ja

Vortragender: nein