

Modellversuche zur Eingrenzung von Verdichtungsindikatoren bei impulsartig wirkenden Bodenverdichtungstechnologien

Alexander KNUT, M.Eng., Holger PANKRATH, M.Sc., Dipl.-Ing. (FH),
Rosa Elena OCAÑA ATENCIO, M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Ralf THIELE
G² Gruppe Geotechnik, Fakultät Bauwesen, HTWK Leipzig, Deutschland

KURZFASSUNG

Der Beitrag stellt die bestehenden Ansätze zur baubegleitenden Qualitätskontrolle durch die FDVK (flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle) für dynamisch angeregte und transient wirkende Bodenverdichtungstechnologien vor. Aufbauend auf den bestehenden Theorien wird eine experimentelle Studie näher beleuchtet. Diese Studie verfolgt das Ziel, am Gerät messbare Kenngrößen bzw. Indikatoren, die einen Verdichtungserfolg anzeigen, in skalierten Modellversuchen zu identifizieren. Die Experimente finden in einem Schnittmodell im Erdschwerefeld statt. Die Bodenreaktion unter impulsartiger Belastung wird mit einer Hochgeschwindigkeitskamera beobachtet und mit Hilfe der PIV / DIC-Methode quantifiziert. Zusätzlich wird am Verdichtungsmodell die Beschleunigung in Fallrichtung gemessen. Dadurch ist es möglich, im reproduzierbaren Laborumfeld die Bodenreaktion mit dem Systemverhalten des Verdichtersmodells zu korrelieren. Die Korrelation der Indikatoren wird im Zeitbereich und Frequenzbild untersucht. Es kann gezeigt werden, dass einige bestehende Ansätze der Verdichtungskontrolle dynamisch angeregter Systeme auch für impulsartig wirkende Technologien Gültigkeit haben können.

1. MOTIVATION

1.1. Bodenverdichtung, eine Klassifikation

Eine Baugrundverbesserung durch den Einsatz von Bodenverdichtungstechnologien wird durch mechanisch erzeugten Energieeintrag in den Boden realisiert. Dieser Eintrag verringert den Porenraum und erhöht somit die Dichte und Steifigkeit des Baugrundes. Prinzipiell lassen sich die eingesetzten Technologien nach der Art und Lokalisation des Energieeintrags klassifizieren. Die

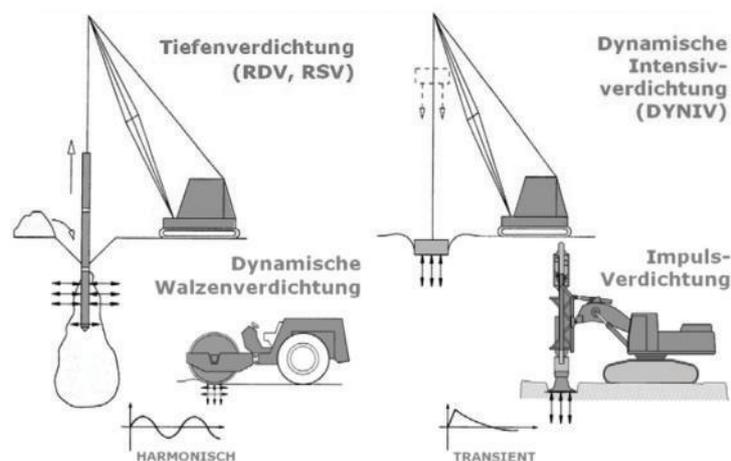


Abb. 1 Klassifikation der Technologien zur Bodenverbesserung nach der Art und Lokalisation des Energieeintrags. Abbildung entnommen aus [Adam 2013].

folgend diskutierten Technologien tragen ihre Verdichtungsarbeit an der Geländeoberfläche ein, Verfahren des Spezialtiefbaus wie die Rütteldruckverdichtung (RDV) werden nicht beleuchtet. Die Art des Energieeintrags kann harmonisch oder impulsartig (transient) erfolgen. Systeme mit harmonischer Anregung sind z.B. Walzenzüge. Bei diesen wird die Bandage (Walzenkörper) durch i.d.R. mehrere, zueinander drehbare Unwuchten harmonisch erregt. Impulsartige Technologien tragen die notwendige Energie zur Bodenverdichtung durch frei fallende Massen ein. Diese Kategorie wird durch die die Impulsverdichtung (engl.: Rapid Impact Compaction: RIC), die dynamische Intensivverdichtung (DYNIV), sowie den Impact Roller technologisch vertreten. Die Klassifikation nach [Adam 2013] ist in Abb. 1 dargestellt.

1.2. Bestehende Systeme zur flächendeckenden Verdichtungskontrolle

1.2.1. Historische Entwicklung und technologischer Hintergrund

Die 1980 vorgestellte Technologie der Verdichtungskontrolle [Forsblad 1980] ist durch die Aufnahme in die nationalen Regelwerke vieler Länder baupraktisch etabliert. Zur Bewertung des Verdichtungserfolgs wird die Beschleunigung am Verdichtungswerkzeug gemessen und mit Hilfe verschiedener Korrelationsansätze auf die Ergebnisse konventioneller Methoden der Verdichtungskontrolle (i.d.R. statische Lastplatte) korreliert. Diese Korrelationsansätze arbeiten entweder mit einem sogenannten Ersatzmodell und bewerten das Beschleunigungssignal im Zeitbereich oder sind heuristisch und fokussieren eine Korrelation im Frequenzbild.

1.2.2. Korrelationsansätze mit mechanischen Ersatzmodellen

Die Hersteller BOMAG [Kröber 1988] und AMANN [Anderegg 1997] interpretieren die Ergebnisse der Beschleunigungsmessung im Zeitbereich mit einem Ersatzmodell. Nach [Kröber 1988] werden alle dynamischen Reaktionen des Bodens auf die Bodenkontaktkraft reduziert. Durch die Berechnung der Verschiebung der Bandage kann ein Indikatordiagramm erstellt werden (siehe Abb. 2), in dem das Sekantenmodul ermittelt wird. Dieses Sekantenmodul wird mit der nach Lundberg erweiterten Theorie der Berührung zweier Körper [Lundberg 1939] gleichgesetzt und daraus der E_{vib} -Wert rekursiv korreliert (Gl. 1) [Kröber et al. 2001], [Pistol 2016].

$$k = \frac{E_{vib} b_0 \pi}{(1 - \nu^2) \left\{ 2,14 + 0,5 \ln \left[\frac{\pi b_0^3 E_{vib}}{2(1 - \nu^2)(m + m_u + m_R)gr} \right] \right\}} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$k_b = \Omega^2 \left(m_d + \frac{m_u r \cos \phi}{z_d} \right) \quad (\text{Gl. 2})$$

Nach [Anderegg 1997] wird die Maschine-Boden-Interaktion auf ein in Reihe geschaltetes, lineares Kelvin-Voigt-Modell (siehe Abb. 2) vereinfacht. Errechnet aus der gemessenen Beschleunigung und den Maschinenparametern wird der k_b -Wert (Gl. 2), ermittelt, welcher wiederum mit dem Verdichtungsgrad des Bodens korreliert. Der E_{vib} - und der k_b -Wert sind Korrelationswerte mit physikalischen Ersatzmodell, die linear elastisches Verhalten voraussetzen.



Abb. 2 Analogiemodelle zur Herleitung der Kontrollwerte. Links die Bodenkontaktkraft nach Kröber, rechts eine Darstellung des Kelvin-Voigt-Modells nach Anderegg

1.2.3. Heuristische Korrelation im Frequenzbild

Alternativ zur Betrachtung des Signals im Zeitbereich verwenden diverse Hersteller (Dynapac / Sakai) eine Interpretation der Daten im Bildbereich der Frequenz. Es wird die Beschleunigung der Bandage in vertikaler Richtung über ein herstellerabhängiges Zeitfenster erfasst, in den Frequenzbereich transformiert und durch Bandpassfilter aufbereitet. Ausgewertet wird die Relation Amplitude der Grundfrequenz der Walze (20 – 30 Hz) zu den Amplituden der Oberwellen, die von Floss als „indirektes Maß für den Verdichtungszustand“ [Floss 1985] bezeichnet werden. Der CMV-Wert der Firma Dynapac ist die historische Grundlage der modernen FDVK (Gl. 3). Der CMV-Wert ist die Relation aus erster und zweiter Oberwellenamplitude. Für den CCV-Wert der Firma Sakai,

$$CMV = c \frac{\hat{a}_2}{\hat{a}_1} \quad (\text{Gl. 3})$$

$$CCV = \frac{\hat{a}_1 + \sum_{i=3}^6 \hat{a}_i}{\hat{a}_1 + \hat{a}_2} \quad (\text{Gl. 4})$$

als dimensionslose Summation der ersten sechs Amplituden der Oberwellen (Gl. 4), wurde durch [Scherocman et al. 2007] gezeigt, dass dieser mit der bezogenen Lagerungsdichte des Materials korreliert. Im Gegensatz zu Korrelationsansätzen mit Ersatzmodellen entziehen sich die heuristischen Ansätze einer physikalischen Interpretation.

1.3. Ansätze zur Verdichtungskontrolle für impulsartig wirkende Technologien

Für die dynamische Intensivverdichtung wurden durch [Adam et al. 2011] und [Kopf et al. 2005] das Ausschwingverhalten des Fallgewichts erfasst. Das Lehrsche Dämpfungsmaß wurde basieren möglicher Parameter zur Bemessung des Verdichtungserfolgs identifiziert. Diese Ansätze fußen auf den linearen, viskoelastischen Theorien der Bodendynamik [Studer et al. 2007]. Ferner hat [Poran et al. 1992] in einem skalierten Modellversuch zeigen können, dass der Maximalwert der Beschleunigung mit steigender Schlagzahl zunimmt. Bezüglich der Qualitätskontrolle während der Impulsverdichtung wird aktuell die Schlagzahl, die akkumulierte Setzung (Kratertiefe) sowie die differenzielle Setzung in Bezug auf den letzten Schlag prozessbegleitend erfasst. Aus dieser Dokumentation werden drei Abbruchkriterien abgeleitet. Diese sind:

1. die akkumulierte Setzung ist größer 80 cm
2. die Schlagzahl ist größer 50
3. die differenzielle Setzung ist kleiner als 10 bis 12 mm

In einer umfassenden Aufbereitung von Felddaten [Yanulova 2015] konnte gezeigt werden, dass das Kriterium 1 (Ausnahme Kies) am häufigsten eine hinreichende Verdichtung indiziert. Eine Korrelation konnte nicht durchgeführt werden, da Bodenparameter wie z.B. der Reibungswinkel am verdichteten Material nicht erfasst wurden. Die Studie zeigt aber, dass die aktuellen Korrelationsfaktoren für das System Impulsverdichter bodenabhängig sind.

1.4. Fazit und Zielstellung

Fazit: Für Verdichtungssysteme mit harmonischer Anregung ist die FDVK durch umfangreiche Arbeiten baupraktisch etabliert und anerkannt. Für impulsartig wirkende Systeme gibt es erste, vor allem heuristisch geprägte Korrelationsansätze, die auf Feldmessungen basieren. Ferner wird versucht, mit viskoelastischen Ersatzmodellen einen physikalisch interpretierbaren Verdichtungskennwert zu generieren.

Ziel: In diesem Beitrag wird gezeigt, dass auch im Laborumfeld Indikatoren zur Verdichtungsbewertung herausgearbeitet werden können. Dadurch wird der experimentelle Aufwand für zeitintensive Feldversuche reduziert und die Methodik des notwendigen Großversuchs geschärft.

2. METHODIK

2.1. Experimenteller Aufbau

Der Beitrag verfolgt das Ziel, mit einem experimentellen Ansatz mögliche Indikatoren, die den Verdichtungserfolg für impulsartig wirkende Bodenverdichtungstechnologien anzeigen, im skalierten Modellversuch einzugrenzen. Der verwendete Modellaufbau ist in Abb. 3 prinzipiell dargestellt. In diesem Aufbau kann der Boden unter impulsartiger Belastung beobachtet werden. Der Impuls wird aus definierter Anfangsfallhöhe durch ein geführtes Fallgewicht eingebracht. Der verwendete trockene Sand wird dazu mit einem Rieselfverfahren reproduzierbar eingebaut. Das Bodenverhalten wird durch eine Hochgeschwindigkeitskamera erfasst und mit Hilfe der PIV/DIC-Methode (engl.: Particle Image Velocimetry / Digital Image Correlation) quantifiziert. Durch einen paarweisen Vergleich diskreter Bildbereiche ist es mit diesem optischen Messverfahren möglich, das Verschiebungsfeld des gesamten Bodens zu erfassen. Synchron zur Bilderfassung wird die Beschleunigung u.a. am Fallgewicht gemessen. Durch die Messung beider Systemkomponenten, Boden und Bodenverdichter, ist das Gesamtsystem messtechnisch erfasst. Somit ist es möglich, Korrelationen zwischen dem Schwingungsverhalten impulsartiger Verdichtungstechnologien und dem Bodenverhalten herzustellen.

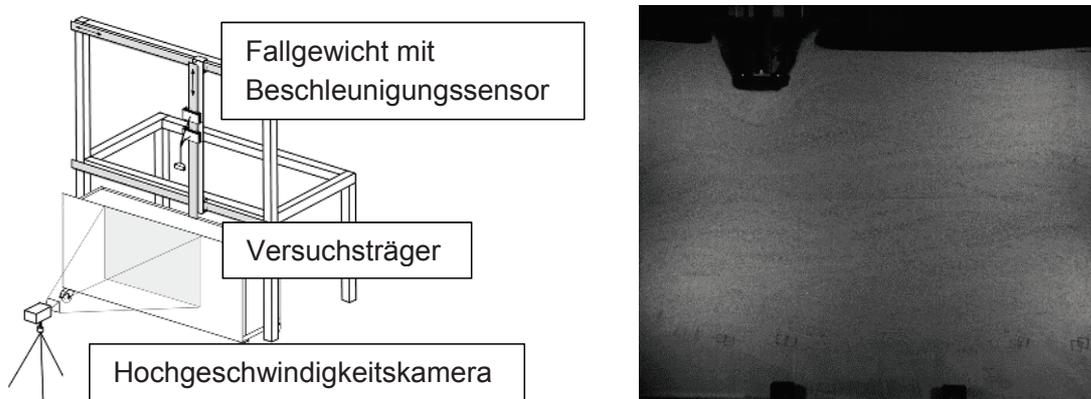


Abb. 3 Komponenten und schematische Darstellung des verwendeten Versuchsaufbaus (links).
Bild der Hochgeschwindigkeitskamera während des Einschlags (rechts)

2.2. Versuchsdesign

Im Rahmen des Beitrags von [Pankrath et al. 2016] wurden umfangreiche Modellversuche mit Fallgewichten und Möglichkeiten der ersten bodenseitigen Bewertung mit der PIV/DIC-Methode und Beschleunigungssensoren im Boden vorgestellt. Innerhalb der Versuchsreihe wurden u.a. die Fallmasse sowie die Fallhöhe in den Grenzen der vorhandenen Versuchsaufbauten variiert. Mit jeder Kombination aus Fallmasse und Fallhöhe wurden 12 Impulse in den Boden eingebracht. Jede Konfiguration wurde für die geringen Fallmassen viermal, für höhere Fallmassen zweimal wiederholt. Die vorgestellte Studie hatte einen Versuchsumfang von 9 Konfigurationen mit insgesamt 336 Einschlägen.

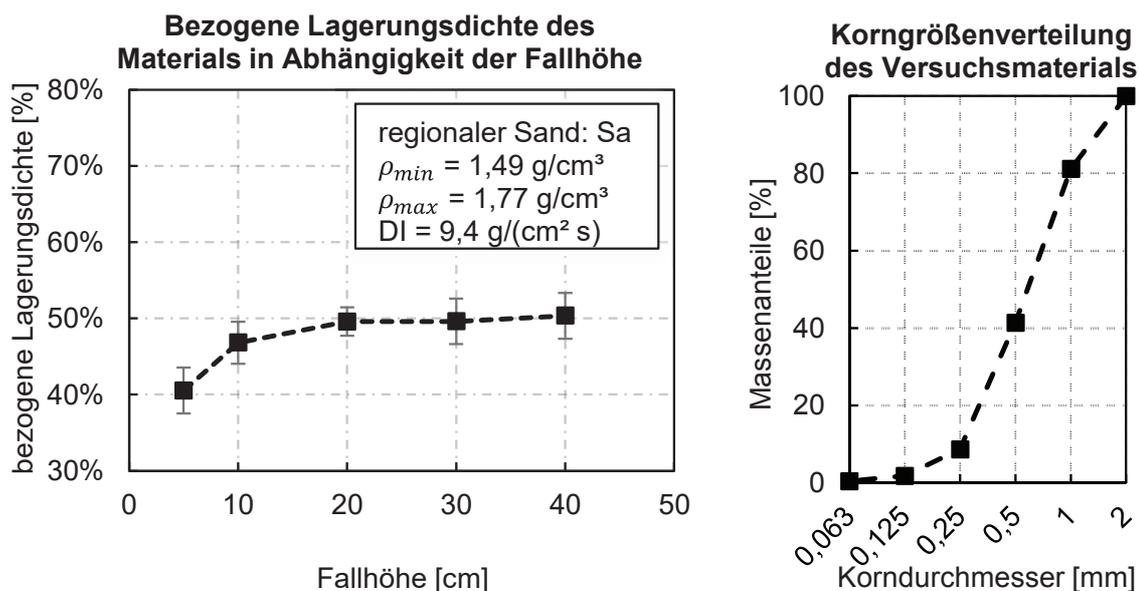


Abb. 4 Materialkennwerte und die bezogene Lagerungsdichte des Versuchsmaterials in Abhängigkeit von der Durchflussintensität (DI) und der Fallhöhe (links). Kornverteilung des Versuchsmaterials (rechts)

2.3. Bodenmaterial

Der verwendete Boden ist ein regionaler, enggestufter Sand ($CU = 2,7-2,9$, $CC = 0,88-0,98$). Dieser wird trocken mit einem mobilen Rieselfverfahren ähnlich [Trudeep et al. 2012] reproduzierbar aus einer Fallhöhe von 20 cm in den Versuchsträger eingebracht. Nach Abb. 4 ergibt sich für alle durchgeführten Versuche, aus der in Tab. 1 aufgelisteten Studie, eine bezogene Ausgangslagerungsdichte von 50% ($\pm 1,9\%$).

2.4. Ergebnisgrößen

Die optischen Daten wurden mit der PIV/DIC-Methode quantifiziert. Die im Abschnitt 3 dargestellten ISO-Linien zeigen die Wirktiefe des Impulses 0,125 s nach dem Einschlag. Nach

Tab. 1 Durchgeführte Versuche im Rahmen der aktuellen Studie [Pankrath et al. 2016]

Nr.:	m [kg]	h [m]	Ø [m]	N	W	Bezeichnung
01	4,5	0,8	0,1	12	4	m4_5-h0_8-D100_N101 ... *_N412
02	4,5	1,0	0,1	12	4	m4_5-h1_0-D100_N101 ... *_N412
03	4,5	1,2	0,1	12	4	m4_5-h1_2-D100_N101 ... *_N412
04	5,625	0,64	0,1	12	4	m5_625-h0_64-D100_N101 ... *_N412
05	6,75	0,53	0,1	12	4	m6_75-h0_53-D100_N101 ... *_N412
06	47,38	0,34	0,3	12	2	m47_38-h0_34-D300_N101 ... *_N212
07	47,38	0,34	0,435	12	2	m47_38-h0_34-D435_N101 ... *_N212
08	47,38	0,46	0,3	12	2	m47_38-h0_46-D300_N101...*_N212
09	47,38	0,91	0,3	12	2	m47_38-h0_91-D300_N101 ... *_N212

m ... Fallmasse
h ... Fallhöhe
Ø ... Durchmesser des Fallgewichts
N ... Anzahl der Impulse je Konfiguration
W ... Anzahl der Wiederholungen der Konfiguration

diesem Zeitfenster kommt es zu keinen signifikanten Änderungen der Ergebnisgröße. Als Wirktiefe wird die Grenze verstanden, bis zu der noch Verschiebungen größer $-4,5$ mm in Y-Richtung erfasst werden. Die Abszisse und Ordinate der Diagramme ist auf den Durchmesser des Fallgewichtes bezogen. Dies reduziert die skalierenden Effekte der 1g-Modellversuche [Poran et al. 1992].

Die Beschleunigungsdaten wurden zur Korrelation mit dem Verschiebungsfeld im Zeitbereich und Frequenzbild analysiert. Zur Bewertung im Zeitbereich wurde das Signal mit einem 100Hz Tiefpassfilter geglättet. Um signifikante Oberwellen im Frequenzbild zu erkennen, wurde das ungefilterte Signal in einem Fenster von 0,125 s nach dem Einschlag analysiert.

3. ERGEBNISSE

3.1. Indikatoren im Zeitbereich

Abb. 5 zeigt den Wirktiefenbereich, von Versuch 01 (siehe Tab. 1). Die nebenstehende Abbildung zeigt die maximale Wirktiefe über die Anzahl der Impulse. Es ist deutlich, dass die gewählte Grenzverschiebung mit steigender Anzahl der Impulse gegen einen Endwert korreliert. Das Ergebnis der Kontrollserie (N301-N312) weicht maximal 7,7% bezogen auf die Ausgangsserie ab. Die gemessene Beschleunigung am Fallgewicht, exemplarisch für Versuch 02 in Abb. 6 dargestellt, entspricht qualitativ den Ergebnissen von [Adam et al. 2011] aus Feldversuchen mit dem System dynamische Intensivverdichtung. Für die Bewertung im Zeitbereich zeigen sich zwei Besonderheiten: Zum einen steigt der Maximalwert der Beschleunigung, was die Ergebnisse von [Poran et al. 1992] auch für Schnittmodelle bestätigt. Zum anderen sinkt mit steigender Schlagzahl die Periodendauer T_1^{Nj} (das Zeitinkrement zwischen ersten und zweiten Maximalwert). Beide Indikatoren korrelieren gegen einen terminalen Grenzwert.

Das Lehrsche Dämpfungsmaß zur Interpretation der Ergebnisse heranzuziehen ist nicht möglich.

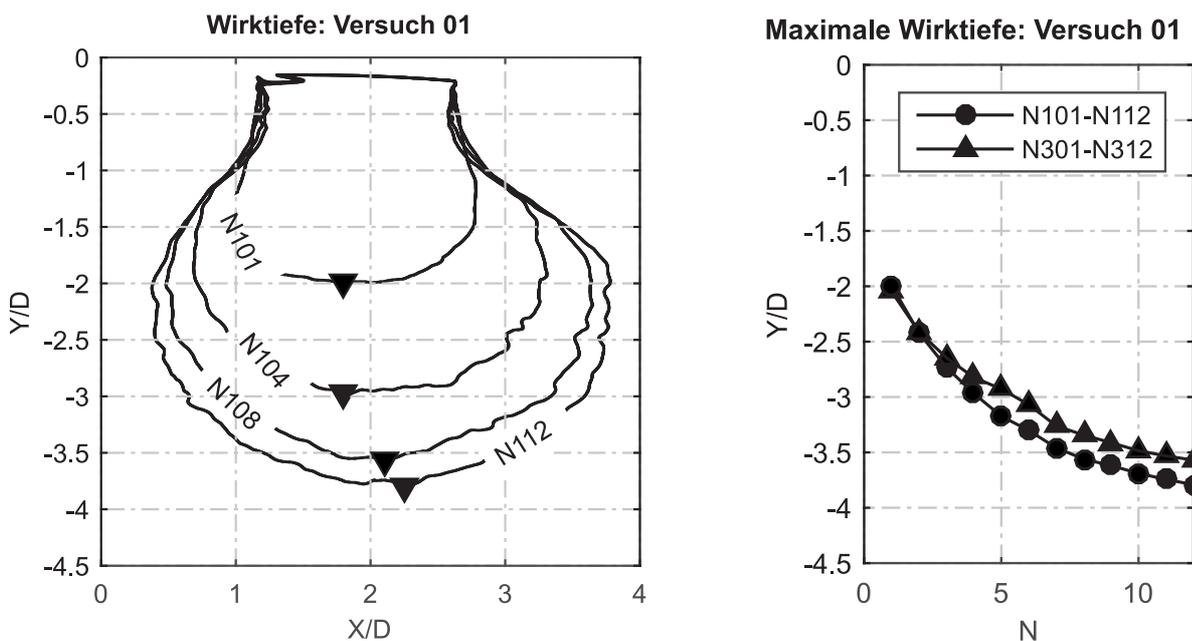


Abb. 5 Wirktiefe des Fallgewichtes 0,125 s nach dem Auftreffen (links). Verlauf der maximalen Wirktiefe über 12 Impulse der Ausgangsserie N101-N112 und der Kontrollserie N301-N312 (rechts)

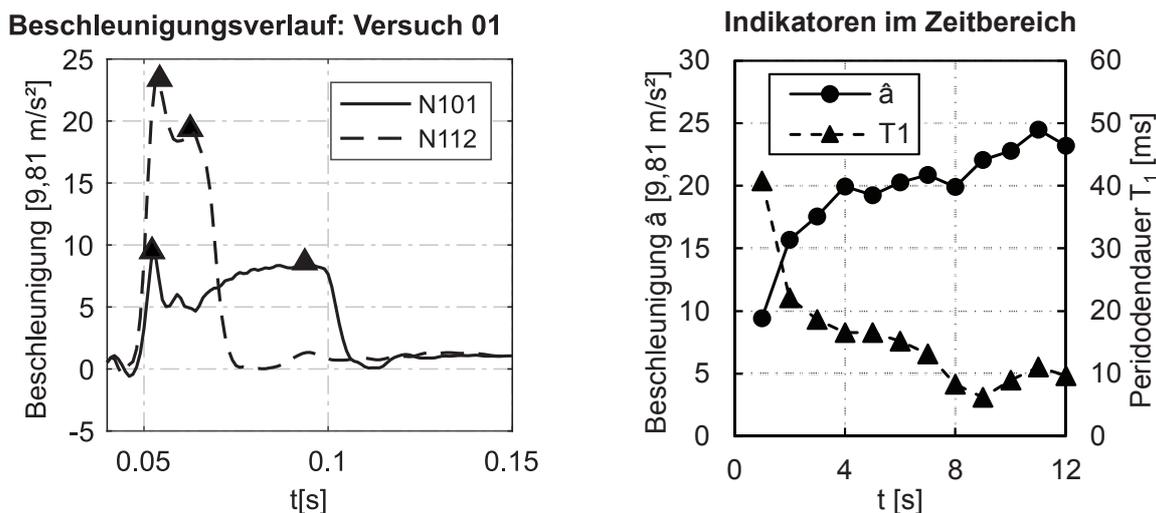


Abb. 6 Beschleunigung in Fallrichtung, gemessen am Verdichtermodell (links). Verlauf der maximalen Beschleunigung und der Periodendauer über 12 Impulse der Serie N101 N112 (rechts)

Die Annahme des viskoelastischen Materialverhaltens, welche voraussetzt, dass die Amplituden der Schwingung $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_n$ in einem konstanten Verhältnis $\hat{a}_n/\hat{a}_{n+1} = const$ abklingen, ist nicht gewährleistet. Die Nichtlinearität ist bedingt durch die große und plastische Deformation des Bodens unter der Belastung. Der Einsatz eines linearen Modells ist somit für impulsartige Systeme nicht hinreichend.

3.2. Indikatoren im Frequenzbild

Die Bewertung eines Signalverlaufs im Frequenzbild ist geeignet, um Schwingungen des Systems besser beurteilen zu können. Dazu wird das Beschleunigungssignal mit Hilfe der FFT (engl.: Fast Fourier Transformation) in das Frequenzbild transformiert. Eine Analyse des Signalspektrums, also der Darstellung der Beschleunigungsamplitude für eine Frequenzkomponente, wird somit möglich. Das Spektrum für ausgewählte Impulse ist in Abb. 7 dargestellt. Betrachtet wird hier, wie in Abschnitt 2.4 erläutert, das Frequenzspektrum für den Signalverlauf nach dem Einschlag. Um ggf. relevante Oberwellen nicht zu dämpfen, wurde mit die Spektralanalyse mit dem ungefilterten Signalverlauf durchgeführt.

Mit steigender Schlagzahl ist zu beobachten, dass entgegen den bestätigten Theorien für harmonisch angeregte Walzenverdichter die Anzahl der Oberwellen sinkt (Abb. 7 N101 / N112). Abb. 8 zeigt den Verlauf der Amplituden der ersten drei Oberwellen. Wie gezeigt wird, korrelieren die Amplituden der Oberwellen nicht. Somit ist die Gültigkeit der Ansätze von [Floss 1985] für impulsartige System zu hinterfragen. Allerdings steigen die Frequenzen der Oberwellen mit steigender Schlagzahl und streben einem Grenzwert entgegen. Für ein linear elastisches System geht eine Steigerung der Oberwellenfrequenz mit einer Zunahme der Steifigkeit des Systems einher.

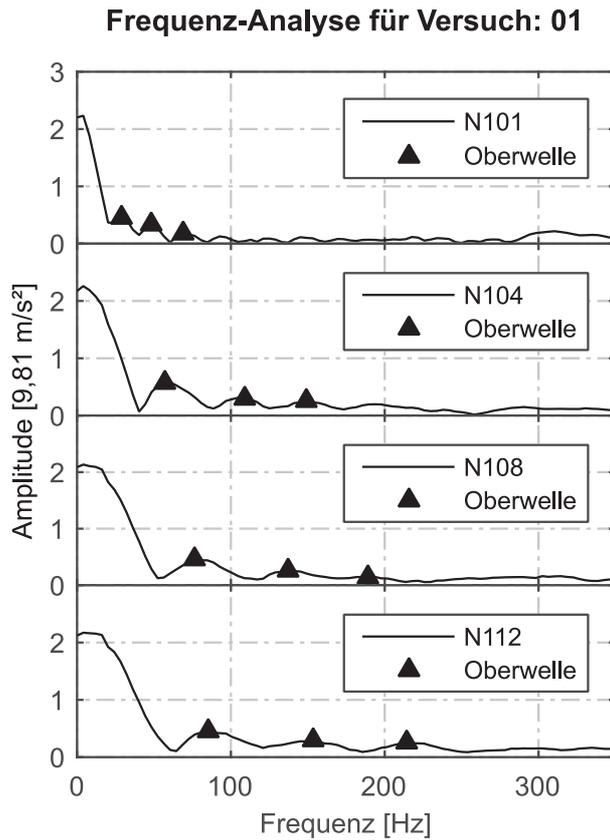


Abb. 7 Amplitudenspektrum der Serie N101-N112 für ausgewählte Impulse

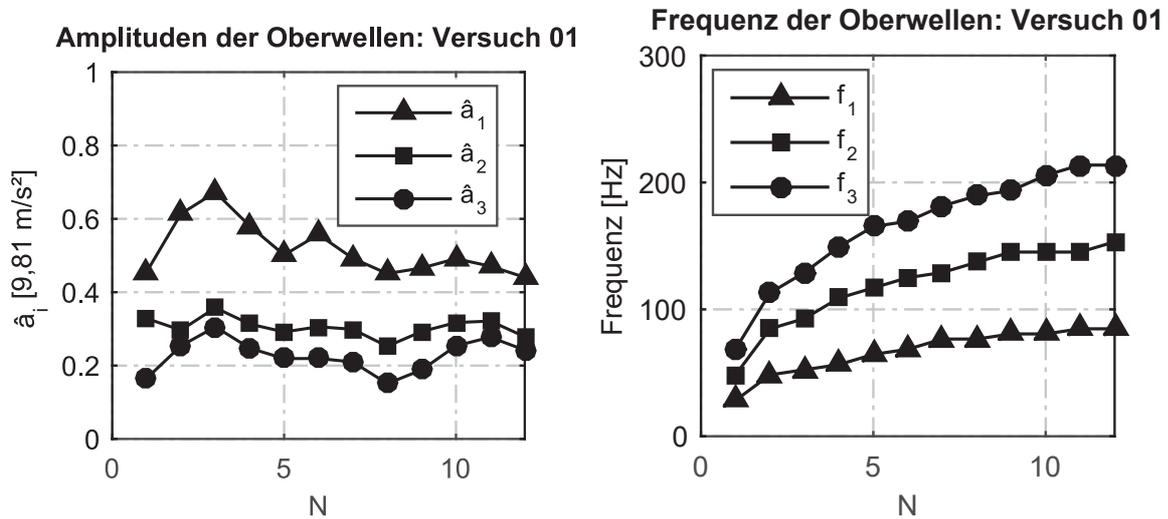


Abb. 8 Verlauf der Amplituden der ersten drei Oberwellen über alle Impulse der Serie N101-N112 (links). Veränderung der Frequenz der ersten drei Oberwellen über 12 Impulse (rechts)

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Modellversuche können in einem experimentellen Kontext nur ein Baustein für das Finden und Etablieren neuer Ansätze in der Geotechnik sein. Die gefundenen Tendenzen müssen immer in Feldversuchen hinterfragt werden. Der Beitrag verdeutlicht, dass Modellversuche ein adäquates Werkzeug sind, um eine Fragestellung breit zu hinterfragen und für ggf. folgende Untersuchungen im Feld sinnvoll einzugrenzen.

Im Hinblick auf Indikatoren, die Verdichtungserfolg bei impulsartigen Systemen anzeigen, konnte gezeigt werden, dass sowohl Parameter im Zeitbereich, als auch im Frequenzbild relevant für die Entwicklung neuer Systeme zur prozessbegleitenden Verdichtungskontrolle für impulsartige Technologien sein können. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Amplituden der Oberwellen bei impulsartigen Verdichtungsmechanismen im Gegensatz zu harmonisch angeregten Systemen nicht mit der Bodenverdichtung korrelieren. Ferner kann das in [Adam et al. 2011] und [Kopf et al. 2005] beobachtete nichtlineare Abklingverhalten im Modellversuch bestätigt werden. Der nichtlineare Effekt der großen und plastischen Deformation des Bodens wird dafür verantwortlich gemacht. Die Erweiterung von linearen Ersatzmodellen mit dem Fokus auf diese plastische Deformation des Bodens ist Kernaspekt der weiteren Arbeiten, mit dem Ziel, einen physikalisch interpretierbaren Ansatz zur Verdichtungskontrolle bei impulsartigen Verdichtungstechnologien vorzulegen.

5. DANKSAGUNG

Die Ergebnisse dieses Beitrags wurden aus einem BMWi geförderten Forschungsvorhaben (MF150157) und dem ESF-Promotionsstipendium des Autors finanziert.

LITERATUR

- Adam et al. (2011): Integrierte Verdichtungskontrollen bei dynamischen Verdichtungsverfahren. In: Adam, D.; Herrmann, R. A. (Hrsg.): Baugrundverbesserung in der Geotechnik. Eigenverl. des Inst. für Geotechnik, Siegen, 2011, S. 135–159.
- Adam (2013): Aktuelle Entwicklungen im Erd- und Grundbau für Straßen und Eisenbahnen. In: Bauakademie Sachsen (Hrsg.): 9. Erdbaufachtagung: Aktuelle Entwicklungen in der Geotechnik, 2013, S. 13–77.
- Anderegg (1997): Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern. Dissertation, ETH Zürich, 1997.
- Floss (1985): Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erdbauten. Straße und Autobahn vol.1985(2), S. 52–57.
- Forssblad (1980): Compaction meter on vibrating rollers for improved Compaction control. Proceedings of the International Conference on Compaction(II), S. 541–546.
- Kopf et al. (2005): Die dynamische Intensivverdichtung (DYNIV) - Verdichtungskontrolle mittels dynamischer Messungen. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ) vol.150(4-5), S. 149–159.
- Kröber (1988): Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, 1988.
- Kröber et al. (2001): Dynamic Soil Stiffness as Quality Criterion for Soil Compaction. Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures.

- Lundberg (1939): Elastische Berührung zweier Halbräume. Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens vol.10(5), S. 201–211.
- Pankrath et al. (2016): Testing Soil Compaction - High-speed Measurements of scaled Falling Weights, 1st Young Transportation Geotechnics Engineers Meeting, associated with the 3rd International Conference on Transportation Geotechnics, 04.09.2016, Guimarães, Portugal.
- Pistrol (2016): Verdichtung mit Oszillationswalzen - Bewegungsverhalten, walzenintegrierte Verdichtungskontrolle und Verschleißbeurteilung. Dissertatuib, Technischen Universität Wien, Institut für Geotechnik, 2016.
- Poran et al. (1992): Impact Behaviour of Sand. Soils and Foundations vol.32(4), S. 81–92.
- Scherocman et al. (2007): Intelligent Compaction, Does It Exist? Proceedings of the Annual Conference - Canadian Technical Asphalt Association vol.52), S. 373–398.
- Studer et al. (2007): Bodendynamik - Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- Trudeep et al. (2012): Assessment of portable traveling pluviator to prepare reconstituted sand specimens. Geomechanics and Engineering vol.2012(4 No. 2), S. 79–90.
- Yanulova (2015): Impulsverdichtung - Auswertung und Interpretation von Messdaten zur Erfassung des Verdichtungserfolgs. Diplomarbeit, Technischen Universität Wien, Institut für Geotechnik, 2015.