

Diploma Thesis

Subballast Compaction with Plate Compactors and Assessment of their Motion Behavior

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern und Analyse von deren Bewegungsverhalten

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Theresa STEFAN, BSc

Matr.Nr.: 01425870

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar ADAM**

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Johannes PISTROL**

Institut für Geotechnik

Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik

Technische Universität Wien,

Karlsplatz 13/220-2, 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2020



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Der Plattenverdichter ist ein Teil der gleisgebundenen Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R (AHM). Im Zuge von Gleisstandhaltungs- und Gleissanierungsarbeiten hat der Plattenverdichter die Aufgabe die von der AHM neue hergestellte ungebundene Tragschicht zu verdichten. Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern. Insbesondere wird auf die Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Plattenverdichtern während der Tragschichtverdichtung eingegangen.

Zu diesem Zweck wird ein mechanisches Modell, welches die Interaktion des Verdichtungsgerätes mit dem Boden beschreibt, herangezogen. Drei Betriebsphasen Belastung, Entlastung und Abheben, prägen die Interaktion zwischen Plattenverdichter und Boden. Unter Verwendung einer semi-analytischen Berechnung zeigen die Simulationsergebnisse das hervorgerufene Bewegungsverhalten in vertikaler Richtung. Der Einfluss der einzelnen Modellparameter auf das Bewegungsverhalten wird durch Parametervariationen analysiert. Für die Verifikation der Modellergebnisse werden die Erkenntnisse der experimentellen Untersuchungen herangezogen. Durch Ausstattung des Plattenverdichters mit Beschleunigungssensoren können die während der Verdichtung auftretenden Beschleunigungen gemessen werden. In der Auswertung werden aus den Beschleunigungen Verschiebungen ermittelt, wodurch die Bewegungsabläufe dargestellt und interpretiert werden können.

Die Simulationsergebnisse des mechanischen Modells zeigen eine regelmäßige Abfolge der Betriebsphasen Belastung, Entlastung und Abheben. Das simulierte Bewegungsverhalten ist von verschiedenen Eingangsparametern abhängig, wobei die Untergrundsteifigkeit einen wesentlichen Einfluss besitzt. Mit der Erhöhung der Untergrundsteifigkeit geht ein Übergang von einem periodischen Bewegungsverhalten zu einer unregelmäßigen Bewegungsabfolge des Plattenverdichters einher. Eine zusätzlich aufgebrachte Zusatzmasse verursacht größere Bodenkontaktkräfte beim Auftreffen des Plattenverdichters auf den zu verdichtenden Boden. Die Auswertung der Feldversuche zeigt regelmäßige Bewegungsmuster aber durchaus auch chaotische Zustände während der Tragschichtverdichtung. Die Simulationsergebnisse des mechanischen Modells stimmen mit dem tatsächlich auftretenden Bewegungsverhalten besonders im Betriebszustand Abheben und im Betriebszustand Springen gut überein.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

The plate compactor is part of the subgrade rehabilitation machine AHM 800-R (AHM). In the course of track maintenance and reconstruction work, the plate compactor is used for the compaction of the unbound subballast. The presented diploma thesis deals with the further development of subballast compaction by means of plate compactors. In particular, the description of the motion behavior during subballast compaction is discussed.

For this purpose, a mechanical model describing the interaction of the compactor with the soil is introduced. Three operating phases, loading, unloading and lifting, characterize the interaction between the plate compactor and the soil. Using a semi-analytical calculation, the simulation results show the induced motion behavior in vertical direction. The influence of the individual model parameters on the motion behavior is analyzed by means of parameter studies. The results of experimental investigations are used for a verification of the model results. By equipping the plate compactor with accelerometers, the accelerations during compaction can be measured. In the evaluation, displacements are determined from the accelerations, whereby the motion sequences can be identified and interpreted.

The simulation results of the mechanical model show a regular sequence of the operating phases loading, unloading and lifting. The simulated motion behavior depends on various input parameters, whereby the subgrade stiffness has a significant influence. An increase of the subgrade stiffness is accompanied by a transition from a periodic motion behavior to an irregular motion sequence of the plate compactor. An additionally applied mass causes greater contact forces between the plate compactor and the soil. The evaluation of the field tests shows regular motion patterns but also chaotic conditions during the compaction of the subballast. The simulation results of the mechanical model are in good agreement with the actual motion behavior, especially in the operating modes partial uplift and double jump.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
2	Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R	13
2.1	Entwicklung.....	14
2.2	Aufbau und Beschreibung.....	14
2.3	Durchführung der Planumsverbesserung.....	16
2.3.1	Schotter- und Planumsaushub	16
2.3.2	Geokunststoffeinbau	16
2.3.3	Herstellung der ungebundenen Tragschicht	18
2.3.4	Verdichtung	18
2.3.5	Qualitätskontrolle.....	19
2.3.6	Vergleich mit der konventionellen Methode	19
2.4	Einsatz der AHM 800-R	20
2.4.1	Vor- und Nachteile der Unterbausanierung mittels AHM 800-R	20
2.4.2	Umweltrelevante und wirtschaftliche Betrachtungen.....	21
2.5	Weitere gleisgebundene Maschinen zur Unterbausanierung.....	21
3	Ungebundene Tragschicht	23
3.1	Funktionen der ungebundenen Tragschicht.....	24
3.1.1	Reduktion der Spannungen im Unterbau.....	24
3.1.2	Vermeidung von schädlichen Verformungen.....	24
3.1.3	Frostschutz des Untergrunds.....	25
3.1.4	Trennung von Untergrund und Schotter	25
3.1.5	Verhinderung des Aufstiegs von Feinkorn	25
3.1.6	Verhinderung der Zermürbung des Untergrunds durch die Schotterkörner	25
3.1.7	Entwässerung des Planums	26
3.1.8	Drainage	26
3.2	Materialanforderungen	26
3.3	Herstellung und Verdichtungskontrolle der ungebundenen Tragschicht	27
4	Verdichtung und Plattenverdichter	31
4.1	Prinzip der Verdichtung	31
4.1.1	Ziel der Bodenverbesserung durch Verdichtung.....	31
4.1.2	Verdichtungsverfahren.....	32

4.1.3	Dynamische Vibrationsverdichtung.....	35
4.1.4	Betriebszustände einer Vibrationswalze	35
4.1.5	Einflüsse auf die Verdichtung	36
4.2	Allgemeines zu Vibrationsplatten	37
4.2.1	Aufbau	37
4.2.2	Anwendungsgebiete	38
4.3	Plattenverdichter der AHM 800-R	38
4.4	Anbauverdichter	39
4.5	Verdichtungskontrollen	40
4.5.1	Dichtebestimmung und Proctorversuch.....	40
4.5.2	Dynamischer Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät	41
4.5.3	Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle	43
5	Stand der Forschung	47
5.1	Bewegungsverhalten und Betriebszustände von Vibrationsplatten und Anbauverdichtern	47
5.1.1	Vergleich von Vibrationsplatte und Walzenzug	47
5.1.2	Bewegungsverhalten der Vibrationsplatte.....	48
5.1.3	Betriebszustände der Vibrationsplatten.....	49
5.1.4	Betriebszustände des Anbauverdichters	49
5.1.5	Betriebszustände des „Roof-Compactors“	50
5.2	Bisherige Forschungsarbeiten an der TU Wien.....	50
5.2.1	Experimentelle Voruntersuchungen.....	51
5.2.2	Experimentelle Grundsatzuntersuchungen.....	52
5.2.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse der bisherigen Forschungsarbeit.....	53
6	Mechanische Modellierung der Plattenverdichter-Boden-Interaktion	55
6.1	Randbedingungen der Modellierung.....	55
6.2	Modellierung und Bewegungsgleichungen des Plattenverdichters	56
6.3	Modellierung des Bodens	58
6.3.1	Elastische Verformungen des Bodenmodells.....	59
6.3.2	Plastische Verformungen des Bodenmodells.....	60
6.4	Kopplung von Plattenverdichter und Boden und Beschreibung der Betriebsphasen	61
6.4.1	Belastung	64
6.4.2	Entlastung.....	64
6.4.3	Abheben	66
6.5	Semi-analytische Berechnung.....	67
6.6	Eingangsparameter der Modellierung.....	68
6.6.1	Geometrie des Plattenverdichters	68

6.6.2	Massenverhältnisse des Plattenverdichters.....	69
6.6.3	Anregungsfrequenz und Unwuchtmoment.....	70
6.6.4	Federsteifigkeit und Dämpfungsparameter zwischen Unterteil und Oberteil des Plattenverdichters	71
6.6.5	Bodenparameter	71
6.6.6	Zusammenfassung der Berechnungsparameter	72
7	Feldversuche mit dem Plattenverdichter	75
7.1	Versuchsfeld	75
7.2	Plattenverdichter	76
7.3	Versuchsdurchführung	77
8	Ergebnisse und Interpretation	81
8.1	Grundlagen zur Auswertung der Modellergebnisse.....	81
8.2	Darstellung der drei Betriebsphasen	82
8.3	Variation der Anregungsfrequenz	87
8.4	Variation des Schubmoduls	91
8.5	Variation von Federsteifigkeit und Dämpfungsparameter der Gummipuffer.....	101
8.6	Variation der Zusatzmasse.....	108
8.7	Auswertung der vertikalen Verschiebungen der Feldversuche.....	113
8.8	Vergleich der Feldversuche mit den Modellergebnissen	118
8.9	Betriebszustände des Plattenverdichters.....	120
9	Zusammenfassung und Ausblick	123
10	Literaturverzeichnis	127
11	Abbildungsverzeichnis	131
12	Tabellenverzeichnis	135
13	Liste häufig verwendeter Symbole	137



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einleitung

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Verdichtung einer im Zuge von Sanierungsarbeiten hergestellten Tragschicht im Bahnbau. Für einen sicheren und ungehinderten Bahnverkehr ist eine hohe Gleislagequalität erforderlich. Diese wird vom Zustand des Gleisschotters sowie der darunterliegenden Tragschicht und nicht zuletzt vom Unterbau bzw. Untergrund beeinflusst. Eine entsprechende Gleislagequalität ist in weiterer Folge für eine lange Lebensdauer des Bahnkörpers Grundvoraussetzung. Kann keine ausreichende Qualität mehr verzeichnet werden, sind Gleisstandhaltungs- und Gleissanierungsarbeiten durch den Infrastrukturbetreiber durchzuführen. Im Zuge dessen kann bei der Identifikation von Problemzonen und Schwachstellen in der Tragschicht die Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R (AHM) zum Einsatz kommen. Mit der AHM werden Planumsverbesserungsmaßnahmen durch Entfernung des vorhandenen Gleisschotters sowie des Tragschichtmaterials und Herstellung einer neuen ungebundenen Tragschicht ermöglicht.

Die Verdichtung der mit der AHM errichteten ungebundenen Tragschicht erfolgt mit sogenannten Plattenverdichtern. Dieses Verdichtungsgerät kann mit Vibrations- und Rüttelplatten verglichen werden und erzeugt eine dynamische Verdichtungswirkung auf den Untergrund. Der Plattenverdichter besteht aus einem Unterteil (Grundplatte) und einem Oberteil (Rahmen). Mit der Grundplatte, an welcher das Erregersystem befestigt ist, wird der Kontakt zum verdichtenden Boden hergestellt.

Das Forschungsprojekt „Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern“ befasst sich mit der Erfassung und Optimierung der Tragschichtverdichtung im Zuge der gleisgebundenen Unterbausanierung. Es soll in weiterer Folge ein maschinen- und arbeitsintegriertes System entwickelt werden, mit dem der Verdichtungserfolg beobachtet und dokumentiert werden kann. Das Forschungsprojekt wird von *Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen, Gesellschaft m.b.H.* in Kooperation mit dem *Institut für Geotechnik der TU Wien* und *FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH* abgewickelt. Ein wichtiger Schritt in der Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung sind das Verständnis und die Beurteilung des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters während der Verdichtung.

Das Ziel der vorliegenden Diplomarbeit ist die Beschreibung des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters. Dieses wird einerseits durch die Betrachtung eines mechanischen Modells und andererseits durch die Durchführung experimenteller Untersuchungen verfolgt. Das mechanische Modell dient zur Darstellung der Interaktion des Plattenverdichters mit dem Boden. Mit den Feldversuchen können die Beschleunigungen während der Verdichtungsfahrt aufgezeichnet und sodann die Verschiebungen ausgewertet werden. Die Ergebnisse beider Methoden stellen das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters dar und erlauben unter Betrachtung verschiedener Aspekte und der Durchführung von Parametervariationen dessen Beschreibung und Interpretation.

Die vorliegende Diplomarbeit ist in neun Kapitel gegliedert, wobei sich die Kapitel 2 bis 4 mit grundlegenden Themen befassen. Zu Beginn wird die Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R vorgestellt. Besonderes Augenmerk wird auf die einzelnen Arbeitsschritte, die zur Herstellung einer neuen ungebundenen Tragschicht nötig sind, sowie auf die Vorteile der gleisgebundenen Unterbausanierung mit der AHM gelegt. Anschließend wird auf die Bedeutung und die Eigenschaften der ungebundenen Tragschicht näher eingegangen. Um die Funktionsfähigkeit der Tragschicht zu gewährleisten, werden verschiedene Anforderungen an das Material und dessen Einbau gerichtet. Kapitel 4 erläutert Grundlagen der Verdichtung und des Plattenverdichters. Die Unterschiede zwischen der statischen und der dynamischen Verdichtung und die Einflüsse auf die Verdichtung werden hierbei beschrieben. Neben der allgemeinen Vorstellung von Rüttelplatten erfolgt die Beschreibung von Plattenverdichtern und Anbauverdichtern. Das abschließende Unterkapitel befasst sich mit den am häufigsten verwendeten Verdichtungskontrollen.

Kapitel 5 widmet sich dem Stand der Technik. Das erste Unterkapitel befasst sich mit dem Bewegungsverhalten und den Betriebszuständen von Vibrationsplatten und ähnlichen Geräten. Im zweiten Unterkapitel werden die Erkenntnisse des Forschungsberichts „Technischen Weiterentwicklung der AHM“ vorgestellt. Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wurde jeweils ein Plattenverdichter mit Beschleunigungssensoren ausgestattet, wodurch die Schwingungen der Grundplatte und des Rahmens über die Auswertung der Messdaten veranschaulicht und erste Rückschlüsse zum Bewegungsverhalten des Plattenverdichters abgeleitet werden konnten.

Ein zentrales Kapitel stellt die mechanische Modellierung der Interaktion des Plattenverdichters mit dem Boden dar. Für das Modell werden Randbedingungen definiert, der Plattenverdichter sowie der Boden modelliert und dessen Kopplung über die Betriebsphasen beschrieben. Das Bewegungsverhalten ist von mehreren Eingangsparametern abhängig, welche in Kapitel 6 erläutert werden. In Kapitel 7 werden die experimentellen Untersuchungen des Forschungsprojekts beschrieben. Das Kapitel unterteilt sich in die Bereiche Versuchsfeld, Plattenverdichter und Versuchsdurchführung.

Nach der Vorstellung der beiden Methoden (mechanische Modellierung und experimentelle Untersuchungen) folgt das Kapitel „Ergebnisse und Interpretation“. Darin werden die Simulationsergebnisse unterschiedlicher Parametervariationen abgebildet. Es werden darüber hinaus erste Auswertungsergebnisse der experimentellen Untersuchung dargestellt und mit Ergebnissen der mechanischen Modellierung verglichen. Die Motivation besteht darin, das Bewegungsverhalten in vertikaler Richtung zu veranschaulichen, den Einfluss verschiedener Parameter zu beurteilen und Betriebszustände zu identifizieren.

Das abschließende Kapitel umfasst die Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und gibt einen Ausblick für die Weiterentwicklung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern.

2 Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R

Die Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R (AHM) der Firma *Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen, Gesellschaft m.b.H.* ist eine gleisgebundene Maschine zur Gleiserneuerung und -instandhaltung. Für einen einwandfreien Betrieb der Eisenbahn, eine stabile Gleislage und eine lange Lebensdauer des Schienenweges ist ein ausreichend entwässerter und vor allem tragfähiger Unterbau und Untergrund unerlässlich. Die AHM wird insbesondere bei Schwachstellen in der unteren Tragschicht eingesetzt. Ihre Aufgabe besteht in der Herstellung einer neuen ungebundenen Tragschicht von Bestandsgleisen, welche auch als Planumsschutzschicht bezeichnet wird.



Abbildung 2.1: Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R; Foto von Plasser & Theurer

Die AHM (siehe Abbildung 2.1) wurde 1994 zum ersten Mal von den *Österreichischen Bundesbahnen* (ÖBB) eingesetzt und wird seither zur Sanierung zahlreicher Streckenabschnitte mit Beeinträchtigungen und Schwachstellen in den unteren Tragschichten bzw. im Unterbau verwendet. Das mechanisierte, gleisgebundene Verfahren sorgt für eine schnelle und effiziente Durchführung der Gleisinstandhaltungsarbeiten. Ein wesentlicher Vorteil der AHM besteht in der Durchführung der Umbauarbeiten ohne Betriebseinschränkungen am Nachbargleis. Im Vergleich zu den Vorgängermodellen der Planumsverbesserungsmaschinen ist die AHM in der Lage, ausgebautes Material zu recyceln und wieder einzubauen. Zusätzlich ermöglicht sie eine Steuerung des Wassergehalts durch beliebige Wasserzugabe. Für eine erfolgreiche Verdichtung ist die Verwendung von Tragschichtmaterial mit optimalem Wassergehalt essenziell.

Das gegenständliche Kapitel beschreibt die Entwicklung und den Aufbau der AHM. Weiters wird auf die Durchführung von Planumsverbesserungsarbeiten eingegangen und deren Ablauf erläutert. Abschließend werden die Vor- und Nachteile sowie umweltrelevante und wirtschaftliche Betrachtungen im Abschnitt 2.4 diskutiert.

2.1 Entwicklung

1960 wurde erstmals mit Hilfe einer Bettungsreinigungsmaschine versucht, eine Tragschicht mechanisiert und gleisgebunden einzubauen. Vor der Entwicklung der AHM gab es bereits von anderen Bahnen ähnliche Maschinen wie die PM 200 von der *Deutschen Bahn*, welche ab 1984 im Betrieb war. Ein weiteres Beispiel ist die seit 1993 eingesetzte SVV 100. Bis dahin bestand die Aufgabe ausschließlich im Ausbau des bestehenden Materials und dem Einbau einer neuen Planumsschutzschicht aus zugeliefertem Material [38].

Zu Beginn der neunziger Jahre wurde für die *ÖBB* von *Plasser & Theurer* die AHM 800-R entwickelt. Mit dieser Maschine sollte die Unterbauverbesserung nachhaltiger und effizienter ermöglicht werden. Die wesentlichen Leitgedanken dafür waren die Einbindung des Schotterrecyclings und die höheren Anforderungen an die Verdichtung der ungebundenen Tragschicht. Ein weiterer Anspruch bezog sich auf eine durchschnittliche Einbauleistung von 40 m/h bei einer verdichteten Tragschichtstärke von 45 cm. Darüber hinaus wurde das Befahren des Gleisabschnittes nach den Sanierungsarbeiten auf dem noch nicht geschotterten Gleises mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h angestrebt [38].

2.2 Aufbau und Beschreibung

In Abbildung 2.2 ist der Aufbau der gesamten Maschine ersichtlich. Im vorderen Bereich befinden sich Materialförder- und Siloeinheiten (MFS), welche für das Abraummateriale zur Verfügung stehen. Diese Einheiten sind universell für verschiedene Maschinen verwendbar und können mit Hilfe eines Förderbands am Boden des Silos vollständig mit Aushubmaterial beladen und wieder entladen werden. Dahinter befindet sich die Schotterbrechanlage, welche den mit der ersten Aushubkette aufgenommenen Gleisschotter für die weitere Verwendung aufbereitet. Das gebrochene Kies-Sand-Gemisch wird mit einer Fördereinrichtung zum hinter den Aushubketten liegenden Mischer transportiert. Dort wird es mit dem am Ende der Maschine gelagerten neuen Material entsprechend den Anforderungen an die Tragschicht gemischt.

Hinter den beiden Aushubketten befindet sich eine Glätteinrichtung zum Abziehen des anstehenden Untergrunds und eine Vorrichtung, die den Einbau eines Geovlieses oder Geogitters ermöglicht. Dahinter und in unmittelbarer Nähe zum Mischer erfolgt der Einbau der neuen Planumsschutzschicht. Mit dem Sandbalken wird das ungebundene Tragschichtmaterial verteilt und der Materialeinbau in der richtigen Schichthöhe gewährleistet. Zur Verdichtung des Tragschichtmaterials werden sechs nachlaufende Rüttelplatten eingesetzt. Eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs sowie eine bildhafte Darstellung der einzelnen Arbeitsschritte ist in Abschnitt 2.3 zusammengefasst.

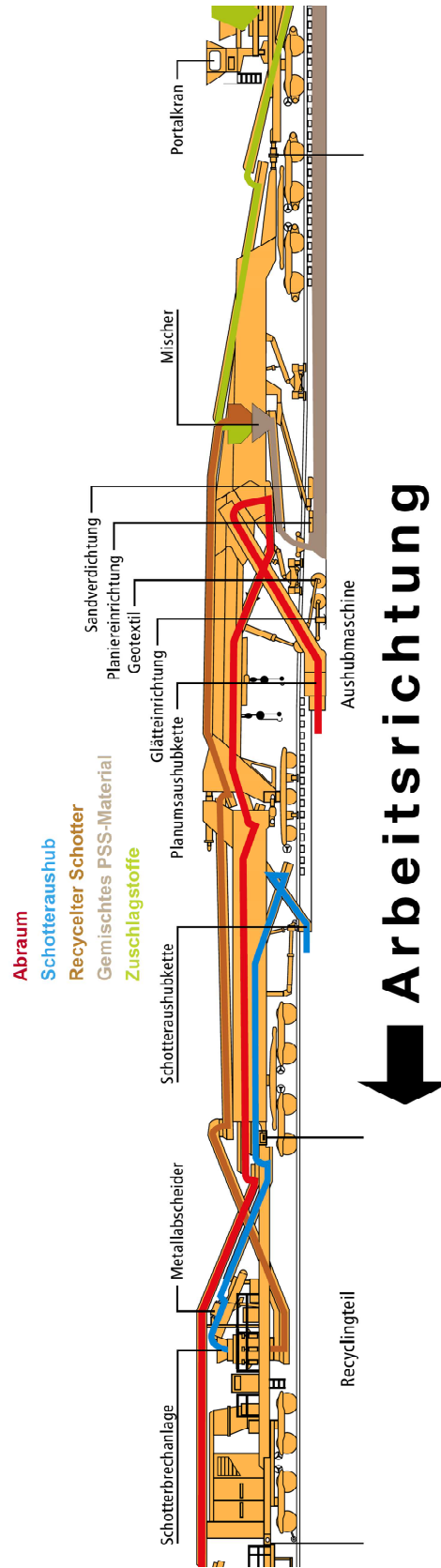


Abbildung 2.2: Aufbau der AHM 800-R [38]

Die Gesamtlänge aller zur Durchführung der einzelnen Arbeitsschritte benötigten Komponenten der AHM beträgt rund 102 m. Die Unterbausanierungsarbeiten erfolgen kontinuierlich, jedoch mit einer relativ geringen Geschwindigkeit, welche einer Arbeitsleistung von 700 m/24 Stunden entspricht. Wird die maximale Leistung der Aushubketten betrachtet, kann die Planumsaushubkette bei einem Totalaushub $800 \text{ m}^3/\text{h}$ und die Schotteraushubkette $300 \text{ m}^3/\text{h}$ leisten [41].

2.3 Durchführung der Planumsverbesserung

Für einen einwandfreien Ablauf der Unterbausanierung ist eine entsprechende Arbeitsvorbereitung zwingend erforderlich. Dazu gehören ein geotechnisches Gutachten und die Festlegung der Anforderungen an das Tragschichtmaterial sowie an die verwendeten Geotextilien. Unabhängig davon ob die Entwässerungsanlage des zu sanierenden Streckenabschnittes bestehen bleibt oder neu errichtet wird, muss während der gesamten Arbeiten besonders auf deren Einbindung geachtet werden. Mängel bei der Ableitung des anfallenden Wassers bewirken eine Herabsetzung der Tragfähigkeit der eingebauten Schichten [12], [38].

2.3.1 Schotter- und Planumsaushub

Die AHM besitzt zwei Räumketten für den Ausbau des Bestandsmaterials. Bevor diese ihre Arbeit verrichten können, müssen das Gleis und die Schienen bis zu 25 cm angehoben und die Räumketten darunter eingefädelt werden [38]. Die erste Aushubkette nimmt den Oberbauschotter bis in eine Tiefe von maximal 70 cm unter der Schienenoberkante auf, was den oberen 20 bis 25 cm des Schotterbetts entspricht. Der gewonnene Schotter wird für den Wiedereinbau direkt von der Aushubkette zur Brechanlage transportiert [18].

Zur Aufnahme des tiefer liegenden Materials bis zu einer Tiefe von maximal 120 cm unter der Schienenoberkante ist die zweite Aushubkette vorgesehen (siehe Abbildung 2.3). Diese Aushubschicht besteht aus einem Gemisch aus unterer Gleisschotterschicht, Tragschichtmaterial und Teilen des anstehenden Untergrundes. Die Planumsaushubbreite kann je nach Gleisgeometrie zwischen 4,05 und 6,50 m variiert werden und ist breiter als die Aufnahmebreite der Schotteraushubkette von 4,00 bis 4,60 m. Das ausgebaute Material der zweiten Räumkette wird nicht mehr verwendet, sondern zu den MFS-Einheiten im vorderen Maschinenbereich befördert und dort bis zum Abtransport zwischengelagert [26], [41].

2.3.2 Geokunststoffeinbau

Mit der AHM ist der Einbau von Geokunststoffen zwischen dem anstehenden Boden und der neu zu errichtenden ungebundenen Tragschicht möglich. Meistens werden Geovliese verwendet, allerdings können je nach Anforderungen auch Geogitter und Verbundstoffe herangezogen werden. Alternativ dazu besteht auch die Möglichkeit, Hartschaumplatten einzubauen [38].



Abbildung 2.3: Planumsaushubkette; Foto von Plasser & Theurer

Die Aufgabe der Geokunststoffeinlage setzt sich aus der Trenn- und Filterwirkung sowie der Stabilisierung während der Verdichtungsarbeiten zusammen. Die hydraulischen Anforderungen beziehen sich auf die Ableitung der Niederschlagswässer des im Quergefälle ausgeführten Profils [12]. Anstelle von Geotextilien werden vor allem in Schweden und Finnland Hartschaumplatten eingesetzt, um Frostschäden während der kalten Jahreszeit zu unterbinden. Diese Wärmedämmschicht bietet einen zusätzlichen Schutz bei großen Frosteindringtiefen oder frostempfindlichem Untergrund [26].

Nachdem durch die Aushubketten das Material entfernt wurde, wird die Aushubsohle mit einer Glätteinrichtung abgezogen. Diese besitzt einen leichten Rüttler, wobei keine direkte Verdichtung des Aushubplanums erfolgt. Feinkörniger Untergrund wird nur statisch geglättet, bei grobkörnigem Untergrund werden durch den Rüttler auch Schwingungen mit der Glättung eingebracht [6]. Anschließend erfolgt die Verlegung bzw. das Ausrollen des Geokunststoffes, wie in Abbildung 2.4 veranschaulicht [18].

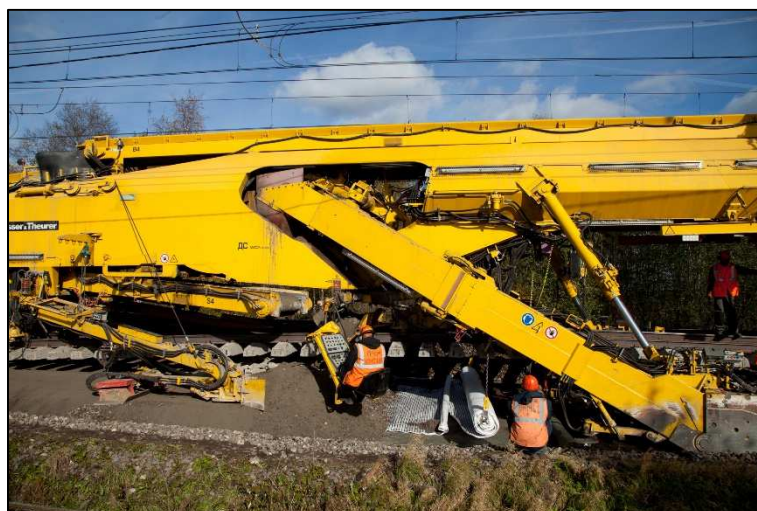


Abbildung 2.4: Geovliesverlegung und Tragschichtmaterialeinbau; Foto von Plasser & Theurer

2.3.3 Herstellung der ungebundenen Tragschicht

Die neue Tragschicht besteht aus einem Gemisch aus gebrochenem und aufbereitetem Gleisschotter und Neumaterial. Der Anteil des recycelten Bestandsmaterials beträgt 40-60%, wodurch bis zu 60% an neuem Material infolge der Herstellung der neuen Tragschicht gespart werden können [6]. Es muss ein gut gestuftes Material innerhalb einer festgelegten Kornverteilungslinie verwendet werden [38]. Die Anforderungen an diese Schicht werden in Abschnitt 3.2 näher erläutert. Die Dimensionierung der Planumsschutzschicht wird sowohl von der Tragfähigkeit als auch der Frostempfindlichkeit geprägt.

Der von der ersten Aushubkette aufgenommene Gleisschotter wird in der Brechanlage zu Material der Korngröße 0 bis 33 mm zerkleinert. Anschließend erfolgt der Mischvorgang mit dem zugelieferten Neumaterial unter Zugabe von Wasser in einer Zwangsmischanlage. Die zugeführte Wassermenge ist vom Wassergehalt des gebrochenen und neuen Materials abhängig. Der Wassergehalt des Tragschichtmaterials hat einen wesentlichen Einfluss auf dessen Verdichtbarkeit [18].

Die maximal mögliche Einbauhöhe der Planumsschutzschicht der AHM beträgt 50 cm, wobei die gesamte Schicht in einer Lage und während eines Arbeitsschrittes eingebaut wird. Mit Hilfe eines Sandbalkens wird das Material der neuen Planumsschutzschicht auf der gesamten Einbaubreite gleichmäßig verteilt und geglättet, um anschließend verdichtet zu werden [12].

2.3.4 Verdichtung

Die Planumsschutzschicht soll eine hohe Lagerungsdichte aufweisen, um Lasten optimal und gleichmäßig in den Untergrund abtragen zu können. Für die Erzielung der geforderten Verdichtung sorgen Plattenverdichter, deren Funktionsprinzip jenem einer Rüttel- oder Vibrationsplatte entsprechen.

In Abbildung 2.5 ist einer der sechs Plattenverdichter dargestellt. Vier der Plattenverdichter sind mittig nebeneinander angeordnet. Die beiden Verbleibenden befinden sich seitlich rund 1 m hinter den Plattenverdichtern in der Mitte. Mit diesen außen situierten Plattenverdichtern kann die Breite der Verdichtungsarbeiten variiert und dadurch auf den jeweiligen Tragschichtquerschnitt Rücksicht genommen werden. Das Material wird meist mit einer Stärke von 50 cm eingebracht, wobei durch die Verdichtung eine Reduktion der Mächtigkeit auf 40 bis 45 cm erfolgt [12]. Die Rüttelplatten werden durch eine Unwucht angeregt und die daraus entstehenden dynamischen Bewegungen sowie das Eigengewicht sorgen für eine entsprechende Verdichtungsenergie, die in den Boden eingebracht wird.

Nach dem Übergang der Plattenverdichter ist die Unterbausanierung abgeschlossen. Der Gleisrost kann wieder auf der Planumsschutzschicht abgelegt, lagemäßig ausgerichtet und mit Schotter gettet werden.

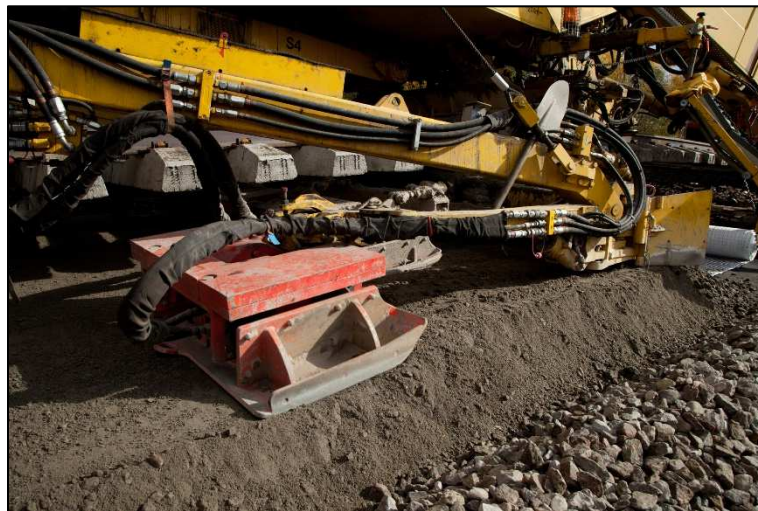


Abbildung 2.5: Plattenverdichter der AHM 800-R; Foto von Plasser & Theurer

2.3.5 Qualitätskontrolle

Um den Erfolg der Unterbausanierung beurteilen zu können, ist eine anschließende Qualitätskontrolle erforderlich. Einerseits wird an verschiedenen Punkten die Aushubtiefe, die Schichtstärke und die Planumsneigung gemessen und protokolliert. Andererseits besitzt die Maschine einen Laborteil an dem mindestens einmal täglich die Korngrößenverteilung und der Wassergehalt des eingebauten Tragschichtmaterials aufgezeichnet werden. Die von den ÖBB geforderten minimalen Verdichtungsgrade und minimalen Verformungsmoduln (siehe Abschnitt 3.3) sind einzuhalten. Zur Feststellung des Verformungsmodul wird im Abstand von etwa 200 m ein dynamischer Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät durchgeführt [38].

2.3.6 Vergleich mit der konventionellen Methode

Vor der Entwicklung des gleisgebundenen Tragschichteinbaus war die Unterbausanierung einer Gleisanlage deutlich aufwendiger. Der Gleisrost musste komplett entfernt sowie der Schotter und die bestehende Tragschicht mit Erdbaugeräten abgetragen werden. Der Transport des ausgebauten und neu einzubauenden Materials wurde von Lastkraftwagen und/oder Eisenbahnwaggons übernommen, wobei der überwiegende Teil meist durch ersteres erfolgt. In besonders unwegsamem Gelände oder bei Exponiertheit der Gleisbaustelle stellte der Materialtransport von und zum Einbauort eine große Herausforderung dar. Für den gesamten Bauablauf waren unter anderem Schub- und Planiertraupen erforderlich. Zudem kamen selbstfahrende Verdichtungsgeräte zum Einsatz [26].

Die Verwendung von Erdbaugeräten und Lastkraftwagen hinterlässt mitunter Vorschädigungen am neuen Planum. In den gegebenenfalls so erzeugten Rillen und Eindrückungen kann Wasser verbleiben, wodurch die Entstehung von Frostbrüchen ermöglicht wird. Die Vorteile der gleisgebundenen, mechanisierten Herstellung der Planumsschutzschicht überwiegen im Vergleich zur konventionellen Methode und sind in Abschnitt 2.4.1 aufgelistet [26].

2.4 Einsatz der AHM 800-R

Die AHM dient ausschließlich der Gleisstandhaltung an Bestandsstrecken und kann nicht für die Neuerrichtung einer Gleisanlage eingesetzt werden. Das Streckennetz der ÖBB wird zur Kontrolle der Gleislage und Identifizierung von Schwachstellen regelmäßig mit Oberbaumesswagen und 2D-Georadargeräten befahren. Die Entscheidung für Instandhaltungs- und Sanierungsarbeiten mit der AHM beruht auf den gewonnenen Informationen zur Gleislage und dem Zustand des Schotterbetts bzw. des Unterbaus [26].

Im nächsten Unterkapitel sind die Vor- und Nachteile im Hinblick auf die Verwendung der AHM angeführt. Anschließend wird kurz auf umweltrelevante und wirtschaftliche Betrachtungen eingegangen.

2.4.1 Vor- und Nachteile der Unterbausanierung mittels AHM 800-R

Die Vorteile der Herstellung einer neuen ungebundenen Tragschicht mit der AHM, insbesondere im Vergleich zur konventionellen gleislosen Einbauvariante, sind [12], [18], [26], [38]:

- Abbau des bestehenden Gleises ist nicht erforderlich
- Ausgebauter Gleisschotter wird auf der Maschine aufbereitet und als neue Tragschicht wieder eingebaut
- Etwa 50% Einsparung von Neumaterial
- Geringerer Aufwand der Materialtransporte von und zur Baustelle
- Gleichzeitiges Einbauen von Geokunststoffen zwischen dem Aushubplanum und der neuen Tragschicht ist möglich
- Mitunter geringere erforderliche Tragschichtstärken aufgrund der Verwendung von Geokunststoffen
- Kleine offene Baugruben (etwa 1 m tief und 6 bis 7 m lang), die schnell wieder verfüllt werden
- Einbau der neuen ungebundenen Tragschicht bis 50 cm Mächtigkeit in einem Arbeitsgang
- Verdichtungsgeräte sind in der Maschine integriert
- Kein Befahren und somit keine Schädigung des neu errichteten Planums durch Erdbaugeräte oder Lastkraftwagen
- Kein Bedarf für eine temporäre Baustellenzufahrt
- Hohe Arbeitsgeschwindigkeit (je nach Einbaustärke maximal 40 bis 80 m/h)
- Kurze Bauzeiten
- Verringerung der Sperrzeiten um bis zu 50%
- Arbeits- und Materialtransporte finden ausschließlich am bearbeiteten Gleis statt
- Ungehinderter Betrieb am Nachbargleis ist möglich
- Minimale Beeinträchtigung der Bahnkunden
- Kontinuierliche Überwachung der gesamten Abläufe und Aufzeichnung verschiedener Parameter wie Aushubtiefe, Querneigung und Tragschichtstärke

Nachteile durch die Verwendung der AHM können fast ausschließlich im Kontext mit den neueren Entwicklungen angeführt werden. Mittlerweile sind Unterbausanierungsmaschinen mit Waschanlagen ausgestattet. Daher kann der ausgebaute Schotter nach der Aufbereitung wieder als Gleis-schotter verwendet werden. Es kann als nachteilig betrachtet werden, dass die gleisgebundenen Instandhaltungsarbeiten in einem Arbeitsübergang durchgeführt werden. Beispielsweise wäre zur Erzielung einer hohen Lagerungsdichte ein lagenweiser Schichteinbau über die gesamte Tragschichtstärke günstig.

2.4.2 Umweltrelevante und wirtschaftliche Betrachtungen

Mit dem Recycling des Schotters auf der Maschine und dessen Wiedereinbau als Tragschicht gehen geringe Materialtransporte einher. Im Hinblick darauf können im Vergleich zum konventionellen Tragschichteinbau Umweltbelastungen reduziert werden [38].

Aus wirtschaftlicher Sicht können durch die Wiederverwendung des Schotters die Transport-, Material- und Entsorgungskosten minimiert werden. Wird die gesamte Arbeitszeit der Unterbausanierungsarbeiten betrachtet, ist diese bei der gleisgebundenen Methode im Vergleich zur konventionellen deutlich kürzer. Unter Verwendung der gleisgebundenen Instandhaltungsarbeiten werden keine Aufwendungen für Zufahrten und Rekultivierung benötigt [26].

Zusammenfassend weist der Einsatz der AHM zur Planumsverbesserung zu den arbeitsablauf- und prozessbezogenen Vorteilen zusätzlich auch umweltrelevante und wirtschaftliche Vorzüge auf.

2.5 Weitere gleisgebundene Maschinen zur Unterbausanierung

Die AHM ist, wie bereits erwähnt, nicht die erste und einzige gleisgebundene Maschine in diesem Bereich. Mit der SVV 100 war die Unterbausanierung in einem drei-stufigen Prozess möglich. Als vorgelagerter Prozessschritt für den Ausbau des vorhandenen Materials wurde eine Bettungsreinigungsmaschine eingesetzt. Die SVV 100 wurde für den Einbau und die Verdichtung der neuen Tragschicht verwendet. Zudem konnte mit dieser Maschine auch das Schotterbett hergestellt werden. Weiters wurde vor der AHM bereits die PM 200-2 eingesetzt, welche in einem Arbeitsgang das alte Material aushebt und daran anschließend sowohl eine Planumsschutzschicht als auch den Gleis-schotter einbaut. Seit 2002 gibt es diese Maschine modifiziert als PM 200-2R mit einer Schotterwaschanlage, um den ausgebauten Schotter nach dem Entfernen der angesammelten Feinteile wieder verwenden zu können [26].

Zwei weitere Maschinen, die nach der AHM entwickelt wurden und ebenfalls das ausgebaute Material aufbereiten und wiederverwenden können, sind die Unterbausanierungsmaschinen RPM 2002 und PM 1000-UMR. Der wesentliche Unterschied zwischen der AHM und der später hervorgebrachten RPM 2002 liegt in der Verwendung des Schotters, da dieser nicht für die Tragschicht aufbereitet, sondern mit einer Kegelbrechanlage angeschärft und als neue Schotterschicht eingebaut werden kann. Die neueste Entwicklung stellt die PM 1000-UMR dar, welche seit 2009 in Betrieb ist. Diese Maschine besitzt drei Aushubketten, wobei der Schotter mit Hilfe einer Waschanlage und Brechern recycelt wird. Zusätzlich ist der Einbau einer stabilisierten Schicht zur Reduktion der Stärke der Tragschicht möglich. Die PM 1000-UMR weist eine deutliche Leistungssteigerung im

Vergleich zu den ersten Unterbausanierungsmaschinen auf. Aufgrund des umfangreichen Materialrecyclings auf der Maschine (bis zu 100% des vorhandenen Bettungsmaterials kann wiederverwendet werden), ermöglicht die PM 1000-UMR eine äußerst nachhaltige Unterbausanierung [18], [26].

3 Ungebundene Tragschicht

Die ungebundene Tragschicht ist Teil einer Gleisanlage mit Schotteroberbau. Für eine hohe Gleisla-gequalität und eine lange Lebensdauer des Bahnkörpers sind alle Bestandteil des Gleisbettes, die Schienen, die Schwellen, der Schotter und die Tragschicht bis hin zum Untergrund verantwortlich. Gemäß RVS 08.03.01: 2010 [34] kann die ungebundene Tragschicht in eine Planumsschutzschicht (PSS) und eine Frostschutzschicht (FSS) unterteilt werden. Üblicherweise erfolgt diese Unterteilung bei Neubauten sowie bei der konventionellen Ertüchtigung oder Instandsetzung einer Bestands-strecke. Die Stärke der PSS beträgt im Regelfall 10 cm und wird auch als obere Tragschicht bezeich-net. Diese Tragschicht kann ungebunden oder bituminös gebunden hergestellt werden. Direkt da-runter befindet sich bei dieser Bauweise eine 30 cm starke FSS bzw. ungebundene untere Trag-schicht. Bei der gleisgebundenen Sanierung ist dieses Schichtpaket nicht unterteilt, weshalb aus-schließlich von einer 40 cm mächtigen ungebundenen Tragschicht gesprochen werden kann. In der Literatur wird oftmals nicht zwischen einer PSS und einer ungebundenen Tragschicht unterschieden, daher werden in dieser Arbeit die beiden Begriffe als Synonyme für die von der AHM einge-baute neue Tragschicht verwendet. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, liegt die ungebundene Trag-schicht zwischen dem Unterbau (bei Dämmen) bzw. Untergrund (bei Einschnitten) und dem Ober-bau.

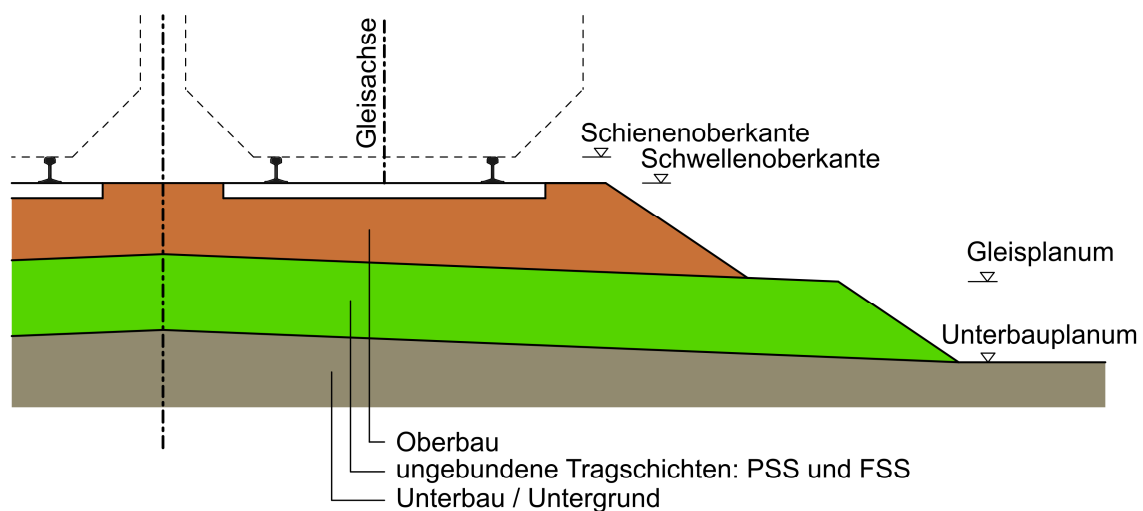


Abbildung 3.1: Lage der Tragschicht (PSS) im Oberbau; adaptiert RVS 08.03.01: 2010 [34]

Den Aufgaben und Funktionen der ungebundenen Tragschicht kommt eine entscheidende Bedeu-tung zu, daher werden diese im Unterkapitel 3.1 näher erläutert. Sie besteht aus einem Sand-Kies-

Gemisch, welches im Unterkapitel 3.2 genauer beschrieben wird. Abschließend behandelt das Unterkapitel 3.3 den Einbau sowie Angaben zur Verdichtungskontrolle der neuen Tragschicht.

3.1 Funktionen der ungebundenen Tragschicht

Die beiden Hauptaufgaben der Tragschicht sind die Reduktion der verkehrsinduzierten Spannungen im Unterbau und die Vergrößerung der Frostschuttschicht [39]. Die PSS übernimmt außerdem einige weitere Funktionen, die nachfolgend aufgelistet und genauer erläutert werden [19], [25], [26], [39]:

- Reduktion der Spannungen im Unterbau
- Vermeidung von schädlichen Verformungen
- Frostschutz des Untergrunds
- Trennung von Untergrund und Schotter
- Verhinderung des Aufstiegs von Feinkorn
- Verhinderung der Zermürbung des Untergrunds durch die Schotterkörner
- Entwässerung des Planums
- Drainagewirkung

3.1.1 Reduktion der Spannungen im Unterbau

Sowohl die statischen als auch die dynamischen Kräfte, die durch den Betrieb einer Eisenbahn entstehen, müssen vom Oberbau der Gleiskonstruktion aufgenommen und in das Unterbauplanum abgeleitet werden. Hierzu besitzen die Tragschicht wie auch das Schotterbett eine lastverteilende Wirkung.

Die aufzunehmenden Lasten gelangen über das Schotterbett in die PSS und werden anschließend in den Unterbau abgetragen. Die Größe der in den Unterbau eingeleiteten Kräfte hängt maßgeblich von der Lasteinleitungsfläche ab. Für die Lasteinleitungsfläche ist die von dieser Schicht hervorgerufene Lastverteilung, welche durch den Steifemodul und die Schichtstärke beeinflusst wird, von Bedeutung [25]. Wäre keine ungebundene Tragschicht vorgesehen, müssten aufgrund der viel kleineren Lastübertragungsfläche größere Spannungen vom Unterbauplanum aufgenommen werden. Die Verwendung der Tragschicht erfolgt bei unzureichender Untergrundtragfähigkeit oder als Ausgleichsschicht, wenn extreme Tragfähigkeitsunterschiede vorhanden sind, um eine entsprechende Ableitung der verkehrsbedingten Lasten und eine Vergleichmäßigung der Belastungen für den Untergrund gewährleisten zu können. Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit des Untergrunds werden aus vorab durchgeführten Lastplattenversuchen gewonnen [26].

3.1.2 Vermeidung von schädlichen Verformungen

Gerade bei weichem bzw. gering tragfähigem Untergrund ist der Einsatz einer ungebundenen Tragschicht besonders wichtig. Wie in Abschnitt 3.1.1 beschrieben, verteilt und reduziert die PSS die auf den Untergrund wirkenden Kräfte. Dadurch können schädliche Verformungen und unerwünschte Setzungen vermieden werden [18].

3.1.3 Frostschutz des Untergrunds

Wird insbesondere bei frostempfindlichen Böden der Frostschutz nicht beachtet, können im Oberbau erhebliche Schäden auftreten. Durch das Gefrieren des im feinkörnigen Boden befindlichen Porenwassers können sich Eislinsen bilden und dadurch Frosthebungen hervorgerufen werden. Im Frühjahr, wenn derartige Eislinsen schmelzen, ist zusätzlich die Gefahr von Aufweichungen und Steifigkeitsverlusten gegeben [39].

Um solche Schwachstellen zu vermeiden, wird frostunempfindliches Material bis in eine ausreichende Tiefe eingebracht. Die ungebundene Tragschicht hat daher auch die Funktion einer FSS. Von frostsicheren Korngemischen kann gesprochen werden, wenn der Anteil an feinen Bodenkörnern (Tone und Schluffe), besonders klein ist und überwiegend Sande und Kiese angetroffen werden. Zur Bestimmung der Frostsicherheit wird das Frostkriterium nach Casagrande herangezogen. Die ungebundene Tragschicht besteht stets aus einem frostsicheren Bodenmaterial [39].

3.1.4 Trennung von Untergrund und Schotter

Die Trennung von Untergrund und Schotter wird auch als Separation oder Filterfunktion bezeichnet. Durch eine entsprechende Kornverteilung und eine ausreichende Mächtigkeit der Tragschicht wird ein Vermischen des Schotters mit dem Unterbau bzw. Untergrund verhindert.

Die Auswirkungen, die durch das Vermischen der Bodenschichten entstehen, sind sehr ähnlich zu jenen, die beim Aufsteigen feiner Kornfraktionen auftreten (siehe Abschnitt 3.1.5). Die Vermischung und Verunreinigung des Schotters reduziert die Lebensdauer der Gleisanlage. Das hat eine Verkürzung der Intervalle der Stopf- und Wartungsarbeiten zur Folge [26].

3.1.5 Verhinderung des Aufstiegs von Feinkorn

Mit Hilfe von Wasser können aus einer Schicht kleine Kornfraktionen nach oben transportiert werden. Dieser Vorgang wird auch als Kontakterosion bezeichnet. Durch eine Verunreinigung des Schotterbetts bzw. der PSS reduziert sich die Elastizität des gesamten Systems und der Steifemodul steigt an. Dieser Versteifung folgt eine Verkleinerung des Druckausbreitungswinkels. Dadurch verringert sich die Lasteinleitungsfläche, was zu größeren Spannungen und Druckkräften auf die darunterliegende Schicht führt. Eine Überbeanspruchung der Körner ist in diesem Zusammenhang nicht auszuschließen [26].

Um das Aufsteigen und Eindringen von Feinkorn in eine darüberliegende Schicht zu verhindern, muss die Kornverteilungslinie des eingebauten Bodenmaterials entsprechend filterstabil sein [25].

3.1.6 Verhinderung der Zermürbung des Untergrunds durch die Schotterkörner

Liegen die Schotterkörner direkt auf einem harten Untergrund, können diese abgerieben werden und bei Vorhandensein von Wasser kann eine Verschlammung entstehen. Die Tragschicht zwischen dem Schotterbett und dem Untergrund verhindert diesen Vorgang [39].

3.1.7 Entwässerung des Planums

Der anstehende Untergrund muss, vor allem wenn er wasserempfindlich ist, vor Oberflächenwässern, beispielsweise aus Niederschlag, geschützt werden. Oberflächlich auftretendes Wasser gelangt über die Schotterschicht direkt auf die PSS. Mit einer geringen Wasserdurchlässigkeit und einem passenden Quergefälle kann das Wasser in die seitlich des Gleises angeordneten Entwässerungsgräben abgeleitet werden [39].

3.1.8 Drainage

Die Drainagefunktion der Tragschicht bezieht sich sowohl auf von unten aufsteigendes als auch von oben eindringendes Wasser. Die Drainageeigenschaften sind vom Anteil an Feinteilen und von der Größe der Poren abhängig. Die Durchlässigkeit der Tragschicht muss, um die Funktionsfähigkeit gewährleisten zu können, geringer als jene des Schotterbettes, aber deutlich größer als die Durchlässigkeit des Untergrundes sein [25].

3.2 Materialanforderungen

An das Material der Tragschicht werden einige Anforderungen gestellt, um die im Abschnitt 3.1 angeführten Funktionen erfüllen zu können. Die RVS 08.15.01: 2010 [37] befasst sich mit dem Material, der Herstellung, den Schichtanforderungen und Prüfungen sowie Prüfungsverfahren für ungebundene untere und obere Tragschichten. Anforderungen an das angelieferte Tragschichtmaterial für eine vollmechanisierte Unterbausanierung sind in den Technische(n) Lieferbedingungen 07.09.18: 2014 [28] der ÖBB geregelt.

Bei der Unterbausanierung mittels AHM stammen 40-60% des Tragschichtmaterials aus dem auf der Maschine gebrochenen, nicht gesiebten Gleisschotter, welcher mit der ersten Aushubkette aufgenommen wird. Der zweite Teil des benötigten Einbaumaterials (40-60%) wird angeliefert. Die Kriterien für die Kornverteilung sind beim neu angelieferten Material strenger als in den Lieferbedingungen TL 07.09.18: 2014 [28] und der RVS 08.15.01: 2010 [37]. Der Grund dafür beruht auf der, je nach Gesteinsart und Brechereinstellung, größeren Streuung der Eigenschaften des recycelten Korngemisches [6].

Als Tragschichtmaterial wird prinzipiell ein sandiger Kies mit einem geringen Feinkornanteil verwendet. Die Kornverteilung des Materials, wie in Abbildung 3.2 ersichtlich, ist seitens den ÖBB durch eine obere und untere Sieblinie begrenzt. Der Anteil an Körnern < 0,02 mm ist auf maximal 3% der Gesamtmasse beschränkt. Ein ebenso wesentlicher Aspekt bei der Materialwahl bezieht sich auf die Kantigkeit der einzelnen Körner. Um eine gute Verzahnung zu erhalten, wird ein Anteil von mindestens 90% Brechkorn gefordert [38].

Der Feinkorngehalt beeinflusst sowohl die Frostsicherheit als auch die Verdichtbarkeit. Hinsichtlich Frostverhalten muss der Anteil an feinen Bodenkörner minimiert werden. Allerdings unterstützt ein gewisser, nicht zu hoher Feinkornanteil die Verdichtungsarbeiten. Bei einer optimalen Abstufung der Korngrößen kann im Zuge der Verdichtung ein geringerer Porenanteil und eine höhere Lagerungsdichte erreicht und dadurch ein besserer Verdichtungserfolg erzielt werden [6].

Die Verdichtungsfähigkeit eines Korngemisches lässt sich über die Kornverteilung, die Gesteinsart, die Kornform und die Korndichte beeinflussen. Die Abstimmung dieser Parameter aufeinander ist eine Grundvoraussetzung für ein zufriedenstellendes Verdichtungsergebnis im Feld. Die Bestimmung der Kornverteilung einer Bodenprobe ist in der ÖNORM B 4412: 1974 [30] geregelt.

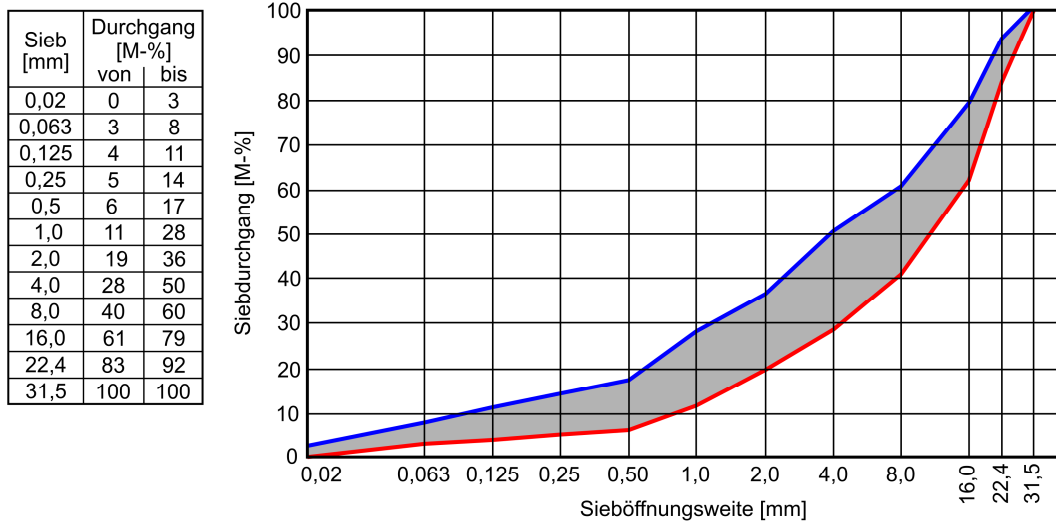


Abbildung 3.2: Anforderungen an die Sieblinie der Planumsschutzschicht; rot: untere Grenze, blau: obere Grenze; adaptiert [38]

Zusammengefasst unterliegt das auf den Strecken der ÖBB eingesetzte Tragschichtmaterial hohen Qualitätsanforderungen. Es muss ausreichend frostsicher und frostbeständig sein und darf nicht empfindlich auf Feuchteänderungen reagieren. Eine ausreichende Verdichtbarkeit ist zu gewährleisten. Weiters sind eine entsprechende Widerstandsfähigkeit und Dauerhaftigkeit im Hinblick auf die Beanspruchungen beim Einbau und unter den Verkehrsbelastungen gefordert [37], [38].

3.3 Herstellung und Verdichtungskontrolle der ungebundenen Tragschicht

Die Dimensionierung der ungebundenen Tragschicht erfolgt auf Basis der beiden Hauptaufgaben, welche sich auf die Tragfähigkeit und die Frostsicherheit beziehen. Je geringer die Tragfähigkeit des Untergrundes ist, desto mächtiger ist die PSS auszuführen [26]. Die Mindestschichtdicke beträgt 20 cm, allerdings wird in der Regel, unter anderem aufgrund der in Mitteleuropa vorhandenen Frosteindringtiefe von 80 bis 100 cm, eine ungebundene Tragschicht mit einer Mächtigkeit ≥ 40 cm ausgeführt [12].

Neben der Schichtstärke spielt die Steifigkeit der Tragschicht für deren Funktionsfähigkeit eine entscheidende Rolle. Die Vertikalspannungen der Gleiskonstruktion nehmen mit der Tiefe ab, weil die Lasteinleitungsfläche mit der Tiefe zunimmt. Idealerweise verringert sich auch die Steifigkeit der

einzelnen Schichten mit zunehmender Tiefe und es treten keine sprunghaften Steifigkeitsänderungen auf [12].

Zur Sicherstellung der Entwässerung beträgt das Quergefälle der ungebundenen Tragschicht mindestens 5%, das entspricht einer Neigung von 1:20 [26]. Um die geforderten Verdichtung der PSS zu erreichen, muss ein verdichtungsfähiges Material mit optimalem Wassergehalt, welcher über den Proctorversuch bestimmt wird (siehe Abschnitt 4.5.1), verwendet werden [12].

Die ÖBB gibt Mindestanforderungen an den Verdichtungsgrad D_{pr} , den statischen Verformungsmodul E_{v1} und den dynamischen Verformungsmodul E_{vd} der eingebauten ungebundenen Tragschicht vor. Diese sind von der maximal zulässigen Streckengeschwindigkeit abhängig. In Tabelle 3.1 sind die Verdichtungsanforderungen für eine Streckenhöchstgeschwindigkeit ≤ 160 km/h aufgelistet.

Tabelle 3.1: Verdichtungsanforderungen für den Einbau von Tragschichten zur Unterbauherstellung von bestehenden Eisenbahnstrecken gemäß RVS 08.03.01: 2010 [34]

Unterbauherstellung	D_{pr} [%]	E_{v1} [MN/m ²]	E_{vd} [MN/m ²]
Obere Tragschicht	97	35	38
Untere Tragschicht	97	30	34
Unterbauplanum*		20	24

* Bei einer Streckenhöchstgeschwindigkeit ≤ 160 km/h

Zusätzlich werden von den ÖBB Verdichtungsanforderungen für die Unterbausanierung mittels AHM in Abhängigkeit vom dynamischen Verformungsmodul des Aushubplanums angegeben (siehe Tabelle 3.2). Die Begründung für die reduzierten Anforderungswerte liegt darin, dass die Kontrolle des dynamischen Verformungsmoduls unmittelbar nach dem Einbau und der Verdichtung der Tragschicht erfolgt und somit keine Liegezeiten berücksichtigt werden können [6].

Tabelle 3.2: Verdichtungsanforderungen bei der AHM-Sanierung gemäß ÖBB (Prüfung sofort nach der Herstellung) [6]

Gemessener E_{vd} -Wert Aushubplanum [MN/m ²]	Geforderter E_{vd} -Mindestwert Aushubplanum [MN/m ²]
zwischen 20 und 30	≥ 30
zwischen 10 und 20	≥ 25
< 10	Keine Vorgabe

Die Verdichtungskontrolle der ungebundenen Tragschicht erfolgte bis 1997 mit der statischen Lastplatte. Das Messergebnis ist eine Last-Setzungskurve, aus der die beiden Verformungsmoduln der Erstbelastung E_{v1} und der Wiederbelastung E_{v2} , gewonnen werden. Dieser Versuch ist sehr aufwendig und erfordert Stehzeiten der Gleisbaumaschine. Heute werden dynamische Lastplattenversuche mit dem Leichten Fallgewichtsgerät (siehe Abschnitt 4.5.2), bei welchem der dynamische Verformungsmodul E_{vd} ausgewertet wird, durchgeführt. Dieser Versuch dauert nur wenige Minuten,

wodurch die Verdichtungskontrolle an mehreren Punkten, im Normalfall im Abstand von 100 - 200 m, durchgeführt werden kann [12].



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4 Verdichtung und Plattenverdichter

Bei der Unterbausanierung mit der AHM werden sechs Plattenverdichter zur Verdichtung der einzubauenden Tragschicht verwendet. Dieses Kapitel widmet sich allgemeinen Grundlagen zur Verdichtung und zum Plattenverdichter.

Das erste Unterkapitel beschäftigt sich mit dem Prinzip der Verdichtung, im speziellen mit der dynamischen Vibrationsverdichtung. Im daran anschließenden Abschnitt wird die Rüttelplatte von deren Aufbau bis hin zu den Anwendungsgebieten beschrieben. Das dritte Unterkapitel befasst sich mit dem bei der AHM verwendeten Plattenverdichter. Folgend wird auf ähnliche Geräte wie den Anbauverdichter eingegangen. Das abschließende Unterkapitel widmet sich der Verdichtungskontrolle. Dazu werden die Dichtebestimmung und der Proctorversuch, der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz (LFG) und die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) näher erläutert.

4.1 Prinzip der Verdichtung

Einleitend werden die Bedeutung und der Nutzen einer Bodenverdichtung im Sinne einer Maßnahme zur Bodenverbesserung erläutert und unterschiedliche Verdichtungsverfahren vorgestellt. Als wesentliches Thema wird näher auf die dynamische Verdichtung eingegangen. Neben der Ausführung der unterschiedlichen Bewegungszustände von Vibrationswalzen während eines Verdichtungsvorganges behandelt das letzte Unterkapitel die Einflüsse und Parameter zur Optimierung der Verdichtung.

4.1.1 Ziel der Bodenverbesserung durch Verdichtung

Jeder Baugrund muss abhängig vom Bauvorhaben bezüglich seiner Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit gewisse Anforderungen erfüllen. Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der Verfahren, mit welchen bei unzureichenden Untergrundeigenschaften eine Bodenverbesserung erzielt werden kann. Eine Bodenverbesserung soll entsprechend der Anforderungen an den Boden die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit erhöhen oder auch die Erdbebenstandsicherheit steigern. Die Gebrauchstauglichkeit kann durch die Verringerung oder Vorwegnahme der Setzungen, die Homogenisierung des Setzungsverhaltens oder die Beschleunigung der Konsolidation verbessert werden [5].

Tabelle 4.1: Übersicht der Bodenverbesserungsverfahren [3]

Prinzip	Verfahren
Boden-ERSATZ	Bodenaustausch, Bodenaushub, Bodenverdrängung
Boden-ENTWÄSSERUNG	Flächendrainagen, Filterbrunnen, Vorbelastung ohne/mit Vertikaldrains, Vakuumkonsolidation
Boden-VERDICHUNG (mechanisch)	Oberflächenverdichtung, Tiefenverdichtung (Rütteldruckverfahren, Rüttelstopfverfahren), Impulsverdichtung, Dynamische Intensivverdichtung
Boden-VERÄNDERUNG (hydraulisch)	Bodenstabilisierung mit Bindemitteln, Injektionen, Düsenstrahlverfahren, Tiefreichende Bodenstabilisierung, Bodenvernadelung, Bodenvereisung
Boden-BEWEHRUNG	Bewehrungslagen (Geokunststoffe)

Eines der fünf Prinzipien ist die Verdichtung, worauf sich die vorliegende Arbeit fokussiert. Während der Bodenverdichtung werden in den Untergrund mechanische Kräfte eingebracht und dadurch der Porenanteil verringert. Die Ergebnisse einer erfolgreichen Verdichtung sind [5]:

- Vorwegnahme von Setzungen
- Homogenisierung der Untergrundeigenschaften
- Erhöhung der Tragfähigkeit
- Reduktion der Durchlässigkeit

4.1.2 Verdichtungsverfahren

Welches Verdichtungsverfahren angewendet wird, ist von der Verdichtbarkeit und anderen Eigenschaften des Bodens abhängig. Eine grundsätzliche Unterscheidung erfolgt zwischen oberflächennaher und tiefreichender sowie zwischen statischer und dynamischer Verdichtung. In Abbildung 4.1 sind vier prinzipielle Verdichtungsverfahren ersichtlich.

Eine Tiefenverdichtung kann beispielsweise unter Verwendung des Rütteldruck- oder Rüttelstopfverfahrens durchgeführt werden. Bei nichtbindigen, grobkörnigen Böden kommt die Rütteldruckverdichtung zum Einsatz. Das Rüttelstopfverfahren eignet sich hingegen für bindige, feinkörnige Böden. Die Dynamische Intensivverdichtung und die Impulsverdichtung sind im Hinblick auf deren Tiefenwirkung zwischen der Tiefenverdichtung und der Oberflächenverdichtung angesiedelt. Je nach Bauvorhaben und Untergrund ist das geeignetste Verdichtungsverfahren anzuwenden. Relevanz für diese Arbeit hat nur die Oberflächenverdichtung, auf welche nachfolgend näher eingegangen wird.

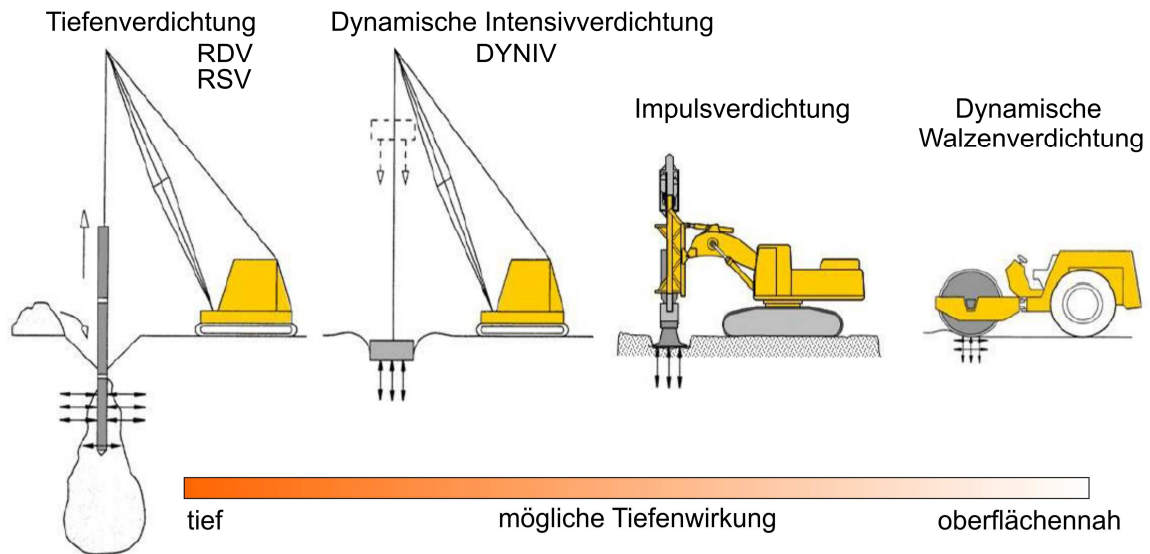


Abbildung 4.1: Ausgewählte Verdichtungsverfahren; adaptiert [5]

Statische Oberflächenverdichtung

Die Oberflächenverdichtung kann mit einer statischen Walze erfolgen. Die Zusammendrückung und Verdichtung des Verdichtungsmaterials wird ausschließlich durch das Eigengewicht der Walze hervorgerufen (siehe Abbildung 4.2). Der Quotient aus der Achslast und der Bandagenbreite stellt die statische Linienlast auf den Untergrund dar. Eine Erhöhung der Verdichtungsleistung erfordert eine Steigerung dieser Linienlast, welche durch die Verwendung einer schwereren Walze erreicht werden kann [22].

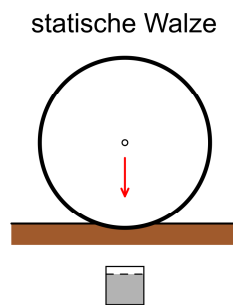


Abbildung 4.2: Prinzip der statischen Verdichtung; adaptiert [5]

Im Falle von bindigen, feinkörnigen Böden tritt bei der Verwendung eines dynamischen Verdichtungsverfahrens nicht immer ein Verdichtungserfolg ein. Idealerweise werden bindige Böden durch eine statische Auflast verdichtet. Bei geringer Durchlässigkeit des Untergrunds können zusätzlich zur statischen Lasteintragung Knetwirkungen sowie das Aufbrechen oder Aufreißen der Kornstruktur für einen raschen Abbau des Porenwasserüberdrucks und den Verdichtungserfolg vorteilhaft sein. Um das zu erreichen, werden statt Glattmantelbandagen Polygon- oder Stampffußbandagen eingesetzt [5].

Die Bedeutung und Anwendung der statischen Oberflächenverdichtung ist im Erdbau im Vergleich zur dynamischen Oberflächenverdichtung deutlich zurückgegangen.

Dynamische Oberflächenverdichtung

Dynamische Oberflächenverdichtungsgeräte besitzen ein Erregersystem, mit welchem Schwingungen erzeugt und in den Untergrund eingetragen werden. Bei Walzen kann zwischen Vibrationswalzen, Oszillationswalzen, Walzen mit Richtschwinger und selbstregelnden Walzen unterschieden werden (siehe Abbildung 4.3). Die Vibrationswalze bringt vorwiegend vertikal gerichtete Belastungen in den Boden ein und besitzt daher im Vergleich zu den anderen Walzen die größte Tiefenwirkung. Oszillationswalzen führen eine Vor- und Rückwärtsrotationsbewegung aus und tragen so dynamische Kräfte in horizontaler Richtung in das zu verdichtende Material ein. Oszillationswalzen eignen sich außerdem zur Verdichtung feinkörniger Böden. Walzen mit Richtschwinger bzw. selbstregelnde Walzen besitzen eine Erregereinheit die aus zwei gegensinnig rotierende Unwuchtmassen besteht. Je nach Bedarf kann diese Erregereinheit verstellt und zwischen vertikalen, in einem beliebigen Winkel geneigten und horizontalen Schwingungen gewählt werden [7].

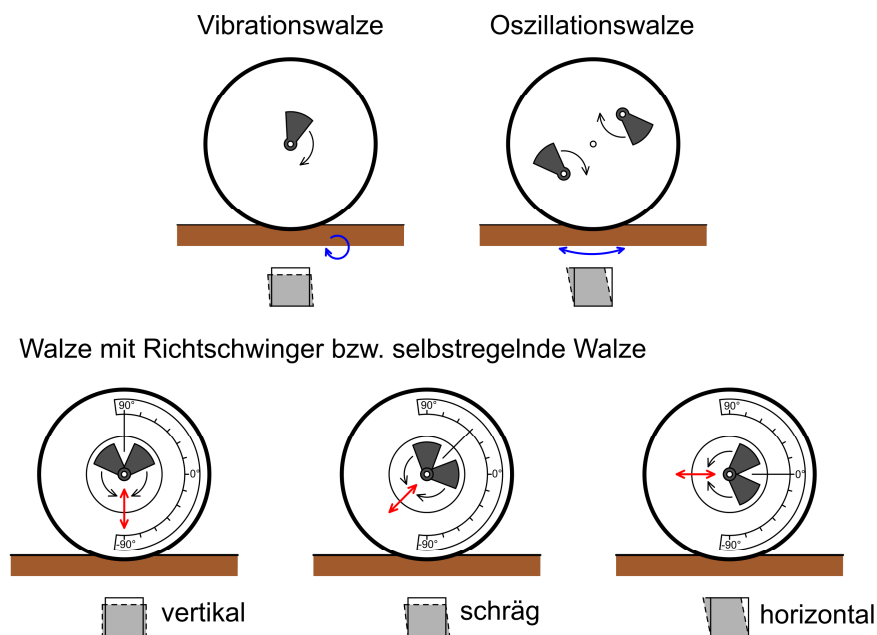


Abbildung 4.3: Prinzip der dynamischen Verdichtung; adaptiert [5]

Die statische und die dynamische Oberflächenverdichtung unterscheiden sich in ihrer Tiefenwirkung. Im Idealfall beträgt die Tiefenwirkung bei der dynamischen Verdichtung bis zu 1,0 m, hingegen erreicht die statische Walzenverdichtung weit geringere Tiefen bis maximal 0,20 m. Dementsprechend können bei der dynamischen Verdichtung die einzelnen Schüttlagen mit einer größeren Mächtigkeit ausgeführt und dadurch Bauzeit gespart werden [5]. Die Rüttelplatte gehört wie der Vibrationsstampfer und die Grabenwalze ebenfalls zu den dynamischen Oberflächenverdichtungsgeräten.

4.1.3 Dynamische Vibrationsverdichtung

Bei der dynamischen Verdichtung erzeugt eine Unwucht Schwingungen, welche in den zu verdichtenden Boden eingetragen werden. Bei der Walzenverdichtung sorgt die Bandage für den Bodenkontakt und die Übertragung der Schwingungen. Diese Aufgabe übernimmt bei einer Rüttelplatte oder einem Vibrationsstamper die fix mit der Erregerinheit verbundene Grundplatte.

Einerseits wird der Boden durch die dynamischen Bewegungen in Schwingung versetzt, sodass die Korn-zu-Korn-Spannungen kurzfristig herabgesetzt werden, wodurch die Umlagerung der einzelnen Bodenkörner in einen dichteren Zustand begünstigt wird. Andererseits erzeugt der Unwuchterreger Zentrifugalkräfte, die weit größer als das Eigengewicht des Gerätes sein können. Bei jeder Umdrehung findet dann ein Abheben und wieder Aufschlagen des Verdichtungsgerätes statt. Die so in den Untergrund eingebrachte Schlagenergie sowie die vorhandene statische Auflast führen zu einer Zusammendrückung und dichteren Lagerung des Bodens [5], [22].

Die Unwuchtmasse rotiert mit einer bestimmten Frequenz um eine Achse und erzeugt kreisförmig translatorische Schwingungen. Für den Verdichtungserfolg sind alle Einflussgrößen und Geräteparameter, wie Frequenz, Amplitude und Fliehkraft, gut aufeinander abzustimmen. Wird beispielsweise die Exzentrizität der Unwuchtmasse vergrößert, erhöht sich die Amplitude der Schwingungen und eine ausgeprägtere Tiefenwirkung kann erreicht werden.

4.1.4 Betriebszustände einer Vibrationswalze

Das schwingende Bandage und der zu verdichtende Boden bilden ein Interaktionssystem. Die Bandage versetzt den Boden in Schwingungen, wobei das Bewegungsverhalten der Bandage ebenso durch den Boden beeinflusst wird. Je nach Bodensteifigkeit, Fahrgeschwindigkeit, Erregeramplitude und dem Verhältnis zwischen Rahmengewicht und Walzengewicht entstehen verschiedene charakteristische Bewegungsmuster, die auch Betriebszustände genannt werden [1]. Das Diagramm in Abbildung 4.4 veranschaulicht sehr übersichtlich die einzelnen Betriebszustände.

Kontakt

Beim Kontakt hebt die Bandage nie vom Untergrund ab. Dieser Zustand kann nur bei sehr weichen Böden mit einer geringen Bodensteifigkeit, hohen Fahrgeschwindigkeiten oder einer geringen Erregeramplitude auftreten [1].

Abheben

Bei jeder Umdrehung hebt die Bandage kurz ab und schlägt danach wieder auf den Boden auf. Dieser Betriebszustand des Abhebens wurde bereits in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, tritt am häufigsten auf und führt zur effektivsten Verdichtung [1].

Springen

Der Übergang vom Abheben zum Springen kann sehr rasch erfolgen. Springen tritt im Vergleich zum Betriebszustand Abheben bei größerer Bodensteifigkeit, geringerer Fahrgeschwindigkeit und einer größeren Erregeramplitude auf. Das Bewegungsmuster ist weiterhin periodisch, wiederholt sich aber nur mit jeder zweiten Unwuchtumdrehung. Die Bandage verliert den Kontakt zum Boden,

schlägt einmal mit einer stärkeren Kraftwirkung und einmal mit einer schwächeren auf den Boden auf. Sind die Untergrundverhältnisse sehr steif, ist es möglich, dass die schwächeren Schläge ohne Bodenkontakt stattfinden und ein Luftschlag auftritt. Problematisch wird dieser Betriebszustand, wenn oberflächennahe eine Auflockerung oder Kornzertrümmerung hervorgerufen wird [1].

Taumeln

Tritt Taumeln auf, ist die Walze kaum mehr steuerbar und eine sinnvolle Verdichtung nicht möglich. Die Längsachse der Bandage neigt sich und es schlagen abwechselnd die linke und die rechte Seite auf den Boden auf. Das Bewegungsverhalten der beiden Seiten ist somit phasenverschoben [1].

Chaos

Bei großer Untergrundsteifigkeit, geringer Fahrgeschwindigkeit und großer Erregeramplitude entsteht ein chaotischer Betriebszustand. Die Walze ist nicht mehr kontrollierbar und die Verdichtungsarbeiten müssen unter diesen Umständen beendet werden [1].

Bewegung der Bandage	Interaktion Bandage - Boden	Betriebszustand	Verlauf der Bodenkontaktkraft	Anwendung der FDVK	Bodensteifigkeit	Fahrgeschwindigkeit	Erregeramplitude
periodisch	ständiger Kontakt	KONTAKT		ja	gering	hoch	klein
	periodischer Kontaktverlust	ABHEBEN		ja	↓	↑	↓
		SPRINGEN		ja			
		TAUMELN		nein			
chaotisch	aperiodischer Kontaktverlust	CHAOS		nein			

Abbildung 4.4: Betriebszustände einer Vibrationswalze [1]

Die Betriebszustände einer Rüttelplatte sind jenen der Vibrationswalze ähnlich. In Abschnitt 5.1.3 wird noch eingehend auf den Stand der Forschung zum Bewegungsverhalten der Rüttelplatte eingegangen.

4.1.5 Einflüsse auf die Verdichtung

Wie gut sich ein Boden verdichten lässt, hängt von vielen Faktoren ab. Dazu gehören die Kornform, die Kornrauigkeit, die Kornverteilung, der Wassergehalt und die Konsistenz (bei bindigen Böden) bzw. die Lagerungsdichte (bei nicht bindigen Böden). Für den bestmöglichen Verdichtungserfolg muss der zu verdichtende Untergrund den optimalen Wassergehalt w_{opt} aufweisen. Dieser kann mit Hilfe des Proctorversuches (siehe Abschnitt 4.5.1) ermittelt werden. Bei zu feuchtem Boden wird

die Verdichtung durch das Porenwasser und bei zu trockenem durch die Kapillarkohäsion erschwert [20].

Neben den Bodeneigenschaften sind die Maschinen- und Prozessparameter für den Verdichtungserfolg entscheidend. Nachfolgend wird eine adaptierte Auflistung der maßgeblichen Kennwerte der Verdichtungsintensität eines Vibrationsverdichters nach *König* [22] angeführt:

- Betriebsgewicht
- Unwuchtmasse im Vibrationskörper
- Erregerfrequenz
- Amplitude
- Statische Last
- Dynamische Last (errechnet sich aus der erzeugten Zentrifugalkraft bezogen auf die Bandagenbreite einer Walze bzw. auf die Grundplatte einer Vibrationsplatte)
- Arbeitsgeschwindigkeit

4.2 Allgemeines zu Vibrationsplatten

Die Beschreibung der Vibrationsplatten richtet sich an den Aufbau, den Verdichtungsprozess und die Anwendungsgebiete. Der auf der AHM eingesetzte Plattenverdichter wird sodann im Unterkapitel 4.3 vorgestellt.

4.2.1 Aufbau

Die Vibrationsplatte besteht aus einer Grundplatte, einem Erregersystem und einer Antriebseinheit. Die Grundplatte und der Unwuchterreger sind fest miteinander verbunden. Der Anschluss an die Antriebseinheit ist mit schwingungsdämpfenden Verbindungselementen ausgeführt.

Häufig werden Vibrationsplatten als Handgeräte, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, eingesetzt. Je nach Verwendungszweck können Rüttelplatten mit ausschließlich Vorlauf oder mit Vor- und Rücklauf verwendet werden [22]. Das Fortbewegen der Rüttelplatte muss einerseits durch die Bauart des Gerätes und die Anordnung des Unwuchterregers ermöglicht werden und kann andererseits nur bei vibrierender Platte erfolgen. Das periodische Abheben der Grundplatte vom Untergrund ist erforderlich, um eine Vibrationsplatte als „selbstgehend“ bezeichnen zu können [9]. Die Arbeitsgeschwindigkeit beträgt bei herkömmlichen Handgeräten bis zu 25 m/min. Die Grundplatte ist gekrümmt und das Eigengewicht des Gerätes liegt zwischen 70 und 800 kg [22].

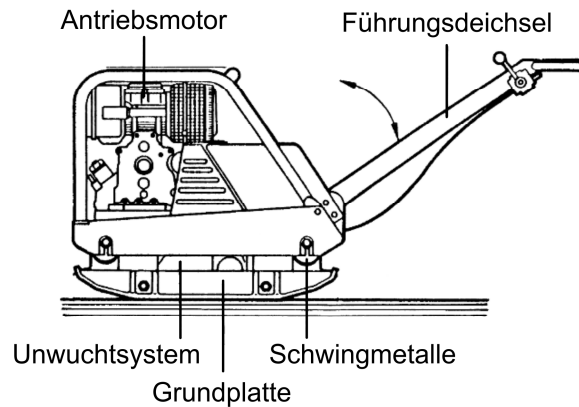


Abbildung 4.5: Rüttelplatte - Handgerät [22]

Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist die Kopplung einer oder mehrerer Vibrationsplatten an ein Trägergerät wie beispielsweise einen Grader oder einen Lastkraftwagen. Der Vorteil besteht im Vergleich zu einem Handgerät in der komfortableren Bedienung. Die Verwendung mehrerer Rüttelplatten nebeneinander ermöglicht aufgrund der größeren Arbeitsbreite Zeit- und Personaleinsparungen [33].

Das Prinzip der dynamischen Vibrationsverdichtung wurde bereits in Abschnitt 4.1 erläutert. Durch den Unwuchterreger der Rüttelplatte werden dynamische Bewegungen erzeugt. Die Eintragung dieser dynamischen Schwingungen in den Boden erfolgt über die Grundplatte. Mit dem periodischen Abheben können Verdichtungsschläge in den Boden eingebracht werden. Das Abheben resultiert aus den Zentrifugalkräften, die größer als das Eigengewicht des Gerätes sind. Aus der hervorgerufenen Umlagerung der Bodenkörner resultiert die Bodenverdichtung [5], [22].

4.2.2 Anwendungsgebiete

Eine Rüttelplatte eignet sich zur Verdichtung von nicht bindigen Böden. Werden bindige Böden verdichtet, kann möglicherweise aufgrund der Kohäsion keine Kornumlagerung stattfinden. Ferner besteht die Gefahr, dass sich die Grundplatte bei höherem Wassergehalt am Untergrund festsaugt. Soll eine Felsverdichtung durchgeführt werden, sind Vibrationsplatten mit besonders hohem Betriebsgewicht erforderlich [22].

Die Vibrationsplatte findet in verschiedensten Bereichen Anwendung. Insbesondere kleinere Flächen und beengte Platzverhältnisse sprechen für deren Verwendung. Zu den Einsatzgebieten zählen daher überschaubare Flächen im Wege-, Landschafts- und Straßenbau, Rohrleitungs- und Kabelbaustellen, das Verdichten von Hinterfüllungen und das Einrütteln von Pflastersteinen [22].

4.3 Plattenverdichter der AHM 800-R

Bei gleisgebundenen Verdichtungsarbeiten wird von *Plasser & Theurer* ein Plattenverdichter mit der Modellbezeichnung WB B 530 verwendet. Dieser wird von der Firma *Wimmer Hartstahl Gesellschaft m.b.H. & Co. KG* erzeugt und bei allen AHM-Unterbausanierungsarbeiten eingesetzt. Die

nachfolgende Tabelle 4.2 zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten geometrischen Abmessungen und Maschinendaten.

Tabelle 4.2: Geometrische Abmessungen und Maschinendaten des Plattenverdichters WB B 530 der Firma Wimmer [42]

Geometrische Abmessungen	
Höhe	0,380 m
Länge Grundplatte	0,635 m
Breite Grundplatte	1,000 m
Grundfläche	0,635 m ²
Maschinendaten	
Masse (Eigengewicht)	650 kg
Frequenz	43,3 Hz
Zentrifugalkraft	52 kN

Das Unterbausanierungsverfahren der AHM erfordert ein Verdichtungsgerät mit geringer Höhe, da die Verdichtungsarbeiten bei angehobenem Gleisrost durchgeführt werden. Mit lediglich 38 cm Höhe eignet sich der Plattenverdichter WB B 530 für diese Aufgabe. Die Plattenverdichter sind über ein Gelenk mit dem Führungsbalken an der AHM verbunden. Durch diese Konstruktion kann ein konstanter Anpressdruck auf das zu verdichtende Material aufgebracht werden [6].

4.4 Anbauverdichter

Bei herkömmlichen Rüttel- oder Vibrationsplatten geht die Verdichtungswirkung ausschließlich von den Schwingungen und Schlägen, welche vom Erregersystem erzeugt werden, aus. Ebenso gibt es auch Anbauvibrationsplatten, bei denen durch das Trägergerät ein normal zur Verdichtungsebene wirkender Druck aufgebracht wird. Literatur dazu ist nur begrenzt vorhanden und die Bezeichnung „Anbauverdichter“ wurde selbst gewählt.

1975 schrieb *Pösch* [33] von interessanten neuen Entwicklungen, bei denen Vibrationsplatten mit einem Anbaugerät an einen Hydraulikbagger montiert werden. Durch diese Kombination kann ein abwärts gerichteter Druck während der Vibrationsverdichtung erzeugt werden.

Der Anbauverdichter, wie er von *Nohlen* [27] beschrieben wird, besteht wie das davor erwähnte Verdichtungsgerät aus einer Grundplatte, die mit einem Unwuchterreger in Schwingungen versetzt wird, und einem Bagger, der die Führung dieser Rüttelplatte übernimmt. Hingegen wird die Rüttelplatte während des Verdichtens nicht vom Trägergerät horizontal bewegt, sondern zur Verdichtung an einer Stelle für 6 bis 15 Sekunden aufgesetzt und anschließend umgesetzt. Durch die hohe Auflast arbeiten Anbauverdichter nicht im Sprungbetrieb. Das Verdichtungsprinzip unterscheidet sich daher grundlegend von dem einer gängigen per Hand geführten Vibrationsplatte. Die Tiefenwirkung wird aufgrund der hohen statischen Auflast, welche variiert werden kann, vergrößert. Die

hohen Fliehkräfte und die große Antriebsleistung des Baggers führen ebenso zu einer großen Tiefenwirkung. Der Anbauverdichter ist insbesondere bei Rohrleitungs-, Kanal- und Straßenbaustellen verbreitet, da ein mit einer Schnellwechseleinrichtung ausgestatteter Hydraulikbagger sowohl Material einbringen als auch diesen anschließend verdichten kann [27].

Der „Roof Compactor“, welcher zur Verdichtung einer unterirdischen Deponieanlage verwendet wurde, besteht ebenfalls aus einer auf einem Hydraulikbagger montierten Vibrationsplatte. Dieses Gerät stellt eine kleinere, mit gebogener Grundplatte ausgestattete Variante des soeben beschriebenen Anbauverdichters dar. Im Zuge des von Adam [2] durchgeführten Projektes wurden zum Verdichtungsverhalten des Roof Compactors numerische Simulationen durchgeführt.

4.5 Verdichtungskontrollen

Die Qualität der Verdichtung wird bei Unterbausanierungsarbeiten der AHM über den Verformungsmodul und den Verdichtungsgrad festgestellt. Bestimmt man den Verformungsmodul, ist zu beachten, dass dieser auch von den Eigenschaften des Untergrunds unter der zu verdichtenden Schicht abhängig ist. Dieser Einfluss folgt aus der Tiefenwirkung der Versuchsmethode. Dieses Kapitel beschreibt verschiedene gebräuchliche Methoden, mit denen die Verdichtungskontrolle möglich ist. Die Anforderungen an den Verdichtungsgrad und den Verformungsmodul einer ungebundenen Tragschicht bei der Unterbausanierung mit der AHM sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen punktuellen und flächendeckenden Verdichtungskontrollen. Bei der konventionellen, punktuellen Prüfmethode wird an ausgewählten Stellen eine Verdichtungskontrolle durchgeführt. Ein lückenloser Verdichtungsnachweis ist nicht möglich. Die flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle hingegen dokumentiert den Verdichtungserfolg während der Verdichtungsarbeiten. Eine genauere Beschreibung dazu findet sich in Unterkapitel 4.5.3.

Die punktuelle Verdichtungskontrolle differenziert zwischen dem direkten und indirekten Prüfverfahren. Die Dichtebestimmung mitsamt der Ermittlung des Verdichtungsgrades entspricht einer direkten Verdichtungskontrolle (siehe Abschnitt 4.5.1). Zu den indirekten Prüfverfahren zählen die Druck- oder Rammsondierung, die Nivellierung und die Lastplattenversuche. Mit dem statischen Lastplattenversuch lassen sich die Verformungsmoduln E_{v1} und E_{v2} bestimmen. Der dynamische Lastplattenversuch liefert den dynamischen Verformungsmodul E_{vd} . Diese Methode wird aufgrund der praktikablen Handhabung und der sofort gewonnenen Versuchsergebnisse sehr häufig verwendet und wird in Abschnitt 4.5.2 näher erläutert.

4.5.1 Dichtebestimmung und Proctorversuch

Der Verdichtungsgrad D_{pr} gibt Auskunft über die Qualität der Verdichtung und kann aus diesem Grund als Kontrollwert herangezogen werden. Der Verdichtungsgrad errechnet sich, wie in Gleichung (4.1) formuliert, aus dem Vergleich der Trockendichte ρ_d des geprüften Bodens mit der Proctordichte ρ_{pr} .

$$D_{pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{pr}} \cdot 100 [\%] \quad (4.1)$$

Die Trockendichte lässt sich aus der Trockenmasse bezogen auf das Volumen der untersuchten Bodenprobe ermitteln. Die Trockenmasse erhält man durch eine Ofentrocknung der Bodenprobe bei 105°C und anschließend abwiegen (siehe ÖNORM B 4410: 1974 [29]). Die Schwierigkeit besteht in der Feststellung des Volumens der Bodenprobe. Für die Volumenbestimmung stehen gemäß ÖNORM B 4414-2: 1979 [31] folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Ausstechzylinder-Verfahren (nur bei bindigen Böden möglich)
- Ersatzverfahren:
 - Sandersatz-Verfahren
 - Ballon-Verfahren
 - Flüssigkeitsersatz-Verfahren
 - Gipsersatz-Verfahren
 - Schürfgruben-Verfahren
 - Schüttkörper-Verfahren (nur bei nicht bindigen Böden möglich)

Zusätzlich kann die Trockendichte auch durch Verwendung der Isotopsonde bestimmt werden. Das Messprinzip dieses radiometrischen Verfahrens beruht auf der Adsorption von Gamma-Strahlen. Aus der Intensität der radioaktiven Strahlung kann eine Beziehung zur Stoffdichte hergestellt werden.

Der Proctorversuch dient zur Ermittlung der Verdichtungsfähigkeit bzw. Verdichtbarkeit des Bodens. Der Laborversuch ist in ÖNORM B 4418: 2012 [32] genormt. Der Proctorversuch besteht aus der Prüfung eines Bodens in mehreren Einzelversuchen mit jeweils unterschiedlichem Wassergehalt. Für jeden Versuch wird die Bodenprobe lagenweise in einen genormten Stahlzylinder, den sogenannten Proctortopf, eingebracht. Die Verdichtung erfolgt mit genau definierten Verdichtungsgeräten, wobei ein Fallgewicht an einer Führungsstange die Verdichtungsenergie einbringt. Die Verdichtungsenergie beträgt beim Standard-Proctorversuch 0,6 MN/m² und beim modifizierten Versuch 2,65 MN/m². Für jeden Einzelversuch wird die Dichte der feuchten Probe und der Wassergehalt bestimmt. Das Ergebnis des Proctorversuches ist ein Diagramm, in dem abhängig vom Wassergehalt die jeweils erzielte Trockendichte aufgetragen ist. Die maximal erreichbare Trockendichte wird als Proctordichte ρ_{pr} und der zugehörige Wassergehalt als optimaler Wassergehalt w_{opt} bezeichnet.

4.5.2 Dynamischer Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät

Wie bereits einleitend beschrieben, ist der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät (LFG) ein indirekter Feldversuch zur Verdichtungskontrolle. Als Messergebnis erhält man den dynamischen Verformungsmodul E_{vd} des Bodens oder der Schüttlage. Als Richtlinie dient die RVS 08.03.04: 2008 [36].

Der Aufbau und die Komponenten des LFG sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Die kreisförmige, starre Lastplatte besteht aus Stahl und ihr Durchmesser beträgt 30 cm. Das Fallgewicht besitzt eine Masse von 10 kg und wird über eine Stange geführt. Mit Hilfe der Ausklinkvorrichtung am oberen Ende

der Stange wird das Fallgewicht gelöst und es trifft auf ein Feder-Dämpfer-Element. Über die Stahlplatte wird sodann ein genau definierter Belastungsstoß in den Untergrund eingetragen. Zwischen der Belastungsvorrichtung und der Stahlplatte befindet sich in Plattenmitte eine Zentrierkugel. Durch die Zentrierkugel wird gewährleistet, dass ausschließlich ein vertikal gerichteter Stoß in den Untergrund eingebracht wird und dadurch nur Druckkräfte übertragen werden. Der mittig an der Lastplatte positionierte Beschleunigungsaufnehmer zeichnet die vertikalen Beschleunigungen auf und gibt diese an das elektronische Messgerät weiter.

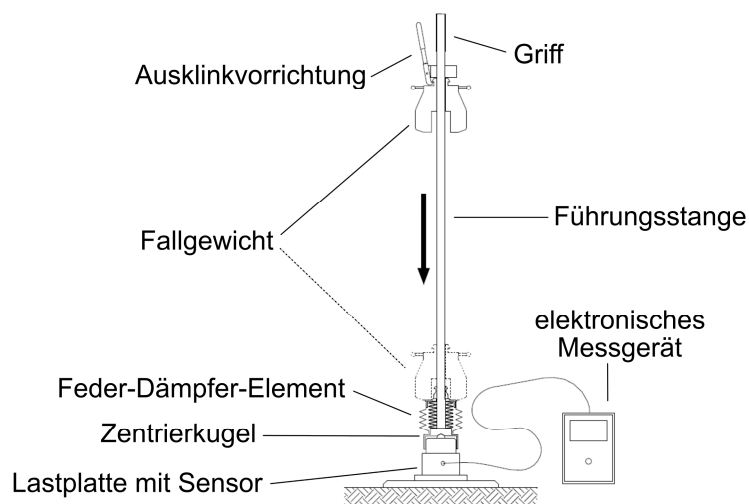


Abbildung 4.6: Aufbau und Komponenten des Leichtes Fallgewichtsgeräts [5]

Für die Durchführung eines dynamischen Lastplattenversuches sind zuerst drei Vorbelastungsstöße auszuführen. Damit wird eine satte und vollflächige Auflage der Stahlplatte gewährleistet. Sind im Planum größere Unebenheiten vorhanden, so kann für deren Ausgleich eine dünne Sandausgleichsschicht unter der Platte aufgebracht werden. Der eigentliche Versuch besteht aus drei Stößen mit dem Fallgewicht. Aus der zweifachen Integration der Beschleunigungssignale kann für jeden Belastungsstoß die Plattenverschiebung z_{max} errechnet werden. In weiterer Folge wird aus dem Mittelwert der Plattenverschiebungen der E_{vd} -Wert ermittelt [23].

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse werden zwei vereinfachende Annahmen getroffen. Einerseits erfolgt die Auswertung über die Formel des statischen Lastplattenversuches, gemäß Gleichung (4.2). Diese beruht auf einem statisch belasteten, elastischen Halbraum und berücksichtigt keine geschwindigkeitsabhängigen Terme oder Massenträgheitskräfte. Andererseits wird angenommen, dass die maximal auftretende Bodenspannung $\Delta\sigma$ konstant ist. Dieser Ansatz begründet sich in der Auslegung des LFG. Gleichung (4.2) beschreibt die Ermittlung des Verformungsmoduls über den statischen Lastplattenversuch. Durch Einsetzen der konstanten Bodenspannung $\Delta\sigma = 0,10 \text{ MN/m}^2$ und des Radius der Lastplatte $r = 0,15 \text{ m}$ ergibt sich Gleichung (4.3) (nicht dimensionsrein!). Demzufolge kann der dynamische Verformungsmodul E_{vd} ausschließlich über die maximale Verschiebung z_{max} (gemittelt aus den drei Belastungsstößen) errechnet werden [23].

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta z} \quad (4.2)$$

$$E_{vd} \left[\text{MN/m}^2 \right] = \frac{22,5}{z_{\max} \left[\text{mm} \right]} \quad (4.3)$$

Die Versuchsdurchführung gestaltet sich besonders einfach und dauert nur wenige Minuten. Das Gerät kann problemlos von einer Person bedient und auf der Baustelle per Hand transportiert werden. Ein großer Vorteil liegt in der Verwendbarkeit des LFG unter beengten Platzverhältnissen wie beispielsweise in Schurfen oder Rohleitungsgräben. Die Versuche können während dem Baubetrieb stattfinden. Aufgrund des raschen Ablaufs einer Messung und der sofortigen Auswertung der Versuchsergebnisse können mit akzeptablem Aufwand sehr viele Versuche durchgeführt werden.

4.5.3 Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle

Die Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) ermöglicht den Verdichtungsnachweis am gesamten Baufeld und nicht nur an ausgewählten Stellen. Dieses Verfahren wurde in den 1980er Jahren für Vibrationswalzen entwickelt. Seither wurde sehr viel Forschungsarbeit rund um die FDVK betrieben und mittlerweile ist diese Methode der Verdichtungskontrolle auch für Oszillationswalzen anwendbar. Die Walze übernimmt zusätzlich zur Verdichtung die Aufgabe eines Mess- und Dokumentationsgerätes und realisiert dadurch eine arbeitsintegrierte, kontinuierliche Kontrolle des Verdichtungserfolges. In Österreich ist der kontinuierlich walzenintegrierte Verdichtungsnachweis in der RVS 08.03.02: 1999 [35] geregelt.

Das Messprinzip besteht in der Analyse der Bandagenbeschleunigung. Die Beschleunigungsaufnehmer sind auf der Lagerschale der Bandage der Walze montiert. Wird die angehobene Bandage dynamisch angeregt, folgt das Bewegungsverhalten einer Sinusschwingung. Besteht allerdings ein Kontakt zum Untergrund sind die Sinussignale verzerrt und nicht mehr harmonisch. Werden während eines Verdichtungsvorganges sämtliche Maschinen- und Prozessparameter konstant gehalten, gehen Änderungen der Untergrundverhältnisse mit Änderungen im Schwingungsverhalten der Bandage einher [1].

Die wesentlichen Komponenten einer Walze mit FDVK-System zeigt Abbildung 4.7. Der Sensor zur Aufnahme der Beschleunigungssignale befindet sich an der Bandagenlagerung. Die Prozesseinheit ermittelt aus den Beschleunigungen einen Messwert. Dieser wird in der Fahrerkabine angezeigt und manipulationssicher gespeichert. Um die Messwerte örtlich zuordnen zu können, besitzen die Walzen einen Wegsensor oder sind mit einem GPS-System ausgestattet.

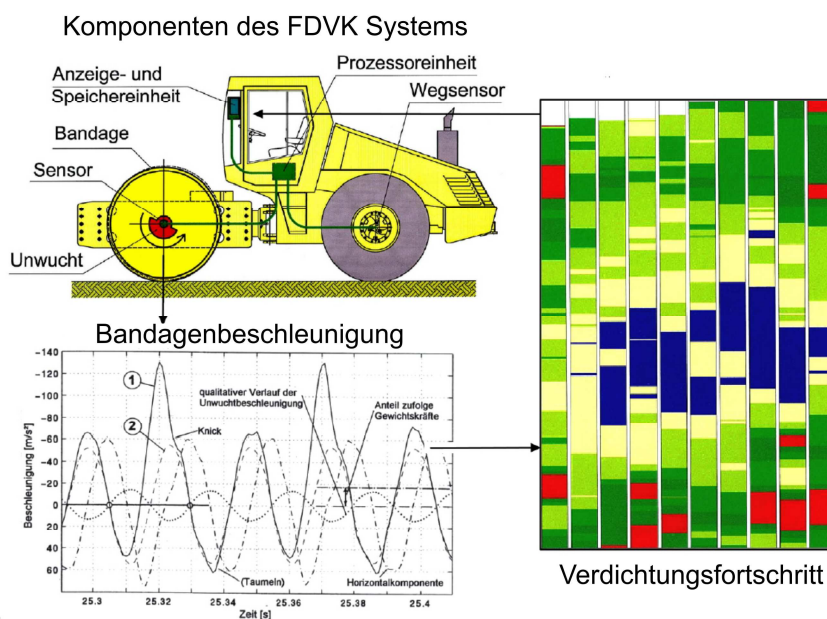


Abbildung 4.7: Prinzip eines FDVK-Systems; oben: Komponenten einer Vibrationswalze mit FDVK-System; unten: gemessene Bandagenbeschleunigung; rechts: Darstellung des Verdichtungsfortschrittes auf dem Display [5]

Der Verdichtungsfortschritt (siehe Abbildung 4.7) kann visuell für das gesamte Baufeld dargestellt werden, sodass der Walzenfahrer während den Verdichtungsarbeiten Kenntnis über den Untergrundzustand hat. Es kann zwischen verschiedenen FDVK-Systemen unterschieden werden [16]:

- Compactometer – CMV: Der Messwert wird abgeleitet aus dem Verhältnis von Vertikalbeschleunigungsamplitude bei der ersten harmonischen Frequenz zur Grundanregungsfrequenz. Die Ermittlung des CMV-Wertes erfolgt im Frequenzbereich.
- Terrameter – OMEGA: Der Messwert wird abgeleitet aus dem Zusammenhang der vertikalen Schwingwege der Bandage und den Bodenkontaktkräften über zwei Erregerzyklen und entspricht der umschriebenen Fläche dieses Arbeitsdiagramms. Die Ermittlung des OMEGA-Wertes erfolgt im Zeitbereich.
- Terrameter – E_{VIB} : Der Messwert wird abgeleitet aus dem Zusammenhang zwischen den vertikalen Schwingwegen der Bandage und den Bodenkontaktkräften und entspricht der Steigung der Arbeitslinie während der Belastungsphase. Die Ermittlung des E_{VIB} -Wertes erfolgt im Zeitbereich.
- ACE – k_B : Der Messwert wird abgeleitet aus dem Zusammenhang der vertikalen Schwingwege der Bandage und den Bodenkontaktkräften, wobei die Amplitude des Schwingweges und die Phasenverschiebung zwischen Anregungskraft und Schwingweg in die Formel einfließen. Die Ermittlung des k_B -Wertes erfolgt im Zeitbereich.

Die FDVK-Messwerte sind keine bodenphysikalischen Kenngrößen, sondern ausschließlich Relativwerte. Um einen Vergleich zu den konventionellen Prüfmethode (beispielsweise Dynamischer Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät) herstellen zu können, ist eine Kalibrierung

zwingend erforderlich. Die Kalibrierung hat bei jeder Baustelle sowie bei allen Kombinationen von Walzen und Böden zu erfolgen [13].

Die Darstellung der Beziehung zwischen dem vertikalen Schwingweg und der Bodenkontaktkraft wird als Arbeitsdiagramm bezeichnet. Abbildung 4.8 zeigt ein derartiges Arbeitsdiagramm, wobei die Bodenkontaktkraft auf der Ordinate und der Schwingweg auf der Abszisse aufgetragen wird. Die aufgetragene Arbeitslinie kann in einen Belastungs- und Entlastungspfad aufgespalten werden. Die Fläche der eingeschlossenen Kurve entspricht der in den Boden eingebrachten Verdichtungsenergie [1].

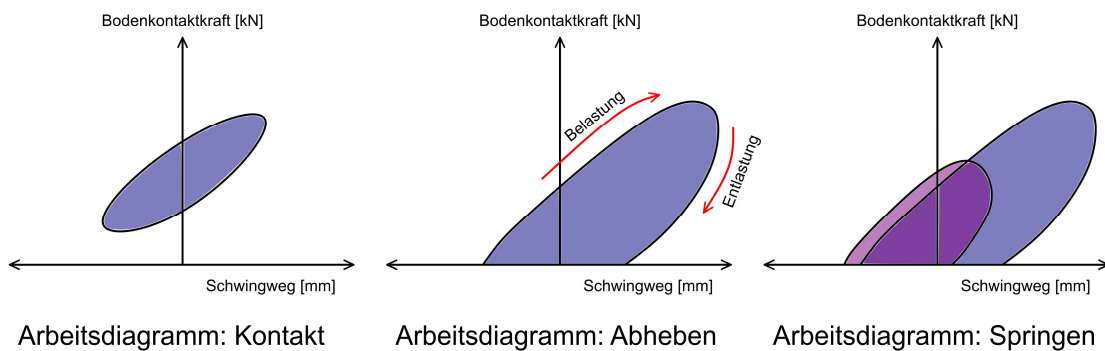


Abbildung 4.8: Arbeitsdiagramme; adaptiert [1]

Bei Vibrationswalzen werden stets zwei Unwuchtdrehungen betrachtet, um einen möglicherweise vorhandenen Sprungbetrieb identifizieren zu können. In diesem Fall wäre die von der Be- und Entlastungskurve umschlossene Fläche bei jeder zweiten Unwuchtdrehung wesentlich kleiner. Im Arbeitsdiagramm zeigt sich der Betriebszustand Kontakt im Vergleich zum Abheben durch keinen Schnittpunkt der Arbeitslinie mit der Abszisse. Aus der Steigung des Belastungspfades können Rückschlüsse auf die Bodensteifigkeit gezogen werden. Je höher die Bodensteifigkeit, desto steiler ist der Belastungspfad der Arbeitslinie geneigt [1].

Durch die Aufzeichnung der FDVK-Messwerte ist der Verdichtungsstatus bzw. Verdichtungserfolg an jeder Stelle abrufbar. Inhomogenitäten und Schwachstellen können schon während den Verdichtungsarbeiten festgestellt werden und eine entsprechende Reaktion darauf ist möglich. Eine Unter- oder Überverdichtung kann leichter vermieden werden. Die FDVK ermöglicht eine bessere Verdichtungsqualität und einen optimierten Verdichtungsablauf. Ein Nachteil besteht beispielsweise darin, dass die FDVK-Messwerte keine Bodenkenngrößen darstellen, eine Kalibrierung immer nötig ist und die Messwerte untereinander nicht vergleichbar sind.

Walzen mit FDVK-Systemen werden vor allem im Verkehrswegebau und Dammbau verwendet, darüber hinaus finden sie auch häufig Anwendung im Wasserbau und Deponiebau.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

5 Stand der Forschung

Das vorliegende Kapitel befasst sich im ersten Teil mit dem Stand der Forschung zum Bewegungsverhalten und zu den Betriebszustände von Vibrationsplatten, Anbauverdichtern und ähnlichen Geräten. Zur Dynamik von Rüttelplatten liegen von *Anderegg* [9], [10], [11] einige Publikationen vor. Der zweite Teil dieses Kapitels gibt einen Überblick über das bereits abgeschlossene Forschungsprojekt *Technische Weiterentwicklung der AHM* [6].

5.1 Bewegungsverhalten und Betriebszustände von Vibrationsplatten und Anbauverdichtern

In der Publikation *Die Dynamik von Vibrationsplatten* [9] werden Versuche zum Vergleich einer Vibrationsplatte mit einem Walzenzug vorgestellt. Die wichtigsten Inhalte daraus sowie Angaben zum Bewegungsverhalten von Vibrationsplatten werden nachfolgend beschrieben. Eng damit verbunden sind die Betriebszustände, welche sowohl für die Vibrationsplatte als auch für den Anbauverdichter und den Roof-Compactor angegeben werden.

5.1.1 Vergleich von Vibrationsplatte und Walzenzug

Der Bericht von *Anderegg* [9] beschreibt den Vergleich einer Vibrationsplatte AVH 6030 mit einem Walzenzug AC 110, beides Geräte der Firma *Ammann*. Für Rückschlüsse auf die Verdichtung wurde das Bewegungsverhalten der Bandage der Walze und analog dazu das Bewegungsverhalten des Unterteils der Vibrationsplatte analysiert. Es wurde festgestellt, dass die Dynamik zur Eintragung der Verdichtungsenergie in den Boden zwischen dem Kleingerät, also der Vibrationsplatte, und dem Großgerät, dem Walzenzug, ähnlich ist.

Die Vibrationsplatte schlägt nicht zwangsweise bei jeder Unwuchtumdrehung auf den Boden auf, wodurch höhere Schlagkräfte entstehen. Die Verdichtungsleistung einer Vibrationsplatte ist sehr hoch und die eingetragenen dynamischen Kräfte können im Maximalfall das 13-fache des Eigengewichts erreichen. Bei der Walzenverdichtung liegen die pro Schwingungsperiode auftretenden Kontaktkräfte in der Größenordnung des 2,5-fachen des Eigengewichts. Bezieht man diese Werte auf die Maschinenbreite, kann von vergleichbaren dynamischen Krafteinträgen gesprochen werden. Bezogen auf die Masse der Geräte, weist die untersuchte Vibrationsplatte eine fünffach höhere Verdichtungsleistung als der Walzenzug auf [9].

Die Messergebnisse der von *Anderegg* [9] durchgeführten Versuche zeigen einen Unterschied in der Intensität und Ausnutzung der nichtlineareren Schwingungen. Bei der Walzenverdichtung bleibt der Rahmen in Ruhe, der Oberteil einer Vibrationsplatte ist an der Bodenverdichtung beteiligt.

5.1.2 Bewegungsverhalten der Vibrationsplatte

Die Versuche von *Anderegg* [9] haben gezeigt, dass der Ober- und Unterwagen, welche nicht starr miteinander verbunden sind, am Bewegungsverhalten der Vibrationsplatte beteiligt sind. Für eine optimale Einleitung der dynamischen Kräfte, sind die Massenverhältnisse und Dämpfungseigenschaften der Vibrationsplatte gut aufeinander abzustimmen.

Subharmonische Schwingungen

Um hohe dynamische Kräfte in den Boden einzuleiten, erfolgen laut *Anderegg* [11] idealerweise ein bis drei Unwuchtumdrehungen ohne Bodenkontakt in der Luft. Sodann entsteht durch diese subharmonischen Schwingungen eine höhere Schlagkraft und es werden beim Auftreffen des Unterbaus auf den Untergrund wesentlich größere Bodenkontaktkräfte als bei anderen Verdichtungsverfahren übertragen.

Autoparametrische Resonanz

Anderegg [11] berichtet hinsichtlich der subharmonischen Schwingungen von der autoparametrischen Resonanz (siehe Abbildung 5.1). Eine parametrische Resonanz beschreibt ein dynamisches System, dessen Anregung durch eine periodische Parameteränderung im System erfolgt. Zudem kann durch eine geeignete Veränderung eines Parameters das System in Resonanz geraten. Die autoparametrische Resonanz einer Vibrationsplatte kann die maximale Verdichtungskraft um bis zu 400% gegenüber der herkömmlichen Methode vergrößern.

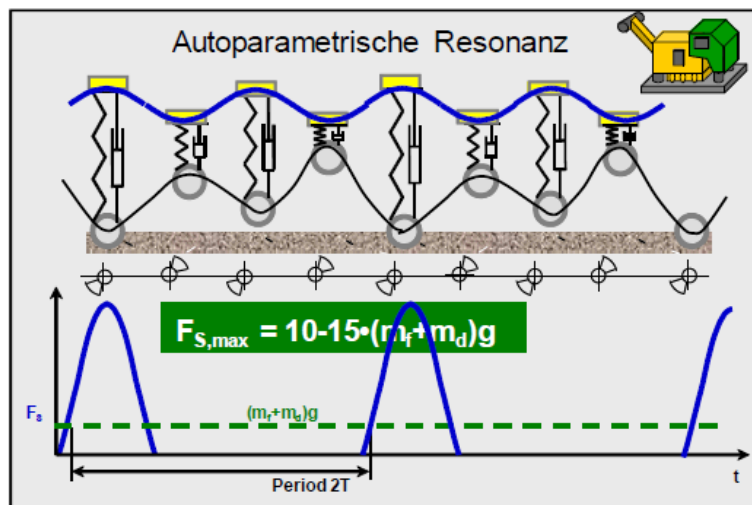


Abbildung 5.1: Autoparametrische Resonanz [11]

Nichtlineare Schwingungen

Für die Fortbewegung der Vibrationsplatte ist ein regelmäßiges Abheben erforderlich. Unter den nichtlinearen Schwingungen bzw. der nichtlinearen Dynamik versteht man ein dynamisches System, bei dem in der Differentialgleichung zur Beschreibung der Zusammenhänge nichtlineare Funktionen auftreten. Als Maß für die zu erwartende Nichtlinearität verwendet *Anderegg* [11] den Quotient aus Zentrifugalkraft und Eigengewicht. Je höher diese dimensionslose Größe ist, desto stärker ist dieser Publikation zufolge die nichtlineare Wirkungsweise. Durch die Kenntnis der nichtlinearen

Dynamik, ist das Verdichtungsverhalten der Vibrationsplatten besser verständlich und eine Optimierung der Verdichtungswirkung möglich. Die Verbesserung zielt auf einen maximalen Energietransfer zwischen dem Verdichtungsgerät und dem Untergrund ab. Allerdings weist *Anderegg* [11] darauf hin, dass ein leistungsfähiges Mess- und Regelungssystem erforderlich ist, um ein stabiles Schwingungsverhalten und kein chaotisches Bewegungsverhalten zu erzeugen. Chaotische Betriebszustände können durch die Anpassung der Erregerfrequenz vermieden werden. Mit der Verringerung der Erregerfrequenz, geht dem Forschungsbericht [11] zufolge eine Reduktion der subharmonischen Schwingungen einher.

5.1.3 Betriebszustände der Vibrationsplatten

Früher wurden zur Unterscheidung der Arbeitsweise von Oberflächenverdichtungsgeräten die Begriffe Auflastrüttler und Sprungrüttler verwendet. Die Verdichtung eines Auflastrüttlers findet unter ständigem Bodenkontakt statt. Die Verdichtungswirkung von Sprungrüttler entspricht jener der heute verwendeten Vibrationsplatten. Erst 1988 wurde von *Kröber* [24] der Betriebszustand „Abheben“ definiert.

Eine Einstufung verschiedener Walzen- und Vibrationsplattentypen anhand der im Normalfall vorherrschenden Betriebszustände gibt *Anderegg* [10]. Vibrationsplatten arbeiten zumeist im Sprungbetrieb und erreichen bei zunehmender Bodensteifigkeit ein chaotisches Bewegungsverhalten. Das chaotische Verhalten während der Verdichtungsarbeiten ist, wie bei den Walzen, unerwünscht. Der Grund liegt in der erschwerten Gerätebedienung und der unzuverlässigen Untergrundverdichtung. Das Fortbewegen von Vibrationsplatten ermöglichen die Betriebszustände Abheben und Springen.

5.1.4 Betriebszustände des Anbauverdichters

Eine Vibrationsplatte und ein Anbauverdichter unterscheiden sich in deren Führung und Fortbewegung sowie in der Verdichtungswirkung. Der von *Nohlen* [27] beschriebene Anbauverdichter wird an die gewünschte Stelle versetzt und die Verdichtung erfolgt unter Aufbringung einer zusätzlichen statischen Auflast. Bei der Verwendung eines Anbauverdichters können *Nohlen* zufolge Geräteparameter wie das Unwuchtmoment, die Anregungsfrequenz oder die statische Auflast an die jeweiligen Baustellenbedingungen und Verdichtungsanforderungen angepasst werden.

Die Betriebszustände einer Vibrationsplatten können in kontinuierlicher Kontakt, Abheben, Springen und chaotisches Verhalten eingeteilt werden. Der kontinuierliche Kontakt, auch als Auflastbetrieb bezeichnet, ist gekennzeichnet durch einen ständigen Kontakt der Grundplatte mit dem Untergrund. Der Übergang zum Abheben kann über die Analyse der Beschleunigungssignale und die Auswertung der Bodenkontaktkraft festgestellt werden. Subharmonische Schwingungen treten im Sprungbetrieb auf. Findet ein chaotisches Bewegungsverhalten statt, kann ein Verdichtungserfolg nicht gewährleistet werden und es sind Anpassungen an den Betriebsparametern vorzunehmen. Bei der Messung und Analyse der Beschleunigungssignale der Anbauverdichter berichtet *Nohlen* [27] von keinen subharmonischen Schwingungen und somit keinem Sprungbetrieb.

5.1.5 Betriebszustände des „Roof-Compactors“

Der „Roof-Compactor“ wurde bereits in Kapitel 4.4 vorgestellt. Er ist eine kleinere Variante des Anbauverdichters mit einer gekrümmten Grundplatte. Im Zuge der numerischen Simulationen von *Adam* [2] wurden der (statische) Anpressdruck und die Bodensteifigkeiten variiert und daraus die Verdichtungswirkung und die Betriebszustände analysiert.

Beim Roof-Compactor treten dieselben Betriebszustände wie bei Vibrationsplatten und Anbauverdichtern auf: Kontakt, Abheben, Springen und Chaos. Welcher Betriebszustand stattfindet, ist vor allem vom (statischen) Anpressdruck, der ausgehend vom Trägergerät über die gekrümmte Grundplatte auf den Untergrund aufgebracht wird, abhängig. Den Einfluss der Untergrundsteifigkeit auf den Betriebszustand beschreibt *Adam* [2] als deutlich geringer. Die numerischen Simulationen dieser Publikation haben gezeigt, dass für eine zuverlässige und effektive Verdichtung unbedingt ein Anpressdruck aufgebracht werden muss.

Je höher der Anpressdruck von *Adam* [2] gewählt wurde, desto stabiler erfolgt die Verdichtung und es gingen nur mehr die Betriebszustände Kontakt oder Abheben vorstatten. Eine geringe Untergrundsteifigkeit führt ebenfalls zu einem kontinuierlichen Kontaktbetrieb. Die im Zuge dessen eingebrachten Kräfte sind kleiner, aber gleichmäßig verteilt. *Adam* [2] stellte mit der Aufbringung mittlerer Anpressdrücke einen periodischen Kontaktverlust und in weiterer Folge stoßartige hohe Verdichtungsschläge fest. Die Größe der eingebrachten Verdichtungsschläge nimmt mit der Untergrundsteifigkeit zu. Ein kleiner Anpressdruck und eine höhere Untergrundsteifigkeit können den Betriebszustand Springen hervorrufen.

Mit der Größe des (statischen) Anpressdruckes kann die Tiefenwirkung der Verdichtung gesteuert werden. Je höher der Druck, desto größere Tiefen werden während der Verdichtung angesprochen. *Adam* [2] vermittelt, dass die Betriebszustände maßgeblich vom (statischen) Anpressdruck abhängen. Zusätzlich haben die Geländeneigung des zu verdichtenden Materials und die Form der Grundplatten einen Einfluss auf die Verdichtungswirkung.

5.2 Bisherige Forschungsarbeiten an der TU Wien

Das *Institut für Geotechnik der TU Wien* veröffentlichte 2018 den Forschungsbericht *Technischen Weiterentwicklung der AHM* [6]. Dieser wurde in Zusammenarbeit mit der *Swietelsky Baugesellschaft m.b.H.* und im Zuge des FFG-Forschungsprojektes „Maschinelle Tragschichtvergütung im Bahnbau“ erstellt. Für die gegenständliche Arbeit ist der Forschungsbericht als Vorprojekt oder Vorversuch zu betrachten. Die im Kapitel 6 beschriebene mechanische Modellierung der Interaktion des Plattenverdichters mit dem Boden und die im Kapitel 7 ausgeführten Feldversuche mit dem Plattenverdichter bauen auf den Erkenntnissen der *Technischen Weiterentwicklung der AHM* auf.

Im Endbericht werden Untersuchungsergebnisse aus Labor- und Feldversuchen und Beobachtungen, die von 2016 bis 2018 im Zuge der Begleitung von AHM-Baustellen und bei separat durchgeführten Verdichtungsversuchen gewonnen wurden, erläutert. Ein Hauptaugenmerk des Forschungsberichtes liegt auf dem verwendeten Tragschichtmaterial, dessen Eigenschaften und

Verdichtungsfähigkeit. Ein weiterer Fokus wurde auf die Beschreibung des Bewegungsverhaltens der Plattenverdichter gesetzt.

Im gegenständlichen Unterkapitel werden die experimentellen Untersuchungen überblicksmäßig erläutert. Abschnitt 5.2.1 beschäftigt sich mit der Voruntersuchung und Abschnitt 5.2.2 mit der Grundsatzuntersuchung. Abschließend fasst Abschnitt 5.2.3 alle gewonnenen Erkenntnisse im Hinblick auf eine Optimierung der Verdichtung und die Beschreibung des Bewegungsverhaltens zusammen.

5.2.1 Experimentelle Voruntersuchungen

Die Messdaten zur Auswertung der Ergebnisse der experimentellen Voruntersuchungen wurden während dem Baustellenbetrieb der AHM aufgenommen. Die Messtechnik befand sich im Zuge der Forschungsarbeiten [6] am äußerst rechten der vier in der Mitte angeordneten Plattenverdichter. Dieser Plattenverdichter wurde mit zwei triaxialen Beschleunigungsaufnehmern an der Grundplatte sowie einem am Rahmen instrumentiert. Zu Beginn erfolgte eine Nullmessung bei der der Plattenverdichter angehoben und freischwingend ohne Interaktion mit dem Boden betrieben wurden. Weiters wurden Messdaten während dem normalen Baustellenbetrieb der AHM in Gerling und Kraubath an der Mur aufgezeichnet.

Für Rückschlüsse auf das Schwingungsverhalten wurden von Adam [6] die gemessenen Beschleunigungen zweifach integriert und folgend die Schwingwege berechnet. Das Bewegungsverhalten in vertikaler Ebene in Fahrtrichtung ohne Bodenkontakt, zeigt gleichmäßige und reproduzierbare Schwingwege der Platte. Im Gegensatz dazu treten beim Verdichtungsvorgang ungleichmäßige Schwingungen auf. In Abbildung 5.2 wird der Vergleich zwischen den Schwingwegen der Nullmessung und der Baustellenmessung aus dem Forschungsbericht [6] veranschaulicht. Die verdrehte elliptische Bewegung der einzelnen Messpunkte resultiert aus der exzentrischen Anordnung der Positionssensoren im vorderen (P2) und hinteren (P1) Bereich der Grundplatte. Die Schwingwege des Rahmens (R1) sind bei der Nullmessung deutlich kleiner als jene der Grundplatte.

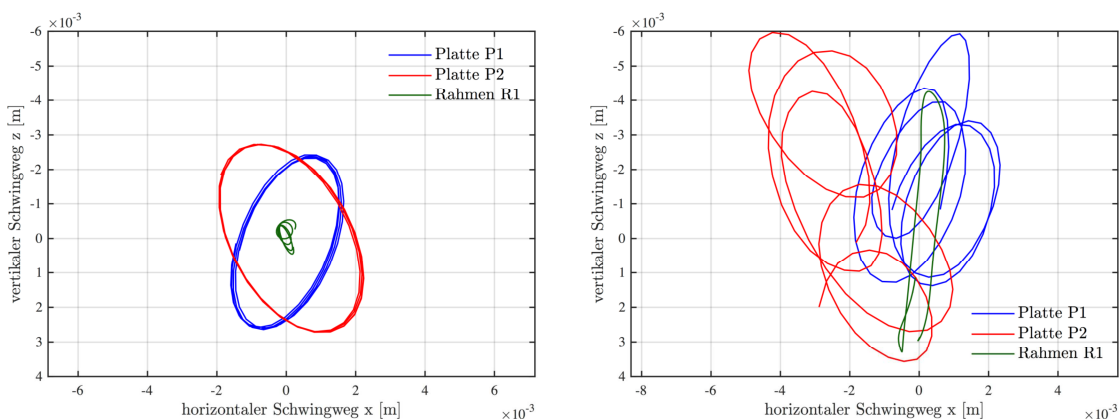


Abbildung 5.2: Horizontale und vertikale Schwingwege des Plattenverdichters; links: Nullmessung; rechts: Baustellenmessung [6]

Im Forschungsbericht [6] sind die direkt gemessenen vertikalen Beschleunigungen der Platte über die Zeit dargestellt. Während der Nullmessung stellt sich wiederum ein besonders gleichmäßiger, sinusähnlicher Verlauf ein. Die Beschleunigungsamplituden des Rahmens sind deutlich geringer als jene der Platte, wodurch *Adam* [6] auf eine gute dynamische Entkopplung zwischen Rahmen und Platte schließt. Bei der Baustellenmessung zeigen sich mit ungleichmäßigen Verzerrungen behaftete Vertikalbeschleunigungsamplituden. Die beiden Hauptgründe dafür liegen in der Interaktion der schwingenden Platte mit dem Untergrund und dem unausgewogenen Bewegungsverhalten des Plattenverdichters [6].

Bei steigender Untergrundsteifigkeit treten größere Vertikalbeschleunigungsamplituden und höhere in den Boden eingetragene Verdichtungsenergien auf. Um aus dem Bewegungsverhalten des Plattenverdichters Rückschlüsse auf die Bodensteifigkeit ziehen zu können, ist laut Forschungsbericht [6] ein gleichmäßigeres Bewegungsverhalten erforderlich. Dieses könnte durch eine ausgewogenere Abstimmung der Massenverhältnisse der schwingenden Grundplatte zur statischen Gewichtskraft erreicht werden. Einen wesentlichen Betrag dazu stellt die Masse des Rahmens dar. Aus dieser Feststellung entstanden die Überlegungen zur Grundsatzuntersuchung.

5.2.2 Experimentelle Grundsatzuntersuchungen

Die Versuche der Grundsatzuntersuchungen wurden im Rahmen der Forschungsarbeiten [6] auf einem Testfeld in Fischamend und nicht während dem laufenden Baustellenbetrieb der AHM durchgeführt. Ein Plattenverdichter wurde mit insgesamt vier Beschleunigungssensoren ausgestattet. Drei wurden an der Grundplatte montiert, einer wiederum am Rahmen. Zur Simulation der im Betrieb auftretenden Vortriebsgeschwindigkeit wurde der Plattenverdichter an einem 2-Wege-Bagger befestigt und dieser von einer Bettungsreinigungsmaschine mit etwa 25 m/h gezogen. Das Testfeld teilte sich in zwei Bereiche mit unterschiedlichen Untergrundsteifigkeiten. Nach jedem Verdichtungsübergang erfolgte ein Auflockern und Umwälzen des zu verdichtenden Tragschichtmaterials.

Zur Variation der Massenverhältnisse wurden im Zuge der Forschungsarbeiten [6] plattenförmige Zusatzgewichte von 120, 250, 390, 530 und 670 kg auf den Plattenverdichter aufgebracht, sodass eine maximale Gesamtmasse von 1365 kg erreicht wurde. Aufgrund der Aufhängung am Bagger, konnte der Plattenverdichter leicht angehoben oder frei mit der gesamten Auflast geführt werden.

Insgesamt wurden 13 messtechnisch begleitete Verdichtungsübergänge sowie Nullversuche mit angehobenem Plattenverdichter durchgeführt. Der aus den gemessenen Beschleunigungen zweifach integrierte Schwingweg verhält sich ohne Bodenkontakt bei allen aufgebrachten Zusatzmassen ähnlich. Lediglich eine minimale Vergrößerung des Schwingweges wurde von *Adam* [6] mit der Massenerhöhung im frei schwingenden Versuch verzeichnet. Bei der Verdichtungsfahrt mit einer Zusatzmasse von 120 kg wurde kein harmonisches, aber bereits ein gleichmäßigeres Bewegungsverhalten erfasst. Abbildung 5.3 zeigt den Schwingweg bei einem Zusatzgewicht von 120 kg sowie 670 kg. Die Schwingwege sind während der Verdichtung im Vergleich zur freischwingenden Platte etwa doppelt so groß. Die kleineren Schwingwege bei 670 kg Zusatzmasse (siehe Abbildung 5.3) ergeben sich aufgrund der von 40 auf etwa 22 Hz abgefallenen Erregerfrequenz und sind der Antriebseinheit geschuldet. Bei der freien Führung des Plattenverdichters mit der maximalen Zusatzmasse konnte ein Eingraben und folgend eine unebene Oberfläche beobachtet werden [6].

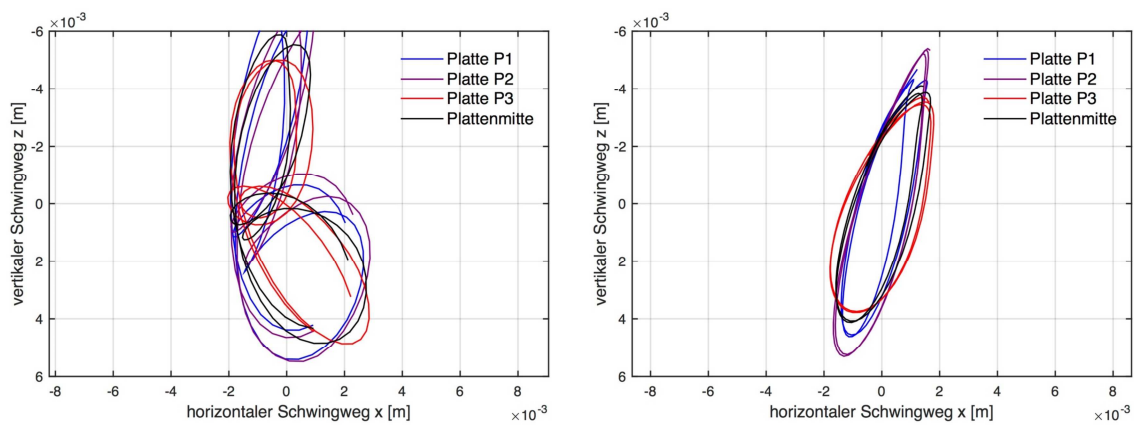


Abbildung 5.3: Horizontale und vertikale Schwingwege des Plattenverdichters; links: 120 kg Zusatzgewicht; rechts: 670 kg Zusatzgewicht [6]

Die Vertikalbeschleunigungen der Grundplatte sind während der Verdichtungsüberfahrt bereits bei 120 kg Zusatzmasse deutlich gleichmäßiger als ohne Auflast. *Adam* [6] erkennt bei der Auswertung der mittleren Vertikalbeschleunigungsamplituden die vorab bekannten Steifigkeitsunterschied des Untergrunds.

Wie bereits in der Voruntersuchung vermutet, kann von *Adam* [6] durch Aufbringen einer Zusatzmasse ein gleichmäßigeres Bewegungsverhalten erzeugt werden. Daraus folgt, dass Änderungen im Bewegungsverhalten des Plattenverdichters auf Änderungen der Untergrundverhältnisse zurückzuführen sind. Das Trägergerät ermöglicht ein Neigen, Anheben oder Andrücken des Plattenverdichters wodurch Änderungen im Bewegungsverhalten bei diesen Grundsatzversuchen im Forschungsbericht [6] nicht ausschließlich von Änderungen im Untergrund stammen.

5.2.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse der bisherigen Forschungsarbeit

Im Forschungsbericht *Technische Weiterentwicklung der AHM* [6] wurden folgende Erkenntnisse, Beobachtungsergebnisse und Gedankenansätzen publiziert:

- Eine zusätzliche statische Auflast von 120 bis 390 kg führt zu einem gleichmäßigeren Bewegungsverhalten und zu einer Optimierung der Verdichtungswirkung des Plattenverdichters. Die Verdichtungskontrolle mit der dynamischen Lastplatte verzeichnete einen deutlich besseren Verdichtungserfolg.
- Eine große Zusatzmasse über 530 bis 670 kg erschwert bzw. verhindert ein freies Fahren des Plattenverdichters, da sich dieser in das Planum eingräbt. Die Verdichtung hat dadurch im angehobenen Zustand zu erfolgen, wobei damit eine Reduktion der Auflast einhergeht.
- Eine Massenerhöhung des Plattenverdichters kann während dem Verdichtungsprozess zu oberflächennahen Kornbrüchen führen. Je trockener das Material ist, desto häufiger tritt ein Kornbruch auf. Ein Tragschichtmaterial mit optimalem Wassergehalt lässt sich besser verdichten und vermindert derartige Kornbrüche.
- Durch eine zweite Verdichtungsüberfahrt am Tragschichtplanum kann bei gleichen Betriebsparametern nur eine geringfügige Verbesserung der Verdichtung erzielt werden.

Durch die Erhöhung der Anregungsfrequenz wurde kein höherer Verdichtungserfolg verzeichnet.

- Aufgrund des gleichmäßigeren Bewegungsverhaltens bei konstanten Betriebsparametern (freie Führung des Plattenverdichters, Erregerfrequenz, Vortriebsgeschwindigkeit) wurden Schwachstellen und Steifigkeitsunterschiede im Untergrund lokalisierbar.

Die Ergebnisse des Forschungsberichts weisen laut Adam [6] auf Potentiale zur Verbesserung und Optimierung der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern. Schon durch eine Zusatzmasse von 120 kg wurden höhere Verdichtungserfolge und ein ausgewogeneres Bewegungsverhalten der Rüttelplatte verzeichnet. Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden, dass mit einer Zusatzmasse immer ein höherer Verdichtungserfolg einhergeht. Dem Forschungsbericht [6] ist zu entnehmen, dass maschinenabhängige Parameter und die Verdichtungsfähigkeit des Tragschichtmaterials haben ebenfalls einen Einfluss auf den Verdichtungserfolg haben.

Ein gleichmäßiges Bewegungsverhalten ist eine Voraussetzung für die Entwicklung einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle zur lückenlosen Überprüfung und Dokumentation des Verdichtungserfolges und der Untergrundbeschaffenheit bei Unterbausanierungsarbeiten mit der AHM. Denn um den Verdichtungszustand beschreiben und das Verdichtungsgerät als Messinstrument verwenden zu können, müssen Änderungen im Bewegungsverhalten des Plattenverdichters auf Änderungen der Steifigkeiten im Boden zurückführbar sein.

6 Mechanische Modellierung der Plattenverdichter-Boden-Interaktion

Der schwingende Plattenverdichter und der zu verdichtende Untergrund stellen ein dynamisches Interaktionssystem dar. Dieses Kapitel widmet sich zu Beginn den in der Modellierung definierten Randbedingungen. Das zweite Unterkapitel fasst die Modellierung des Plattenverdichters und die Aufstellung der Bewegungsgleichungen zusammen. Darauffolgend wird die Bodenmodellierung unter anderem mit Hilfe des Konusmodells nach *Wolf* [43] erläutert. Die weiteren Unterkapitel beinhalten die Kopplung dieser beiden Teilsysteme über Kontaktbedingungen, die resultierenden Betriebsphasen sowie Anmerkungen zum semi-analytischen Berechnungsvorgang und den Eingangsgrößen des gesamten mechanischen Modells.

6.1 Randbedingungen der Modellierung

Zur zweckmäßigen Beschreibung der Plattenverdichter-Boden-Interaktion werden verschiedene Vereinfachungen vorausgesetzt und Randbedingungen festgelegt. Die Bewegungsgleichungen beinhalten ausschließlich vertikale Bewegungsgrößen (Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Verschiebungen) und wird mit der vorwiegend vertikal gerichteten Belastung des Bodens begründet. Diese Annahme wurde bereits bei diversen Untersuchungen der Vibrationswalze herangezogen. Unter der Annahme der ausschließlich vertikalen Verschiebungen, bewegen sich die Grundplatte und der Untergrund immer parallel zueinander.

Die AHM und der Plattenverdichter fahren mit einer sehr geringen Geschwindigkeit (ca. 70 m/h) über das zu verdichtende Tragschichtmaterial. In der Simulation wird die Fahrbewegung nicht berücksichtigt und das gesamte Modell weist keine horizontalen Bewegungen auf. Das Modell kann daher nicht für die Abbildung des Verdichtungsvorgangs, sehr wohl aber für die Beschreibung eines Verdichtungszustands genutzt werden.

Eine zusätzliche Randbedingung stellt die Voraussetzung einer konstanten Kontaktfläche zwischen dem Plattenverdichter und dem Untergrund dar. Wie in Abschnitt 6.6.1 später genauer erläutert, besitzt die Grundplatte am vorderen und hinteren Ende eine Abrundung (siehe Abbildung 6.6). Je tiefer das Verdichtungsgerät in den Boden gedrückt wird, desto größer ist die Kontaktfläche. Allerdings ist diese Zunahme im Vergleich zur gesamten Kontaktfläche minimal und es erweist sich als sinnvoll, die Kontaktfläche unabhängig von der Verdichtung als konstante Größe zu betrachten.

6.2 Modellierung und Bewegungsgleichungen des Plattenverdichters

Der Plattenverdichter kann vereinfacht durch den Unterteil und den Oberteil (siehe Abbildung 6.1) dargestellt werden. Der Unterteil setzt sich aus der Grundplatte und der Erregersystem zusammen. Die Anregung der Unwuchtmasse erfolgt demzufolge am Unterteil des Plattenverdichters. Der Oberteil besteht aus dem Rahmen des Plattenverdichters. Zusätzliche Lasten werden am Oberteil des Plattenverdichters aufgebracht. Verbunden sind der Unter- und Oberteil zur schwingungstechnischen Entkopplung mit Gummipuffern, welche als Feder-Dämpfer-Element modelliert werden. In Abbildung 6.1 wurden zur Beschreibung des mechanischen Modells Parameter verwendet, welche in Tabelle 6.1 aufgelistet sind.

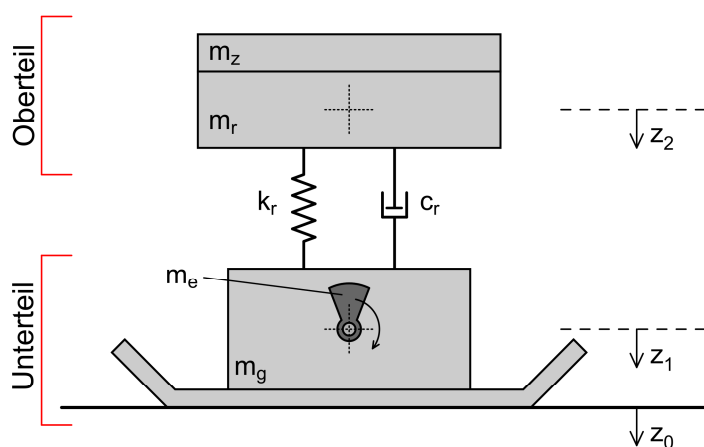


Abbildung 6.1: Mechanisches Modell des Plattenverdichters

Der gesamte Plattenverdichter wird als Zwei-Massen-Schwinger mit zwei Freiheitsgraden modelliert. Die beiden Freiheitsgrade wurden durch die Lagekoordinaten z_1 des Unterteils und z_2 des Oberteils beschrieben. Zur Aufstellung der Bewegungsgleichungen wird der Schwerpunktsatz in vertikaler Richtung herangezogen. In diese Bewegungsgleichungen gehen sowohl Beschleunigungen als auch Geschwindigkeiten und Verschiebungen ein. Die Geschwindigkeit entspricht der ersten Ableitung der Verschiebung. Durch zweimaliges Ableiten der Verschiebung erhält man die Beschleunigung. Die Verschiebung des Bodens z_0 als dritte Lagekoordinate wird durch die Interaktion des Verdichtungsgerätes mit dem Boden bestimmt.

Tabelle 6.1: Parameter zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters

Variable	Einheit	Beschreibung
c_r	[Ns/m]	Dämpfungsparameter zwischen Unter- und Oberteil
e	[m]	Exzentrizität der Unwuchtmasse
f	[Hz]	Anregungsfrequenz
F_b	[N]	Bodenkontaktkraft (Druck positiv)

F_{err}	[N]	Erregerkraft
F_r	[N]	Kraft aus dem Dämpfungs- und Steifigkeitsanteil der Gummipuffer
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
k_r	[N/m]	Federsteifigkeit zwischen Unter- und Oberteil
m_e	[kg]	Masse der Unwucht (Exzenter)
m_g	[kg]	Masse des Unterteils (Grundplatte)
m_r	[kg]	Masse des Oberteils (Rahmen)
m_z	[kg]	Zusatzmasse
θ	[rad/s]	Erregerkreisfrequenz ($\theta = 2\pi f$)
t	[s]	Zeit
φ_0	[rad]	Phasenverschiebung
z_0	[m]	vertikale Verschiebung des Bodens
z_1	[m]	vertikale Verschiebung des Unterteils
\dot{z}_1	[m/s]	vertikale Geschwindigkeit des Unterteils
\ddot{z}_1	[m/s ²]	vertikale Beschleunigung des Unterteils
z_2	[m]	vertikale Verschiebung des Oberteils
\dot{z}_2	[m/s]	vertikale Geschwindigkeit des Oberteils
\ddot{z}_2	[m/s ²]	vertikale Beschleunigung des Oberteils

Ein gedachter Schnitt durch die Gummipuffer ermöglicht eine separate Betrachtung des Unter- und Oberteils. Die Bewegungsgleichung des Oberteils wird in Gleichung (6.1) angeführt, wobei der Dämpfungs- und Steifigkeitsanteil gemäß Gleichung (6.2) zusammengefasst werden kann. Das Bewegungsverhalten des Unterteils wird unter Berücksichtigung der Beschleunigungen und der Masse des Unterteils sowie der statischen Gewichtskraft, dem Einfluss des Oberteils und der Erregerkraft berechnet (6.3). Die Erregerkraft beschreibt die Anregung durch einen sinusförmigen Verlauf, gemäß Gleichung (6.4).

$$(m_r + m_z) \cdot \ddot{z}_2 - F_r = (m_r + m_z) \cdot g \quad (6.1)$$

$$F_r = c_r \cdot (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_r \cdot (z_1 - z_2) \quad (6.2)$$

$$(m_g + m_e) \cdot \ddot{z}_1 + F_r + F_{err} + F_b = (m_g + m_e) \cdot g \quad (6.3)$$

$$F_{err} = m_e \cdot e \cdot \theta^2 \cdot \sin(\theta \cdot t + \varphi_0) \quad (6.4)$$

Die Bodenkontaktkraft (auch als Bodenreaktionskraft bezeichnet) F_b stellt eine bedeutende Größe der Interaktion des Plattenverdichters mit dem Untergrund dar. Durch zusammenführen der Bewegungsgleichungen des Unter- und Oberteils kann die Bodenkontaktkraft folgendermaßen beschrieben werden (6.5).

$$F_b = (m_g + m_e) \cdot g - F_r - F_{err} - (m_g + m_e) \cdot \ddot{z}_1 \quad (6.5)$$

6.3 Modellierung des Bodens

Die mechanische Modellierung des Bodens ist in Abbildung 6.2 dargestellt. Die vertikale Verschiebung des Bodens setzt sich aus den plastischen und den elastischen Verschiebungsanteilen nach Gleichung (6.6) zusammen.

$$z_0 = z_e + z_p \quad (6.6)$$

Die elastischen Verformungen werden als Feder-Dämpfer-Element modelliert und repräsentieren das Fernfeld. Die Beschreibung der plastischen Verformungen des Lasteinleitungsbereiches (Nahfeld) erfolgt über eine elastische Feder, die in eine Richtung gesperrt ist. Das Kelvin-Voigt-Element aus dem Konusmodell und die Feder zur Beschreibung der plastischen Verformungen, die bei Entlastung und Abheben gesperrt ist, werden in Serie geschaltet. Eine derartige Modellierung (siehe Abbildung 6.2) wurde bereits von *Hager* [17] zur Modellierung der Vibrationswalzenverdichtung gewählt und stellte sich in diesem Zusammenhang als sehr geeignet dar.

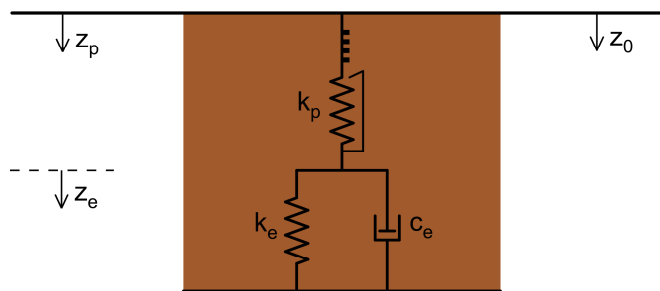


Abbildung 6.2: Mechanisches Modell des Bodens

Für die Ermittlung der Federsteifigkeit und des Dämpfungsparameters wird das Konusmodell nach *Wolf* [43] herangezogen. Mit Hilfe des Konusmodells kann der Boden als linear elastische Halbraum berücksichtigt werden. Dieses Modell hat sich bereits bei *Adam* [1] und anderen Forschungsarbeiten, bei denen die Interaktion eines Verdichtungsgerätes mit dem dynamisch angeregten Boden untersucht wurden, bewährt. In Tabelle 6.2 finden sich alle zur Beschreibung des Bodens verwendeten Variablen mitsamt deren Einheiten.

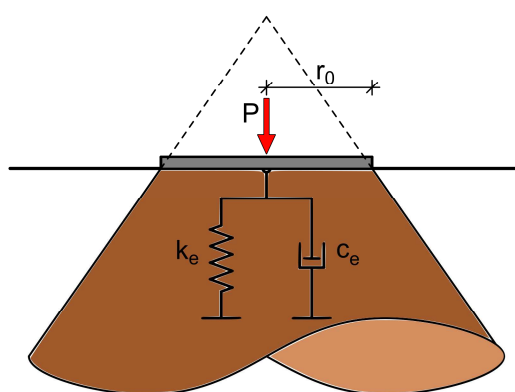
Tabelle 6.2: Verwendete Parameter zur Beschreibung des Bodens

Variable	Einheit	Beschreibung
c_e	[Ns/m]	Dämpfungsparameter des Bodens
k_e	[N/m]	elastische Steifigkeit des Bodens
k_p	[N/m]	plastische Steifigkeit des Bodens
z_0	[m]	gesamte vertikale Verschiebung des Bodens
z_e	[m]	vertikale elastische Verschiebung des Bodens
z_p	[m]	vertikale plastische Verschiebung des Bodens

6.3.1 Elastische Verformungen des Bodenmodells

Das Konusmodell nach Wolf wird für die Beschreibung der Federsteifigkeit und des Dämpfungsparameters des Kelvin-Voigt-Elements verwendet. Die grundlegende Idee des Konusmodells besteht in der Vereinfachung des elastisch isotropen Halbraumes durch einen Konus. Das ist möglich, da die Verformungen und Kräfte außerhalb des Konus, aufgrund deren geringen Einfluss auf den betrachteten Bereich innerhalb des Konus, vernachlässigt werden können [43].

Das Konusmodell ist in Abbildung 6.3 schematisch abgebildet. Die kreisförmige Deckfläche stellt die Lasteintragungsfläche dar und bildet die obere Begrenzung des Konus oder Kegelstumpfes. Nach unten hin ist der Konus unbegrenzt. Die Lasteintragungsfläche kann prinzipiell jede beliebige Form besitzen und wird unter Verwendung einer flächengleiche Umrechnung in einen Kreis mit entsprechendem Radius umgerechnet [43].

**Abbildung 6.3:** Konusmodell nach Wolf; adaptiert [43]

Das Konusmodell nach *Wolf* [43] kann sowohl für statische Aufgabenstellungen als auch bei dynamisch angeregten Böden verwendet werden. Jedoch kann das Bewegungsverhaltens nur in eine Richtung betrachtet werden.

Die Berechnung der Federsteifigkeit und des Dämpfungsparameters erfolgt in Abhängigkeit von der Querdehnzahl des Bodens. Kompressible Böden sind nicht bindig und kohäsionslos, bestehen hauptsächlich aus Sand und Kies und weisen eine Querdehnzahl von $0 \leq \nu \leq 1/3$ auf. Bei einer größeren Querdehnzahl von $1/3 \leq \nu \leq 1/2$ spricht man von inkompressiblen Böden, welche vorrangig als bindig und feinkörnig beschrieben werden und hauptsächlich Schluffe und Tone besitzen [43].

Die Aufstandsfläche des Plattenverdichters wird durch seine Grundplatte bestimmt und ist rechteckig. Das zu verdichtende Tragschichtmaterial besteht aus sandigem Kies und zählt zu den kompressiblen Böden. Die folgenden Gleichungen geben für kompressible Böden mit Querdehnzahl ν im angegebenen Bereich (6.7) für eine rechteckige Lasteinleitungsfläche die Federsteifigkeit k_e (6.8) und den Dämpfungsparameter c_e (6.9) an. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

$$0 \leq \nu \leq 1/3 \quad (6.7)$$

$$k_e = \frac{G \cdot b}{1 - \nu} \left[3,1 \cdot \left(\frac{a}{b} \right)^{0,75} + 1,6 \right] \quad (6.8)$$

$$c_e = 4 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot G \cdot \frac{1 - \nu}{1 - 2\nu}} \cdot a \cdot b \quad (6.9)$$

Tabelle 6.3: Verwendete Parameter zur Beschreibung des Konusmodells nach Wolf

Variable	Einheit	Beschreibung
a	[m]	Länge Lasteinleitungsfläche
b	[m]	Breite Lasteinleitungsfläche
c_e	[Ns/m]	Dämpfungsparameter des Bodens
G	[N/m ²]	Schubmodul des Bodens
k_e	[N/m]	Steifigkeit des Bodens
ν	[-]	Querdehnzahl des Bodens

6.3.2 Plastische Verformungen des Bodenmodells

Das Konusmodell beschreibt den visko-elastischen Bereich im sogenannten Fernfeld. Das Nahfeld stellt den direkten Lasteinleitungsbereich dar [17]. In diesem Bereich treten plastische Verformungen auf, die durch eine elastische Feder k_p modelliert werden, wobei sich die Feder ausschließlich bei Kompression elastisch verhält und anderenfalls gesperrt ist. Die Rückverformung des Bodens während der Betriebsphase Entlastung und der Betriebsphase Abheben wird durch das vom Kelvin-Voigt-Element ausgehende Zurückkriechen des Bodens bestimmt. Der Ansatz zur Ermittlung der Federsteifigkeit, die plastische Verformungen beschreiben soll, erfolgt nach *Adam* [1] über den

dimensionslosen Zustandsfaktor ε . Der Zustandsfaktor beschreibt, wie in Gleichung (6.10) aufgezeigt, das Verhältnis von elastischer zu elastoplastischer Deformation.

$$\varepsilon = \frac{z_e}{z_e + z_p} = \frac{k_p}{k_p + k_e} \quad (6.10)$$

Der Zustandsfaktor kann einen Wert zwischen 0 und 1 annehmen. Bei unendlicher Steifigkeit $k_p = \infty$ folgt $\varepsilon = 1$ (Entlastung), das bedeutet der Boden verhält sich rein elastisch [1]. Bei bekannter elastischer Federsteifigkeit k_e und Vorgabe eines Zustandsfaktor ε kann die Federsteifigkeit k_p ermittelt werden.

Aus diesem Bodenmodell lässt sich die Bodenkontaktkraft F_b errechnen (6.11). $F_{p,vor}$ entspricht der Vorspannung und $z_{p,vor}$ der Vorverformung der elastischen Feder zur Beschreibung der plastischen Verformungen. Der Anteil der Verformung z_p kann nach Gleichung (6.12) ermittelt werden.

$$F_b = [(z_0 - z_e) - z_{p,vor}] \cdot k_p + F_{p,vor} = c_e \cdot \dot{z}_e + k_e \cdot z_e \quad (6.11)$$

$$z_p = z_{p,abs} - z_{p,vor} = (z_0 - z_e) - z_{p,vor} \quad (6.12)$$

6.4 Kopplung von Plattenverdichter und Boden und Beschreibung der Betriebsphasen

Das gesamte Modell, welches in Abbildung 6.4 veranschaulicht ist, setzt sich aus dem Plattenverdichter, der aus dem Ober- und Unterteil besteht, und dem Boden zusammen. Die Kopplung dieser beiden Teilsysteme erfolgt über die Kontaktbedingungen, welche wiederum aus den Betriebsphasen resultieren.

Während einer Unwuchtumdrehung können grundsätzlich drei verschiedene Betriebsphasen auftreten:

- Belastung
- Entlastung
- Abheben

Die Zuordnung zu einer der angeführten Betriebsphasen erfolgt entsprechend der Bodenkontaktkraft und deren Verlauf sowie den vertikalen Verschiebungen von Boden und Plattenverdichter. In Abbildung 6.5 werden der Ausgangszustand, die Belastungsphase, die Entlastungsphase und das Abheben miteinander verglichen.

Die folgenden Unterkapitel erläutern für die drei Betriebsphasen die Beharrungskriterien und zu erfüllenden Zusammenhänge. Für jede Betriebsphase wird die Ermittlung der auftretenden Bodenkontaktkraft angegeben. Es werden Kriterien für das Ende der jeweiligen und die Überleitung in eine andere Betriebsphase aufgezeigt.

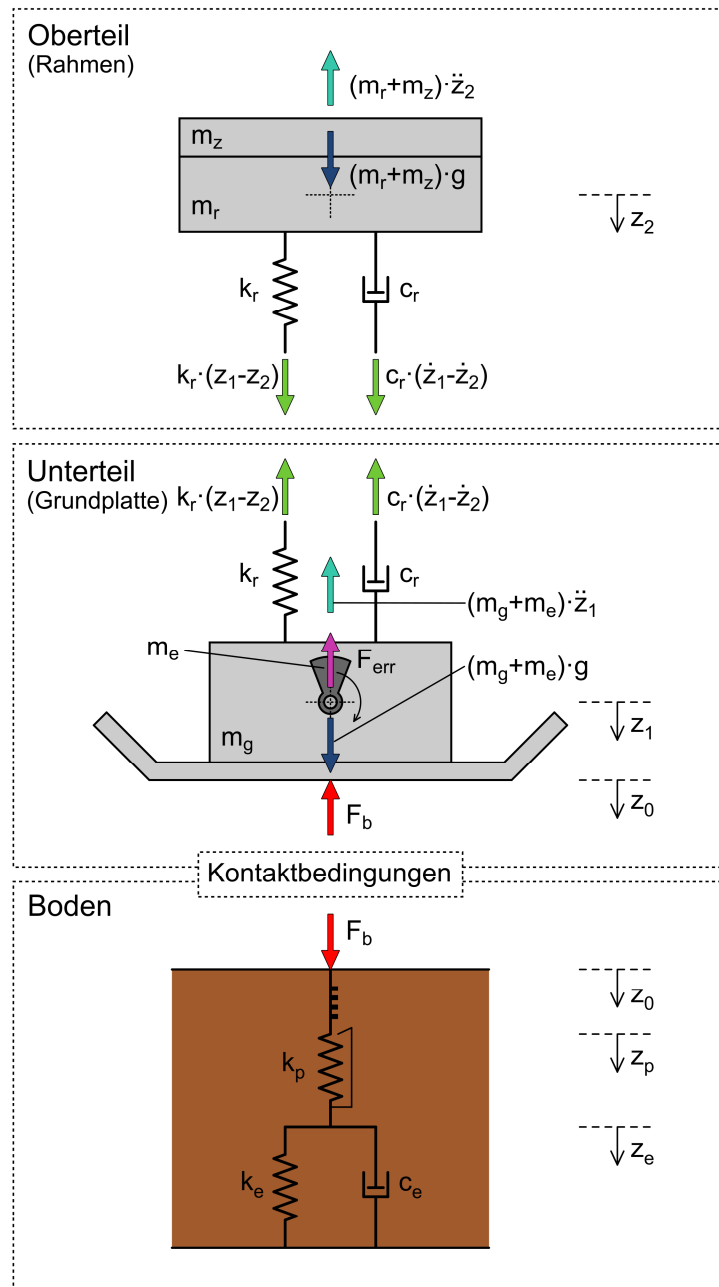


Abbildung 6.4: Mechanisches Modell der Interaktion des Plattenverdichters mit dem Boden

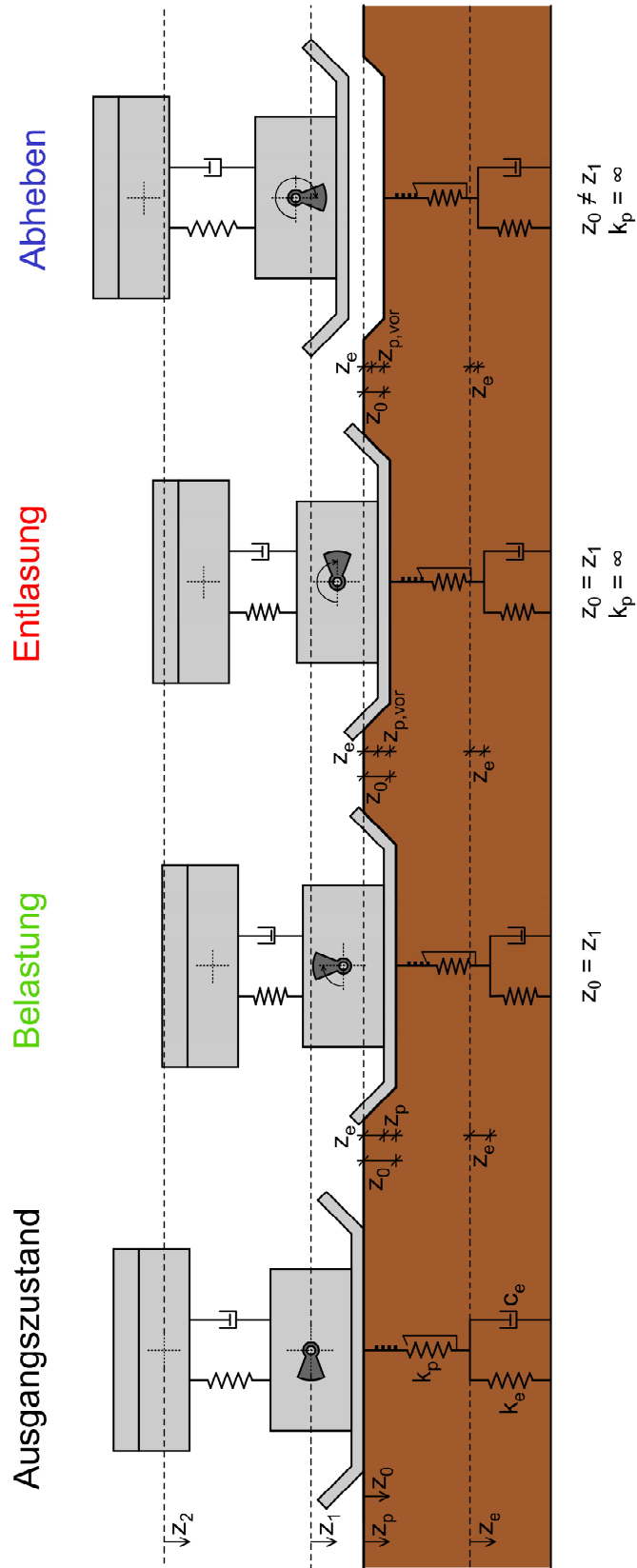


Abbildung 6.5: Darstellung der Betriebsphasen des Plattenverdichters

6.4.1 Belastung

In der Betriebsphase Belastung herrscht zwischen dem Boden und der Grundplatte des Plattenverdichters ein ständiger Kontakt. Beide Komponenten besitzen in jedem Zeitschritt die gleiche vertikale Absolutverschiebung (6.13). Weiters ist diese Betriebsphase durch einen positiven Gradienten der Bodenkontaktkraft \dot{F}_b und eine positive Bodenkontaktkraft F_b gekennzeichnet (6.14), (6.15). Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass die Bodenkontaktkraft während der Belastung stets zunimmt und der Plattenverdichter weiter in den Boden eindringt.

$$z_0 = z_1 \quad (6.13)$$

$$\dot{F}_b > 0 \quad (6.14)$$

$$F_b > 0 \quad (6.15)$$

Während der Belastungsphase ist die elastische Feder zur Darstellung der plastischen Deformationen aktiviert und es treten sowohl elastische z_e als auch plastische Verformungen z_p auf, siehe Gleichung (6.16). Die plastischen Verformungen können sich ausschließlich in der Belastungsphase ausbilden und es folgt eine Aufspaltung der absoluten plastischen Verformungen $z_{p,abs}$ in die bereits vorhanden plastischen Verformungen $z_{p,vor}$ aus vergangenen Belastungszyklen und die während des aktuellen Belastungszyklus auftretenden plastischen Verformungen z_p nach Gleichung (6.17).

$$z_0 = z_e + z_{p,abs} \quad (6.16)$$

$$z_{p,abs} = z_{p,vor} + z_p \quad (6.17)$$

Bodenkontaktkräfte in der Betriebsphase Belastung

Die Bodenkontaktkraft kann auf der einen Seite über die Bewegungsgleichungen des Plattenverdichters ermittelt werden (6.18) und andererseits besteht die Möglichkeit, diese über das elastische Feder-Dämpfer-Element zu errechnen (6.19).

$$F_{b,Plattenverdichter} = -F_{beschl,g} + F_{stat,g} + F_{err} - F_{beschl,r} + F_{stat,r} \quad (6.18)$$

$$F_{b,Boden} = c_e \cdot \dot{z}_e + k_e \cdot z_e \quad (6.19)$$

Ende der Betriebsphase Belastung

Steigt die Bodenkontaktkraft nicht mehr an, endet die Belastungsphase. Die Gradienten der Bodenkontaktkraft \dot{F}_b ist in diesem Fall negativ (6.20). Auf die Betriebsphase der Belastung folgt stets die Betriebsphase Entlastung.

$$\dot{F}_b \leq 0 \quad (6.20)$$

6.4.2 Entlastung

Die Betriebsphase der Entlastung ist ebenfalls durch eine idente Absolutverschiebung des Bodens und der Grundplatte charakterisiert (6.21). Im Unterschied zur Belastungsphase nimmt die

Bodenkontaktkraft F_b während der Entlastung ab. Der Gradient der Bodenkontaktkraft \dot{F}_b weist ein negatives Vorzeichen auf, siehe Gleichung (6.22). Die Bodenkontaktkraft nimmt jedoch während der gesamten Entlastungsphase positive Werte an (6.23).

$$z_0 = z_1 \quad (6.21)$$

$$\dot{F}_b \leq 0 \quad (6.22)$$

$$F_b > 0 \quad (6.23)$$

Die Entlastung ist ein rein elastischer Vorgang. Die absoluten plastischen Verformungen entsprechen in dieser Betriebsphase den bereits vorhandenen Verformungen, siehe Gleichungen (6.24) und (6.25). Die gesamten vertikalen Verschiebungen im Boden setzen sich wiederum aus den elastischen und den plastischen Verformungen zusammen (6.26).

$$z_p = 0 \quad (6.24)$$

$$z_{p,abs} = z_{p,vor} \quad (6.25)$$

$$z_0 = z_e + z_{p,abs} \quad (6.26)$$

Bei jedem Wechsel von der Betriebsphase Belastung zur Betriebsphase Entlastung steigt die vorhandene plastische Verformung $z_{p,vor}$ sprunghaft, um den während der Belastung entstandenen Anteil der plastischen Verformungen $\Delta z_{p,vor}$, an. Dieser Zusammenhang wird in Gleichung (6.27) angeführt, wobei die Berechnung kumulativ über die Zeit erfolgt.

$$\Delta z_{p,vor} = \frac{\Delta F_b}{k_p} \quad (6.27)$$

Bodenkontaktkräfte in der Betriebsphase Entlastung

Die Bestimmung der Bodenkontaktkraft erfolgt analog zur Belastung, gemäß den Gleichungen (6.28) und (6.29).

$$F_{b,Plattenverdichter} = -F_{beschl,g} + F_{stat,g} + F_{err} - F_{beschl,r} + F_{stat,r} \quad (6.28)$$

$$F_{b,Boden} = c_e \cdot \dot{z}_e + k_e \cdot z_e \quad (6.29)$$

Ende der Betriebsphase Entlastung

Das Ende der Entlastungsphase kann durch zwei verschiedene Vorgänge hervorgerufen werden. Die erste Möglichkeit ist durch eine fehlende Bodenkontaktkraft charakterisiert. Der Boden kann keine Zugkräfte aufnehmen und deshalb hebt die Grundplatte des Plattenverdichters vom Untergrund ab. Dieser Umstand lässt sich durch Gleichung (6.30) beschreiben und es folgt die Betriebsphase Abheben.

$$F_b = 0 \quad (6.30)$$

Im zweiten Fall steigt die Bodenkontaktkraft ohne vorheriger vollständiger Entlastung an. Dies kann durch einen positiven Gradienten der Bodenkontaktkraft (6.31) beschrieben werden. Anschließend findet eine Überleitung in die Belastungsphase statt.

$$\dot{F}_b \geq 0 \quad (6.31)$$

6.4.3 Abheben

Bewegen sich der Boden und der Plattenverdichter entkoppelt und unabhängig voneinander, spricht man von der Betriebsphase Abheben. Während des Abhebens sind die Absolutverschiebungen der Grundplatte des Plattenverdichters z_1 kleiner als jene des Bodens z_0 (6.32).

$$z_1 < z_0 \quad (6.32)$$

Wie bei der Entlastung treten auch in dieser Betriebsphase nur rein elastische Verformungen auf, beim Übergang zum Abheben erfolgt auch keine Änderung der plastischen Vorverformungen. Diese Zusammenhänge sind in den Gleichungen (6.33), (6.34), (6.35) und (6.36) festgehalten.

$$z_p = 0 \quad (6.33)$$

$$\Delta z_{p,vor} = 0 \quad (6.34)$$

$$z_{p,abs} = z_{p,vor} \quad (6.35)$$

$$z_0 = z_e + z_{p,abs} \quad (6.36)$$

Bodenkontaktkräfte in der Betriebsphase Abheben

Beim Abheben des Plattenverdichters ist keine Bodenkontaktkraft F_b vorhanden (6.37) und die Vorspannkraft der elastischen Einzelfeder $F_{p,vor}$ wird gleich Null gesetzt (6.38).

$$F_b = 0 \quad (6.37)$$

$$F_{p,vor} = 0 \quad (6.38)$$

Ende der Betriebsphase Abheben

Setzt der Plattenverdichter wieder auf den Boden auf, endet das Abheben. Gleichzeitig nimmt die Bodenkontaktkraft erneut einen positiven Wert an (6.39) und es folgt auf die Betriebsphase Abheben stets eine Belastungsphase.

$$F_b > 0 \quad (6.39)$$

6.5 Semi-analytische Berechnung

Die Berechnung des Plattenverdichter-Boden-Interaktions-Modells erfolgt mit Hilfe von *MATLAB* und es wird ein semi-analytischer Ansatz gewählt. Die Auswertung der einzelnen Berechnungsgrößen erfolgt für jeden Zeitschritt, wobei aufgrund der vorhandenen Freiheitsgrade ausgewählte Ergebnisse des vorherigen Berechnungsschrittes für den betrachteten Zeitschritt als Eingangsgröße dienen.

Die Simulationszeit wird mit 10 Sekunden definiert. Für die gewählte Abtastrate von 1 000 000 Hz ergibt sich die Differenz zweier Zeitschritte zu 0,00001 Sekunden. Wählt man beispielsweise eine Anregungsfrequenz von 40 Hz, beträgt die Dauer einer Unwuchtumdrehung 0,025 Sekunden. Eine Unwuchtumdrehung umfasst dann 2500 Zeitschritte. Diese sehr kurze Dauer eines Zeitschrittes sowie die verhältnismäßig hohe Anzahl an Zeitschritten je Unwuchtumdrehung minimieren den Fehler und erlauben eine semi-analytische Berechnung.

Für die Simulation sind Anfangsbedingungen zu definieren. Es wird für den Simulationsbeginn die Betriebsphase Belastung gewählt und als Startwert die Beschleunigung der Grundplatte \ddot{z}_1 herangezogen (6.40).

$$\ddot{z}_1 = \frac{1}{m_g + m_e} \left[(m_g + m_e) \cdot g - m_e \cdot e \cdot (2\pi f)^2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t_{(1)}) \right] \quad (6.40)$$

Die folgenden Gleichungen (6.41) bis (6.48) zeigen die semi-analytische Berechnung zur Ermittlung der Bodenkontaktkraft F_b aus den Bewegungsgleichungen des Plattenverdichters für einen Zeitschritt i .

$$\ddot{z}_{1(i)} = \frac{1}{m_g + m_e} \cdot \left[(m_g + m_e) \cdot g - F_{b(i-1)} - F_{r(i-1)} - F_{err(i)} \right] \quad (6.41)$$

$$\dot{z}_{1(i)} = \dot{z}_{1(i-1)} + \ddot{z}_{1(i)} \cdot \Delta t \quad (6.42)$$

$$z_{1(i)} = z_{1(i-1)} + \dot{z}_{1(i)} \cdot \Delta t \quad (6.43)$$

$$F_{r(i)}^{neu} = k_r \cdot (z_{1(i)} - z_{2(i-1)}) + c_r \cdot (\dot{z}_{1(i)} - \dot{z}_{2(i-1)}) \quad (6.44)$$

$$z_{2(i)} = \frac{1}{m_r + m_z} \cdot \left[(m_r + m_z) \cdot g + F_{r(i)} \right] \quad (6.45)$$

$$\dot{z}_{2(i)}^{neu} = \dot{z}_{2(i-1)} + \ddot{z}_{2(i)} \cdot \Delta t \quad (6.46)$$

$$z_{2(i)}^{neu} = z_{2(i-1)} + \dot{z}_{2(i)} \cdot \Delta t \quad (6.47)$$

$$F_{b(i)}^{neu} = (m_g + m_e) \cdot g - (m_g + m_e) \cdot z_{2(i)} - F_{err(i)} - F_{r(i)} \quad (6.48)$$

6.6 Eingangsparameter der Modellierung

Das Plattenverdichter-Boden-Interaktions-Modell besitzt 14 voneinander unabhängige Eingangsparameter. Diese beziehen sich auf die Abmessungen der Grundplatte, die Massen der einzelnen Komponenten, die Anregung des Erregersystems, die Federsteifigkeit und den Dämpfungsparameter der Gummipuffer und auf die Bodenparameter.

Von diesen 14 Parametern konnten zehn bestimmt oder sinnvoll festgelegt werden. Für die verbleibenden vier werden im ersten Schritt sinnvolle Annahmen getroffen und im Zuge der Ergebnisauswertung Parametervariationen durchgeführt. Das abschließende Unterkapitel zeigt in Tabelle 6.4 eine Übersicht aller Berechnungsparameter sowie, wenn bekannt, deren Größenordnung.

6.6.1 Geometrie des Plattenverdichters

Hinsichtlich der Geometrie sind für die Simulation des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters ausschließlich die Abmessungen der Grundplatte relevant. Diese wurden aus dem Produktdatenblatt der Firma *Wimmer* [42] entnommen. Der untersuchte Plattenverdichter des Modelltyps WB B 530 hat eine Länge a der Grundplatte von 635 mm und eine Breite b von 1000 mm. Die Abmessungen sind in Abbildung 6.6 eingetragen.



Abbildung 6.6: Abmessungen der Grundplatte des Plattenverdichters; Bauhof der Swietelsky

In Abbildung 6.6 ist ersichtlich, dass sowohl die vordere als auch die hintere Kante der Grundplatte abgerundet sind. Je nach Betriebsphase und Eindringtiefe des Plattenverdichters ändert sich zufolge der Abrundungen die Größe der Kontaktfläche zwischen Verdichtungsgerät und Boden. Diese geht in die Berechnung der elastischen Federsteifigkeit und des Dämpfungsparameters mit dem Konusmodell nach *Wolf* (siehe Abschnitt 6.3.1) und folgend in die Steifigkeit der elastischen Feder zur Beschreibung der plastischen Verformungen (siehe Abschnitt 6.3.2) ein. Die Differenz zwischen der Kontaktfläche bei unbelasteter Auflage der Grundplatte am Boden ($0,47 \text{ m}^2$) und jener bei einer

Eindringtiefe von einigen Zentimetern ($0,64 \text{ m}^2$) ist gering. Aufgrund des minimalen Einflusses wird die Größe der Lasteinleitungsfläche für alle Zeitschritte und Betriebsphasen, wie bereits in den Randbedingungen (siehe Abschnitt 6.1) beschrieben, als konstant betrachtet.

6.6.2 Massenverhältnisse des Plattenverdichters

Bei der Beschreibung des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters und seiner Interaktion mit dem Boden kommt den Massen der einzelnen miteinander interagierenden Komponenten und Teilsystemen eine große Bedeutung zu. Einen entscheidenden Einfluss stellen zusätzlich zur Gesamtmasse die Massenverhältnisse dar.

Die Bestimmung der Massen erfolgte für den Unterteil (Grundplatte), den Oberteil (Rahmen) und die Unwucht (Exzenter) im Zuge der Vorbereitungen am Bauhof der Firma *Swietelsky* am 19. November 2019. Die einzelnen Teile wurden unter Verwendung einer Federwaage abgewogen.

Abbildung 6.7 zeigt die Ermittlung der Unwuchtmasse m_e , welche 20 kg beträgt. Der Unterteil besteht aus der Grundplatte, dem Unwuchtmotor ohne Unwucht und zwei der vier Gummipuffer. Seine Masse wird mit der Variable m_g bezeichnet und die Abwägung beträgt 295 kg. Der Rahmen sowie die zwei verbleibenden Gummipuffer ergeben die Masse des Oberteils m_r mit 385 kg.

Die gesamte Masse des Plattenverdichters m_{PLV} lässt sich mit Gleichung (6.49) zusammenfassen und ergibt 700 kg.

$$m_{PLV} = m_g + m_r + m_e = 295 + 385 + 20 = 700 \text{ kg} \quad (6.49)$$

In den bisherigen Forschungsarbeiten zur *Technischen Weiterentwicklung der AHM* [6] geht mit der Massenerhöhung am Plattenverdichter eine Verbesserung der Verdichtungswirkung einher. Um diesen Effekt in der Modellierung berücksichtigen zu können, wird eine Zusatzmasse m_z definiert. Diese zusätzliche Auflast erhöht die die Masse des Rahmens $m_{r,ges}$ (6.50).

$$m_{r,ges} = m_r + m_z \quad (6.50)$$

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es unter anderem die Auswirkungen der Zusatzmasse zu untersuchen, weshalb die Zusatzmasse m_z in den Simulationen zwischen 0 und 500 kg variiert wird. Die Ergebnisse zur Variation der Zusatzmasse sind Abschnitt 8.6 zu entnehmen.

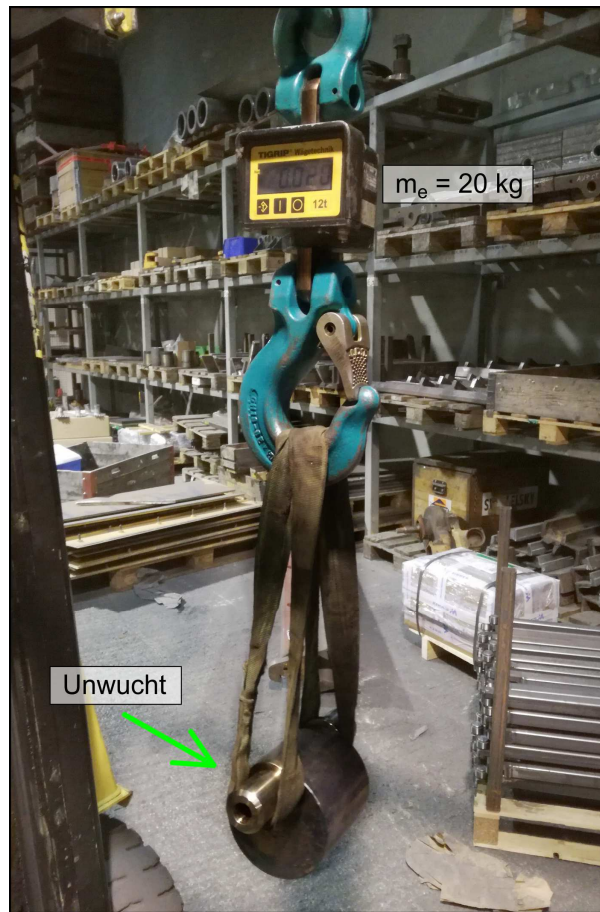


Abbildung 6.7: Ermittlung der Unwuchtmasse; Bauhof der Swietelsky

6.6.3 Anregungsfrequenz und Unwuchtmoment

Eine besonders relevante Eingangsgröße stellt die Anregungsfrequenz f , mit welcher der Plattenverdichter betrieben wird, dar. Im Produktdatenblatt der Firma *Wimmer* [42] ist diese für das vorliegende Verdichtungsgerät mit 43,3 Hz festgelegt. In der Modellierung wurde eine Anregungsfrequenz von 40 Hz angesetzt. Die Auswirkungen einer Veränderung der Anregungsfrequenz werden in Abschnitt 8.3 diskutiert.

Das Unwuchtmoment U errechnet sich aus der Masse der Unwucht m_e und deren Exzentrizität e nach Gleichung (6.51). Am 19. November 2019 wurde die Exzentrizität der Unwucht, wie in Abbildung 6.8 skizziert, mit 4,50 cm abgeschätzt.

$$U = m_e \cdot e = 20 \cdot 0,045 = 0,90 \text{ kgm} \quad (6.51)$$

Unter Verwendung dieser Eingangsgrößen kann die Zentrifugalkraft F_z der Unwuchtmasse berechnet werden (6.52). In Gleichung (6.53) ist die Berechnung der Kreisfrequenz ω angeführt.

$$F_z = U \cdot \omega^2 = 0,90 \cdot 251,33^2 = 56850 \text{ N} \quad (6.52)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 40 = 251,33 \text{ rad/s} \quad (6.53)$$

Die ermittelte Zentrifugalkraft F_z von 56,8 kN entspricht etwa der im Produktdatenblatt der Firma Wimmer [42] angegebene Zentrifugalkraft von 52 kN.

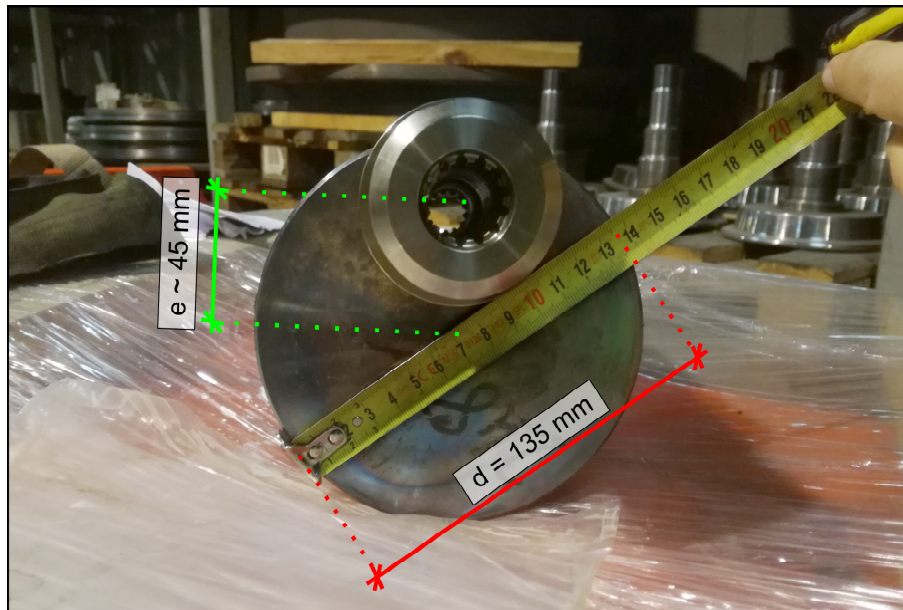


Abbildung 6.8: Abmessung der Unwucht; Bauhof der Swietelsky

6.6.4 Federsteifigkeit und Dämpfungsparameter zwischen Unterteil und Oberteil des Plattenverdichters

Der Unter- und Oberteil des Plattenverdichters sind über Gummipuffer miteinander verbunden. Diese Kopplung wird im Modell durch ein Feder-Dämpfer-Element abgebildet (siehe Abbildung 6.1). Um das Bewegungsverhalten beschreiben zu können, sind die Federsteifigkeit k_r und der Dämpfungsparameter c_r in der Modellberechnung zu definieren.

Die beiden Eingangsgrößen sind nicht bekannt, haben allerdings einen großen Einfluss auf das Bewegungsverhalten der Grundplatte und des Rahmens. Die Erkenntnisse der Parametervariation von Federsteifigkeit und Dämpfungsparameter sind in Abschnitt 8.5 angeführt.

6.6.5 Bodenparameter

Das mit dem Plattenverdichter zu verdichtende ungebundene Tragschichtmaterial wurde bereits in Kapitel 3 vorgestellt. Es handelt sich um ein Kies-Sand-Gemisch, dessen Kornverteilung innerhalb von zwei Grenzsieblinien zu liegen kommt (siehe Abbildung 3.2). Für dieses Bodenmaterial wurde in der Berechnung eine Dichte ρ von 1,80 g/cm³ gewählt.

Die Modellierung des Bodens erfolgt über ein Feder-Dämpfer-Element und eine elastische Einzelfeder zur Beschreibung der plastischen Verformungen (siehe Abschnitt 6.3). Die Berechnung der Federsteifigkeiten und der Dämpfungskonstante ist neben der Dichte ρ von der Querdehnzahl ν und dem Schubmodul G abhängig. Für das nicht bindige und kompressible Tragschichtmaterial wird eine Querdehnzahl von 0,30 festgelegt.

Der Schubmodul kann entweder direkt als Eingangsgröße definiert oder aus dem dynamischen Verformungsmodul E_{vd} errechnet werden. Die Berechnung des Schubmoduls G kann gemäß den Gleichungen (6.54) bis (6.56) über den Verformungsmodul E_v aus dem dynamischen Verformungsmodul E_{vd} erfolgen.

$$\text{für } E_v < 25 \text{ MN/m}^2: E_v = \frac{5}{6} \cdot E_{vd} \text{ in MN/m}^2 \quad (6.54)$$

$$\text{für } E_v \geq 25 \text{ MN/m}^2: E_v = \frac{5}{4} \cdot (E_{vd} - 10) \text{ in MN/m}^2 \quad (6.55)$$

$$G = E_v \cdot \frac{\pi \cdot (1 - \nu)}{6} \quad (6.56)$$

Das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters und dessen Verdichtungswirkung hängen wesentlich vom Schub- bzw. Verformungsmodul ab. Die Ergebnisse des Unterkapitels 8.4 sind der Variation des Schubmoduls gewidmet.

Als weiterer Berechnungsparameter wird der Zustandsfaktor ε mit 0,85 festgelegt.

6.6.6 Zusammenfassung der Berechnungsparameter

In Tabelle 6.4 sind alle 14 Eingangsgrößen sowie deren Zahlenwerte, sofern diese bekannt sind, aufgelistet.

Tabelle 6.4: Übersicht der Berechnungsparameter der Modellierung

Variable	Wert	Beschreibung
a	635 mm	Länge der Grundplatte des Plattenverdichters
b	1000 mm	Breite der Grundplatte des Plattenverdichters
c_r	*	Dämpfungsparameter zwischen Unter- und Oberteil
e	0,045 m	Exzentrizität der Unwucht
ε	0,85	Zustandsfaktor der Verdichtung
f	40 Hz	Anregungsfrequenz
G	*	Schubmodul des Bodens
k_r	*	Federsteifigkeit zwischen Unter- und Oberteil
m_e	20 kg	Masse der Unwucht (Exzenter)
m_g	295 kg	Masse des Unterteils (Grundplatte)
m_r	385 kg	Masse des Oberteils (Rahmen)
m_z	*	Zusatzmasse

ρ	1800 kg/m ³	Dichte des Bodens
ν	0,30	Querdehnzahl des Bodens

* Der Wert dieser Berechnungsparameter ist nicht bekannt.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

7 Feldversuche mit dem Plattenverdichter

Die Feldversuche wurden am 20. November 2019 durch *Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen, Gesellschaft m.b.H.* in Zusammenarbeit mit dem *Institut für Geotechnik der TU Wien, Swietelsky Baugesellschaft m.b.H.* und *FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT G.m.b.H* durchgeführt. Das Versuchsfeld befand sich in Fischamend (Niederösterreich) in der Kiesgrube der Firma *HABAU Hoch- Tiefbaugesellschaft m.b.H.* Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wurde der Plattenverdichter mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet. Für den Zusammenbau des Plattenverdichters, den Einbau der Sensoren, die Vorbereitungen der Messtechnik und diverse andere vorab durchgeführte Arbeiten standen die Hallen am Firmengelände der *Swietelsky Baugesellschaft m.b.H.* in Fischamend, welche nur wenige Kilometer vom Versuchsfeld entfernt sind, zur Verfügung. Die Grundlagen des geplanten und durchgeführten Versuchskonzepts der Feldversuche beruhen auf den Erfahrungen und Erkenntnissen des Forschungsprojekts *Technische Weiterentwicklung der AHM* [6].

Das Kapitel ist in drei Teilbereiche gegliedert: Versuchsfeld, Plattenverdichter und Versuchsdurchführung.

7.1 Versuchsfeld

Die Luftbildaufnahme in Abbildung 7.1 zeigt die Kiesgrube der Firma *HABAU* in Fischamend und die Lage des Versuchsgeländes. Westlich der Kiesgrube befindet sich in unmittelbarer Nähe das Flughafengelände des Flughafens Wien-Schwechat. Das Versuchsfeld eignet sich vor allem aufgrund der vorhandenen Fläche besonders gut für Feldversuche.



Abbildung 7.1: Luftbildaufnahme des Versuchsfeldes in der Kiesgrube [15]

Der Untergrund des Versuchsgeländes besteht aus sandigem Kies. Für die Feldversuche wurden zwei Spuren vorbereitet, welche jeweils eine Teststrecke von 15 m aufwiesen. Die beiden Spuren verliefen parallel und sind in Abbildung 7.2 gekennzeichnet.

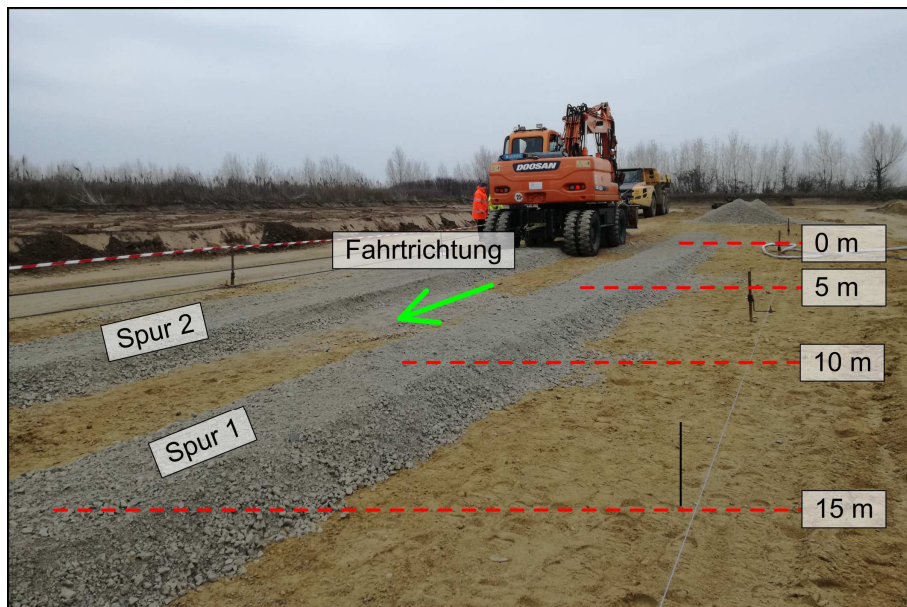


Abbildung 7.2: Spur 1 und Spur 2 der Versuchsstrecke; Versuchsfeld in Fischamend

Die Vorbereitungsarbeiten am Versuchsfeld wurden am 19. November 2019 durchgeführt. Der Aufbau und das zu verdichtende Material sind auf beiden Spuren ident. Auf jeder Spur erfolgte ein 35 cm tiefer und mindestens 105 cm breiter Aushub des vorhandenen Materials über die gesamte Länge der Teststrecke. Dieser Graben wurde anschließend mit dem Tragschichtmaterial verfüllt und eine insgesamt etwa 50 cm starke Schicht hergestellt. Das verwendete Tragschichtmaterial entspricht den in der TL 07.09.18 [28] festgehaltenen Lieferbedingungen und Anforderungen der ÖBB. Hierbei handelt es sich um qualitätsgesichertes AHM-Tragschichtmaterial 0/32 mm des Materiallieferanten Hollitzer. Der Einbau erfolgte mit einem Löffelbagger, sodass eine homogene, locker gelagerte Tragschicht für die Versuchsmessfahrten mit dem Plattenverdichter bereitstand.

7.2 Plattenverdichter

Als Trägergerät wurde ein Hydraulikbagger verwendet und der Plattenverdichter wurde an dessen Schild über eine eigens konstruierte Aufhängung befestigt. Durch die Führung mit dem Hydraulikbagger kann der Anpressdruck des Verdichtungsgerätes auf den Untergrund variiert werden. Die Versorgung des Unwuchtmotors erfolgte über das Hydrauliksystem des Baggers.

Positionssensoren für die Lage der Unwucht

Um während der Verdichtungsfahrten stets eine Auskunft über die Lage der rotierenden Unwuchtmasse zu erhalten, wurden vier Positionssensoren angebracht. Die verwendeten Sensoren sind Hall-Sensoren, welche an der Seite des Unwuchtgehäuses montiert wurden. Die Unwucht selbst wurde mit einem Magnet ausgestattet. Die Sensoren registrieren das „Vorbeikommen“ des

Magneten. Durch die Anordnung der vier Sensoren in den Viertelpunkten (siehe Abbildung 7.3), kann die Position und Drehrichtung der Unwucht erfasst werden. Der Einbau dieser Hall-Sensoren erfolgte im Zuge der Vorbereitungen am 17. September 2019 auf dem Bauhof der Firma *Swietelsky* in Fischamend.

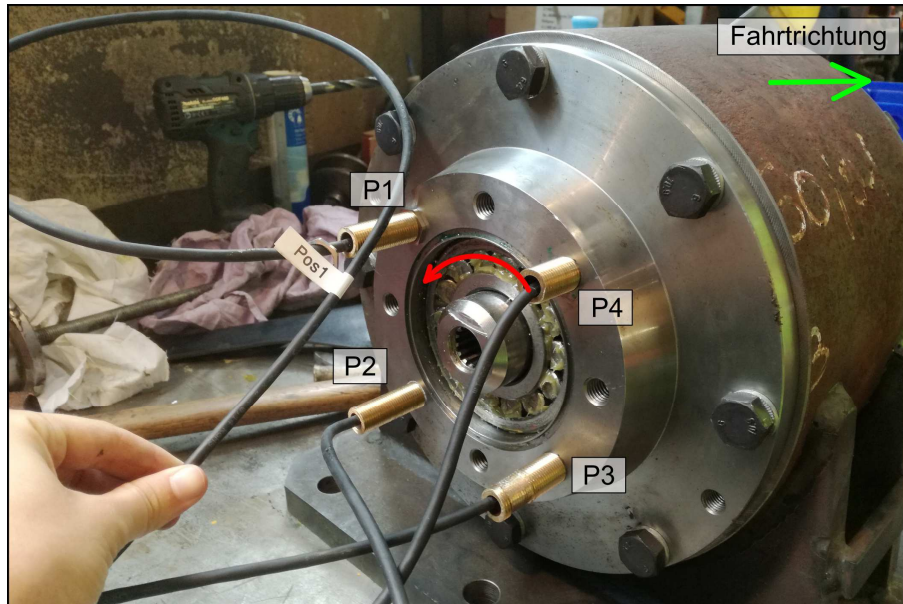


Abbildung 7.3: Anordnung der Positionssensoren für die Bestimmung der Lage der Unwucht; Bauhof der Swietelsky

Beschleunigungsaufnehmer

Durch die Aufzeichnung der Beschleunigungen während der Messfahrten, können die Schwingwege des Plattenverdichters und in weiterer Folge die eingebrachte Verdichtungsenergie ermittelt werden. Insgesamt wurden fünf Beschleunigungsaufnehmer montiert, wobei vier auf der Grundplatte und einer am Rahmen positioniert wurde. Die verwendeten Kistler-Sensoren nehmen die Beschleunigungen in allen drei Koordinatenrichtungen auf. In Abbildung 7.4 ist die Positionierung der Beschleunigungsaufnehmer auf der Grundplatte veranschaulicht. Jener des Rahmens, befindet sich mittig im hinteren Bereich des Oberteils.

Ein GPS-Sensor wurde installiert, um bei der Auswertung der Messdaten eine örtliche Zuordnung zu ermöglichen. Die Messdaten der Positions- und Beschleunigungssensoren wurden mit einer Abtastrate von 10000 Hz aufgezeichnet.

7.3 Versuchsdurchführung

Die Feldversuche fanden am 20. November 2019 statt. Das Wetter war zu Versuchsbeginn noch trocken, im Laufe des Nachmittags begann es zu regnen. Das vorab befürchtete Gefrieren des Untergrunds in der Kiesgrube blieb aus, daher stand der Versuchsdurchführung nichts im Wege.

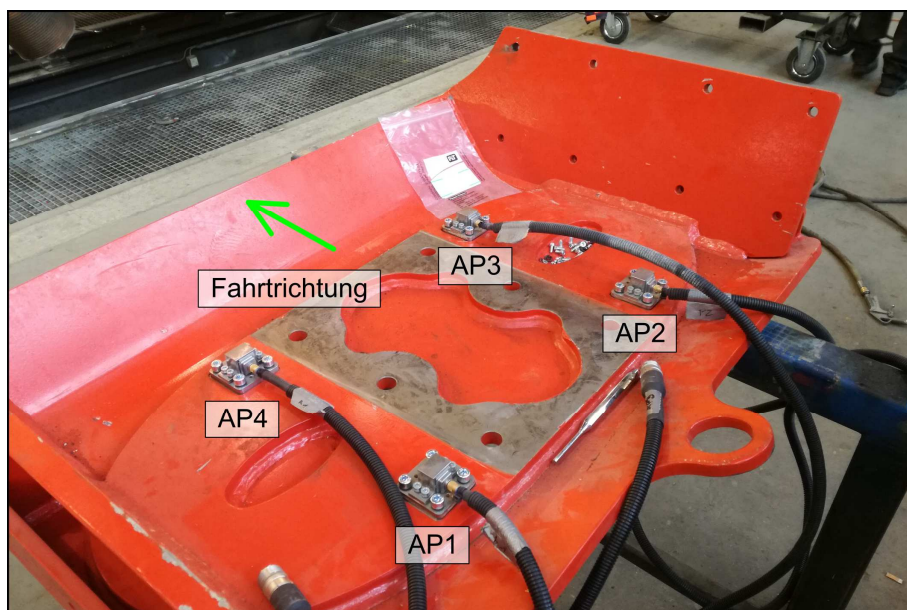


Abbildung 7.4: Anordnung der Beschleunigungssensoren auf der Grundplatte; Bauhof der Swietelsky

Die Messfahrten mit dem Plattenverdichter erfolgten mit einer konstanten Geschwindigkeit von 90 m/h, was in etwa der Arbeitsgeschwindigkeit der AHM entspricht. Dem als Trägergerät des Plattenverdichters verwendete Hydraulikbagger war es nicht möglich, die tatsächliche Arbeitsgeschwindigkeit der AHM von 70 m/h zu gewährleisten, weshalb der Bagger von einer Seilwinde eines Feuerwehrautos mit 90 m/h gezogen wurde (siehe Foto in Abbildung 7.5).

Vor der ersten Versuchsfahrt wurde das Tragschichtmaterial befeuchtet, um eine bestmögliche Verdichtungsqualität zu erhalten. Die Auflockerung und Wiederaufbereitung der beiden Spuren für eine weitere Verdichtung wurde mit dem Bagger durchgeführt.

Im vorab festgelegten Messprogramm wurden Nullversuche und Messfahrten mit jeweils unterschiedlichen Anregungsfrequenzen und Anpressdrücken vorgesehen. Insgesamt wurden vier Nullversuche mit einem frei in der Luft schwingenden Plattenverdichter durchgeführt. Die einzelnen Versuche unterschieden sich jeweils in der Anregungsfrequenz. Anschließend erfolgten acht Messfahrten (siehe Tabelle 7.1). Die Verdichtung des Tragschichtmaterials am Gleis erfolgt mit nur einer Überfahrt des Plattenverdichters, wobei im Zuge der Versuche jeweils eine zweite Überfahrt durchgeführt wurde. Standardmäßig erfolgt der Antrieb der Unwucht gegen die Fahrtrichtung. Dies sorgt erfahrungsgemäß für eine bessere Oberflächenqualität. Am Versuchsfeld wurden die Messfahrten auf der Spur 2 jeweils mit einer Unwuchtumdrehung gegen die Fahrtrichtung und auf der Spur 1 in Fahrtrichtung abgewickelt. Das Foto in Abbildung 7.6 zeigt den Plattenverdichter während der Versuchsdurchführung.



Abbildung 7.5: Von Seilwinde gezogener Hydraulikbagger mit Plattenverdichter; Versuchsfeld in Fischamend

Tabelle 7.1: Übersicht der durchgeführten Messfahrten (ohne Nullversuche)

Messfahrt	Beschreibung
1	Spur 2, 1. Übergang auf der neu hergestellten Spur, Unwuchtdrehung gegen die Fahrtrichtung
2	Spur 2, 2. Übergang, Unwuchtdrehung gegen die Fahrtrichtung
3	Spur 1, 1. Übergang auf der neu hergestellten Spur, Unwuchtdrehung in die Fahrtrichtung
4	Spur 1, 2. Übergang, Unwuchtdrehung in die Fahrtrichtung
5	Spur 2, 1. Übergang auf der aufgelockerten Spur, Unwuchtdrehung gegen die Fahrtrichtung
6	Spur 2, 2. Übergang, Unwuchtdrehung gegen die Fahrtrichtung
7	Spur 1, 1. Übergang auf der aufgelockerten Spur, Unwuchtdrehung in die Fahrtrichtung
8	Spur 1, 2. Übergang, Unwuchtdrehung in die Fahrtrichtung

Als begleitende Verdichtungskontrolle wurde der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät, wie in Abschnitt 4.5.2 vorgestellt, herangezogen. Dieser eignet sich aufgrund der

zuverlässigen Ergebnisse sowie der einfachen und schnellen Handhabung besonders gut. Auf beiden Spuren wurden Messpunkte bei 5, 10 und 15 m festgelegt (siehe Abbildung 7.2), wobei jeweils drei Einzelversuche je Messpunkt ausgeführt wurden. Die dynamischen Lastplattenversuche erfolgten in der ausgehobenen Spur, also etwa 35 cm unter der Geländeoberkante, auf dem 50 cm mächtigen locker geschütteten Tragschichtmaterial bzw. der aufgelockerten Spur sowie nach der ersten und zweiten Verdichtungsfahrt.

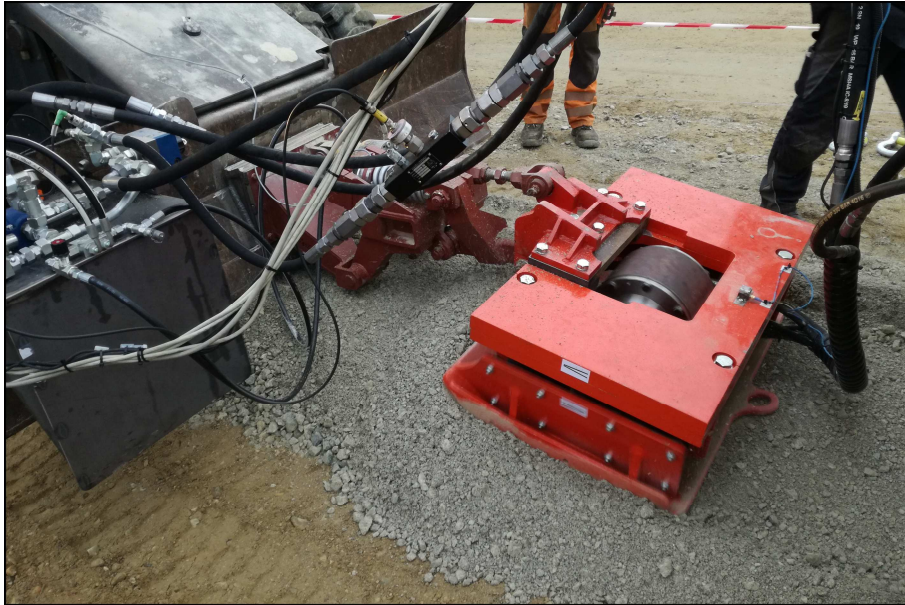


Abbildung 7.6: Plattenverdichter während der Messfahrt;
Versuchsfeld in Fischamend

8 Ergebnisse und Interpretation

Das vorliegende Kapitel umfasst alle erarbeiteten Ergebnisse. Einleitend werden Grundlagen zur Auswertung der Modellergebnisse vorgestellt. Die nachfolgende Auflistung gibt einen Überblick über die durchgeführten Simulationen und Parametervariationen des mechanischen Modells. Es werden jeweils die gewählten Eingangsgrößen erläutert, die Ergebnisse mit Hilfe von Diagrammen dargestellt und eine Beschreibung und Interpretation angeführt.

- Darstellung der drei Betriebsphasen
- Variation der Anregungsfrequenz
- Variation des Schubmoduls
- Variation der Federsteifigkeit und des Dämpfungsparameters zwischen Unter- und Ober- teil des Plattenverdichters
- Variation der Zusatzmasse

Die Ergebnisse in Unterkapitel 8.7 und 8.8 beziehen sich auf die Auswertung der Feldversuche. Die vertikalen Verschiebungen des Plattenverdichters werden einerseits während der Messfahrten so- wie andererseits im Vergleich zwischen dem mechanischen Modell und den Feldversuchen präsen- tiert. Das abschließende Unterkapitel befasst sich mit der Beschreibung der Betriebszustände des Plattenverdichters anhand der davor erhaltenen Ergebnisse.

8.1 Grundlagen zur Auswertung der Modellergebnisse

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erfolgte mit *MATLAB*. In den Diagrammen sind sowohl Verschiebungen als auch Bodenkontaktkräfte oder die bei der Verdichtung geleistete Arbeit aufge- tragen. Die erläuterten Grundlagen beziehen sich auf die Berechnung der während der Verdichtung geleisteten Arbeit.

Zu jedem Zeitschritt ist die Ermittlung der in den Boden eingetragenen Verdichtungsarbeit durch Multiplikation der Bodenkontaktkraft F_b und der Verschiebung z möglich (8.1). Die Verdichtungsar- beit kann in die Anteile zufolge der plastischen und der elastischen Verformungen zerlegt werden, siehe Gleichungen (8.2), (8.3) und (8.4).

$$A_{F_b} = F_b \cdot \Delta z_0 \quad (8.1)$$

$$A_{F_{eder,pl}} = F_b \cdot \Delta z_p \quad (8.2)$$

$$A_{Dämpfer} = (c_e \cdot \Delta \dot{z}_e) \cdot \Delta z_e \quad (8.3)$$

$$A_{F_{eder,el}} = (F_b - c_e \cdot \Delta \dot{z}_e) \cdot \Delta z_e \quad (8.4)$$

Eine wichtige Ergebnisgröße stellt die pro Unwuchtdrehung aufsummierte Arbeit dar. Diese kann in weiterer Folge für den Vergleich verschiedener Eingangsparameterkonfigurationen des Modells verwendet werden.

8.2 Darstellung der drei Betriebsphasen

Die vertikalen Verschiebungen der Plattenverdichter-Boden-Interaktion sind in Abbildung 8.1 dargestellt. Der Abbildung 8.2 bzw. Abbildung 8.3 sind die Diagramme der ebenfalls über die Zeit aufgetragenen Bodenkontaktkräfte zufolge der Anteile des Bodens bzw. des Plattenverdichters zu entnehmen.

Die Simulationsergebnisse wurden für einen Zeitraum von 0,1 Sekunde, das entspricht bei $f = 40$ Hz genau vier Unwuchtdrehungen, dargestellt. Zu Simulationsbeginn findet in der Analyse des Bewegungsverhaltens der Einschwingvorgang statt. Um ausschließlich den eingeschwungenen Zustand zu veranschaulichen, wurden die Ergebnisse im Zeitbereich von 0,3 bis 0,4 Sekunden herangezogen. Die bekannten Berechnungsparameter wurden gemäß Tabelle 6.4 gewählt, für die unbekannten Größen wurden folgende Werte angenommen:

- $c_r = 35\,000$ Ns/m (Dämpfungsparameter zwischen Unter- und Oberteil)
- $G = 7,5$ MN/m² (Schubmodul des Bodens)
das entspricht bei $\nu = 0,30$ etwa $E_{vd} = 24,5$ MN/m²
- $k_r = 2\,000\,000$ N/m (Federsteifigkeit zwischen Unter- und Oberteil)
- $m_z = 0$ kg (Zusatzmasse)

In Abbildung 8.4 ist das Arbeitsdiagramm abgebildet. Für die Darstellung in Abbildung 8.4 erfolgt eine Glättung der Werte über zehn Unwuchtdrehungen.

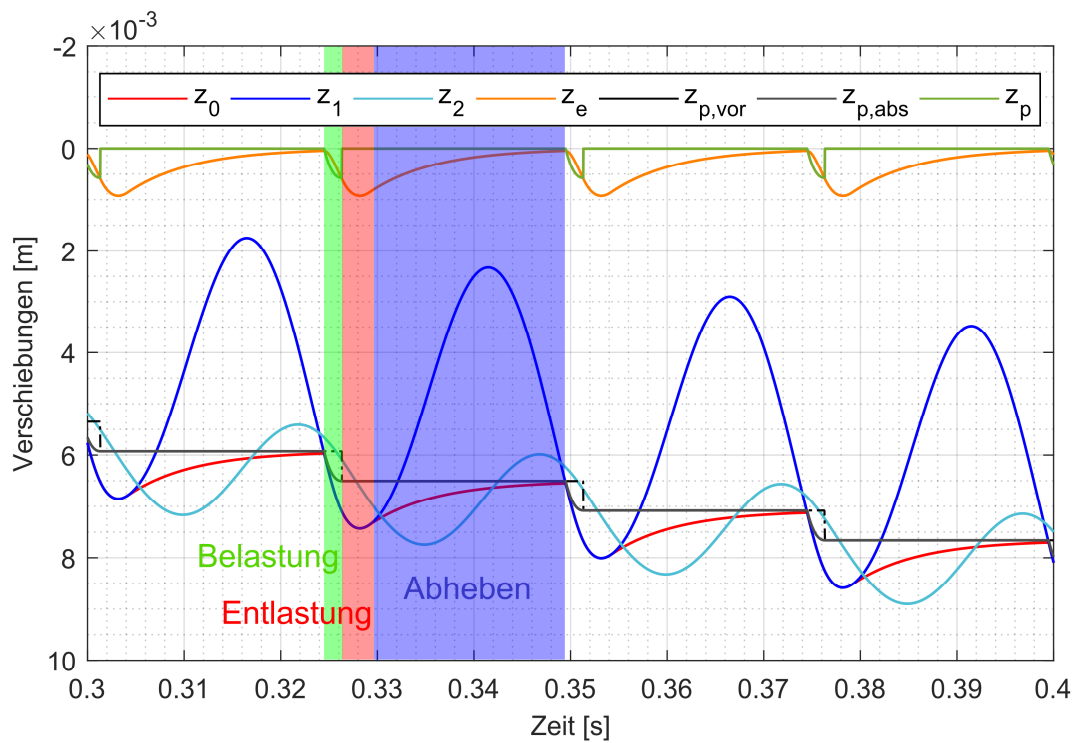


Abbildung 8.1: Verschiebungen mit Kennzeichnung der drei Betriebsphasen

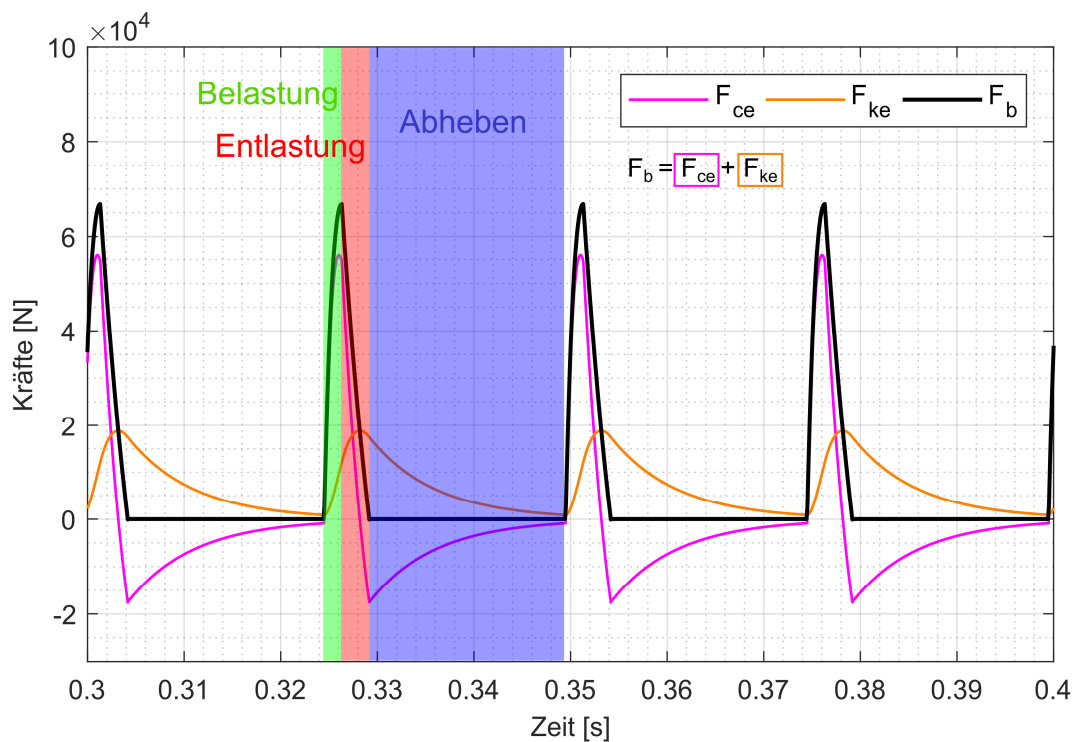


Abbildung 8.2: Bodenkontaktkräfte aufgeteilt nach den Anteilen des Bodens mit Kennzeichnung der drei Betriebsphasen

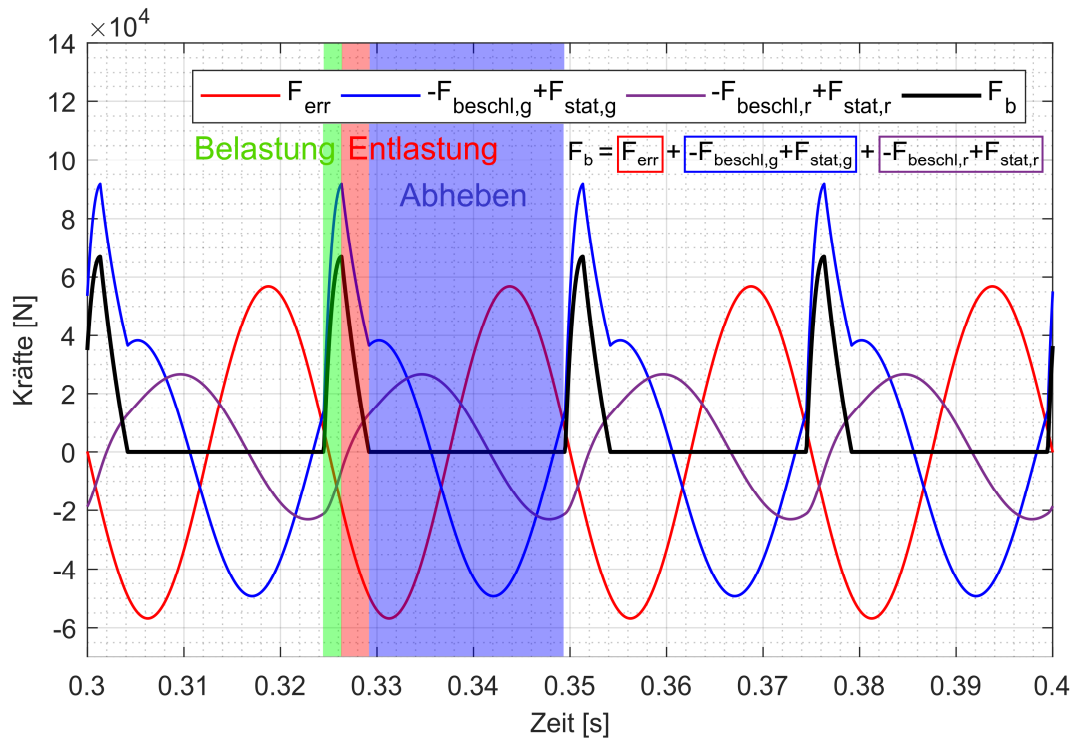


Abbildung 8.3: Bodenkontaktkräfte aufgeteilt nach den Anteilen des Plattenverdichters mit Kennzeichnung der drei Betriebsphasen

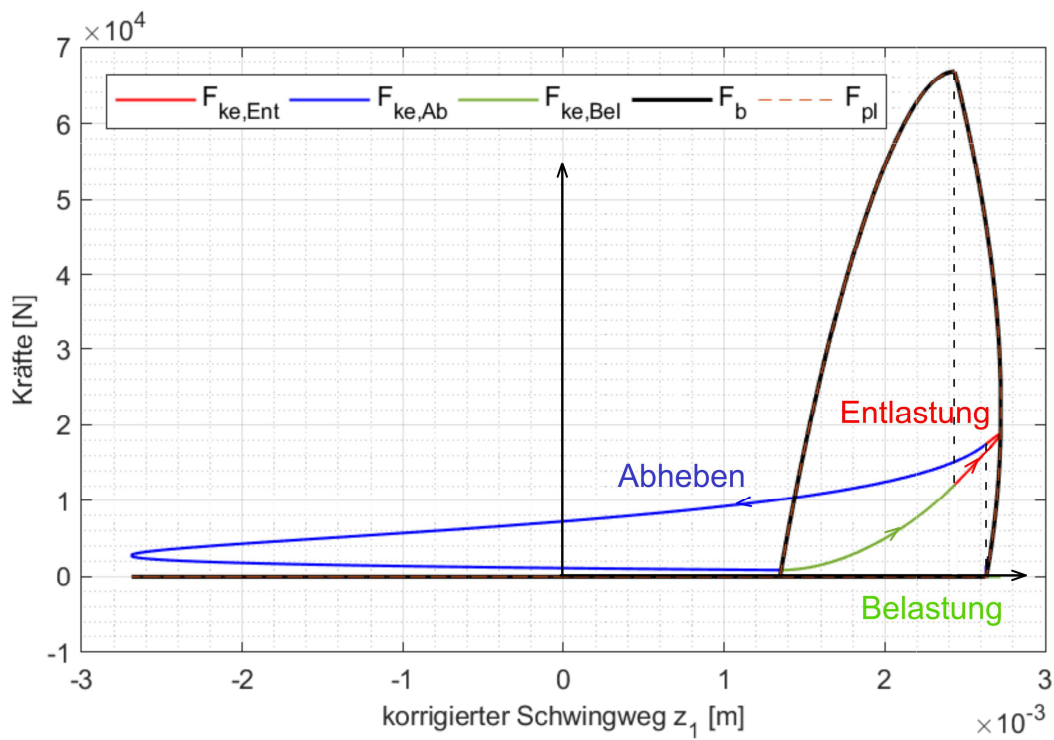


Abbildung 8.4: Arbeitsdiagramm

Beschreibung und Interpretation der Ergebnisse

Während jeder Unwuchtumdrehung treten die drei Betriebsphasen Belastung, Entlastung und Abheben auf. Die Dauer der Betriebsphase Abheben ist deutlich länger als jene der Be- sowie Entlastung. Der Wechsel zwischen den einzelnen Betriebsphasen ist in Abbildung 8.1 klar ersichtlich. Beim Übergang von der Belastung zu Entlastung zeichnet sich ein Sprung in den plastischen Verschiebungen ab. Während des Abhebens kriecht der Boden zurück und es herrscht zwischen der Grundplatte des Plattenverdichters und dem Boden kein Kontakt. Beim Knick in der Verschiebungslinie des Bodens hin zu einer Zunahme der Verschiebungen findet der Wechsel vom Abheben zur Belastung statt. Die Grundplatte trifft allerdings vor der kompletten Rückverformung der elastischen Feder wieder auf den Boden auf.

Mit den angenommenen Werten der Federsteifigkeit k_r und des Dämpfungsparameters c_r der Gummipuffer ist der vertikale Schwingweg des Unterteils (Grundplatte) etwa doppelt so groß wie jener des Oberteils (Rahmen). Zwischen den Schwingungen des Unter- und Oberteils stellt sich eine Phasenverschiebung von etwa $0,4 \pi$ ein.

Eine positive Bodenkontaktkraft kann ausschließlich in den Betriebsphasen Belastung und Entlastung auftreten. Diese steigt während der Belastung an und nimmt in der Entlastungsphase wieder ab. Betrachtet man die Bodenkontaktkraft F_b des Teilsystems Boden (siehe Abbildung 8.2) kann diese in die Anteile zufolge Dämpfung F_{ce} und elastischer Federsteifigkeit F_{ke} aufgespalten werden. Die Bodenkontaktkraft F_b in Abbildung 8.3 kann in die Erregerkraft F_{err} , die Beschleunigungskräfte und statischen Kräfte der Grundplatte $-F_{beschl,g} + F_{stat,g}$ und jene des Rahmens $-F_{beschl,r} + F_{stat,r}$ aufgeteilt werden.

Im Arbeitsdiagramm (siehe Abbildung 8.4) sind die Kraft-Verschiebungspfade der drei Betriebsphasen erkennbar. Das Abheben zeichnet sich durch einen verhältnismäßig großen Schwingweg aus. Die vertikalen Schwingwege während einer Unwuchtumdrehung reichen von rund -3 mm bis $+3$ mm. Der nahezu lineare Pfad der Entlastung lässt auf den rein elastischen Vorgang schließen. Die durch die Bodenkontaktkraft eingeschlossene Fläche stellt die geleistete Arbeit während einer Unwuchtumdrehung dar.

Kontrolle der Bodenkontaktkraft

Eine Kontrolle der Simulationsergebnisse erfolgt über den Vergleich der wirksamen statischen Kräfte. Die Bodenkontaktkraft setzt sich aus der Erregerkraft sowie den statischen Kräften und den Beschleunigungskräften gemäß Gleichung (8.5) zusammen. Die im mechanischen Modell wirksame statische Kraft kann aus dem Gewicht des Plattenverdichters ermittelt werden, siehe Gleichung (8.6). Die über eine Unwuchtumdrehung gemittelte Bodenkontaktkraft muss, unter der Voraussetzung eines eingeschwungenen, gleichmäßigen, periodischen Bewegungsverhaltens, der statischen Gewichtskraft entsprechen. Dieser Zusammenhang ist über den Zeitbereich von vier Unwuchtumdrehungen in Abbildung 8.5 dargestellt.

$$F_b = F_{err} + F_{stat,g} - F_{beschl,g} + F_{stat,r} - F_{beschl,r} \quad (8.5)$$

$$F_{stat} = (m_g + m_e + m_r) \cdot g = (295 + 20 + 385) \cdot 9,81 = 6867 \text{ N} \quad (8.6)$$

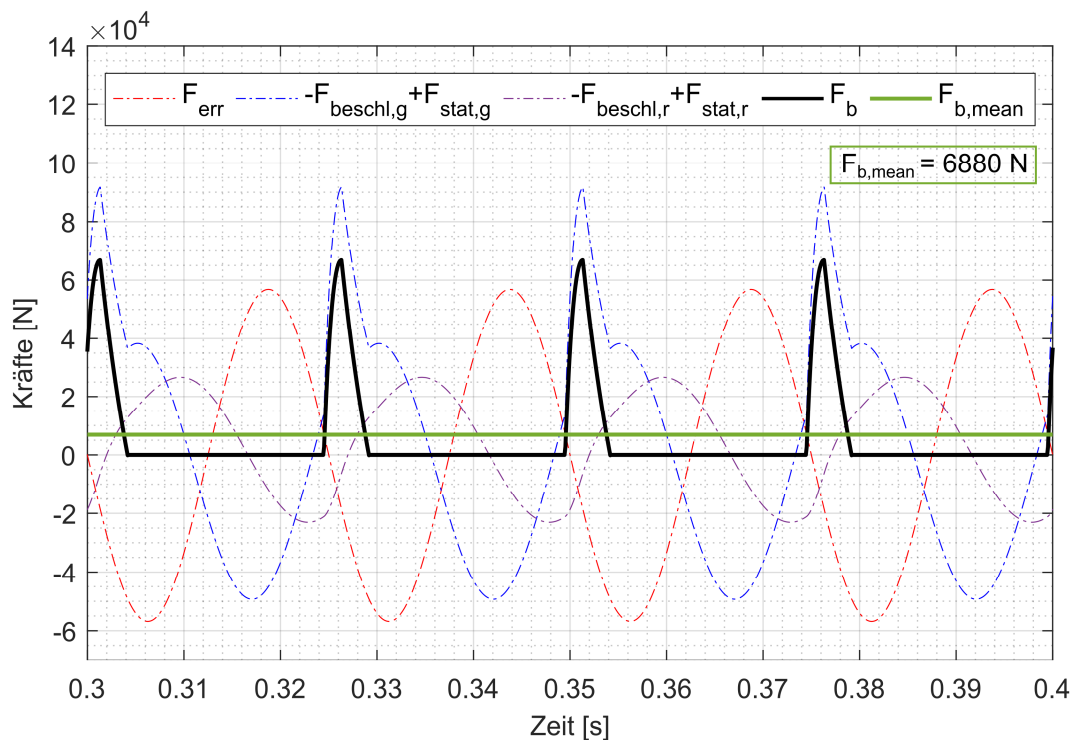


Abbildung 8.5: Bodenkontaktkräfte aufgeteilt nach den Anteilen des Plattenverdichters über die Zeit mit Kennzeichnung der mittleren Bodenkontaktkraft

Mit einer statischen Kraft von 6867 N nach Gleichung (8.6) und der im Diagramm (siehe Abbildung 8.5) gezeigten gemittelten Bodenkontaktkraft von 6880 N kann die Kontrolle als zufriedenstellend erfüllt betrachtet werden.

8.3 Variation der Anregungsfrequenz

Dieses Unterkapitel befasst sich mit dem Einfluss der Anregungsfrequenz auf die Interaktion des Plattenverdichters mit dem Boden. Dafür wurden die Simulationen mit den folgenden Frequenzen durchgeführt:

- $f = 30$ Hz
- $f = 40$ Hz
- $f = 40$ Hz

Die Unterschiede werden hinsichtlich der Verschiebungen in Abbildung 8.6 und der Bodenkontaktkräfte in Abbildung 8.7 untersucht. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wurde der Zeitraum von 0 bis 0,5 Sekunden gewählt. Dadurch sind der Simulationsbeginn und das Bewegungsverhalten im eingeschwungenen Zustand ersichtlich. Die bekannten Berechnungsparameter wurden gemäß Tabelle 6.4 gewählt, für die unbekanntes Größen wurden folgende Werte angenommen:

- $c_r = 35\,000$ Ns/m (Dämpfungsparameter zwischen Unter- und Oberteil)
- $G = 7,5$ MN/m² (Schubmodul des Bodens)
das entspricht bei $\nu = 0,30$ etwa $E_{vd} = 24,5$ MN/m²
- $k_r = 2\,000\,000$ N/m (Federsteifigkeit zwischen Unter- und Oberteil)
- $m_z = 0$ kg (Zusatzmasse)

Die maximale Bodenkontaktkraft und die in den Boden eingebrachte Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung sind für jede Frequenzvariation in Tabelle 8.1 festgehalten. Das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters ist im eingeschwungenen Zustand für alle Frequenzen periodisch und die ermittelte Bodenkontaktkraft sowie die Arbeit nehmen für jede Unwuchtumdrehung den gleichen Wert an. Für die Ergebnisse im eingeschwungenen Zustand wurde jeweils ein Zeitbereich ab 0,15 Sekunden nach Simulationsbeginn herangezogen.

Tabelle 8.1: Maximale Bodenkontaktkraft und eingebrachte Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für verschiedene Frequenzen

		Maximale Bodenkontaktkraft [N]	Eingebrachte Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung [Nm]
Frequenz f [Hz]	30	59 100	61
	40	66 800	66
	50	70 300	63

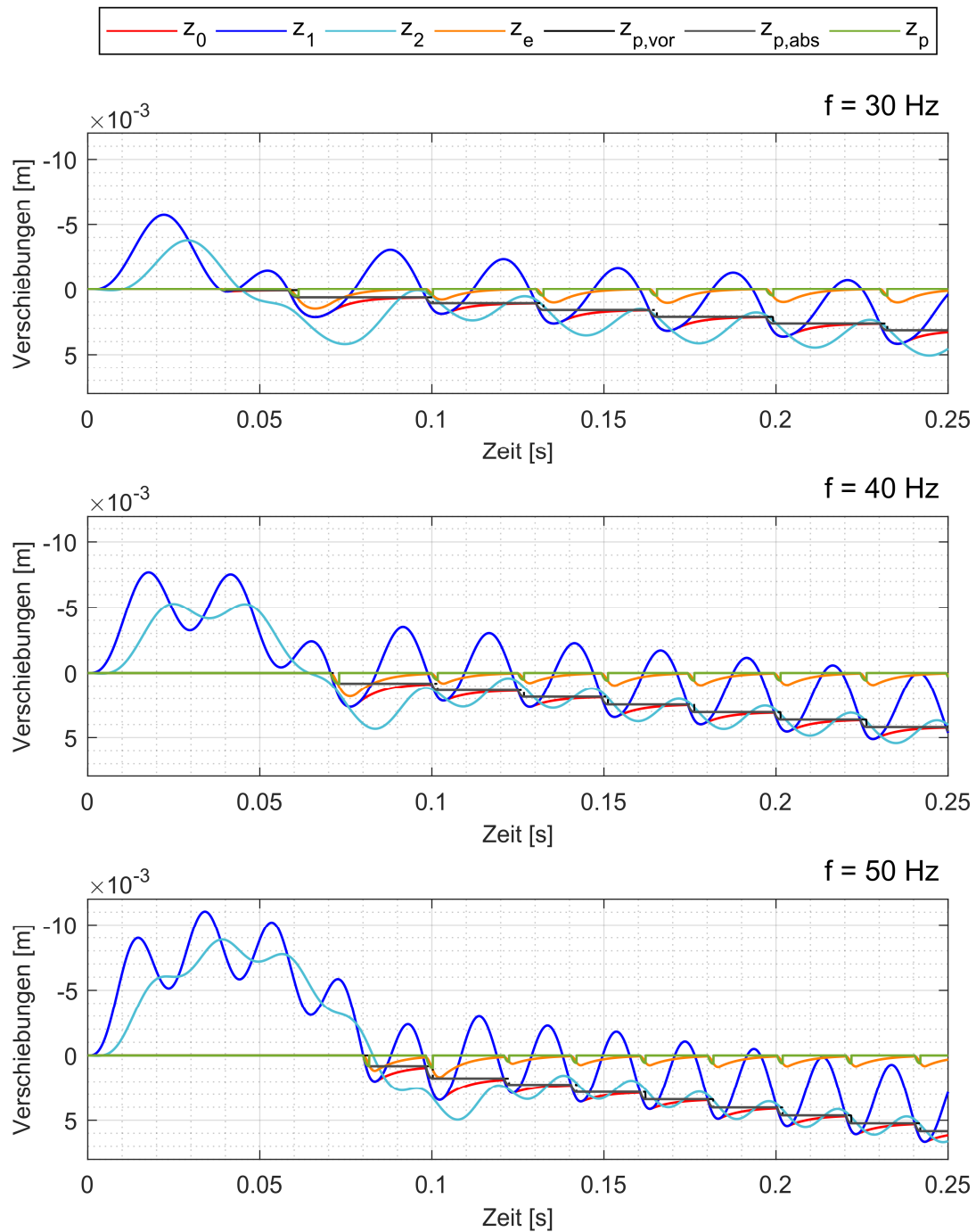


Abbildung 8.6: Verschiebungen; $f = 30 \text{ Hz}$, $f = 40 \text{ Hz}$ und $f = 50 \text{ Hz}$ (von oben nach unten)

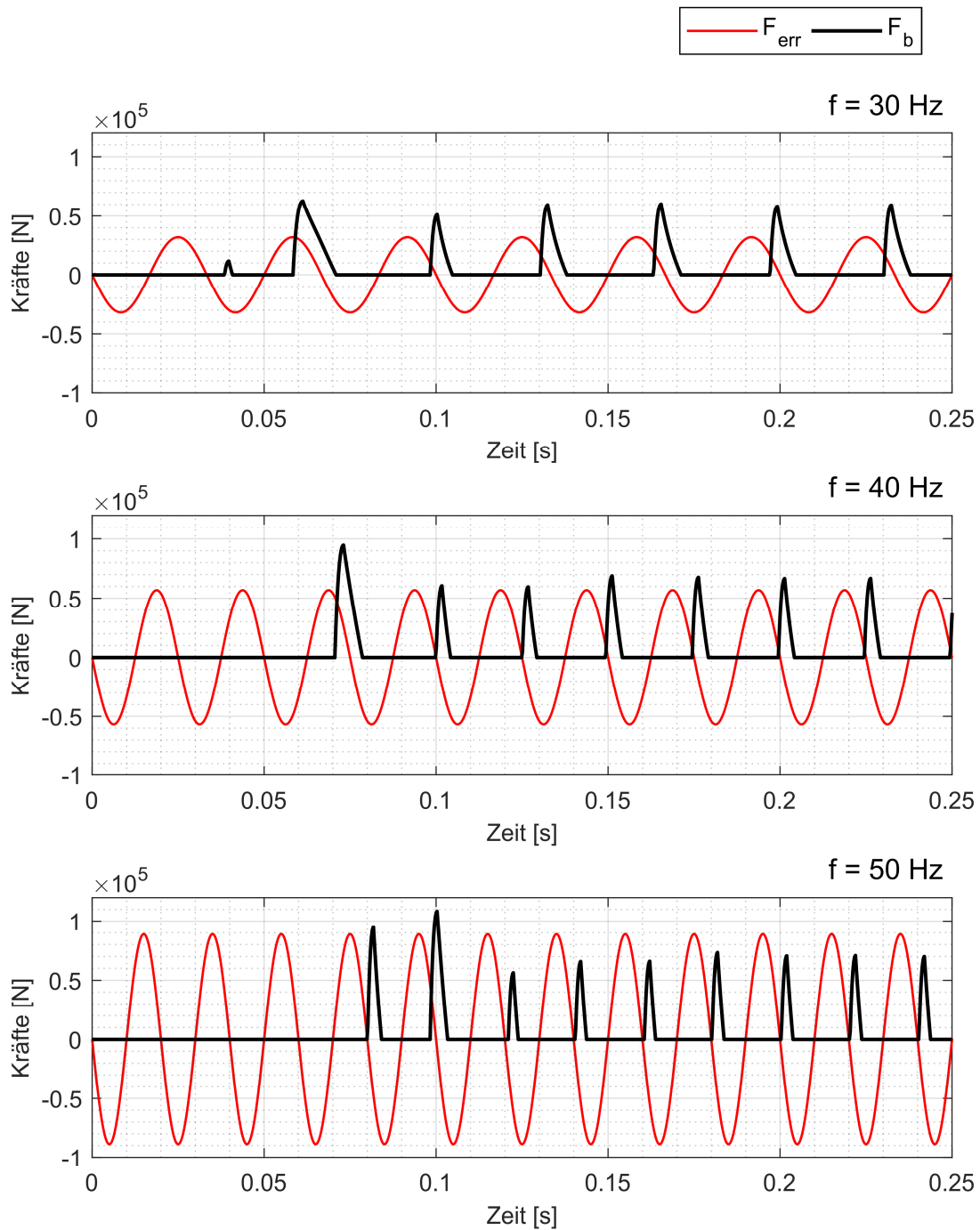


Abbildung 8.7: Erregerkraft und Bodenkontaktkraft; $f = 30$ Hz, $f = 40$ Hz und $f = 50$ Hz (von oben nach unten)

Beschreibung und Interpretation der Ergebnisse

Je höher die Anregungsfrequenz f ist, desto länger dauert es, bis sich ein eingeschwungener Zustand und eine regelmäßige Abfolge der Betriebsphasen Belastung, Entlastung und Abheben einstellt (siehe Abbildung 8.6). Die vertikalen Schwingwege des Plattenverdichters vergrößern sich mit dem Anstieg der Frequenz. Eine höhere Frequenz führt über die gleiche Zeitspanne zu einer

vergleichsweise größeren Eindringtiefe der Grundplatte in den Boden. Das Verhältnis der jeweiligen Dauer der einzelnen Betriebsphasen ist für die drei angeführten Frequenzvariationen annähernd gleich und somit von der Frequenz weitgehend unabhängig. Die aus der sinusförmigen Anregung der Unwucht entstehende Erregerkraft ist in Abbildung 8.7 erkennbar, wobei diese bei einer höheren Frequenz ansteigt. Die Bodenkontaktkraft verhält sich ähnlich und wächst bei einer Vergrößerung der Frequenz deutlich an. Dieser Zusammenhang ist auch in Tabelle 8.1 veranschaulicht. Die Anregungsfrequenz und die in den Boden eingebrachte Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung verhalten sich nicht proportional zueinander. Die geleistete Arbeit der drei untersuchten Variationen unterscheidet sich allerdings nur geringfügig.

Der Einfluss und die Auswirkungen der Veränderung der Anregungsfrequenz sind auf das Bewegungsverhalten als minimal zu bezeichnen. Die Verdichtungswirkung von Vibrationsverdichtungsgeräten ist vom Schlagabstand abhängig. Der Schlagabstand definiert den zurückgelegten Weg zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kontaktphasen von Verdichtungsgerät und Boden. Daher ist der Schlagabstand neben der Frequenz auch von der Arbeitsgeschwindigkeit des Verdichtungsgerätes abhängig. Die gleisgebundenen Unterbausanierungsarbeiten werden mit einer sehr geringen Geschwindigkeit von 70 m/h durchgeführt. Der Schlagabstand s errechnet sich, wie in Gleichung (8.7) angeführt, aus dem Verhältnis der Arbeitsgeschwindigkeit v zur Erregerfrequenz f [21]. Die entstehende Schlagabstandsdifferenz Δs der gewählten Frequenzen von 30 Hz und 50 Hz ist den Gleichungen (8.8) bis (8.10) zu entnehmen.

$$s = \frac{v}{f} \quad (8.7)$$

$$s_1 = \frac{v}{f_1} = \frac{0,0194 \text{ m/s}}{30 \text{ Hz}} = 0,000648 \text{ m} \quad (8.8)$$

$$s_2 = \frac{v}{f_2} = \frac{0,0194 \text{ m/s}}{50 \text{ Hz}} = 0,000389 \text{ m} \quad (8.9)$$

$$\Delta s = s_1 - s_2 = 0,648 - 0,389 = 0,259 \text{ mm} \quad (8.10)$$

Neben den geringen Unterschieden im Bewegungsverhalten des Plattenverdichters zufolge verschiedener Anregungsfrequenzen ist auch die Differenz der Schlagabstände mit 0,26 mm besonders klein. Das mechanische Modell bildet zudem keinen Verdichtungs Vorgang, sondern ausschließlich einen Verdichtungszustand ab. Zusammenfassend spielt die Variation der Anregungsfrequenz im untersuchten Wertebereich eine untergeordnete Rolle hinsichtlich der Beschreibung der Interaktion des Plattenverdichters mit dem Boden.

8.4 Variation des Schubmoduls

Der Schubmodul des Bodens ist ein unbekannter Eingangsparameter und jeweils vom zu verdichtenden Material abhängig. Um dessen Einfluss auf das Bewegungsverhalten zu untersuchen, wurde der Schubmodul einer Variation unterzogen. Die Eingabe in das Modell kann einerseits über den Schubmodul G selbst oder über den dynamischen Verformungsmodul E_{vd} , die Umrechnung dazu ist in Abschnitt 6.6.5 angeführt, erfolgen.

Für jede gewählte Parameterkonfiguration, also jede Änderung des Schubmoduls, werden sowohl die vertikalen Verschiebungen (siehe Abbildung 8.10 bis Abbildung 8.13), als auch die Bodenkontaktkräfte und die daraus abgeleitete Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung (siehe Abbildung 8.14) dargestellt. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse wird der Zeitraum von 0,3 bis 0,7 Sekunden gewählt, das entspricht bei einer Anregungsfrequenz von $f = 40$ Hz genau 16 Unwuchtumdrehungen. Die Anzahl der in den Diagrammen angezeigten Unwuchtumdrehungen wird im Vergleich zu den Ergebnissen aus Abschnitt 8.2 erhöht, um mögliche Periodenfolgen besser erkennen zu können. Die bekannten Berechnungsparameter wurden gemäß Tabelle 6.4 gewählt, für die unbekanntes Größen wurden folgende Werte angenommen:

- $c_r = 35\,000$ Ns/m (Dämpfungsparameter zwischen Unter- und Oberteil)
- $k_r = 2\,000\,000$ N/m (Federsteifigkeit zwischen Unter- und Oberteil)
- $m_z = 0$ kg (Zusatzmasse)

Die Wahl des untersuchten Schubmoduls erfolgt unter Berücksichtigung der im Zuge der Feldversuche am 20. November gemessenen dynamischen Verformungsmoduln. Als begleitende Kontrolle des Verdichtungserfolges wurde der dynamische Lastplattenversuch herangezogen. Der E_{vd} -Wert wurde für jede Spur an drei Messpunkten und jeweils am Aushubplanum, auf der locker gelagerten Schicht, nach der ersten Verdichtungsfahrt sowie nach dem zweiten Übergang ermittelt (siehe Abschnitt 7.3). Die Ergebnisse zeigen für jeden Messpunkt den Mittelwert der drei Einzelversuche und sind in den Diagrammen der Abbildung 8.8 für Spur 1 und Abbildung 8.9 für Spur 2 dargestellt.

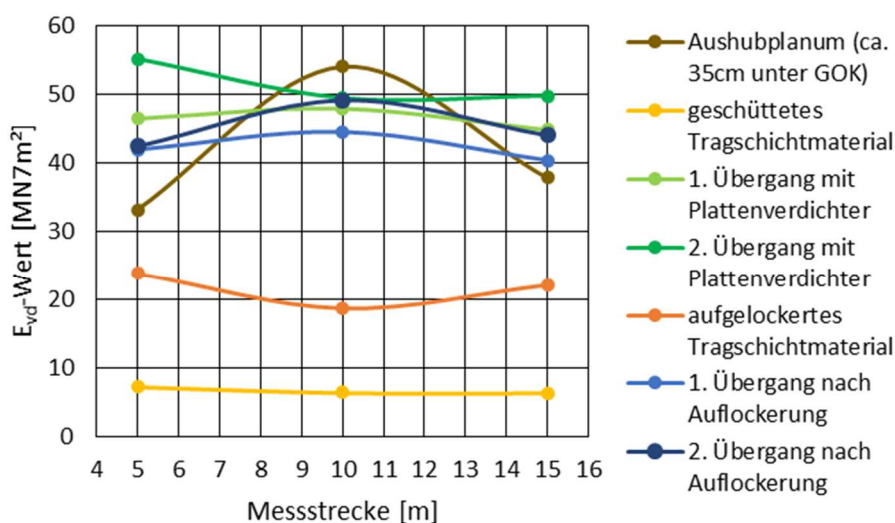


Abbildung 8.8: Gemessene E_{vd} -Werte des Testfeldes auf Spur 1

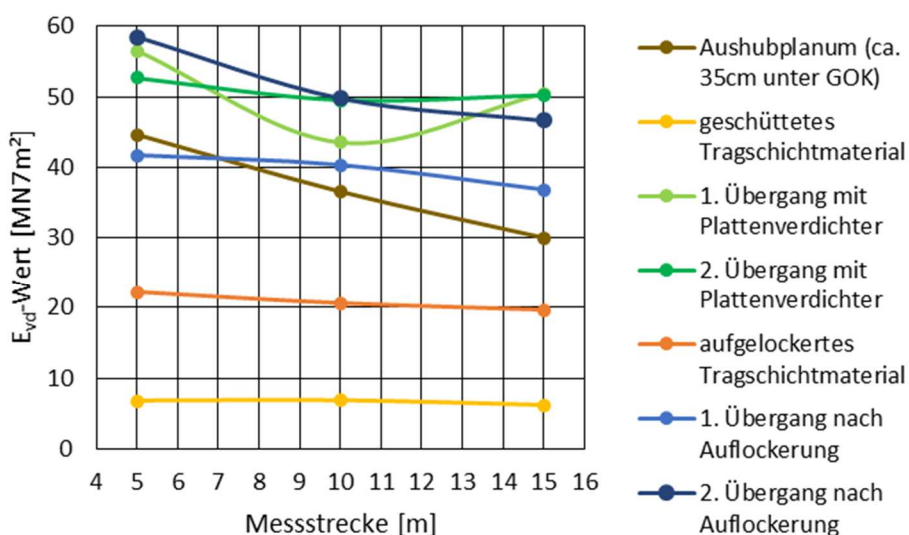


Abbildung 8.9: Gemessene E_{vd} -Werte des Testfeldes auf Spur 2

Aus den Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen werden Rückschlüsse auf realistische Eingangsparameter für den Schubmodul gezogen. Der Plattenverdichter wird aufgrund seiner geringen Arbeitsgeschwindigkeit am vorderen Ende der Grundplatte auf den noch unverdichteten und am hinteren Ende auf den endverdichteten Boden auftreffen. Der mittlere dynamische Verformungsmodul wird daher auf $E_{vd} = 24,5 \text{ MN/m}^2$ geschätzt. Die Variation des Schubmoduls wird mit folgenden Werten durchgeführt:

- $E_{vd} = 10 \text{ MN/m}^2 \rightarrow G \approx 3,05 \text{ MN/m}^2$
- $E_{vd} = 25 \text{ MN/m}^2 \rightarrow G \approx 7,6 \text{ MN/m}^2$
- $E_{vd} = 40 \text{ MN/m}^2 \rightarrow G \approx 13,7 \text{ MN/m}^2$

- $E_{vd} = 55 \text{ MN/m}^2 \rightarrow G \approx 20,6 \text{ MN/m}^2$

Durch die Variation des dynamischen Verformungsmoduls des Bodens kann sowohl periodisches Abheben der Grundplatte als auch ein Aufschlagen des Plattenverdichters mit jeder zweiten Unwuchtumdrehung hervorgerufen werden. Dazwischen findet ein abwechselndes Auftreffen der Grundplatte mit einem starken und einem schwachen Schlag statt. Dieses Verhalten ist allerdings nur in einem sehr engen Wertebereich des dynamischen Verformungsmoduls zu beobachten. Für die Darstellung dieses Bewegungsmusters (siehe Abbildung 8.15) wird der dynamische Verformungsmodul folgendermaßen festgelegt:

- $E_{vd} = 49 \text{ MN/m}^2 \rightarrow G \approx 17,9 \text{ MN/m}^2$

Die maximale Bodenkontaktkraft und die in den Boden eingebrachte Verdichtungsarbeit sind in Tabelle 8.2 festgehalten. Für diese Auswertung wurden jeweils zwei Unwuchtumdrehungen betrachtet, da während dem Springen ein nur mit jeder zweiten Unwuchtumdrehung periodisches Bewegungsverhalten stattfindet.

Tabelle 8.2: Maximale Bodenkontaktkraft und eingebrachte Verdichtungsarbeit für zwei Unwuchtumdrehung für verschiedene dynamische Verformungsmoduln

		Maximale Bodenkontaktkraft [N]	Eingebrachte Verdichtungsarbeit für zwei Unwuchtumdrehung [Nm]
dynamische Verformungsmodul E_{vd} [MN/m ²]	10	47 000	149,2
	25	67 300	131,3
	40	86 000	119,9
	49	123 800	120,3
	55	139 300	126,6

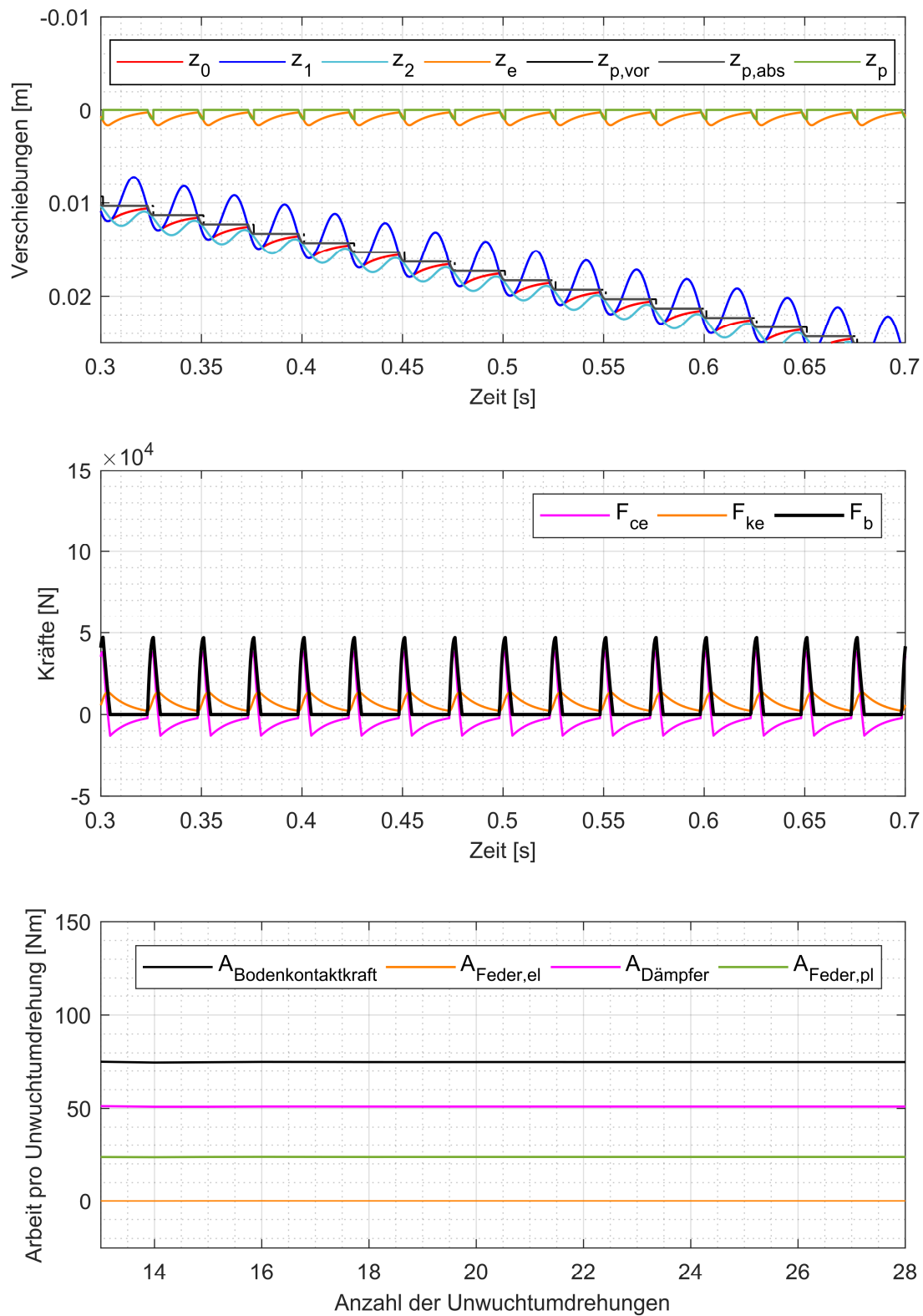


Abbildung 8.10: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung für $E_{vd} = 10 \text{ MN/m}^2$ ($G = 3,05 \text{ MN/m}^2$)

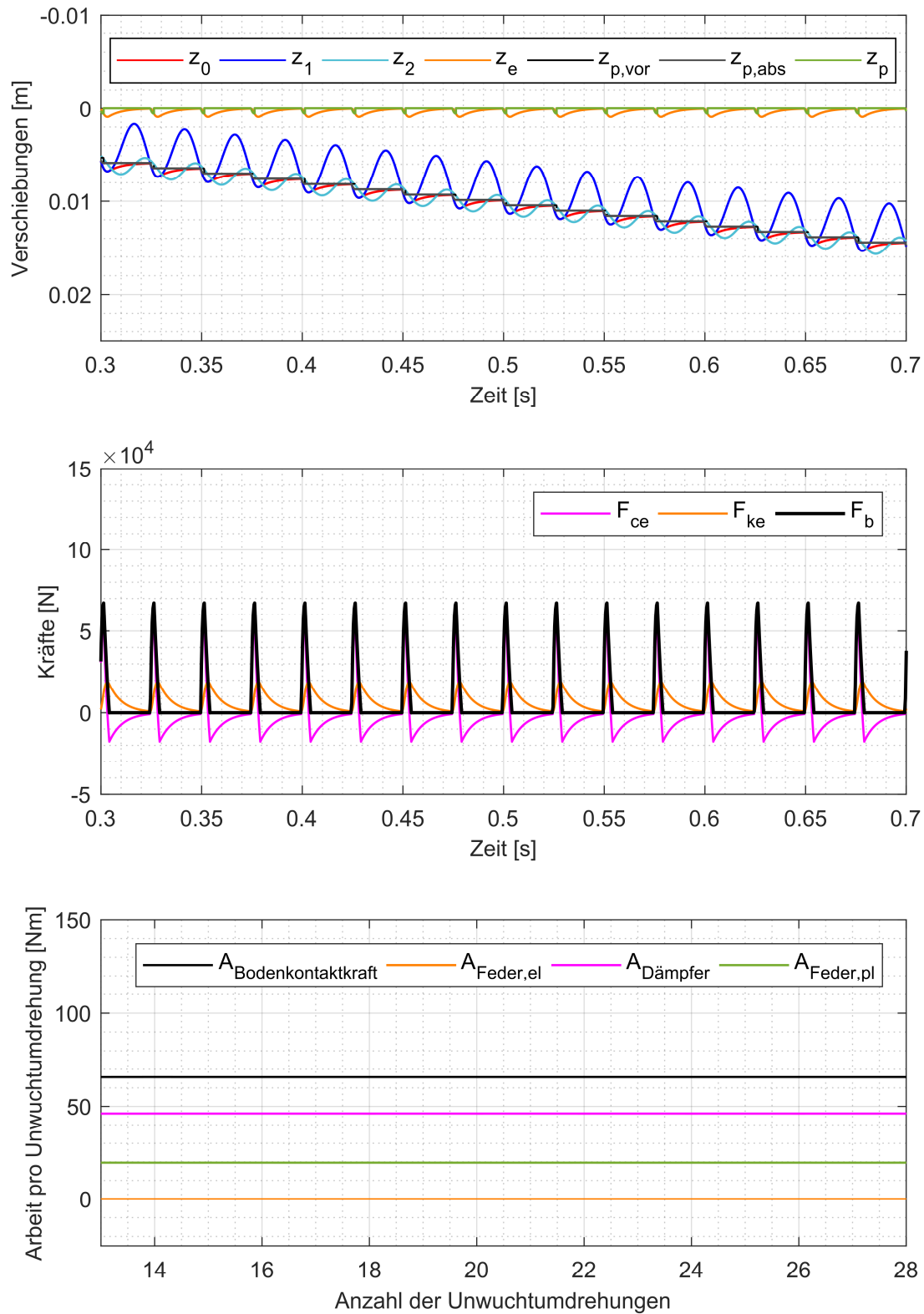


Abbildung 8.11: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung für $E_{vd} = 25 \text{ MN/m}^2$ ($G = 7,6 \text{ MN/m}^2$)

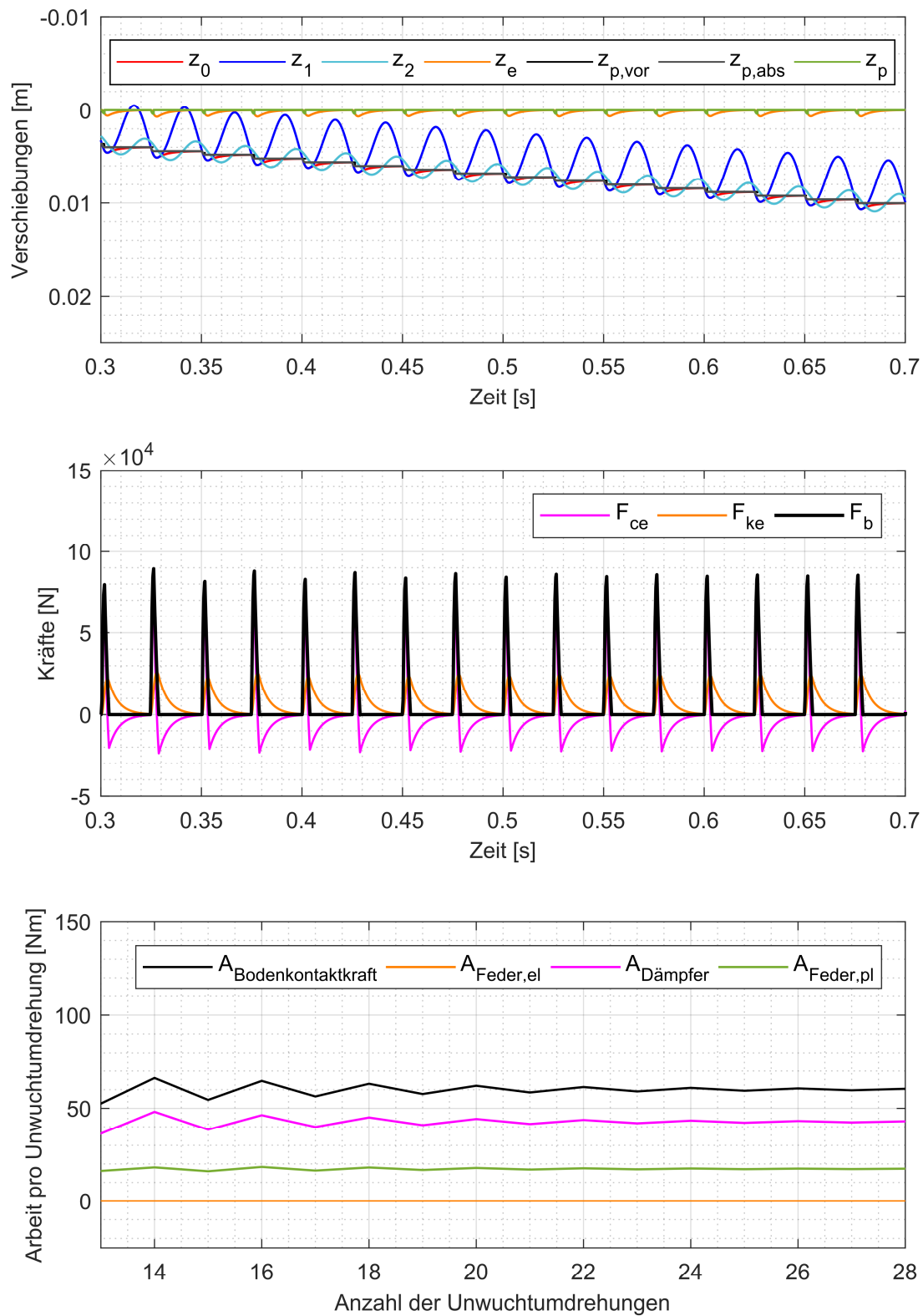


Abbildung 8.12: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung für $E_{vd} = 40 \text{ MN/m}^2$ ($G = 13,7 \text{ MN/m}^2$)

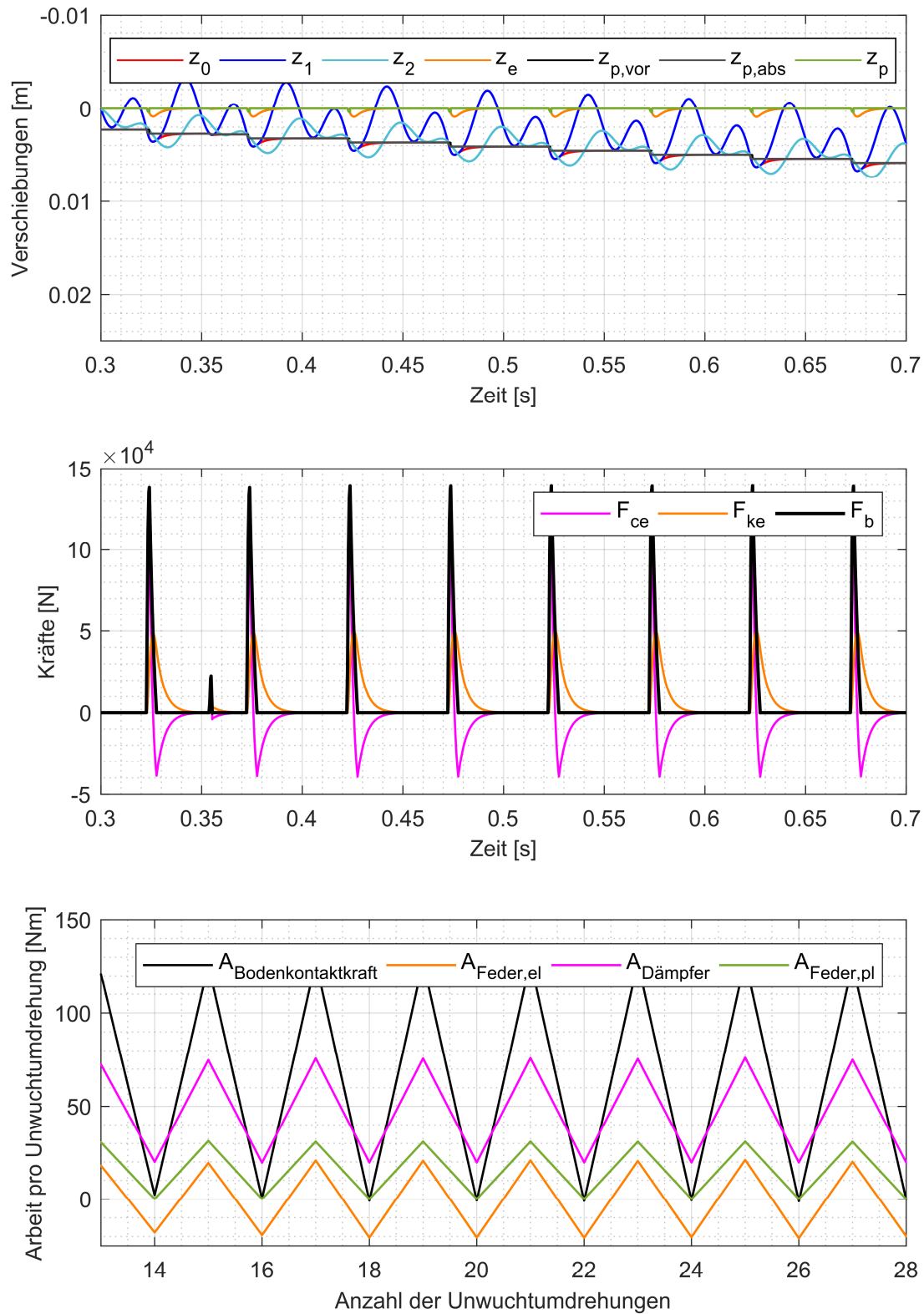


Abbildung 8.13: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung für $E_{vd} = 55 \text{ MN/m}^2$ ($G = 20,6 \text{ MN/m}^2$)

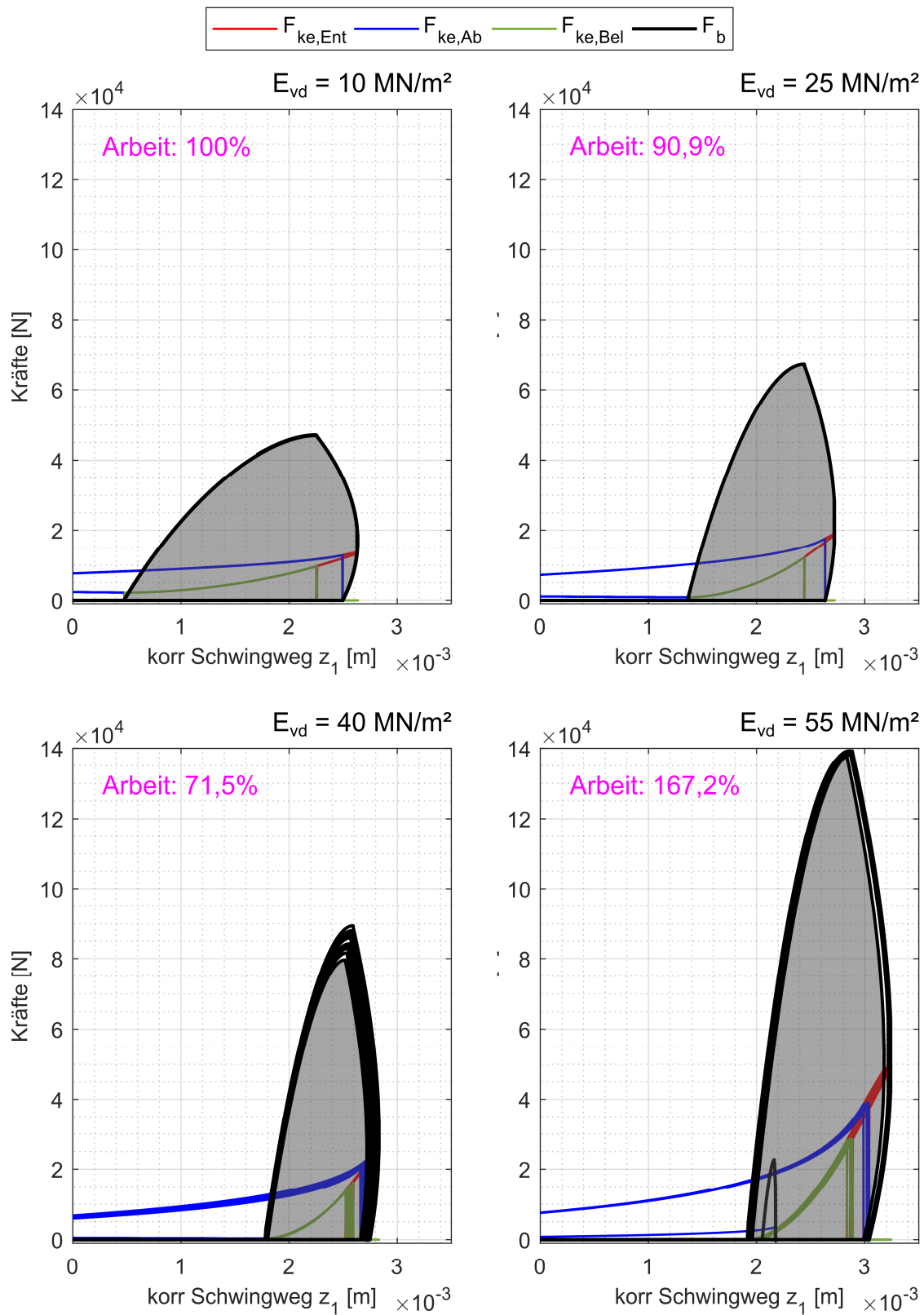


Abbildung 8.14: Arbeitsdiagramme; links oben: für $E_{vd} = 10 \text{ MN/m}^2$; rechts oben: für $E_{vd} = 25 \text{ MN/m}^2$; links unten: für $E_{vd} = 40 \text{ MN/m}^2$; rechts unten: für $E_{vd} = 55 \text{ MN/m}^2$

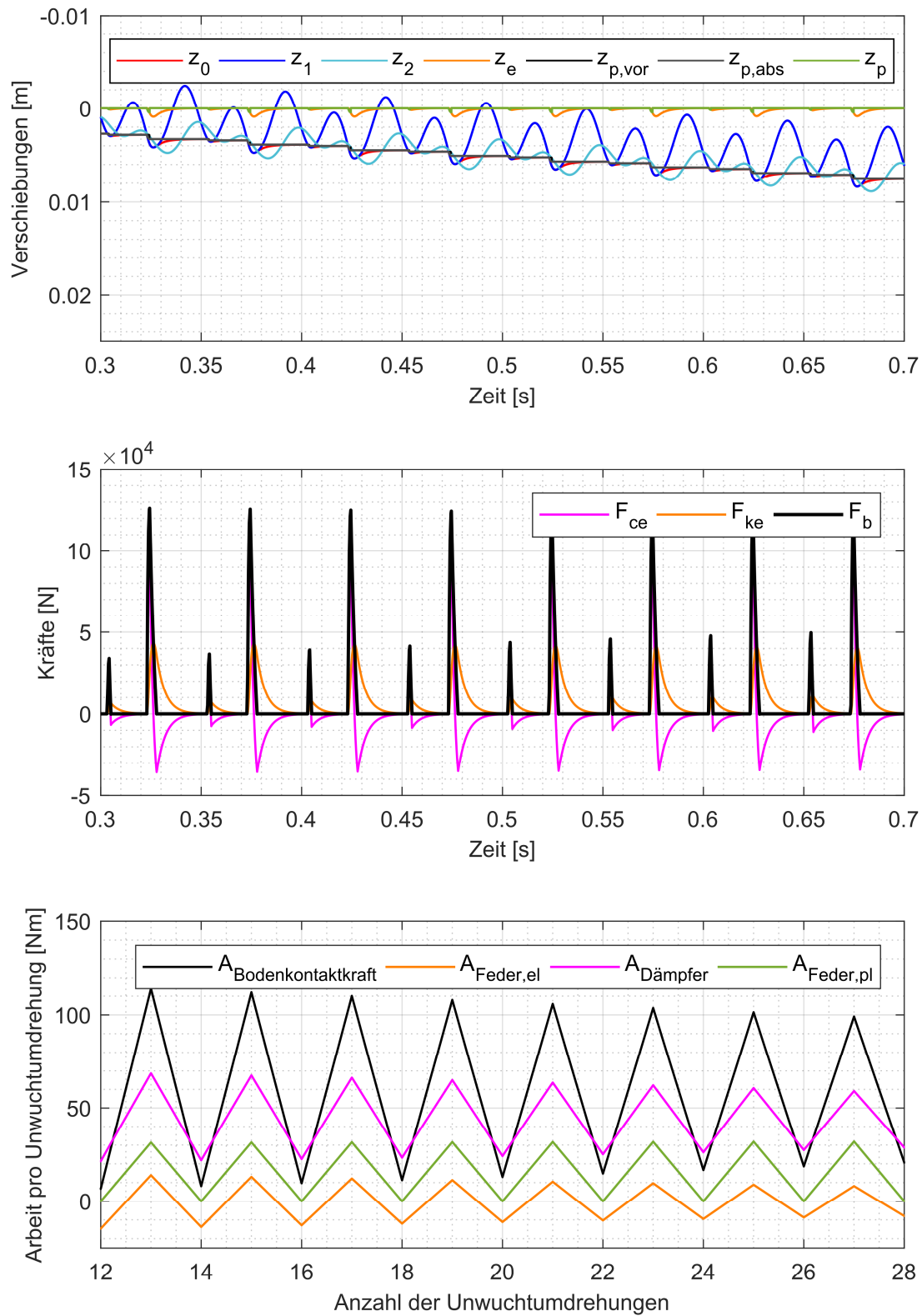


Abbildung 8.15: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung für $E_{vd} = 49 \text{ MN/m}^2$ ($G = 17,9 \text{ MN/m}^2$)

Beschreibung und Interpretation der Ergebnisse

Betrachtet man das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters in den Abbildung 8.10 bis Abbildung 8.13, ergeben sich für den gleichen Zeitraum in einem Boden mit geringem Schubmodul bzw. dynamischem Verformungsmodul wesentlich größere Verschiebungen und die Grundplatte dringt tiefer in das zu verdichtende Material ein. Je größer der Schubmodul ist, desto unregelmäßiger wird das Bewegungsverhalten. Beispielsweise schlägt bei $E_{vd} = 55 \text{ MN/m}^2$ die Grundplatte, wie in Abbildung 8.13 ersichtlich, nur nach jeder zweiten Unwuchtumdrehung auf dem Boden auf. Die maximal auftretende Bodenkontaktkraft nimmt in einem Boden mit höherem E_{vd} -Wert zu. Vergleicht man die Bodenkontaktkraft für $E_{vd} = 10 \text{ MN/m}^2$ mit jener für $E_{vd} = 40 \text{ MN/m}^2$, erreicht zweitere eine fast zweimal größere maximale Kraft. Eine Bodenkontaktkraft kann bei $E_{vd} = 55 \text{ MN/m}^2$ nur mit jeder zweiten Unwuchtumdrehung, also immer dann, wenn ein Kontakt zwischen Untergrund und Verdichtungsgerät stattfindet, auftreten. Die Arbeit pro Unwuchtumdrehung nimmt bei geringem E_{vd} -Wert des zu verdichtenden Materials während jedem Bodenkontakt den gleichen Wert an und es stellt sich ein konstanter Verlauf ein. Zusammengefasst entwickeln sich mit dem Anstieg des dynamischen Verformungsmoduls Unregelmäßigkeiten und die in maximale Bodenkontaktkraft nimmt deutlich zu.

Die Arbeitsdiagramme in Abbildung 8.14 veranschaulichen, dass sich die geleistete Arbeit nicht proportional zum steigenden dynamischen Verformungsmodul verhält. Als Bezugsgröße (100%) wurde die geleistete Arbeit für $E_{vd} = 10 \text{ MN/m}^2$ herangezogen. Deutlich erkennbar ist in den Arbeitsdiagrammen der Neigungsanstieg des Belastungspfades bei größerem dynamischem Verformungsmodul. Dieser Zusammenhang wurde bereits in Unterkapitel 4.5.3 beschrieben. Je geringer der dynamische Verformungsmodul ist, desto länger findet ein Kontakt zwischen der Grundplatte und dem Untergrund statt.

In Abbildung 8.15 sind die Verschiebungen, die Bodenkontaktkräfte und die Arbeit pro Unwuchtumdrehung für $E_{vd} = 49 \text{ MN/m}^2$ aufgetragen. Genau in diesem Wertebereich treten abwechselnd eine größere und eine kleinere Bodenkontaktkraft auf. Dieses ablaufende Wechselspiel zeigt sich auch in den Verschiebungen und der Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung. Um die Berechnungsergebnisse des Betriebszustand Abheben mit jenen des Betriebszustand Springen vergleichen zu können, müssen zwei Unwuchtumdrehungen betrachtet werden (siehe Tabelle 8.2).

Unter sonst konstanten Eingangsparametern und einer ausschließlichen Vergrößerung des Schubmoduls des Bodens reduziert sich die Eindringtiefe in das zu verdichtende Material und die maximale Bodenkontaktkraft steigt an. Die jeweils für zwei Unwuchtumdrehungen betrachtete eingebrachte Verdichtungsarbeit verhält sich nicht proportional zum Schubmodul, liegt allerdings in einem ähnlichen Wertebereich. Der Schubmodul bzw. der dynamische Verformungsmodul haben einen wesentlichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters während der Verdichtung.

8.5 Variation von Federsteifigkeit und Dämpfungsparameter der Gummipuffer

Zwei unbekannte Berechnungsparameter stellen die Federsteifigkeit und der Dämpfungsparameter der Gummipuffer zwischen dem Unter- und Oberteil des Plattenverdichters dar. Im ersten Schritt werden sinnvoll erscheinende Werte angenommen, wobei für beide Eingangsparameter keine Größenordnung bekannt ist. Eine Variantenstudie der Kombination von Federsteifigkeit k_r und Dämpfungsparameter c_r ist daher unumgänglich.

Die Simulationsergebnisse werden wiederum für einen Zeitraum von 0,3 bis 0,7 Sekunden betrachtet. Das entspricht bei einer Anregungsfrequenz von $f = 40$ Hz genau 16 Unwuchtdrehungen und dadurch einem entsprechend langen Zeitraum, um Regelmäßigkeiten identifizieren zu können. Die bekannten Berechnungsparameter wurden gemäß Tabelle 6.4 gewählt, für die unbekanntes Größen wurden folgende Werte angenommen:

- $G = 7,5 \text{ MN/m}^2$ (Schubmodul des Bodens)
das entspricht bei $\nu = 0,30$ etwa $E_{vd} = 24,5 \text{ MN/m}^2$
- $m_z = 0 \text{ kg}$ (Zusatzmasse)

Zunächst veranschaulicht Tabelle 8.3 entsprechend der verschiedenen Kombinationen der Federsteifigkeit und des Dämpfungsparameters die maximal auftretende Bodenkontaktkraft im betrachteten Zeitraum. Die Parameter werden jeweils um eine Zehnerpotenz vergrößert bzw. verringert. In Tabelle 8.4 ist die Summe der eingebrachten Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung ebenfalls für den betrachteten Zeitraum, also für 16 Unwuchtdrehungen, eingetragen. Die hervorgehobene Kombination stellt die, für alle bisherigen Ergebnisse angenommene Federsteifigkeit und den Dämpfungsparameter dar ($k_r = 2\,000\,000 \text{ N/m}$, $c_r = 35\,000 \text{ Ns/m}$).

Tabelle 8.3: Maximale Bodenkontaktkraft im betrachteten Zeitraum von 0,3 bis 0,7 Sekunden für verschiedene Kombinationen von Federsteifigkeit und Dämpfungsparameter

Maximale Bodenkontaktkraft [N]		Dämpfungsparameter c_r [Ns/m]			
		3 500	35 000	350 000	3 500 000
Federsteifigkeit k_r [N/m]	200 000	<u>118 700</u>	67 600	62 500	77 400
	2 000 000	123 700	66 800	62 000	<u>78 300</u>
	20 000 000	<u>30 700</u>	36 900	61 000	78 900
	200 000 000	75 700	<u>72 700</u>	73 900	77 600
	2 000 000 000	79 300	79 000	79 200	78 800

Tabelle 8.4: Summe der eingebrachten Verdichtungsarbeit im betrachteten Zeitraum von 0,3 bis 0,7 Sekunden für verschiedene Kombinationen von Federsteifigkeit und Dämpfungsparameter

Summe der eingebrachten Verdichtungsarbeit [Nm]		Dämpfungsparameter c_r [Ns/m]			
		3 500	35 000	350 000	3 500 000
Federsteifigkeit k_r [N/m]	200 000	<u>1 160</u>	1 040	660	680
	2 000 000	1 780	1 050	690	<u>650</u>
	20 000 000	<u>240</u>	390	660	660
	200 000 000	620	<u>620</u>	600	670
	2 000 000 000	740	750	720	740

Für vier ausgewählte Kombinationen der Federsteifigkeit und des Dämpfungsparameters sind die Simulationsergebnisse bezüglich der Verschiebungen, der auftretenden Bodenkontaktkräfte und der in den Boden eingebrachten Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung in Abbildung 8.16 bis Abbildung 8.19 dargestellt. Für die Darstellung in Abbildung 8.20 wird zudem der dynamische Verformungsmodul auf $E_{vd} = 55 \text{ MN/m}^2$ ($G = 20,6 \text{ MN/m}^2$) erhöht.

Beschreibung und Interpretation der Ergebnisse

Hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Bodenkontaktkraft und die Summe der in den Boden eingebrachten Verdichtungsarbeit zusammenhängen und von der Anzahl der Kontakte zwischen Grundplatte und Boden im betrachteten Zeitraum abhängen.

Ein klarer Zusammenhang für die Zunahme der Federsteifigkeit und die gleichzeitige Erhöhung des Dämpfungsparameters lässt sich unter Betrachtung der maximalen Bodenkontaktkraft und der Summe der in den Boden eingetragenen Arbeit nicht herstellen. Bei den meisten Kombinationen liegt die Bodenkontaktkraft zwischen 60 000 N und 80 000 N bzw. die eingetragene Arbeit im Bereich von 600 Nm und 750 Nm (gemäß Tabelle 8.3 und Tabelle 8.4).

Hervorzuheben sind die verhältnismäßig hohen Ergebnisse für $c_r = 3 500 \text{ Ns/m}$ und eine kleine Federsteifigkeit. Eine dieser Kombinationen ist in Abbildung 8.16 veranschaulicht. In den Verschiebungen ist ersichtlich, dass die Grundplatte nur bei jeder dritten Unwuchtumdrehung auf den Boden aufschlägt. Aufgrund der geringen Federsteifigkeit von $k_r = 200 000 \text{ N/m}$ bewegen sich der Unter- und Oberteil des Plattenverdichters sehr unterschiedlich zueinander. Das Diagramm zeigt weit größere vertikale Verschiebungen des Rahmens als jene der Grundplatte. Das Bewegungsverhalten eines Plattenverdichters mit einer derartig kleinen Federsteifigkeit ist nicht realistisch. Die Bodenkontaktkräfte und die Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung nehmen bei dieser Kombination vergleichsweise große Werte an.

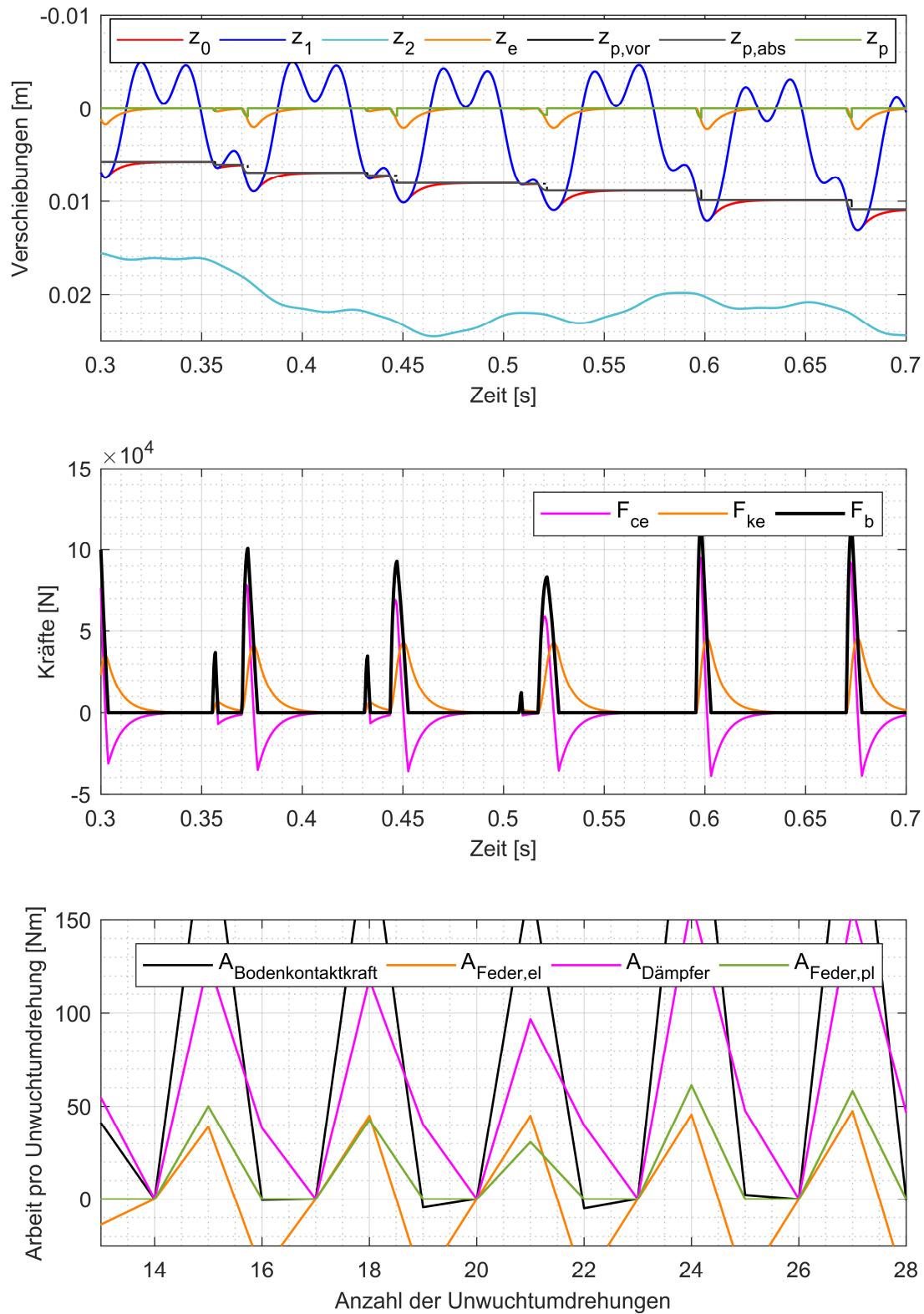


Abbildung 8.16: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung für $k_r = 200\,000\text{ N/m}$ und $c_r = 3\,500\text{ Ns/m}$

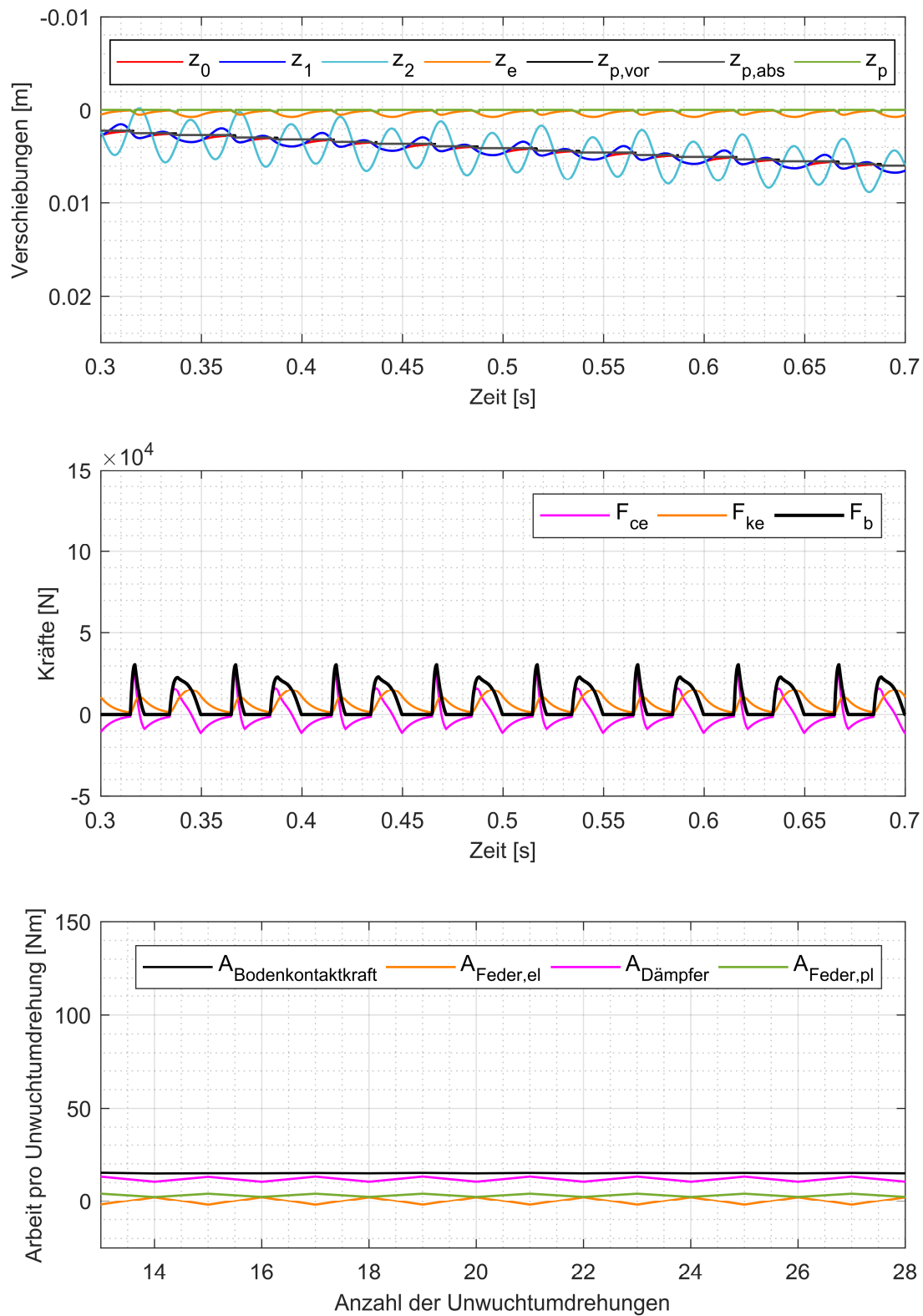


Abbildung 8.17: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung für $k_r = 20\,000\,000\text{ N/m}$ und $c_r = 3\,500\text{ Ns/m}$

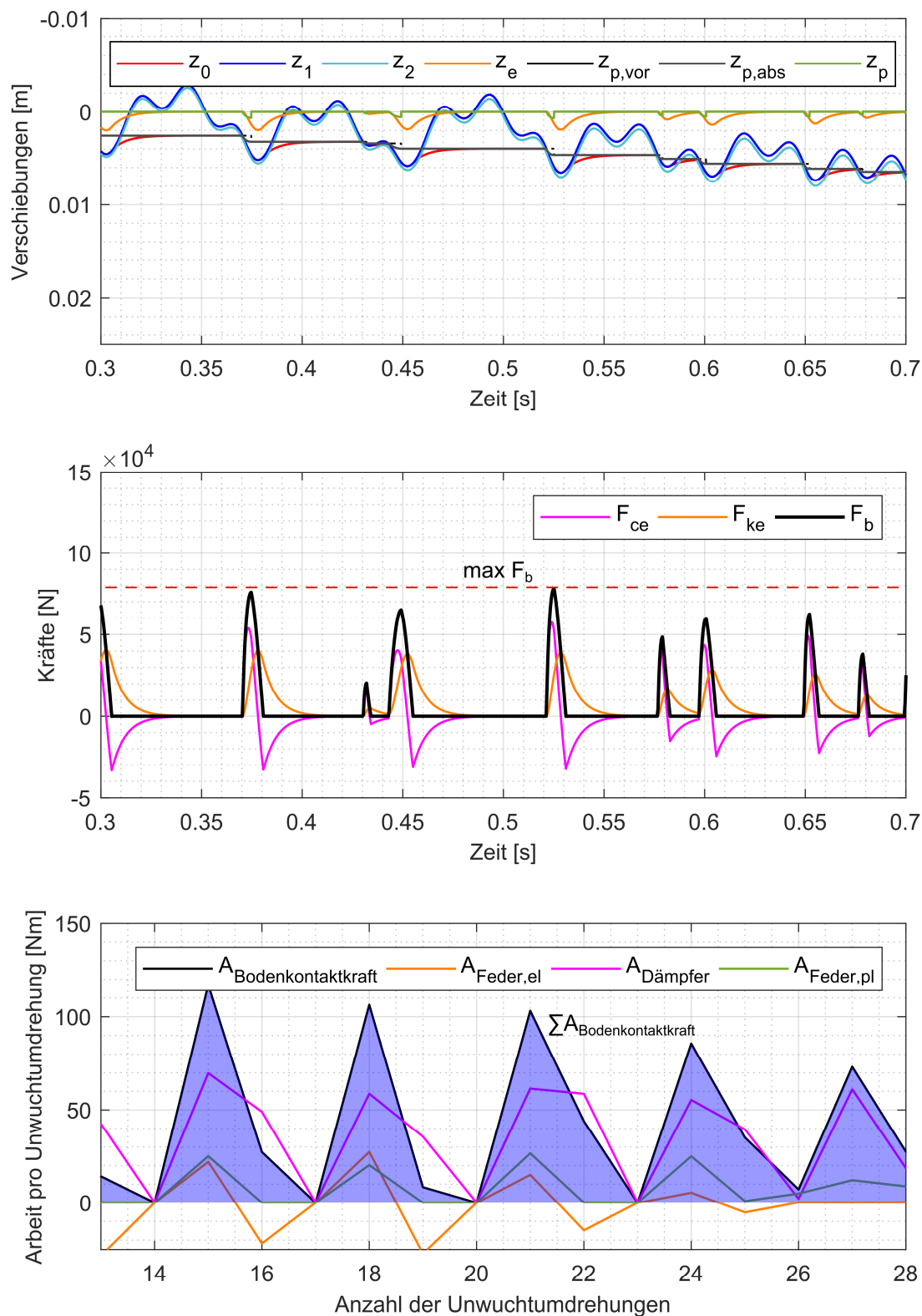


Abbildung 8.18 Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung für $k_r = 2\,000\,000$ N/m und $c_r = 3\,500\,000$ Ns/m mit Darstellung der maximalen Bodenkontaktkraft und der Summe der in den Boden eingetragenen Arbeit

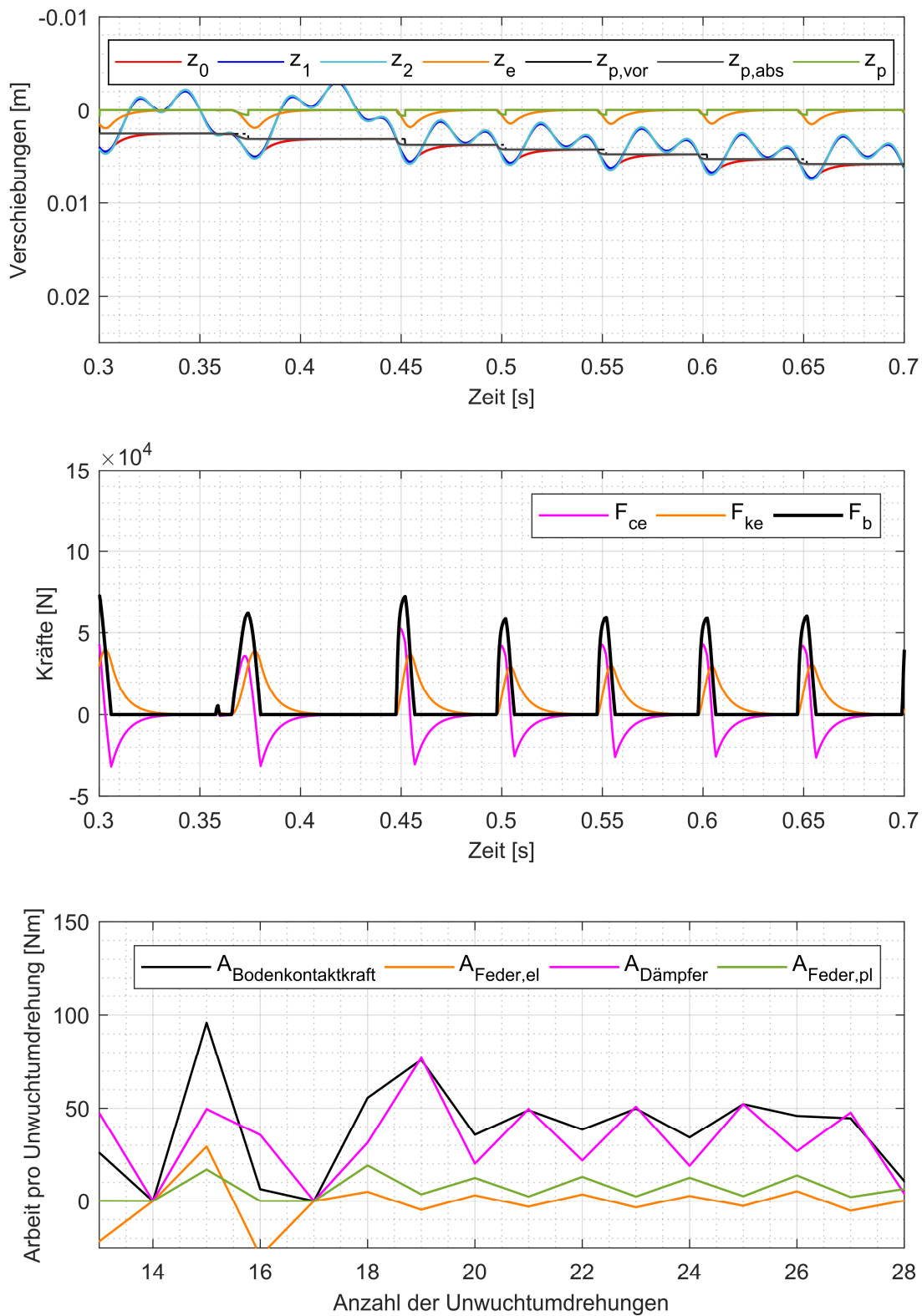


Abbildung 8.19: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung für $k_r = 200\,000\,000$ N/m und $c_r = 35\,000$ Ns/m

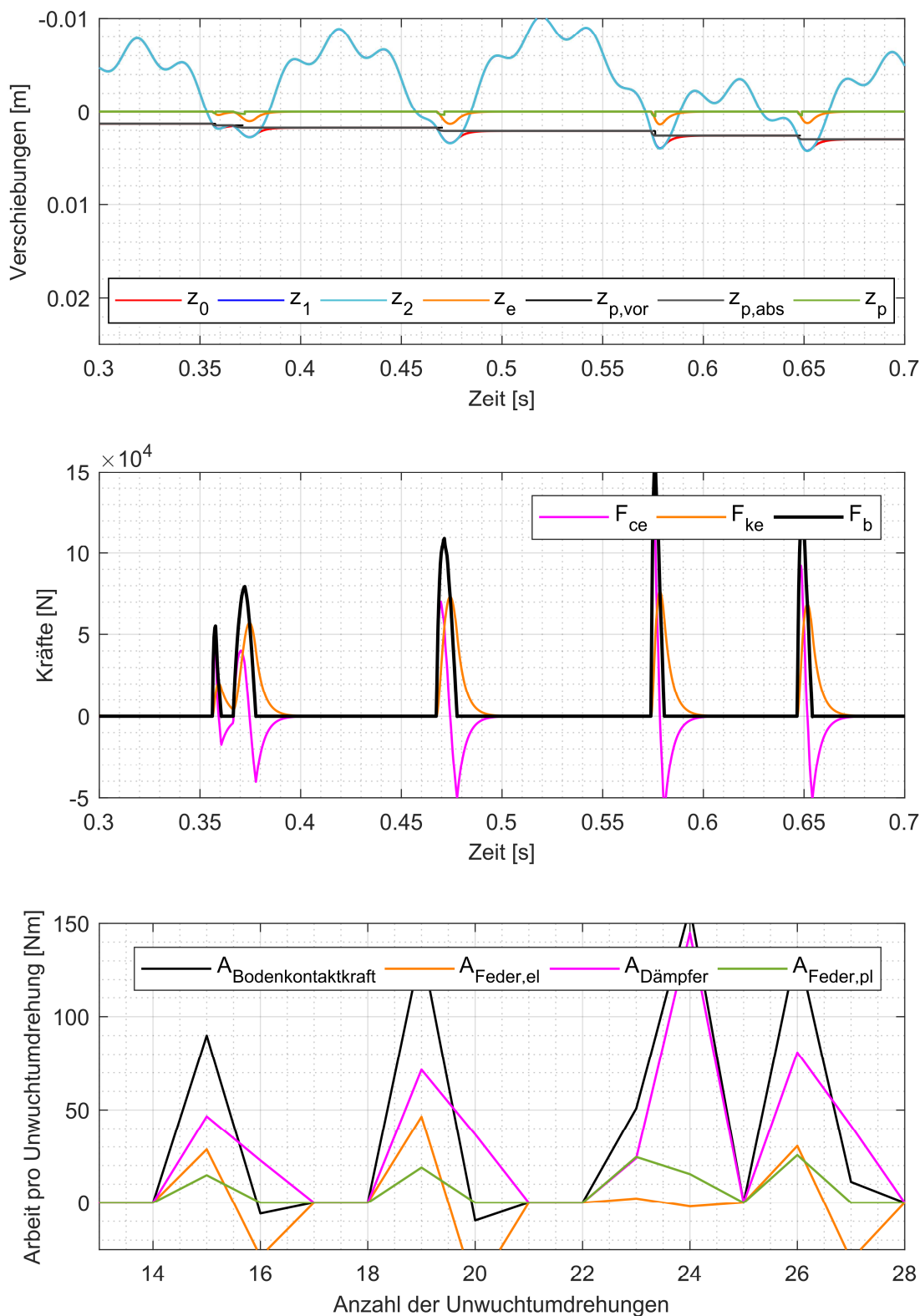


Abbildung 8.20: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtdrehung für $k_r = 200\,000\,000\text{ N/m}$, $c_r = 35\,000\text{ Ns/m}$ und $E_{vd} = 55\text{ MN/m}^2$

Das Bewegungsverhalten aus Abbildung 8.17 ist auffällig, da die Schwingwege des Rahmens weit größer sind als jene der Grundplatte. Die Verschiebungen von Unter- und Oberteil verhalten sich annähernd entgegengesetzt, bewegt sich der Unterteil nach oben findet zu diesem Zeitpunkt die Verschiebung des Oberteils nach unten hin statt. Es findet ein regelmäßiger Kontakt des Plattenverdichters mit dem Boden statt, der bei jeder zweiten Unwuchtumdrehung länger andauert. Die Bodenkontaktkräfte sind klein und die Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung ist über den betrachteten Zeitraum konstant.

Abbildung 8.18 und Abbildung 8.19 zeigen bei unterschiedlichen Parameterkombinationen ($k_r = 2\,000\,000\text{ N/m}$ und $c_r = 3\,500\,000\text{ Ns/m}$ bzw. $k_r = 200\,000\,000\text{ N/m}$ und $c_r = 35\,000\text{ Ns/m}$) ein sehr ähnliches Verhalten. Der Plattenverdichter schwingt mindestens zwei Unwuchtumdrehungen in der Luft bevor wieder ein Kontakt zum Boden hergestellt wird. Aufgrund der höheren Federsteifigkeit der Gummipuffer geht das Bewegungsverhalten des Rahmens mit dem der Grundplatte einher und deren Verschiebungen weichen nur geringfügig voneinander ab. Die Bodenkontaktkräfte und die Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung zeigen in diesen beiden Fällen keine Regelmäßigkeiten.

Der Unterschied zwischen den Diagrammen in Abbildung 8.19 und Abbildung 8.20 liegt in der Erhöhung des dynamischen Verformungsmoduls von $24,5\text{ MN/m}^2$ auf 55 MN/m^2 . Mit dem größeren E_{vd} -Wert trifft der Plattenverdichter nur bei jeder dritten bis fünften Unwuchtumdrehung am Boden auf. Weiters nehmen die Bodenkontaktkräfte größere Werte an und die in den Boden eingebrachte Arbeit je Unwuchtumdrehung unterliegt einer großen Schwankungsbreite.

Zusammenfassend besitzen die Federsteifigkeit und der Dämpfungsparameter der Gummipuffer zwischen der Grundplatte und dem Rahmen einen überaus großen Einfluss auf das Bewegungsverhalten und die eingebrachte Verdichtungsenergie. Um die Modellierung der Interaktion des Plattenverdichters mit dem Boden in dieser Hinsicht zu verbessern, müssen diese beiden Eingangsgrößen durch geeignete Versuche bestimmt werden.

8.6 Variation der Zusatzmasse

Die Auswirkung einer Zusatzmasse auf die Verdichtungsarbeit des Plattenverdichters wurde bereits im Zuge der Grundsatzversuche [6] untersucht und ist im Abschnitt 5.2 festgehalten. Dieses Unterkapitel stellt nun die Simulationsergebnisse für die Aufbringung einer Zusatzmasse im mechanischen Modell dar. Das zusätzliche Gewicht wird auf den Oberteil des Plattenverdichters (siehe Abbildung 6.1) aufgebracht, folgende Varianten werden betrachtet:

- $m_z = 0\text{ kg}$
- $m_z = 250\text{ kg}$
- $m_z = 500\text{ kg}$

Die Simulationsergebnisse für die Variation der Zusatzmasse werden im Hinblick auf die Verschiebungen und die Bodenkontaktkraft für den Zeitbereich von 0,3 bis 0,4 Sekunden, also 4 Unwuchtumdrehungen, veranschaulicht. Für jede Zusatzmasse wird darüber hinaus ein Arbeitsdiagramm

erstellt. Die bekannten Berechnungsparameter wurden gemäß Tabelle 6.4 gewählt, für die unbekannten Größen wurden folgende Werte angenommen:

- $c_r = 35\,000\text{ Ns/m}$ (Dämpfungsparameter zwischen Unter- und Oberteil)
- $G = 7,5\text{ MN/m}^2$ (Schubmodul des Bodens)
das entspricht bei $\nu = 0,30$ etwa $E_{vd} = 24,5\text{ MN/m}^2$
- $k_r = 2\,000\,000\text{ N/m}$ (Federsteifigkeit zwischen Unter- und Oberteil)

In Tabelle 8.5 sind die maximale Bodenkontaktkraft und die in den Boden eingebrachte Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung abhängig von der Zusatzmasse festgehalten. Das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters ist im eingeschwungenen Zustand bei allen Parametervariationen periodisch und die ermittelte Bodenkontaktkraft sowie die eingebrachte Arbeit nehmen mit jeder Unwuchtumdrehung den gleichen Wert an.

Tabelle 8.5: Maximale Bodenkontaktkraft und eingebrachte Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für verschiedene Zusatzmassen

		Maximale Bodenkontaktkraft [N]	Eingebrachte Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung [Nm]
Zusatzmasse m_z [kg]	0	66 800	66
	250	80 600	101
	500	91 400	136

Beschreibung und Interpretation der Ergebnisse

Je mehr Zusatzmasse auf den Plattenverdichter aufgebracht wird, desto größer ist dessen vertikale Eindringtiefe in den Boden (siehe Abbildung 8.21). Insbesondere wandert der Oberteil mit steigender Zusatzmasse tiefer in Richtung Boden. Das grundsätzliche Bewegungsverhalten verändert sich allerdings nicht. Bei einem höheren Gesamtgewicht des Plattenverdichters nehmen die Dauer der Belastungsphase und der Entlastungsphase jeweils minimal zu, hingegen findet das Abheben über einen kürzeren Zeitraum statt. Die maximale Bodenkontaktkraft steigt mit der Zunahme des Zusatzgewichtes an, dies ist in Abbildung 8.22 und in Tabelle 8.5 ersichtlich. Die in den Boden eingebrachte Arbeit je Unwuchtumdrehung erhöht sich ebenso mit dem Anstieg der Zusatzmasse und nimmt bei $m_z = 500\text{ kg}$ mehr als den doppelten Wert im Vergleich zu keiner Zusatzmasse an (siehe Abbildung 8.23).

Eine zusätzliche Masse hat nur einen geringen Einfluss auf das grundsätzliche Bewegungsverhalten des Plattenverdichters, führt jedoch zu einer größeren Bodenkontaktkraft und einer höheren Verdichtungsarbeit. In Abbildung 8.23 wurde als Bezugsgröße (100%) die geleistete Arbeit für $m_z = 0\text{ kg}$ herangezogen. Daraus kann ein überaus positiver Effekt auf die Verdichtungsqualität geschlossen werden.

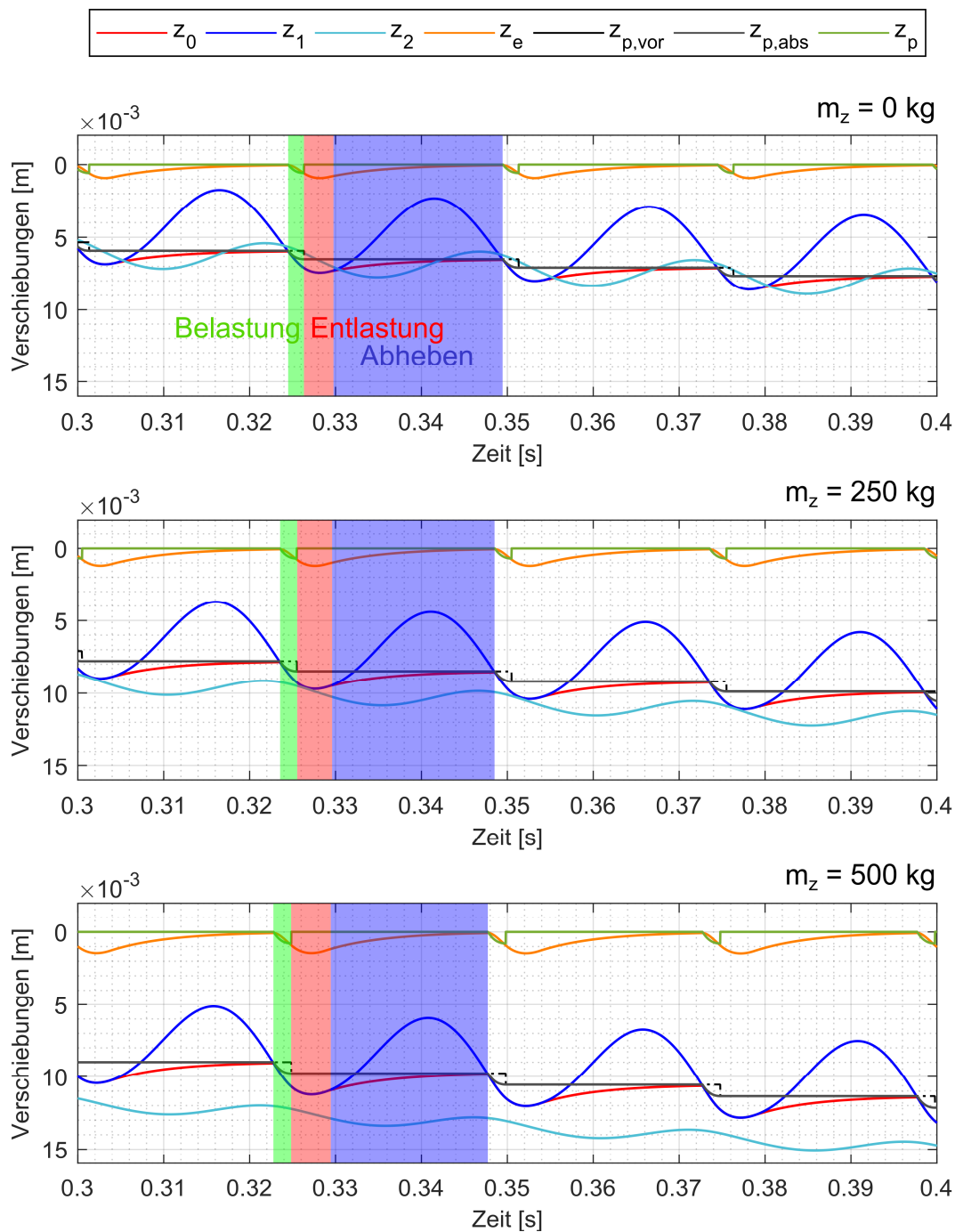


Abbildung 8.21: Verschiebungen; $m_z = 0 \text{ kg}$, $m_z = 250 \text{ kg}$ und $m_z = 500 \text{ kg}$ (von oben nach unten)

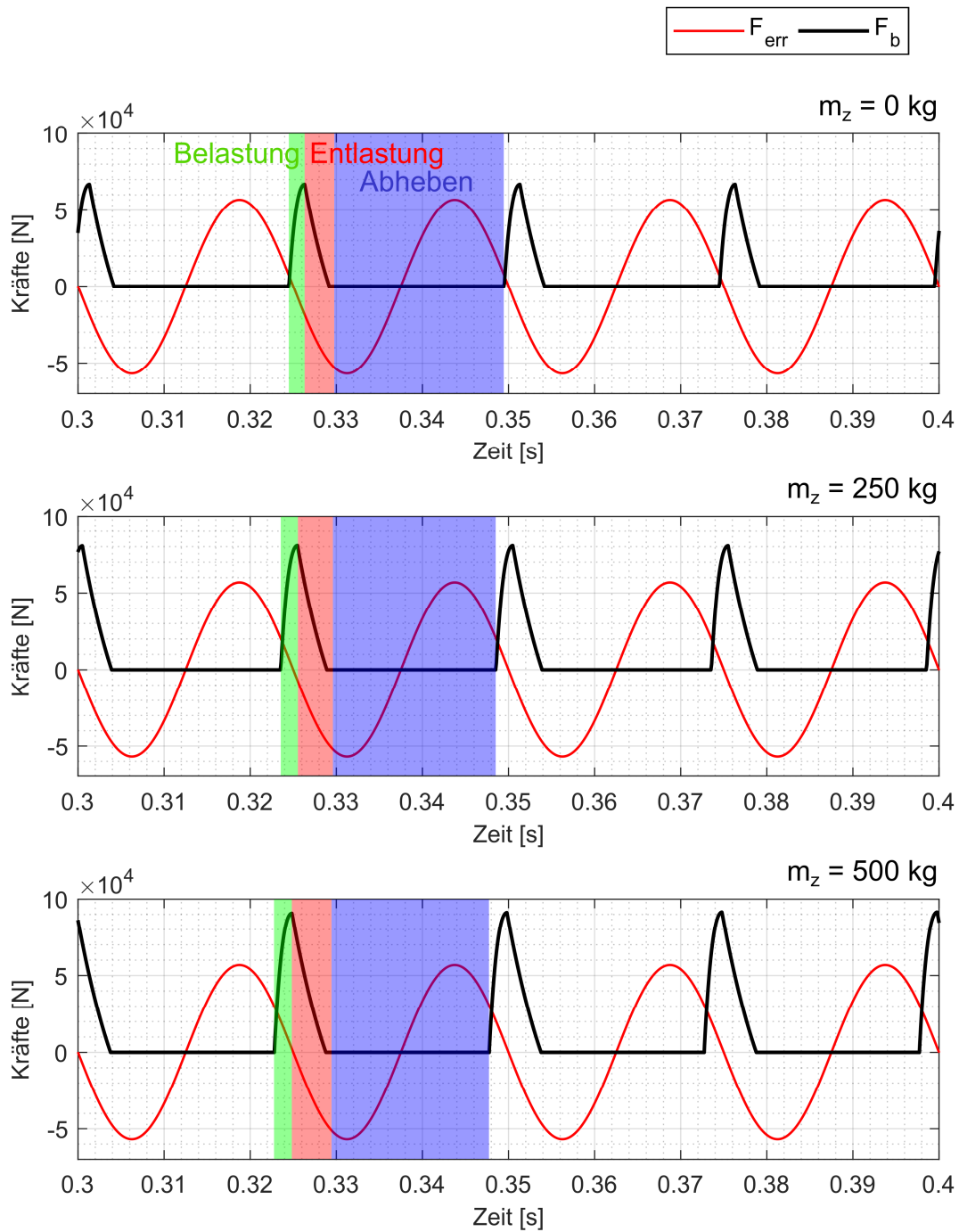


Abbildung 8.22: Erregerkraft und Bodenkontaktkraft; $m_z = 0 \text{ kg}$, $m_z = 250 \text{ kg}$ und $m_z = 500 \text{ kg}$ (von oben nach unten)

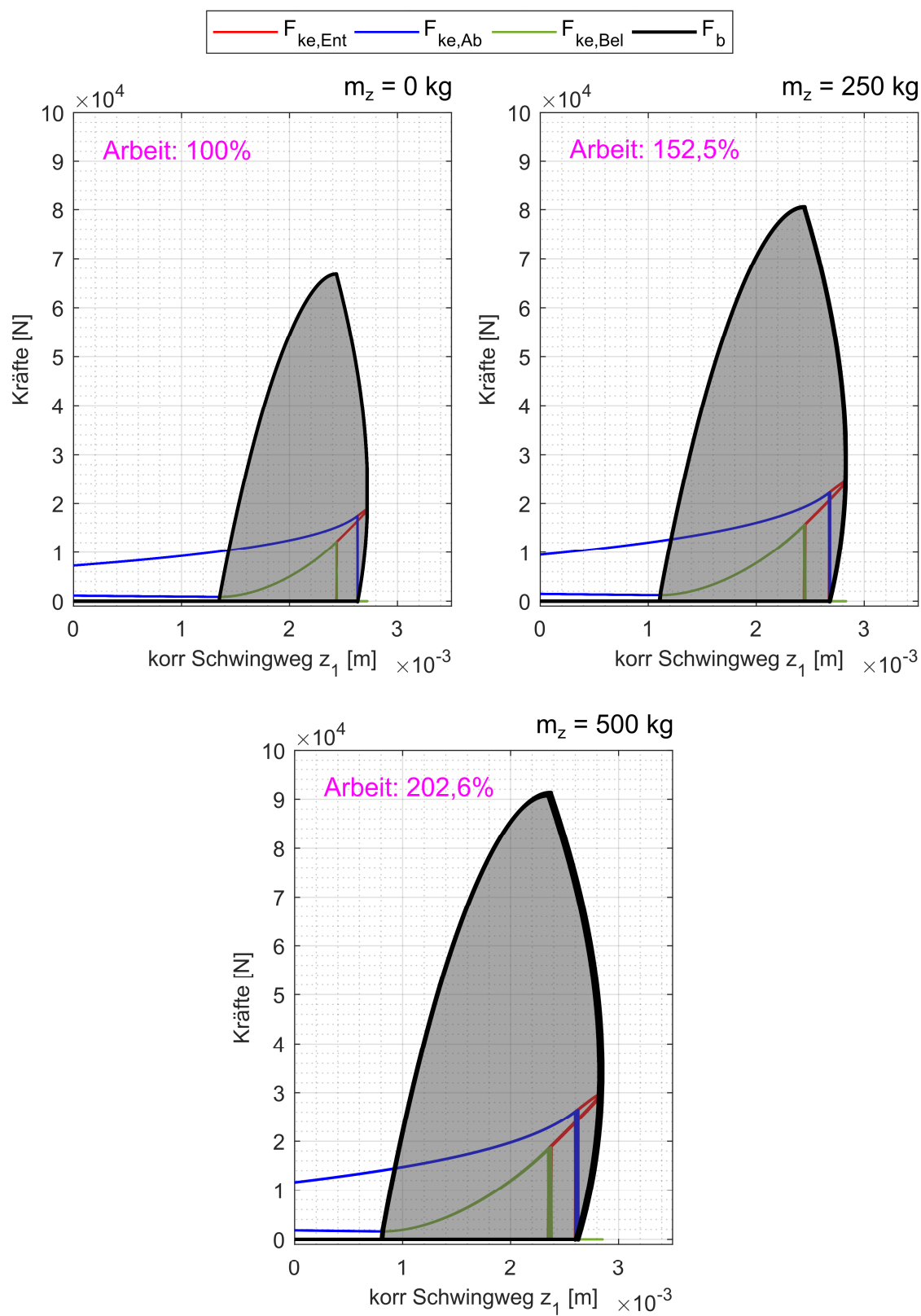


Abbildung 8.23: Arbeitsdiagramme; links oben: $m_z = 0 \text{ kg}$; rechts oben: $m_z = 250 \text{ kg}$; unten: $m_z = 500 \text{ kg}$

8.7 Auswertung der vertikalen Verschiebungen der Feldversuche

Mit der Vorauswertung der Feldversuche beschäftigt sich *Affenzeller* [8] im Zuge einer Projektarbeit am *Institut für Geotechnik* der *TU Wien*. Die Messdaten wurden mit *MATLAB* ausgewertet. Von den insgesamt fünf montierten Beschleunigungssensoren wurden zwei während den Feldversuchen beschädigt. Die Messdaten der nachfolgenden Auswertungsergebnisse stammen von den Beschleunigungssensoren AP1 und AP4 der Grundplatte sowie AR1 des Rahmens (siehe Abbildung 8.24). Die beiden Sensoren AP1 und AP4 befinden sich in Fahrtrichtung gesehen auf der linken Seite, wobei AP1 im hinteren und AP4 im vorderen Bereich der Grundplatte angeordnet ist. Die in der Auswertung mit APm bezeichnet Daten entsprechen dem Mittelwert aus AP1 und AP4. Am Rahmen befindet sich der Beschleunigungssensor AR1 mittig am hinteren Ende. In der vorliegenden Diplomarbeit werden ausgewählte Diagramme vorgestellt und interpretiert.

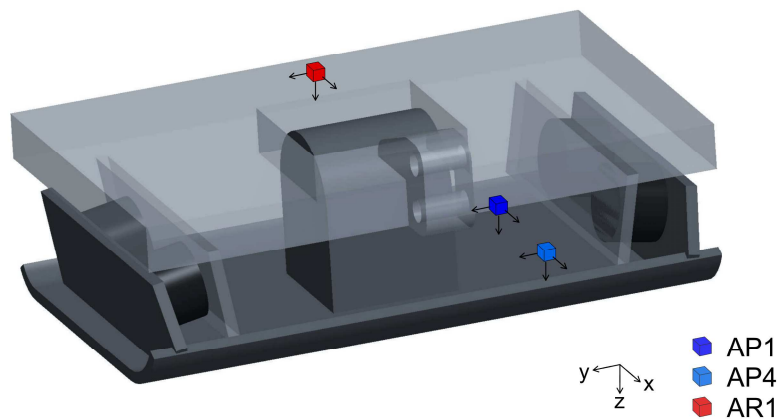


Abbildung 8.24: Anordnung der für die Auswertung der Messergebnisse herangezogenen Beschleunigungssensoren am schematisch dargestellten Plattenverdichter

Beschreibung und Interpretation der Ergebnisse

In Abbildung 8.25 bis Abbildung 8.29 sind die vertikalen Schwingwege der Grundplatte und des Rahmens jeweils über eine Dauer von 0,15 Sekunden dargestellt. Die grauen Balken kennzeichnen, zum besseren Vergleich der Verschiebungen, jeweils den Zeitbereich zwischen zwei maximalen Schwingwegamplituden der Verschiebungen in Plattenmitte (APm). Die ersten beiden Abbildungen beziehen sich auf die Messfahrt 01 und unterscheiden sich im Anpressdruck, auch als mittlere Kraft bezeichnet. In Abbildung 8.25 (mittlere Kraft von 4 512 N) zeigt sich ein periodischer Verlauf der Schwingwege. Chronologisch betrachtet trifft die Platte zuerst hinten (AP1) und kurz darauf vorne (AP4) auf den Untergrund. Vergleicht man die mittlere Bewegung der Grundplatte (APm) mit jener des Rahmens (AR1) zeigt sich eine kleine Phasenverschiebung zwischen den maximalen Schwingwegamplituden. Dies folgt aus der Anordnung der Sensoren sowie der kreisförmig, translatorischen Anregung. Innerhalb einer vertikalen Verschiebung des Unterteils nach unten (positive z-Richtung) bewegt sich der Oberteil entgegengesetzt nach oben. Die Schwingungen des Rahmens sind etwa um eine Zehnerpotenz kleiner als jene der Grundplatte.

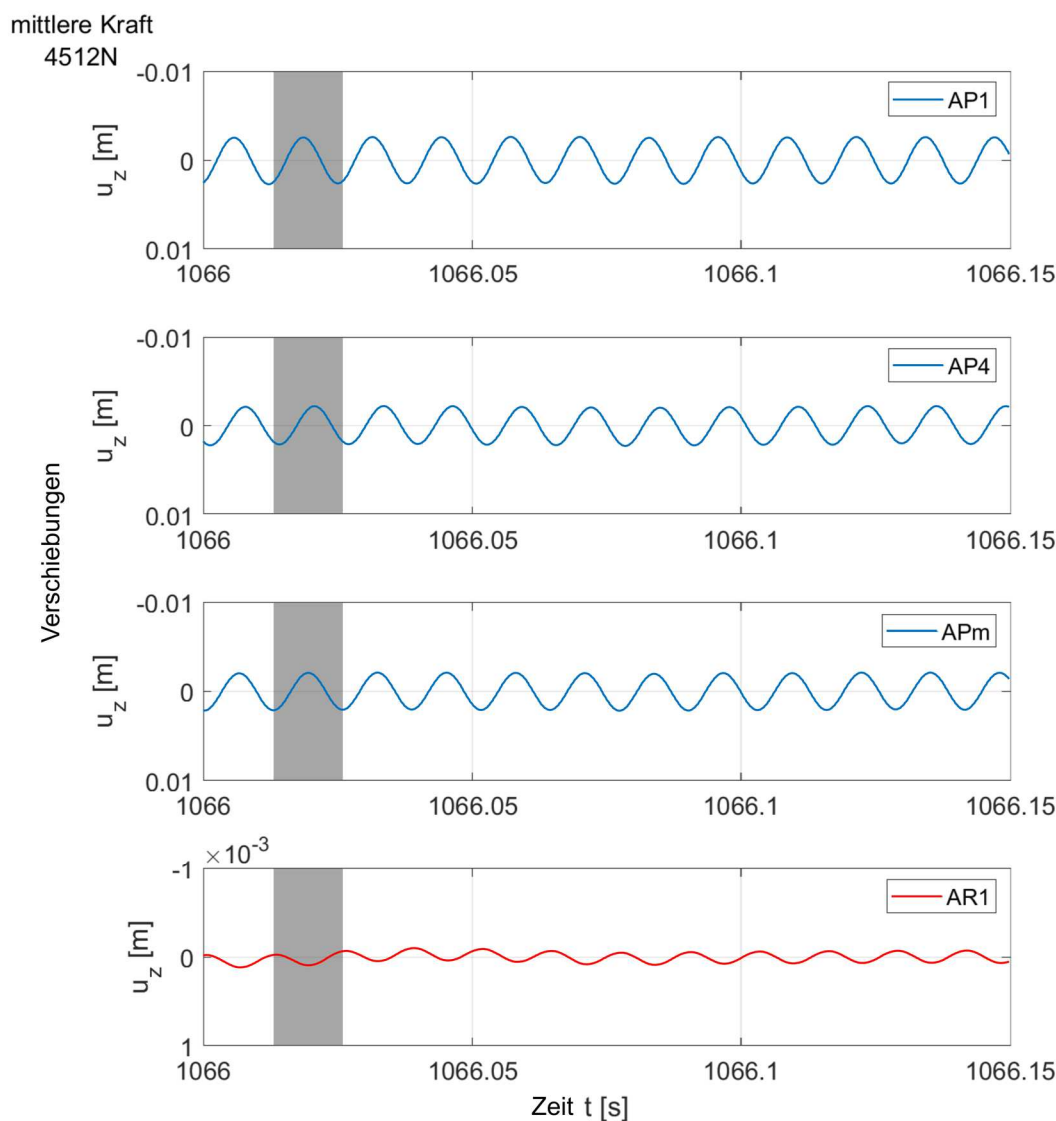


Abbildung 8.25: Schwingwege von Grundplatte und Rahmen für Messfahrt 01 bei geringem Anpressdruck; adaptiert [8]

Steigt der Anpressdruck, wie in Abbildung 8.26 mit 7 936 N veranschaulicht, ergibt sich ein unregelmäßigeres Bewegungsverhalten. Die gemittelten vertikalen Verschiebungen des Unterteils (APm) weisen abwechselnd eine größere und eine kleinere Schwingamplitude auf. Zwischen der Grundplatte und dem Rahmen erkennt man im gewählten Zeitausschnitt auf den ersten Blick keine Zusammenhänge. Der Vergleich zeigt, dass mit der Vergrößerung des Anpressdruckes die maximalen Verschiebungen sowohl für den Unter- als auch den Oberenteil zunehmen.

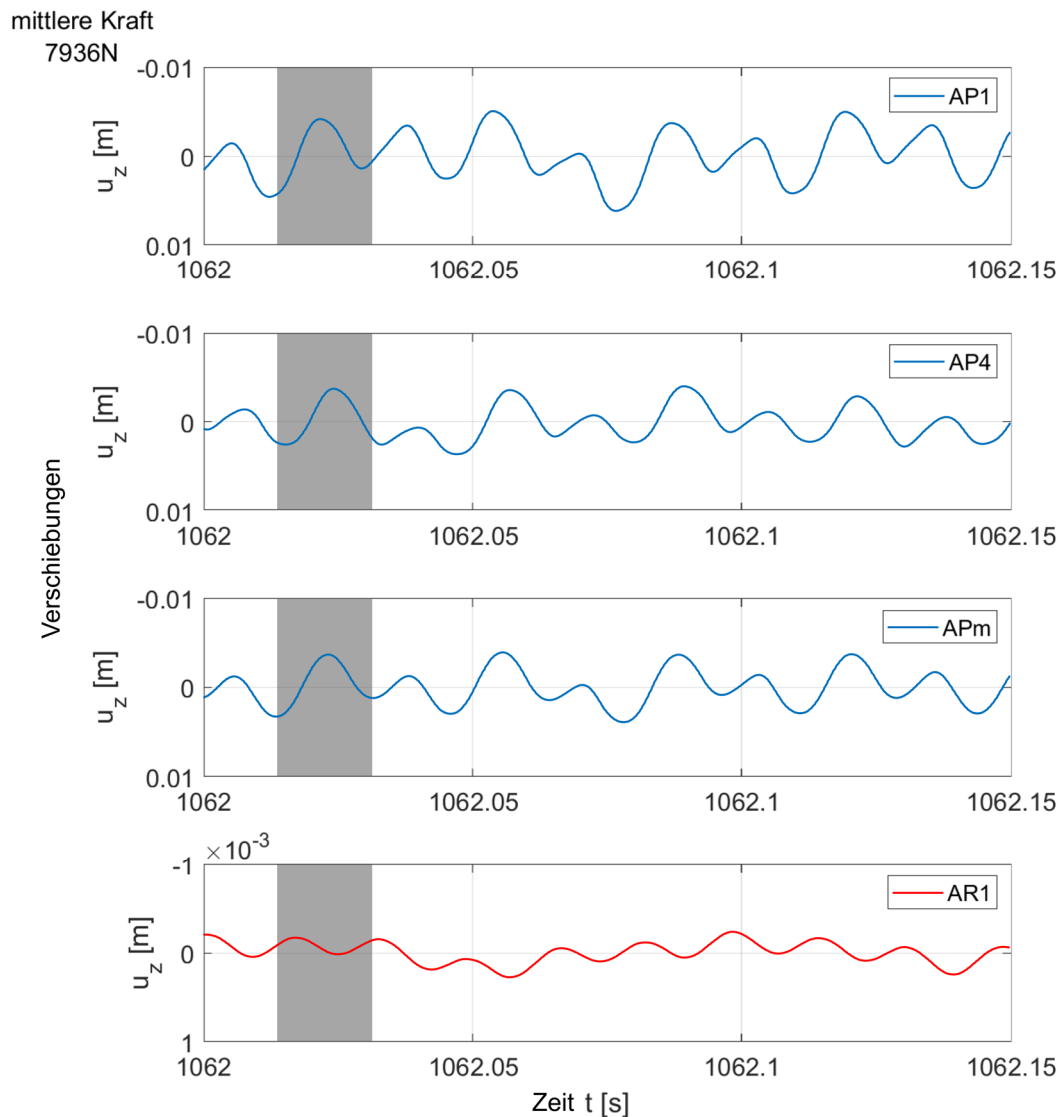


Abbildung 8.26: Schwingwege von Grundplatte und Rahmen für Messfahrt 01 bei hohem Anpressdruck; adaptiert [8]

Abbildung 8.27 und Abbildung 8.28 veranschaulichen den Unterschied zwischen der ersten und der zweiten Überfahrt des Plattenverdichters. Die Diagramme in Abbildung 8.27 beruhen auf den Messdaten der Messfahrt 05. Auf Spur 2 erfolgte im Anschluss an die Messfahrt 05 als zweite Verdichtungsüberfahrt die Messfahrt 06 (siehe Abbildung 8.28). In den abgebildeten Zeitbereichen herrschen jeweils ähnliche Anpressdrücke (12 326 N bzw. 11 320 N).

In der Messdatenauswertung sind in beiden Fällen keine gleichmäßigen oder periodischen vertikalen Bewegungen erkennbar. Bei der Messfahrt auf dem unverdichteten Material (Messfahrt 05) führt die Grundplatte sowohl im hinteren (AP1) als auch im vorderen Bereich (AP4), im Vergleich zur Messfahrt auf dem bereits verdichteten Tragschichtmaterial (Messfahrt 06), größere Schwingwege aus. Weiters sind die Verschiebungen des Rahmens (AR1) der ersten Verdichtungsüberfahrt

größer als während der Zweiten. Bis auf die Größe der Schwingwegamplitude können aus den beiden Abbildungen keine charakteristischen Unterschiede abgeleitet werden.

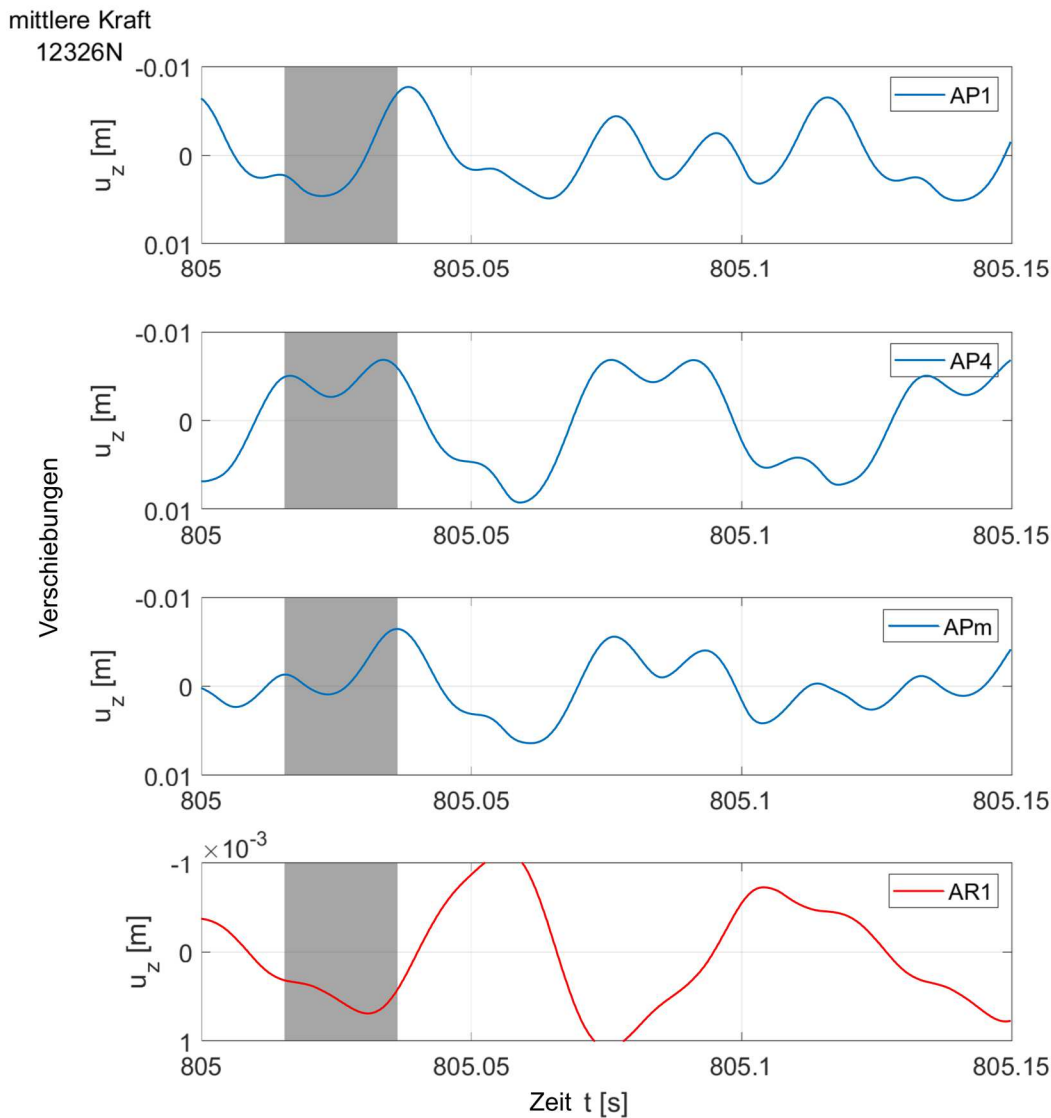


Abbildung 8.27: Schwingwege von Grundplatte und Rahmen für Messfahrt 05; adaptiert [8]

In Abbildung 8.29 ist ein weiterer 0,15 Sekunden langer Messdatenausschnitt abgebildet. Die Diagramme zeigen Messfahrt 04, welche auf Spur 1 mit einer in Fahrtrichtung laufenden Unwucht als zweite Verdichtungsüberfahrt durchgeführt wurde. Im dargestellten Zeitraum kann im weitesten Sinne eine mit jeder zweiten Unwuchtdrehung einhergehende Periodizität festgestellt werden. Es treten abwechselnd eine größere und eine kleinere vertikale Verschiebung (APm) auf. Das Bewegungsverhalten des Rahmens (AR1) ist gleichfalls durch eine stärkere und eine schwächere Schwingwegamplitude gekennzeichnet. Im grau hinterlegten Bereich (dient ausschließlich zur besseren Orientierung) bewegen sich der Unter- und Oberteil in dieselbe Richtung. Nur rund 0,1 Sekunden später findet das Bewegungsverhalten der beiden Teile zueinander, also in entgegengesetzte Richtung, statt.

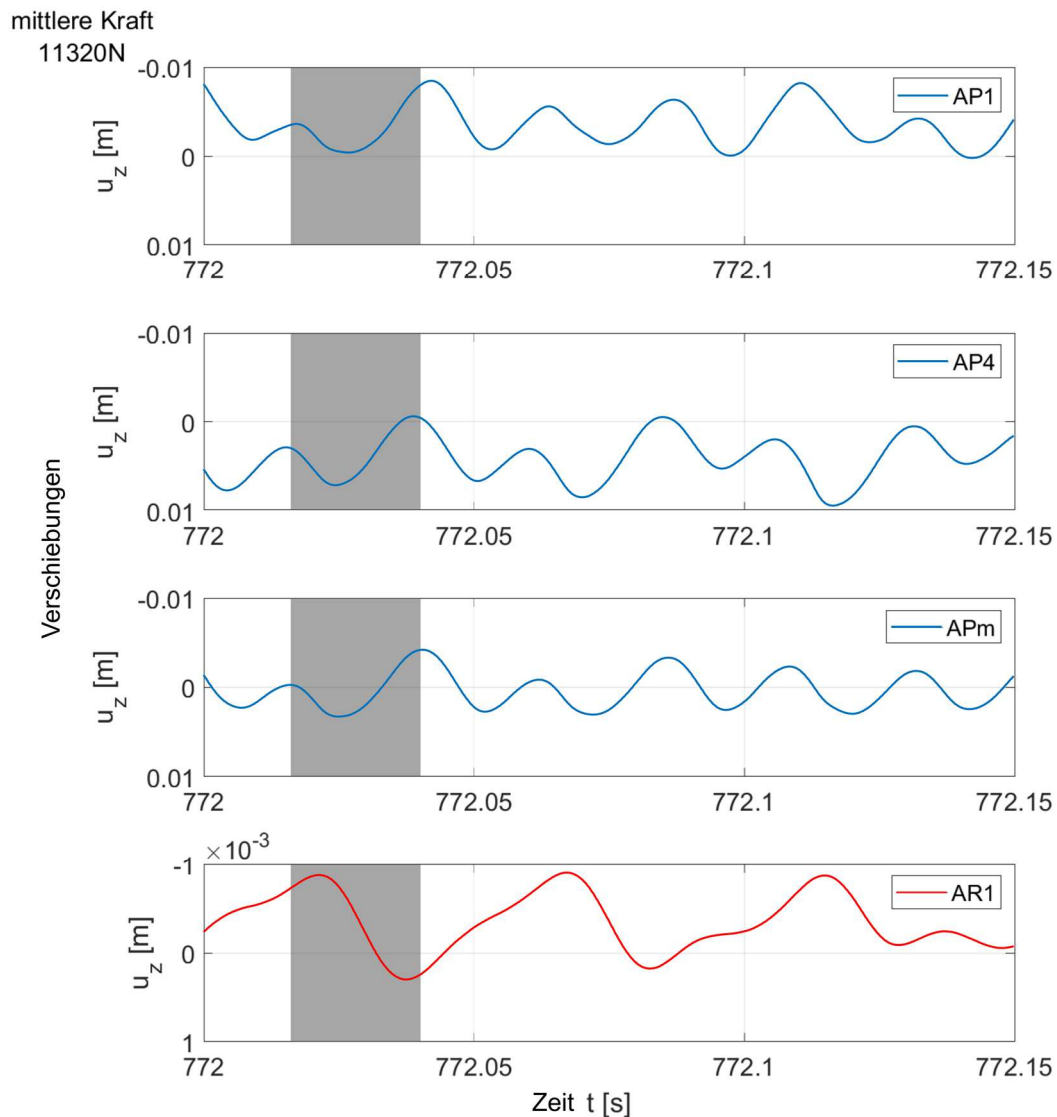


Abbildung 8.28: Schwingwege von Grundplatte und Rahmen für Messfahrt 06; adaptiert [8]

Abhängig von der mittleren Kraft, der Untergrundsteifigkeit und der Unwuchtdrehrichtung sind in den ausgewählten Zeitbereichen immer wieder periodische Bewegungsmuster zu beobachten, allerdings ist das Bewegungsverhalten durch viele Unregelmäßigkeiten geprägt. Der Unterteil schlägt nicht waagrecht ausgerichtet und parallel zum Untergrund auf, sondern es treffen abwechselnd der vordere (AP4) und der hintere Bereich (AP1) auf den Boden. Über alle vorgestellten Messdatenauswertungen liegen die vertikalen Schwingwege der Grundplatte und jene des Rahmens in einem ähnlichen Wertebereich. Die Verschiebungen des Rahmens entsprechen etwa einem Zehntel jener der Grundplatte.

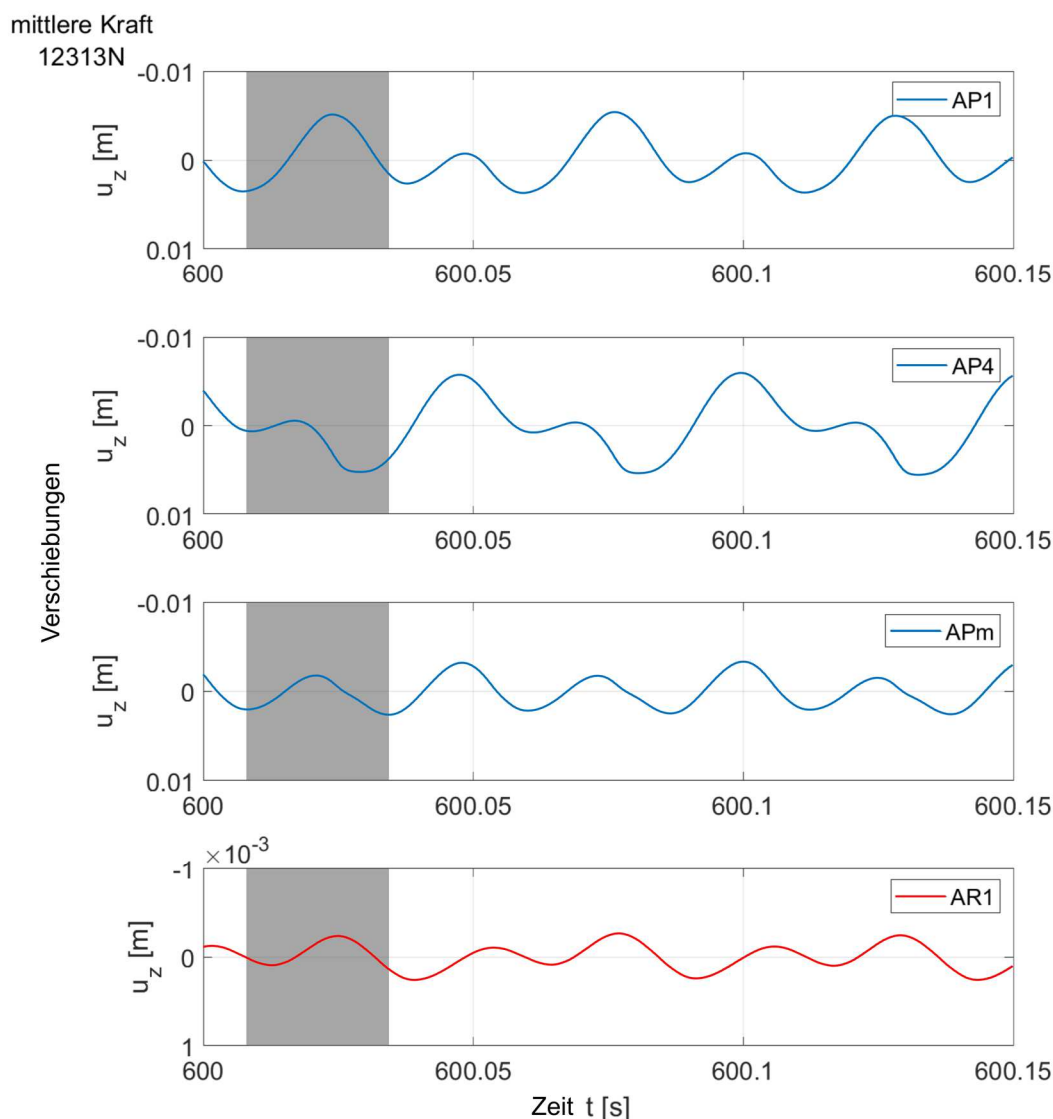


Abbildung 8.29: Schwingwege von Grundplatte und Rahmen für Messfahrt 04; adaptiert [8]

8.8 Vergleich der Feldversuche mit den Modellergebnissen

Dieses Teilkapitel widmet sich dem Vergleich der experimentellen Untersuchungen mit den Ergebnissen des mechanischen Modells. Verglichen werden die vertikalen Verschiebungen von Unter- und Oberseite des Plattenverdichters (siehe Abbildung 8.30). Die Feldversuche beschreiben einen Verdichtungsvorgang hingegen wird mit dem Modell ein Verdichtungszustand veranschaulicht.

Das Zeitfenster der Auswertung wurde jeweils mit einer Dauer von 0,15 Sekunden gewählt. Die verwendeten Messdaten der Feldversuche stammen aus der Messfahrt 01 mit einer mittleren Kraft von 4 512 N (wie in Abbildung 8.25). Die Anregungsfrequenz während der Verdichtungsfahrt liegt bei etwa 80 Hz. Die vertikalen Schwingwege der Feldversuche stellen den Mittelwert der, aus dem Signal des vorderen und hinteren Beschleunigungssensors berechneten, vertikalen Verschiebungen

(APm) dar. Den Simulationsergebnissen liegen die Eingangsparameter aus Abschnitt 8.2 zugrunde, wobei die Frequenz auf $f = 80$ Hz angepasst wurde.

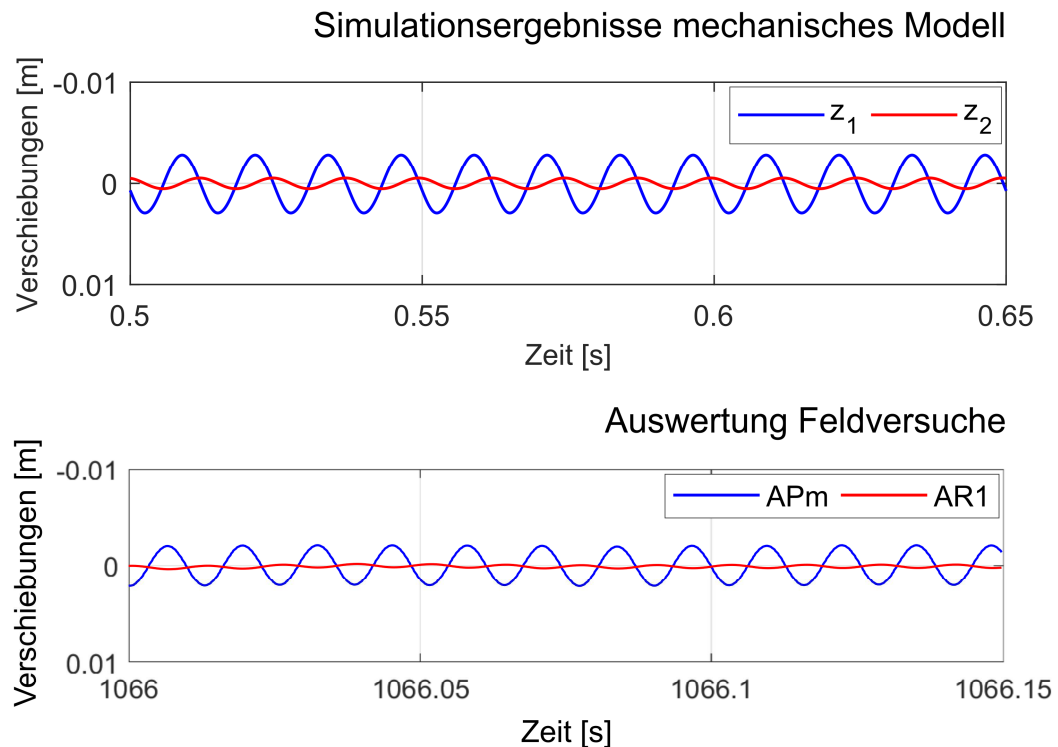


Abbildung 8.30: Vergleich der vertikalen Verschiebungen von Grundplatte (blau, z_1 bzw. APm) und Rahmen (rot, z_2 bzw. AR1)

Beschreibung und Interpretation der Ergebnisse

Vergleicht man die vertikalen Schwingwege der Grundplatte aus der Simulation mit jenen der Feldversuche, liegen die Schwingwegamplituden in einem ähnlichen Wertebereich. Die gewählte Federsteifigkeit und der Dämpfungsparameter zwischen Unter- und Oberteil führen im Modell zu einer Phasenverschiebung und die maximalen Schwingwege des Rahmens entsprechen rund einem Drittel jener der Grundplatte. In den Feldversuchen traten deutlich kleinere vertikale Verschiebungen des Rahmens auf, diese liegen etwa bei einem Zehntel der Verschiebungen der Grundplatte.

Zusammenfassend bildet bei diesem ausgewählten Vergleich das mechanische Modell relativ gut das tatsächlich auftretende Bewegungsverhalten der Grundplatte ab. Das Verhältnis zwischen den Schwingwegamplituden von Unter- und Oberteil unterscheidet sich in beiden Fällen voneinander. Im mechanischen Modell kann dieses Verhältnis jedoch über die Federsteifigkeit und den Dämpfungsparameter der Gummipuffer zwischen Unter- und Oberteil gesteuert werden.

Anpassung der Berechnungsparameter

Die Simulationsergebnisse wurden bestmöglich an die Auswertungsergebnisse der Feldversuche angepasst. In Abbildung 8.31 sind die vertikalen Verschiebungen für einen Zeitbereich von

0,15 Sekunden dargestellt. Die Federsteifigkeit k_r und der Dämpfungsparameter c_r der Gummipuffer wurden folgendermaßen verändert:

- $c_r = 12\,000\text{ Ns/m}$ (Dämpfungsparameter zwischen Unter- und Oberteil)
- $k_r = 1\,800\,000\text{ N/m}$ (Federsteifigkeit zwischen Unter- und Oberteil)

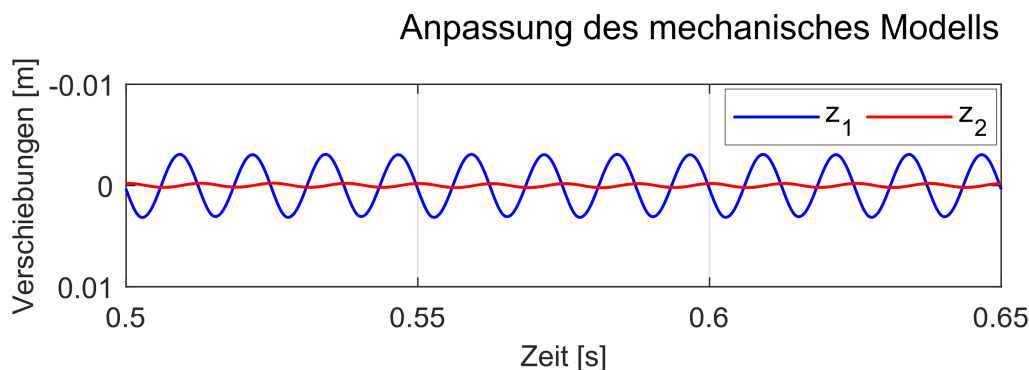


Abbildung 8.31: Vertikale Verschiebungen von Grundplatte (blau, z_1) und Rahmen (rot, z_2) nach der Anpassung der Berechnungsparameter

Durch diese Anpassung entspricht das Verhältnis der Schwingwegamplituden von Grundplatte und Rahmen etwa jenem der Feldversuche. Das mechanische Modell bildet nach Anpassung der beiden Berechnungsparameter das tatsächlich während den Feldversuchen auftretende Bewegungsverhalten gut ab.

8.9 Betriebszustände des Plattenverdichters

Das abschließende Unterkapitel befasst sich mit der Einteilung des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters in verschiedene Betriebszustände. Diese Kategorisierung basiert auf den Simulationsergebnissen des mechanischen Modells und der Auswertung der experimentellen Untersuchungen.

Das gewählte mechanische Modell entspricht einer eindimensionalen Betrachtung der Bewegungsabläufe in vertikaler Richtung. Dieser Randbedingung zufolge kann sich die Grundplatte ausschließlich parallel zum Untergrund verschieben und es wird lediglich ein Verdichtungszustand beschrieben. Das tatsächliche im dreidimensionalen Raum stattfindende Bewegungsverhalten konnte im Zuge der am 20. November 2019 durchgeführten Feldversuche beobachtet werden. Der vordere und hintere Teil der Grundplatte treffen bei der Verdichtung nicht gleichzeitig, sondern zeitlich versetzt auf den Untergrund. Dies folgt aus der Anordnung der Sensoren sowie der kreisförmig, translatorischen Anregung.

Der Plattenverdichter und der Boden bilden ein dynamisches Interaktionssystem. Die Einflüsse auf das Bewegungsverhalten und den Betriebszustand sind nachfolgend aufgelistet:

- Plattenverdichter
 - Gesamtmasse des Verdichtungsgeräts
 - Massenverhältnisse zwischen Grundplatte und Rahmen
 - Steifigkeit und Dämpfungseigenschaft der Gummipuffer zwischen Unter- und Ober-
teil
 - Unwuchtmoment (Unwuchtmasse und Exzentrizität)
 - Anregungsfrequenz
 - Kontaktfläche zwischen Plattenverdichter und Boden
- Boden
 - Dichte und Querdehnzahl des zu verdichtenden Materials
 - Untergrundsteifigkeit

Die vertikalen Verschiebungen der identifizierten Betriebszustände Kontakt, Abheben, Springen und Chaos sind in Abbildung 8.32 zusammengefasst. Im Vergleich zur Vibrationswalze (siehe Abschnitt 4.1.4) tritt beim Plattenverdichter kein Taumeln, also das wechselseitige Aufschlagen der linken und rechten Bandagenseite, auf. Das mechanische Modell kann diesen Betriebszustand aufgrund der definierten Randbedingung (Plattenverdichter und Untergrund bewegen sich ausschließlich in vertikaler Richtung) nicht abbilden. Für die Auswertung der Messdaten wurden stets die in Fahrtrichtung links angeordneten Beschleunigungssensoren (siehe Abbildung 8.24) betrachtet. Die Beobachtungen mit dem freien Auge zeigten im Rahmen der Feldversuche kein abwechselndes Auftreffen der linken und rechten Seite am Untergrund.

Kontakt

Findet eine ständige Berührung zwischen dem Plattenverdichter und dem Boden statt, spricht man vom Betriebszustand Kontakt. Bei zunehmender Steifigkeit erfolgt der Übergang in den Betriebszustand Abheben. Ein Kontaktbetrieb konnte in den Feldversuchen (siehe Abbildung 8.25) identifiziert werden.

Abheben

Wenn der Plattenverdichter innerhalb einer Unwuchtumdrehung regelmäßig die Betriebsphasen Belastung, Entlastung und Abheben durchläuft, spricht man vom Betriebszustand Abheben. Die Simulationsergebnisse zeigen abhängig von den Eingangsparametern sehr häufig diesen Betriebszustand (siehe beispielsweise Abbildung 8.1 bis Abbildung 8.4). Ausgehend von diesem Betriebszustand führt eine Gewichtserhöhung zu einer Verlängerung der Kontaktzeit zwischen Grundplatte und Untergrund und es kann in weiterer Folge ein Übergang in den Betriebszustand Kontakt erfolgen. Das Abheben stellt mit dem periodischen Aufschlagen des Plattenverdichters auf dem Untergrund eine sehr effiziente Verdichtung dar.

Springen

Mit einer Verringerung der Auflast oder einer Zunahme der Untergrundsteifigkeit erfolgt der Übergang vom Abheben zum Springen. Das Springen ist gekennzeichnet durch einen abwechselnd starken und einen schwachen Schlag auf das zu verdichtenden Material (siehe Abbildung 8.15). Beim vollen Springen verschwindet der schwache Schlag zur Gänze und stattdessen tritt ein Luftschlag

auf (siehe Abbildung 8.13). Zwischen den Aufschlägen auf dem Boden können auch mehrere Schläge in der Luft erfolgen (siehe Abbildung 8.16). Das auf die Luftschläge folgende Auftreffen auf den Untergrund erfolgt dann mit einer viel größeren Bodenkontaktkraft. Das Springen stellt im Hinblick auf den Verdichtungserfolg einen sehr günstigen Betriebszustand dar. Allerdings wird das Verdichtungsgerät deutlich stärker beansprucht als im Betriebszustand Abheben.

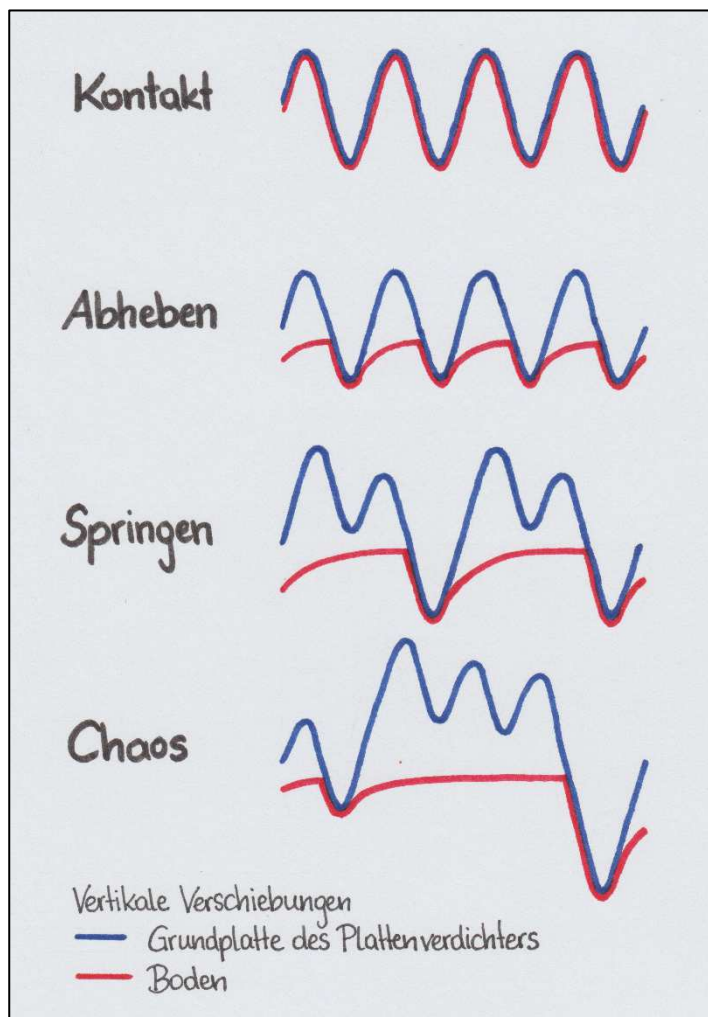


Abbildung 8.32: Skizzenhafte Darstellung der Betriebszustände des Plattenverdichters

Chaos

Eine weitere Zunahme der Untergrundsteifigkeit führt zu einem chaotischen, nicht periodischen Bewegungsverhalten des Plattenverdichters. Der Betriebszustand Chaos zeichnet sich beispielsweise in den Simulationsergebnissen des mechanischen Modells in Abbildung 8.20 und in der Auswertung der Feldversuche in Abbildung 8.27 ab. Eine ausreichende Verdichtungswirkung kann im Betriebszustand Chaos nicht mehr gewährleistet werden weshalb dieser Betriebszustand zu vermeiden ist. Zudem vermindert sich im Betriebszustand Chaos die Oberflächenqualität und das Verdichtungsgerät wird stark belastet.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die in der vorliegenden Diplomarbeit beschriebenen Plattenverdichter sind Teil der Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R von *Plasser & Theurer* und dienen der Verdichtung einer neu eingebauten ungebundenen Tragschicht. Die AHM kommt bei einer nicht zufriedenstellenden Lagegenauigkeit des Gleises oder einer nicht ausreichenden Qualität des Unterbaus zum Einsatz. Diese Gleisbaumaschine wurde in den neunziger Jahren entwickelt und weist gegenüber den davor verwendeten Maschinen eine effizientere und wirtschaftlichere Abwicklung der gleisgebundenen Unterbausanierungsarbeiten auf. Im Vergleich zu konventionellen Gleisbauarbeiten, bieten die AHM den wesentlichen Vorteil, dass Nachbargleise nicht beeinträchtigt werden, der Materialtransport fast ausschließlich auf den Schienen stattfindet und zumeist von kürzeren Bauzeiten ausgegangen werden kann.

Betrachtet man die einzelnen Arbeitsschritte der AHM, erfolgt zu Beginn das Anheben des Gleisrostes. Danach wird mit zwei Räumketten der Gleisschotter, das vorhandene Tragschichtmaterial und zum Teil auch anstehender Untergrund bis in eine Tiefe von maximal 120 cm unter der Schienenoberkante ausgebaut. Der mit der ersten Aushubkette aufgenommene Schotter wird auf der Maschine gebrochen und für den Wiedereinbau vorbereitet. Durch das Schotterrecycling kann der erforderliche Materialtransport reduziert werden. Nach dem Materialaushub wird das Planum abgezogen, zumeist eine Geokunststoffeinlage verlegt und anschließend das neue Tragschichtmaterial eingebracht. Diese geschüttete 50 cm starke Schicht besteht aus recyceltem Schotter und zugeliefertem, qualitätsgesichertem Material. Vor dem Ablegen des Gleisrostes erfolgt die Verdichtung der ungebundenen Tragschicht mit sechs Plattenverdichtern wodurch die Schichtmächtigkeit auf 40 bis 45 cm reduziert wird.

Die mit der AHM hergestellte ungebundene Tragschicht besteht aus sandigem Kies. Anforderungen an das Material sind in den Technische(n) Lieferbedingungen 07.09.18: 2014 [28] und der RVS 08.15.01: 2010 [37] festgelegt. Zwei vorgegebene Grenzsieblinien definieren die Kornverteilungslinie des Tragschichtmaterials. Der Feinkornanteil darf maximal drei Masseprozent betragen, sodass eine ausreichende Frostsicherheit gewährleistet werden kann. Zusätzlich zum Frostschutz muss die ungebundene Tragschicht als lastverteilende Schicht wirken. Die Spannungen auf den Unterbau werden reduziert und schädliche Verformungen am Unterbauplanum vermeiden. Die Tragschicht trennt den Untergrund vom Gleisschotter, verhindert das Aufsteigen von feinen Kornfraktionen sowie die Zermürbung des Untergrunds durch die Schotterkörner, dient der Entwässerung des Planums und besitzt eine Drainagewirkung. Aufgrund der angeführten Funktionen hat die ungebundene Tragschicht eine nicht zu unterschätzende Bedeutung für die Qualität der gesamten Gleiskonstruktion.

Das Bewegungsverhalten von Vibrationsplatten wurde von *Anderegg* [9], [10], [11] untersucht. *Anderegg* [9] vergleicht eine Vibrationswalze und eine Vibrationsplatte und zeigt, dass die

Vibrationsplatte nicht zwangsweise bei jeder Unwuchtumdrehung auf den Boden aufschlägt, sondern aber weit höhere dynamische Kräfte in den Boden eingeleitet werden. Der Unter- und Ober- teil einer Vibrationsplatte sind über Gummipuffer miteinander verbunden, wodurch zufolge *Andereggs* [11] subharmonische, nichtlineare Schwingungen entstehen. Weiters beschreibt er, dass ein chaotisches Bewegungsverhalten durch die Regelung der Anregungsfrequenz des Erregersystems verhindert werden kann.

Eine wichtige Grundlage in Bezug auf die Beschreibung des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters stellt der Forschungsbericht zur *Technischen Weiterentwicklung der AHM* [6] dar. Im Zuge dieser Forschungsarbeit wurden verschiedene Versuche während dem Baustellenbetrieb und auf einem Versuchsfeld durchgeführt. Die Grundplatte und der Rahmen des Plattenverdichters wurden für die Versuche mit Beschleunigungssensoren ausgestattet. Die Auswertung der Messergebnisse zeigte ein sehr unregelmäßiges Schwingungsverhalten in Fahrtrichtung und in vertikaler Richtung während der Untergrundverdichtung. Es stellte sich heraus, dass die Massenverhältnisse einen deutlichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten haben, weshalb der Rahmen des Plattenverdichters versuchsweise mit Zusatzgewichten belastet wurde. Mit Hilfe der aufgebrauchten Zusatzmassen konnte ein gleichmäßigeres Bewegungsverhalten des Plattenverdichters verzeichnet werden.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Beschreibung des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters während der Verdichtung. Ein mechanisches Modell zur Veranschaulichung der Interaktion des Plattenverdichters mit dem Boden wurde erstellt. Der Plattenverdichter besteht aus einem Unterteil (Grundplatte) und einem Ober- teil (Rahmen). Die Modellierung erfolgte als Zwei-Massen-Schwinger, wobei sich die beiden Teile ausschließlich in vertikaler Richtung bewegen können. Die Grundplatte und der Rahmen sind mit Gummipuffern verbunden, die als Feder-Dämpfer-Element modelliert wurden. Die Modellierung des Bodens erfolgte über ein Feder-Dämpfer-Element und eine elastische Feder zur Beschreibung der plastischen Verformungen, welche in Serie geschaltet wurden. Unter Verwendung des Konusmodells nach *Wolf* [43] konnten die Federsteifigkeit und der Dämpfungsparameter des Kelvin-Voigt-Elements ermittelt werden. Die elastische Feder zur Beschreibung der plastischen Verformungen ist nur während der Betriebsphase Belastung aktiv und in den Betriebsphasen Entlastung und Abheben gesperrt. Eine derartige Modellierung des Bodens wurde bereits von *Hager* [17] durchgeführt. Der beiden Teilsysteme (Plattenverdichter und Boden) wurden über die Kontaktbedingungen gekoppelt. Aus den Kontaktbedingungen resultieren drei Betriebsphasen Belastung, Entlastung und Abheben. Die Zuordnung zu den Betriebsphasen ist von der Größe und dem Gradienten der Bodenkontaktkraft sowie von den vertikalen Verschiebungen zwischen der Grundplatte und dem Boden abhängig.

Die Simulation wurde semi-analytisch durchgeführt, was bedeutet, dass für den betrachteten Zeitschritt Berechnungsergebnisse des vorherigen Zeitschrittes verwendet wurden. Zwischen den einzelnen Berechnungsschritten liegen 0,00001 Sekunden, wodurch der Fehler minimal wird. In das Modell fließen verschiedene Eingangsgrößen ein, wobei nicht alle bekannt sind. Die Massen der einzelnen Bauteile konnten abgewogen und die Exzentrizität der Unwucht abgeschätzt werden. Zwei Unbekannte sind die Federsteifigkeit und der Dämpfungsparameter der Gummipuffer zwischen Unter- und Ober- teil.

Als Simulationsergebnisse wurden die vertikalen Verschiebungen, die Bodenkontaktkräfte und die in den Boden eingebrachte Verdichtungsarbeit analysiert. Im Zuge der Auswertung konnte eine regelmäßige Abfolge der Betriebsphasen Belastung, Entlastung und Abheben festgestellt werden. Einen entscheidenden Einfluss auf das Bewegungsverhalten stellt der dynamische Verformungsmodul des Bodens dar. Mit der Erhöhung des E_{vd} -Wertes geht ein Auftreffen der Grundplatte auf den Boden mit nur jeder zweiten Unwuchtumdrehung und eine Zunahme der auftretenden Bodenkontaktkräfte einher. Die Kombination unterschiedlicher Federsteifigkeiten und Dämpfungsparameter der Gummipuffen führen zu einer großen Bandbreite ungleichmäßiger, chaotischer Bewegungen von Grundplatte und Rahmen.

Im mechanischen Modell wurde auf den Rahmen des Plattenverdichters eine Zusatzmassen aufgebracht, um die hervorgerufenen Veränderungen im Bewegungsverhalten zu untersuchen. Eine zusätzliche Auflast bewirkt größere Bodenkontaktkräfte und eine Vergrößerung der in den Boden eingebrachten Arbeit.

Im Zuge des Forschungsprojekts *Technischen Weiterentwicklung der AHM* [6] wurden auch Feldversuche zur experimentellen Untersuchung des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters durchgeführt. An der Grundplatte und am Rahmen des Plattenverdichters wurden Beschleunigungssensoren zur Messung der auftretenden Beschleunigungen montiert. Aus diesen konnten durch zweifache Integration im Zuge der Auswertung die Schwingwege errechnet werden. Die Vorauswertung wurde von *Affenzeller* [8] durchgeführt. Betrachtet man die vertikalen Schwingwege des Unter- und Oberteils, treten nur teilweise regelmäßige Bewegungsmuster auf. Die vertikalen Verschiebungen der Grundplatte während den Feldversuchen sind etwa zehnmal größer als jene des Rahmens.

Basierend auf den Ergebnissen der mechanischen Modellierung und der experimentellen Untersuchungen kann das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters in die Betriebszustände Kontakt, Abheben, Springen und Chaos eingeteilt werden. Im Betriebszustand Kontakt verlieren des Verdichtungsgerät und der Boden nie den Kontakt zueinander. Für diesen Zustand sind entsprechend geringe Untergrundsteifigkeiten Voraussetzung. Das Abheben zeigt mit jeder Unwuchtumdrehung eine regelmäßige Abfolge von Belastung, Entlastung und Abheben. Sehr häufig tritt in den Simulationsergebnissen und Versuchsauswertungen der Betriebszustand Springen auf. Das Springen ist gekennzeichnet durch einen abwechselnd starken und einen schwachen Schlag auf das zu verdichtenden Material. Beim vollen Springen verschwindet der schwache Schlag zur Gänze und stattdessen tritt ein Luftschlag auf. Im Betriebszustand Springen entstehen weit größere Bodenkontaktkräfte und eine höhere Schlagenergie wird erreicht. Mit dem Betriebszustand Chaos, welcher ein unregelmäßiges und chaotisches Bewegungsverhalten beschrieben, kann keine zufriedenstellende Verdichtungsqualität gewährleistet werden.

Die „Weiterentwicklungen der Tragschichtverdichtung mittels Plattenverdichtern“ kann im Hinblick auf das Bewegungsverhalten um die in der vorliegenden Diplomarbeit gewonnenen Erkenntnisse und Rückschlüsse erweitert werden. Das übergeordnete Ziel umfasst die Überwachung der durchgeführten Tragschichtverdichtung sowie die Entwicklung eines arbeitsintegrierten Kontrollwertes, der Auskunft über den Verdichtungserfolg gibt. Die Bodenverdichtung mit Vibrations- und Oszillationswalzen ermöglicht dies bereits über die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle

(FDVK). Die Beschreibung des Bewegungsverhaltens ist die Grundvoraussetzung für die Entwicklung einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle. So wie im Falle der Walzen aus dem Bewegungsverhalten der Bandage Rückschlüsse auf die Bodenverdichtung gezogen werden, sollen Schwachstellen und Steifigkeitsunterschiede im Tragschichtmaterial und im Untergrund über das Bewegungsverhalten der Grundplatte des Plattenverdichters lokalisierbar werden.

Die Simulationsergebnisse der durchgeführten Parametervariationen des mechanischen Modells sowie die ersten Auswertungen der Feldversuche geben einen guten Einblick in das Bewegungsverhalten des Plattenverdichters. Aus diesem Grund kann positiv in die Entwicklung einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle geblickt werden und weitere Forschungsarbeiten erscheinen als vielversprechend.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Adam D. (1996): *Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen*; Dissertation, Technische Universität Wien
- [2] Adam D. (2006): *Backfilling and Clousure of the deep repository, Roof Compactor, Laboratory and field Tests, Numerical simulations*; Technical Report, Brunn am Gebirge
- [3] Adam D., Paulmichl I. (2009): *Bodenmechanische und bodenphysikalische Grundlagen der Bodenverbesserung*; Veranstaltung der VÖBU: Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Bodenverbesserung, Wien
- [4] Adam D., Paulmichl I., Kopf F., Erdmann P. (2011): *Integrierte Verdichtungskontrollen bei dynamischen Verdichtungsverfahren*; Symposium „Baugrundverbesserung in der Geotechnik“; Universität Siegen
- [5] Adam D. (2016): *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*; Institut für Grundbau Boden- und Felsmechanik, Technische Universität Wien
- [6] Adam D., Pistor J., Hausenberger A. (2018): *Technische Weiterentwicklung AHM – Forschungsbericht*; Institut für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, Technische Universität Wien
- [7] Adam D., Kopf F., Pistor J. (2019): *Studienblätter zur Vorlesung Bodendynamik*; Institut für Grundbau Boden- und Felsmechanik, Technischen Universität Wien
- [8] Affenzeller M. (2020): *Vorauswertung dynamischer Messungen an einem Plattenverdichter der gleisgebundenen Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R*; Projektarbeit, Technische Universität Wien
- [9] Anderegg R., von Felten D., Kaufmann K. (2007): *Die Dynamik von Vibrationsplatten*; Straßen- und Tiefbau 10/2007
- [10] Anderegg R., Recher L. (2010): *Control of chaotic vibrations using principle of autoparametric resonances*; ETH Zürich
- [11] Anderegg R. (2018): *Automatische Verdichtungskontrolle: eine Anwendung der nichtlinearen Schwingungstheorie*; Anniversary Symposium - 40 Years of Roller Integrated Continuous Compaction Control (CCC); Technische Universität Wien
- [12] Auer F., Zuzic M., Schilder R., Breyman H. (2007): *13 Jahre Erfahrung mit gleisgebundener Untergrundsanieung im Netz der ÖBB*; ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, Nr. 12, 12/2007

- [13] Brandl H., Adam D. (2000): *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen- Grundlagenforschung und praktische Anwendung*; Bundesministerium für Verkehr, Innovation u. Technologie, Republik Österreich, Bundesstraßenverwaltung, Heft 506
- [14] Erdmann P., Adam D. (2014): *Numerical simulation of dynamic soil compaction with vibratory compaction equipment*; XV Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, ÖIAV Österreichischer Ingenieur- und Architektenverein, Wien
- [15] Google Maps (2019): *Ausschnitt aus der Satellitenaufnahme von Fischamend*; URL: <https://www.google.at/maps/@48.119436,16.589634,1640m/data=!3m1!1e3?hl=de>
- [16] Hager M. (2015): *Messwerte der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) im theoretischen und experimentellen Vergleich*; Diplomarbeit, Technischen Universität Wien
- [17] Hager M., Pistor J., Adam D. (2019): *Semi-analytische Modellierung der Bandagen-Boden-Interaktion für die Verdichtung mit Vibrationswalzen*; Tagungsband der 16. D-A-CH Tagung, Österreichische Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (OGE)
- [18] Hansmann F. (2016): *Großmaschineneinsatz bei Untergründen mit geringer Tragfähigkeit*; EI – Der Eisenbahningenieur – Sonderheft Geotechnik, 8/2016
- [19] Indraratna B., Salim W., Rujikiatkamjorn Ch. (2011); *Advanced Rail Geotechnology – Ballasted Track*; Taylor & Francis Group, LLC
- [20] Kolymbas D. (2011): *Geotechnik; Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*; 3., neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag
- [21] König F. (1994): *Verdichtung im Erd- und Straßenbau*; Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin
- [22] König H. (2011): *Maschinen im Baubetrieb – Grundlagen und Anwendung*; Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
- [23] Kopf F., Adam C., Paulmichl I. (2005): *Untersuchungen des dynamischen Lastplattenversuches mit dem Leichten Fallgewichtsgesetz unter Verwendung der Randelementmethode*; Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, 150. Jahrgang, Heft 4-5/2005
- [24] Kröber W. (1988): *Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden*; Schriftreihe Heft 11, Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau Bodenmechanik und Felsmechanik, Technischen Universität München
- [25] Li D., Hyslip J., Sussmann T., Chrismer S. (2015): *Railway Geotechnics*; Taylor & Francis Group, LLC
- [26] Lichtenberger B. (2010): *Handbuch Gleis – Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*; DVV Media Group GmbH | Eurailpress, Linz

- [27] Nohlen U., Konietzky H. (2012): *Verdichtung steif-halbfester bindiger Böden mit Bagger-Anbauverdichtern*; 2 Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik, Technische Universität Wien
- [28] ÖBB Technische Lieferbedingungen 07.09.18 (2014): *Tragschichtmaterial 0/32 für maschinelle Untergrundsanie rung*; ÖBB Infrastruktur AG
- [29] ÖNORM B 4410 (1974): *Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung*; Austrian Standards
- [30] ÖNORM B 4412 (1974): *Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Korngrößenverteilung*; Austrian Standards
- [31] ÖNORM B 4414-2 (1979): *Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Dichte des Bodens – Feldverfahren*; Austrian Standards
- [32] ÖNORM B 4418 (2012): *Geotechnik – Durchführung von Proctorversuchen im Erdbau unter Einbeziehung der ÖNORM EN 13286-2*; Austrian Standards
- [33] Pösch H., Ikes W. (1975): *Verdichtungstechnik und Verdichtungsgeräte im Erdbau*; Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin
- [34] RVS 08.03.01 (2010): *Technische Vertragsbestimmungen, Vor- Abtrags- und Erdarbeiten, Erdarbeiten*; Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV)
- [35] RVS 08.03.02 (1999): *Technische Vertragsbestimmungen, Vor- Abtrags- und Erdarbeiten, Kontinuierlicher walzenintegrierter Verdichtungsnachweis*; Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV)
- [36] RVS 08.03.04 (2008): *Technische Vertragsbestimmungen, Vor- Abtrags- und Erdarbeiten, Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches*; Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV)
- [37] RVS 08.15.01 (2010): *Technische Vertragsbedingungen, Unterbauplanum und ungebundene Tragschichten, Ungebundene Tragsichten*; Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV)
- [38] Schilder R., Piereder F. (2000): *Planumsverbesserung mit der Aushubmaschine AHM 800-R*; ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 49, Heft 9, 9/2000
- [39] Selig E. T., Waters J. M. (1994): *Track Geotechnology and Substructure Management*; Railway Geotechnical Consultant Derby, England
- [40] Sharpe Ph., Strange P. (2009): *Optimisation of ballast compaction by continous monitoring of ground stiffness*
- [41] Swietelsky (2018): *Bahnbaumaschinen*; Swietelskie Baugesellschaft, 4/2018, Österreich
- [42] Wimmer International: *Produktdatenblatt Bodenverdichter WB*;
<https://www.wimmer.info/de/produkte/bodenverdichter/bodenverdichter-wb/>;
abgerufen am 09.12.2019

- [43] Wolf J.P. (1994): *Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Unterbausanierungsmaschine AHM 800-R; Foto von Plasser & Theurer	13
Abbildung 2.2: Aufbau der AHM 800-R [38]	15
Abbildung 2.3: Planumsaushubkette; Foto von Plasser & Theurer	17
Abbildung 2.4: Geovliesverlegung und Tragschichtmaterialeinbau; Foto von Plasser & Theurer ..	17
Abbildung 2.5: Plattenverdichter der AHM 800-R; Foto von Plasser & Theurer	19
Abbildung 3.1: Lage der Tragschicht (PSS) im Oberbau; adaptiert RVS 08.03.01: 2010 [34]	23
Abbildung 3.2: Anforderungen an die Sieblinie der Planumsschutzschicht; rot: untere Grenze, blau: obere Grenze; adaptiert [38]	27
Abbildung 4.1: Ausgewählte Verdichtungsverfahren; adaptiert [5]	33
Abbildung 4.2: Prinzip der statischen Verdichtung; adaptiert [5]	33
Abbildung 4.3: Prinzip der dynamischen Verdichtung; adaptiert [5]	34
Abbildung 4.4: Betriebszustände einer Vibrationswalze [1]	36
Abbildung 4.5: Rüttelplatte - Handgerät [22]	38
Abbildung 4.6: Aufbau und Komponenten des Leichten Fallgewichtsgeräts [5]	42
Abbildung 4.7: Prinzip eines FDVK-Systems; oben: Komponenten einer Vibrationswalze mit FDVK-System; unten: gemessene Bandagenbeschleunigung; rechts: Darstellung des Verdichtungsfortschrittes auf dem Display [5]	44
Abbildung 4.8: Arbeitsdiagramme; adaptiert [1]	45
Abbildung 5.1: Autoparametrische Resonanz [11]	48
Abbildung 5.2: Horizontale und vertikale Schwingwege des Plattenverdichters; links: Nullmessung; rechts: Baustellenmessung [6]	51
Abbildung 5.3: Horizontale und vertikale Schwingwege des Plattenverdichters; links: 120 kg Zusatzgewicht; rechts: 670 kg Zusatzgewicht [6]	53
Abbildung 6.1: Mechanisches Modell des Plattenverdichters	56
Abbildung 6.2: Mechanisches Modell des Bodens	58
Abbildung 6.3: Konusmodell nach Wolf; adaptiert [43]	59
Abbildung 6.4: Mechanisches Modell der Interaktion des Plattenverdichters mit dem Boden	62
Abbildung 6.5: Darstellung der Betriebsphasen des Plattenverdichters	63
Abbildung 6.6: Abmessungen der Grundplatte des Plattenverdichters; Bauhof der Swietelsky	68
Abbildung 6.7: Ermittlung der Unwuchtmasse; Bauhof der Swietelsky	70
Abbildung 6.8: Abmessung der Unwucht; Bauhof der Swietelsky	71
Abbildung 7.1: Laufbildaufnahme des Versuchsfeldes in der Kiesgrube [15]	75

Abbildung 7.2: Spur 1 und Spur 2 der Versuchsstrecke; Versuchsfeld in Fischamend.....	76
Abbildung 7.3: Anordnung der Positionssensoren für die Bestimmung der Lage der Unwucht; Bauhof der Swietelsky	77
Abbildung 7.4: Anordnung der Beschleunigungssensoren auf der Grundplatte; Bauhof der Swietelsky.....	78
Abbildung 7.5: Von Seilwinde gezogener Hydraulikbagger mit Plattenverdichter; Versuchsfeld in Fischamend.....	79
Abbildung 7.6: Plattenverdichter während der Messfahrt; Versuchsfeld in Fischamend.....	80
Abbildung 8.1: Verschiebungen mit Kennzeichnung der drei Betriebsphasen	83
Abbildung 8.2: Bodenkontaktkräfte aufgeteilt nach den Anteilen des Bodens mit Kennzeichnung der drei Betriebsphasen	83
Abbildung 8.3: Bodenkontaktkräfte aufgeteilt nach den Anteilen des Plattenverdichters mit Kennzeichnung der drei Betriebsphasen.....	84
Abbildung 8.4: Arbeitsdiagramm	84
Abbildung 8.5: Bodenkontaktkräfte aufgeteilt nach den Anteilen des Plattenverdichters über die Zeit mit Kennzeichnung der mittleren Bodenkontaktkraft	86
Abbildung 8.6: Verschiebungen; $f = 30$ Hz, $f = 40$ Hz und $f = 50$ Hz (von oben nach unten)	88
Abbildung 8.7: Erregerkraft und Bodenkontaktkraft; $f = 30$ Hz, $f = 40$ Hz und $f = 50$ Hz (von oben nach unten)	89
Abbildung 8.8: Gemessene E_{vd} -Werte des Testfeldes auf Spur 1	92
Abbildung 8.9: Gemessene E_{vd} -Werte des Testfeldes auf Spur 2	92
Abbildung 8.10: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für $E_{vd} = 10$ MN/m ² ($G = 3,05$ MN/m ²)	94
Abbildung 8.11: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für $E_{vd} = 25$ MN/m ² ($G = 7,6$ MN/m ²)	95
Abbildung 8.12: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für $E_{vd} = 40$ MN/m ² ($G = 13,7$ MN/m ²)	96
Abbildung 8.13: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für $E_{vd} = 55$ MN/m ² ($G = 20,6$ MN/m ²)	97
Abbildung 8.14: Arbeitsdiagramme; links oben: für $E_{vd} = 10$ MN/m ² ; rechts oben: für $E_{vd} = 25$ MN/m ² ; links unten: für $E_{vd} = 40$ MN/m ² ; rechts unten: für $E_{vd} = 55$ MN/m ²	98
Abbildung 8.15: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für $E_{vd} = 49$ MN/m ² ($G = 17,9$ MN/m ²)	99
Abbildung 8.16: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für $k_r = 200\ 000$ N/m und $c_r = 3\ 500$ Ns/m	103
Abbildung 8.17: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für $k_r = 20\ 000\ 000$ N/m und $c_r = 3\ 500$ Ns/m	104

Abbildung 8.18 Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für $k_r = 2\,000\,000\text{ N/m}$ und $c_r = 3\,500\,000\text{ Ns/m}$ mit Darstellung der maximalen Bodenkontaktkraft und der Summe der in den Boden eingetragenen Arbeit....	105
Abbildung 8.19: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für $k_r = 200\,000\,000\text{ N/m}$ und $c_r = 35\,000\text{ Ns/m}$	106
Abbildung 8.20: Verschiebungen, Bodenkontaktkräfte und Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für $k_r = 200\,000\,000\text{ N/m}$, $c_r = 35\,000\text{ Ns/m}$ und $E_{vd} = 55\text{ MN/m}^2$	107
Abbildung 8.21: Verschiebungen; $m_z = 0\text{ kg}$, $m_z = 250\text{ kg}$ und $m_z = 500\text{ kg}$ (von oben nach unten)	110
Abbildung 8.22: Erregerkraft und Bodenkontaktkraft; $m_z = 0\text{ kg}$, $m_z = 250\text{ kg}$ und $m_z = 500\text{ kg}$ (von oben nach unten)	111
Abbildung 8.23: Arbeitsdiagramme; links oben: $m_z = 0\text{ kg}$; rechts oben: $m_z = 250\text{ kg}$; unten: $m_z = 500\text{ kg}$	112
Abbildung 8.24: Anordnung der für die Auswertung der Messergebnisse herangezogenen Beschleunigungssensoren am schematisch dargestellten Plattenverdichter.....	113
Abbildung 8.25: Schwingwege von Grundplatte und Rahmen für Messfahrt 01 bei geringem Anpressdruck; adaptiert [8]	114
Abbildung 8.26: Schwingwege von Grundplatte und Rahmen für Messfahrt 01 bei hohem Anpressdruck; adaptiert [8]	115
Abbildung 8.27: Schwingwege von Grundplatte und Rahmen für Messfahrt 05; adaptiert [8] ...	116
Abbildung 8.28: Schwingwege von Grundplatte und Rahmen für Messfahrt 06; adaptiert [8] ...	117
Abbildung 8.29: Schwingwege von Grundplatte und Rahmen für Messfahrt 04; adaptiert [8] ...	118
Abbildung 8.30: Vergleich der vertikalen Verschiebungen von Grundplatte (blau, z_1 bzw. APm) und Rahmen (rot, z_2 bzw. AR1).....	119
Abbildung 8.31: Vertikale Verschiebungen von Grundplatte (blau, z_1) und Rahmen (rot, z_2) nach der Anpassung der Berechnungsparameter	120
Abbildung 8.32: Skizzenhafte Darstellung der Betriebszustände des Plattenverdichters	122



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Verdichtungsanforderungen für den Einbau von Tragschichten zur Unterbauherstellung von bestehenden Eisenbahnstrecken gemäß RVS 08.03.01: 2010 [34]	28
Tabelle 3.2: Verdichtungsanforderungen bei der AHM-Sanierung gemäß ÖBB (Prüfung sofort nach der Herstellung) [6]	28
Tabelle 4.1: Übersicht der Bodenverbesserungsverfahren [3]	32
Tabelle 4.2: Geometrische Abmessungen und Maschinendaten des Plattenverdichters WB B 530 der Firma Wimmer [42]	39
Tabelle 6.1: Parameter zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens des Plattenverdichters	56
Tabelle 6.2: Verwendete Parameter zur Beschreibung des Bodens	59
Tabelle 6.3: Verwendete Parameter zur Beschreibung des Konusmodells nach Wolf	60
Tabelle 6.4: Übersicht der Berechnungsparameter der Modellierung	72
Tabelle 7.1: Übersicht der durchgeführten Messfahrten (ohne Nullversuche)	79
Tabelle 8.1: Maximale Bodenkontaktkraft und eingebrachte Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für verschiedene Frequenzen	87
Tabelle 8.2: Maximale Bodenkontaktkraft und eingebrachte Verdichtungsarbeit für zwei Unwuchtumdrehung für verschiedene dynamische Verformungsmoduln	93
Tabelle 8.3: Maximale Bodenkontaktkraft im betrachteten Zeitraum von 0,3 bis 0,7 Sekunden für verschiedene Kombinationen von Federsteifigkeit und Dämpfungsparameter	101
Tabelle 8.4: Summe der eingebrachten Verdichtungsarbeit im betrachteten Zeitraum von 0,3 bis 0,7 Sekunden für verschiedene Kombinationen von Federsteifigkeit und Dämpfungsparameter	102
Tabelle 8.5: Maximale Bodenkontaktkraft und eingebrachte Verdichtungsarbeit je Unwuchtumdrehung für verschiedene Zusatzmassen	109



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

13 Liste häufig verwendeter Symbole

Lateinische Großbuchstaben

Abkürzungen und weitere Symbole

AHM	Unterbausanierungsmaschine AHM 800 – R
FDVK	Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle
FSS	Frostschutzschicht
LFG	Leichtes Fallgewichtsgerät
MFS	Materialförder- und Silo-Einheiten
PSS	Planumsschutzschicht
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen

Griechische Buchstaben

ϵ	Zustandsfaktor
ν	Querdehnzahl
ρ	Dichte des Bodens in g/cm^3
ρ_d	Trockendichte des Bodens in g/cm^3
ρ_{pr}	Proctordichte des Bodens in g/cm^3
ω	Winkelgeschwindigkeit in rad/s

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Länge der Plattenverdichters
b	Breite des Plattenverdichters
c_e	Dämpfungsparameter des Bodens in Ns/m
c_r	Dämpfungsparameter zwischen Unter- und Oberteil in Ns/m
e	Exzentrizität der Unwuchtmasse in m
f	Anregungsfrequenz in Hz
g	Erdbeschleunigung in m/s^2
k_e	elastische Federsteifigkeit des Bodens in N/m
k_p	plastische Federsteifigkeit des Bodens in N/m
k_r	Federsteifigkeit zwischen Unter- und Oberteil in N/m
m_e	Masse der Unwucht in kg
m_g	Masse des Unterteils in kg
m_{ges}	Gesamtmasse aus Plattenverdichter und Zusatzmasse in kg
m_{PLV}	Masse des Plattenverdichters in kg
m_r	Masse des Oberteils in kg

m_z	Zusatzmasse in kg
t	Zeit in s
w_{opt}	optimaler Wassergehalt aus dem Proctorversuch in %
z_0	vertikale Verschiebung des Bodens in m
z_1	vertikale Verschiebung des Unterteils in m
\dot{z}_1	vertikale Geschwindigkeit des Unterteils in m/s
\ddot{z}_1	vertikale Beschleunigung des Unterteils in m/s^2
z_2	vertikale Verschiebung des Oberteils in m
\dot{z}_2	vertikale Geschwindigkeit des Oberteils in m/s
\ddot{z}_2	vertikale Beschleunigung des Oberteils in m/s^2
z_e	vertikale elastische Verschiebung des Bodens in m
z_p	vertikale plastische Verschiebung des Bodens in m
$z_{p,abs}$	absolute vertikale plastische Verschiebung des Bodens in m
$z_{p,vor}$	plastische Vorverformungen in m

Lateinische Großbuchstaben

D_{pr}	Verdichtungsgrad in %
E	Elastizitätsmodul in MN/m^2
E_v	Verformungsmodul des Bodens in MN/m^2
E_{v1}	Verformungsmodul der Erstbelastung (auch Erstbelastungsmodul) des Bodens beim statischen Lastplattenversuch in MN/m^2
E_{v2}	Verformungsmodul der Wiederbelastung des Bodens beim statischen Lastplattenversuch in MN/m^2
E_{vd}	Dynamischer Verformungsmodul des Bodens in N/m^2
F_b	Bodenkontaktkraft in N
\dot{F}_b	Gradiente der Bodenkontaktkraft in N/s
F_{err}	Erregerkraft in N
$F_{p,vor}$	Vorspannung der elastischen Feder zur Darstellung der plastischen Verformungen in N
F_z	Zentrifugalkraft in N
F_r	Kraft aus dem Dämpfungs- und Steifigkeitsanteil der Gummipuffer in N
G	Schubmodul des Bodens in N/m^2
G_d	Dynamischer Schubmodul des Bodens in N/m^2
U	Unwuchtmoment in kgm



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.