Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

Messwerte der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) im theoretischen und experimentellen Vergleich

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplomingenieurs

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**
und
Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Johannes Pistrol**, Bsc.

E220
Institut für Geotechnik
Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Mario Hager, Bsc.
0525325
Kaiserstrasse 107/28, 1070 Wien

Wien, im April 2015 .....

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen Danke sagen, die mich während meiner Studienzeit motiviert und vorangetrieben haben und somit auch wesentlich zum Gelingen vorliegender Abschlussarbeit beigetragen haben. Im Besonderen seien dabei folgende Personen erwähnt:

Bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam bedanke ich mich für seinen spannenden, interessanten und praxisorientierten Lehrstil im Hörsaal, der mich überhaupt erst dazu bewegt hat, auf diesem Gebiet meine Diplomarbeit zu verfassen.

Ebenso danke ich meinem Freund, Univ.Ass. Dipl.-Ing. Johannes Pistrol, Bsc. für die zahlreichen Inspirationen, die Betreuung und die geopferte Zeit im Laufe der Entstehung dieser Arbeit.

Ein spezielles Dankeschön für die gegenseitige Unterstützung während des gesamten Studiums, möchte ich auch an meine Freunde und Kollegen Bernhard, Christoph, Dominik, Lukas und Patrick richten, die mit mir gelernt, diskutiert und gefeiert haben.

Bei meiner langjährigen Freundin Sarah Zauner bedanke ich mich für den gebotenen Rückhalt, die wertvolle moralische Unterstützung und nicht zuletzt für so manchen Verzicht.

Mein größter Dank gilt allerdings meinen Eltern Ernst und Hannelore Hager, die mir mein Studium an der Technischen Universität Wien, durch ihre finanzielle Unterstützung, überhaupt erst ermöglicht haben.

Kurzfassung

Die stetig verbesserten Verdichtungstechniken im Erd- bzw. Grundbau, die steigenden Einbauleistungen und die daraus resultierenden kürzeren Bauzeiten, erfordern zwangsläufig auch den Einsatz von adäquaten Prüftechniken des erzielten Verdichtungserfolges. Konventionelle, punktuelle Prüfmethoden entsprechen dabei, vor allem bei Großbaustellen, schon lange nicht mehr dem Stand der Technik.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen.
Dabei handelt es sich um eine arbeitsintegrierte Verdichtungsmesskontrolle mit dynamisch erregten Walzen, die es ermöglicht, den Erfolg der Verdichtung unmittelbar, kontinuierlich und flächendeckend zu messen und zudem manipulationssicher dokumentieren zu können. Bewerkstelligt wird dies, indem noch während des Verdichtungsvorganges, aus der Analyse des Schwingungsverhaltens der Bandage, ein Messwert errechnet wird, der Rückschlüsse auf den erreichten Bodenverdichtungszustand zulässt.
Diese relativ moderne Möglichkeit der Verdichtungskontrolle ist durch die Gesamtheit all der, aus ihr resultierenden Vorteilen im Stande, die Qualität bzw. die Homogenität und Langlebigkeit von Erdbauwerken bedeutend zu steigern.

Nach einer kurzen Einführung in die Thematik folgt in Kapitel 2 eine theoretische Beschreibung der Grundlagen der Oberflächenverdichtung.
Zuerst werden die Ziele und Methoden der Bodenverdichtung, sowie die wesentlichen Einflussgrößen auf die Verdichtbarkeit von Böden erarbeitet und erläutert. Anschließend wird im Speziellen auf die Oberflächenverdichtung durch Walzen, mit Hauptaugenmerk auf Vibrationswalzen eingegangen. Die unterschiedlichen Walzentypen im Hinblick auf Prinzip, Aufbau und Wirkungsweise werden näher betrachtet. Den Abschluss des Kapitels 2 bilden punktuelle Methoden der Verdichtungskontrolle, die schlussendlich auch den nahtlosen Übergang zu Kapitel 3, welches ausschließlich der FDVK gewidmet ist, darstellen.

In Kapitel 3 werden eingangs Funktionsprinzip, Wirkungsweise, Vor- und Nachteile, sowie Komponenten von FDVK-Systemen behandelt, um danach die führenden auf dem Markt befindlichen Messsysteme (Compactometer, Terrameter, ACE) in den Mittelpunkt zu stellen. Es werden Aufbau, Messprinzip und die jeweiligen Formeln zur Messwertgewinnung angegeben. Des Weiteren wird auf die Kalibrierung von FDVK-Messwerten eingegangen und Einflussgrößen auf FDVK-Messwerte werden besprochen.

Nachdem in Kapitel 4 Versuchsdurchführung und -aufbau der getätigten experimentellen Feldversuche beschrieben werden, werden im fünften Kapitel die, aus den Walzenüberfahrten gewonnen, Messdaten und Signale, welche das Bewegungsverhalten der Walze beschreiben, ausgewertet, analysiert, graphisch aufbereitet, und dargestellt, mit dem Ziel die verschiedenen dynamischen FDVK-Messwerte zu ermitteln, zu diskutieren und vergleichend gegenüberzustellen.

Das sechste und letzte Kapitel soll eine kurze Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse, sowie einen Status-quo Bericht inklusive Ausblick auf mögliche weitere Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet liefern.

Abstract

Steadily improved compaction techniques in earthworks and ground engineering over the course of time, require the use of adequate test equipment to assess the achieved compaction success. For this purpose, conventional and spot like compaction testing methods, especially at large construction sites, are outdated and don't represent the state of the art anymore.

In this master thesis "Continuous Compaction Control" (CCC) is considered in connection with rollers equipped with vibratory exciters. CCC is, as the name suggests, a roller integrated compaction measurement method with dynamically excited rollers, that allows to measure the success of compaction immediately, continuously and to document the results already during the compaction process. This is accomplished by analyzing the motion behavior of the vibratory excited roller drum. Therefore dynamic compaction values, which indicate soil stiffness properties, are calculated from consequently measured drum accelerations. Generally spoken, CCC is based on the measurement of the dynamic interaction between soil and roller. This novel approach of work-integrated compaction control is, due to his numerous advantages (totality of all the benefits arising from them), able to significantly increase the quality, uniformity and durability of earthworks.

After a short introduction into the topic, Chapter 2 describes the theoretical basics of surface near compaction. At first targets, respectively methods of soil compaction, and their essential influencing factors on the compactability of soils, are explained. Methods of surface compaction, with the main focus on vibrating rollers, and the different types of roller with regard to principle, structure and modes of operation are described. Specific methods of compaction tests form the conclusion of the chapter and represent the seamless transition to chapter 3, which is exclusively dedicated to CCC.

At the beginning of Chapter 3, principle of operation, effectiveness, advantages and disadvantages, as well as components of CCC systems are presented, to subsequently

introduce the leading systems on the market (Compactometer, Terrameter, ACE). Their structure, measurement principle as well as respective formulas for determining the individual measure values are presented. Furthermore, the calibration of CCC measurement values and parameters influencing them are discussed.

Chapter 4 describes the procedure, setup and structure of done experimental large scale in situ tests and therefore introduces to the following section 5, which deals with the evaluation of the data and signals, measured and memorized during the roller test passes. These recordings, describing the kinematic roller behavior, are evaluated, determined and graphically shown, with the overall goal to analyze, discuss, interpret and compare the different resulting CCC values.

The sixth and final chapter contains a brief summary of the obtained findings, as well as a status - quo report, that includes and provides views on possible further research activities in this field.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Ziel der Arbeit 4

2 Grundlagen der Bodenverdichtung **5**

2.1 Ziel und Zweck von Bodenverbesserungsmaßnahmen 5

2.2 Methoden der mechanischen Bodenverdichtung 6

2.3 Einflüsse auf den Verdichtungserfolg und die Verdichtungsleistung . . 9

2.3.1 Bodenparameter 9

2.3.1.1 Kornform / Kornrauigkeit 9

2.3.1.2 Korngröße / Feinkornanteil 9

2.3.1.3 Wassergehalt 11

2.3.1.4 Konsistenz / Lagerungsdichte 11

2.3.2 Einbaubedingungen 13

2.3.3 Verdichtungsmaschine 14

2.3.3.1 Walzentypen 14

2.3.3.2 Verdichtungsverfahren / Anregungsart der Bandage 15

2.3.3.3 Bandagenoberfläche 15

2.3.4 Walzenkenngrößen und - parameter 16

2.3.4.1 Konstruktive Parameter 16

2.3.4.2 Variable Parameter 17

2.4 Oberflächenverdichtung mit Walzen 18

2.4.1 Statische Walzen 18

2.4.2 Dynamische Walzen 19

2.4.2.1 Oszillationswalzen 19

2.4.2.2 Vibrationswalzen 21

2.4.2.3 Walzen mit Richtschwinger 22

2.4.2.4 Selbstregelnde Walzen 24

2.4.2.5 Selbstlernende, Intelligente Walzen 27

2.5 Betriebszustände von Vibrationswalzen 28
2.6 Verdichtungsprüfung 30
2.6.1 Arten der Verdichtungsprüfung 30
2.6.2 Methoden der Verdichtungsprüfung 31
2.6.2.1 Allgemeines 31
2.6.2.2 Punktuelle Verdichtungskontrollen 31
2.6.2.3 Flächendeckende Verdichtungskontrolle 37

3 FDVK mit Vibrationswalzen 39
3.1 Allgemeines 39
3.2 Messprinzip und Komponenten 40
3.3 Vorteile und Nachteile der FDVK 42
3.4 Einflussgrößen auf FDVK-Messwerte 44
3.5 Kalibrierung von FDVK-Messwerten 47
3.5.1 Allgemeines 47
3.5.2 Ablauf der Kalibrierung 48
3.5.3 Einflussgrößen auf die Korrelationsbildung 51
3.6 Messsysteme der FDVK 54
3.6.1 Allgemeines 54
3.6.2 Compactometer 56
3.6.2.1 Aufbau 57
3.6.2.2 Prinzip und Wirkungsweise 59
3.6.2.3 Messwerte 60
3.6.3 Terrameter 62
3.6.3.1 Aufbau 62
3.6.3.2 Prinzip und Wirkungsweise 65
3.6.3.3 Messwerte 68
3.6.4 ACE 72
3.6.4.1 Aufbau 73
3.6.4.2 Prinzip und Wirkungsweise 74
3.6.4.3 Messwerte 76

4 Versuchsbeschreibung 79
4.1 Einleitung 79
4.1.1 Allgemeines 79
4.1.2 Areal 80

4.2 Prüffeld . . . 81
4.2.1 Spuren 1 – 4 “Verdichtungsfahrten auf 50 cm Wandschotter” 81
4.2.2 Spur 5 “Verdichtungsfahrten auf steifem Planum” . . . 84
4.2.3 Spuren 6 – 7 “Verdichtungsfahrten auf Schüttung über weichem Untergrund” . . . 85
4.3 Messwalze . . . 86
4.4 Messwerterfassungssysteme . . . 89
4.4.1 Überblick . . . 89
4.4.2 Messwerterfassung Walze . . . 90
4.4.3 Messwerterfassung Boden . . . 91
4.5 Messprotokolle . . . 92
4.6 Vergleichsversuch . . . 95
4.6.1 Dynamische Lastplatte . . . 95

5 Versuchsauswertung 98
5.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus abgeschlossenen Forschungstätigkeiten . . . 98
5.2 Vorbemerkungen zur Auswertung . . . 103
5.2.1 Vorgehensweise bei der Berechnung . . . 103
5.2.2 Allgemeine Bemerkungen . . . 105
5.3 Auswertung der Überfahrten auf den Testspuren . . . 108
5.3.1 Spur 2 . . . 108
5.3.1.1 Dynamische Lastplatte . . . 109
5.3.1.2 Bandagenbeschleunigung . . . 110
5.3.1.3 Vertikale Kräfte - Betriebszustand . . . 111
5.3.1.4 FDVK-Messwerte . . . 113
5.3.2 Spur 3 . . . 124
5.3.2.1 Dynamische Lastplatte . . . 124
5.3.2.2 Bandagenbeschleunigung . . . 125
5.3.2.3 Vertikale Kräfte - Betriebszustand . . . 126
5.3.2.4 FDVK-Messwerte . . . 127
5.3.3 Spur 5 . . . 134
5.3.3.1 Dynamische Lastplatte . . . 135
5.3.3.2 Bandagenbeschleunigung . . . 135
5.3.3.3 Vertikale Kräfte - Betriebszustand . . . 136
5.3.3.4 FDVK-Messwerte . . . 137

5.3.4 Spur 7 140
5.3.4.1 Dynamische Lastplatte 141
5.3.4.2 Bandagenbeschleunigung 141
5.3.4.3 Vertikale Kräfte - Betriebszustand 142
5.3.4.4 FDVK-Messwerte 143
5.4 Korrelationsbildung 149

6 Zusammenfassung und Ausblick 154
6.1 Zusammenfassung 154
6.2 Ausblick 159

Literaturverzeichnis 161

Abbildungsverzeichnis 167

1 Einleitung

Die Tragfähigkeit von anstehenden oder aufgeschütteten Böden ist in der Regel nicht groß genug, um die resultierenden Belastungen unterschiedlichster Herkunft (Bauwerke, Infrastruktur, etc...) sicher aufnehmen zu können.
Aus diesem Grund ist es notwendig, den anstehenden Untergrund mit geeigneten Maßnahmen derart zu überbrücken oder zu verbessern, dass Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit über die gesamte Lebensdauer des Bauwerkes gewährleistet sind und unerwünschte Verformungen auf ein bauwerksverträgliches Maß reduziert werden können.

In der breit gefächerten Palette an Möglichkeiten zur Bodenverbesserung in der Geotechnik stellt die oberflächennahe Bodenverdichtung mit Walzen eine wirtschaftliche und deshalb sehr häufig angewandte Methode dar. Die Verdichtung von lagenweise eingebauten Schüttgutlagen im Erdbau, wie etwa im Zusammenhang mit der Errichtung von Straßen, Eisenbahnen, Flugplätzen, Deponien, Dämmen usw. wird deshalb in der Regel mit Hilfe von statischen oder dynamisch angeregten Walzen durchgeführt. Im bautechnischen Sinne bewirkt die geleistete Verdichtungsarbeit dabei eine Verringerung der mit Luft und Wasser gefüllten Porenräume des zu verdichtenden Untergrundes, was letztendlich zu der gewünschten Erhöhung von Dichte (Raumgewicht), der Vorwegnahme von Setzungen und der Homogenisierung der Tragfähigkeit des Materials führt.

Dabei tritt in zunehmendem Maße die Optimierung und Qualitätssicherung der Verdichtungsmaßnahmen in den Vordergrund. Der Fokus liegt primär auf der Reduktion der Verdichtungszeiten und der benötigten Walzübergänge in Kombination mit der Gewährleistung des geforderten Verdichtungsgrades, der Vermeidung von Qualitätsmängeln und dem effizienten Verdichtungsmaschineneinsatz an sich. Um all diesen aufgelisteten Ansprüchen gerecht werden zu können, ist der Kontrolle und Dokumentation des Verdichtungsprozesses, sowie der erreichten Verdichtungsqualität eine immer größer werdende Bedeutung beizumessen.

Die konventionellen Punktmethoden, die zur Verdichtungskontrolle und Tragfähigkeitsbestimmung herangezogen werden, sind mit groben Nachteilen behaftet. So können die Anforderungseigenschaften lediglich statisch, an meist willkürlich ausgewählten Stellen, gemessen werden und keinesfalls weder den geforderten Gesamtüberblick über das Bauwerk, noch die erforderlichen Detailinformationen über jeden verdichteten Quadratmeter liefern. Zudem behindern bzw. unterbrechen sie den Bauablauf durch teilweise lange Wartezeiten empfindlich, oder werden ohnehin erst nach Abschluss der Verdichtungsarbeiten durchgeführt. Diese Umstände führen letztlich zu unerwünschten Zeitverzögerungen und Nacharbeiten im gesamten Baubetrieb und können deshalb nicht mehr den Anforderungen entsprechen, die heutzutage an eine moderne Baustelle, welche sich unter anderem durch stetig zu steigernde Arbeitsproduktivität auszeichnet, gestellt werden. Die Rede ist dabei vor allem vom alt eingesessenen statischen Lastplattenversuch, von diversen Verfahren zur Dichtebestimmung (Ausstechzylinder, Ersatzverfahren, Isotopensonde etc.), die in der Regel mit physikalischen Laboruntersuchungen (Proctorversuch, lockerste und dichteste Lagerung) zu kombinieren sind und von unterschiedlichen Sondierungsmethoden [9, 40].

Dieser angesprochenen Problematik wurde von fast allen führenden Maschinenherstellern der mechanischen Verdichtungstechnik in den letzten knapp 30 Jahren große Aufmerksamkeit gewidmet. Moderne Elektronik machte es letztendlich möglich, die Kontrollmessungen arbeitsintegriert durchzuführen, gewaltige Datenmengen zu verarbeiten und die Ergebnisse in Form von Messwerten unmittelbar und übersichtlich darzustellen. Der heutige Stand der Technik sind deswegen elektronische, walzenintegrierte Verdichtungsmesssysteme zur Dokumentation des gesamten Verdichtungsprozesses. Das Verfahren hatte seine Anfänge bereits in den 1980er-Jahren [63, 35] und wird als Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bezeichnet. Eine notwendige Vorraussetzung für den Einsatz dieser Methode ist eine dynamisch, entweder durch Vibration oder Oszillation, erregte Bandage. Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich die FDVK mit Vibrationswalzen behandelt.

Die dynamische Verdichtungswirkung von Vibrationswalzen wird durch eine, um die Achse der Bandage, rotierende Unwucht erreicht. Durch die dabei entstehende Kraftwirkung auf den zu verdichtenden Untergrund wird die innere Reibung zwischen den Bodenpartikeln kurzzeitig verringert und dadurch eine Umlagerung der Körner in eine dichtere Lagerung begünstigt. Die dynamisch angeregte Bandage und der zu bearbeitende Untergrund bilden dabei während des gesamten Verdichtungsvorganges

ein schwingendes, interagierendes System mit wechselnden Kontaktbedingungen. Dieses Bewegungsverhalten der Walzenbandage zufolge der Vibrationsverdichtung stellt dabei einen äußerst komplexen, mehrfach statisch unbestimmten und nichtlinearen Vorgang dar. Die auftretenden Nichtlinearitäten resultieren primär aus der gekrümmten Form der Bandage, aus dem plastischen Verhalten des Bodens (Materialnichtlinearität) und aus der eben erwähnten Interaktionsbeziehung zwischen Walze und Boden (Systemnichtlinearität) [36, 2].

Das Funktionsprinzip der Verdichtungskontrolle mit dynamisch angeregten Walzen beruht auf der Analyse des Bandagenschwingungsverhaltens, welches sich mit der, im Laufe des Verdichtungsprozesses steigenden, Bodensteifigkeit ändert. Anhand von Beschleunigungsmessungen an der Lagerschale der schwingenden Walzentrommel können dynamische Messwerte errechnet werden, die dann zur Beurteilung des Verdichtungserfolges herangezogen werden können. Auf diese Weise wird es möglich, aus der nichtlinearen Schwingungscharakteristik der Walzenbandage, auf den Verdichtungszustand des Bodens zu schließen. Die gewonnenen Messwerte können dann mit geeigneter Hardware aufgezeichnet und unmittelbar als Hilfe für den Walzenfahrer dargestellt werden. Nach Abschluss der Verdichtung können die Messdaten dann auf einen PC transferiert, bearbeitet und letztendlich für die Baustellendokumentation aufbereitet werden [8].

Das FDVK-Messsystem ermöglicht also nach jeder Walzenüberfahrt und für jede Schicht eine lückenlose, flächenhafte und vor allem manipulationssichere Dokumentation und gleichzeitig eine noch während des Verdichtungsprozesses mögliche Beurteilung der Verdichtungsqualität. So ist es möglich, bereits während den Verdichtungsfahrten, den Arbeitserfolg durch richtige Interpretation der Messwerte zu maximieren. Dieser mächtige und sofortige Informationsgewinn über den Verdichtungserfolg mit all den damit verbundenen weiteren Vorteilen (siehe Kapitel 3.3), stellt einen großen Nutzen dar und rechtfertigt den, im Vergleich dazu ohnehin relativ geringen, Messaufwand in vielerlei Hinsicht. Arbeitsbegleitende dynamische Verdichtungskontrollen sind zweifelsohne auf dem Vormarsch und laufen den “veralteten” Stichprobenkontrollen zunehmend den Rang ab.

1.1 Ziel der Arbeit

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen zunächst, als Basis für die weiteren Kapitel, die theoretischen Grundlagen der Bodenverdichtung und dabei im Speziellen die Grundlagen der Oberflächenverdichtung mit dynamisch angeregten Walzen, sowie die Methoden der Verdichtungsprüfung beschrieben werden.

Im Anschluss daran wird die Methode der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle mit Vibrationswalzen ausführlich erläutert. Dabei werden unter anderem die auf dem Markt befindlichen, führenden FDVK-Messsysteme und deren Messwerte vorgestellt und beschrieben, um die theoretischen Vorraussetzungen für das Verständnis des Kernstückes dieser Arbeit zu schaffen.

Im Zentrum steht dann die Aufbereitung, Auswertung und Darstellung der, im Zuge von experimentellen Feldversuchen, in Form eines großmaßstäblichen Versuches mit einer speziell ausgerüsteten Tandemwalze, gewonnenen Messdaten. Aus diesen Daten werden mit Hilfe von geeigneter Computersoftware die gängigen FDVK-Messwerte errechnet, um sie abschließend untereinander zu vergleichen, gegenüberzustellen und zu diskutieren.

Auch etwaige Gemeinsamkeiten oder Diskrepanzen zu bereits abgeschlossenen theoretischen und experimentellen Untersuchungen auf diesem Gebiet, sollen aufgezeigt und ausgearbeitet werden.

2 Grundlagen der Bodenverdichtung

2.1 Ziel und Zweck von Bodenverbesserungsmaßnahmen

Alle Arten von Bodenverbesserungsmaßnahmen verfolgen das primäre Ziel, den anstehenden Untergrund so weit zu verbessern, dass eine Homogenisierung der Bodenverhältnisse erreicht und die später unvermeidbar auftretenden Verformungen derart begrenzt und beherrscht werden können, dass es auf keinen Fall zu einer Beschädigung oder Beeinträchtigung des Bauwerks während dessen gesamter Lebensdauer kommt. Des Weiteren kann, je nach Erfordnis, das Eintreten folgender Effekte angestrebt und erreicht werden [2]:

- Erhöhung bzw. Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit
  - Vorwegnahme, Verringerung, Homogenisierung und Beschleunigung von Setzungen
- Erhöhung und Homogenisierung der Tragfähigkeit / Verschleißfestigkeit
- Erhöhung der Dichte
- Verminderung (bzw. Erhöhung) der Durchlässigkeit
- Erhöhung der Frostbeständigkeit
- Erhöhung der Erdbebenbeständigkeit durch Verminderung des Verflüssigungspotentials

Durch die große Bandbreite an Bodenverbesserungsmaßnahmen, mit denen sich die Tragfähigkeit und das Verformungsverhalten des anfangs nicht oder wenig tragfähigen bzw. setzungsempfindlichen Untergrundes bedeutend verbessern lässt, ist es jedenfalls erforderlich, das anzuwendende Verfahren auf die vorherrschenden Bodeneigenschaften und Randbedingungen bestmöglich abzustimmen; nicht zuletzt um einen

möglichst wirtschaftlichen Einsatz sicherzustellen. Abbildung 2.1 soll einen groben Überblick über die am häufigsten angewandten Prinzipien und Verfahren liefern.

PRINZIP	VERFAHREN
Boden - Ersatz	Aushub, Austausch, Verdrängung
Boden - Entwässerung	Vorbelastung mit/ohne Vertikaldrains, Filterbrunnen Flächendrainage, Vakuumkonsolidation
Boden - Verdichtung (mechanisch)	Oberflächenverdichtung, Tiefenverdichtung (Rütteldruck - und Rüttelstopfverfahren), Impulsverdichtung, Dynamische Intensivverdichtung
Boden - Veränderung (hydraulisch)	Bodenstabilisierung mit Bindemitteln, Injektionen Tiefreichende Bodenstabilisierung, Düsenstrahlverfahren, Bodenvereisung, Bodenvernadelung
Boden - Bewehrung	Geokunststoffe, Bewehrungslagen, Zellkonstruktionen, etc..

Abbildung 2.1: Übersicht über Bodenverbesserungsmaßnahmen [8, adaptiert].

Neben den Verfahren der Baugrund- bzw. Bodenverbesserung, existieren diverse Möglichkeiten der konventionellen Tiefgründung, mit denen man die anstehenden Lasten konzentriert in tiefergelegene, tragfähigere und weniger setzungsempfindliche Bodenschichten leitet. Diese Methoden werden dann zum Einsatz kommen, wenn etwaige Bodenverbesserungsmaßnahmen nicht wirtschaftlich oder zielführend erscheinen bzw. schlichtweg einfach nicht realisierbar sind.

2.2 Methoden der mechanischen Bodenverdichtung

Die mechanische Bodenverdichtung stellt eines der häufigsten und bedeutendsten Verfahren zur Untergrundverbesserung dar. Unter dem Begriff der Verdichtung versteht man eine Verringerung des Porenanteils und eine damit einhergehende Erhöhung der Dichte des Bodens durch den gezielten Eintrag von Energie. Anders ausgedrückt bedeutet dies eine Steifigkeitserhöhung des Bodens, die schlussendlich die Belastbarkeit des Erdbauwerkes steigert. Abbildung 2.2 veranschaulicht die wesentlichen mechanischen Verfahren zur Bodenverdichtung grafisch und unterscheidet sie dabei einerseits hinsichtlich ihrer Wirktiefe (oberflächennah - mitteltief - tief) und andererseits nach ihrer Anregungsart (periodisch bzw. harmonisch und impulsförmig bzw. transient).

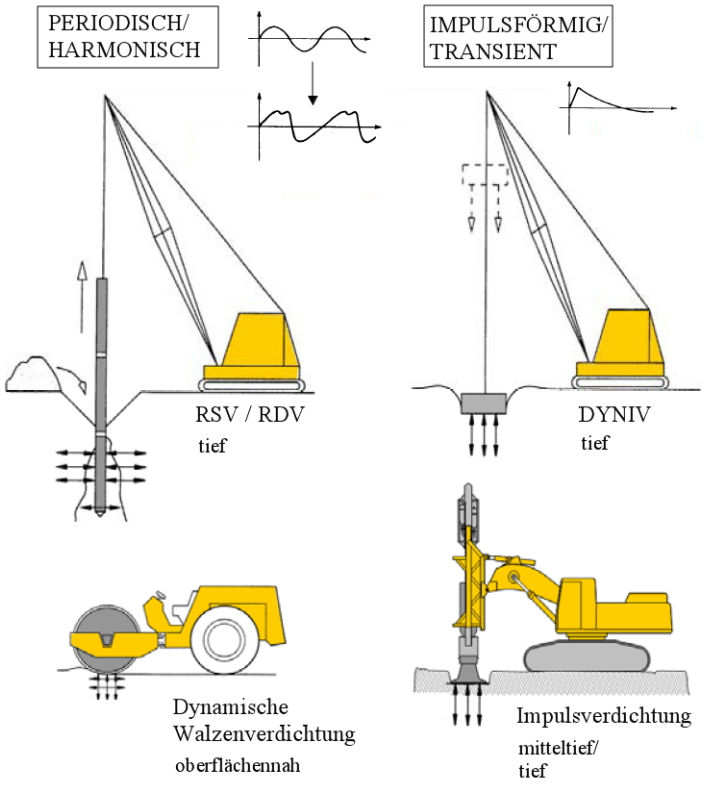


Abbildung 2.2: Methoden der mechanischen Bodenverdichtung [2, adaptiert].

Die folgenden Zeilen erheben den Anspruch eben diese Methoden kurz, prägnant und überblicksmäßig zu beschreiben [3]. Im Rahmen vorliegender Arbeit wird in weiterer Folge ausschließlich die Oberflächenverdichtung von Böden mittels Walzen näher behandelt (siehe etwa Kapitel 2.3 oder 2.4).

- Oberflächenverdichtung:

  wird in erster Linie durch statische oder dynamisch erregte Walzen in Form von Vibrations- und Oszillationswalzen, Walzen mit gerichteter Schwingung (VARIO-Walzen) und seit etwa 20 Jahren auch mit sogenannten selbstregelnden Walzen (VARIOCONTROL, VARIOMATIC, ACE) bewerkstelligt.

- Impulsverdichtung (IV):

  basiert prinzipiell auf der Technologie des hydraulischen Schlaghammers. Dabei werden kontrollierte Schläge auf den Untergrund ausgeübt, indem ein Gewicht mit wesentlich kleinerer Masse (max. 12 t) als bei der DYNIV auf eine, am zu verdichtenden Boden stehende, Verdichtungsplatte mit max. 1,5 m Durchmesser fallen gelassen wird. Die Fallhöhe wird dabei mit etwa 1,2 m

begrenzt. Es handelt sich um ein innovatives, universell einsetzbares Verfahren mit wesentlichen Vorteilen gegenüber der dynamischen Intensivverdichtung, die vor allem in der wesentlich höheren Schlagzahl pro Zeiteinheit (ca. 40 – 60 mal pro Minute), der geringeren Erschütterungswirkung und den flexibleren Einsatzmöglichkeiten begründet sind. Der Impulsverdichter wird vor allem zur mitteltiefen Verdichtung von Kiesen, Sanden und Schluffen verwendet. Die mit wirtschaftlichem Aufwand zu erreichende Verdichtungstiefe liegt dabei etwa bei 7,5 m (max. 10 m).

- Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV):

  beschreibt das wohl älteste mechanische Bodenverdichtungsverfahren. Hierbei wird ein Fallgewicht mit einer Masse von üblicherweise 10 – 40 t (in Extremfällen sogar bis zu 200 t) auf eine Höhe von bis zu 40 m angehoben und anschließend auf den Untergrund fallen gelassen. Die dabei freiwerdende kinetische Energie steht dann, beim Auftreffen der Masse auf den Untergrund, zur Verdichtung zur Verfügung. Auf diese Weise wird sowohl eine oberflächennahe, als auch eine tiefer reichende Verdichtungswirkung erzielt. Die Anwendung kann dabei entweder großflächig oder punktuell über sogenannte DYNIV-Säulen erfolgen, welche die Lasten dann gezielt in den Untergrund leiten.

- Tiefenverdichtung:

  erfolgt vor allem durch sogenannte Tiefenrüttler in Form von Torpedo- oder Schleusenrüttlern, wobei zur Verbesserung von grobkörnigen bzw. kohäsionslosen Böden die Rütteldruckverdichtung (RDV - meist mit Wasserspülung) und zur Herstellung von Kiessäulen in feinkörnigen bzw. kohäsiven Böden die Rüttelstopfverdichtung (RSV - vorzugsweise Druckluft) Anwendung findet. Alternativ zu den eben erwähnten Kiessäulen können auch gebundene Säulen in Form von vermörtelten Stopfsäulen, Fertigmörtelsäulen oder Ortbetonrüttelsäulen hergestellt werden. Die maximal erreichbare Tiefe ist dabei mit ca. 50 m (RDV) bzw. 45 m (RSV) beschränkt.

2.3 Einflüsse auf den Verdichtungserfolg und die Verdichtungsleistung

Dieses Unterkapitel behandelt die maßgebenden Faktoren, die für das Erreichen des gewünschten Verdichtungserfolges bei der oberflächennahen Verdichtung mittels Vibrationswalzen verantwortlich sind. Im Wesentlichen setzen sich diese Parameter aus den anstehenden Bodeneigenschaften, den Einbaubedingungen, der Wahl der Verdichtungsmaschine und den eingestellten Walzenparametern zusammen.

Um eine effiziente und zielführende Verdichtung zu gewährleisten, sowie den geforderten Verdichtungserfolg hinsichtlich Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Qualität der Ausführung mit vertretbarem Aufwand zu sichern, ist eine bestmögliche Abstimmung aller im Folgenden abgehandelten Faktoren aufeinander unerlässlich und somit anzustreben.

2.3.1 Bodenparameter

Ganz allgemein unterscheidet man in der Bodenmechanik zwischen bindigen, kohäsiven und nicht bindigen, grobkörnigen Böden. Das gänzlich unterschiedliche Verdichtungsverhalten dieser beiden Bodenarten, lässt sich aus den folgenden bodenmechanischen Parametern ableiten und erklären [23, 2].

2.3.1.1 Kornform / Kornrauigkeit

- Kornform: von gedrungen bis plättchenförmig
- Kornrauigkeit: von glatt bis scharfkantig

Je kugeliger und glatter das Korn, umso leichter lässt sich der Boden verdichten. Wesentlich schwerer verdichtbar sind hingegen Böden mit kantigen Kornformen. Sie sind dafür jedoch wesentlich belastbarer.

2.3.1.2 Korngröße / Feinkornanteil

Die Korngrößenverteilung gibt die prozentuellen Masseanteile der einzelnen Korngrößen bezogen auf die Gesamttrockenmasse an und stellt somit eine Summenkurve der Siebrückstände dar. Sie kann gewissermaßen als Visitenkarte des Bodens verstanden

werden, aus der sich unzählige charakteristische Eigenschaften des Untergrunds ablesen lassen. Der Feinteilgehalt prägt etwa die Verdichtungsmöglichkeiten entscheidend.

Die Bestimmung der Kornverteilungslinie erfolgt für Körner mit einem Durchmesser $d > 0,063$ mm mittels Siebanalyse, für Körner mit einem Durchmesser $d < 0,063$ mm mit der Schlämmanalyse (Aräometerversuch nach *Casagrande*). Die Darstellung der Kornverteilungslinie erfolgt im halblogarithmischen Maßstab, um auch die Feinanteile gut sichtbar abbilden zu können.

Aus den ermittelten Kornverteilungslinien lassen sich weiters verschiedene Kenngrössen, wie die

$$\text{Ungleichförmigkeitszahl: } C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

und die

$$\text{Krümmungszahl: } C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \cdot d_{60}}$$

ableiten.
d_{xx} entspricht dabei jener Korngröße, welche die Kornverteilungslinie bei XX Masseprozent aufweist.
Diese beiden Werte bestimmen die Form der Kornverteilungslinie, wobei C_u ein Maß für die Steilheit der Kurve im Bereich d_{60} bis d_{10} ist und C_c den Verlauf in diesem Bereich angibt. Anhand dieser beiden Größen unterscheidet die ÖNORM EN 14688-2:2004 zwischen enggestuften, gut gestuften, weitgestuften und intermittierend gestuften Kornverteilungen.

Böden mit enggestuften Korngrößen (zB. Löss - steiler Verlauf der KV-Linie) lassen sich nur schlecht bzw. beschränkt verdichten, da lediglich eine limitierte Möglichkeit der Hohlraumausfüllung zwischen den einzelnen Körnern gegeben ist.

Weitgestufte, gemischtkörnige Korngrößen (zB. Moränenmaterial - flacher Verlauf der KV-Linie) sind hingegen gut verdichtbar, da durch die Verdichtungswirkung die kleineren Körner in der Lage sind, vermehrt in die Hohlräume zwischen den größeren Körnern einzudringen. Dadurch sinkt der Porenanteil.

2.3.1.3 Wassergehalt

Der Wassergehalt $w\,[\%]$ wird als Quotient der Masse des Porenwassers m_w zur Masse des trockenen Bodens m_d ermittelt und spielt sowohl bei bindigen als auch bei nichtbindigen Böden (wenn auch nur in untergeordnetem Ausmaß) eine große Rolle im Hinblick auf deren Verdichtbarkeit.

Bei nicht bindigen, rolligen Böden ist aufgrund der haufwerksporigen, lose aneinanderliegenden Körner die Wasserdurchlässigkeit größer als bei kohäsiven Böden, die eine feinschuppige Kornstruktur aufweisen und somit dem Wasser das Entweichen aus dem Porenraum bei mechanischer Beanspruchung erschweren (Porenwasserdrücke, Konsolidierung). Aus diesem Grund sinkt die Verdichtbarkeit von bindigen Böden im Allgemeinen mit zunehmendem Porenwassergehalt. Zu trockene Böden stellen jedoch ebenfalls Zustände dar, die sich negativ auf die Verdichtungswilligkeit auswirken. Es ist deshalb in besonderem Maße auf den Wassergehalt zu achten. Der für die Verdichtung optimale Wassergehalt w_{opt} für bindige Böden kann aus dem Proctorversuch ermittelt werden.

2.3.1.4 Konsistenz / Lagerungsdichte

Bei bindigen Böden reicht die Korngrößenverteilung zur Beurteilung von Verdichtbarkeit, Bearbeitbarkeit und Steifigkeit meist nicht aus, da diese Eigenschaften ganz entscheidend, wie bereits erwähnt, vom Wassergehalt beeinflusst werden. Die sogenannten Konsistenzgrenzen nach *Atterberg*, beschreiben die jeweiligen Zustandsformen [flüssig – plastisch (bildsam) – halbfest – fest] von bindigen Böden. Sie lassen sich durch die charakteristischen Wassergehalte der Fließgrenze w_l, der Ausrollgrenze w_p und der Schrumpfgrenze w_s definieren. Die Kennzahlen mit den zugehörigen Wassergehalten lassen sich durch die entsprechenden Versuche ermitteln. Zudem können weitere Kenngrößen, wie zB. die Plästizitätszahl I_p und die Konsistenzzahl I_c aus den Wassergehalten abgeleitet werden.

Bei nicht bindigen Böden spricht man in diesem Zusammenhang von der Lagerungsdichte D eines Bodens. Sie ist definiert als Differenz zwischen dem Porenanteil in lockerster Lagerung n_{max} und natürlicher Lagerung n bezogen auf die Differenz zwischen dem Porenanteil in lockerster und dichtester Lagerung n_{min}. Diese Porenanteile können mit dem Schlaggabel,- oder Rütteltischversuch (dichteste Lagerung) und mit dem Zylinderversuch (lockerste Lagerung) bestimmt werden. Aus dem Porenanteil n

und der Porenzahl e lassen sich abermals weitere Kennzahlen nicht bindiger Böden, wie zB. die bezogene Lagerungsdichte I_D und die Verdichtungsfähigkeit I_f ableiten.

In nachfolgender Abbildung 2.3 wurde eine Gegenüberstellung von weiteren wesentlichen Kriterien im Hinblick auf die Verdichtungseigenschaften von bindigen und nicht bindigen Böden zusammengestellt, aus denen sich weitere Unterschiede ergeben.

	SANDE und KIESE (nicht bindig, rollig, locker)	**SCHLUFFE und TONE** (bindig, kohäsiv, kohärent)
Korn-struktur	~ große und lose aneinanderliegende Körner mit großem porenfüllenden Porenraum	~ feine, schuppenförmige Einzelteilchen - dadurch starke Bindung des Wassers und der benachbarten Teilchen
Festig-keit	~ Widerstand durch Reibung u. Verzahnung: * Lagerungsdichte * Oberflächenrauhigkeit	~ Haft- und Klebefestigkeit ("Zähigkeit"): * Mineralbestand * Kornfeinheit * Plastizität (Konsistenzgrenzen)
Verdich-tungs-methode	~ Körnerumlagerung durch Reibungsüberwindung: * Flächendruck * Strömungsdruck * Stampf-, Rüttel-, und Schwingungsgeräte	~ Austreiben von luft- und wassergefüllten Poren durch Kohäsionskraftüberwindung: * statische Auflast * Kneten * Aufbrechen bzw. Aufreißen der Kornstruktur (Porenwasserdruckabbau)
Einfluss-faktoren	~ Ungleichförmigkeitszahl bis C_u=36 ~ Kornform: gedrungen, rund ~ Wassergehalt bei großer C_u	~ optimaler Wassergehalt
Zeit	~ Mineralgehalt (chemische Bindung)	~ Konsolidation
Wirkung	~ Kornzertrümmerung, Kornabrieb ~ Verzahnung (physikalische Bindung)	~ Porenwasserdruck (Über- und Unterdruck bei Be- und Entlastung) ~ Kohäsion

Abbildung 2.3: Gegenüberstellung der Verdichtungseigenschaften von bindigen und nicht bindigen Böden [8].

Zusammenfassend lassen sich also folgende essentielle Merkmale und Charakteristika von bindigen und nicht bindigen Böden feststellen, die das unterschiedliche Verdichtungsverhalten der beiden Bodenarten begründen:

Nicht bindige, grobkörnige Böden sind gekennzeichnet durch eine hohe Wasserdurchlässigkeit, gute Verdichtbarkeit und hohe Tragfähigkeit im verdichteten Zustand.

Bei diesen Böden erfolgt die Verdichtung in erster Linie durch die Überwindung der Korn zu Korn Reibung, wodurch eine Umlagerung und Einregelung der Körner möglich wird und diese eine dichtere Lagerung einnehmen können. Dies wird am besten durch dynamische Verdichtung mit glatten Bandagen erreicht, wobei bis zu einem gewissen Maße auch statische Verdichtung den gewünschten Erfolg herbeiführen kann. Nicht bindige Böden stellen ein ideales Anwendungsgebiet für die FDVK dar. Es gilt an dieser Stelle anzumerken, dass es bei zu starker Verdichtung zu einer unerwünschten Wiederauflockerung bzw. Kornzertrümmerung kommen kann.

Bei bindigen, feinkörnigen Böden ist die Verdichtung in erster Linie durch statische Auflast bzw. durch Kneten, Aufreißen oder Aufbrechen der Kornstruktur zu bewerkstelligen. Dies liegt darin begründet, dass die Verdichtungswilligkeit dieser Bodenart primär von der Konsistenz abhängig ist, welche wiederum vom Wassergehalt bestimmt wird. Die durch die Verdichtung, aufgrund der geringen Wasserdurchlässigkeit entstehendenen Porenwasserdrücke müssen also mehr oder weniger schnell abgebaut werden. Deswegen werden zur Verdichtung von bindigen Böden vorwiegend statische Walzen mit profilierten Bandagen (größere Oberfläche, Aufreißen von Wasserwegigkeiten) eingesetzt. Dynamische Verdichtungsmethoden würden bei diesen Böden einen hohen Anstieg der Porenwasserdrücke bewirken und sind aus diesem Grund schlechter geeignet und eher kontraproduktiv. Die Steifigkeiten kohäsiver Böden sind im Wesentlichen deutlich geringer als jene von nicht bindigen Materialien.

2.3.2 Einbaubedingungen

Die für den Verdichtungserfolg bzw. die Verdichtungsleistung hinsichtlich Einbaubedingungen wesentlichen und maßgebenden Faktoren können wie folgt zusammengefasst werden:

- Schütthöhe bzw. Schichtdicke des zu verdichtenden Materials (Kubatur)
- Steifigkeit der Unterlage (vorhandener Vorverdichtungsgrad, Hohlraumgehalt, Tragfähigkeit)
- Anforderung hinsichtlich Verdichtungsgrad und Verdichtungsleistung [m^3/h], [m^3/d]; [t/h], [t/d]
- Witterung, Baustellengröße und - topographie

2.3.3 Verdichtungsmaschine

Die Auswahl des Gerätes zur oberflächennahen Verdichtung richtet sich neben der Bodenart und wirtschaftlichen Überlegungen auch nach der technischen Ausrüstung, der angestrebten Verwendung und den vorherrschenden Einsatzbedingungen. Es wird dabei zwischen Rüttlern, Stampfern, Platten und Walzen unterschieden. Letztere können entweder handgeführt, angehängt oder eigens angetrieben werden. An dieser Stelle wird nur auf eigens angetriebene Walzen für den schweren Erdbau näher eingegangen, zumal diese auch die Mehrheit in der Baupraxis darstellen.

2.3.3.1 Walzentypen

- walzenzüge sind die im Erdbau am meisten eingesetzten Verdichtungsgeräte und zudem für die Anwendung der FDVK besonders geeignet. Der Walzenzug ist sowohl mit einer Walzentrommel (Bandage) an der Vorderachse als auch mit einer Luftbereifung (2 Gummiräder) an der Hinterachse ausgestattet. Der hintere Teil, bestehend aus Motorraum und Fahrerkabine, lastet auf den Gummirädern und ist entweder starr, oder über eine Knicklenkung mit dem Rahmen verbunden. Der Walzenrahmen ruht auf der dynamisch angeregten Bandage an der Vorderachse. Durch Gummipuffer an der Lagerschale sind Bandage und Rahmen voneinander dynamisch entkoppelt. Angetrieben werden Walzenzüge üblicherweise über deren Hinterachse, wobei auch die Bandage angetrieben sein kann.
- Tandemwalzen (Doppelwalzen) besitzen an Vorder- und Hinterachse je eine Bandage. Oberhalb des Walzenkörpers oder unterhalb der Fahrerkabine sind Wassertanks angebracht, die zur Beschwerung dienen und die Berieselung der Bandagen ermöglichen, welche notwendig ist, um ein mögliches Ankleben des zu verdichtenden Materials zu verhindern. Die Verhinderung dieses Effekts, spielt insbesondere im Asphaltbau eine wichtige Rolle, wo Tandemwalzen auch primär Verwendung finden.
- Kombiwalzen vereinen die Verdichtungswirkung einer Gummiradwalze und der Tandemwalze in einem Gerät. Der Aufbau entspricht dem einer Tandemwalze mit dem Unterschied, dass die hintere Bandage durch Gummiräder ersetzt wird. Sie kommen neben dem Erdbau vermehrt auch im Asphaltbau zum Einsatz.

- Anhängewalzen, sowie diverse Kleingeräte werden vorzugsweise für kleinräumige oder unter beengten Verhältnissen stattfindende Verdichtungsarbeiten eingesetzt und spielen daher eine eher untergeordnete Rolle. Sie seien der Vollständigkeit halber jedoch hier ebenso erwähnt.

2.3.3.2 Verdichtungsverfahren / Anregungsart der Bandage

Die statische Verdichtung basiert einzig und allein auf der Kompression des Untergrunds zufolge des Eigengewichtes des Verdichtungsgerätes.

Bei der dynamischen Verdichtung werden, neben der Kraftwirkung aus dem Eigengewicht, auch Schwingungen durch exzentrisch zur Walzentrommelachse rotierende Massen erzeugt. Dadurch wird zusätzliche Verdichtungsenergie in den Boden eingetragen.

Ob statisch oder dynamisch verdichtet wird, bestimmen in erster Linie die in Kapitel 2.3.1 abgehandelten Eigenschaften des zu verdichtenden Untergrundes.

2.3.3.3 Bandagenoberfläche

Auch der verwendete Bandagentyp hat, vor allem bei feinkörnigen Böden, wesentlichen Einfluss auf die Verdichtungswirkung.

Neben den herkömmlichen zylindrischen Glattmantelbandagen und den profilierten Schaffußbandagen bzw. Stampffußbandagen kommen auch Polygonbandagen zur Anwendung. Die Typen unterscheiden sich dabei im Wesentlichen durch die Form und Geometrie ihrer Oberfläche und der damit verbundenen Krafteintragungsrichtung in den Untergrund.

- Mit der Glattmantelbandage ist eine optimale Verdichtung von nicht bindigen Böden mit hoher Durchlässigkeit zu erreichen. Die Kraftwirkungsrichtung der Bandage ändert sich während des Abrollvorgangs nicht.
- Die Schaffussbandage oder Stampffussbandage weist an ihrer Oberfläche Stollen (“Füße”) auf, die einen ähnlichen Effekt wie die Platten und Keilsegmente der Polygonbandage bewirken. Sie Kneten, Zerkleinern und Brechen die Kornstruktur von bindigen Böden auf und erhöhen dadurch deren Verdichtungswilligkeit.

- Die Polygonbandage besteht aus drei axial nebeneinander liegenden achteckigen Plattensegmenten, die in Umfangsrichtung jeweils versetzt zum Nachbarsegment angeordnet sind. Dadurch erfährt der Boden abwechselnd eine Kraftwirkung aus Platten und Keilsegmenten. Die Kombination aus Plattenwirkung - leitet vertikal gerichtete Druckkräfte in den Boden - und Keilwirkung - verformt durch die stetige Drehbewegung der Bandage den Boden durch Kneten und Entspannen, bewirkt eine höhere Tiefenwirkung der Verdichtung bei nicht bindigen Böden und verhindert eine gegenseitige Verkeilung der Bodenkörner. Aus diesem Grund ist die Polygonbandage in der Lage auch größere Schütthöhen zu verdichten. Bewährt hat sich dieser Bandagentyp insbesondere beim Einbau von Felsbruch und bei der Verdichtung von bindigen Böden mit naturgemäß hohem Feinkornanteil, da die Knetwirkung der Bandage, das Entweichen des vorhandenen Porenwassers beschleunigt und somit die Verdichtung begünstigt [43, 9, 53].

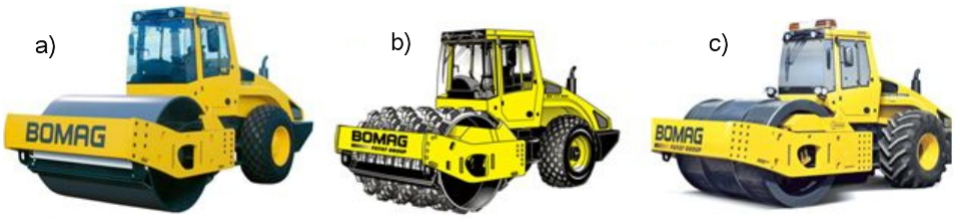


Abbildung 2.4: Walzenzüge der Firma BOMAG mit verschiedenen Bandagentypen a) Glattmantelbandage b) Schaffußbandage/Stampffußbandage c) Polygonbandage [22, adaptiert].

2.3.4 Walzenkenngrößen und - parameter

2.3.4.1 Konstruktive Parameter

- Bandagengeometrie und -oberfläche: Die Bandage ist durch ihre Geometrie (Durchmesser, Länge, Aufstandsbreite), Masse, Oberflächengestaltung (siehe Kapitel 2.3.3.3) und Anregungsart (siehe Kapitel 2.3.3.2) definiert.
- Achslast/statische Linienlast [kg/cm]: Die statische Linienlast errechnet sich durch Division der Achslast [kg], bestehend aus dem Eigengewicht der Bandage und der Erregermasse, sowie dem anteilig wirkenden Rahmengewicht, durch die Bandagenbreite [cm].

- Maschinengewicht [kg]: Ein hohes Betriebsgewicht der Walze bedeutet in der Regel eine große Wirktiefe. Das Gesamtgewicht von Vibrationswalzen liegt meist zwischen 4 und 25 t wobei spezielle Entwicklungen diese Spanne auch überschreiten können.
- Statisches Moment [kgm]: Je größer die Unwucht- bzw. Erregermasse [kg] und deren Exzentrizität [m] vom Bandagenmittelpunkt, umso größer ist das daraus resultierende statische Moment [kgm] und infolgedessen auch die Verdichtungswirkung.

2.3.4.2 Variable Parameter

- Fahrgeschwindigkeit [km/h]: Je geringer der Vorschub einer Maschine (i. A. zwischen 2 und 6 km/h) bei identischer Amplitude ist, desto größer ist im Allgemeinen der in den Verdichtungsprozess eingebrachte Energiebetrag.
- Frequenz [Hz]: Die Frequenz gibt an, wie oft pro Sekunde die Bandage auf den zu verdichtenden Boden schlägt. Eine kleine Vibrationsamplitude in Kombination mit einer hohen Frequenz lässt meist nur eine geringe Tiefenwirkung zu. Bei Vibrationswalzen liegt der verwendete Frequenzbereich in der Regel zwischen 30 und 50 Hz.
- Amplitude [mm]: Die Amplitude bei freier Schwingung (angehobener Walzenrahmen) gibt an, wie hoch die Bandage infolge der Fliehkraft, erzeugt durch die mit einer gewissen Exzentrizität und Frequenz um die Bandagenachse rotierenden Unwuchtmasse, angehoben wird (zwischen 0,5 und 2,0 mm). Die Fliehkraft wächst dabei quadratisch mit der Frequenz. Die Amplitude lässt sich durch Variation des statischen Unwuchtmoments verstellen, welches sich aus der Masse der Unwucht multipliziert mit der Exzentrizität der Unwucht um die Bandagenachse errechnet. Bei den meisten Vibrationswalzentypen kann zwischen großer und kleiner Amplitude mit zugehöriger Frequenz gewählt werden. Es ändert sich dabei je nach Umlaufrichtung der Unwuchten, die Exzentrizität selbiger von der Drehachse.

2.4 Oberflächenverdichtung mit Walzen

2.4.1 Statische Walzen

Bei statischen Walzen erfolgt die Zusammendrückung des Verdichtungsmaterials, im Gegensatz zu dynamischen Walzen, einzig und allein durch das Eigengewicht des Gerätes. Die statische Linienlast [kg/cm] stellt dabei, neben dem Bandagendurchmesser [m], die maßgebende Kenngröße dar.

Während mit dynamischen Walzen durchaus eine Tiefenwirkung von etwa 1,5 – 2,5 m erzielbar ist, erreicht man mit statischen Walzen (gleiche Randbedingungen vorausgesetzt) aufgrund eben angesprochener Tatsache bestenfalls lediglich 0,5 – 1,0 m. Diese limitierte Tiefenwirkung kann zwar durch Erhöhung der statischen Linienlast bzw. durch Änderung der Bandagenoberfläche und -form bis zu einem gewissen Grad erhöht werden, in den meisten Fällen wird jedoch dennoch der dynamischen Verdichtung der Vorzug gegeben, zumal neben der effizienteren Verdichtung auch die Möglichkeit besteht, die Walze gleichzeitig als Messgerät (FDVK) zu verwenden. Der Anteil von dynamischen Walzen zur Bodenverdichtung im Erdbau liegt mittlerweile weltweit bei rund 90 % [2].

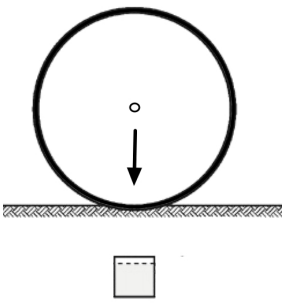


Abbildung 2.5: Prinzip der statischen Walze

Lediglich bei der Oberflächenverdichtung von Asphaltdecken und bei bindigen, wassergesättigten Böden, wo eine dynamische Anregung des Bodens zu einem Aufstieg des enthaltenen Porenwassers führen würde (Verschlechterung der Bodeneigenschaften durch Konsistenzänderung), wird statische Verdichtung bevorzugt.

2.4.2 Dynamische Walzen

Für die dynamische Verdichtung von Untergründen sind die dynamischen Kräfte aus den Erregersystemen in Kombination mit den statischen Lasten aus dem Gewicht der Maschinen verantwortlich.

Die Erzeugung der Verdichtungskräfte erfolgt durch rotierende Unwuchtmassen, welche die Walzenbandage zum Schwingen anregen. Es kommen hierfür entweder vibrierende oder oszillierende Systeme zum Einsatz, die aus der Rotation einer oder mehrerer Erregerwellen bestehen. Die Schwingungserreger unterscheiden sich durch ihre Anordnung in der Bandage, der damit verbundenen Erzeugung der Verdichtungskräfte und deren Einleitung in das zu verdichtende Material. Durch die dynamische Anregung erfährt die Oberfläche des Untergrundes eine Vielzahl von Impulsen. Es werden Druck- und/oder Scherwellen in das Material eingeleitet, welche die Bodenpartikel in Schwingung versetzen. Dadurch wird die innere Reibung des Materials herabgesetzt und somit eine Partikelumlagerung im Zusammenspiel mit dem Einfluss der Schwerkraft wesentlich begünstigt und erleichtert, sodass letztendlich der Porenanteil sinkt und die Dichte ansteigt [2].

2.4.2.1 Oszillationswalzen

Das Oszillationssystem wurde Anfang der 80er Jahre von der Firma *Geodynamik AB* in Schweden entwickelt [35].

Eine oszillierend arbeitende Walze ist mit zwei im Bezug auf den Bandagenmittelpunkt (punktsymmetrisch) gegenüberliegenden, gleichsinnig, synchron und um 180° phasenversetzt drehenden Unwuchtmassen ausgerüstet, die der Walze ein Moment um die Bandagenachse aufzwingen. Die Horizontal- und Vertikalkomponenten der Zentrifugalkräfte heben sich bei dieser gleichsinnigen Rotation der Unwuchten auf. Die resultierende Beschleunigung wirkt demzufolge in tangentialer Richtung. Das entstehende Torsionsmoment ändert während einer Drehung der Masse seine Wirkrichtung (vor- und rückwärts), sodass eine schnell wechselnde oszillierende Bandagenbewegung entsteht. Die Walze hebt dabei niemals von der Unterlage ab. Angetrieben werden die beiden gegenüberliegenden Exzenterwellen von einer Zentralwelle.

Die Verdichtung wird demnach einerseits durch das Gewicht der Walze (wie bei einer statischen Walze) und andererseits durch tangential, über Reibung eingeleitete horizontale Schubkräfte (“Kneten” der Unterlage) bewirkt.

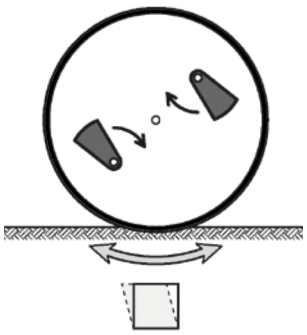


Abbildung 2.6: Prinzip der Oszillationswalze [2].

Im Vergleich zu vibratorisch erregten Walzen, verdichten Oszillationswalzen wesentlich schonender, erschütterungsärmer und auch gleichmäßiger, was eine im Allgemeinen längere Lebensdauer der Maschine, sowie erhöhten Fahrkomfort bewirkt. Diese Umstände sind dadurch begründet, dass die Bandage ständig auf der Oberfläche des Untergrunds aufliegt, somit immer Bodenkontakt aufweist und sich die Schwingungen hauptsächlich horizontal, in Längsrichtung der Fahrtrichtung, ausbreiten. Als nachteilig ist hingegen die Schiebeneigung bei leicht verdichtbaren Materialien bzw. an Steigungen zu bewerten. Zudem ist der meist geringeren Wirktiefe mit geringeren Schütthöhen entgegenzuwirken.

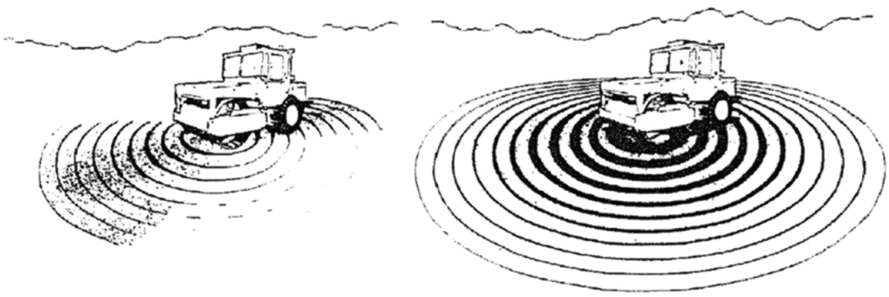


Abbildung 2.7: Ausbreitung der Oberflächenwellen bei Oszillationswalzen (links) und Vibrationswalzen (rechts) [28].

Aufgrund der geringeren Erschütterungswirkung kommt die Oszillationstechnik für viele Einsatzbereiche in Frage. Sie wird im innerstädtischen Bereich, im Brückenbau, zur Hinterfüllung von Widerlagern sowie in der Nähe von erschütterungsanfälligen und sensiblen Bauwerken angewandt. Oszillierende Walzen stellen zudem extrem glatte Oberflächen her, da sie in Folge der horizontalen Kraftwirkung auf den Untergrund,

eine Auflockerung oder Kornzertrümmerung der oberflächennahen Zone fast vollends vermeiden. Sie erfreuen sich deswegen auch im Asphaltbau, sowie im Deponiebau, zur Versieglung der Oberfläche von Dichtschichten, großer Beliebtheit.

Die Betriebszustände von Oszillationswalzen werden in Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten, resultierend aus der Abstimmung von Walzen und Bodenparametern, in “Haften“, “einseitiges Gleiten”, “asymmetrisches Gleiten” und “symmetrisches Gleiten“ unterschieden [25]. An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass auch für oszillierende Walzen eine Amplitude angegeben wird. Hier ist jedoch, im Gegensatz zu der vertikalen Schwingungsamplitude bei vibrierenden Walzen, die tangentiale Oszillationsamplitude gemeint [35].

2.4.2.2 Vibrationswalzen

Die Verdichtungswirkung von Vibrationswalzen wird durch die statische Auflast der Walze in Kombination mit der Übertragung der Vibrationen aus den vertikalen dynamischen Erregerkräften auf den Untergrund erreicht. Diese zusätzliche Erregerkraft steigert die Verdichtungswirkung des Gerätes gegenüber einer statischen Walze erheblich[2, 23].

Ausgerüstet ist eine Walze dieses Typs in der Regel mit einer, in der Bandage zentrisch gelagerten, Unwuchtmasse. Durch schnelle Rotation derselbigen entsteht eine Zentrifugalkraft, welche die Vibration der Bandage bewirkt. Diese Schwingung erzeugt vertikal gerichtete Verdichtungskräfte, die in den Untergrund eingeleitet werden. Damit die erzeugte Verdichtungsenergie vollständig dem Untergrund zur Verfügung steht, sind die Bandagen durch Gummipuffer mit dem Walzenrahmen verbunden und auf diese Weise schwingungstechnisch entkoppelt.

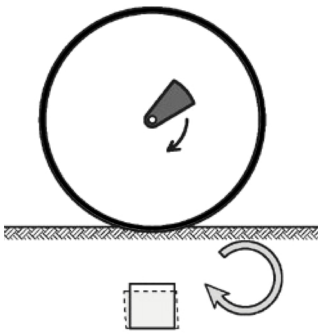


Abbildung 2.8: Prinzip der Vibrationswalze [2].

Mit der Absicht die Effizienz des Verdichtungsgerätes zu steigern und besser auf die Bodeneigenschaften reagieren zu können, werden in der Bandage von Vibrationswalzen meist zweigeteilte Unwuchtmassen verbaut. Je nach Drehrichtung der Erregermasse verändert sich die Lage des Gesamtschwerpunktes der beiden Massen, was zwei verschiedene Unwuchtexzentrizitäten in Bezug auf den Bandagenmittelpunkt bedingt. Man hat somit die Wahl zwischen kleiner und großer Amplitude, indem man schlichtweg die Umlaufrichtung der Unwucht verändert.

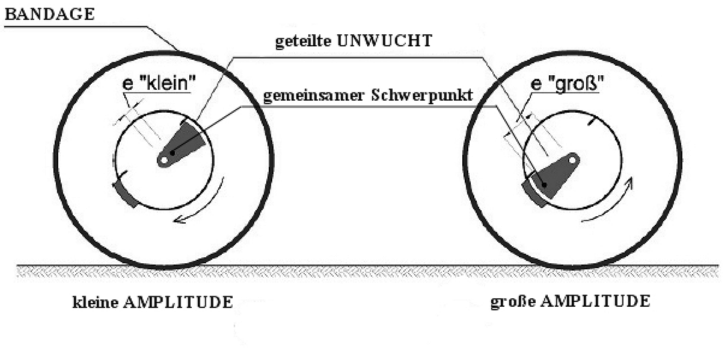


Abbildung 2.9: Vibrationswalze mit geteilten Unwuchten [48, adaptiert].

2.4.2.3 Walzen mit Richtschwinger

Neben den klassischen Vibrationswalzen stehen seit 1998 Walzen mit Richtschwingern, sogenannte VARIO-Walzen, entwickelt vom *Bomag* Konzern, zur Verfügung [31]. Das VARIO-System unterscheidet sich von herkömmlichen Vibrationswalzen durch die Eigenschaft, die Stellung der gesamten Erregereinheit durch Verdrehen so zu ändern, dass die Richtung des Energieeintrages gesteuert und dadurch indirekt die vertikale Amplitude geregelt werden kann.
Diese stufenlose Verstellung zwischen den beiden Extremen – horizontal und vertikal – bietet eine enorme Bandbreite an Verdichtungsleistung und Tiefenwirkung für jede Anwendung. Sie vereint somit weitgehend die Vorteile von Vibrations- und Oszillationswalzen und kann als Basis und Grundlage für die Entwicklung der in Kapitel 2.4.2.4 behandelten selbstregelnden Walzen angesehen werden.

Das System besteht also aus zwei zentrisch in der Bandagenachse gelagerten, gegenlaufenden Unwuchtmassen, welche die Bandage in eine gerichtete Schwingung (Richtschwinger) versetzen. Die hierbei entstehenden Fliehkräfte addieren sich, wenn sie in dieselbe Richtung weisen und kompensieren sich, wenn sie in entgegengesetzte Richtung zeigen. Die Richtung der dynamischen Erregung kann, wie bereits erwähnt,

durch hydraulische Verdrehung bzw. Verstellung der gesamten Erregereinheit variabel und stufenlos von horizontal bis vertikal eingestellt werden, wodurch der Vertikalanteil der Erregeramplitude bzw. die Kraftrichtung beliebig gesteuert werden kann.
Die Auswahl der Arbeitsrichtung erfolgt durch den Walzenfahrer, indem er lediglich einen Schalter an seinem Bedienungspult betätigt. Die jeweils erforderliche Schwingungsart kann somit ohne Unterbrechung der Verdichtungsarbeit eingestellt werden. Es ist außerdem problemlos möglich, von der Stellung "Horizontal" direkt auf die Stellung "Vertikal" umzuschalten oder umgekehrt, da das System mit einer sehr kurzen Reaktionszeit arbeitet und dadurch im Stande ist, unkontrollierte Taumelbewegungen zu vermeiden [22].
Die vertikale Position der dynamischen Erregung erzielt eine hohe Tiefenwirkung mit maximaler Verdichtungsleistung und trägt wesentlich mehr Verdichtungsenergie in den Boden ein, als der horizontale Anteil. Steht der Erreger vollständig oder nahezu in vertikaler Richtung, so ist die Verdichtungswirkung mit einem Kreiserreger zu vergleichen und es treten demnach auch die Betriebszustände der Vibrationswalze (Kapitel 2.14) auf.
Bei sehr flacher Stellung der Erreger bzw. horizontal gerichteter Schwingung ist das Verdichtungsverhalten vergleichbar mit einer Oszillationsbandage, wenn auch das Bewegungsverhalten unterschiedlich ist [45].

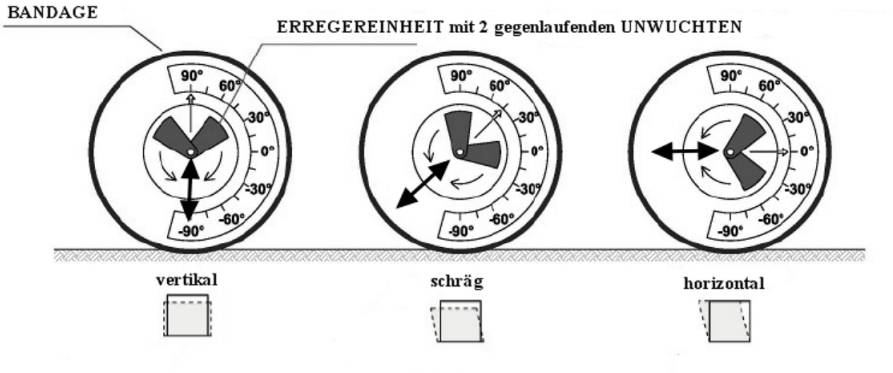


Abbildung 2.10: VARIO-Walze [48, adaptiert].

Eine VARIO-Walze kann durchaus zur FDVK eingesetzt werden. Es müssen allerdings während der gesamten Messfahrt jene Einstellungen für die Fahrgeschwindigkeit und die Erregerstellung verwendet werden, für die auch die Kalibrierung (siehe Kapitel 3.5) stattfand, um vergleichbare Messdaten zu gewinnen, da die Messtiefe und das Messwertniveau selbstversändlich von der Erregerrichtung abhängig sind.

2.4.2.4 Selbstregelnde Walzen

Dieser Walzentyp unterscheidet sich grundlegend von den herkömmlichen Vibrationssystemen. Letztere sind durch die starre Parametervorgabe nämlich nicht in der Lage, sich an die ständig wechselnden Einbauzustände optimal anzupassen. Selbstregelnde Walzen besitzen eben jene Fähigkeit, die Walzenparameter automatisch und kontinuierlich, nach gewissen Regelkriterien, an die lokalen Untergrundverhältnisse anzupassen. Das System erkennt also selbstständig den erforderlichen Energiebedarf während des Verdichtungsvorgangs.
Ziel dieser Innovation war es, die Verdichtung zu optimieren, die Anzahl der notwendigen Walzenüberfahrten für den geforderten Verdichtungserfolg zu reduzieren und eine homogene, tiefreichende, aber dennoch materialschonende Verdichtung, durch die permanente Anpassung der Amplitude und der Frequenz in Abhängigkeit von der vorherrschenden Untergrundsteifigkeit zu erzielen. Vor allem dem Problem der Bodenauflockerung durch Überverdichtung bei enggestuften Kiesen und Sanden oder Materialien mit wenig Feinkornanteil kann mit der Entwicklung effizient begegnet werden [22, 31, 50].

Beim VARIOCONTROL-System (1998) für Walzenzüge des Erdbaues (respektive dem VARIOMATIC-System (1996) für Tandemwalzen zur Asphaltverdichtung), von der Firma *Bomag* entwickelt, handelt es sich um eine Weiterentwicklung der VARIO-Walze.
Das Funktionsprinzip entspricht exakt jenem der VARIO-Walze, mit dem einzigen Unterschied, dass die Verstellung der Erregereinheit automatisch, über die Interaktion zwischen der Bandage und der Untergrundsteifigkeit unter Ausnutzung von Beschleunigungssignalen geschieht und dabei nach 2 Regelkriterien – dem Sprung- und dem Kraftkriterium – auf die Untergrundverhältnisse eingestellt wird. Ersteres besagt, dass die Walze nie in den Sprungbetrieb kommen darf. Durch das Kraftkriterium wird die Obergrenze für die vertikale Bodenkontaktkraft auf einen vom Benützer wählbaren Wert beschränkt.
Die Maschine beginnt mit horizontaler, flacher Erregerrichtung und ist bestrebt, die Neigung so lange zu erhöhen, bis eines der beiden Regelkriterien greift bzw. bis die maximale vertikale Position erreicht wird. Als Wahlmöglichkeit zur automatischen Selbstregelung des Systems besteht für den Walzenfahrer auch die Möglichkeit, eine von sechs Schwingrichtungen vorzugeben, um bestimmte Verdichtungsanwendungen mit einer fest eingestellten Amplitude zu betreiben.

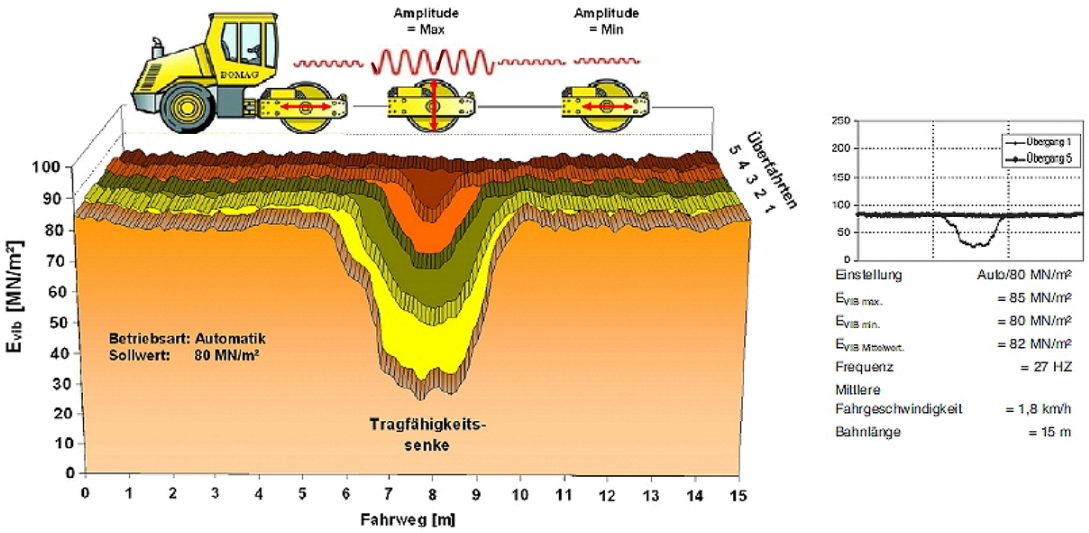


Abbildung 2.11: VARIOCONTROL-Walze der Firma BOMAG [22, adaptiert].

Auch die Firma *Ammann Group* mit Hauptsitz in der Schweiz, hat Ende der 90er Jahre ein Selbstregelungssystem, das ACE-System ("Ammann Compaction Expert"), auf den Markt gebracht. Das Funktionsprinzip besteht, wie beim *Bomag* System auch, darin, die Verdichtungsenergie automatisch an das nichtlineare Schwingungssystem Maschine-Boden anzupassen. Gesteuert wird der Mechanismus dabei über die Begrenzung der Bodenreaktionskraft F_b (kraftbasierte Regelung), sodass unerwünschte Betriebszustände der Bandage vermieden werden. Dafür wurde als Erregereinheit eine gleichlaufende, geteilte Unwucht realisiert, deren Lage bzw. Öffnungswinkel variabel einstellbar ist. Dadurch können beliebige Exzentrizitäten des Gesamtschwerpunktes der beiden Massen zum Bandagenmittelpunkt erreicht werden, die somit eine stufenlose Regelbarkeit der Amplitude möglich machen. Die Frequenz stellt sich bezüglich der Resonanz des Bodens ein und wird über die Phasenverschiebung zwischen Schwingungserzeugung (Erregerkraft) und Schwingungsantwort der Bandage kontrolliert und gesteuert.

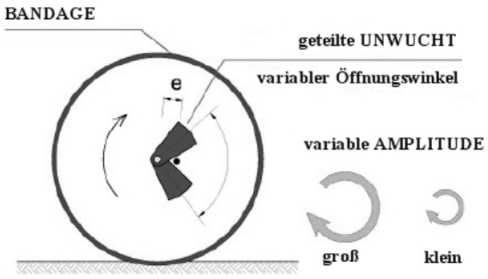


Abbildung 2.12: ACE-Walze [48, adaptiert].

Die ACE-Technik verdichtet Untergrundbereiche mit geringen Festigkeiten in der Regel mit einer hohen Amplitude (2,0 – 3,0 mm, hohe Schlagkraft und Verdichtungsenergie) und geringer, tiefer Frequenz (23 – 25 Hz, geringe Schlagdichte). Da bei hohem Verdichtungsenergieeintrag und zunehmendem Verdichtungsfortschritt jedoch die Gefahr des Springens (siehe Kapitel 2.5) und der Kornzertrümmerung besteht, stellt sich im Laufe des Verdichtungsprozesses die Amplitude zurück (bis zu 0,4 mm); gleichzeitig wird die Frequenz erhöht (bis 35 Hz) [14, 12, 13, 20, 16, 19].

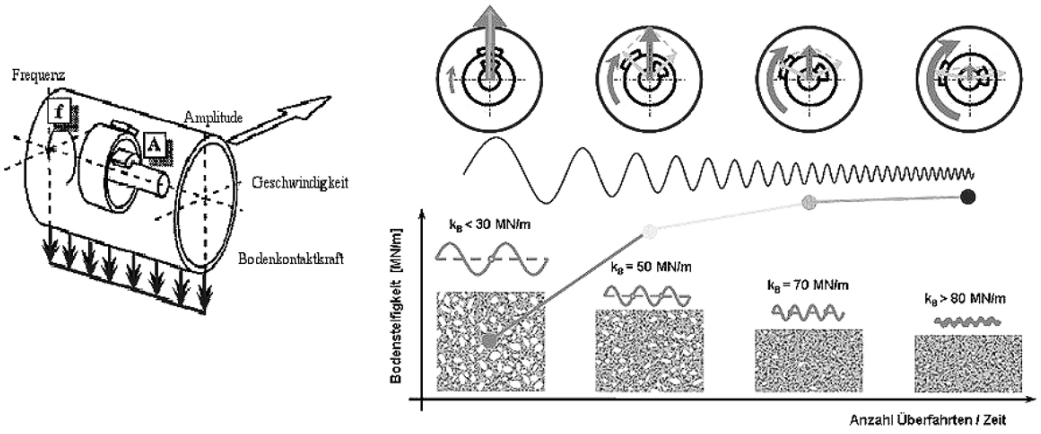


Abbildung 2.13: Mit zunehmender Verdichtungszeit bzw. Anzahl an Überfahrten steigt die Bodensteifigkeit, die Amplitude wird zurückgeschalten und die Frequenz erhöht [16, adaptiert].

Mit den VARIOCONTROL-Walzenzügen bzw. VARIOMATIC-Tandemwalzen der Firma *Bomag* und den ACE-Walzen der Firma *Ammann* sind seit knapp 20 Jahren selbstregelnde Systeme auf dem Markt.

Die Verwendung dieses Walzentyps zur FDVK steht im Widerspruch zu dessen Funktionsprinzip, welches besagt, dass Walzenparameter und Fahrgeschwindigkeit bei der

Überfahrt konstant gehalten werden müssen (alleine schon wegen der Veränderung der Messtiefe bei geschichtetem Aufbau), um Veränderungen der Bandagenbeschleunigung eindeutig den Veränderungen im Untergrund zuordnen zu können. Aus diesem Grund können selbstregelnde Walzen nicht für Abnahmeprüfungen herangezogen werden. Es sei denn, ihre Selbstregelung wird ausgeschalten und die Erregereinheit fix arretiert, denn dann arbeiten diese Walzen wie VARIO-Walzen [21]. Für qualitative Abschätzungen des Verdichtungserfolges sind die Messwerte jedoch sehr wohl zu gebrauchen [25].

2.4.2.5 Selbstlernende, Intelligente Walzen

Die aus den Vereinigten Staaten von Amerika stammenden Begriffe „Intelligent Compaction“ bzw. „Intelligent Roller“ werden oft fälschlicherweise wortwörtlich ins Deutsche übersetzt. Aus diesem Grund werden, auch in deutscher Fachliteratur, selbstregelnde Walzen immer wieder als intelligente Walzen bezeichnet. Es erscheint an dieser Stelle eine kurze Beschreibung und Abgrenzung von intelligenten, zu selbstregelnden Walzen sinnvoll.

Selbstregelnde Walzen (im Englischen „Intelligent Rollers“), wie im vorherigen Kapitel 2.4.2.4 beschrieben, reagieren auf vorherrschende Bedingungen immer auf die selbe Art und Weise.

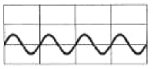
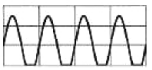
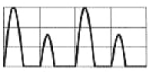
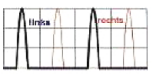
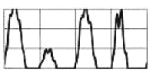
Das Wesen einer intelligenten Walze bestünde darin, auf ähnliche Situationen nicht immer gleich zu reagieren sondern durch Erfahrung dazuzulernen und diese bei der Lösung von Problemen einfließen zu lassen; ähnlich wie dies ein intelligenter Mensch machen würde. Dazu müssten die von der Walze gesammelten Erfahrungswerte abgespeichert werden können und die Walze zudem eine Art Gedächtnis haben, welches es gilt ständig zu erweitern. Somit wären entsprechende Lernprozeduren, sowie die Entwicklung von geeigneten Regelkriterien notwendig, um diese weitere Innovation realisieren zu können. Die Vorteile einer solchen Walze liegen auf der Hand [25].

Intelligente Walzen beschreiben zum jetzigen Zeitpunkt noch eine visionäre Vorstellung, würden jedoch als Nachfolger von selbstregelnden Walzen abermals eine Revolution für die Verdichtungstechnik bedeuten und den nächsten logischen Schritt in der Weiterentwicklung der dynamischen Verdichtungstechnik mit Walzen darstellen. Wenn man in Betracht zieht, mit welcher Geschwindigkeit sich die Verdichtungstechnik im Hinblick auf Forschung, Technik und Anwendung der FDVK in den

letzten Jahren weiterentwickelt hat, stellen selbstlernende Walzen ein ambitioniertes, allerdings kein utopisches Ziel mehr dar. Ob sie letztendlich tatsächlich realisierbar sind, werden zukünftige Entwicklungen zeigen.

2.5 Betriebszustände von Vibrationswalzen

Experimentelle und theoretische Untersuchungen [1] haben gezeigt, dass je nach Abstimmung des interagierenden Walze-Boden-Systems (siehe Kapitel 2.3), die Vibrationswalze bei der dynamischen Verdichtung in verschiedenen Bewegungsmustern arbeitet. Dabei gilt es fünf Betriebszustände zu unterscheiden, welche in Abbildung 2.14 grafisch aufbereitet sind und nachfolgend genauer erläutert werden, da sie für das Verständnis der Effekte, die bei der dynamischen Bodenverdichtung mit Vibrationswalzen auftreten, essentiell sind. Sie bestimmen nicht nur die Verdichtungseffektivität und den Verschleiß des Gerätes maßgebend, sondern haben zudem wesentlichen Einfluss auf das Niveau der FDVK-Messwerte [1, 45, 49].

Bewegung der Bandage	Interaktion Bandage-Boden	Betriebs-zustand	Verlauf der Bodenkontaktkraft	kleinste Periode *	Anwendung der FDVK	Boden-steifigkeit	Fahr-geschwindig-keit	Erreger-Amplitude	Verhältnis Rahmengew./ Bandagengew.
periodisch	ständiger Kontakt	KONTAKT		1	ja	gering	hoch	gering	hoch
	periodischer Kontaktverlust	ABHEBEN		1	ja				
		SPRINGEN		2 (4)	ja				
		TAUMELN		[2 (4)]	nein				
chaotisch	aperiodischer Kontaktverlust	CHAOS		[-]	nein	hoch	niedrig	hoch	niedrig

* Die kleinste Periode ist als Vielfaches der Erregerperiode T angegeben

Abbildung 2.14: Betriebszustände einer Vibrationswalze [1, adaptiert].

KONTAKT:

Bei diesem Betriebszustand verliert die Bandage nie den Kontakt zum Untergrund. Der ständige Kontakt zum Boden kann allerdings nur bei geringen Bodensteifigkeiten (zB. weicher Boden mit geringer Lagerungsdichte), hoher Auflast durch den

Walzenrahmen auf der Bandage (= großes Verhältnis von Rahmengewicht zu Bandagengewicht), geringen Vibrationsamplituden oder hohen Fahrgeschwindigkeiten auftreten.

ABHEBEN:

Abheben beschreibt den üblichen und normalerweise am häufigsten vorkommenden Zustand bei der dynamischen Verdichtung mit Vibrationswalzen. Bei jeder Unwuchtumdrehung hebt die Bandage kurzfristig und periodisch vom Untergrund ab, um innerhalb derselben auch wieder aufzuschlagen (dh. die Periode entspricht jener der Erregerfrequenz). Dieses periodische Aufschlagen der Bandage auf dem Untergrund bewirkt den effektivsten Verdichtungserfolg bei geringster Gerätebelastung.

SPRINGEN:

In den Betriebszustand Springen wechselt die Bandage bei weiter zunehmender Bodensteifigkeit. Walzen mit großer Amplitude, geringer Fahrgeschwindigkeit und verhältnismäßig geringem Rahmengewicht neigen dabei eher zum Springen, als Walzen mit großen statischen Achslasten, geringer Amplitude und hohen Fahrgeschwindigkeiten. Der Übergang vom Abheben zum Springen erfolgt in der Regel rasch, jedoch kontinuierlich. Das Bewegungsverhalten wiederholt sich dann nur mehr mit jeder zweiten Exzenterumdrehung. Springen beginnt, sobald die Bodenkontaktkraft zweier aufeinander folgender “Schläge“ der Bandage auf den Untergrund deutlich unterschiedliche Werte aufweist (ein stärkerer und ein schwächerer Schlag wechseln einander ab). Dies kann unter Umständen so weit führen, dass der schwache Schlag plötzlich ganz verschwindet und die Bandage nur mehr bei jeder zweiten Unwuchtumdrehung auf dem Boden auftrifft. Dafür ist dieser Schlag dann um so härter (“volles Springen”).
Für den Walzenfahrer ist Springen nicht nur am Bewegungsverhalten der Walze, sondern auch akustisch, durch ein tiefes Dröhnen, bedingt durch die halbe Erregerfrequenz, zu erkennen. Das Steuern und Verdichten mit der Walze ist im Sprungbetrieb noch möglich, es treten dabei aber erhöhte Belastungen für das Verdichtungsgerät auf, welche die Lebensdauer negativ beeinflussen. Zudem wird im Sprungbetrieb der Boden meist oberflächennah wieder aufgelockert und es kann zu Kornzertrümmerungen des verdichteten Materials kommen. Mit der richtigen Wahl des Verdichtungsgerätes und geeigneter Walzenparameterabstimmung kann dieser Betriebszustand vermieden

werden. Bei sogenannten selbstregelnden Walzen wird das Springen messtechnisch, durch eine automatische Regelung, unterbunden (siehe Kapitel 2.4.2.4).

TAUMELN:

Schlägt die Bandage abwechselnd auf der linken und rechten Seite auf dem Boden auf, führt sie also eine Rotation um die Längsachse (Wiegeschwingung) aus, wird dieser Zustand als Taumeln bezeichnet. Er tritt auf, wenn der Boden noch härter und steifer wird. Die Walze lässt sich in diesem Zustand kaum mehr steuern und würde der enormen Belastung auf Dauer nicht standhalten. Taumeln ist unbedingt zu vermeiden. In diesem Betriebszustand ist keine sinnvolle Verdichtung mehr erzielbar.

CHAOS:

Der chaotische Betriebszustand lässt sich durch niedrige Fahrgeschwindigkeiten auf extrem steifen Unterlagen, bei gleichzeitig großer Amplitude und geringem Rahmengewicht, bezogen auf das Bandagengewicht, provozieren. Die Bandagenbewegungen in diesem Betriebszustand weisen keine Periodizität mehr auf. Die Walze ist nicht mehr kontrollierbar, wodurch auch keine vernünftige Verdichtungsarbeit mehr möglich ist. Der Walzvorgang ist umgehend zu beenden und nach entsprechender Änderung der Fahrgeschwindigkeit bzw. der Walzenparameter in anderen Betriebszuständen fortzusetzen.

2.6 Verdichtungsprüfung

2.6.1 Arten der Verdichtungsprüfung

Die RVS 08.03.01 [60] kennt und unterscheidet folgende Arten der Verdichtungsprüfung:

- Erstprüfung (Eignungsprüfung): sind Prüfungen zum Nachweis der Eignung der Baustoffe für den vorgesehenen Verwendungszweck entsprechend den Anforderungen des Projektes. Die Prüfung muss durch den Auftragnehmer veranlasst werden. Selbiger trägt auch die Kosten.
- Konformitätsprüfung (Kontrollprüfung): sind laufende Prüfungen des Auftragnehmers, oder dessen Beauftragten, um festzustellen, ob die Güte-

eigenschaften der Baustoffe und der fertigen Leistung den vertraglichen Anforderungen entsprechen. Der Auftragnehmer hat die Prüfung zu veranlassen und die Kosten dafür zu tragen

- Identitätsprüfung (Abnahmeprüfung): sind Prüfungen des Auftraggebers, um festzustellen, ob die Güteeigenschaften der Baustoffe und der fertigen Leistung den Anforderungen entsprechen. Er selbst hat die Prüfung zu veranlassen und die Kosten dafür zu tragen.

Diese Definitionen für Laborversuche können auch sinngemäß auf Feldversuche umgelegt werden.

2.6.2 Methoden der Verdichtungsprüfung

2.6.2.1 Allgemeines

Der Anspruch dieses Kapitels ist es, einen Überblick über die gebräuchlichsten Methoden der Verdichtungsprüfung zu liefern, sowie diese kurz zu erläutern, um letztendlich den nahtlosen Übergang zu Kapitel 3 zu schaffen, wo die FDVK im Detail behandelt und ausführlich diskutiert wird.

Um den Erfolg der Verdichtung von Erdbaustoffen bzw. die Einhaltung der geforderten Mindestqualitäten nachzuweisen, gibt es je nach Anforderungsprofil verschiedene Prüfmethoden. Die Auswahl des Prüfverfahrens wird in Österreich durch die RVS 08.03.01 [60] geregelt. Ganz allgemein können Verdichtungskontrollen einerseits in konventionelle, punktuelle (direkter oder indirekter Bezug auf die Proctordichte) und andererseits in arbeitsbegleitende, flächendeckende Methoden (zB. FDVK) eingeteilt werden.

2.6.2.2 Punktuelle Verdichtungskontrollen

Direkte Prüfverfahren

sind Verdichtungsprüfungen, bei denen die Trockendichte ρ_d [g/cm³] des zu prüfenden Bodens mit der labormäßig ermittelten Proctordichte ρ_{pr} [g/cm³] verglichen wird, um daraus den Verdichtungsgrad $D_{pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{pr}} \cdot 100$ [%] zu ermitteln. Der direkte Nachweis des Verdichtungsgrades erfordert also einerseits die Ermittlung der Dichte im Feld, andererseits auch die Ermittlung der Proctordichte als Bezugswert im Labor.

Indirekte Prüfverfahren

sind Prüfungen, die als Ergebnis keinen direkten Bezug zur Proctordichte liefern. Die Ergebnisse lassen sich jedoch anhand von Erfahrungswerten interpretieren oder zum Teil auch an Referenzwerte koppeln, die wiederum Rückschlüsse auf die erzielte Verdichtungsqualität ermöglichen.

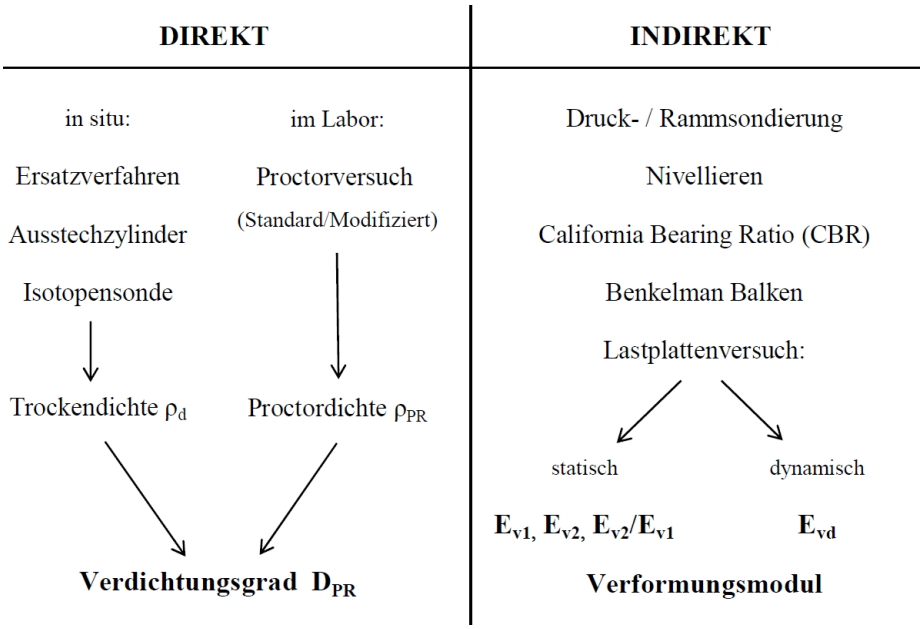


Abbildung 2.15: Übersicht über punktuelle Verdichtungsprüfmethoden [2].

Dichtebestimmung (in situ):

Bei der Bestimmung der Dichte im Feld liegt die Schwierigkeit vor allem in der Bestimmung des Volumens der untersuchten Bodenprobe. Im Erdbau stehen dafür folgende Verfahren zur Auswahl, die im Wesentlichen alle nach dem gleichen Prinzip funktionieren und in ÖNORM B 4414-2 [54] bzw. DIN 18125-2 [29] geregelt sind.

- Ausstechzylinder-Verfahren (nur bindige Böden)
- Ersatzverfahren
  - Sandersatz-Verfahren
  - Ballon-Verfahren
  - Flüssigkeitsersatz-Verfahren
  - Gipsersatz-Verfahren

- Schürfgruben-Verfahren
- Schüttkörper-Verfahren (nur nicht bindige Böden)

Geprüft wird immer die zuletzt verdichtete Bodenschicht, indem eine Probe aus der Oberfläche entnommen wird. Das Volumen der Probe wird entweder direkt an der Bodenprobe bzw. am Entnahmegerät gemessen oder durch Ausmessen des entstandenen Hohlraumes im Boden. Dabei wird der Hohlraum durch einen Ersatzstoff – ein anderes Medium bekannter Dichte - (zB. Wasser oder Sand mit bekannter Schüttdichte ρ_E) ausgetauscht und anschließend das zugehörige Ersatzstoffvolumen $V_E = \frac{m_E}{\rho_E}$ [cm³] bestimmt. Die Bodenprobe wird später im Labor in feuchtem Zustand sowie nach Ofentrocknung bei 105 °C gewogen, sodass dann der Wassergehalt und die Trockendichte der geprüften Bodenprobe in situ bekannt sind. Die Trockendichte kann nun auf den Laborwert der Proctordichte für den gleichen Boden bezogen werden, sodass man den Verdichtungsgrad D_{pr} [%] erhält.

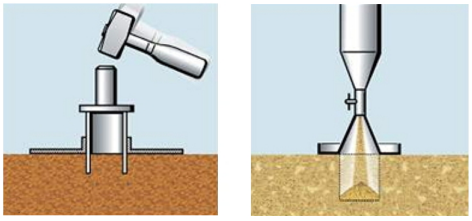


Abbildung 2.16: Ausstechzylinderverfahren (links) und Sandersatzverfahren (rechts) [22, adaptiert].

- Radiometrische Verfahren (Isotopensonde)

  Bei der Anwendung der Isotopensonde handelt es sich um ein zerstörungsfreies Schnellprüfverfahren, bei dem man sich die Eigenschaften radioaktiver Strahlung zunutze macht, um Rückschlüsse auf die Verdichtung zu ziehen. Es ist zu beachten, dass die Anwendung von radiometrischen Prüfmethoden an gesetzliche Auflagen gebunden und deshalb genehmigungspflichtig ist.

  Die Sonde besteht aus der Strahlenquelle, dem Detektor zur Messung der Strahlungsintensitäten und einem Impulszählgerät.

  Zur Dichtemessung des Untergrunds werden Gammastrahlen verwendet. Dabei wird die Sonde auf das zu untersuchende Material gesetzt. Die Strahlenquelle sendet Strahlung aus, die durch das Material abgeschwächt und gestreut

wird. Mit Hilfe des integrierten Zählrohrs können die Intensitätsunterschiede bestimmt und daraus auf die Dichte des Materials geschlossen werden.

Die Wassergehaltsmessung erfolgt mit Hilfe von Neutronenstrahlen. Die ausgesendeten Neutronen mit hoher kinetischer Energie dringen in das Material ein und werden an Wasserstoffatomen (geringere Masse) abgebremst und abgelenkt. Diese Neutronen erzeugen in Zählrohren elektrische Impulse, die dokumentiert und auf der Digitalanzeige des Gerätes angezeigt werden. Im Allgemeinen gilt: Je stärker die Abbremsung ausfällt, desto höher ist die Feuchtigkeit.

Als Ergebnis liefert die Sonde eine Direktanzeige von Feuchte und Trockenraumdichte, Wassergehalt und Verdichtungsgrad (%-Feuchte und %-Proctor).

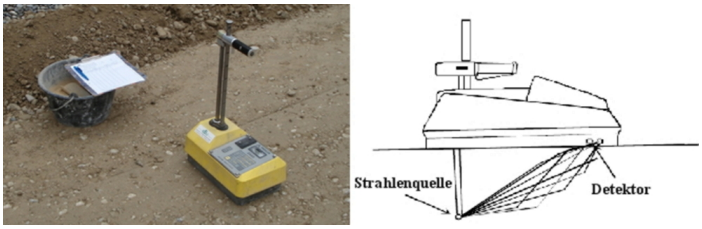


Abbildung 2.17: Isotopensonde

Proctorversuch (im Labor):

Mit dem Proctorversuch lässt sich die Verdichtungsfähigkeit bzw. Verdichtbarkeit des Bodens bestimmen, indem die erzielbare Trockendichte ρ_d in Abhängigkeit vom Wassergehalt w [%] einer Bodenprobe, bei vorgegebener Verdichtungsarbeit (Proctorarbeit) ermittelt wird. Der Versuch dient zur Abschätzung der im Feld, unter Einwirkung von Verdichtungsgeräten, erreichbaren Dichte des Bodens und stellt einen Referenzwert/Bezugswert für die Beurteilung der örtlich vorhandenen Dichte dar. Genormt wird der Proctorversuch in Österreich durch die ÖNORM B 4418 [55].

Der Ablauf des Versuches lässt sich wie folgt beschreiben:
Die Bodenprobe wird lagenweise in ein definiertes Gefäß, den sogenannten Proctortopf eingebaut. Danach wird in einem festgelegten Arbeitsverfahren, der Bodenprobe über ein Fallgewicht mit Führungsstange, vordefinierte Energie (Standard 0,6 [MNm/m^3] bzw. Modifizierter 2,65 [MNm/m^3] Proctorversuch) zugeführt und anschließend die erreichte Dichte dokumentiert. Dieses Prozedere wird an Teilmengen von ein und derselben Bodenprobe wiederholt, die sich nur hinsichtlich unterschiedlicher Wassergehalte unterscheiden. Werden dann die erzielten Trockendichten ρ_d über die zugehörigen Wassergehalte w aufgetragen, ergibt sich eine Kurve, die zunächst

ansteigt, ein Maximum erreicht und dann wieder abfällt. Das Maximum beschreibt die Proctordichte ρ_{pr} des Bodens mit zugehörigem, optimalem Wassergehalt w_{opt} (siehe untenstehende Abbildung 2.18).

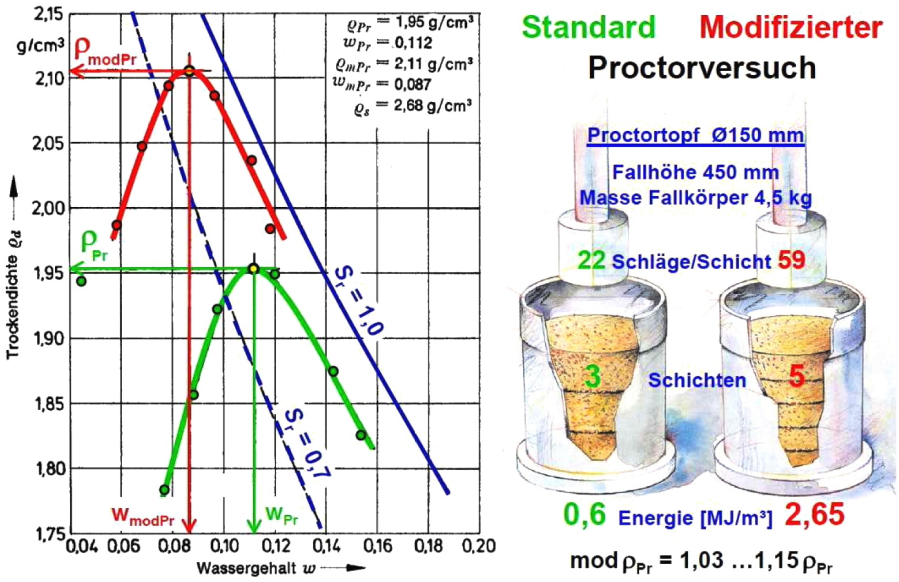


Abbildung 2.18: Proctorversuch [2].

Bei den Verdichtungskontrollen im Erdbau wird meist ein, in den Normen und Regelwerken festgelegter, Verdichtungsgrad D_{pr} gefordert, der somit ein Beurteilungskriterium für lokal vorhandene Dichten darstellt. Die RVS 08.03.01 [60] schreibt beispielsweise einen Mindestverdichtungsgrad für das Unterbauplanum im Straßenbau von $D_{pr} = 100$ % vor, was bedeutet, dass die Verdichtung von den, auf der Baustelle geprüften, Böden einem Verhältniswert von 100 % der im Labor ermittelten Proctordichte entsprechen muss.

Einschränkend ist anzumerken, dass nur eine geringe Tiefe bis ca. 30 cm unter dem aktuellen Planum geprüft werden kann, sodass auf jeder Schüttlage nach der zuvor geschätzten Anzahl von Verdichtungsübergängen eine Prüfung notwendig ist.

Dynamischer Lastplattenversuch (LFG - Leichtes Fallgewichtsgerät):

Beim dynamischen Lastplattenversuch handelt es sich um einen indirekten Feldversuch zur Verdichtungskontrolle bzw. Tragfähigkeitsprüfung von Schüttlagen oder Böden im Erdbau. Er dient zur Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} und ist in der österreichischen Vorschrift für den Straßenbau RVS 08.03.04 [59] geregelt.

Das Gerät besteht aus einer runden, als starr angenommenen Stahlplatte mit dem Radius $r = 15$ cm, die eine stoßförmige Belastung auf den Untergrund überträgt. Um zu gewährleisten, dass die Platte bei der Versuchsdurchführung vollflächig auf dem zu testenden Planum aufliegt, sind 3 Vorbelastungsstöße durchzuführen. Gegebenenfalls ist eine Sandschicht unter der Platte aufzubringen, um etwaige Unebenheiten des Planums entsprechend ausgleichen zu können.
Auf einer, in Plattenmitte angebrachten, Zentrierkugel befindet sich die Belastungsvorrichtung mit einem 10 kg schweren Fallgewicht, welches im Zuge der Versuchsdurchführung ausgeklinkt wird und über eine Stange geführt, auf ein Feder-Dämpfer Element fällt. Dieser genau definierte Stoß, wird von einem zentrisch montierten Beschleunigungsaufnehmer im Inneren der Platte aufgezeichnet, dessen Signale in dem angeschlossenen elektronischen Messgerät zu einem Messwert, dem dynamischen Verformungsmodul E_{vd}, verarbeitet werden.

Bei der Versuchsauswertung werden dabei 2 wesentliche Vereinfachungen getroffen [6]:

- Die Ermittlung des E_{vd} geschieht über die Formel des statischen Lastplattenversuches, welche auf dem statisch belasteten elastischen Halbraum basiert. Somit finden in der Auswertung dynamische Terme keine Berücksichtigung:

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s}\,[\mathrm{MN/m^2}] \tag{2.1}$$

  mit:

E_{vd}	dynamischer Verformungsmodul
r	Radius der Lastplatte
$\Delta\sigma$	mittlere Normalspannung (Sohlpressung)
Δs	vertikale Setzung der Platte

- Die maximal auftretende Kontaktspannung zwischen Platte und Untergrund wird vereinfachend als konstant mit $\Delta\sigma = 0,1\,\mathrm{MN/m^2}$ angenommen. Somit

geht zur Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls lediglich die gemessene maximale Setzung s_{max} [mm] ein und Gleichung 2.1 degeneriert, für eine Lastplatte mit 30 cm Durchmesser, zu folgender einfachen Beziehung:

$$E_{vd} = \frac{22,5}{z_{max}} \, [\mathrm{MN/m^2}] \tag{2.2}$$

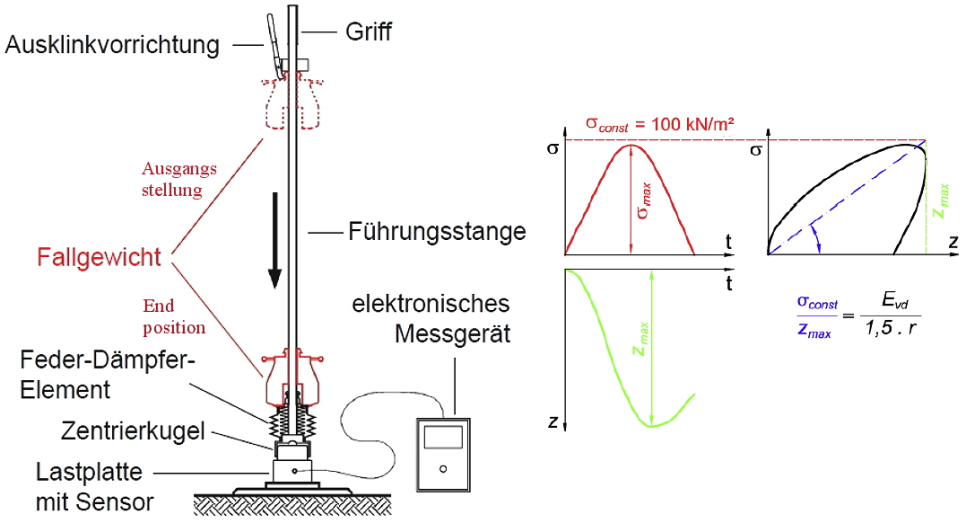


Abbildung 2.19: Komponenten (links) bzw. Bodenpressung, Verschiebung und Arbeitsdiagramm (rechts) der Dynamischen Lastplatte [23, adaptiert]

Die Vorteile des leichten Fallgewichtsgerätes liegen in der raschen, einfachen Durchführbarkeit und der flexiblen und robusten Gerätschaft im Vergleich zur statischen Lastplatte. Das Gerät kann von einer Person bedient werden, ist leicht zu transportieren und erlaubt somit in einem akzeptablen Zeitraum relativ viele Versuche, selbst unter beengten Verhältnissen, durchzuführen. Die Messtiefe beträgt ca. $2,0 \cdot d$ (vgl. statischer Lastplattenversuch ca. $1,5 \cdot d$) [6].

2.6.2.3 Flächendeckende Verdichtungskontrolle

Konventionelle, punktuelle Prüfmethoden können, wie bereits in Kapitel 1 besprochen wurde, nur an einzelnen statisch ausgewählten Stellen durchgeführt werden und sind zudem sowohl kosten- als auch zeitintensiv. Es kann demnach kein ganzheitlicher Verdichtungsnachweis erbracht werden. Unvermeidbare Nacharbeiten und Zwischenprüfungen, die den Bauablauf entsprechend verzögern und behindern, sind die logische Folge.

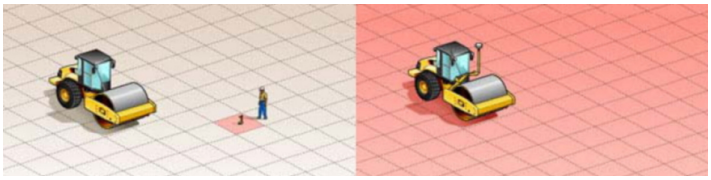


Abbildung 2.20: Bildhafter Vergleich von punktueller und flächendeckender Verdichtungsprüfung [22].

Der Zwang zur Rationalisierung führte deshalb zu einer bereits in den 1980er-Jahren entwickelten Methode, bei der die Walze nicht nur die Aufgabe der Verdichtung übernimmt, sondern gleichzeitig auch zum kontinuierlich messenden Dokumentationsgerät wird, was eine gewünschte flächendeckende Verdichtungsüberprüfung möglich macht. Das Verfahren wird als Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bezeichnet und im nächsten Kapitel 3 ausführlich behandelt.

3 FDVK mit Vibrationswalzen

3.1 Allgemeines

Bei der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) handelt es sich um eine walzen- und arbeitsintegrierte Methode der Verdichtungsprüfung, bei der die dynamisch angeregte Walze nicht nur als Verdichtungsgerät, sondern gleichzeitig auch als Messgerät Verwendung findet.
Nach längjähriger Entwicklungs- und Forschungstätigkeit, hat diese revolutionäre Methode der Verdichtungsprüfung in den letzten Jahren Einzug in die Praxis gehalten. Als bahnbrechend dafür kann die Erkenntnis angesehen werden, dass die Walze bei der dynamischen Bodenverdichtung in Abhängigkeit der Abstimmung von Boden- und Walzenparametern in unterschiedlichen Betriebszuständen (Kapitel 2.5) arbeitet [1].

Das Prinzip der FDVK besteht darin, die von einer rotierenden Unwucht in der Bandage erzeugten Schwingungen der Walzentrommel mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern aufzuzeichnen, diese Signale mit entsprechender Elektronik im Zeit- bzw. Frequenzbereich zu analysieren und daraus dann dynamische Messwerte zu errechnen, mit denen sich das Trag- bzw. das Verformungsverhalten des Bodens beurteilen lässt und schlussendlich eine Aussage über die Verdichtung getroffen werden kann. Diese Messwerte hängen wesentlich von den, in Kapitel 3.4 beschriebenen, zahlreichen Faktoren ab [1, 25, 45, 24].

Für den effizienten und routinemäßigen Einsatz der FDVK muss die Walze selbst für die Durchführung geeignet sein, was eine dynamische Anregung der Bandage, sowie die Ausrüstung der Walze mit einem Mess- bzw. Dokumentationssystem bedingt.
Weitere Anforderungen und Voraussetzungen für den Einsatz sind an den Boden, hinsichtlich Ebenheit des Planums und auch Bodenart, an die Art der Durchführung und selbstverständlich auch an das gesamte involvierte Personal (vertrauter Aufgabenbereich) zu stellen.

Zudem muss die Reproduzierbarkeit signifikanter Messwertverläufe, von unmittelbar hintereinander durchgeführten Messfahrten auf der selben Walzspur, gegeben sein.

Die Methode der FDVK wird in Österreich durch die RVS 08.03.02 [58] (ehemals RVS 8S.02.06) geregelt, wo unter anderem weitere Rahmenbedingungen für eine standardisierte Anwendung definiert sind. Die darin enthaltenen Erkenntnisse beruhen in erster Linie auf der Arbeit von *Adam* [1], die somit ganz entscheidend zur Überarbeitung der "alten" RVS 8S.02.06 beitrug.

Da es sich bei der FDVK um ein indirektes Verfahren der Verdichtungskontrolle handelt, sind für diese eben angesprochenen Messwerte bisher noch keine allgemeingültigen Anforderungswerte vorhanden, die ein entsprechendes Qualitätskriterium für die Abnahme darstellen. Es muss daher für jede Baustelle und Walzen-Boden Kombination eine Bindung der Messwerte an herkömmliche bauphysikalische Größen hergestellt werden. Auf den Vorgang der Kalibrierung von FDVK-Messwerten wird in Kapitel 3.5 näher eingegangen.

Die Anwendungsmöglichkeiten der FDVK erstrecken sich vom Verkehrswegebau, der Verdichtung von verschiedenen Tragschichten, Schüttlagen und Aufstandsflächen, über den Wasserbau, Dammbau und Flugplatzbau, bis hin zur Herstellung von Dichtschichten im Deponiebau [9, 4]. Die Durchführung einer FDVK ist in Österreich, ab einer Planumsfläche von 30.000 m^2 verpflichtend vorgeschrieben.

3.2 Messprinzip und Komponenten

Die grundlegende Idee der FDVK beruht auf der Analyse der Bandagenbeschleunigung in der Lagerschale (Schwingung), welche die Wechselwirkungen des schwingenden Interaktionssystems zwischen der dynamisch erregten Bandage und dem zu verdichtenden Boden charakterisiert.
Wird die Bandage am Rahmen angehoben (kein Kontakt zum Untergrund), so kann ihr Bewegungsverhalten während der dynamischen Anregung mit einer Sinusschwingung beschrieben werden. Sobald die Bandage jedoch auf den Untergrund trifft, wird dieses Sinussignal (zB. Beschleunigungssignal) durch die, infolge des Verdichtungsfortschrittes, steigende Bodenkontaktkraft* zunehmend verzerrt. Das Signal wird im Allgemeinen noch periodisch, jedoch nicht mehr harmonisch sein. Genau diese

*Der Vektor dieser Bodenreaktionskraft zeigt zwar zu jeder Zeit in eine andere Richtung, seine primäre Ausrichtung ist jedoch senkrecht [49].

Tatsache macht sich die Methode der FDVK zunutze.
Werden während des Verdichtungsvorganges die Walzenparameter nicht verändert, so können die Änderungen im Schwingungsverhalten der Bandage eindeutig auf die Änderung der Untergrundverhältnisse zurückgeführt werden, wodurch eine Überprüfung der Verdichtung möglich wird. Der Messwert zur Beurteilung der Bodentragfähigkeit wird dann durch eine elektronische Auswertung aus der gemessenen Bandagenbeschleunigung ermittelt.

Durch entsprechende Hardware können die, während der Verdichtungsfahrt ermittelten, Messwerte dann gespeichert und unmittelbar dargestellt werden. Diese visuelle Darstellung des Verdichtungserfolges basiert dabei auf dem Vergleich von aufeinanderfolgenden Messfahrten und kann entweder über den Monitor, oder mit Hilfe eines Druckers erfolgen und informiert den Walzenfahrer noch während der Fahrt über den derzeitigen Zustand des Untergrundes. Steigende Anzeigewerte lassen erkennen, dass noch Verdichtungspotential vorhanden ist. Stagnierende Messwerte bedeuten hingegen (meist als 5% Zuwachsgrenze definiert), dass bei den vorherrschenden Einsatzbedingungen kein weiterer Verdichtungszuwachs mehr möglich ist.

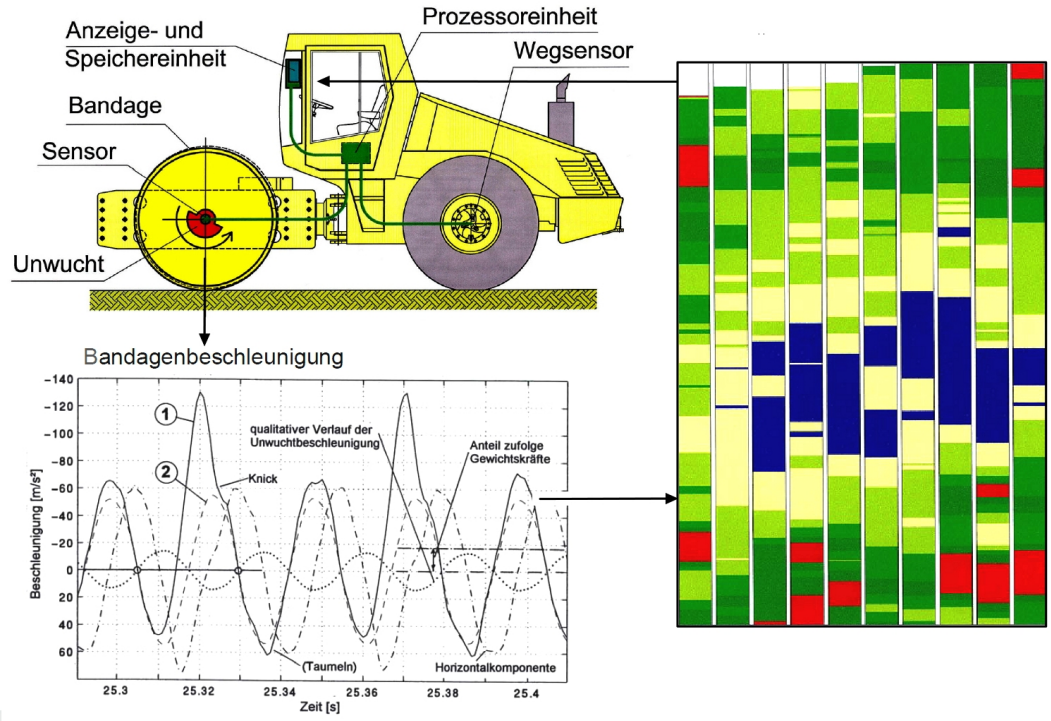


Abbildung 3.1: Komponenten eines FDVK-Systems (oben), gemessene Bandagenbeschleunigung (unten) und Darstellung des Verdichtungsfortschrittes auf dem Display (rechts) [2, adaptiert].

Teil eines jeden FDVK-Systems ist eine Beschleunigungsaufnehmer- bzw. Sensoreinheit, die auf der Lagerschale der Bandage montiert ist und somit das charakteristische Schwingungsverhalten misst.
Des Weiteren besteht ein FDVK-System aus einer Prozessoreinheit, die aus den aufgezeichneten Signalen laufend den aktuellen Messwert errechnet und der Anzeige- und Speichereinheit zur visuellen Darstellung der Messwerte auf dem Display bzw. zur manipulationssicheren Speicherung der Daten.
Durch einen Weg- und Geschwindigkeitssensor an der Hinterachse der Walze oder, wie es heutzutage üblich ist, durch ein GPS-System, wird der zugehörige Ort zu den berechneten Verdichtungsmesswerten ermittelt und exakt zugeordnet. Grundsätzlich kann demnach also zwischen einer bahngebundenen Arbeitsweise, bei der die Baustelle in Bahnen und Felder unterteilt wird, und einer GPS-basierten Arbeitsweise der FDVK unterschieden werden (siehe Abbildung 3.12).
Für die Verwaltung und Dokumentation der Messwerte, sowie für deren weitere Verarbeitung und Aufbereitung steht entsprechende Computersoftware zur Verfügung.

3.3 Vorteile und Nachteile der FDVK

Die wesentlichen Vorteile der FDVK lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Optimierung der Verdichtungsqualität und Qualitätssicherung
- Erhöhung der Verdichtungsleistung
- Unmittelbare, kontinuierliche und flächendeckende Messung und Darstellung des Verdichtungszustandes
- Manipulationssichere Dokumenation des gesamten Prozesses inklusive der Möglichkeit der nachträglichen Verarbeitung und Aufbereitung am PC
- Identifikation von Inhomogenitäten, Schwach- und Fehlstellen im Untergrund bereits während der Verdichtungsarbeiten
- Reduzierte Gefahr der Unter- und Überverdichtung (Wiederauflockerung, Kornzertrümmerung)
- Optimierung des gesamten Bauprozesses (Verdichtungsgeräteeinsatz mit GPS, minimierter Arbeitsaufwand etc.)
- Zeit- und Kosteneinsparungen durch Entfall bzw. Minimierung von Nacharbeiten, Erhaltungsarbeiten und nachlaufenden externen Kontrollen

- Erhöhung der Lebensdauer der Bauwerke und der Walze (Vermeidung schädlicher Betriebszustände etc.)

Dass es sich bei der FDVK um eine noch relativ "junge" und moderne Möglichkeit der Verdichtungsprüfung mit noch vorhandenem Entwicklungspotential handelt, wird anhand folgender Auflistung ersichtlich:

- Indirekte Messmethode - Messwerte sind den traditionellen Bodenkennwerten nicht direkt zuzuordnen - eine Kalibrierung ist erforderlich.
- beträchtlicher Aufwand für Organisation, Abwicklung und Logistik auf der Baustelle
- Komplexität infolge der mehrfachen Nichtlinearität des interagierenden Boden-Walze-Systems
- Effekte und Phänomene die bei der Verdichtung auftreten und Einfluss auf die FDVK-Messwerte nehmen
- Empfindlichkeit und Sensibilität der Messwerte auf Untergrundverhältnisse (zB. Wassergehalt) und auf Änderung der Walzenparameter
- Anwendung der FDVK bei fein- und gemischtkörnigen Böden aufgrund der großen Abhängigkeit der Messwerte von Wassergehalt, Zustandsform und auch Feinkornanteil
- Vergleichbarkeit der verschiedenen Messwerte untereinander
- Abhängigkeit der Messwerte von den bei der Verdichtung auftretenden Betriebszuständen der Bandage
- Veränderte Tiefenwirkung (mess- und verdichtungstechnisch) bei Änderung der Walzenparameter
- Einfluss von geschichtetem Untergrund auf die Messwerte (sofern die Schichtgrenze innerhalb der Messtiefe liegt)
- Hohe Anforderungen an Personal, Messsystem, Durchführung und Verdichtungsgerät für einen zielführenden Einsatz

3.4 Einflussgrößen auf FDVK-Messwerte

Die wichtigsten Einflussgrößen auf die Messwertbildung der FDVK mit Vibrationswalzen konnten aus diversen Untersuchungen bereits hinreichend erforscht werden. Am meisten Bedeutung kann dabei zweifelsohne den Arbeiten von *Adam* [24], [1] beigemessen werden. Die daraus gewonnen Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Boden:

- Bodenart:

  hinsichtlich Korngröße und Korngrößenverteilung. Je feinkörniger der Boden, desto geringer ist das Messwertniveau. Auch der Anstieg der Messwerte bei Zunahme der Anzahl der Überfahrten ist im Vergleich zu grobkörnigen Böden geringer.

- Schichtaufbau:

  beeinflusst das Messwertniveau durch etwaig vorhandene Schwachstellen oder Inhomogenitäten, sofern diese innerhalb der Messtiefe liegen.

- Wassergehalt:

  Im Allgemeinen wird, bei (vor allem bindigen) Böden mit hohem Wassergehalt, ein niedriges Niveau der dynamischen Messwerte registriert.

Planum:

- Ebenflächigkeit:

  Unebenheiten des Planums, wodurch die Bandage nicht vollflächig auf dem Boden aufliegen kann, wirken sich negativ auf die Verdichtung aus. Auch die Messwerte werden in diesem Fall verfälscht und sind daher nicht mehr aussagekräftig.

- Verdichtungsgrad, Steifigkeit:

  Da die Steifigkeiten kohäsiver Böden im Wesentlichen deutlich geringer sind als jene von nicht bindigen Materialien, wird das Messwertniveau bei FDVK- Messungen sehr niedrig sein. Generell sind sinnvolle Messungen bei bindiger Bodenart, wenn überhaupt, nur mit sehr leichten Walzgeräten zu erzielen. Nicht bindige Böden stellen wegen ihrer guten Verdichtbarkeit und hohen Tragfähigkeit im verdichteten Zustand hingegen ein ideales Anwendungsgebiet für die FDVK dar.

Maschinenparameter:

- Amplitude:

  Die Amplitude nimmt Einfluss auf die Verdichtungswirkung, die Messtiefe, den Betriebszustand (bei großer Amplitude neigt die Bandage eher zum Springen) und somit auch auf das Niveau der dynamischen Messwerte.

- statische Linienlast:

  Mit steigender statischer Linienlast erhöht sich die Tiefenwirkung sowie auch die Messtiefe der Walze, wodurch tieferliegende Bereiche Einfluss auf die FDVK-Messwerte nehmen können. Zudem beeinflusst das Verhältnis von Rahmengewicht zu Bandagengewicht die Betriebszustände der Bandage erheblich (siehe Kapitel 2.5). Dabei neigen Walzen mit relativ geringem Rahmengewicht eher zum Springen. Aus diesem Grund sind bei grobkörnigen Böden eher schwere Rahmen zu bevorzugen, bei feinkörnigen eher leichte, um einen deutlicher ausgeprägten Messwertverlauf zu erreichen.

- Frequenz:

  Mit zunehmender Frequenz nimmt der FDVK-Messwert generell ab. Diese Beziehung gilt auch umgekehrt. Deshalb ist die Frequenz während der Fahrt in einem Toleranzbereich von $\pm 2\,\mathrm{Hz}$, ehestmöglich konstant zu halten.

- Fahrgeschwindigkeit:

  Der FDVK-Messwert wird generell größer, wenn die Geschwindigkeit gedrosselt wird und umgekehrt. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass die Bandage bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten eher zum Springen neigt. Allenfalls ist die Abwalzgeschwindigkeit während der Fahrt auf jeden Fall in einem Toleranzbereich von $\pm 0,2\,\mathrm{km/h}$ zu halten, bestenfalls jedoch konstant.

- Fahrtrichtung:

  Grundsätzlich ist es zu empfehlen den Verdichtungserfolg nur in einer Fahrtrichtung (vorwärts oder rückwärts) zu messen. Ist es allerdings aus irgendwelchen Gründen notwendig in beiden Richtungen Messungen zu tätigen, so ist sicherzustellen, dass sich das Messwertniveau des dynamischen Wertes nicht ändert bzw. bekannt ist.

Lage und Geometrie der Walzspur:

- Neigung:

  Die Walze muss in der Lage sein, die vorgegebene Böschungsneigung ohne zu großen Schlupf der Antriebsräder zu befahren. Dabei spielen zum einen der Reibungskoeffizient zwischen Gerät und Boden, der von der Oberflächenbeschaffenheit, der Korngrößenverteilung und vom Wassergehalt des Bodens abhängig ist, sowie zum anderen das Reifenprofil und der Luftdruck im Reifen eine wesentliche Rolle.

- Kurven:

  enge Kurven, sowie Kurvenfahrten sind generell zu vermeiden.

Bewegungsverhalten der Bandage :

Die verschiedenen Betriebszustände der Bandage beeinflussen den FDVK-Messwertverlauf signifikant. Aus diesem Grund sind die Messwerte unbedingt getrennt, einerseits für Kontakt und Abheben, andererseits für Sprungbetrieb, zu betrachten und zu bewerten. Dies gilt im Besonderen für die Analyse der Messwerte im Frequenzbereich (siehe Kapitel 3.6.2.3).

Liegezeit:

Darunter versteht man den Zeitraum zwischen abgeschlossener Verdichtung und Durchführung der Messwalzung. Witterungsverhältnisse oder weitere Verdichtung durch etwaigen Baustellenverkehr können die FDVK-Messwerte beeinflussen. Dies gilt selbstverständlich nur für den Fall, dass die Messung nicht arbeitsintegriert passiert (Hinweis: Kapitel 2.4.2.4).

Messtiefe:

Beim Umgang mit FDVK-Systemen muss unbedingt zwischen der Verdichtungstiefe (Walze als Verdichtungsgerät) und der Messtiefe (Walze als Messgerät) klar unterschieden werden. Die durch die Verdichtung erzielbare Tiefenwirkung kann in Abhängigkeit von der eingesetzten Walze und den eingestellten Parametern bis zu 1,5 m betragen, während die Messwirkung deutlich tiefer, bis in eine Tiefe von etwa 2,5 m reichen kann. Die Messtiefe hängt dabei von der Amplitude, der Frequenz, der statischen Linienlast und der Bodenart ab.
Liegen Schichtgrenzen, Schwachstellen oder Inhomogenitäten innerhalb der Messtiefe, so können diese wesentlichen Einfluss auf die FDVK-Messwerte haben und eben jene verfälschen. Die Werte beziehen sich dann nicht mehr

nur auf die oberste Schüttgutlage, sondern lassen auch die Eigenschaften der darunter liegenden Bodenschichten in die Auswertung mit einfließen. An dieser Stelle ist bei der Interpretation der Messwerte besondere Sorgfalt geboten.

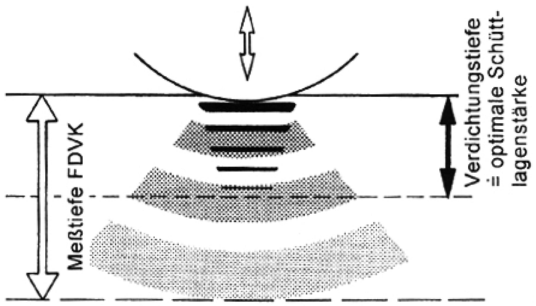


Abbildung 3.2: Messtiefe vs. Verdichtungstiefe [24].

3.5 Kalibrierung von FDVK-Messwerten

3.5.1 Allgemeines

Der dynamische Messwert aus der FDVK stellt für sich keine spezifische Bodenkenngröße dar, sondern einen Relativwert, der in einem bestimmten Zusammenhang mit den üblichen Kenngrößen der Bodentragfähigkeit steht.
Bei der Kalibrierung wird zwischen den von der Walze gemessenen dynamischen Messgrößen und den zur Abnahme in Bauverträgen, Normen und Richtlinien geforderten Tragfähigkeits- und Verdichtungskennwerten aus konventionellen Prüfmethoden (zB. Verformungsmoduln E_{v1}, E_{v2}, E_{vd}, Verdichtungsverhältnis $\frac{E_{v2}}{E_{v1}}$, Verdichtungsgrad D_{Pr}) ein eindeutiger Zusammenhang, eine Korrelation, hergestellt [24, 25]. Dadurch wird es erst möglich, mit Hilfe der FDVK eine Abnahmeprüfung durchführen zu können.

Grundsätzlich können dabei die dynamischen Messwerte allen Ergebnissen konventioneller Prüfungen hinsichtlich Verdichtung und Tragfähigkeit zugeordnet werden. Die bisherige Praxis, sowie Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass die Korrelationsbildung mit dem dynamischen Verformungsmodul E_{vd} des leichten Fallgewichtsgerätes (LFG) allen anderen möglichen Verfahren vorzuziehen ist, da die Korrelation hierbei wesentlich zuverlässiger ist, als zum Beispiel mit den Moduln E_{v1} und E_{v2} der statischen Lastplatte. Der Grund dafür scheint in der dynamischen Interaktion von FDVK und LFG mit dem Untergrund zu liegen. Auch die wesentlich raschere und

unaufwändigere Durchführbarkeit, im Gegensatz zum statischen Lastplattenversuch, sprechen für den dynamischen Grenzwert. Um den E_{vd} jedoch tatsächlich für die Korrelation verwenden zu können, müssen sich die vertraglichen Bedingungen ebenso auf diesen beziehen bzw. eine Verbindung zu selbigem herstellbar sein (mögliche Umrechnung von E_{v1}, E_{v2} zu E_{vd} nach der österreichischen RVS 08.03.04 [59]) [47].

Wird nun eine Kalibrierung durchgeführt, so hat diese lediglich unter den Voraussetzungen Gültigkeit, dass Walzenparameter (wie Walzentyp, Fahrgeschwindigkeit, Vibrationsfrequenz, Amplitude, etc...), Messsystem, Art der Versuchsdurchführung und im Wesentlichen auch die Bodenparameter bei der FDVK-Messung nicht verändert werden. Es erscheint somit unsinnig, in Bauverträgen beispielsweise, erforderliche Grenzwerte für dynamische Messwerte der Abnahme vorzugeben, da jede Boden-Walze Kombination zwar zu qualitativ ähnlichen Messwertverläufen führen kann, jedoch quantitativ ein anderes Messwertniveau liefert.

3.5.2 Ablauf der Kalibrierung

Die Kalibrierung ist ein wichtiges und zentrales Element in allen Normen, welche die FDVK betreffen und deshalb auch länderspezifisch genormt.
Für Österreich ist die Verfahrensweise im Rahmen einer Eignungsprüfung mit Hilfe eines Probefeldes, welches sinnvollerweise im Baulos und nicht irgendwo auf einer abseits gelegenen Fläche liegen sollte (nicht zuletzt um zusätzlichen Material und Arbeitsaufwand zu verhindern), in der Richtlinie für Straßenbau RVS 08.03.02 [58] geregelt. Vor der Schüttung des Probefeldes ist es notwendig, eine FDVK-Dokumentation auf dem Planum durchzuführen, um auffällige Unregelmäßigkeiten (Schwachstellen, Inhomogenitäten) im Untergrund lokalisieren zu können.
Die Kalibrierung an sich umfasst eine Probeverdichtung, sowie die anschließende, eigentliche Korrelationsbildung.

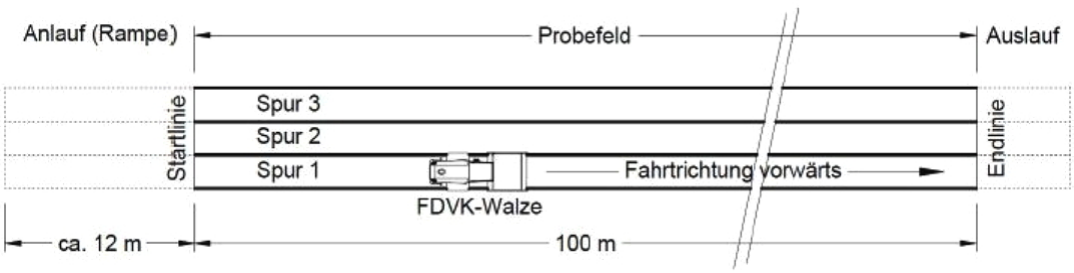


Abbildung 3.3: Probefeld für die Kalibrierung der FDVK-Messwerte nach RVS 08.03.02 [58].

Die Probeverdichtung verfolgt das Ziel, den optimalen Verdichtungserfolg mit minimalem Aufwand zu erreichen. Dabei darf sowohl die Schütthöhe als auch die Einstellung des Verdichtungsgerätes (Fahrgeschwindigkeit, Amplitude, etc..) variiert werden, lediglich die letzten zwei Verdichtungsfahrten müssen laut [58] mit konstanten Walzenparametern vorgenommen werden. Die Walzenparameter sind dabei so zu wählen, dass die Walze nicht in den Betriebszustand Springen wechselt und generell gut verdichtet wird. Ob die vorgeschriebene Bodensteifigkeit erreicht wurde, kann mit dem LFG bzw. der FDVK festgestellt werden.

Die Korrelationsbildung stellt den Zusammenhang zwischen den FDVK-Messwerten und den geforderten Lastplatten Kennwerten (E_{v1}, E_{v2}, E_{vd}) her.
Dabei wird das Probefeld solange mit der dynamisch angeregten Walze überfahren, bis sich keine (nennenswerte) Zunahme der Verdichtung mehr ergibt. Dabei sind Lage- und Tiefeneffekte zu berücksichtigen.
Für die Korrelationsbildung werden dann die Messwerte der jeweils letzten Fahrt auf den jeweiligen Spuren herangezogen. Anhand des aufgezeichneten FDVK-Messwertverlaufes wählt man dann steife, mittlere und weiche Stellen auf dem Prüffeld aus. Im Anschluss daran folgt eine Ermittlung des E_{v1} Wertes an mindestens 9 Stellen (je drei Versuche bei geringer, mittlerer und starker Verdichtung) durch die statische Lastplatte. Bei einer Messung mit der dynamischen Lastplatte (E_{vd}) erhöht sich die Anzahl der notwendigen Messungen auf 36, wobei anzumerken ist, dass die Arbeitszeit für einen Versuch wesentlich geringer ist, als bei der statischen Lastplatte.
Schlussendlich wird ein Diagramm angefertigt, in welches die gemessenen Verformungsmoduln aus den Lastplattenmessungen sowie die dynamischen Messwerte der Walze an der selben Stelle eingetragen werden. Nun legt man eine lineare Regressionsgerade (Ausgleichsgerade) zwischen die erhaltenen Punkte. Dabei darf der Korrelationskoeffizient r , welcher ein dimensionsloses Maß für den Grad des linearen Zusammenhangs zwischen 2 Merkmalen darstellt, den Wert 0,7 nicht unterschreiten. Aus diesem Kalibrierungsdiagramm lassen sich die Beziehungen für die 4 geforderten FDVK-Abnahmekriterien nach [58] festlegen. Der Mindestwert (MIN) ist bei 95% und der Mittelwert (MW) ist bei 105% - im Sprungbetrieb bei 100% - vom geforderten E_{v1}Wert festzulegen. Zudem sind die Werte bei $0,8 \cdot MIN$ (80% von MIN) und der Maximalwert MAX (150% von MIN) anzugeben. Die neue Richtlinie für den Strassenbau RVS 08.03.02 [58] legt nun erstmals auch Werte fest, ab wann die Verdichtung beendet werden kann. Dazu muss die Änderung des Messwertes der vorletzten gegenüber der letzten Fahrt $\Delta FDVK < 5\%$ und die Standardabweichung $\Delta SD_{FDVK} < 20\%$ sein.

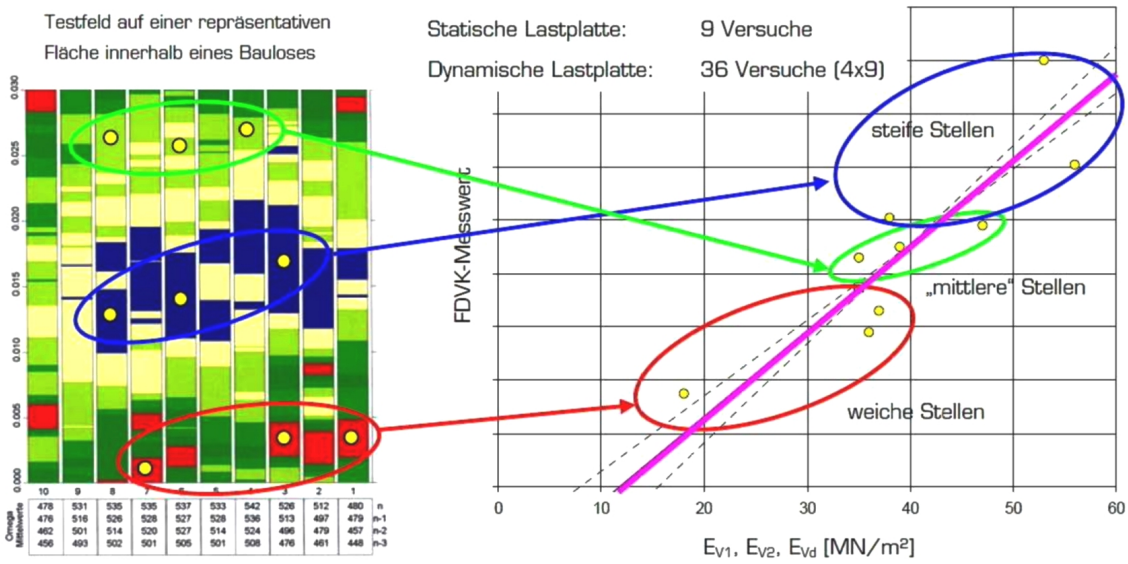


Abbildung 3.4: Kalibrierung der FDVK[2].

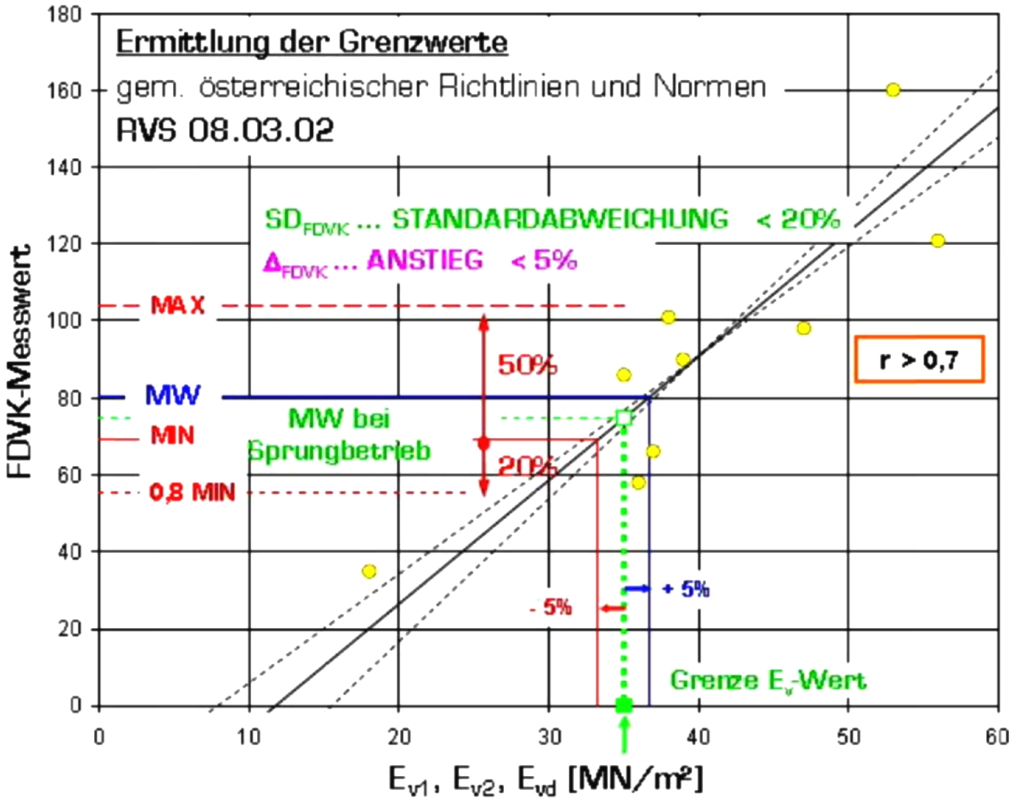


Abbildung 3.5: Ermittlung der Grenzwerte der FDVK gemäß RVS 08.03.02 [2].

Da die Vorgehensweise bei der Kalibrierung mit doch erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist, erscheint sie für kleine bis mittlere Bauvorhaben nicht immer rentabel oder sinnvoll. In [26] wurden für verschiedene Regelanwendungen Anforderungswerte für den FDVK-Messwert abgeleitet, die eine Abnahme ohne entsprechende Kalibrierung erlauben sollen.

Die FDVK kann auch gänzlich ohne vollständige Kalibrierung, als sogenannte "Prüfwalze", im Sinne einer Eigenüberwachung oder Verdichtungssteuerung zum Zwecke der wirtschaftlichen oder technischen Optimierung eingesetzt werden. Es können dabei beispielsweise Unterschiede in der Homogenität und Gleichmäßigkeit der Prüffläche festgestellt werden, oder unter Berücksichtigung der Anzahl der Walzenüberfahrten Änderungen des Messwertes beobachtet und dokumentiert werden. Bei Kleinbaustellen muss lediglich das Verdichtungszuwachskriterium erfüllt werden, welches besagt, dass so lange verdichtet werden muss, bis der Zuwachs des Mittelwertes der FDVK-Werte von einer Verdichtungsfahrt zur nächsten auf der selben Spur, geringer als 5% ist. Im Anschluss werden an den schwächsten Stellen meist Versuche mit der Lastplatte durchgeführt.
Neben diesen, sehr einfach anzuwendenden, Methoden besteht eine weitere Anwendungsmöglichkeit der FDVK ohne Kalibrierung in der Proof Rolling Methode. Dabei werden nach der Prüfüberfahrt einzelne Bereiche mit niedrigen dynamischen Messwerten durch traditionelle Verdichtungskontrollen geprüft.
Diese Anwendungsmöglichkeiten der FDVK, ohne jegliche Kalibrierung, können prinzipiell angewandt werden, sobald die zu prüfende Fläche befahrbar ist und reproduzierbare Messwertverläufe liefert. Es sind keine bodenspezifischen Anwendungsgrenzen einzuhalten.

3.5.3 Einflussgrößen auf die Korrelationsbildung

Wesentliche Einflussgrößen auf die Korrelation zwischen FDVK-Messwert und Vergleichswert stellen nachfolgend zusammengefasste Faktoren dar. Ihnen kann in Hinblick auf eine erfolgreiche und zielführende Kalibrierung entscheidender Charakter beigemessen werden [24, 35, 1, 47, 58].

- Art des Vergleichsversuches:

  Es ist zu berücksichtigen, dass sich die in Frage kommenden Vergleichsversuche, in Form der traditionellen punktuellen Messprinzipien (dynamisch-statisch,

direkt-indirekt..usw.) in Hinblick auf Prinzip und Wirkungsweise bzw. Art der Durchführung stark unterscheiden.

- Auswahl der Vergleichspunkte:

  Die Auswahl der Vergleichsstellen kann nach augenscheinlichen Schwachstellen, nach einem Raster, über die Proof Rolling Methode oder über das FDVK-Protokoll erfolgen.

- Tiefenwirkung Walze und Vergleichsversuch: (siehe auch Kapitel 3.4)

  Die Messtiefe der FDVK mit bis zu 2,5 m (abhängig von Boden, Frequenz, Amplitude, statische Linienlast) ist deutlich größer als deren Verdichtungswirktiefe ca. 1,0 m. Als Faustformel für die Messtiefe beim statischen (dynamischen) Lastplattenversuch gilt hingegen etwa rund 1,5 (2,0) mal dem Plattendurchmesser $d = 30\,\text{cm}$. Die herkömmlichen punktuellen Prüfverfahren haben demnach eine wesentlich geringere Messtiefe als FDVK-Systeme, wodurch ein wesentlich kleineres Prüfvolumen erfasst wird. Dieser Umstand beeinflusst die Güte der korrelativen Beziehung deutlich und ist bei der Korrelationsbildung zu berücksichtigen.

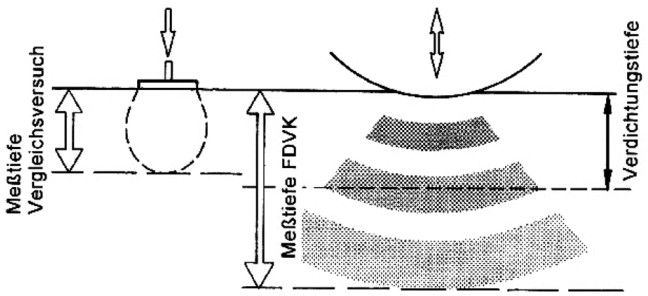


Abbildung 3.6: Messtiefe der FDVK im Vergleich zu konventionellen Versuchen [24].

- Bodenart: (siehe Kapitel 2.3.1)

  Bei bindigen Böden ist eine Kalibrierung aufgrund der geringen Steifigkeit und der ebenfalls geringen Variation der Messwerte (sowohl FDVK als auch Vergleichsversuche) wenig zielführend. Je steifer der Boden, desto größer ist die Aussicht auf eine erfolgreiche Kalibrierung.

- Wassergehalt: (siehe auch Kapitel 2.3.1.3)

  Bei der Kalibrierung sind, abhängig von der Bodenart, bezüglich des Wassergehaltes Grenzen zu setzen. Die folgenden Erkenntnisse wurden aus durchge-

führten Feld- und Laborversuchen gewonnen, sind jedoch nur für ein relativ konstantes Niveau der Trockendichte [27].

Bei grobkörnigen Böden kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass der Wassergehalt keinen entscheidenden Einfluss auf den FDVK-Messwert nimmt. Allerdings ist diese Abhängigkeit bei steigendem Feinkornanteil umso ausgeprägter.

Bei grobkörnigen Böden können bis zur vollen Wassersättigung (Sättigungsgrad $S_r = 100\%$) stets eindeutige Korrelationen zwischen dynamischem Messwert und Verformungsmodul bzw. Verdichtungsgrad gefunden werden.

Bei gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil < 15 Masseprozent wird abgeschätzt, bis zu einem Sättigungsgrad von 90% ($w = \text{ca. } 1,2 \cdot w_{opt}$) gute Korrelationen zu erhalten.

Bei gemischtkörnigen Böden mit einem Feinkornanteil > 15 Masseprozent, sowie bei feinkörnigen Böden, ist die Anwendung der kalibrierten FDVK bis zu einer Sättigung von 80% möglich ($w = \text{ca. } w_{opt}$).

Generell nimmt üblicherweise der FDVK-Messwert bei hohen Wassergehalten ab und verfälscht somit auch die Korrelationsbeziehung, was obige bodenspezifischen Anwendungsgrenzen notwendig macht.

- Walzenparameter: (siehe auch Kapitel 2.3.4)

  Aufgrund der Abhängigkeit der FDVK-Messwerte und der Korrelationsbildung von Maschinenparametern, sei hier nochmals erwähnt, dass unbedingt auf eine konstant bleibende Maschinenparametereinstellung (alleine schon wegen der Auswirkungen bei der Veränderung der Messtiefe) während der Messfahrt zu achten ist, damit die Messwerte ihre Aussagekraft und die Kalibrierung ihre Gültigkeit behalten.

- Betriebszustände der Bandage (siehe Kapitel 2.5)

- Oberfläche, Witterung, Schüttalter (Liegezeit),
  sowie die Verdichtung durch den Baustellenverkehr stellen ebenfalls Einflussfaktoren, im Hinblick auf eine zielführende Kalibrierung, dar.

Anhand dieser Auflistung ist augenscheinlich klar, dass die Ergebnisse der Kalibrierung, abhängig von der Kombination obiger Einflussfaktoren, durchaus beträchtlich streuen können und allgemeingültige Zusammenhänge die Ausnahme darstellen.

3.6 Messsysteme der FDVK

3.6.1 Allgemeines

Die Anfänge der Entwicklung von FDVK-Messtechniken im Zusammenhang mit vibrierenden Verdichtungswalzen sind im Jahre 1974 zu finden, als *Dr. Heinz Thurner* von der "Swedish Highway Administration" Feldstudien mit einer 5 Tonnen schweren *Dynapac* Vibrationswalze, gezogen von einem Traktor und ausgerüstet mit einem Beschleunigungsaufnehmer, durchführte.
Bei diesen Tests zeigte sich, dass das Verhältnis zwischen der Amplitude der ersten Oberschwingung und der Amplitude der Anregungsfrequenz des aufgezeichneten Beschleunigungssignals im Frequenzbereich im Zusammenhang mit der Steifigkeit des Bodens, gemessen mit dem statischen Lastplattendruckversuch, steht und einen Indikator für den Verdichtungszustand des Bodens darstellt.

Im Jahr 1975, gründete dann der aus Österreich stammende *Dr. Heinz Thurner* mit seinem Partner *Dr. Åke Sandstroem* die Firma *Geodynamik AB* in Schweden, um die Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet weiter voranzutreiben. So wurde, in Zusammenarbeit mit *Dr. Lars Forssblad* von *Dynapac*, das Compactometer mit dem *CMV*-Wert (Compaction Meter Value) entwickelt und 1978 eingeführt. Die neue Methode wurde auf der ersten Internationalen Konferenz für Verdichtung, abgehalten im Jahre 1980 in Paris (Frankreich), der Fachwelt präsentiert [65, 32, 68]. Ausgehend davon sind im Laufe der Jahre diverse firmenspezifische Messsysteme entstanden, sodass heutzutage fast jeder renommierte Walzenhersteller über ein eigenes FDVK-Messsystem verfügt.

Der deutsch-amerikanische *Bomag* Konzern führte 1982 das Terrameter Messsystem mit dem zugehörigen *OMEGA*-Wert ein, welches zu diesem Zeitpunkt die einzige Alternative zum *Compactometer* System darstellte [42, 49]. In den späten 1990er-Jahren wurde dann der dimensionslose *OMEGA*-Wert vom dynamischen Vibrationsmodul *Evib* [MN/m^2] abgelöst.

Die Schweizer Firma *Ammann* zog im Jahr 1999, mit der Einführung des ACE (Ammann Compaction Expert) mit zugehörigem Bodensteifigkeitsparameter *kb* [MN/m] nach. Die eben erwähnten Messwerte von *Ammann* und *Bomag*, liefern im Gegensatz zu den dimensionslosen Messwerten der übrigen Hersteller, eine physikalisch interpretierbare Messgröße.

Im Jahr 2004 führte *Sakai* den *CCV*-Wert (Compaction Control Value) ein, der auch einen dimensionslosen Parameter ähnlich dem *CMV*-Wert darstellt, allerdings neben Grundfrequenz und erster Harmonischer auch vielfache Harmonische und Subharmonische zur Bestimmung des Messwertes heranzieht.
Caterpillar (*CMVc*), *Dynapac* (*CMVd*, *MDP)*, *Hamm (HMV)* und *Volvo (CMVv)* bedienen sich alle des Compactometer Systems und verwenden im Wesentlichen den *CMV*-Wert.

Der grundsätzliche Aufbau, sowie die Komponenten (siehe Kapitel 3.2) aus denen sich das Messsystem zusammensetzt, sind bei allen am Markt befindlichen Systemen gleich. Das Prinzip, nach dem das Bandagenbeschleunigungssignal der Vibrationsbandage erfasst und einer entsprechenden elektronischen Auswertung zugeführt wird, ist dabei ebenfalls ident.
Der primäre Unterschied zwischen den einzelnen Messsystemen liegt im komplett unterschiedlichen Zugang und dem Verfahren zur Messwertbildung. Damit sind in erster Linie die Berechnung von bzw. die Verarbeitungsalgorithmen zu Messwerten gemeint.
So wird zum Beispiel der Messwert beim *Bomag* Terrametersystem über eine Bilanzierung der in den Boden eingetragenen Verdichtungsenergie berechnet. Beim Compactometer wird das Beschleunigungssignals im Frequenzbereich analysiert, während das ACE-System der Firma *Ammann* auf Basis eines analytischen, nichtlinearen Maschine-Boden Systems die Bodensteifigkeit k_b errechnet.

Die im Wesentlichen heutzutage zur Verfügung stehenden drei verschiedenen FDVK-Messsysteme (Compactometer, Terrameter, ACE) bzw. die zugehörigen vier Messwerte (*CMV*, *OMEGA*, *Evib* und k_b), werden im Folgenden hinsichtlich Aufbau, Prinzip, Wirkungsweise und Messwertbildung näher beschrieben.
Abbildung 3.7 soll einen zusammenfassenden Überblick über die verfügbaren Messsysteme, deren Messwerte und Hersteller liefern.

Walzen-hersteller	FDVK-Messsystem	FDVK-Messwert	FDVK Messwert abgeleitet aus:
Dynapac Caterpillar Hamm Volvo	Compacto-meter (Geodynamik, Schweden)	***CMV (RMV)*** **[-]** Compaction Measurement Value	dem Verhältnis von Vertikalbeschleunigungs-amplitude bei der ersten Harmonischen zur Grundanregungsfrequenz; im Frequenzbereich
Sakai	im Wesentl. Compacto-meter	***CCV*** **[-]** Compaction Control Value	der Beziehung von multiplen Vertikalbeschleu-nigungsamplituden bei Grundfrequenz, ihrer vielfachen Harmonischen und Subharmonischen; im Frequenzbereich
Ammann	ACE	k_b **[MN/m]** Boden-steifigkeit	dem Zusammenhang zwischen vertikalem Bandagenschwingweg und Bodenkontaktkraft; im Zeitbereich
Bomag	Terrameter	***OMEGA*** **[-]** effektiv in den Boden einge-tragene Energie	dem Zusammenhang zwischen vertikalem Schwingweg der Bandage und der Bodenkontaktkraft über 2 Erregerzyklen; im Zeitbereich
		E_{vib} **[MN/m²]** dynamischer Vibrations-modul	der Neigung des Zusammenhangs zwischen vertikalem Bandagenschwingweg und Boden-kontaktkraft während der Belastungsphase; im Zeitbereich

Abbildung 3.7: Übersicht über etablierte FDVK-Systeme, zugehörige Messwerte und deren Definitionen, sowie Hersteller.

3.6.2 Compactometer

Das Compactometer war das erste Verdichtungsmesssystem, welches auf den Markt kam und auch heutzutage noch breite Anwendung findet [61, 34, 63, 33, 64, 65]. Es wurde im Jahre 1978 von der schwedischen Firma *Geodynamik AB* (Stockholm, Schweden) in Zusammenarbeit mit dem schwedischen Walzenhersteller *Dynapac AB* vorgestellt und patentiert.
Grundsätzlich ist zu bemerken, dass *Geodynamik AB*, im Unterschied zu etwa *Bomag* und *Ammann*, selbst keine Walzen produziert, sondern als reiner Messsystemhersteller auf die Nachrüstung neuer oder in Betrieb stehender Walzen konzentriert ist. Das System kann deshalb auf jeder Vibrationswalze montiert und eingesetzt werden.
Das Compactometer basiert auf der Analyse des, in vertikaler Richtung gemessenen, Amplitudenfrequenzganges des Bandagenbeschleunigungssignals an der Lagerschale (ungedämpfter Teil) der Bandage. Die daraus resultierenden Messwerte, ergeben sich

dabei aus den Verhältnissen der Amplitude von Grundfrequenzen zu deren Ober bzw. Unterfrequenzen des Beschleunigungssignals, multipliziert mit einem im Allgemeinen willkürlich wählbaren Faktor. Dieses Konzept stammt aus der Klanglehre der Musik, wo Obertöne verantwortlich für die Klangfarbe sind.
Derzeit nutzen die Walzenhersteller *Dynapac*, *Hamm*, *Volvo*, *Caterpillar* und auch *Sakai* die grundsätzliche Idee des *CMV*-Messwertes (vgl. Abbildung 3.7) .

3.6.2.1 Aufbau

- Verdichtungsmesssystem ALFA-022R [34]

  Das Compactometer Verdichtungsmesssystem ALFA-022R besteht aus einem A-Sensor, der das Beschleunigungssignal misst, einer Prozessoreinheit, welche die Signale verarbeitet und daraus die Verdichtungsmesswerte *CMV* und *RMV* errechnet, aus Anzeigeinstrumenten, wie Analoguhren zur Anzeige der Messwerte und der Erregerfrequenz und der entsprechenden Verkabelung.
  Das walzenintegrierte Verdichtungsmesssystem kann selbstverständlich auch ohne Dokumentationssystem verwendet werden, was aber lediglich die Anzeige der Messwerte erlaubt.

- Dokumentationssystem CDS-012-J [35]

  Das Compactometer Dokumentations System CDS-012-J setzt sich aus der Displayeinheit, einem Mikroprozessor der die Erfassung, Speicherung und Präsentation der Messwerte steuert, einem I-Sensor für Längen- und Geschwindigkeitsmessung, dem Start-Stopp Schalter, sowie der notwendigen Verkabelung zusammen. Für die spätere Aufbereitung, Verwaltung, Dokumentation und Darstellung der Messwerte auf dem PC, sind die Softwareprogramme CdsView, CdsCom, CdsComXl und CdsMap verfügbar.

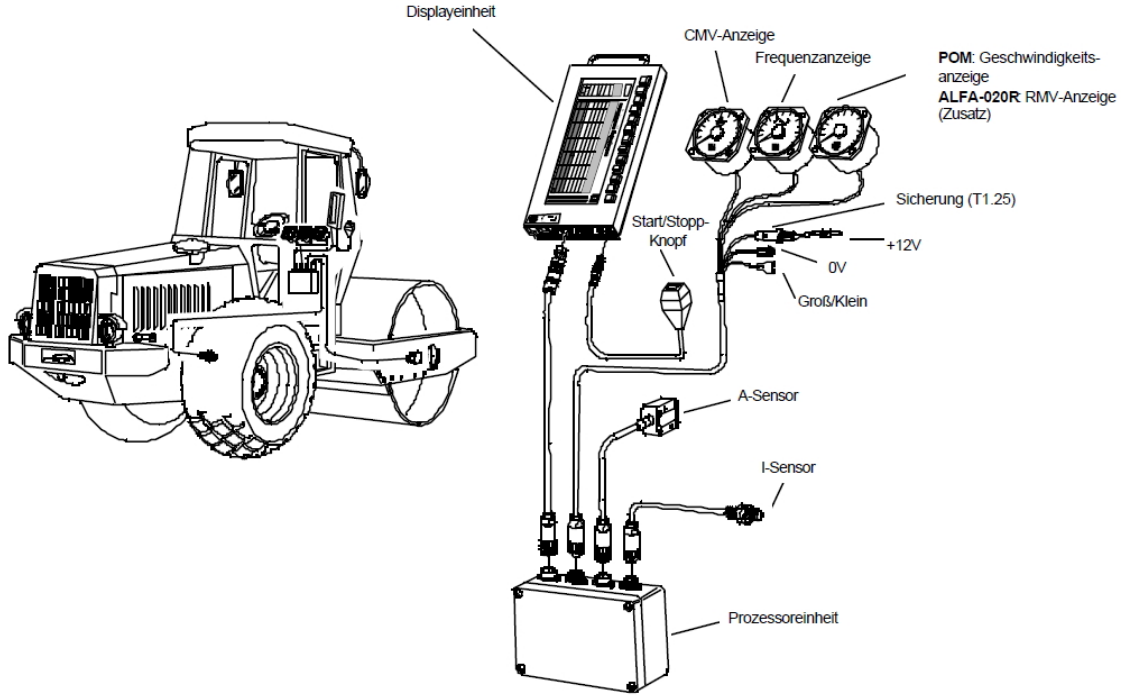


Abbildung 3.8: Verdichtungsmess- und Dokumentationssystem der schwedischen Firma *Geodynamik AB*, Stockholm [34].

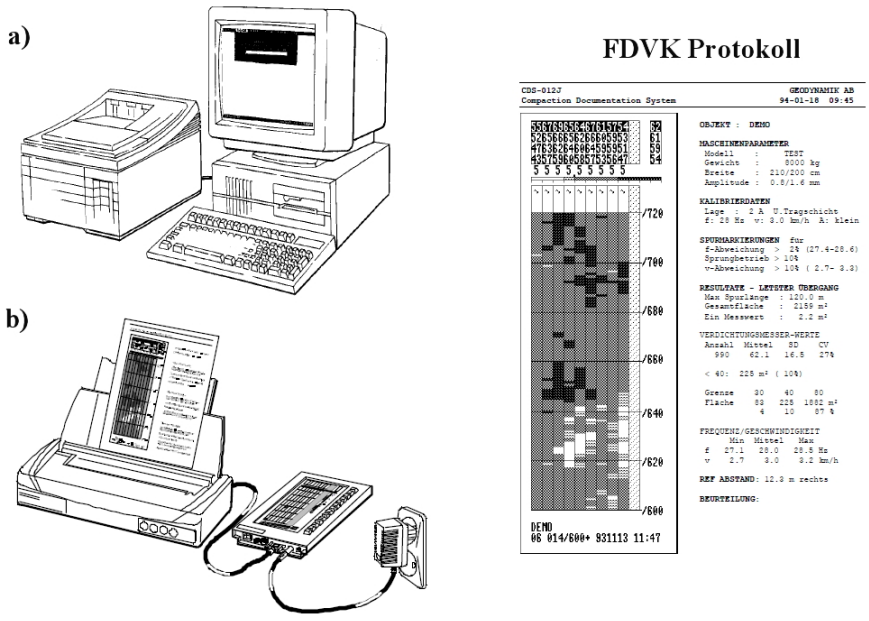


Abbildung 3.9: Möglichkeiten des Ausdrucks des FDVK-Protokolls a) über PC mit Software oder b) direkt über das CDS [35, adaptiert].

3.6.2.2 Prinzip und Wirkungsweise

Das Messprinzip des Compactometers besteht darin, die vertikale Bewegungskomponente der Bandage permanent über den A-Sensor des Compactometers abzugreifen, wo die Bandagenbewegung in elektrische Signale umgewandelt wird.

Nach Verstärkung und Filterung des Beschleunigungssignals wird selbiges einer Fourier Analyse unterzogen, um die Transformation des Signals vom Zeit- in den Frequenzbereich zu bewerkstelligen. Auf diese Weise wird das Signal in sein gesamtes Frequenzspektrum, mit sämtlichen Harmonischen und Subharmonischen der Grundschwingung, zerlegt. Erledigt wird diese Aufgabe von einem Prozessor, welcher sich üblicherweise in der Fahrerkabine befindet. Der zur Positionsbestimmung notwendige I-Sensor (Geschwindigkeitssensor) ist zweckmäßigerweise an der Hinterachse der Walze montiert, er registriert die Bewegung der Antriebsräder. Dadurch können die Messwerte, der jeweiligen Lage in der Walzspur zugeordnet werden. Heutzutage übernimmt diese Aufgabe allerdings meist ein installiertes GPS-System.

Aufgrund der steigenden Steifigkeit des Untergrundes, mit Fortdauer des Verdichtungsprozesses, wird das Beschleunigungssignal zunehmends verzerrt. Es besteht dann nicht mehr nur aus einer harmonischen, periodischen Sinusschwingung, wie es beim Hochheben der Walzenbandage (freier Schwinger - kein Bodenkontakt) der Fall wäre, sondern enthält auch Schwingungen mit Frequenzen, die (meist) ein ganzzahliges Vielfaches der Grundfrequenz (sogenannte Oberschwingungen) darstellen. Die Amplituden dieser Oberschwingungen wachsen mit zunehmender Bodensteifigkeit an. Bei Sprungbetrieb treten auch Spektralanteile bei der halben Erregerfrequenz auf. Wie Untersuchungen von *Thurner* und *Sandstroem* [64, 65] gezeigt haben, lassen sich aus den Amplitudenverhältnissen von bestimmten Frequenzen, die Messwerte *CMV* und *RMV* errechnen.

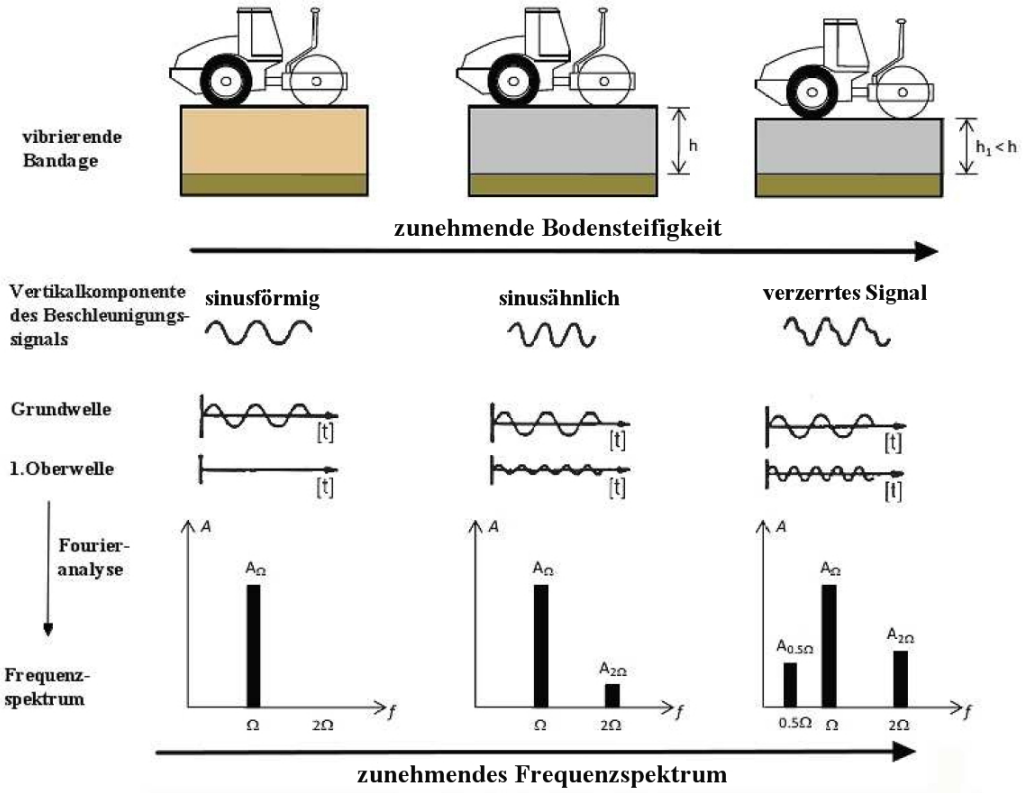


Abbildung 3.10: Prinzip des Compactometers.

3.6.2.3 Messwerte

Der dynamische Compactometer-Wert wird als CMV (Compaction Meter Value) bezeichnet, und ist folgendermaßen definiert:

$$CMV = Faktor_1 \cdot \frac{a\,(2 \cdot \omega_0)}{a\,(\omega_0)} \tag{3.1}$$

Der CMV-Wert ist proportional zur Amplitude des vertikalen Beschleunigungssignals der Bandage bei der ersten Oberschwingung (doppelte Unwuchtkreisfrequenz), bezogen auf die Amplitude bei Erregerkreisfrequenz und multipliziert mit einem $Faktor_1$, der generell mit 300 festgelegt wird.
Bei genauerer Betrachtung von Gleichung 3.1 erkennt man, dass der dynamische Messwert bei einem vollkommen linearen Boden-Walze System gleich 0 wäre, da eine Anregungsfrequenz der Walze von 40 Hz bei vollkommener Linearität auch eine Beschleunigungsantwort der Bandage von 40 Hz zur Folge hätte. Er kann somit auch als Maß für die Nichtlinearität des Systems aufgefasst werden.

Der *CMV*-Wert stellt, ebenso wie der *OMEGA*-Wert des *Bomag* Terrameters, einen dimensionslosen Relativwert dar. Relativwert bedeutet in diesem Fall, dass der Wert von verschiedenen Walzenparametern abhängig ist, die sofern sie konstant gehalten werden, eine Beurteilung des Verdichtungszustandes der Unterlage durch den CMV erlauben.

Die zweite Messgröße des Compactometers, wird als *RMV* (Resonance Meter Value) bezeichnet, und zusätzlich zum *CMV*-Wert errechnet. Er zeigt an, ob die Walze im Sprungbetrieb verdichtet oder im Begriff ist, sich diesem Zustand zu nähern. Dies ist wichtig, da sich der *CMV*-Messwert beim Wechsel des Betriebszustandes vom Abheben zum Springen signifikant ändert (absinkt) [24]. An dieser Stelle sei angemerkt, dass es sich bei der Betitelung des Messwertes *RMV* um einen irreführenden Begriff handelt. Es besteht nämlich, wie der Name fälschlicherweise vermuten lassen würde, keinerlei Beziehung zum physikalischen Phänomen der Resonanz.

$$RMV = Faktor_2 \cdot \frac{a\,(0,5 \cdot \omega_0)}{a\,(\omega_0)} \tag{3.2}$$

Der *RMV*-Wert ist proportional zur Amplitude bei der halben Erregerkreisfrequenz, bezogen auf die Amplitude bei Erregerkreisfrequenz und multipliziert mit einem $Faktor_2$, der generell mit 100 festgelegt wird.
Da sich beim Übergang zum Sprungbetrieb die Periode des Beschleunigungssignals verdoppelt, ist Sprungbetrieb im Frequenzbereich an der Existenz eines Wertes ungleich Null bei der halben Erregerfrequenz zu erkennen.

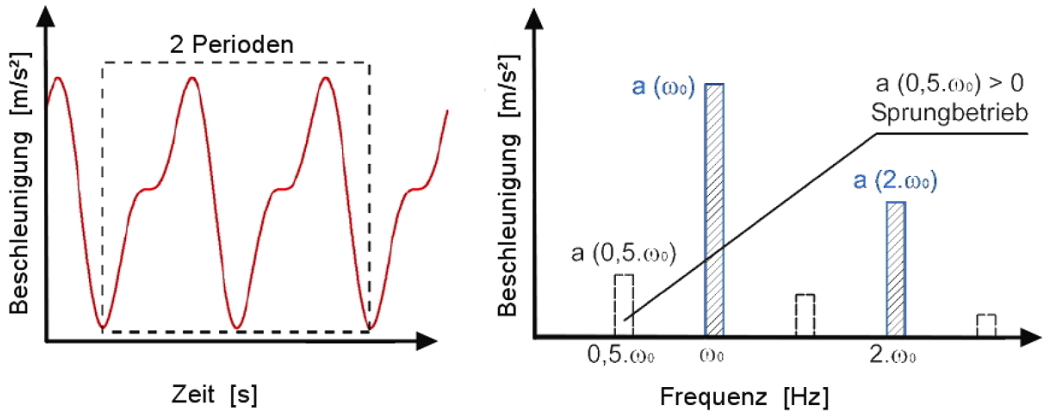


Abbildung 3.11: Methode zur Ermittlung des *CMV*-Wertes: 2 Zyklen des vertikalen Bandagenbeschleunigungssignals (Amplitude) im Zeitbereich werden einer Spektralanalyse im Frequenzbereich unterzogen [7, adaptiert].

3.6.3 Terrameter

Nachdem der deutsch-amerikanische *Bomag* Konzern 1982 die erste Version des Verdichtungsmesssystems BTM (Bomag Terrameter Managementsystem) mit dem dimensionslosen *OMEGA*-Messwert einführte, folgte im Jahre 1995 das Dokumentationssystem BCM (Bomag Compaction Managementsystem). Seit 1999 beruht die *Bomag* Messtechnik nun auf dem E_{vib}-Wert [MN/m^2].

In Kapitel 3.6.3.3 wird sowohl auf den älteren *OMEGA*, als auch auf die Ermittlung des jetzigen E_{vib}-Wertes eingegangen.

3.6.3.1 Aufbau

- Verdichtungsmesssystem BEM:

  Das Bomag E_{vib}-Meter (BEM) besteht aus zwei Beschleunigungsaufnehmern, einem Distanzmesser, der Elektronikeinheit und einem in der Fahrarmatur befindlichen Rundinstrument, der E_{vib}-Analoganzeige, welche kontinuierlich die dynamische Bodensteifigkeit als Vibrationsmodul anzeigt. Das BEM kann durch das Terrameter und/oder das BCM05 ergänzt werden.

- Verdichtungsmesssystem BTMplus/BTMprof:

  Das Bomag Terrameter Management BTMplus bzw. BTMprof besteht aus zwei Beschleunigungsaufnehmern, dem Wegmesser, der Elektronikeinheit, sowie der Bedien- und Anzeigeeinheit BOP (Bomag Operation Panel), die den E_{vib}-Wert, die Arbeitsgeschwindigkeit, Frequenz und Amplitude kontinuierlich anzeigt. Das BTMprof ist dabei zusätzlich noch mit einem Drucker zur Dokumentation der Messwerte als Linien- oder Balkendiagramm ausgerüstet. So können unmittelbar auf der Baustelle, für Bahnen bis zu 150 m Länge, Ausdrucke erstellt werden, welche die aufgezeichneten Messwerte als Linienschrieb und die Betriebsparameter des Verdichtungsgerätes dokumentieren. Beide Terrameter-Systeme können zusätzlich durch das BCM05 ergänzt werden.

- Dokumentationssystem BCM05:

  Das Bomag Compaction Management BCM05 bietet ein Messdatenmanagement und umfangreiche Dokumentations- und Auswertungsmöglichkeiten.

  Die vom Messsystem ermittelten E_{vib}-Werte werden auf dem Tablet-PC im Hinblick auf unterschiedlichste Anforderungen (Zunahme der Messwerte, farbliche Intervall-, Sollbereichs- und Schlechtflächendarstellungen) mit der BCM05

Mobil Software erfasst, grafisch visualisiert (entweder über die Messlänge als 2D-Darstellung oder als Farbflächendarstellung in der Draufsicht) und gespeichert.

Mit USB-Memorysticks ist die Datenübertragung auf einen stationären PC/Laptop möglich. Dort können die Daten bequem mit Hilfe der BCM05 Office Software analysiert, dokumentiert und verwaltet werden. Im Gegensatz zum Terrameter, bei dem die Dokumentation über einzelne Ausdrucke vor Ort erfolgt, bietet also BCM05 die Analyse der gesamten Baustelle bequem von einem stationären PC aus.

Grundsätzlich kann zwischen einer bahngebundenen und einer GPS-basierten Arbeitsweise der FDVK unterschieden werden.

Die Dokumentation ohne GPS erfolgt bahngebunden, in der Regel mit Bahnlängen von 100 m. Dazu werden die zu bearbeitenden Flächen in ein Walzbahnraster eingeteilt die Rastergröße, Positionierung im Feld durch XY-Koordinaten, sowie andere wichtige Daten zur Beschreibung der Verdichtungsarbeiten im Baubüro mit BCM05 Office vorbereitet und auf einem USB-Stick eingelesen.

Neben der bahnorientierten Dokumentation, mit der manuellen Positionierung im Baufeld, bietet das Dokumentationssystem mit dem Softwaremodul BCM05 Positioning Modul eine satellitengestützte Dokumentation (GPS) und Zuordnung der E_{vib}-Werte zu den jeweiligen Positionsdaten. Dadurch wird die Dokumentation noch präziser, anwenderfreundlicher und vor allem manipulationssicher, da keine Felder im Voraus definiert werden müssen und der Walzenfahrer keine Zuordnung seiner aktuellen Position zur jeweiligen Bahn vornehmen muss. Schließlich weiß die Walze ja, wo sie sich befindet (Abbildung 3.12). Voraussetzung für den Einsatz eines GPS-Systems, ist die Ausrüstung der Walze mit dem BCM05.

- BCM Net:

  Mit dem BCM Net, erstmals vorgestellt auf der internationalen Baumaschinenmesse 2013 in München (BAUMA), können die individuellen Messdaten und die Positionen der am Verdichtungsprozess beteiligten Walzen, allen Verbundteilnehmern in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden. Dadurch wird die gesamte Baustelle vernetzt und jeder Walzenfahrer ist über seine und die von den anderen Teilnehmern geleistete Verdichtungsarbeit informiert.

Abbildung 3.12: Darstellung der FDVK-Messwerte am Beispiel der BOMAG-Messtechnik; a) bahngebundene, b) GPS-basierte Vorgangsweise; jeweils links: Darstellung der Baustelle, in der Mitte: die Ansicht auf dem Messmonitor in der Walze und rechts: Dokumentation der Messdaten am PC.

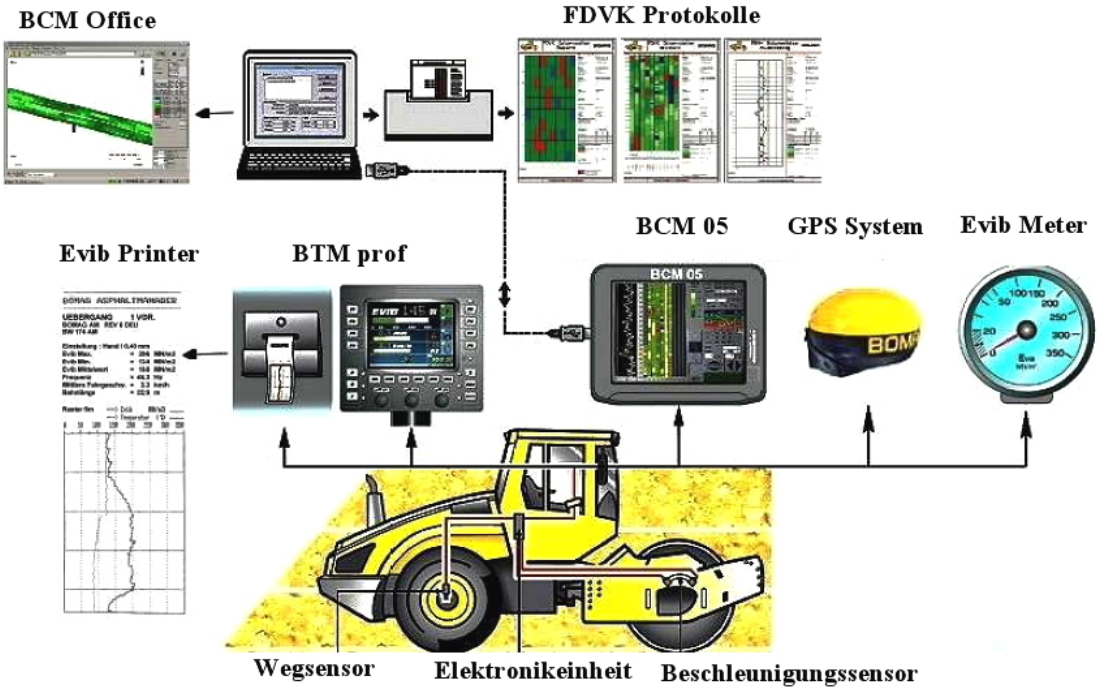


Abbildung 3.13: Übersicht über die Verdichtungsmess- und Dokumentationstechnik der Firma BOMAG [22, adaptiert].

3.6.3.2 Prinzip und Wirkungsweise

Bomag Verdichtungsmesssysteme analysieren ebenfalls die Wechselwirkung zwischen der Beschleunigung der vibrierenden Bandage (gemessen an der Lagerschale) und der dynamischen Steifigkeit des Bodens, jedoch nicht im Frequenz- (vgl. Kapitel 3.6.2.2) sondern im Zeitbereich [50, 49].
Zudem berücksichtigt das Compactometer System zur Verdichtungsmesswertermittlung lediglich die Vertikalkomponente des Beschleunigungssignals, das Terrameter hingegen die Daten von zwei, aufeinander orthogonal stehenden Aufnehmern.

Der vibrierende Walzenkörper gibt bei jeder Umdrehung, der in der Bandage befindlichen Unwucht (besteht aus Be- und Entlastungsphase), Bewegungsenergie an die Bodenunterlage ab. Dabei absorbiert (dissipiert) der Boden, in Abhängigkeit des Verdichtungsgrades, diese von der Bandage abgegebene Energie unterschiedlich stark. Bereits gut verdichtete Böden weisen naturgemäß eine höhere Steifigkeit und eine geringere Dämpfung, bzw. eine höhere Rückbeschleunigung, im Vergleich zu lockeren Böden auf.
Diese Effekte können am Arbeits- bzw. Indikatordiagramm, in Form eines Kraft-Weg Diagramms veranschaulicht werden, indem man auf der vertikalen *y-Achse* (Ordinate) die Bodenkontaktkraft F_b und auf der horizontalen *x-Achse* (Abszisse) den Schwingweg z aufträgt. Die Dämpfung kann dabei als die, von der Hysterese (Be- und Entlastungspfad pro Unwuchtumdrehung) beschriebene, Fläche veranschaulicht werden. Sie stellt die vom Boden "geschluckte" Verdichtungsenergie dar.

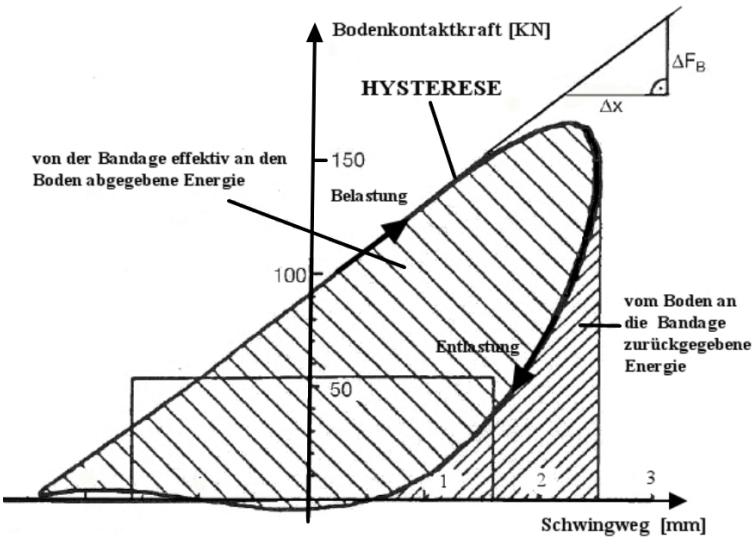


Abbildung 3.14: Indikatordiagramm als Kraft-Weg Diagramm [26, 49].

Die Vertikalbeschleunigung der schwingenden Bandage $\ddot{z}$ wird beim Terrameter, wie bereits erwähnt, von zwei, in einem Winkel von $\pm 45°$ zur Senkrechten stehenden Messwertaufnehmern, in zwei normal aufeinander stehenden Achsen gemessen, die sich genau in der Bandagenachse schneiden.
Integriert man die Bandagenbeschleunigung ein- bzw. zweimal, so erhält man die Schwinggeschwindigkeit $\dot{z}$ bzw. den Schwingweg z der vibrierenden Bandage.

Die Bodenkontaktkraft F_b zwischen Walzenbandage und Untergrund kann anhand folgender einfacher Modellbildung ermittelt werden:

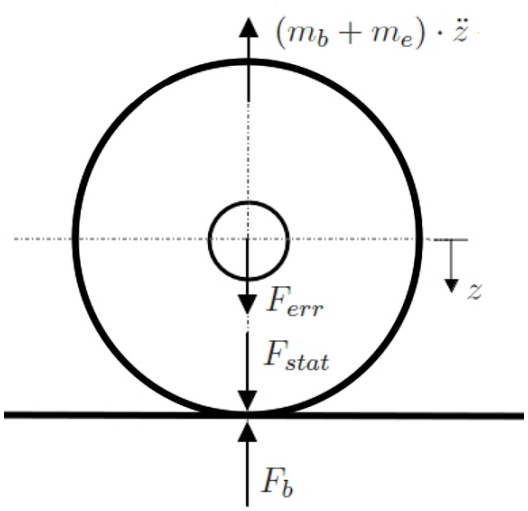


Abbildung 3.15: Vertikales Kräftegleichgewicht an der Bandage.

Unter Berücksichtigung der Bandagenmasse m_b, der Unwuchtmasse m_e, sowie der statischen Achslast F_{stat} und der Erregerkraft F_{err}, ergibt sich die resultierende Bodenkontaktkraft F_b aus dem vertikalen Kräftegleichgewicht zu:

$$F_b = -(m_b + m_e) \cdot \ddot{z} + F_{stat} + F_{err} \tag{3.3}$$

mit:

$$F_{stat} = (m_r + m_b + m_e) \cdot g \tag{3.4}$$

$$F_{err} = F_z \cdot \sin(\omega_{err} \cdot t + \varphi_0) \tag{3.5}$$

$$F_z = m_e \cdot e \cdot \omega^2{}_{err} \tag{3.6}$$

Darin sind:

F_b	Bodenkontaktkraft	[N]
F_{stat}	Statische Achslast	[N]
F_{err}	Erregerkraft	[N]
F_z	Zentrifugalkraft (Fliehkraft)	[N]
m_b	Bandagenmasse	[kg]
m_e	Erregermasse	[kg]
m_r	Rahmenmasse	[kg]
e	Erregerexzentrizität	[m]
g	Beschleunigung zufolge Schwerkraft	[m/s^2]
$\ddot{z}$	Vertikalbeschleunigung der Bandage	[m/s^2]
ω_{err}	Erregerkreisfrequenz mit $\omega = 2\pi f$	[rad/s]
φ_0	Phasenverschiebung	[rad]
f	Erregerfrequenz	[1/s]

Die Bodenkontaktkraft setzt sich also aus der Trägheitskraft, die sich aus der Vertikalbeschleunigung der Bandage multipliziert mit der Bandagenmasse und der Erregermasse ergibt, der statischen Achslast und der vertikalen Erregerkraft, die über die Erregerkreisfrequenz, Erregermasse, Exzenterabstand und Phasenlage definiert ist, zusammen.
Trägt man nun diese Bodenkontaktkraft über den Schwingweg der Bandage auf, so ergibt sich für jede Unwuchtumdrehung ein Arbeitsdiagramm, in Form einer Be- bzw. Entlastungskurve (siehe Abbildung 3.14 bzw. 3.17).

Die von dieser Kurve eingeschlossene Fläche entspricht der abgegebenen Verdichtungsenergie. Aus Kenntnis der Bodenreaktionskraft F_b und des Schwingweges z, kann also der elastische Anteil der effektiv von der Bandage in den Boden eingetragenen Energie W_{eff} bzw. die effektiv abgegebene Leistung P_{eff} , innerhalb des Zyklus mit einer Periode T ermittelt werden:

$$W_{eff} = \oint_z F_b \, dz = \oint_T F_b \cdot \dot{z} \, dt = \oint_T [-(m_b + m_e) \cdot \ddot{z} + F_{stat} + F_{err}] \cdot \dot{z} \, dt \tag{3.7}$$

$$P_{eff} = \frac{1}{T} \cdot W_{eff} \tag{3.8}$$

Die weitere Betrachtung im Hinblick auf den E_{vib}-Wert bezieht sich im wesentlichen jedoch nicht auf diese indizierte Fläche, sondern vielmehr auf die Steigung des Kraft-Weg Diagrammes während der Kompressions- bzw. Belastungsphase des Bodens.
Es erscheint plausibel, dass die Belastungskurve bei geringen Bodensteifigkeiten eher flach verläuft und bei Zunahme von Verdichtungsfahrten bzw. höheren Bodensteifigkeiten, der in den Untergrund eindringenden Bandage wesentlich mehr Widerstand entgegengesetzt wird.

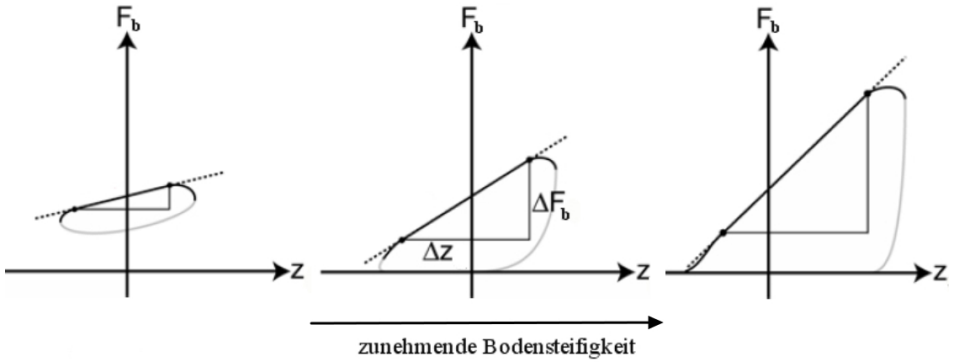


Abbildung 3.16: Zunehmende Bodensteifigkeiten führen zu steileren Belastungskurven im Kraft-Weg Diagramm [51, adaptiert].

3.6.3.3 Messwerte

Das, aus dem vertikalen Kräftegleichgewicht und dem vertikalen Schwingweg der Bandage resultierende Arbeitsdiagramm, stellt also die Grundlage zur Ermittlung der Messwerte *OMEGA* und E_{vib} dar.

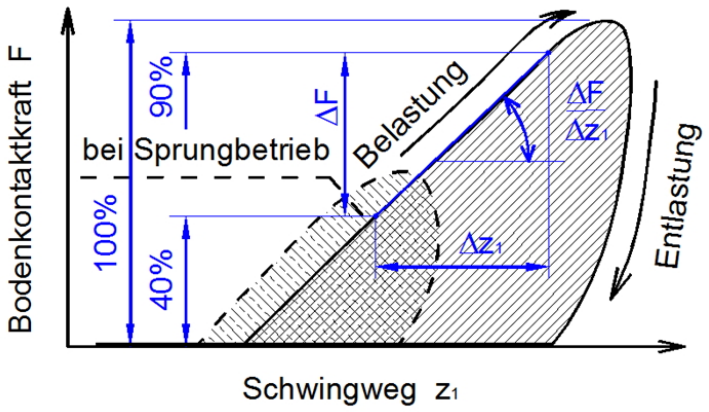


Abbildung 3.17: Arbeitsdiagramm der schwingenden Bandage für die Berechnung des *OMEGA*- und des E_{vib}-Wertes [48].

OMEGA

Der *OMEGA*-Wert ist die ursprüngliche Messgröße des ersten Terrameter-Systems. Wird die Fläche unter dem Arbeitsdiagramm (siehe schraffierte Fläche in Abbildung 3.17) über 2 Erregerperioden T ermittelt, so erhält man die in den Untergrund effektiv eingebrachte Verdichtungsenergie W_{eff} . Der FDVK-Messwert *OMEGA* ist nun proportional zum elastischen Anteil der effektiv in den Boden eingetragenen Energie W_{eff} und repräsentiert somit den von der Walze in den Boden abgegebenen Energiefluss. Er errechnet sich wie folgt [49, 1]:

$$OMEGA = Faktor_3 \cdot W_{eff} = Faktor_3 \cdot \oint_{2T} [-(m_b + m_e) \cdot \ddot{z} + F_{stat} + F_{err}] \cdot \dot{z}\, dt \quad (3.9)$$

Der Wert $Faktor_3$ in obiger Gleichung ist geräteabhängig und beschreibt eine beliebig gewählte Referenzenergie [1/Nm]. Er bringt den *OMEGA*-Wert somit auf eine dimensionslose Größe zwischen 0 und 1000. Allerdings findet er in der Auswertung keine Berücksichtigung, weshalb eine *OMEGA* proportionale Größe im Folgenden die Einheit [Nm pro 2-facher Unwuchtumdrehung] hat. Das Integral in obiger Gleichung wird über 2 Perioden gebildet, da sich im Sprungbetrieb der Energieeintrag von zwei aufeinanderfolgenden Perioden unterscheidet. Auf diese Weise wird der Einfluss des Sprungbetriebes auf den *OMEGA*-Messwert minimiert, ist jedoch weiterhin vorhanden und muss aus diesem Grund auch dokumentiert werden [24, 25, 49, 48].

Evib

Der dynamische Vibrationsmodul E_{vib} bezeichnet, ähnlich wie der dynamische Verformungsmodul E_{vd} des Lastplattenversuches, das Tragfähigkeitsverhalten des Bodens und beschreibt dabei eine physikalisch verifizierbare Messgröße, die anders als die zuvor bereits abgehandelten dimensionslosen dynamischen Messwerte (*CMV*, *OMEGA*) nicht nur zur qualitativen, sondern auch zur quantitativen Beurteilung des Verdichtungs- und Tragfähigkeitszustandes herangezogen werden kann [22]. Er drückt den Zusammenhang zwischen vertikaler Bodenkontaktkraft und vertikalem Schwingweg der Bandage aus. Da die Bodensteifigkeit mit zunehmender Verdichtungsarbeit naturgemäß zunimmt, stellt die Steigung der Arbeitslinie in der Belastungsphase, definiert als Sekante durch festgelegte Punkte $\frac{\Delta F}{\Delta z_1}$ in Abbildung 3.17, eine Kenngröße zur Beurteilung der Steifigkeit des Untergrundes dar. Sie wird als Bodensteifigkeit k_b bezeichnet und stellt die Grundlage zur Ermittlung des E_{vib}-Wertes [MN/m²] dar.

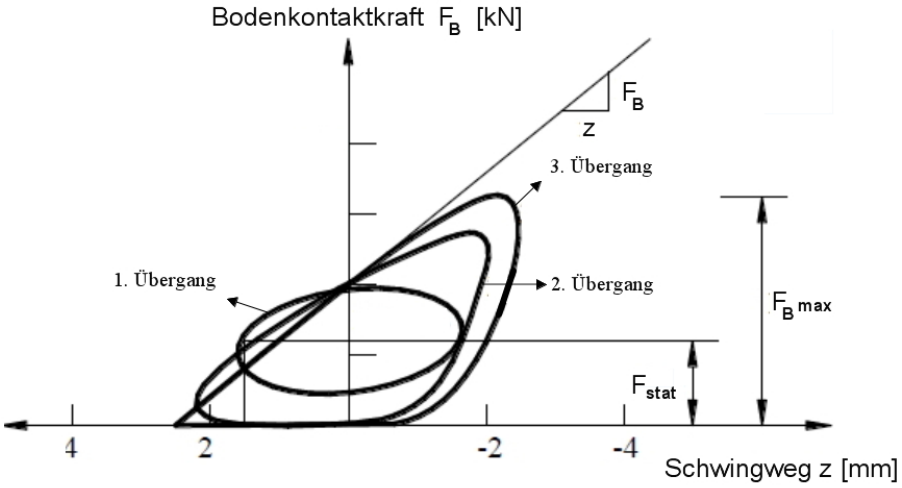


Abbildung 3.18: Mit zunehmender Verdichtung steigt auch der E_{vib}-Wert [42, 31, adaptiert].

Um nun einen Zusammenhang zwischen der Bodensteifigkeit k_b, die ja keinen unabhängigen Bodenparameter darstellt, da sie abhängig von der Masse bzw. Kraft, bezogen auf die Fläche ist, auf die sie wirkt, und dem E-Modul E herstellen zu können, bedient man sich der von *G. Lundberg* präsentierten theorethischen Lösung eines ruhenden, starren Zylinders auf einem homogenen, elastisch isotropen Halbraum [52]. Eben diese statische Lösung liefert die gewünschte Beziehung zwischen Querdehnzahl ν und E-Modul E des Halbraumes, Bodenkontaktkraft F_b, Zylinderverschiebung z, Bandagenlänge L und Bandagenradius R.

$$z = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot \pi} \cdot \frac{F_b}{L} \cdot \left(1,8864 + ln\,\frac{L}{b}\right) \tag{3.10}$$

Darin beschreibt b die Kontaktbreite des zylindrischen Walzenkörpers nach *H.Hertz* [39]. Sie lässt sich in Abhängigkeit von Geometrie, Kraft und Materialeingeschaften bestimmen.

$$b = \sqrt{\frac{16 \cdot R \cdot (1 - \nu^2)}{E \cdot \pi \cdot L} \cdot F_b} \tag{3.11}$$

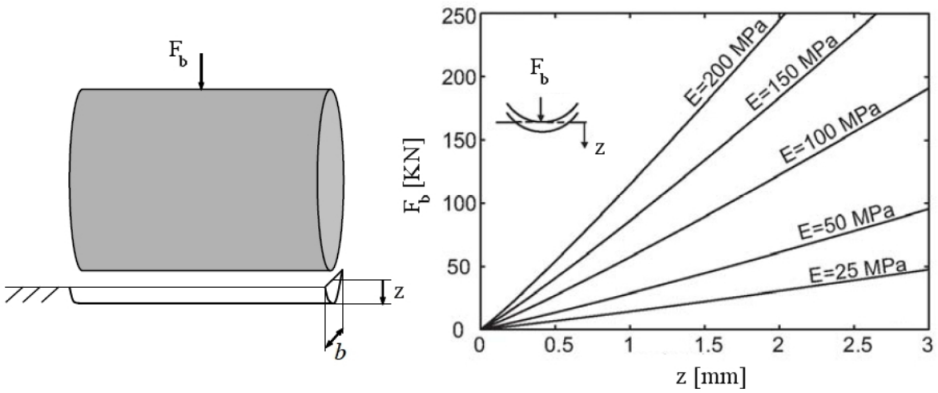


Abbildung 3.19: Zusammenhang zwischen Bodensteifigkeit und E-Modul basierend auf der Theorie des elastischen Halbraumes [7, adaptiert].

Die beiden Gleichungen 3.10 und 3.11, stellen das Fundament für nachstehende Formel zur rekursiven Berechnung von E_{vib}, wenn die Bodensteifigkeit k_b bekannt ist, dar.

$$\frac{\Delta F}{\Delta z_1} = \frac{E_{vib} \cdot 2 \cdot a \cdot \pi}{2 \cdot (1-\nu^2) \cdot \left\{ 2,14 + 0,5 \cdot ln \left[\frac{\pi \cdot (2 \cdot a)^3 \cdot E_{vib}}{(1-\nu^2) \cdot 16 \cdot (m_b + m_e + m_r) \cdot g \cdot \left(\frac{d}{2}\right)} \right] \right\}} \tag{3.12}$$

mit:

a	halbe Bandagenlänge L	[m]
ν	Querdehnzahl (bei $Bomag = 0{,}25$)	[-]
m_e	Erregermasse	[kg]
m_b	Bandagenmasse	[kg]
m_r	Rahmenmasse	[kg]
d	Bandagendurchmesser	[m]

Da sich der Boden, entgegen der durch die Verwendung obiger Formeln implizierter Annahme, natürlich nicht linear, elastisch und isotrop verhält, wird ähnlich wie beim dynamischen Lastplattenversuch, die Kenngröße nicht als E-Modul bezeichnet, sondern eben der Begriff des dynamischen Vibrationsmoduls E_{vib} eingeführt. Dieser FDVK-Messwert kann, da im Berechnungsansatz bereits sämtliche Geometriegrößen (Gleichung 3.10), sowie die spezifischen Massen der Walze (siehe Berechnung der

Bodenkontaktkraft in Gleichung 3.3) eingegangen sind, als nahezu unabhängig von der Verdichtungsmaschine angesehen werden.

3.6.4 ACE

Die *Ammann-Group Holding AG* mit Hauptsitz in Langenthal (Schweiz), ist ein Maschinenbauunternehmen, welches in den späten 1990er-Jahren ebenfalls ein spezifisches FDVK-System entwickelt hat, bei dem Vibrationswalzen ihre Erregerparameter (Amplitude, Frequenz) automatisch dem Verdichtungszustand des Bodens anpassen.

Die Bodenreaktionen werden dabei, analog zum Compactometer bzw. Terrameter, mit Hilfe von an der Bandage montierten Beschleunigungssensoren erfasst und verarbeitet. Die Elektronik berechnet aus den gemessenen Signalen die optimalen Maschinenparameter und die aktuelle Steifigkeit des Bodens, den k_b-Wert [MN/m], der den FDVK-Messwert als Maß für die erreichte Verdichtung darstellt. Der technische Vorteil der Verwendung einer Steifigkeit, im Gegensatz zum dynamischen Vibrationsmodul, ist das zu Grunde liegende physikalische Modell, welches eine Verifikation von Theorie und Praxis ermöglicht (siehe Abbildung 3.22). Ein weiterer Grund, weshalb beim ACE System eine Steifigkeit und nicht ein E-Modul berechnet wird, dürfte die nicht exakt bestimmbare Aufstandsfläche des Kontaktes zwischen Walzenrad und Untergrund sein (siehe Gleichung 3.10).

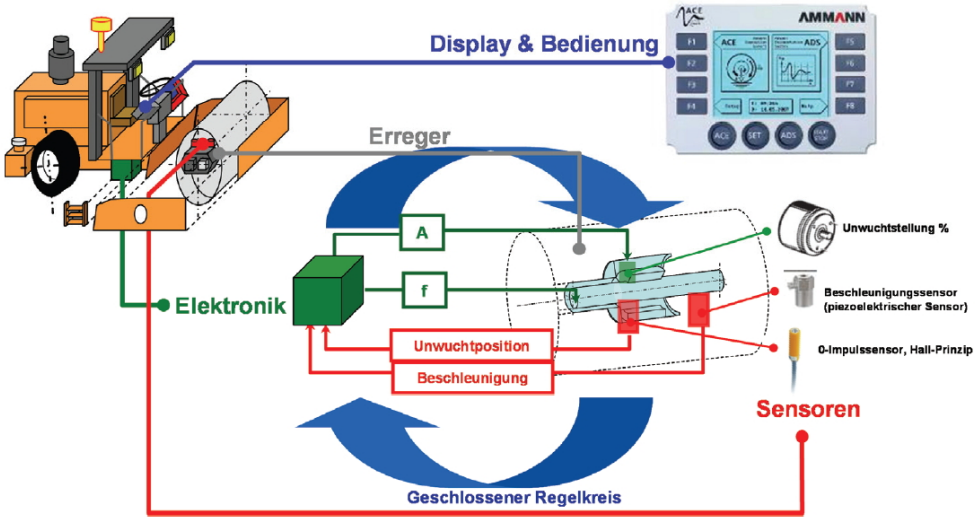


Abbildung 3.20: Funktionsweise Ammann Compaction Expert System - ACE [15].

3.6.4.1 Aufbau

- Verdichtungsmesssystem ACE:

  Der Ammann Compaction Expert (ACE) ist ein elektronisches Mess- und Regelsystem für Vibrationswalzen. Amplitude und Frequenz werden dabei automatisch und stufenlos der aktuellen Bodenbeschaffenheit angepasst.

- Dokumentationssystem ADS:

  Das Ammann Documentation System (ADS) arbeitet ähnlich wie die Messdatenerfassung von *Bomag*. Die gemessenen Daten werden während dem Arbeitsprozess kontinuierlich durch einen Speicher aufgezeichnet und können dann anschaulich und in Echtzeit auf dem Display grafisch dargestellt und bei Bedarf vor Ort ausgedruckt werden, was eine effiziente Analyse bzw. Interpretation der Verdichtungsleistung ermöglicht. Die Bedienung des Druckers erfolgt dabei menügeführt über das ACE-Bedienfeld eines Touch Screen PC in der Kabine der Walze. Die Druckausgaben beinhalten die Tragfähigkeit k_b [MN/m], Wegstrecke [m], Geschwindigkeit [km/h], sowie Datum, Uhrzeit und Anzahl der Walzüberfahrten auf der Spur.
  Für eine spätere genauere Dokumentation, Analyse oder Aufbereitung können die gespeicherten Daten mittels USB Memory Stick zwischen Maschine und PC transferiert werden, wo sie mit Hilfe der ADS-Analyse Software ausgewertet und protokolliert werden können.

- System ACEplus:

  Das System ACEplus ist seit dem Jahr 2000 verfügbar. Es handelt sich dabei um die Kombination des Ammann Compaction Expert mit einem GPS gestützten Dokumentationssystem. Das Satellitennavigationssystem ordnet den gemessenen Verdichtungswerten mit einer hohen Genauigkeit die Positionsdaten und die Zeit zu.

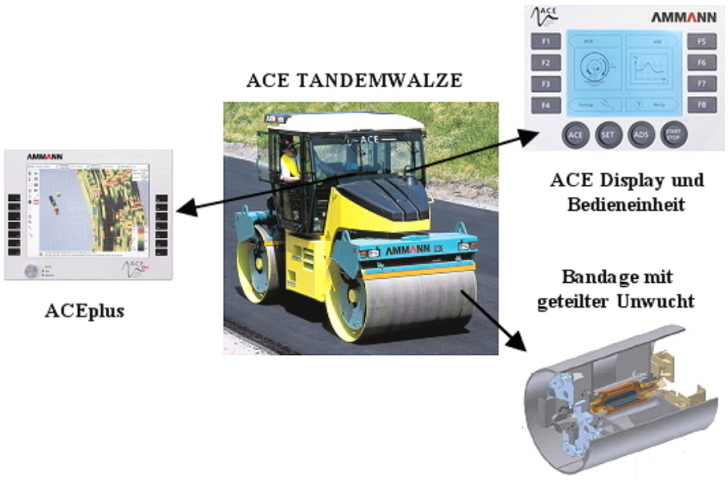


Abbildung 3.21: Komponenten des ACE-Systems [10, adaptiert].

3.6.4.2 Prinzip und Wirkungsweise

Die Effekte und Phänomene, die bei der Bodenverdichtung auftreten, sind komplex und mehrfach nichtlinear. Die Simulation der Vorgänge, die bei der dynamischen Bodenverdichtung auftreten, erweisen sich deshalb als hilfreich für das Verständnis der Vorgänge bei dynamischen Verdichtungsgeräten und nicht zuletzt für die Interpretation der FDVK-Messwerte.
Der Ansatz zur Entwicklung des Algorithmus für die Ermittlung der Bodensteifigkeit k_b basiert auf einem bereits erprobten, analytischen und schwingfähigen Maschinen-Boden-Interaktionsmodell [68, 1, 20]. Es handelt sich um einen Zweimassenschwinger mit 2 Freiheitsgraden. Diese Modellierung unterstellt, als wesentliche Vereinfachung, dem homogenen (ungeschichteten) Untergrund lineares Verhalten. Zudem wird auch die Nichtlinearität aufgrund der gekrümmten Bandagenform vernachlässigt. Es wird lediglich die Nichtlinearität infolge des möglichen Abhebens der Bandage berücksichtigt.

Der Walzenzug besteht aus der vibrierenden Bandage samt Unwuchterreger und steht mit dem Verdichtungsgut in unmittelbarem Kontakt. Darauf stützt sich das statische Auflastgewicht des Rahmens über Dämpfungselemente ab. Aufgrund dieser Schwingungsentkopplung durch die Dämpfungselemente, können die Trägheitskräfte des Rahmens näherungsweise vernachlässigt werden. Seine Wirkung besteht lediglich in einer zusätzlichen statischen Auflast.
Aus diesem Grund reduziert sich die Anzahl der Freiheitsgrade auf lediglich einen, den Schwingweg der Bandage z , um die Geschwindigkeit und Beschleunigung der

Walze zu beschreiben. Die Bandagenmasse wird durch eine periodische Erregerkraft angeregt und steht in direktem Kontakt mit dem Boden, der durch eine Feder mit Steifigkeit k_b und einem parallel geschalteten, viskosen Dämpfer c_b (Kelvin Voigt Körper) dargestellt wird. Die Federeigenschaften berücksichtigen die Kontaktzone zwischen Bandage und elastischem Halbraum (Boden) [12, 13, 18, 17, 19, 14, 11, 15].

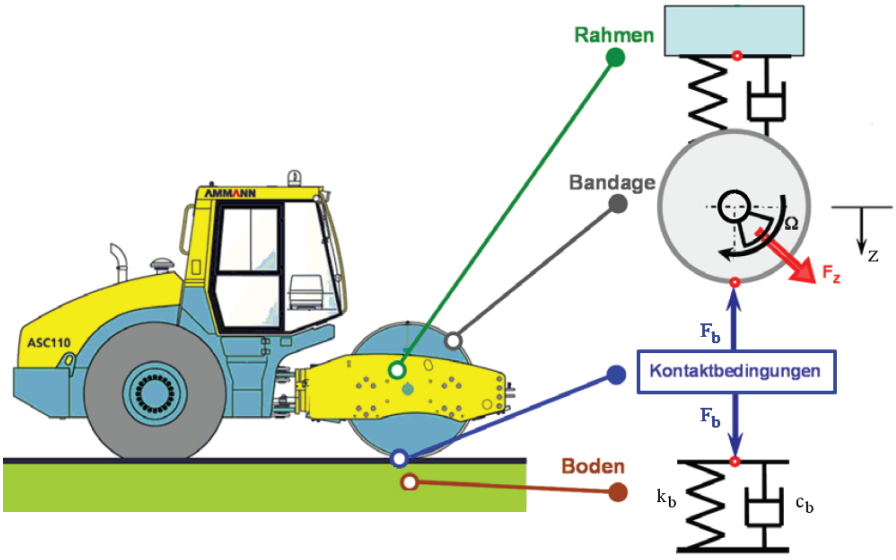


Abbildung 3.22: Analytisches Maschine - Boden Interaktionsmodell [20, adaptiert].

Im Allgemeinen beginnt die Verdichtung im Kontaktbetrieb, wo ständiger Kontakt zwischen Bandage und Boden herrscht. Auf die zunehmende Verdichtung und die damit steigenden Bodensteifigkeitswerte (bzw. sinkenden Dämpfungswerte), reagiert das System mit zunehmender Nichtlinearität. Es kommt zum Kontaktverlust, sobald die dynamische Kraft zwischen Maschine und Boden eine maximale Bodenreaktionskraft F_b übersteigt. Abgebildet wird dieser Sachverhalt im Modell durch die Formulierung von Kontaktbedingungen (siehe Kapitel 3.6.4.3).
Diese aus dem periodischen Kontaktverlust resultierende nichtlineare Dynamik, äußert sich in Form von verschiedenen Betriebszuständen (vgl. Kapitel 2.5), die prinzipiell bei allen schwingfähigen Systemen mit einseitiger Bindung auftreten können und sowohl im Frequenzbereich durch eine FFT (Fast Fourier Transformation) des Beschleunigungssignals, als auch im Zeitbereich durch Messen der Schwingungsmaxima, respektive der Bodenreaktionskraft F_b, diagnostiziert werden können.

3.6.4.3 Messwerte

Der vertikale Schwingweg der Bandage lässt sich abermals durch doppelte Integration des gemessenen Bandagenvertikalbeschleunigungssignals errechnen.
Die Berechnung der Bodenkontaktkraft erfolgt durch Formulieren der Gleichgewichtsbetrachtung der angreifenden Kräfte an der Bandage in vertikaler Richtung (unter Vernachlässigung der Trägheitskraft des Rahmens).
Demnach ergibt sich analog zu Gleichung 3.3 die Bodenreaktionskraft F_b, mit den dort angeführten Variablenbezeichnungen, zu:

$$F_b = -(m_b + m_e) \cdot \ddot{z} + (m_r + m_b + m_e) \cdot g + m_e \cdot e \cdot \omega^2{}_{err} \cdot \cos(\omega_{err} \cdot t) \qquad (3.13)$$

Da der Untergrund als Feder-Dämpfer System abgebildet wird, kann die Bodenreaktionskraft auch geschrieben werden als:

$$F_b = k_b \cdot z + c_b \cdot \dot{z} \qquad (3.14)$$

An dieser Stelle kommen nun die oben angesprochenen Kontaktbedingungen ins Spiel. Gleichung 3.14 gilt demnach nur für den Fall, dass $F_b > 0$, also eine Druckkraft ist. Dies ist dann der Fall, wenn unmittelbarer Kontakt zwischen der Walzentrommel und dem Untergrund besteht. In allen anderen Fällen kann klarerweise keine Energie in den Boden eingetragen werden und die Kontaktkraft ist gleich 0.

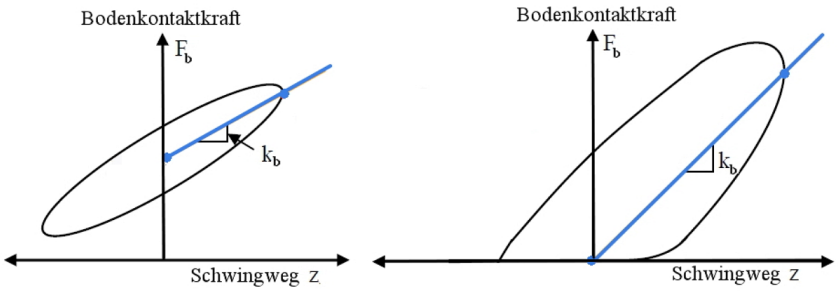


Abbildung 3.23: Arbeitsdiagramm bei ständigem Kontakt (links) und Kontaktverlust (rechts) [66].

Aus den beiden Gleichungen 3.13 und 3.14, kann durch Gleichsetzen die Bodensteifgkeit k_b, ermittelt werden.

Zu jenem Zeitpunkt, in dem die Bandage den tiefsten Punkt erreicht, ist die Bandagengeschwindigkeit $\dot{z} = 0$ und somit die Dämpfungskraft $c_b \cdot \dot{z} = 0$. Daraus ergibt sich die Bodensteifigkeit k_b [MN/m], als Verhältnis von Bodenkontaktkraft und Vibrationsamplitude im Kontaktbetrieb nach [14], zu:

$$k_b = \omega^2 \cdot \left[(m_b + m_e) + \frac{(m_e \cdot e) \cdot \cos(\varphi)}{A_{(z)}} \right] \tag{3.15}$$

mit:

$A_{(z)}$	Amplitude des Schwingweges	[m]
φ	Phasenwinkel des Schwingweges bzw. Nacheilwinkel der Schwingungsantwort gegenüber der Schwingungsanregung	[rad]

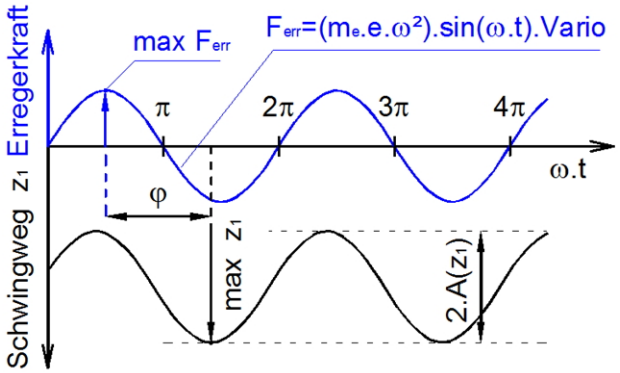


Abbildung 3.24: Erregerkraft und Schwingweg der Bandage, mit eingezeichneter Phasenverschiebung und maximalem Schwingweg, zur Berechnung von k_b im Kontaktbetrieb [48].

Aufgrund der Nichtlinearität ergeben sich je nach Betriebszustand letztendlich 2 Formeln für die Berechnung von k_b [14].
Bei periodischem Kontaktverlust wird der FDVK-Messwert nach folgender Formel ermittelt:

$$k_b = \frac{F_{b(\dot{z}=0)} - (m_b + m_e + m_r) \cdot g}{A_{(z)}} \tag{3.16}$$

mit:

$F_{b(\dot{z}=0)}$	Bodenkontaktkraft am Umkehrpunkt	[N]
$(m_b + m_e + m_r) \cdot g$	statische Achslast	[N]
$A_{(z)}$	Amplitude der Bandagenbewegung am Umkehrpunkt	[m]

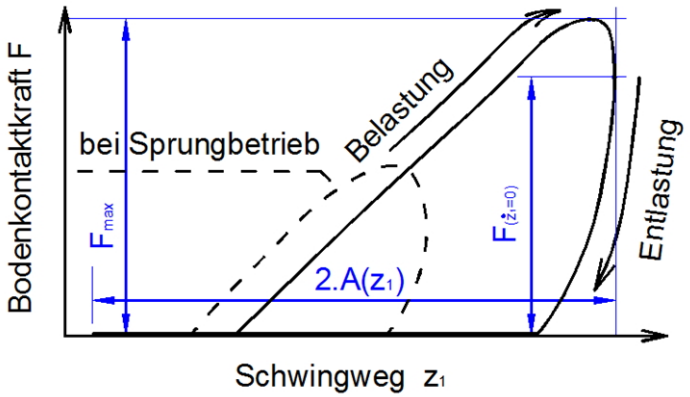


Abbildung 3.25: Arbeitsdiagramm mit eingezeichneten Hilfsgrößen zur Berechnung des k_b-Wertes bei Kontaktverlust [48].

Die Bodensteifigkeit k_b [MN/m] beschreibt also die Steigung der Geraden des Belastungsastes im Kraft-Weg Diagramm und nimmt mit zunehmender Verdichtung zu (siehe Abbildung 3.16).

4 Versuchsbeschreibung

4.1 Einleitung

4.1.1 Allgemeines

Die experimentellen Versuche wurden im Rahmen umfangreicher Messreihen, mit einer speziell ausgerüsteten Tandemvibrationswalze, Mitte April 2012 in einer Kiesgrube, welche uns dankenswerterweise von der Firma *HABAU Hoch- und Tiefbaugesellschaft m.b.H.* zur Verfügung gestellt wurde, durchgeführt.

Das Testareal liegt im Gemeindegebiet von A-2401 Fischamend, unweit des Flughafens Wien – Schwechat, mit unmittelbarem Anschluss an die A4 Ostautobahn.

Abbildung 4.1: Satellitenbild der Umgebung der Kiesgrube

Das Hauptaugenmerk der Versuchsfahrten lag auf der genauen Erforschung der Vorgänge, Effekte und Phänomene, die bei der Oszillationsverdichtung auftreten, kombiniert mit akustischen Messungen an der Bandage, sowie Verdichtungsfahrten mit der vibratorisch angeregten Walzentrommel an der Vorderseite der Walze.

Im Zuge dieser Arbeit werden jene Versuche behandelt, welche mit vibratorisch erregter Bandage durchgeführt wurden. Aus diesem Grund sind in Kapitel 4.4 auch nur jene Messeinrichtungen angeführt, die in Zusammenhang mit selbiger stehen und

somit für die Bearbeitung vorliegender Arbeit von Relevanz sind.
Das Messlayout aller installierten und parallel messenden Systeme, sowohl auf der Walze, als auch im Boden, sind in den Abbildungen 4.15 und 4.16 dargestellt.
Eine protokollierte Übersicht aller getätigten Messfahrten, mit vibratorisch angeregter Walzentrommel, ist in Kapitel 4.5 zu finden.

4.1.2 Areal

Auf dem Versuchsgelände der Firma *HABAU* fanden wir, neben der ausgezeichneten Anbindung an die Infrastruktur und dem vom Betreiber der Kiesgrube gewährten Freiraum zum Experimentieren, nahezu ideale Bedingungen vor, um die geplanten Testfahrten durchführen zu können.

Abbildung 4.2: Luftbildaufnahme des Testgeländes

Im Besonderen betrifft dies die zahlreichen dort stationierten Erdbaugeräte mitsamt Fahrer (Radlader, LKW, Planierraupe, Wasserwagen), das Vorhandensein von Kraftstoff, geeignetem Schüttmaterial, sowie einem leistungsfähigen Wasseranschluss der unter anderem für die Gewichtsvariation der Walze benötigt wurde, die homogene und annähernd horizontale Umgebung für die Messungen der Erschütterungsausbreitung und nicht zuletzt die Abwesenheit von Nachbarn, die sich gestört fühlen könnten. Zudem wurde uns Zugang zu einer Garage gewährt, wo diverse Reparaturarbeiten an den Gerätschaften durchgeführt, oder auch Akkus wiederaufgeladen werden konnten. Weiters konnten auf dem Areal, abseits des eingerichteten Versuchsfeldes, notwendige Vergleichsversuche auf unterschiedlichen Böden bzw. Steigungen durchgeführt werden.

4.2 Prüffeld

Das Unterbauplanum bestand aus einer, durch den Kiesgrubenverkehr bereits hochgradig verdichteten, Mischung aus sandigen Kiesen. Das Versuchsgelände wurde in insgesamt 7 Fahrspuren eingeteilt. Die lagemäßige Anordnung der einzelnen Bahnen zueinander, ist aus Abbildung 4.3 ersichtlich.

Abbildung 4.3: Spureneinteilung

4.2.1 Spuren 1 – 4 "Verdichtungsfahrten auf 50 cm Wandschotter"

Ein Großteil der Versuchsfahrten fand auf den parallelen Spuren 1 bis 4 statt. Diese wurden auf Bahnen mit einer Länge $l = 20$ m und einer Breite von $b = 1,6$ m eingerichtet. Darauf wurde anschließend eine ca. $d = 50$ cm dicke, homogene Schicht von zu verdichtendem, locker gelagertem, sandigem Kies ("Wandschotter") geschüttet.

Um bei den Messfahrten eine, über die gesamte Fahrspur konstante, Geschwindigkeit gewährleisten zu können, wurde ein möglichst ebener An- und Auslauf vor bzw. nach dem Beginn der eigentlichen Messspur vorgesehen.

Senkrecht zur Verdichtungsrichtung wurden auf Höhe der Mittelachse des Testfeldes Beschleunigungssensoren aufgestellt, um die Bodenbeschleunigungen in drei zueinander orthogonal stehenden Richtungen zu messen (blaue Punkte in Abbildung 4.6). Dabei zeigte die x-Achse der Beschleunigungssensoren in Verdichtungsrichtung, die y-Achse stand orthogonal darauf, um die Horizontalbeschleunigungen aufzuzeichnen. Die vertikale Bodenbeschleunigung wurde in z-Richtung, positiv in Richtung Erdmittelpunkt weisend, gewählt.
Spur 2 war zudem noch mit einem Setzungsmessgerät und einer Druckmessdose (grüner bzw. roter Punkt in Abbildung 4.6) ausgestattet. Die Daten aller Messsensoren

wurden von “Brimos Wireless” Einheiten aufgezeichnet und chronologisch mittels GPS synchronisiert.

Abbildung 4.4: ”Brimos Wireless” Einheit [46]

Außerdem wurde im Rahmen eines sogenannten “Schwachstellenversuches“ eine künstliche Schwachstelle, in Form von 2 handelsüblichen Matratzen mit den Abmessungen von je $2,00\,\mathrm{m}$ mal $0,90\,\mathrm{m}$ auf Spur 2 hergestellt und überschüttet (siehe Abbildung 4.7). Bei den Walzüberfahrten konnte so der Einfluss dieser lokalen Schwachstelle, auf das Bewegungsverhalten der Bandage und auf die FDVK-Messwerte, studiert werden.

Abbildung 4.5: Haupttestfeld mit den Spuren 1 - 4

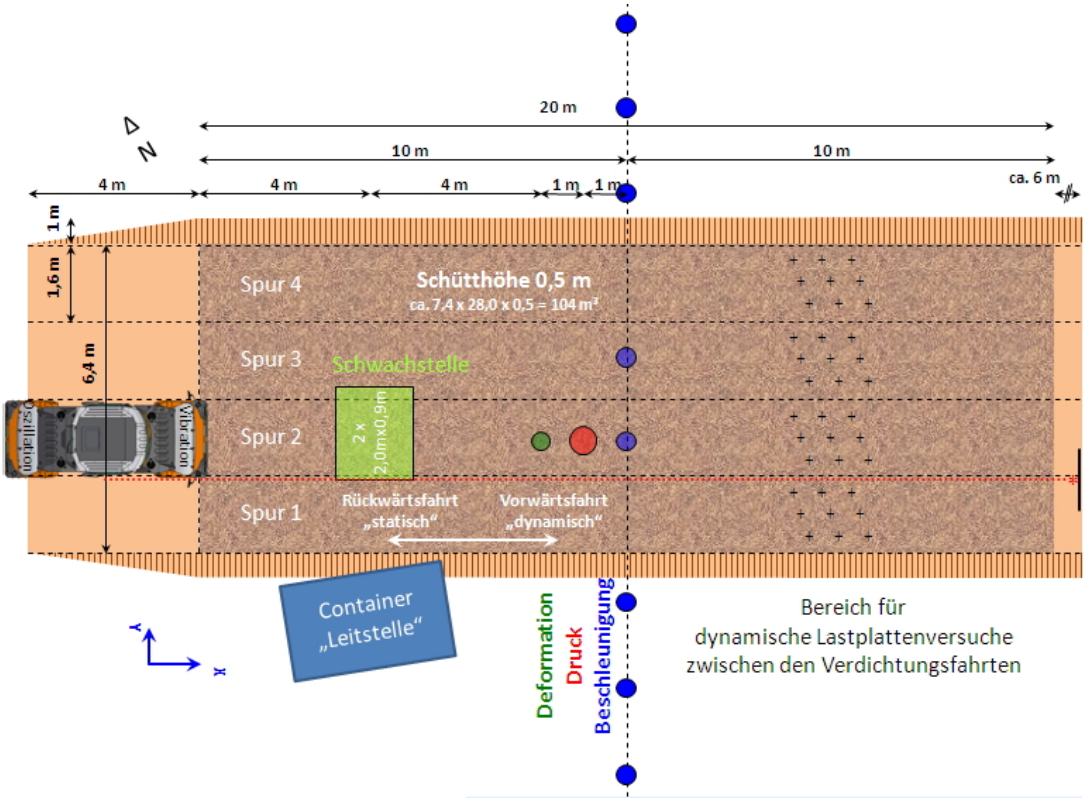


Abbildung 4.6: Prinzipskizze der Spuren 1 - 4 mit Messsensoren [46, adaptiert]

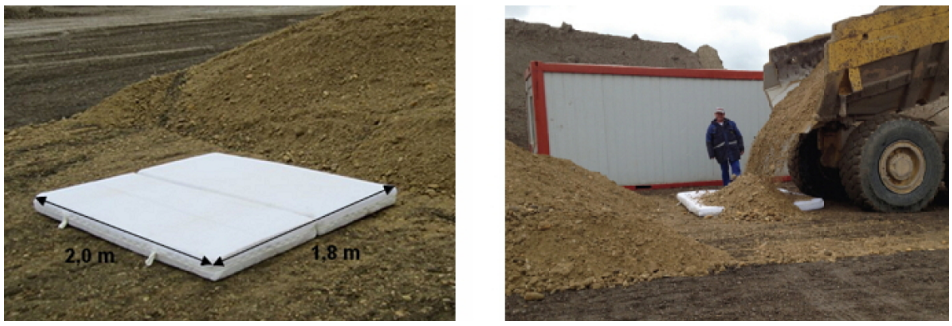


Abbildung 4.7: Einbau der Matratzen als “Schwachstelle”

4.2.2 Spur 5 "Verdichtungsfahrten auf steifem Planum"

Spur 5 wurde auf dem bereits hochgradig verdichteten Unterbauplanum der Kiesgrube eingerichtet. Hier wurde lediglich eine Messung der Beschleunigungsausbreitung normal zur Achse der Spur durchgeführt .

Abbildung 4.8: Spur 5 auf steifem Planum

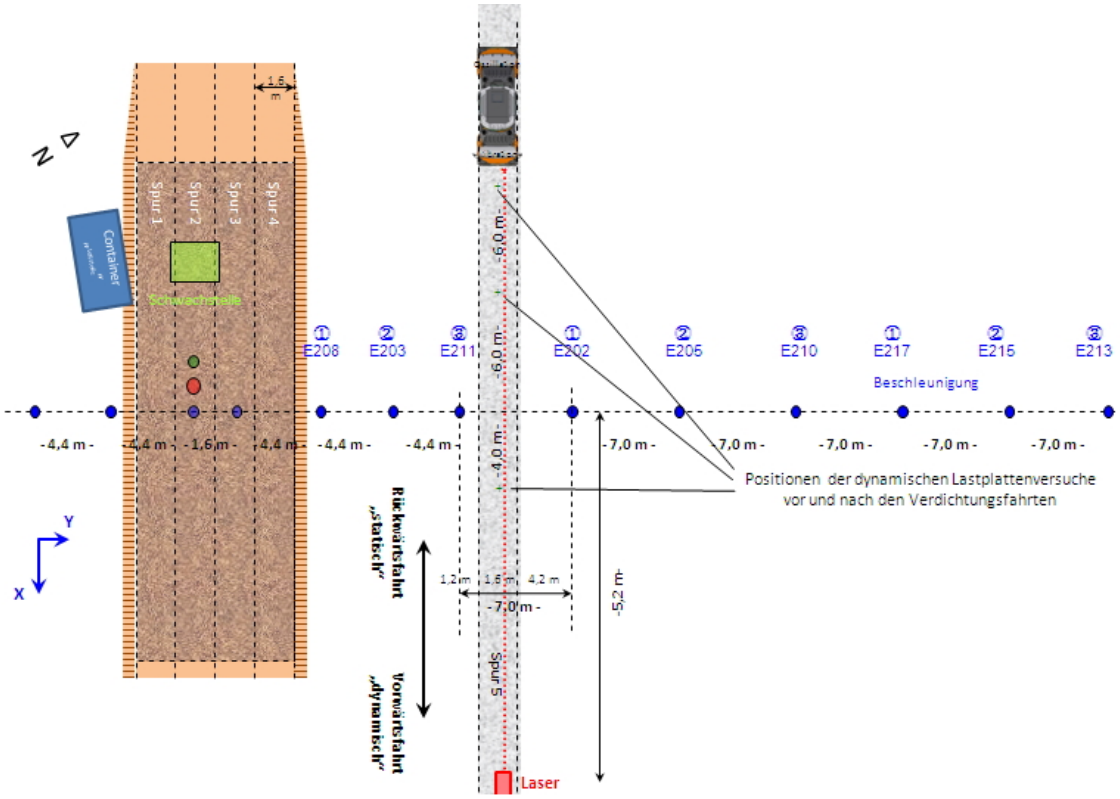


Abbildung 4.9: Prinzipskizze der Spur 5 [46, adaptiert]

4.2.3 Spuren 6 – 7 “Verdichtungsfahrten auf Schüttung über weichem Untergrund”

Auf den Spuren 6 (nur Oszillationsverdichtung) und 7 (nur Vibrationsverdichtung) wurden Messfahrten auf einer Schüttung über weichem Untergrund durchgeführt. Die Beschleunigungssensoren wurden dafür in Verdichtungsrichtung, also parallel zu den Spuren, positioniert.

Abbildung 4.10: Spur 6 und 7

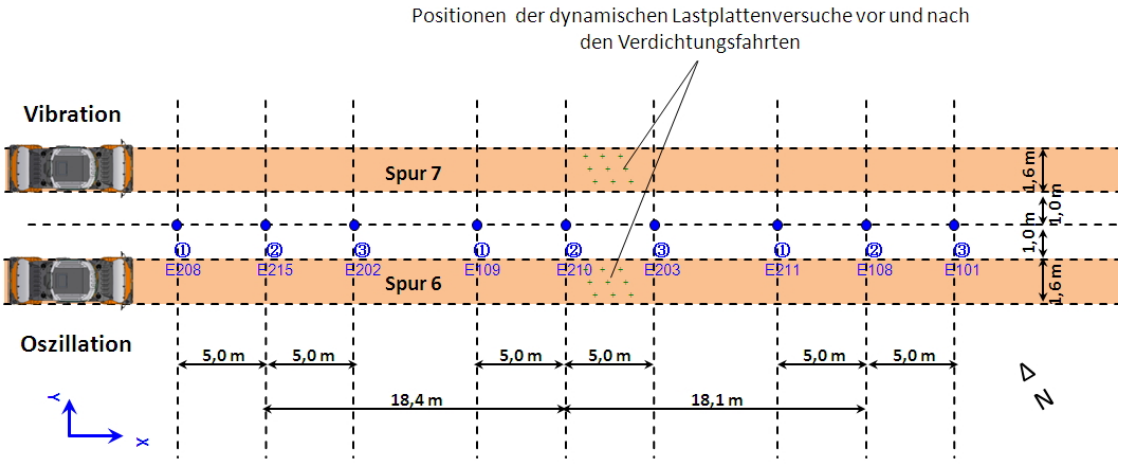


Abbildung 4.11: Prinzipskizze der Spuren 6 und 7 [46, adaptiert]

4.3 Messwalze

Für die Versuche wurde uns von der Firma *HAMM AG*, eine knickgelenkte Tandemwalze mit Vibrations- und Oszillationsbandage des Typs HD+ 90 VO zur Verfügung gestellt.

Abbildung 4.12: HAMM HD+ 90 VO

Das Gerät hat ein Betriebsgewicht von 9380 kg, wobei die vordere Achslast der Vibrationsbandage 4770 kg und die der hinteren Oszillationsbandage 4610 kg beträgt. Bei einer Bandagenbreite von $1,68$ m, ergibt sich die statische Linienlast unter der Vibrationsbandage zu $28,4$ kg/cm, jene unter der Oszillationsbandage beträgt bei gleicher Bandagenbreite $27,4$ kg/cm. Die beiden Bandagen haben einen Durchmesser von jeweils $1,20$ m und eine schwingende Masse von etwa 1900 kg. Der Achsabstand beträgt $3,40$ m.

Die Geschwindigkeit kann zwischen 1 km/h und 12 km/h in halben km/h-Schritten variiert werden. Bei den durchgeführten Versuchen wurde meist mit einer Standardgeschwindigkeit von 4 km/h verdichtet. Darüber hinaus wurden Geschwindigkeitsvariationen mit 2 km/h und 6 km/h durchgeführt.

Die Walze ist mit einem vierzylindrigen Dieselmotor der Firma DEUTZ mit 100 kW (136 PS) Leistung ausgestattet. Die Brems- und die Schwingungsanlage, sowie die Lenkung werden hydraulisch angetrieben.

Für die Vibration der Bandage sind, je nach Drehrichtung der Unwuchtmasse, die sich aus zwei Einzelmassen zusammensetzt, zwei mögliche Einstellungen verfügbar (Stufe 1 und Stufe 2). Die beiden Einzelmassen ändern abhängig von der Drehrichtung ihre

Stellung zueinander, was unterschiedliche Exzentrizitäten und somit unterschiedliche Amplituden bewirkt. Dabei wird empfohlen, die höhere Amplitude an die niedrigere Frequenz zu koppeln, was eine tiefer reichende Verdichtung bewirkt als umgekehrt. Für die kleinere Amplitude von $0,34$ mm wird deshalb eine Frequenz von 50 Hz angeraten, während 42 Hz die Standard-Frequenz für die Verdichtung mit der großen Amplitude von $0,62$ mm ist.
Prinzipiell kann aber sowohl die kleine, als auch die große Amplitude mit frei wählbaren Frequenzen betrieben werden, wie dies bei unseren Untersuchungen auch geschehen ist (siehe Kapitel 4.5).

Alle weiteren Kenngrößen können dem Produktdatenblatt in Abbildung 4.14 entnommen werden.

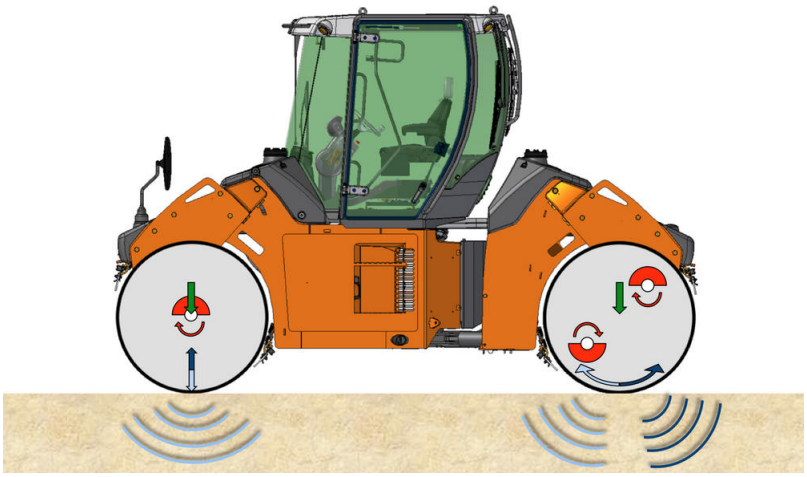


Abbildung 4.13: Kräfte und Momente an der Bandage; vorne Vibration, hinten Oszillation [56]

HD+ 90 VV / HD+ 90 VO

HD+ 90 VV - Knickgelenkte Tandemwalze mit 2 Vibrationsbandagen
HD+ 90 VO - Knickgelenkte Tandemwalze mit Vibrations- und Oszillationsbandage

		HD+ 90 VV	HD+ 90 VO
Gewichte			
Betriebsgewicht mit Kabine	kg	9380	9380
Betriebsgewicht max.	kg	11900	11900
Achslast, vorn/hinten	kg	4740/4610	4770/4610
Statische Linienlast, vorn/hinten	kg/cm	28,4/27,4	28,4/27,4
Abmessungen Maschine			
Maximale Arbeitsbreite	mm	1850	1850
Spurkreisradius, innen	mm	5250	5250
Dieselmotor			
Hersteller		DEUTZ	DEUTZ
Typ		TCD 2012 L04 2V	TCD 2012 L04 2V
Zylinder, Anzahl		4	4
Leistung ISO 14396, kW/PS/UpM		100,0/136,0/2300	100,0/136,0/2300
Leistung SAE J1349, kW/HP/UpM		100,0/134,0/2300	100,0/134,0/2300
Abgasstufe EU / USA		III A / Tier 3	III A / Tier 3
Fahrantrieb			
Fahrantrieb hydrost., vorn/hinten		Radmotor/Radmotor	Radmotor/Radmotor
Geschwindigkeit, Arbeitsgang	km/h	0-6,0	0-6,0
Geschwindigkeit, Transportgang	km/h	0-12,0	0-12,0
Steigfähigkeit, mit/ohne Vibration	%	35/40	35/40
Schwingungssystem Hydrostatischer Antrieb			
Vibration			
Vibrationsfrequenz, vorn, I/II	Hz	42/50	42/50
Vibrationsfrequenz, hinten, I/II	Hz	42/50	
Amplitude, vorn, I/II	mm	0,62/0,34	0,62/0,34
Amplitude, hinten, I/II	mm	0,62/0,34	
Zentrifugalkraft, vorn, I/II	kN	75/60	75/60
Zentrifugalkraft, hinten, I/II	kN	75/60	
Oszillation			
Oszillationsfrequenz, hinten	Hz		39
Tangentialamplitude, hinten	mm		1,44
Oszillationskraft, hinten	kN		144
Lenkung			
Lenkung, Art		Knicklenkung	Knicklenkung
Lenkung, Betätigung		hydrostatisch, Lenkrad	hydrostatisch, Lenkrad
Lenkeinschlag +/-	°	30	30
Pendelwinkel +/-	°	10	10
Bremsanlage			
Betriebsbremse, Wirkung		hydrostatisch	hydrostatisch
Betriebsbremse, Betätigung		Fahrhebel	Fahrhebel
Parkbremse, Wirkung		Federspeicher/mechanisch	Federspeicher/mechanisch
Parkbremse, Betätigung		elektr. u. autom.	elektr. u. autom.
Hilfsbremse, Wirkung		hydr./mech.	hydr./mech.
Hilfsbremse, Betätigung		Not-Stop	Not-Stop
Berieselungsanlage			
Wasserberieselung, Art		Druck	Druck
Betätigung, Wasserberieselung		intervall/manuell	intervall/manuell
Wassertank, Inhalt	L	834	834

Ausstattung
gefederter Fahrersitz, schwenk- und verschiebbarer Komfortsitz, Multifunktionsfahrhebel rechts vom Sitz, Amplitude schaltbar: groß/klein, Vibration schaltbar: vorne/hinten/doppelt, Scheibenwischer vorn und hinten, Kontrollleuchten und Notstopp, CE vorbereitet, Batteriehauptschalter, Dreifach-Ölfilterung, Beleuchtung nach StVZO, Wasserstandsanzeige, Geschwindigkeitsmesser, ROPS-Komfort-Großraumkabine, Aufstiegsgriffe

Sonderausstattung
HCQ-Asphalt-Verdichtungsmesser, HCQ-Asphalttemperaturmesser, Frequenzregler schaltbar: vorne/hinten/doppelt, Hundegang zur Erhöhung der Arbeitsbreite, ROPS-Panoramakabine, Heiz/Klima mit Entfeuchtung, staubfreie Lüftung, Innenbeleuchtung, Außen- und Innenspiegel, Fahrtenschreiber, Rundumkennleuchte, Schallisolierung, Kantenandrück- und Schneidgerät, Radio, Back-up-Alarm, zweiter Multifunktionsfahrhebel, Bandagenbeleuchtung, Kabine: 4 Scheinwerfer, alle Scheinwerfer auch in Xenon erhältlich, Stoffsitz, Fahrersitz-Rückenverlängerung, Sicherheitsgurt, Sonnendach

Gesamtlänge	**L**	**4600**	**4600**
Breite	**B**	**1790**	**1790**
Gesamthöhe	**H**	**3050**	**3050**
Achsabstand	**A**	**3400**	**3400**
Bandagenbreite	**X**	**1680/1680**	**1680/1680**
Bandagendurchmesser	**D**	**1200/1200**	**1200/1200**

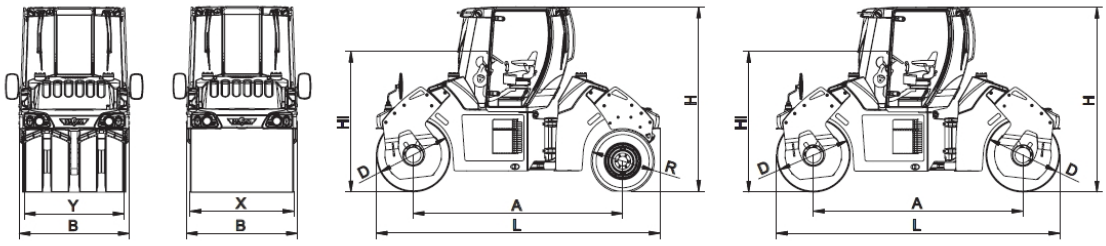


Abbildung 4.14: Datenblatt HAMM HD+ 90 VO [37]

4.4 Messwerterfassungssysteme

4.4.1 Überblick

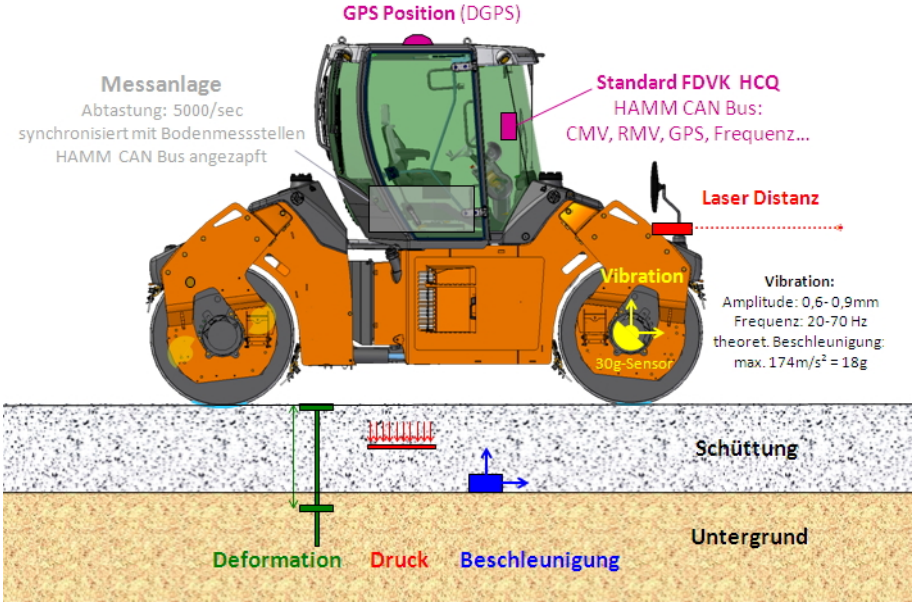


Abbildung 4.15: Messlayout Übersicht [46, adaptiert]

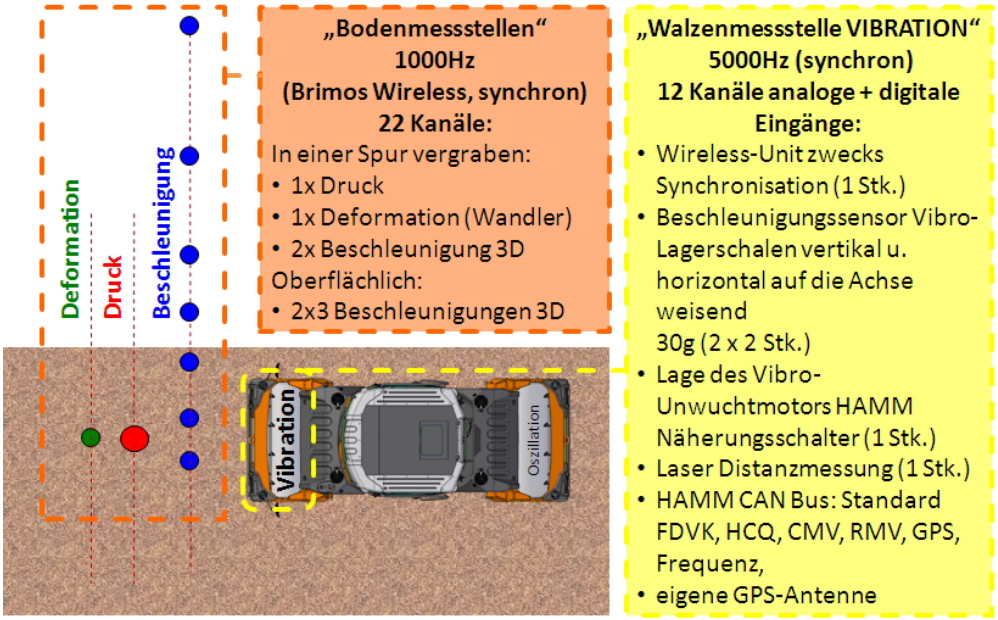


Abbildung 4.16: Für die Vibrationsversuche installierte Messsysteme [46, adaptiert]

4.4.2 Messwerterfassung Walze

An der Lagerschale der Vibrationsbandage wurden beidseitig je 2 Stk. Beschleunigungsaufnehmer (±30 g) vertikal und horizontal auf die Bandagenachse weisend montiert, um deren Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen registrieren zu können (siehe Abbildung 4.18).
Mit diesen Beschleunigungsmessungen ist es möglich, die gängigen FDVK-Werte unabhängig von den Messwerten des installierten FDVK-Systems *(HMV/RMV)* zu ermitteln und gegenüberzustellen. Weiters war ein Näherungsschalter für die Bestimmung der Lage der Vibrationsunwucht angebracht. Zur Positionsbestimmung waren zwei GPS-Systeme auf der Walze montiert. Dabei handelt es sich um ein werksmäßig von der Firma HAMM vorinstalliertes, sowie ein von uns eigens angebrachtes GPS-Messsystem. Die Fahrantriebsseite der Walze wurde der Einfachheit halber als Backbord (Abkürzung Bb) und die dynamische Antriebsseite mit Steuerbord (Sb) bezeichnet (siehe Abbildung 4.17).

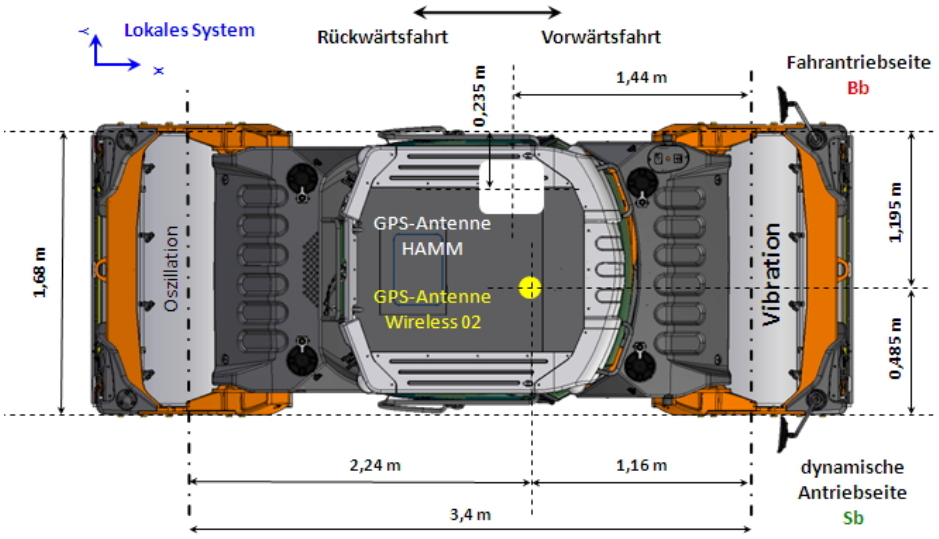


Abbildung 4.17: GPS Bezug Walze [46]

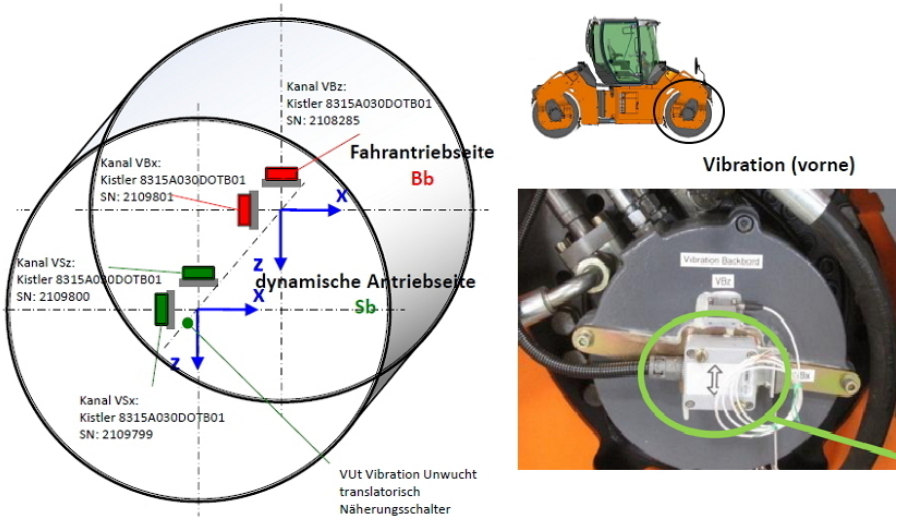


Abbildung 4.18: Translatorisches Messsystem der Vibrationsbandage [46, adaptiert]

Das Messwerterfassungssystem auf der Walze (die Vibration betreffend) bestand somit aus folgenden Komponenten:

- Beschleunigungssensoren auf den Lagerschalen vertikal u. horizontal auf die Achse weisend ±30 g (2 x 2 Stk.)
- HAMM Näherungsschalter (1 Stk.) zur Lagebestimmung der Vibrationsunwucht
- HAMM CAN Bus: Standard FDVK HCQ (HMV, RMV, GPS Breite bzw. Länge, Frequenz- Soll, Frequenz- Ist, Amplitude, Fahrgeschwindigkeit, Fahrtrichtung)
- 2 GPS-Systeme
- Brimos Wireless Einheiten zur Synchronisierung mit der Bodenmessstelle

4.4.3 Messwerterfassung Boden

Um das Beschleunigungs- und Verformungsverhalten des Bodens, sowie die Druckverhältnisse in selbigem messen und registrieren zu können, wurden an verschiedenen Positionen im Versuchsfeld entsprechende Messaufnehmer installiert, die die Werte bei jeder Überfahrt aufzeichneten.

Die jeweilige Lage der Sensoren im Grundriss ist aus den entsprechenden Abbildungen 4.6, 4.9 und 4.11 in Kapitel 4.2 ersichtlich. Die 3 Sensoren in Spur 2 bzw. der Beschleunigungssensor in Spur 3 befanden sich direkt unter der Schüttung, in 50 cm Tiefe.

Alle anderen Beschleunigungsmessgeräte wurden direkt auf das Unterbauplanum gestellt und somit nicht überschüttet.

Auf diese Weise erhielten wir pro Testfahrt, welche sich aus dynamischer Vorwärts- und statischer Rückwärtsfahrt zusammensetzte, je ein Messdatenfile. Dieses File beinhaltet alle Ergebnisse sämtlicher Messkanäle, die als Bodenmessstelle, vorinstallierter Walzenmessstelle (CAN Bus), sowie der eigens angebrachten Sensoren an der Walze, installiert waren.

4.5 Messprotokolle

Die Dokumentation spielt, vor allem bei derart groß angelegten Versuchsreihen, eine wesentliche Rolle. Für jeden Versuchstag wurde ein eigenes Protokoll erstellt, in dem festgehalten wurde, wann und mit welchen Einstellungen (Verdichtungsart, Frequenz, Amplitude, Geschwindigkeit etc.) jede Spur befahren wurde. Besondere Vorkommnisse, wie etwa Sensorenausfälle oder sonstige technische Probleme wurden ebenfalls vermerkt. Die relevanten Informationen dieser Protokolle sind in den folgenden Abbildungen 4.19 und 4.20 zusammengefasst.

	Messfahrt	Zeit	Spur	Amplitude groß/klein	Frequenz [Hz]	Geschwindigkeit [km/h]	Wassertank	Bandage	Fahrtrichtung vorwärts	Fahrtrichtung rückwärts	Anmerkung
18.04.2012	31	15:43:08	2	klein	50	4	voll	trocken	vibratorisch	statisch	Batterie nicht sicher angesteckt?
	32	15:46:45	2	klein	50	4					
	33	15:50:00	2	klein	50	2					benachbartes Fahrzeug (Mulde) umgekippt!
	34	15:53:17	2	klein	50	2					
	35	15:57:03	2	klein	50	6					
	36	15:59:48	2	klein	50	6					Laser zeigt Error
	37	16:02:51	2	klein	50	2-6					
	38	16:18:51	2	klein	50	2-6					
	39	16:22:32	2	klein	20	4					
	40	16:27:19	2	klein	20	4					
	41	16:30:20	2	klein	40	4					
	42	16:32:44	2	klein	40	4					
	43	16:35:31	2	klein	60	4					
	44	16:38:18	2	klein	60	4					
	45	16:40:58	2	groß	30	4					
	46	16:43:50	2	groß	30	4					
	47	16:46:10	2	groß	40	4					Übertragung der Vibrationen in der Umgebung
	48	16:49:21	2	groß	40	4					wird auf der Schwachstelle spürbar gedämpft!
19.04.2012	71	11:11:41	3	klein	50	4	voll	trocken	vibratorisch	statisch	Reparatur des Lüfters in der Vibrationsbandage
	72	11:14:34	3	klein	50	4					Piepsen in der Walze bei der dyn. Vorwärtsfahrt
	73	11:17:21	3	klein	50	4					
	74	11:19:58	3	klein	50	4					
	75	11:22:47	3	klein	50	4					
	76	11:25:18	3	klein	50	4					
	77	11:28:03	3	klein	50	4					
	78	11:31:09	3	groß	40	4					
	79	11:34:24	3	groß	40	4					
	80	11:37:40	3	groß	40	4					
	81	11:40:48	3	groß	40	4					
	82	11:43:59	3	groß	40	4					
	83	11:47:02	3	groß	40	4					
	84	11:49:38	3	groß	40	4					
	93	12:32:13	4	klein	50	4					
	96	14:44:11	4	klein	50	4	leer				
	97	14:47:12	4	klein	50	4					
	105	16:05:59	4	klein	50	4		nass			Sprühstellung 4/5; Bespr. funkt. nicht dauerhaft!
	106	16:09:14	4	klein	50	4					Sprühstellung 4/5; Bespr. funkt. nicht dauerhaft!

Abbildung 4.19: Messprotokoll vom 18/19.04.2012

	Messfahrt	Zeit	Spur	Amplitude groß/klein	Frequenz [Hz]	Geschwindigkeit [km/h]	Wassertank	Bandage	Fahrtrichtung vorwärts	Fahrtrichtung rückwärts	Anmerkung
23.04.2012					Lastplatte : 4m von der Messachse in Fahrtrichtung in der Mitte der Spur Lastplatte: 6m von der Messachse gegen die Fahrtrichtung in der Mitte der Spur Lastplatte: 12m von der Messachse gegen die Fahrtrichtung in der Mitte der Spur						
	123	12:02:10	5	klein	50	4	1/3	trocken	vibratorisch	statisch	
	124	12:05:25	5	klein	50	4					
	125	12:08:19	5	klein	50	2					
	126	12:11:44	5	klein	50	2					Ausfall von B-WL 10,
	127	12:15:54	5	klein	50	6					keine Lasermessungen mehr möglich!
	128	12:18:41	5	klein	50	6					
	129	12:21:08	5	klein	20	4					
	130	12:23:40	5	klein	20	4					
	131	12:26:26	5	klein	40	4					
	132	12:28:50	5	klein	40	4					
	133	12:31:20	5	klein	60	4					
	134	12:34:00	5	klein	60	4					
	135	12:45:30	5	groß	40	4					
	136	12:48:01	5	groß	40	4					
	137	12:50:32	5	groß	40	2					
	138	12:54:13	5	groß	40	2					
	139	12:58:07	5	groß	40	6					
	140	13:00:29	5	groß	40	6					
	141	13:02:43	5	groß	30	4					
	142	13:05:02	5	groß	30	4					
	143	13:07:29	5	groß	45	4					
	144	13:09:51	5	groß	45	4					
					Lastplatte : 4m von der Messachse in Fahrtrichtung in der Mitte der Spur Lastplatte: 6m von der Messachse gegen die Fahrtrichtung in der Mitte der Spur Lastplatte: 12m von der Messachse gegen die Fahrtrichtung in der Mitte der Spur						
	175	17:21:59	7	-	-	4	1/10	trocken	stat.	statisch	Kurzes Aus- und Einschalten der Pfeifenlüfter,
	176	17:26:08	7	klein	50	4			vibratorisch		damit der Wechsel von Oszi
	177	17:29:01	7	klein	50	4					auf Vibrobetrieb erkennbar wird
	178	17:31:36	7	klein	50	4					
	179	17:34:17	7	klein	50	4					Ultraschallsensor OU4 schaltet nicht
	180	17:38:33	7	klein	20	4					Nach der Messfahrt:
	181	17:42:01	7	klein	20	4					Akkutausch für Vibro - Lüfter
	182	17:44:45	7	klein	40	4					
	183	17:47:20	7	klein	40	4					
	184	17:49:51	7	klein	60	4					
	185	17:52:36	7	groß	40	4					

Abbildung 4.20: Messprotokoll vom 23.04.2012

4.6 Vergleichsversuch

4.6.1 Dynamische Lastplatte

Die Dynamische Lastplatte als Leichtes Fallgewichtsgerät (LFG) ist ein Feldversuch, der im gesamten Erd- und Grundbau Verwendung findet. Dabei wird der dynamische Verformungsmodul ermittelt, welcher zur Bestimmung der Tragfähigkeit bzw. des Verdichtungszustandes von Böden oder Schüttlagen dient. Das Funktionsprinzip und die Versuchsdurchführung wurden bereits in Kapitel 2.6.2.2 erläutert. Die ausgewählten Positionen der Vergleichsversuche auf den jeweiligen Teststrecken, sind aus den entsprechenden Abbildungen unter Kapitel 4.2 ersichtlich.

Abbildung 4.21: Bestimmung des E_{vd} mit der dynamischen Lastplatte

Auf den Spuren 1-4 wurde der dynamische Verformungsmodul E_{vd} nach jeder getätigten Walzenmessfahrt ermittelt. Somit war eine genaue Dokumentation des Verdichtungsanstiegs möglich. Da die verwendete Messwalze auf der steifen Spur 5 ohnehin keinen messbaren Verdichtungszuwachs mehr herbeiführen konnte, entschloss man sich dazu, auf dieser Teststrecke nur vereinzelte Vergleichsmessungen durchzuführen. Auf den weichen Spuren 6-7 wurde durchschnittlich nach jeder dritten Walzenüberfahrt eine Ermittlung des Verformungsmoduls vorgenommen. Hier sorgte ein “Hochpumpen“ des vorhandenen Porenwassers für eine Aufweichung des Untergrunds und verhinderte dadurch einen messbaren Verdichtungserfolg.

Alle Versuchsergebnisse sind aus nachstehenden Abbildungen in protokollierter Form ersichtlich.

			dyn. Lastplatte Vorbelastung					dyn. Lastplatte Messschläge				
	Messfahrt	Spur	S1 [mm]	S2 [mm]	S3 [mm]	S [mm]	E_{vd} [MN/m²]	S1 [mm]	S2 [mm]	S3 [mm]	S [mm]	E_{vd} [MN/m²]
18.04.2012	31	2	1,74	0,83	0,67	1,08	20,9	0,61	0,59	0,58	0,59	38,1
	32	2	1,5	0,66	0,58	0,91	24,7	0,53	0,5	0,49	0,51	44,6
	33	2	1,62	0,71	0,57	0,97	23,2	0,51	0,49	0,46	0,49	46,2
	34	2	1,55	0,72	0,56	0,94	23,9	0,52	0,49	0,47	0,49	45,6
	35	2	1,8	0,7	0,56	1,02	22	0,49	0,46	0,44	0,46	48,7
	36	2	2,08	0,86	0,62	1,19	19,8	0,54	0,52	0,5	0,52	43,3
	37	2	1,44	0,69	0,57	0,9	25	0,52	0,5	0,49	0,5	44,8
	38	2	1,08	0,58	0,51	0,72	31,2	0,48	0,45	0,44	0,46	49,5
	39	2	1,47	0,65	0,54	0,89	25,4	0,48	0,46	0,44	0,46	48,8
	40	2	1,35	0,62	0,5	0,82	27,3	0,44	0,43	0,42	0,43	52,4
	41	2	1,13	0,57	0,49	0,73	30,8	0,46	0,44	0,4	0,43	52,2
	42	2	2,88	0,86	0,67	1,47	15,3	0,59	0,57	0,54	0,57	39,8
	43	2	1,03	0,56	0,53	0,71	31,9	0,74	0,49	0,47	0,57	39,8
	44	2	1,5	0,68	0,53	0,9	25	0,48	0,46	0,44	0,46	48,7
	45	2	1,43	0,54	0,5	0,83	27,3	0,47	0,44	0,43	0,4	50,2
	46	2	1,08	0,61	0,52	0,74	30,5	0,49	0,47	0,46	0,47	47,5
	47	2	1,39	0,72	0,58	0,9	25,1	0,57	0,51	0,49	0,52	43,3
	48	2	1,74	0,76	0,72	1,07	20,9	0,63	0,6	0,58	0,6	37,4
19.04.2012	71	3	0,69	0,39	0,37	0,48	46,5	0,45	0,44	0,43	0,44	51,4
	72	3	0,84	0,56	0,52	0,64	35,3	0,49	0,46	0,47	0,47	47,7
	73	3	1,11	0,56	0,54	0,73	30,7	0,5	0,49	0,48	0,49	46
	74	3	0,86	0,61	0,5	0,66	34,2	0,47	0,45	0,44	0,45	49,6
	75	3	0,87	0,64	0,62	0,71	31,7	0,53	0,42	0,46	0,47	48,1
	76	3	0,78	0,51	0,45	0,58	38,8	0,45	0,44	0,43	0,44	51
	77	3	0,77	0,55	0,51	0,61	36,9	0,48	0,44	0,44	0,45	49,9
	78	3	1,7	0,54	0,48	0,73	30,8	0,47	0,43	0,53	0,47	47,7
	79	3	0,72	0,51	0,46	0,56	39,9	0,43	0,43	0,38	0,41	54,3
	80	3	0,74	0,54	0,48	0,59	38,5	0,48	0,44	0,44	0,46	49,3
	81	3	1,13	0,57	0,46	0,72	31,3	0,44	0,43	0,42	0,43	52,7
	82	3	0,69	0,49	0,44	0,54	41,8	0,43	0,4	0,4	0,41	54,7
	83	3	0,6	0,48	0,42	0,5	45,2	0,39	0,4	0,38	0,39	57,7
	84	3	0,83	0,55	0,49	0,62	46,3	0,47	0,45	0,47	0,46	48,9
	93	4	0,98	0,66	0,61	0,75	30	0,58	0,56	0,55	0,56	40
	96	4	0,68	0,62	0,47	0,56	40,5	0,45	0,44	0,45	0,45	50,2
	97	4	0,7	0,88	0,53	0,7	32	0,52	0,48	0,47	0,49	46,2
	105	4	0,99	0,62	0,6	0,73	30,7	0,52	0,53	0,5	0,52	43,7
	106	4	0,97	0,64	0,59	0,73	30,7	0,54	0,52	0,49	0,52	43,5

Abbildung 4.22: Messprotokoll der Dynamischen Lastplatte vom 18/19.04.2012

	Messfahrt	Spur	dyn. Lastplatte Vorbelastung S1 [mm]	S2 [mm]	S3 [mm]	S [mm]	E_{vd} [MN/m²]	dyn. Lastplatte Messschläge S1 [mm]	S2 [mm]	S3 [mm]	S [mm]	E_{vd} [MN/m²]
23.04.2012			0,45	0,32	0,29	0,35	63,9	0,28	0,26	0,27	0,27	83,3
			0,64	0,33	0,31	0,43	52,7	0,28	0,28	0,28	0,28	80,9
			0,39	0,25	0,22	0,28	79,2	0,2	0,19	0,19	0,2	114,8
	123	5										
	124	5										
	125	5										
	126	5										
	127	5										
	128	5										
	129	5										
	130	5										
	131	5										
	132	5										
	133	5										
	134	5										
	135	5										
	136	5										
	137	5										
	138	5										
	139	5										
	140	5										
	141	5										
	142	5										
	143	5										
	144	5										
			1,06	0,46	0,39	0,64	35,3	0,36	0,34	0,33	0,34	65,8
			0,52	0,24	0,24	0,33	67,4	0,22	0,21	0,21	0,21	106,1
			0,42	0,27	0,25	0,31	71,7	0,23	0,2	0,22	0,22	103,7
	175	7	4,97	4,67	4,84	4,83	4,7	4,58	4,37	4,04	4,33	5,2
	176	7										
	177	7										
	178	7										
	179	7	5,98	5,31	5,32	5,54	4,1	5	5,06	4,98	5,01	4,5
	180	7										
	181	7										
	182	7										
	183	7										
	184	7										
	185	7	7,22	6,75	6,67	6,88	3,3	6,17	6,37	6,47	6,34	3,6

Abbildung 4.23: Messprotokoll der Dynamischen Lastplatte vom 23.04.2012

5 Versuchsauswertung

Nachdem in Kapitel 4 Versuchsdurchführung und -aufbau der experimentellen Feldversuche dargestellt und beschrieben wurden, rückt nun die Aufbereitung, Auswertung und Darstellung der, aus den Walzenüberfahrten gewonnen, Messdaten in den Mittelpunkt.
Aus den gemessenen Signalen, die das Bewegungsverhalten der Walze beschreiben, wurden, mit Hilfe von geeigneter Computersoftware, die gängigen FDVK-Messwerte und deren Verläufe auf den Testspuren errechnet, analysiert und graphisch aufbereitet. Etwaige Gemeinsamkeiten oder Diskrepanzen zu bereits abgeschlossenen, theoretischen und experimentellen Forschungstätigkeiten auf diesem Gebiet werden aufgezeigt.
Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, einleitend auf die Kernaussagen eben jener Arbeiten und Untersuchungen einzugehen. Anschließend werden noch relevante Vorbemerkungen zur Versuchsauswertung angeführt, um dann zum eigentlichen Kernstück dieser Arbeit, der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse aus den Feldversuchen, übergehen zu können.

5.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus abgeschlossenen Forschungstätigkeiten

In [1] wurden von *Adam* bereits 1996 theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Erforschung des Bewegungsverhaltens einer Vibrationswalze während dem Verdichtungsvorgang durchgeführt. Wesentliche Erkenntnisse aus dieser Arbeit, wurden bereits in den Kapiteln 2.5 und 3.4 bzw. Abschnitt 3.5.3 aufgezeigt. An dieser Stelle wird kurz und zusammenfassend auf die Kernaussage der Ergebnisse, in Bezug auf die untersuchten FDVK-Messwerte, den *CMV- (RMV)* und den *OMEGA*-Wert, eingegangen.

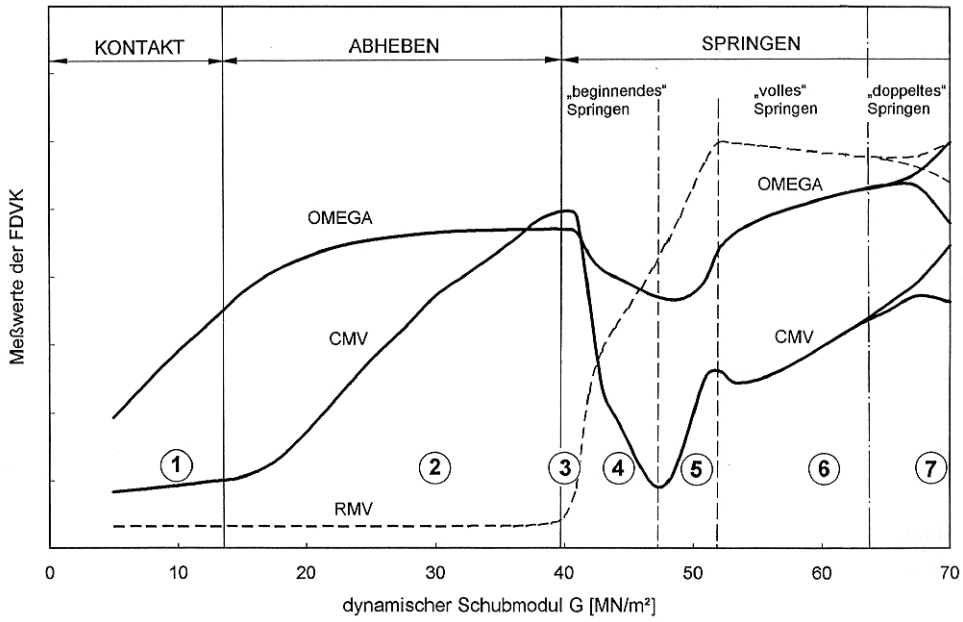


Abbildung 5.1: FDVK-Werte (*CMV*, *RMV* und *OMEGA*) in Abhängigkeit des Schubmoduls G [MN/m^2] des Bodens, bei verschiedenen Betriebszuständen der Vibrationsbandage [1].

- Auffällig ist vor allem das unterschiedliche Verhalten der FDVK-Werte in den einzelnen Betriebszuständen, was bedingt, dass die Messwerte in den einzelnen Zuständen immer getrennt voneinander zu betrachten sind.
- Während im Kontaktbetrieb der *CMV*-Wert mit zunehmender Bodensteifigkeit nur sehr langsam steigt, weist der *OMEGA*-Wert einen signifikanten Anstieg auf. Diese sensible Reaktion, bei niedrigen Bodensteifigkeiten und im Besonderen im Kontaktbetrieb, zeichnet den *OMEGA*-Wert aus und macht ihn dadurch in diesen Bereichen sehr aussagekräftig. Da keine subharmonischen Bandagenschwingungen auftreten, ist der *RMV*-Wert erwartungsgemäß gleich Null.
- Genau das Gegenteil ist beim *CMV*-Wert zu beobachten; er hat seine Stärken im Betriebszustand Abheben, wo er einen annähernd linearen Zusammenhang mit der Bodensteifigkeit aufweist.
- Ab dem Betriebszustand Springen reagieren die beiden Messwerte relativ ähnlich. Nach einem signifikanten Einbruch des *CMV*-Wertes und einem weniger stark ausgeprägten Rückgang des *OMEGA*-Wertes, steigen die Werte wieder an, um bei “vollem Springen” (Bodenkontakt der Bandage nur bei jeder zweiten Unwuchtumdrehung) einen nahezu linearen Verlauf anzunehmen.

Der *RMV*-Wert, welcher einen Indikator für den Sprungbetrieb darstellt, steigt erwartungsgemäß ab dem "beginnenden Springen" empfindlich an.

Praxisrelevant für die walzenintegrierte Verdichtungskontrolle, sind im Prinzip nur die drei Zustände Kontakt, Abheben und Springen, da in den Zuständen Taumeln bzw. Chaos eine geregelte Verdichtung ohnehin nicht mehr möglich ist (siehe Kapitel 2.5).

In [5] wurden von *Adam* und *Kopf* numerische Untersuchungen von FDVK-Messwerten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.2 zusammengefasst.

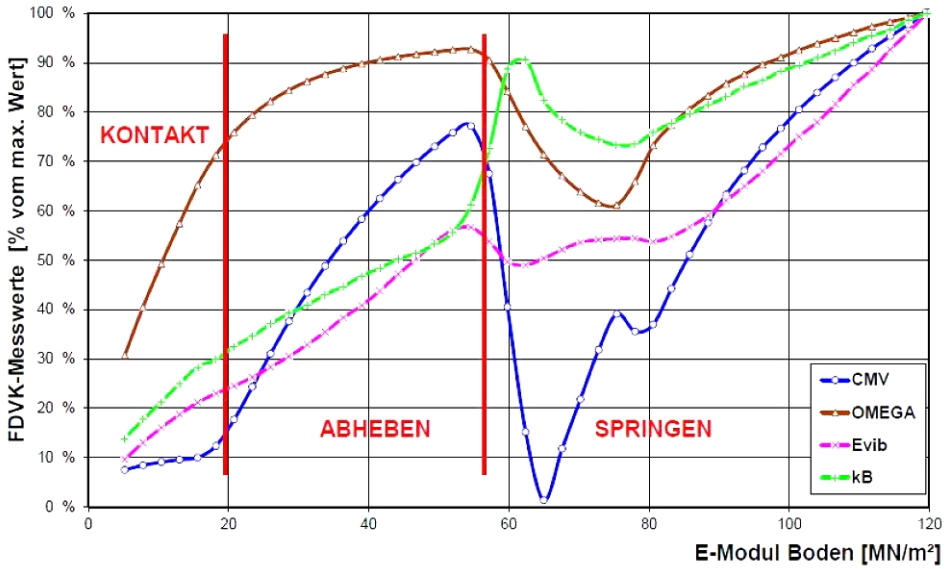


Abbildung 5.2: Relative FDVK-Werte (*CMV*, *OMEGA*, E_{vib}und k_b) in Abhängigkeit des *E-Moduls* [MN/m^2] des Bodens, bestimmt aus numerischen Simulationen [5].

- Im Kontaktbetrieb ist eine gewisse lineare Abhängigkeit des *OMEGA*-, E_{vib}- und k_b-Wertes von der Bodensteifigkeit deutlich zu erkennen, während der *CMV*-Wert relativ konstant bleibt.
- Während des Abhebens erweist sich der *OMEGA*-Wert als der am wenigsten empfindliche Messwert auf die Erhöhung der Bodensteifigkeit, ganz im Gegensatz zum *CMV*-Wert.

Basierend auf einem von *Wolf* in [67] verwendeten Simulationsmodell (sog. Konusmodell zur Modellierung des elastisch - isotropen Halbraumes), zur Beschreibung der dynamischen Effekte bei der Verdichtung, wurden neben [1, 45] auch in [48] von *Kopf*

und *Erdmann* weitere Parameterstudien im Zuge von numerischen Untersuchungen zum Vergleich von FDVK-Messwerten angestellt.

Die daraus entstandenen vier Darstellungen in Abbildung 5.3, ermöglichen einen objektiven Vergleich der unterschiedlichen FDVK-Messgrößen und eignen sich deshalb zur Beurteilung ihrer Stärken und Schwächen in den jeweiligen Betriebszuständen, sowie ihrer Empfindlichkeit auf die Variation von Bodensteifigkeit und Amplitude.
Der Abstand der Iso-Linien beschreibt dabei die Sensibilität der Werte gegenüber einer Änderung der Bodensteifigkeit bzw. des Grades der dynamischen Erregung.
Je steiler die Iso-Linien gegen die x-Achse (E-Modul) ansteigen, desto unempfindlicher ist der Wert gegenüber der Variation der dynamischen Erregung.
Ein Messwert mit äquidistanten, senkrechten Iso-Linien über den ganzen Steifigkeitsbereich, wäre also demnach am wünschenswertesten und würde die "ideale Messgröße" darstellen.
Die Erhöhung des E-Moduls [MN/m²] (Abszisse) simuliert dabei den Verdichtungsfortschritt des homogenen Untergrunds, der Vario-Faktor [-] (Ordinate) beschreibt die Verstellbarkeit der dynamischen Anregung (Amplitude) der Vibrationswalze.
Jeweils rechts findet man eine Legende mit Wertebereich und Farbzuordnung.

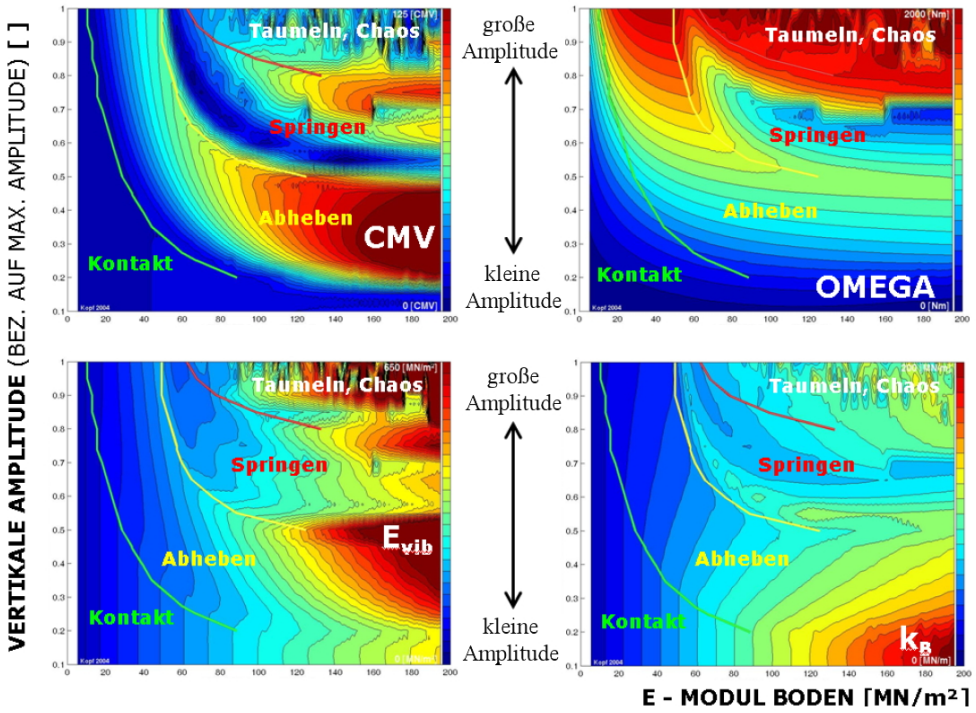


Abbildung 5.3: Graphische Darstellung von FDVK-Messwerten (*CMV*, *OMEGA*, E_{vib} und k_b) aus Simulationsberechnungen [48].

Von *Kopf* und *Erdmann* wurden in [48] darüber hinaus Ergebnisse aus FEM Berechnungen publiziert, deren Erkenntnisse sich weitgehend mit jenen aus den Simulationsberechnungen decken. Sie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Einfluss des Betriebszustandes der Bandage auf den FDVK-Wert:

  Betrachtet man beispielsweise den *CMV*-Wert bei einem Abminderungsfaktor von 0,8, so lässt sich die ausgeprägte Abhängigkeit des Messwertniveaus von den einzelnen Betriebszuständen besonders deutlich erkennen.
  Während im Kontaktbetrieb nahezu kein Werteanstieg erkennbar ist, steigt der *CMV*-Wert im Modus Abheben stetig an. Beginnt die Bandage nun zu Springen, so reagiert der Messwert mit einem schlagartigen Abfall des Messniveaus, um dann jedoch erneut anzusteigen und schlussendlich, im Übergang zum Zustand Chaos, völlig seine Aussagekraft zu verlieren.
  Generell weisen *CMV*- und *OMEGA*-Wert eine große Empfindlichkeit gegenüber dem Betriebszustand auf. E_{vib}- und k_b-Wert sind qualitativ gesehen nahezu gleichwertig, wenn sich die Bandage im Zustand des ständigen Kontakts oder im Abhebezustand befindet.

- Der *CMV*-Wert zeigt im Betriebszustand Kontakt, unabhängig von der Bodensteifigkeit, ein sehr niedriges und konstantes Niveau.
  Im Betriebszustand Abheben nimmt er mit zunehmender Bodensteifigkeit rasant zu. Auch die Amplitudenabhängigkeit ist hier deutlich zu erkennen. Demnach wird eine höhere Erregerkraft auch einen größeren *CMV*-Wert für denselben Boden ergeben.

- Der *OMEGA*-Messwert reagiert in den Zuständen Kontakt und Abheben bei konstanten Amplituden wesentlich unempfindlicher auf steigende Bodensteifigkeiten (waagrechte Isolinien) als die übrigen drei Messwerte.

- Der E_{vib}-Wert reagiert in den Zuständen Kontakt und Abheben sehr empfindlich auf eine Änderung der Bodensteifigkeit, er steigt nahezu linear an. Eine Amplitudenabhängigkeit im Betriebsmodus Kontakt ist nahezu nicht vorhanden. Erst mit Zunahme der Bodensteifigkeit im Zustand Abheben reagiert der E_{vib}-Wert auf den Grad der dynamischen Erregung sensibler.

- Der k_b-Wert reagiert in den Zuständen Kontakt und Abheben ähnlich wie der E_{vib}-Wert, mit dem Unterschied, dass im Betriebszustand Abheben mit zunehmender Bodensteifigkeit und gleichzeitiger Steigerung der Amplitudengröße das Messwertniveau sinkt.

- Es lässt sich eine deutlich ausgeprägte Abhängigkeit der dimensionslosen "alten" *CMV*- und *OMEGA*-Messwerte von der Größe der dynamischen Anregung (vertikale Erregeramplitude), der Untergrundsteifigkeit und dem Bewegungsmuster der Bandage erkennen. Die "neueren" E_{vib}- und k_b-Werte reagieren auf eine Änderung des Betriebszustandes deutlich unempfindlicher und sind auch wesentlich amplitudenunabhängiger, da sie speziell für Walzen mit variabler Amplitude entwickelt wurden. Eine gewisse Abhängigkeit vom Grad der dynamischen Erregung, ist aber dennoch zu beobachten.

Es sei an dieser Stelle nochmals angemerkt, dass die Zusammenhänge zwischen den FDVK Größen in den jeweiligen Betriebszuständen der Bandage zwar qualitativ (verlaufsmäßig) auf alle Walzen-Boden Kombinationen übertragbar sind, jedoch quantitativ (wertemäßig) aufgrund immer unterschiedlicher Walzen- und Bodenparameter klarerweise nicht übereinstimmen können; jede Systemeinheit aus Bodeneigenschaften und Walzenparametern ist unterschiedlich.

5.2 Vorbemerkungen zur Auswertung

Bevor in Kapitel 5.3 die Ergebnisse der Auswertungen dargestellt und diskutiert werden, sollen diesbezüglich noch einige grundlegende Anmerkungen und Informationen gegeben werden.

5.2.1 Vorgehensweise bei der Berechnung

Alle FDVK-Messwerte wurden aus den gemessenen Basisdaten, gewonnen aus den experimentellen Feldversuchen, mit Hilfe des Softwarepaketes *MATLAB (R2012b)*[*] und nach den bereits in Kapitel 3.6 vorgestellten Formeln, ermittelt.
Eben angesprochene Rohmessdaten bilden dabei das Fundament und stellen den Ausgangspunkt aller gewonnen Erkenntnisse im Folgenden dar. Wesentliche Berechnungsschritte und Vorgehensweisen auf dem Weg dorthin, werden nachfolgend ausformuliert und zusammengefasst.

Der dimensionslose *CMV*-Wert (Compaction Meter Value) stellt einen Relativwert dar und wird im Frequenzbereich ausgewertet. Das Vertikalbeschleunigungssignal der

[*] *MATLAB* (als Kürzel für MATrix LABratory) ist eine höhere Programmiersprache und interaktive Umgebung für numerische Berechnungen, Visualisierung und Programmierung, entwickelt vom US-amerikanischen Unternehmen *TheMathWorks, Inc.*

Bandage wird dabei einer diskreten Fouriertransformation in Form einer FFT (Fast Fourier Transformation) unterzogen und somit in sein gesamtes Frequenzspektrum (u. a. die Grundschwingung, sowie Schwingungen bei jedem ganzzahligem Vielfachen der Grundfrequenz; bei Sprungbetrieb aufgrund der Periodenverdopplung zudem Schwingungen mit der halben Erregerfrequenz und wiederum ganzzahlige Vielfache davon) zerlegt.
Der Messwert wird dann als Verhältnis der Amplitude bei doppelter Erregerfrequenz zur Amplitude der Erregerfrequenz, multipliziert mit einem willkürlich wählbaren, konstanten Faktor, der im Allgemeinen mit 300 festgelegt ist, angegeben (siehe Gleichung 3.1). Der *CMV*-Wert stellt im Wesentlichen ein Maß für den Grad der Nichtlinearität zwischen Walze und Boden dar.
Zudem wird ein weiterer Messwert, der *RMV*-Wert (Resonance Meter Value), welcher als ein Indikator für Sprungbetrieb gilt, definiert. Zur Ermittlung wird die Relation zwischen der Beschleunigungsamplitude bei halber Erregerfrequenz zur Amplitude der Grundschwingung bestimmt und mit dem Faktor 100 multipliziert (siehe Gleichung 3.2). Ist also die Amplitude bei halber Grundfrequenz des vertikalen Beschleunigungssignals ungleich 0, so befindet sich die Walze im Sprungbetrieb.
Beide Messwerte wurden mit Hilfe eines an der Walze installierten Compactometer Systems während der Messfahrten aufgezeichnet ($CMV_{gemessen}$, $RMV_{gemessen}$) und zum Vergleich auch aus den Signalen der unabhängigen Beschleunigungsmessungen berechnet ($CMV_{gerechnet}$, $RMV_{gerechnet}$).

Durch Multiplikation der schwingenden Masse inkl. sämtlicher unwuchterzeugender Anteile mit der gemessenen Vertikalbeschleunigung, reduziert um die Erregerkraft, kann die Bodenkontaktkraft ermittelt werden. Der Schwingweg der Bandage errechnet sich durch zweimalige Integration des Vertikalbeschleunigungssignals. Aus Kontaktkraft und Schwingweg kann für jede Exzenterumdrehung ein sogenanntes Arbeitsdiagramm angefertigt werden.
Die Fläche unter diesem Diagramm entspricht dabei der von der Walze effektiv in den Boden eingebrachten elastischen Verdichtungsenergie. Der *OMEGA*-Messwert beschreibt nun genau jene in den Boden eingetragene Energie und wird für eine Zeitdauer von 2 Perioden angegeben, um den Einfluss des Sprungbetriebes auf das Messwertniveau so gut wie möglich minimieren zu können.
$Faktor_3$ in Gleichung 3.9 stellt eine willkürlich gewählte Bezugsenergie dar, um letztendlich einen dimensionslosen Messwert zu erhalten. Er wurde jedoch in den Berechnungen nicht berücksichtigt, weshalb der *OMEGA*-Wert im Folgenden in der Einheit [Nm pro 2-facher Unwuchtumdrehung] angegeben wird.

Sowohl der E_{vib} [MN/m²], als auch der k_b-Wert [MN/m] werden, wie der OMEGA-Messwert, aus dem Arbeitsdiagramm abgeleitet. Allerdings spielt bei der Ermittlung der beiden Erstgenannten nun die Steigung der Arbeitslinie in der Belastungsphase die wesentliche Rolle. Diese beiden "neueren" Messwerte wurden speziell für Walzen mit veränderlichen Parametern entwickelt und stellen, wie an deren Einheiten erkennbar, bauphysikalische Größen dar. Der k_b-Wert beschreibt infolge dessen eine Steifigkeitsgröße, der E_{vib}-Wert im Gegensatz dazu, einen dynamischen Vibrationsmodul.
Der Vorteil bei der Verwendung des Moduls zur Beurteilung des Verdichtungszustandes ist, dass dieser nur von den Bodeneigenschaften, nicht aber von Walzengrößen wie Bandagendurchmesser, Bandagenbreite, schwingender Masse etc. abhängig ist. Theoretisch bedeutet dies, dass der E_{vib}-Wert als quasi unabhängig von der Verdichtungsmaschine angesehen werden kann.
Die Firma *AMMANN* rechtfertigt die Verwendung einer Steifigkeitsgröße zur Beschreibung der Untergrundeigenschaften mit dem Argument, dass die Aufstandsfläche der Bandage auf dem Untergrund, deren Kenntnis für die Umrechnung zum Modul unumgänglich ist, nur näherungsweise und nicht exakt ermittelt werden kann (siehe Gleichung 3.10). Der technische Vorteil der Verwendung einer Steifigkeit ist also das zu Grunde liegende physikalische Modell, welches gewissermaßen eine Verifikation von Theorie und Praxis ermöglicht (siehe Kapitel 3.6.4.2).

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die auf vorliegende Art und Weise ermittelten Messwerte, quantitativ nicht zu 100% mit jenen Größen übereinstimmen müssen, die sich aus Überfahrten mit den jeweiligen Messsystemen ergeben würden. Der Grund dafür liegt an einer nicht auszuschließenden, firmenspezifisch programmierten Faktorisierung der FDVK-Werte mit Referenzwerten (siehe z.B. Faktor 3 in Gleichung 3.9) oder sonstigen, ähnlichen Filterungsmaßnahmen.

5.2.2 Allgemeine Bemerkungen

Alle mit vibratorisch erregter Bandage durchgeführten Messfahrten, im Speziellen die dabei gewählten Walzenparametereinstellungen (Frequenz, Amplitude, Geschwindigkeit), besondere Vorkommnisse während der Fahrten (Sensorausfälle, technische Probleme mit der Messausrüstung, etc.) und die Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche wurden in Form von Messprotokollen (siehe Kapitel 4.5) dokumentiert. Der Dokumentation der Vorkommnisse während der Messfahrten, egal in welcher

Form diese auch stattfindet (Protokoll, Foto, Video), kommt nicht nur, aber im Besonderen bei derart groß angelegten Versuchsreihen, besondere Bedeutung zu. Nur so können die Nachvollziehbarkeit der Daten zu einem späteren Zeitpunkt gewährleistet und eventuell auftretende Verwechslungen und Unstimmigkeiten, die in weiterer Folge womöglich zu falschen Erkenntnissen führen, von vornherein weitestgehend ausgeschlossen werden.

Auf jeder einzelnen Spur wurde ein eigenes, im Vorfeld genau festgelegtes und wohlüberlegtes Versuchsprogramm gefahren, bei dem die Einstellungen von Frequenz, Amplitude und Geschwindigkeit systematisch variiert wurden. Dabei wurde jede Überfahrt von einer anschließenden Wiederholungsfahrt (bei der die eingestellten Parameter gleich blieben) gefolgt, um einerseits die Reproduzierbarkeit der Messwertverläufe überprüfen zu können und andererseits das Risiko von unbrauchbaren Messdaten bzw. Sensorausfällen zu minimieren.
Um ein breiteres Spektrum an Walzenparametereinstellungen für die Fahrten abdecken zu können, wurde die Walze dahingehend von der Firma *HAMM AG* eigens modifiziert. Neben der Geschwindigkeit, die zwischen 2 und 6 km/h gewählt wurde, konnte die Erregerfrequenz der Unwucht in einer Bandbreite von 20-60 Hz variiert werden. Die Exzentrizität der Unwucht war zwischen 0,62 mm ("groß" - Drehrichtung der Unwucht in Fahrtrichtung) und 0,34 mm ("klein" – Drehrichtung gegen die Fahrtrichtung) zu wählen.

Um alle grundlegenden "Rohmessdaten", die zur Berechnung der FDVK-Messwerte notwendig sind, aus den getätigten experimentellen Walzenmessfahrten gewinnen zu können, musste die Walze im Vorhinein mit einem gut durchdachten und sorgfältig geplanten Messwerterfassungssystem ausgestattet werden.
Diese Messsensorik hatte hohen Anforderungen zu genügen. Neben den Belastungen aus dem Walzvorgang an sich, musste das System auch den Baustellenbedingungen wie Witterung, Temperatur, etc. standhalten und zudem in der Lage sein, große Datenmengen mit einer hohen Messrate abzuspeichern. Eine weitere Herausforderung bestand darin, den Aufbau der Messkette möglichst flexibel zu gestalten, um auf Ausfälle einzelner Komponenten (oder sonstige unvorhersehbare Umstände) rasch reagieren zu können.
Trotz aller Sorgfalt kam es vereinzelt zu unvermeidbaren Messwertaufnehmer- und Sensorausfällen bzw. zu Messfahrten, bei denen die Elektronik erst zeitverzögert, wie etwa nach Absolvierung der halben Teststrecke, verwertbare Daten aufzeichnete. Unvollständige und fehlerbehaftete Messdaten, bedingt durch den ganzzeitigen

oder teilweisen Ausfall von Sensoren oder dergleichen, mussten bei der Auswertung zwangsläufig ignoriert werden.

Die Signale wurden, wie bereits erwähnt, mit Hilfe des Softwarepaketes *MATLAB* aufbereitet und mathematisch handhab- bzw. verwertbar gemacht, um schlussendlich im Frequenz- bzw. Zeitbereich ausgewertet zu werden. Im Zuge dessen wurden die Daten im Allgemeinen keiner speziellen Filterung unterzogen. Die Eingangssignale wurden mit einer Samplerate *fs* von 1000 Hz abgetastet und nach dem Motto: "So viel wie nötig, so wenig wie möglich" geglättet. Ziel war es, die Ergebnisse so aussagekräftig und unverfälscht wie nur möglich darstellen zu können. War eine Signalglättung (Dämpfung) bzw. -filterung für eine aussagekräftige Darstellung dennoch unumgänglich, so geschah dies zu jederzeit und für alle Messfahrten in gleichem Ausmaß, um die Vergleichbarkeit der Messwerte untereinander gewährleisten zu können.
Da beim Ein- respektive Ausschaltvorgang der Vibration (Hoch- bzw. Runterfahren der Unwuchterregung), jeweils am Beginn bzw. Ende einer Walzenüberfahrt, kontinuierlich das gesamte Frequenzspektrum bis zum gewünschten Wert durchfahren wird, sind etwaige, zu diesen Zeitpunkten auftretende "Peaks" in den FDVK-Messwertverläufen, diesem Umstand geschuldet und dementsprechend zu bewerten. Um diesen Effekt weitestgehend auszuschalten und einen bereits "eingeschwungenen Zustand" der Bandage garantieren zu können, wurden alle Messwertverläufe mit einem eigens programmierten Vibro-Faktor multipliziert, welcher nur dann Werte ungleich Null annimmt, wenn die gewünschte Frequenz zu mindestens 90 % erreicht wurde.
Die beidseitig an der Lagerschale der Bandage gemessenen Vertikal- sowie Horizontalbeschleunigungen wurden für die Berechnungen gemittelt.
Um die Position der Bandage einmal pro Umdrehung exakt bestimmen zu können, wurde ein induktiver Näherungsschalter installiert, dessen Aufgabe es war, bei jeder Umdrehung einen elektrischen Impuls zu geben. Da dieser Schalter jedoch keine verwertbaren Aufzeichnungen lieferte, mussten jene für die Berechnung der Erregerkraft notwendigen Informationen (Phasenwinkel bzw. Phasenverschiebung zwischen Unwucht und Bandage), aus dem Horizontalbeschleunigungssignal gewonnen werden.

5.3 Auswertung der Überfahrten auf den Testspuren

Die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse hat selbstverständlich für jede Spur getrennt zu erfolgen, und ist innerhalb dieser auch nur für jene Testfahrten sinnvoll, bei denen lediglich ein und derselbe Parameter variiert wurde.
Klarerweise können im Rahmen vorliegender Arbeit nicht alle Messfahrten in ihrer Gesamtheit abgehandelt und dargestellt werden. Die Auswahl beschränkt sich deshalb im Folgenden auf jene Überfahrten, welche die gewonnen Erkenntnisse am besten abzubilden vermögen.

5.3.1 Spur 2

Spur 2 wurde, ebenso wie Spur 3, auf dem vierspurigen Haupttestfeld mit einer 50 cm starken Schüttung aus sandigem Kies eingerichtet. Besonderes Augenmerk bei der Auswertung galt der künstlich erzeugten Schwachstelle, in Form von 2 handelsüblichen, nebeneinander verlegten 90 x 200 cm Matratzen. Sie sollte zeigen, inwieweit die Messwertverläufe auf die abrupte Steifigkeitsänderung in diesem Bereich der Fahrspur reagieren.
Nach jeder Walzenüberfahrt wurde an einer bestimmten Stelle der Fahrspur (siehe Abbildung 4.6) der dynamische Verformungsmodul E_{vd} mit dem leichten Fallgewichtsgerät ermittelt, um einen Referenztragfähigkeitswert zu erhalten und in weiterer Folge eine Korrelationsbildung mit den verschiedenen FDVK-Werten durchführen zu können. Diese Bereiche der Lastplattenversuche sind in den folgenden Grafiken mit "mean" gekennzeichnet.
Spur 2 erwies sich aufgrund der eingebetteten künstlichen Schwachstelle und den vorherrschenden Untergrundverhältnissen als interessanteste bzw. aussagekräftigste Teststrecke. Ihr wird aus diesem Grund besondere Beachtung geschenkt und demnach auch am ausführlichsten behandelt.

5.3.1.1 Dynamische Lastplatte

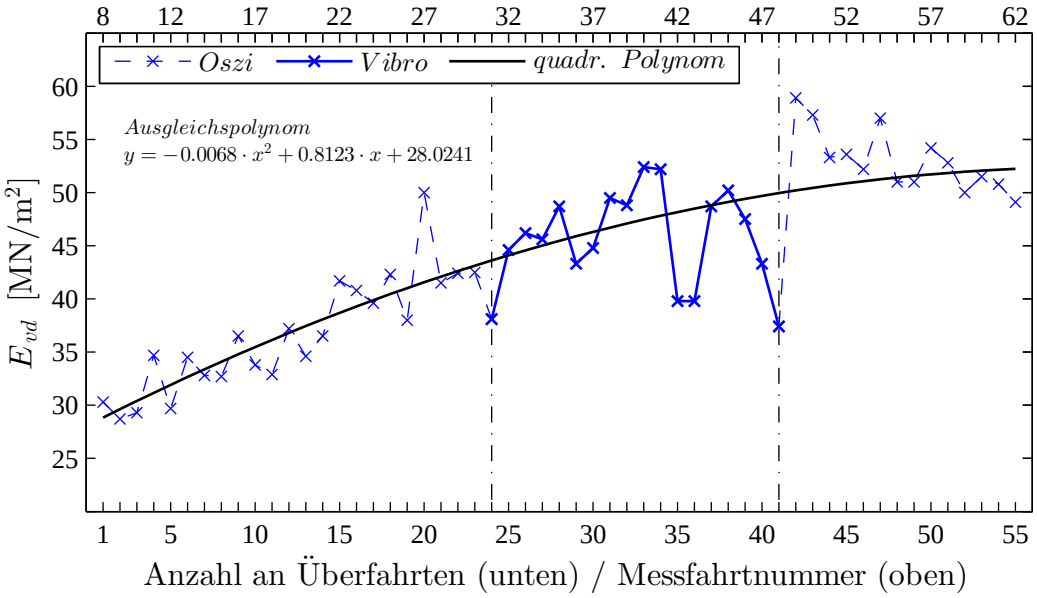


Abbildung 5.4: Entwicklung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} über alle durchgeführten Messfahrten auf Spur 2.

Abbildung 5.4 zeigt die Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche auf Spur 2. Die Ermittlung des E_{vd}-Wertes fand unmittelbar nach jeder Walzenüberfahrt, in dem aus Abbildung 4.6 ersichtlichen Bereich, statt.
Um die Entwicklung des Messwertes über alle, im Zuge dieser Versuchsreihe durchgeführten, Messfahrten auf Spur 2 besser beurteilen zu können, wurden neben den Vibrationsfahrten ebenso die Resultate aus den vor- bzw. nachher durchgeführten Oszillationsfahrten dargestellt. Es fällt auf, dass die E_{vd}-Werte von hintereinander getätigten Messungen durchaus erheblich streuen. Aufgrund dessen wurde zusätzlich ein Ausgleichspolynom 2. Grades abgebildet, um den Trend bestmöglich zu veranschaulichen. Des Weiteren ist zufolge der beträchtlichen Anzahl von vorher getätigten Walzüberfahrten mit oszillatorisch erregter Bandage, im Zuge der Vibrationsfahrten kaum mehr ein nennenswerter Verdichtungszuwachs zu verzeichnen.
Als angenehme Konsequenz dieser Tatsache können in weiterer Folge Änderungen in den berechneten FDVK-Messwertverläufen eindeutig der Variation der jeweiligen Walzenparameter bzw. den daraus resultierenden Betriebszuständen der Walze zugeschrieben werden. Änderungen der Verläufe infolge einer Erhöhung der Bodensteifigkeit können demnach zur Interpretation der FDVK-Werte getrost vernachlässigt werden.

5.3.1.2 Bandagenbeschleunigung

Die Vertikalbeschleunigung der Bandage kann als Grundlage sämtlicher FDVK-Messsysteme angesehen werden.
Für sämtliche Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit wurden die, beidseitig an der Lagerschale der Bandage gemessenen, Beschleunigungen gemittelt.
Abbildung 5.5 stellt beispielhafte Verläufe des Beschleunigungssignals dar.
Grafik 5.5.a zeigt, anhand von Messfahrt 34, einen Ausschnitt des Vertikalbeschleunigungssignals über der Schwachstelle. Das Schwingungsverhalten beschreibt dabei einen annähernd sinusförmigen Verlauf; die Bandage befindet sich im Kontaktbetrieb.
Grafik 5.5.b beschreibt das Bewegungsverhalten der Bandage, während der Messfahrt 48, im Bereich "mean". Im Vergleich zu MF 34, ist hier die resultierende Bodenkontaktkraft bereits groß genug, um das Signal, wenn auch nur geringfügig, zu verzerren. Es ist zwar noch periodisch, aber nicht mehr harmonisch. Zudem kann ein Werteanstieg auf 60 m/s² beobachtet werden.

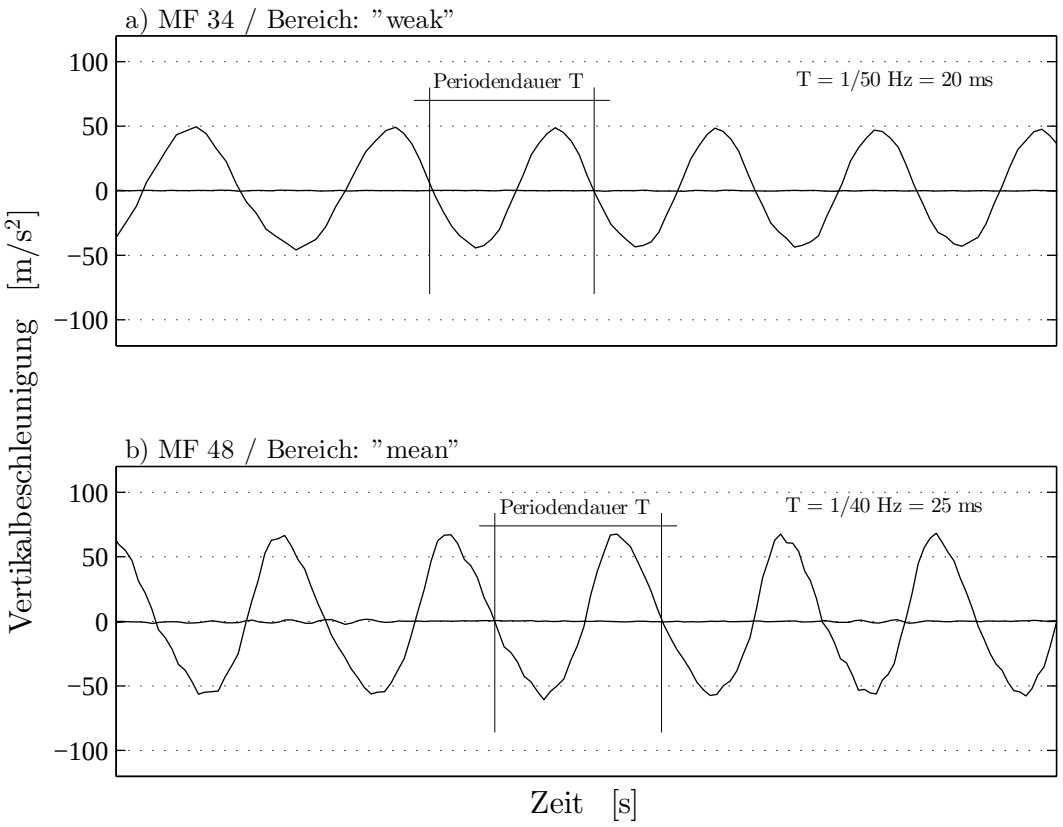


Abbildung 5.5: Ausschnitt der gemessenen vertikalen Bandagenbeschleunigung im Bereich "weak" (oben) und "mean" (unten) für ausgewählte Messfahrten auf Spur 2.

5.3.1.3 Vertikale Kräfte - Betriebszustand

Wie von *Adam* bereits 1996 erstmals theoretisch und experimentell untersucht [1], werden die FDVK-Messwertverläufe und deren Werteniveaus signifikant vom Betriebszustand der Walze beeinflusst.
Das vorherrschende Bewegungsverhalten der Walze ist dabei von den jeweiligen Walzenparametern (statische Achslast der Bandage, schwingende Masse, Masse der Unwucht, Fahrgeschwindigkeit, Erregerfrequenz, Amplitude) und den gegebenen Bodeneigenschaften bzw. deren Abstimmung abhängig. Die Kenntnis darüber, in welchem Betriebszustand die Walze verdichtet, ist also essentiell für eine richtige Interpretation der Messwerte.
Dies bedingt, dass FDVK Werte die in unterschiedlichen Betriebszuständen gemessen wurden, nicht ohne weiteres unmittelbar miteinander vergleichbar sind. Ein etwaiger Betriebszustandswechsel ist, bei der Diskussion der Messwerte, jedenfalls zu berücksichtigen.
Aus diesem Grund werden in den folgenden grafischen Darstellungen, soweit dies nötig und sinnvoll erscheint, die jeweiligen Betriebszustände mit deren Anfangsbuchstaben (wie etwa *"K"* für Kontakt, *"A"* für Abheben, *"S"* für Springen, etc.) abgekürzt. Der Übergang von Kontaktbetrieb zum Abheben wird dabei mit "*K(A)*" gekennzeichnet.

Auf Spur 2 befand sich die Walze bis einschließlich Messfahrt 42, sowohl im Bereich oberhalb der Schwachstelle (Bezeichnung "weak", siehe Abbildung 5.8), als auch im homogenen Bereich (Bezeichnung "mean") der vergleichenden dynamischen Lastplattenversuche im Kontaktbetrieb.
Erst ab Messfahrt 43 hob die Walze bei jeder Unwuchtumdrehung kurzzeitig vom Boden ab. Bereiche über der Schwachstelle sind davon ausgenommen. Dort wahrte sie, aufgrund der geringen Untergrundsteifigkeit, über alle getätigten Messfahrten Kontakt mit dem Untergrund.
Die Erklärung für das niedrige Werteniveau der auftretenden Bodenkontaktkräfte liegt in den mit 0.34 mm (kleine Amplitude) bzw. 0.62 mm (große Amplitude) sehr kleinen Schwingungsamplituden begründet, die man eher aus der Asphaltverdichtung kennt. Weitere Gründe, resultierend aus den geringen Amplituden und der kleinen Exzentermasse, stellen die niedrige Erregerkraft, sowie die, auf nur 1770 kg begrenzte, schwingende Masse, dar .

Aus nachfolgender Abbildung sind exemplarisch die beiden auf Spur 2 auftretenden Bewegungsmuster der Walze, anhand der Verläufe der Bodenkontaktkraft ersichtlich. Für den vertikalen Anteil der Kräfte sind jeweils die Beschleunigungskraft F_{beschl}, die

Erregerkraft F_{err} unter Berücksichtigung der statischen Gewichtskraft F_{stat}, sowie deren Differenz in Form der Bodenkontaktkraft F_b angegeben.

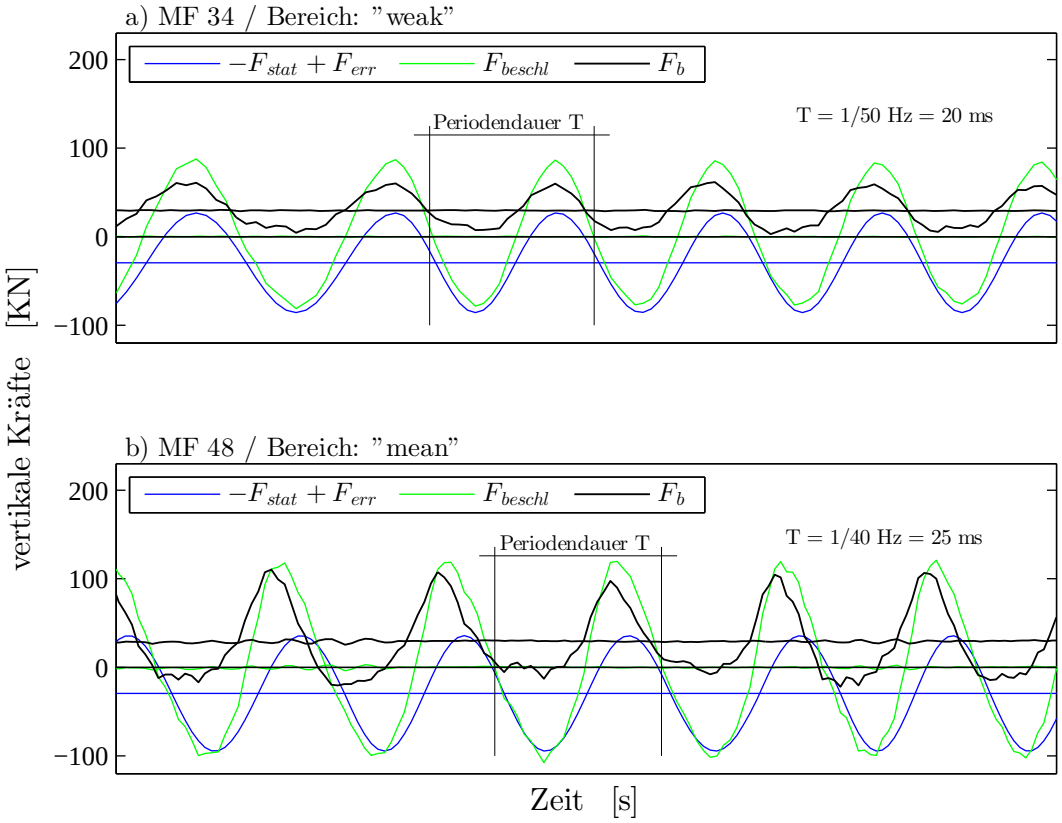


Abbildung 5.6: Darstellung der vertikalen Kräfte und der daraus resultierenden Bodenkontaktkraft F_b für ausgewählte Messfahrten auf Spur 2.

Abbildung 5.6.a zeigt den Betriebszustand Kontakt. Dabei verliert die Walze zu keiner Zeit den Kontakt zum Untergrund. Die Bodenkontaktkraft nimmt stets positive Werte an.
In jenen Phasen, in denen die Bodenkontaktkraft Null ist bzw. negative Werte annimmt (Zugkräfte in Form von negativen Kontaktkräften sind selbstverständlich nicht übertragbar und werden hier nur plakativ dargestellt), hebt die Bandage vom Boden ab, um innerhalb der selben Unwuchtumdrehung wieder aufzuschlagen. Untergrund und Walzentrommel bewegen sich dabei also kurzfristig voneinander entkoppelt (Zustand Abheben in Abbildung 5.6.b).

5.3.1.4 FDVK-Messwerte

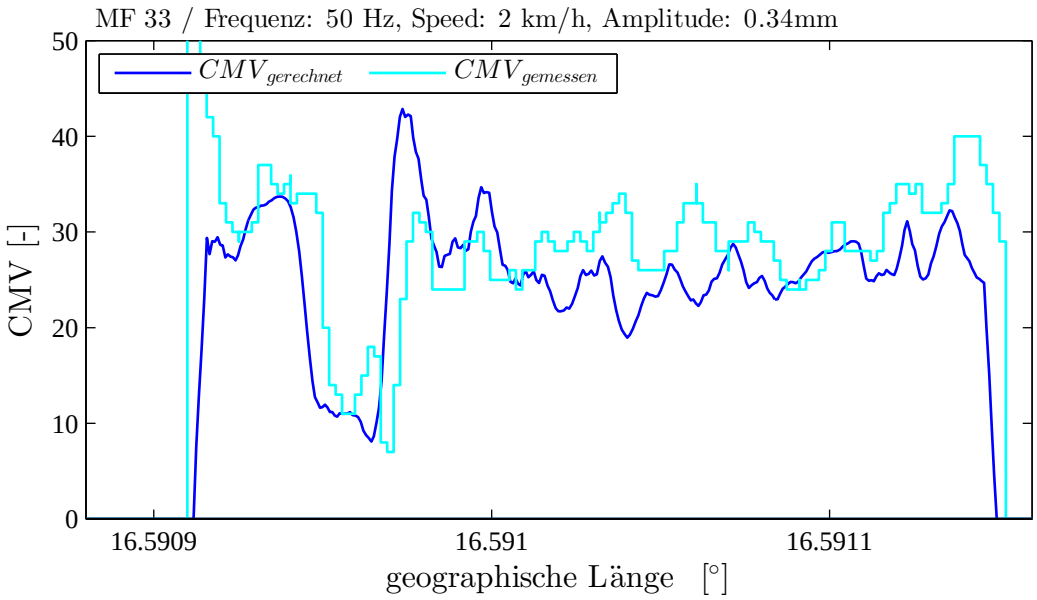


Abbildung 5.7: Vergleich des mittels Compactometer gemessenem und dem aus unabhängigen Beschleunigungsmessungen errechnetem *CMV*-Wertes.

Der, aus einer Frequenzanalyse des Vertikalbeschleunigungssignals (FFT) berechnete, *CMV*-Wert stimmt gut mit dem gemessenen Wert des *Compactometers* überein. In Abbildung 5.7 wurden die Daten aus MF 33 ausgewertet und dargestellt.
Da die Walze nicht im Sprungbetrieb verdichtet und sich diesem auch nicht nähert, ist der *RMV*-Wert klarerweise gleich Null. Weiters ist eine geringfügige Phasenverschiebung der Verläufe (der gemessene hinkt dem gerechneten *CMV*-Wert zeitlich hinterher) zu erkennen, welche vermutlich auf eine interne Filterung bzw. Dämpfung im System des *Compactometers* zurückzuführen ist.
Eine weitere Interpretationsmöglichkeit besteht darin, dass der *CMV*-Wert im Prozessor über mehrere Messabschnitte ermittelt wird, mit der Absicht die Ablesbarkeit des Wertes auf dem Display zu verbessern. Auf diese Weise können konstantere Werte angezeigt und somit übermäßiges Schwanken unterdrückt werden.

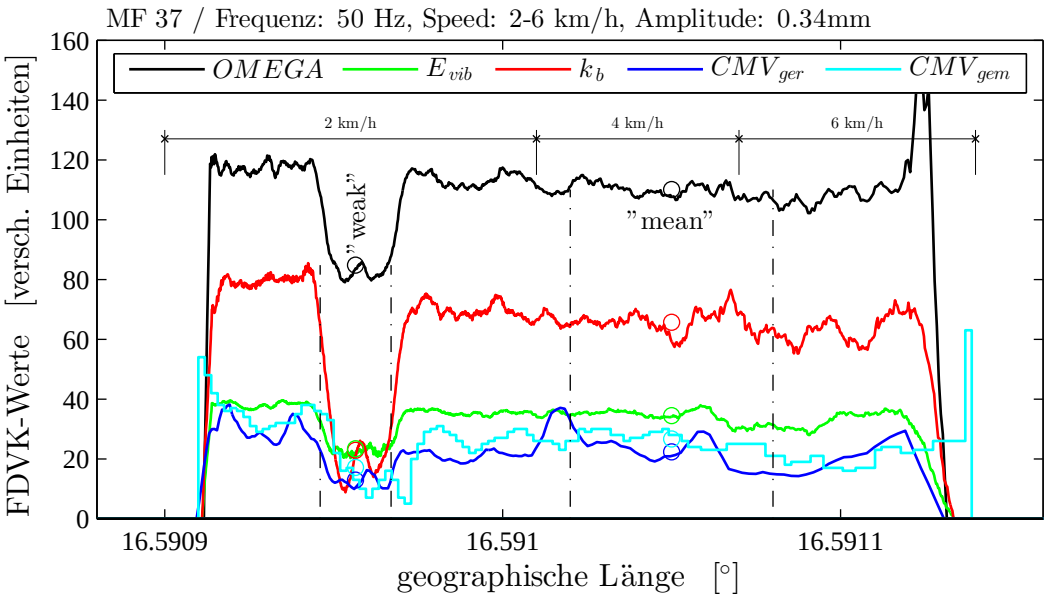


Abbildung 5.8: Darstellung der FDVK-Werte über die gesamte Messfahrt 37.

Abbildung 5.8 zeigt die FDVK-Messwertverläufe aus Messfahrt 37. Diese Testfahrt wurde mit einer kontinuierlichen Geschwindigkeitssteigerung während der Überfahrt von 2 auf 6 km/h durchgeführt. Die praktische Umsetzung dieser Idee war nicht einfach zu bewerkstelligen, da die Walze natürlich eine gewisse Reaktionszeit benötigt, um auf die Geschwindigkeitsänderung zu reagieren und diese dann auch konstant zu halten um erneut auf ein anderes Geschwindigkeitsniveau zu schalten.
Dennoch kann bei allen FDVK-Messwerten eine geringe Abnahme des Messwertniveaus bei Steigerung der Überfahrtgeschwindigkeit beobachtet werden. Mit anderen Worten bedeutet dies: je schneller der Untergrund überfahren wird, desto "weicher" erscheint er. Die FDVK-Werte weisen demnach eine gewisse Geschwindigkeitsabhängigkeit auf, wie unter anderem bereits Hartmann [38] bei seinen Untersuchungen erkannte.
Der ersichtliche kurzzeitige Anstieg der Messwerte über der Schwachstelle erklärt sich aus einer gewissen Auseinanderschiebung der Matratzen, die mit der Anzahl der Walzübergänge stattgefunden haben dürfte. Der Boden tritt dabei an der Nahtstelle durch und lässt auf diese Weise die Messwerte kurzzeitig ansteigen.

In der Regel nehmen FDVK-Messwerte mit zunehmender Anzahl der Übergängen zu. Die Absolutbeträge, sowie die Zuwachsrate der Werte von Übergang zu Übergang, hängen dabei vor allem von der Größe der Walze und deren Parametereinstellungen, sowie von den Eigenschaften des zu verdichtenden Materials bzw. der Unterlage ab.

Da sich, wie bereits durch die Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche bekannt, mit der vorhandenen Walze kein nennenswerter Verdichtungszuwachs mehr erzielen ließ, können Änderungen der Messwerte, so eindeutig der jeweiligen Parametervariation zugeschrieben werden.
Wie bereits eingangs erwähnt, ist es allerdings nur sinnvoll FDVK-Werte und Verläufe aus Testfahrten, bei denen lediglich ein und derselbe Parameter variiert wurde, miteinander zu vergleichen.

Auf Spur 2 ergeben sich demnach 3 Bereiche, die jeweils für sich zu diskutieren sind:

- Bereich 1 mit MF 31 - 38: Geschwindigkeitsvariation bei konstanter Frequenz von 50 Hz und einer Amplitude von 0.34 mm.
- Bereich 2 mit MF 39 - 44: Frequenzänderung bei konstanter Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.34 mm.
- Bereich 3 mit MF 45 - 48: Frequenzänderung bei konstanter Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.62 mm.

Innerhalb der festgelegten Teststreckenabschnitte “weak” und “mean” (ersichtlich aus Abbildung 5.8) wurden jeweils die Mittelwerte einer jeden FDVK-Messgröße ermittelt (mit “o” gekennzeichnet), mit dem Endzweck die wertemäßige Entwicklung der Messwerte, an jenen markanten Stellen, über die Gesamtheit aller getätigten Messfahrten übersichtlich darstellen und untersuchen zu können.
Die FDVK-Werte können somit nun bestmöglich auf ihre Sensibilität gegenüber veränderten Parametereinstellungen untersucht werden.

Zudem wurden die Werte aus den Abbildungen 5.9 und 5.11 durch die Mittelwerte der zugehörigen Bereiche dividiert. Auf diese Weise erhält man normierte und dimensionslose Messwerte, die sich besonders gut zur Veranschaulichung der qualitativen Entwicklung und vor allem zum Vergleich der einzelnen FDVK-Messgrößen untereinander eignen.
Der Übersichtlichkeit halber, wird in den folgenden Grafiken auf eine Darstellung des errechneten CMV-Wertes verzichtet.

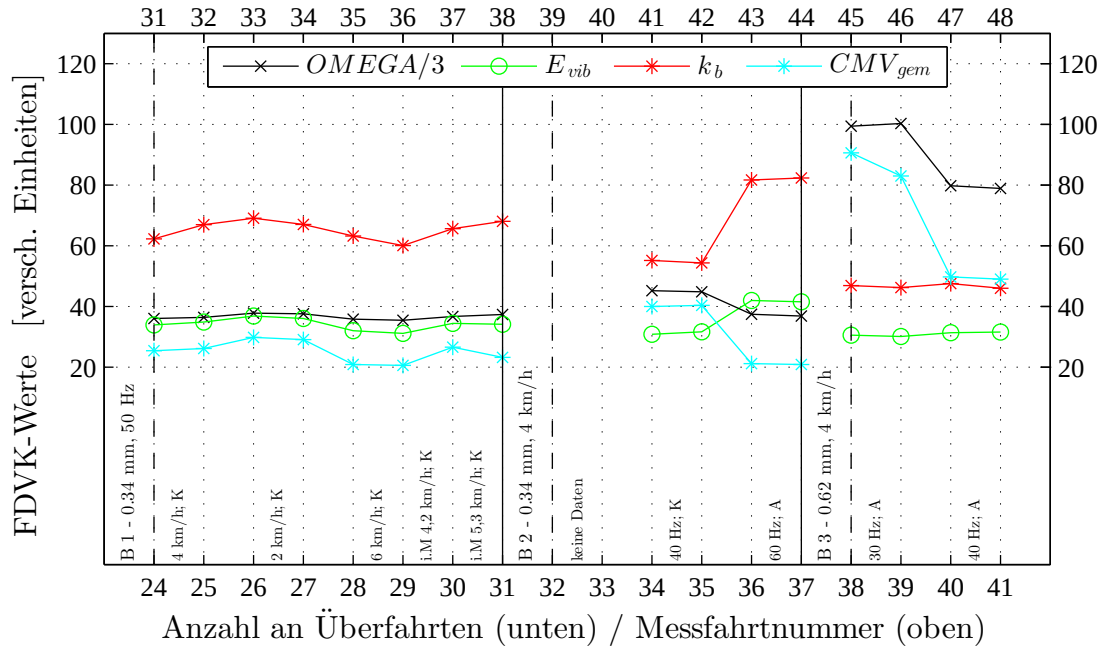


Abbildung 5.9: Entwicklung der im Abschnitt “mean” gemittelten FDVK-Werte über die gesamten Messfahrten auf Spur 2.

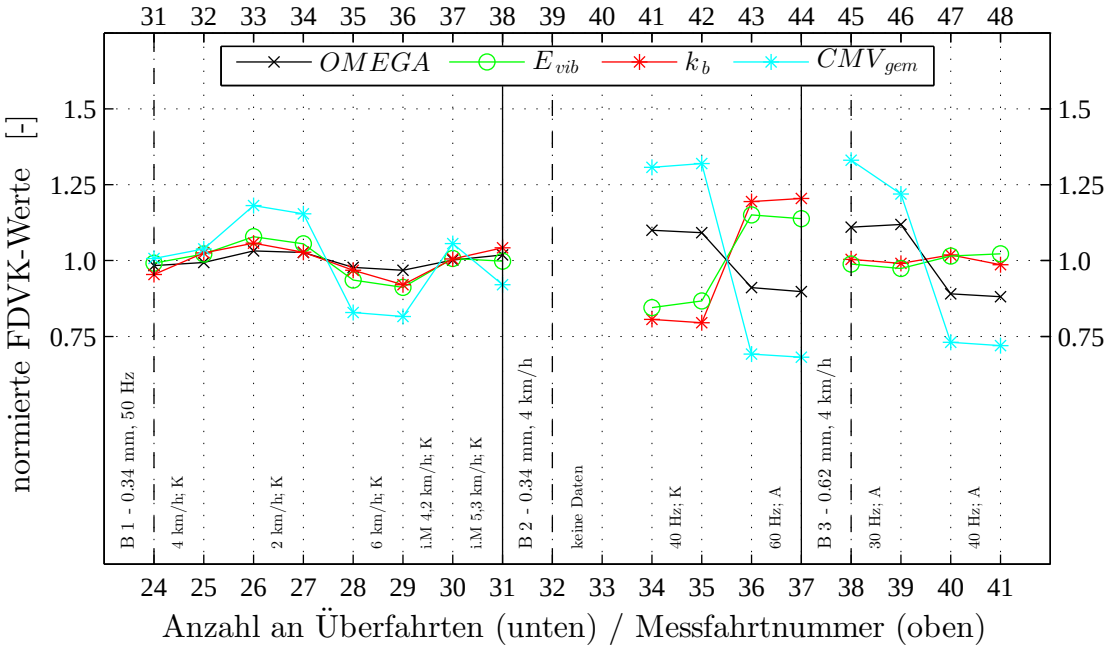


Abbildung 5.10: Darstellung der, innerhalb der jeweiligen Bereiche normierten, FDVK-Größen im Bereich “mean” der Spur 2.

Betrachtet man Bereich 1 der Abbildungen 5.9 und 5.10, so lässt sich eine gewisse Geschwindigkeitsabhängigkeit der FDVK-Werte ausmachen. Niedrige Fahrgeschwindigkeiten lassen dabei den Boden "steifer" erscheinen. Mit zunehmender Geschwindigkeit sinkt also das Niveau der Messwerte. Dieser Effekt lässt sich bei allen Messgrößen beobachten, am stärksten beim *CMV*-Wert, am resistentesten zeigt sich der *OMEGA*-Wert.

Anhand der Messfahrten 41 - 44 können die Auswirkungen einer Frequenzerhöhung bei kleiner Amplitude abgelesen werden. *CMV*- und *OMEGA*- Wert reagieren mit einem Abfall des Werteniveaus. Konträr dazu verhalten sich E_{vib}- und k_b- Wert. Wird die Frequenz erhöht, so steigt auch deren Messniveau und zwar in etwa gleichem Maße, wie Abbildung 5.10 zeigt. Allerdings ist an dieser Stelle anzumerken, dass die Walze bei den Messfahrten 43 und 44, aufgrund der hohen Frequenz von 60 Hz, in den Betriebszustand Abheben wechselte.

Die Messfahrten 45 - 48 wurden mit großer Amplitude und einer abermaligen Frequenzerhöhung durchgeführt. Vergleicht man die Bereiche 2 und 3 und fasst dabei zuerst die beiden "alten" Messwerte *CMV* und *OMEGA* ins Auge, so ist ein Anstieg zufolge der Amplitudenerhöhung zu verzeichnen (siehe Abbildung 5.9). Der *OMEGA*-Wert erhöht sich bei Betrachtung von MF 41/42 im Vergleich zu MF 47/48 sogar auf das Doppelte. Der *CMV*-Wert reagiert auf diesen Sachverhalt nicht so extrem, eine ausgeprägte Amplitudenabhängigkeit ist aber dennoch festzustellen. Bezüglich der Frequenzerhöhung verhalten sich die beiden Werte analog zu Bereich 2. Sie sinken erneut, verhältnismäßig sogar in gleichem Ausmaß.
Der E_{vib}-Wert hält trotz der Amplitudenerhöhung sein Werteniveau, während der k_b-Wert sogar geringfügig abfällt. Im Gegensatz zur Frequenzerhöhung von 40 auf 60 Hz in Bereich 2, zeigen sich die beiden "neueren" Werte diesbezüglich nun wesentlich stabiler. Ein geringfügiger Anstieg der Messwerte ist aber dennoch erkennbar.

In analoger Weise zu den eben diskutierten Darstellungen 5.9 und 5.10 im Bereich "mean", wurde auch der Bereich über der Schwachstelle analysiert. Die folgenden Abbildungen 5.11 und 5.12 zeigen die Ergebnisse.

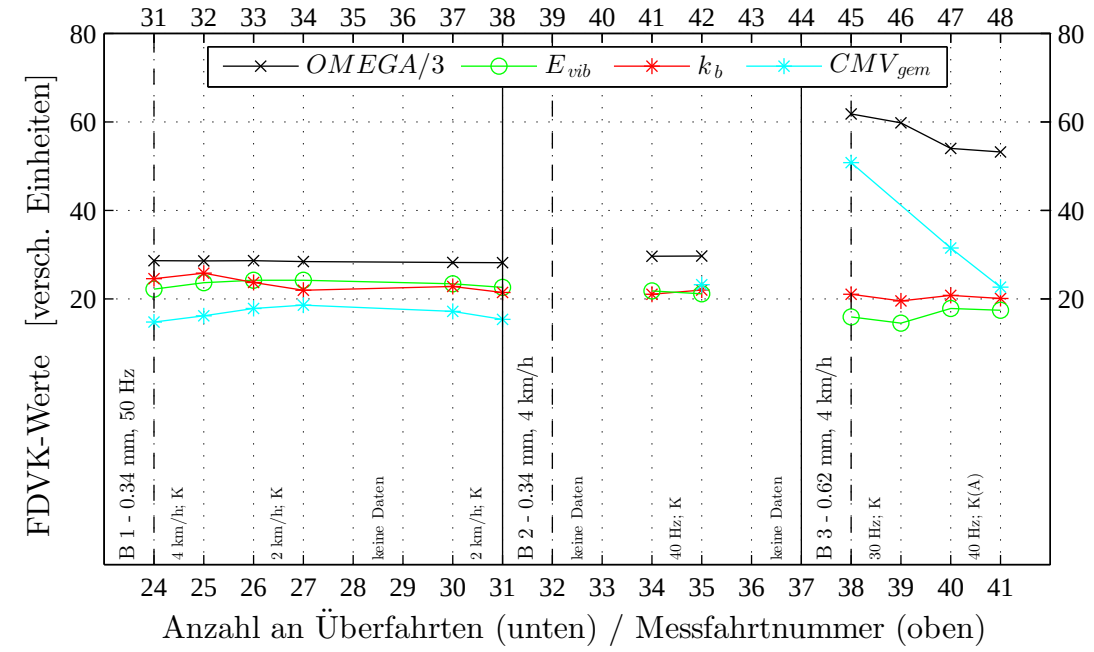


Abbildung 5.11: Entwicklung der im Abschnitt “weak” gemittelten FDVK-Werte über die gesamten Messfahrten auf Spur 2.

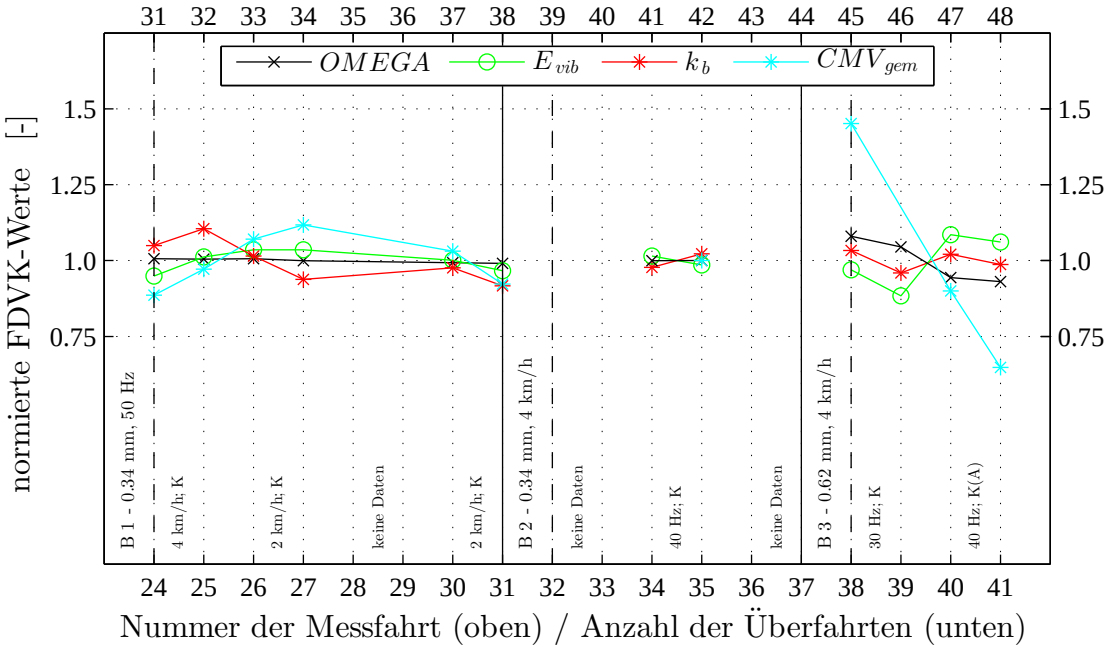


Abbildung 5.12: Darstellung der, innerhalb der jeweiligen Bereiche normierten, FDVK-Größen im Bereich “weak” der Spur 2.

Da die Schwachstelle am Beginn der Teststrecke situiert war und die Messsensorik bei manchen Testfahrten erst verzögert anschlug bzw. das Hinauffahren der Unwuchterregung je nach eingestelltem Frequenzniveau mal früher und mal später abgeschlossen war, musste man einige Messdatenausfälle im Bereich "weak" in Kauf nehmen. Je weniger Daten zur Analyse zur Verfügung stehen, desto schwieriger und unsicherer gestaltet sich selbige.

In Bereich 1 konnte, aufgrund der weichen Untergrundverhältnisse, keine systematische Geschwindigkeitsabhängigkeit der Messwerte festgestellt werden. *OMEGA* und E_{vib} zeigen über alle Messfahrten ein nahezu konstantes Werteniveau.
Bereich 2 lässt aufgrund der bereits angesprochenen Messwertausfälle keine Interpretation zu.
Bei den Messfahrten 45 - 48 kann, analog zum Bereich "mean", erneut eine erhebliche Amplitudenabhängigkeit des *CMV*- und des *OMEGA*-Wertes beobachtet werden. Beide verzeichnen auch bei einer Frequenzerhöhung über der Schwachstelle einen Einbruch des Messwertniveaus. E_{vib}- und k_b-Wert bestätigen ebenso das bereits gezeigte Verhalten im Bereich "mean". Der Einfluss der vertikalen Erregung lässt die Werte marginal sinken, die Frequenzerhöhung schlägt sich abermals in einer minimalen Erhöhung des Messwertniveaus nieder.

Abschließend werden die einzelnen FDVK-Größen für jeweils 2 ausgewählte Messfahrten, über die gesamte Teststrecke dargestellt. So können die Ergebnisse aus den Abbildungen 5.9 und 5.11 plakativ veranschaulicht und zudem etwaige Auffälligkeiten und Änderungen in den Verläufen analysiert werden.

Abbildung 5.13 zeigt noch einmal die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Messwerte über die gesamte Messfahrt. Die Werte steigen mit einer Reduktion der Fahrgeschwindigkeit zahlenmäßig an, die Verläufe bleiben dabei jedoch qualitativ gesehen ident.

CMV- und *OMEGA*-Wert reagieren auf eine Frequenzerhöhung mit einem Abfall des Werteniveaus. Im Gegensatz dazu legen der E_{vib}- und der k_b-Wert zahlenmäßig zu und weisen zudem einen sichtbar unruhigeren Verlauf auf (siehe Abbildung 5.14).

Auch bei Fahrten mit großer Amplitude und Frequenzvariation zeigen *CMV*- und *OMEGA*-Wert identes Verhalten, sie sinken. Die beiden unteren Messwerte in Abbildung 5.15 halten indes ihr Niveau. Auffällig ist zudem der konstant ruhige Verlauf des E_{vib}-Messwertes über die ganze Spur.

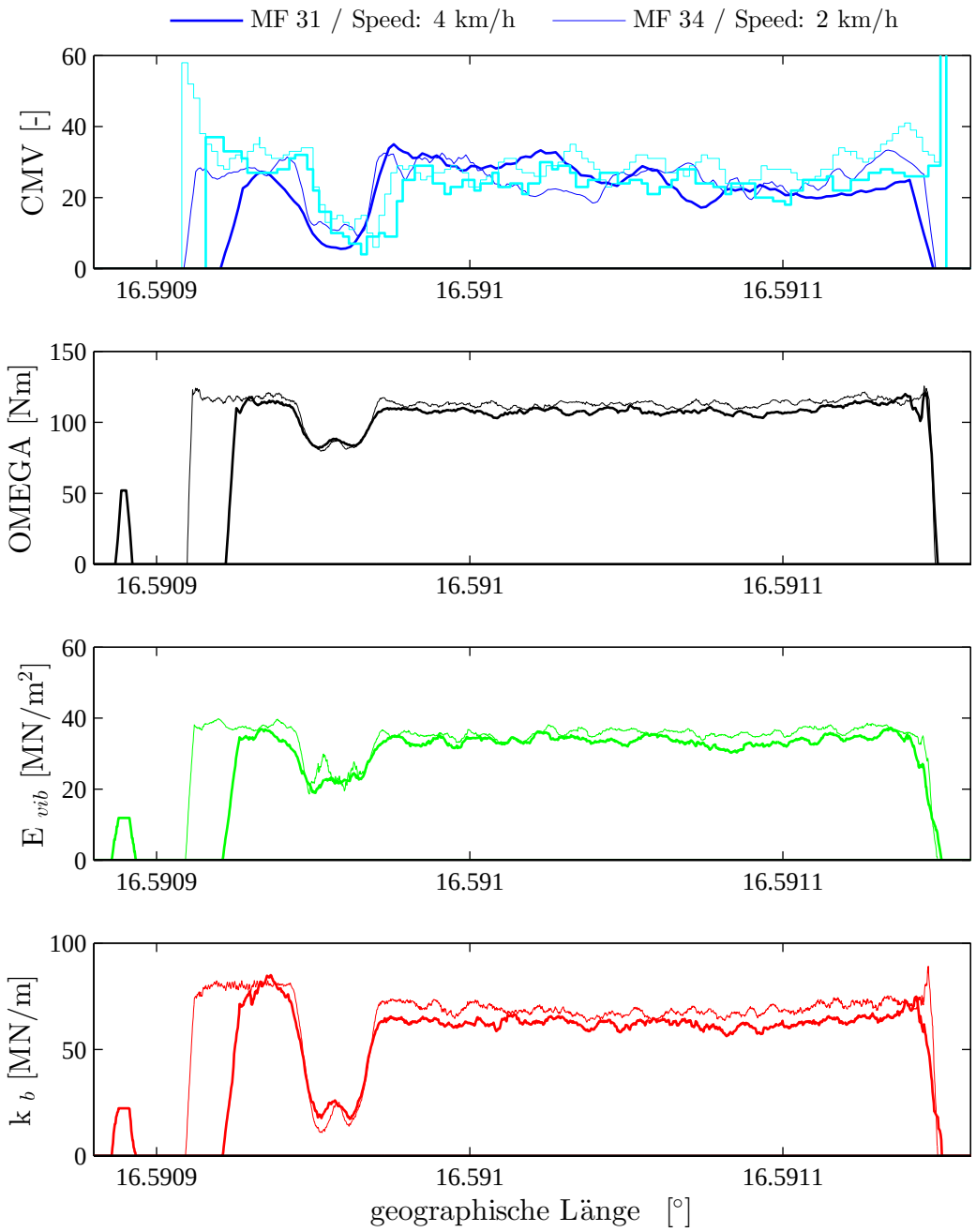


Abbildung 5.13: Gegenüberstellung zweier Messfahrten mit einer Geschwindigkeit von 4 km/h (dicke Linie) bzw. 2 km/h (dünne Linie), konstanter Frequenz (50 Hz) und Amplitude (0.34 mm) auf Spur 2.

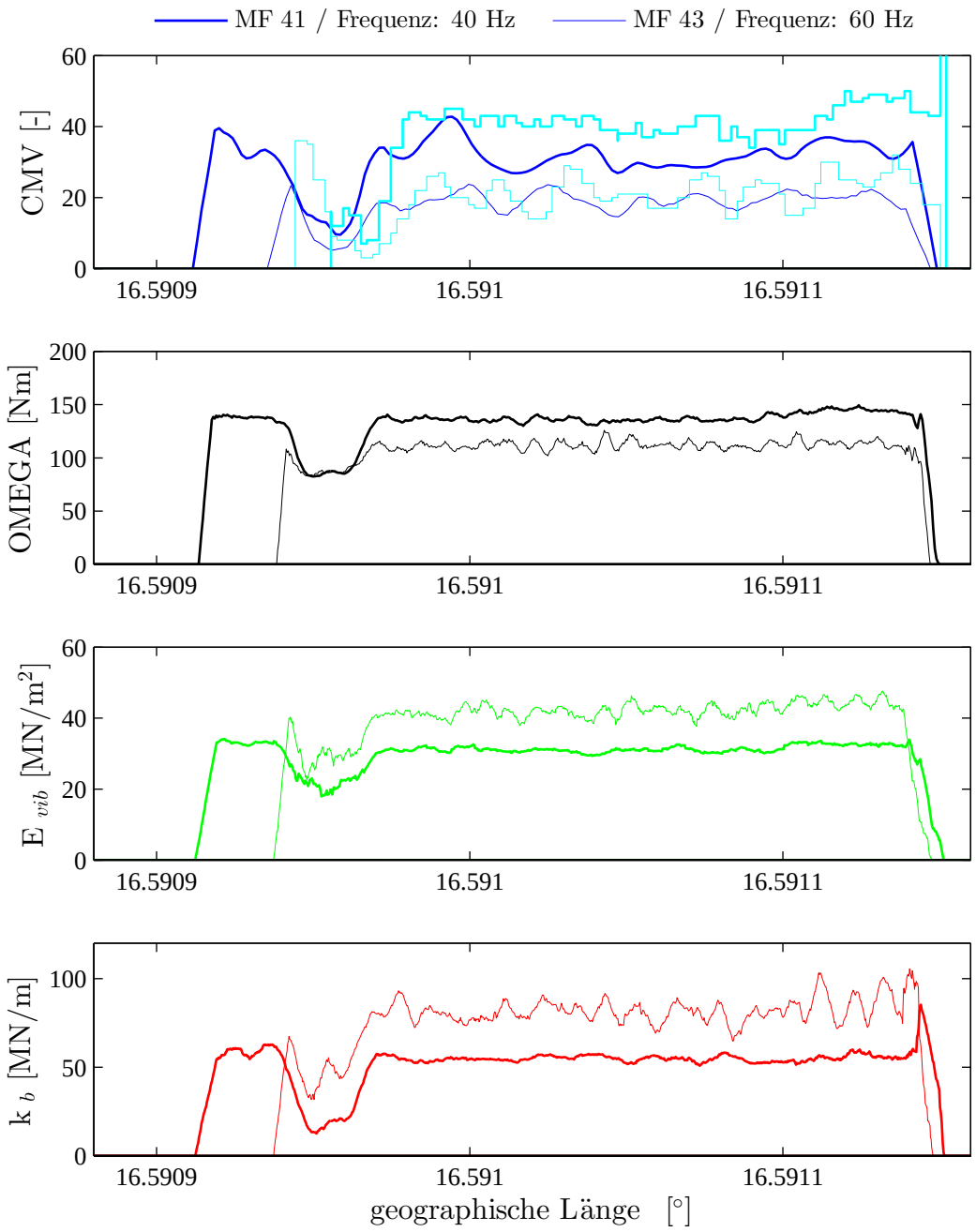


Abbildung 5.14: Gegenüberstellung zweier Messfahrten mit einer Frequenz von 40 Hz (dicke Linie) bzw. 60 Hz (dünne Linie), konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) und Amplitude (0.34 mm) auf Spur 2.

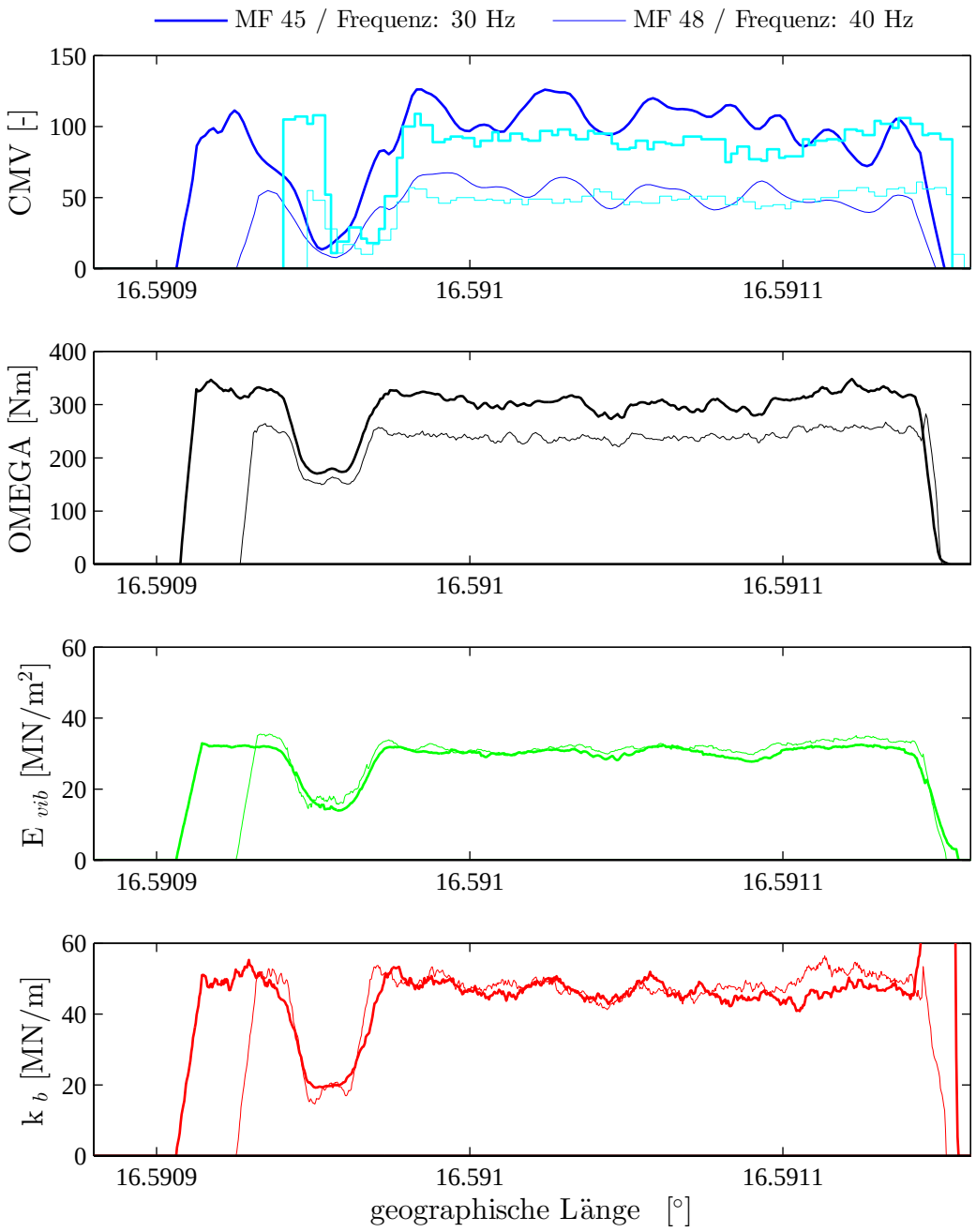


Abbildung 5.15: Gegenüberstellung zweier Messfahrten mit einer Frequenz von 30 Hz (dicke Linie) bzw. 40 Hz (dünne Linie), konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) und Amplitude (0.62 mm) auf Spur 2.

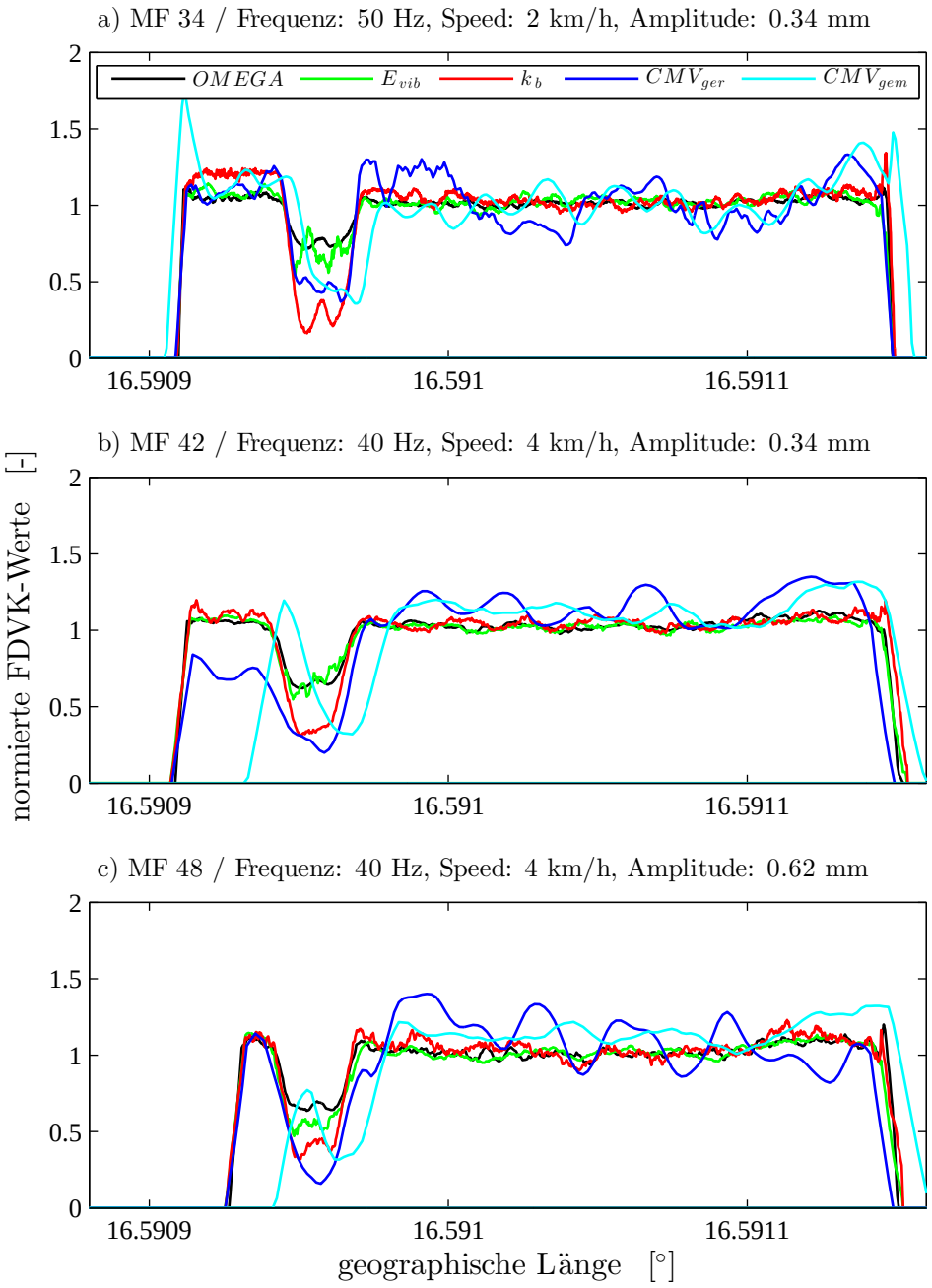


Abbildung 5.16: Gegenüberstellung normierter FDVK-Messwertverläufe mit ausgewählten Messfahrten aus je einem Bereich auf Spur 2.

Qualitativ ähneln sich die Messwertverläufe zwar, die wesentlichen Unterschiede in den Formeln zur Messwertermittlung spiegeln sich jedoch in großen zahlenmäßigen Unterschieden wieder. Um diesen Effekt auszuschalten und dadurch eine bessere Vergleichbarkeit der Messwerte zu erzielen, wurden die gesamten Messwertverläufe durch ihren Mittelwert dividiert (normiert).
Abbildung 5.16 zeigt diese normierte Darstellung der Verläufe über die gesamte Teststrecke mit ausgewählten Messfahrten aus je einem Bereich.
Der CMV- und k_b-Wert reagieren auf die Schwachstelle im Untergrund am deutlichsten. Des Weiteren stechen die Werteschwankungen des CMV-Wertes ins Auge, die bei allen 3 abgebildeten Messfahrten gleichermaßen zu beobachten sind. Zur zeitlichen Verzögerung des gemessenen CMV-Wertes wurde bereits zu Beginn des Kapitels Stellung genommen.

5.3.2 Spur 3

Spur 3 verlief parallel zu Spur 2 und war somit ebenfalls Bestandteil des vierspurigen Haupttestfeldes, eingerichtet auf einer Schüttung von 50 cm Wandschotter. Die beiden Spuren unterscheiden sich dabei lediglich durch die künstliche erzeugte Schwachstelle unterhalb der zweiten Spur.

5.3.2.1 Dynamische Lastplatte

Der dynamische Verformungsmodul wurde immer unmittelbar nach jeder Walzenüberfahrt, in dem aus Abbildung 4.6 ersichtlichen Bereich ermittelt. Bevor die geplanten Vibrationsfahrten durchgeführt wurden, fanden erneut, wie dies bereits auf Spur 2 der Fall war, zahlreiche Überfahrten mit oszillatorisch erregter Bandage statt. Infolge dessen konnte mit dem verwendeten Verdichtungsgerät im Zuge der Vibrationsfahrten, kein nennenswerter Verdichtungszuwachs mehr erzielt werden, wie an der flach verlaufenden Ausgleichskurve in Abbildung 5.17 unschwer zu erkennen ist.

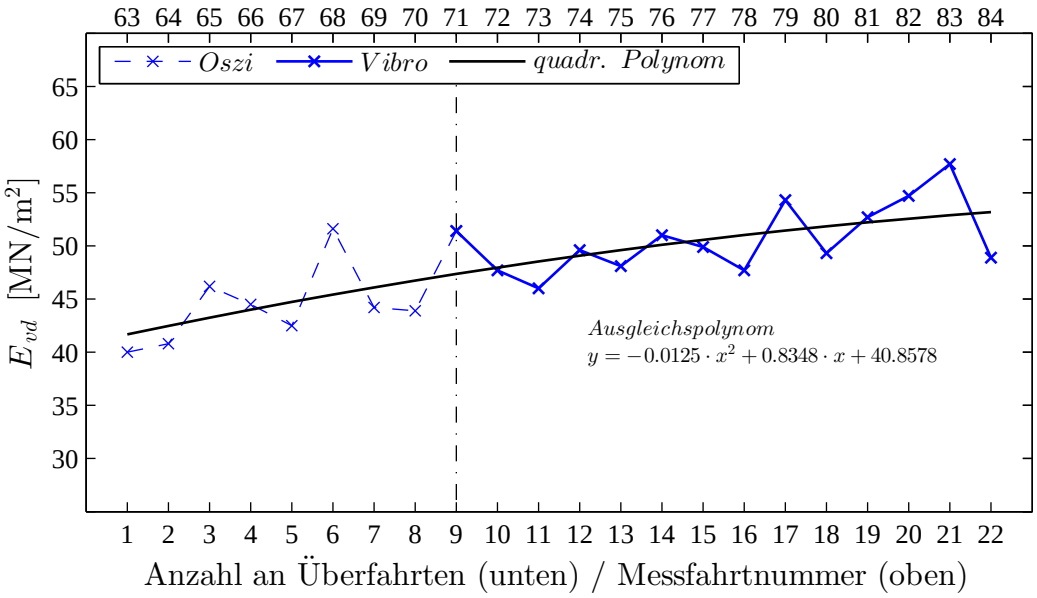


Abbildung 5.17: Entwicklung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} über alle durchgeführten Messfahrten auf Spur 3.

Dieser Umstand erlaubt es nun abermals, Änderungen in den berechneten FDVK-Messwertverläufen eindeutig den jeweiligen Walzenparametervariationen zuzuschreiben und den Einfluss einer, sich steifigkeitsmäßig ändernden, Unterlage mehr oder minder vernachlässigen zu können.

5.3.2.2 Bandagenbeschleunigung

Abbildung 5.18 zeigt einen Ausschnitt der gemittelten Vertikalbeschleunigungen der Bandage im Bereich “mean” für die Messfahrten 75 und 84, welche mit unterschiedlichen Frequenzen und Schwingamplituden durchgeführt wurden.
Die Dauer einer Unwuchterregung entspricht dabei, in beiden Fällen, jener bei einfacher Erregerfrequenz. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass sich das Bewegungsverhalten der Bandage jede Unwuchtumdrehung wiederholt.

In Grafik 5.18.a ist der Beschleunigungsverlauf annähernd sinusförmig, weshalb sich die Walze erwartungsgemäß im Betriebszustand Kontakt befindet (vgl. Abbildung 5.19).
Das Signal in unterer Grafik 5.18.b wird durch die größer gewählte Amplitude und der damit einhergehenden steigenden Bodenkontaktkraft geringfügig verzerrt und weist deshalb keinen harmonsichen Verlauf mehr auf. Die Walze verdichtet im Zustand Abheben.

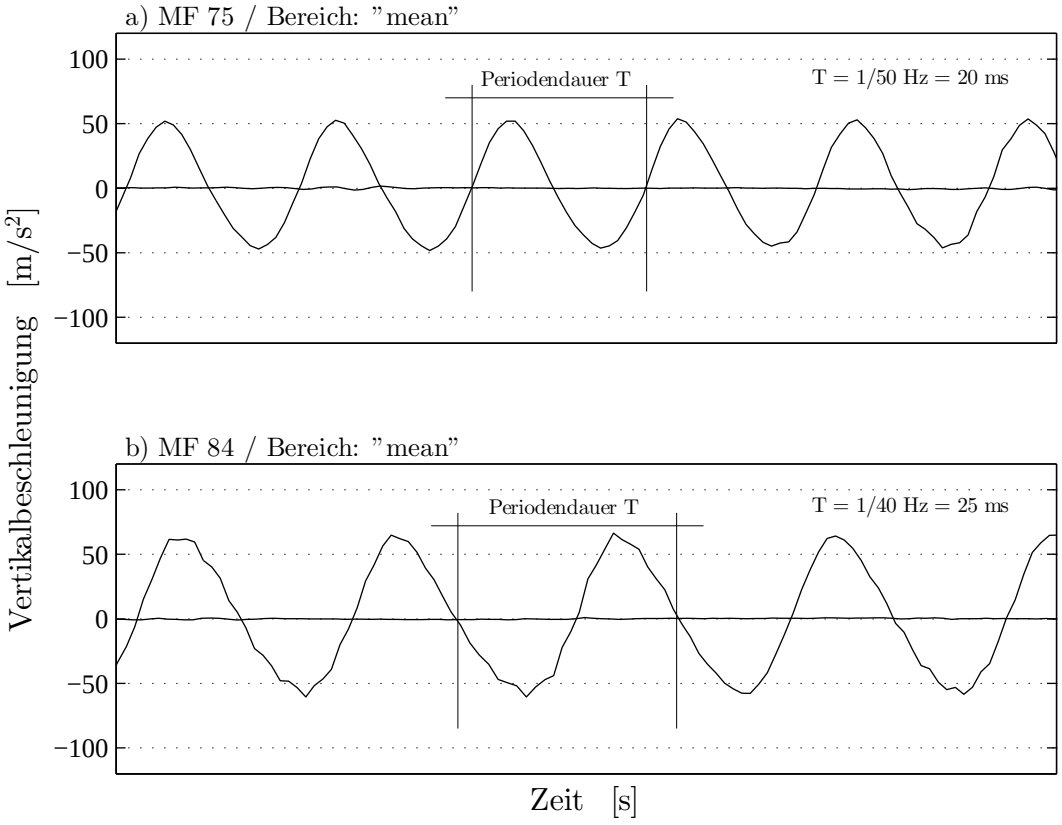


Abbildung 5.18: Ausschnitt der gemessenen vertikalen Bandagenbeschleunigung im Bereich "mean" für ausgewählte Messfahrten auf Spur 3.

5.3.2.3 Vertikale Kräfte - Betriebszustand

Wie aufgrund der, im Vergleich zu Spur 2 annähernd gleichen Bodenverhältnisse und Parametereinstellungen der Walze zu erwarten war, verdichtete selbige auch auf Spur 3 im Betriebszustand Kontakt bzw. Abheben. Bei den Messfahrten mit kleiner Amplitude (MF 71 - 77) verlor die Bandage zu keiner Zeit den Kontakt mit dem Untergrund, um dann, mit dem Umschalten auf die größere Unwuchtexzentrizität für die Messfahrten 78 - 84, in den Zustand des Abhebens zu wechseln. Einmal pro Unwuchtumdrehung hebt sich die Bandage vom Boden ab, um unmittelbar danach, noch innerhalb der selben Exzenterumdrehung, wieder aufzuschlagen.

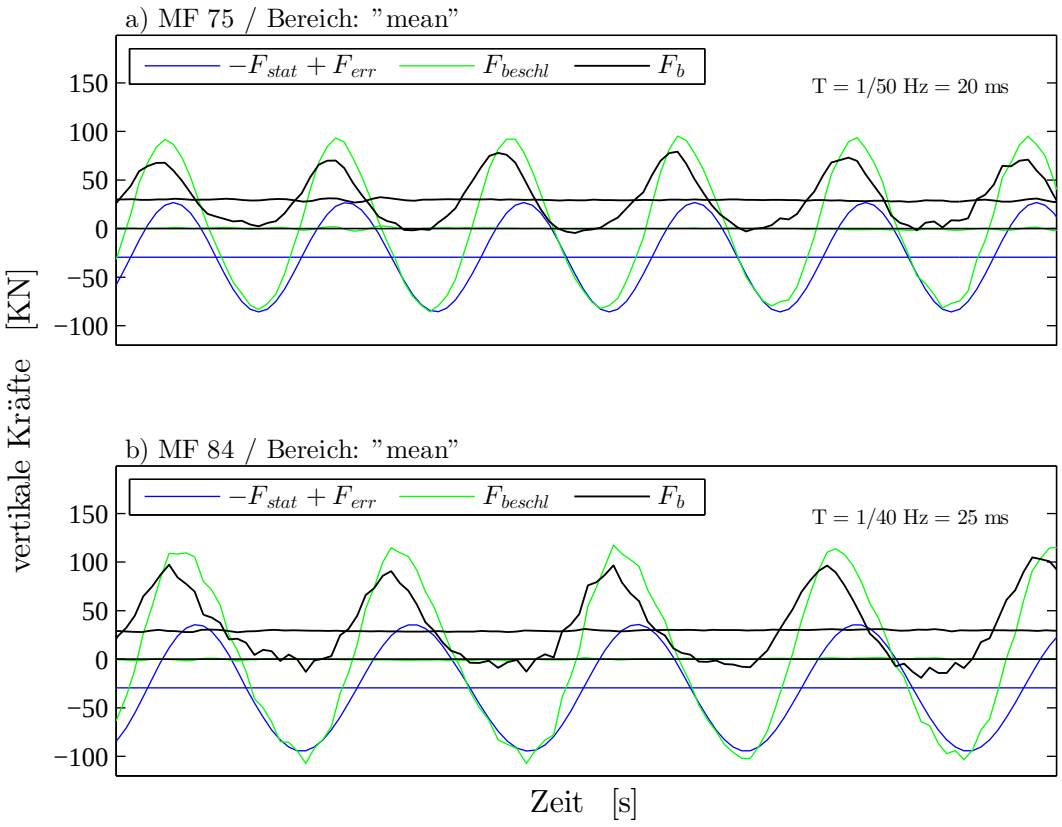


Abbildung 5.19: Darstellung der vertikalen Kräfte und der daraus resultierenden Bodenkontaktkraft F_b für ausgewählte Messfahrten auf Spur 3.

Die Beschleunigungskraft in Grafik 5.19.a zeigt einen annähernd sinusförmigen Verlauf, während im Zustand des Abhebens, bedingt durch die steigende Bodenreaktionskraft, eine gewisse Verzerrung erkennbar ist. Nach oben gerichtete Kräfte sind dabei so groß, dass sie ein Abheben der Bandage vom Untergrund ermöglichen. Nimmt die Kontaktkraft negative Werte an (Zugkräfte zwischen Bandage und Boden können in der Praxis naturgemäß nicht übertragen werden), so bewegt sich das Interaktionssystem Bandage – Boden voneinander entkoppelt (Abbildung 5.19.b).

5.3.2.4 FDVK-Messwerte

Abbildung 5.20 zeigt einen beispielhaften Verlauf der Messwerte auf Spur 3 und weist den im Folgenden näher betrachteten Abschnitt „mean“, mit den jeweiligen gemittelten FDVK-Wert aus. Die Messwerte präsentieren sich durchwegs auf konstantem, stabilem Werteniveau. Sie schwanken nur wenig, und entsprechen dabei quantitätsmäßig, wie zu vermuten war, den mit gleichen Walzeneinstellungen durchgeführten

Messfarten 31 und 32 auf Spur 2.

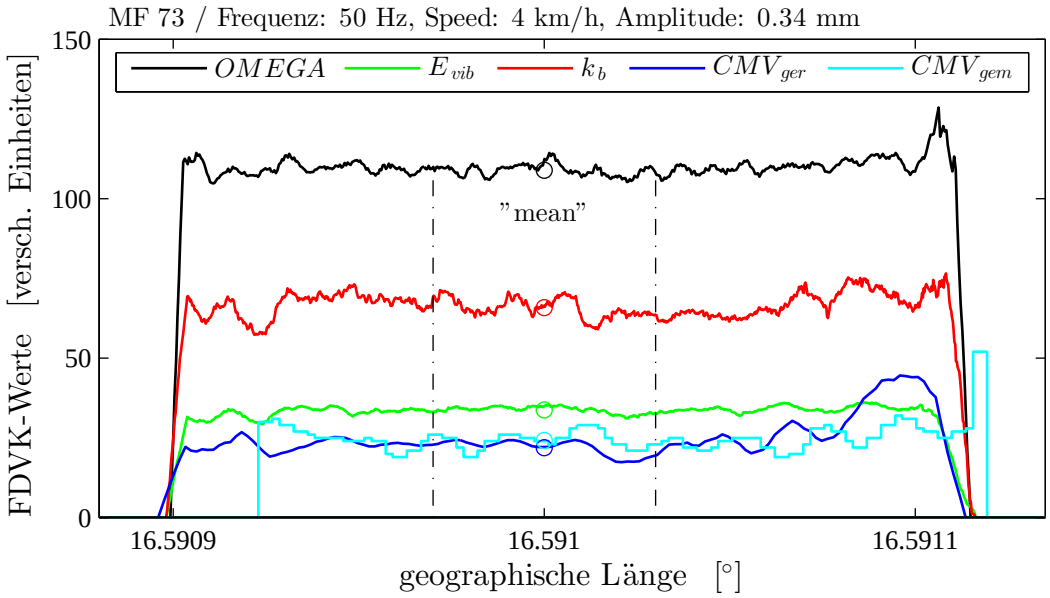


Abbildung 5.20: Darstellung der FDVK-Werte über die gesamte Messfahrt 73.

Analog zu den bereits in Kapitel 5.3.1.4 ausformulierten Gedanken, werden für Spur 3 wiederum Messfahrten mit identen Parametereinstellungen zusammengefasst und diskutiert.
Daraus ergibt sich:

- Bereich 1 mit MF 71 - 77: konstante Frequenz von 50 Hz, Geschwindigkeit von 4 km/h und eine Amplitude von 0.34 mm.
- Bereich 2 mit MF 78 - 84: konstante Frequenz von 40 Hz, Geschwindigkeit von 4 km/h und eine Amplitude von 0.62 mm.

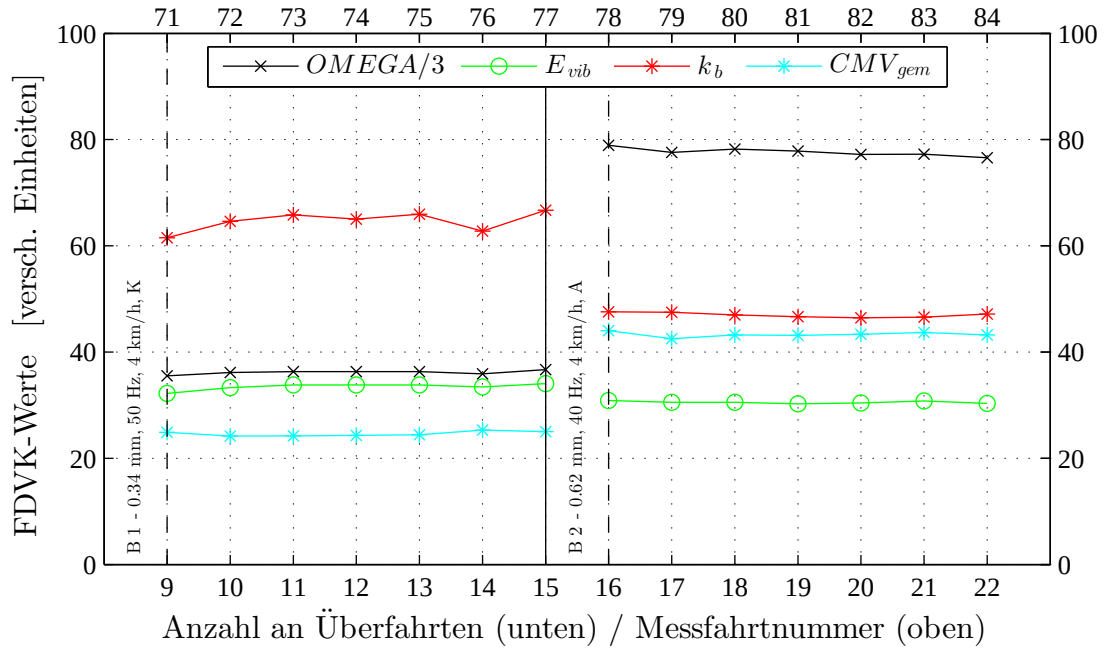


Abbildung 5.21: Entwicklung der im Abschnitt “mean” gemittelten FDVK-Werte über die gesamten Messfahrten auf Spur 3.

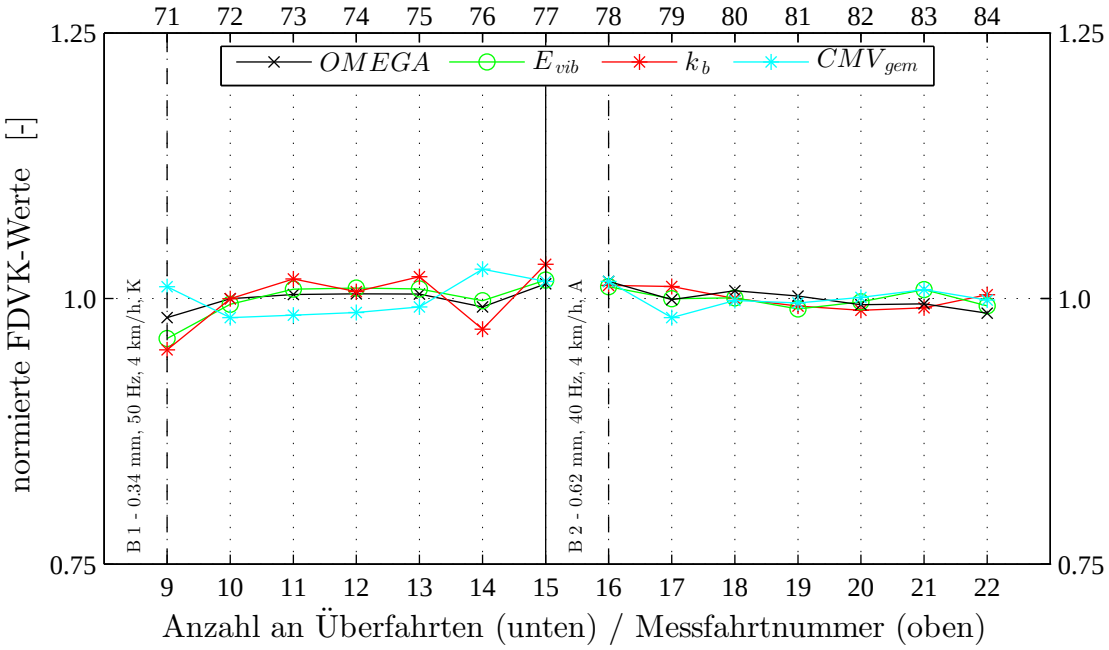


Abbildung 5.22: Darstellung der, innerhalb der jeweiligen Bereiche normierten, FDVK-Größen im Bereich “mean” der Spur 3.

Das konstante Werteniveau über alle Messfahrten in beiden Bereichen ist nicht weiter überraschend, sondern bestätigt die bereits aus Abbildung 5.17 erlangte Erkenntnis, wonach aufgrund der Vielzahl an Walzenüberfahrten, kein Verdichtungszuwachs mehr zu verzeichnen ist.
Zudem können auch die Beobachtungen auf Spur 2 bezüglich der Amplitudenabhängigkeit der Messwerte unterstrichen werden. Während sich der *CMV*- und der *OMEGA*-Wert aufgrund der vergrößerten Amplitude wertemäßig nahezu verdoppeln, sinkt der k_b-Wert um etwa ein Drittel ab. Der E_{vib}-Wert zeigt die geringste Sensibilität auf eine Änderung der vertikalen Erregung. Er sinkt nur marginal, was vermutlich auf die Reduktion der Frequenz von 50 auf 40 Hz zurückzuführen ist.
Der k_b-Wert weist zudem, im Vergleich zu Bereich 1, bei den MF 78 - 84 mit großer Amplitude, einen stabileren, weniger schwankenden Verlauf auf.

Zum Abschluss der Analyse auf Spur 3, werden die Messwertverläufe für je 2 vergleichbare Messfahrten untereinander dargestellt, um auf etwaige Besonderheiten in den Verläufen über die gesamte Fahrspur eingehen zu können.

Die Abbildungen 5.23 und 5.24 verdeutlichen dabei noch einmal das stabile, durchgehend konstante Messwertniveau auf der homogenen, bereits vollständig verdichteten Testspur.
Grafik 5.25 stellt die Amplitudenabhängigkeit dar, wobei die Messwerte natürlich auch aufgrund der Frequenzreduktion von Bereich 1 zu Bereich 2 beeinflusst werden. Da selbige jedoch nur um 10 Hz vermindert wurde, hält sich dieser Effekt in Grenzen und fällt weniger ins Gewicht.

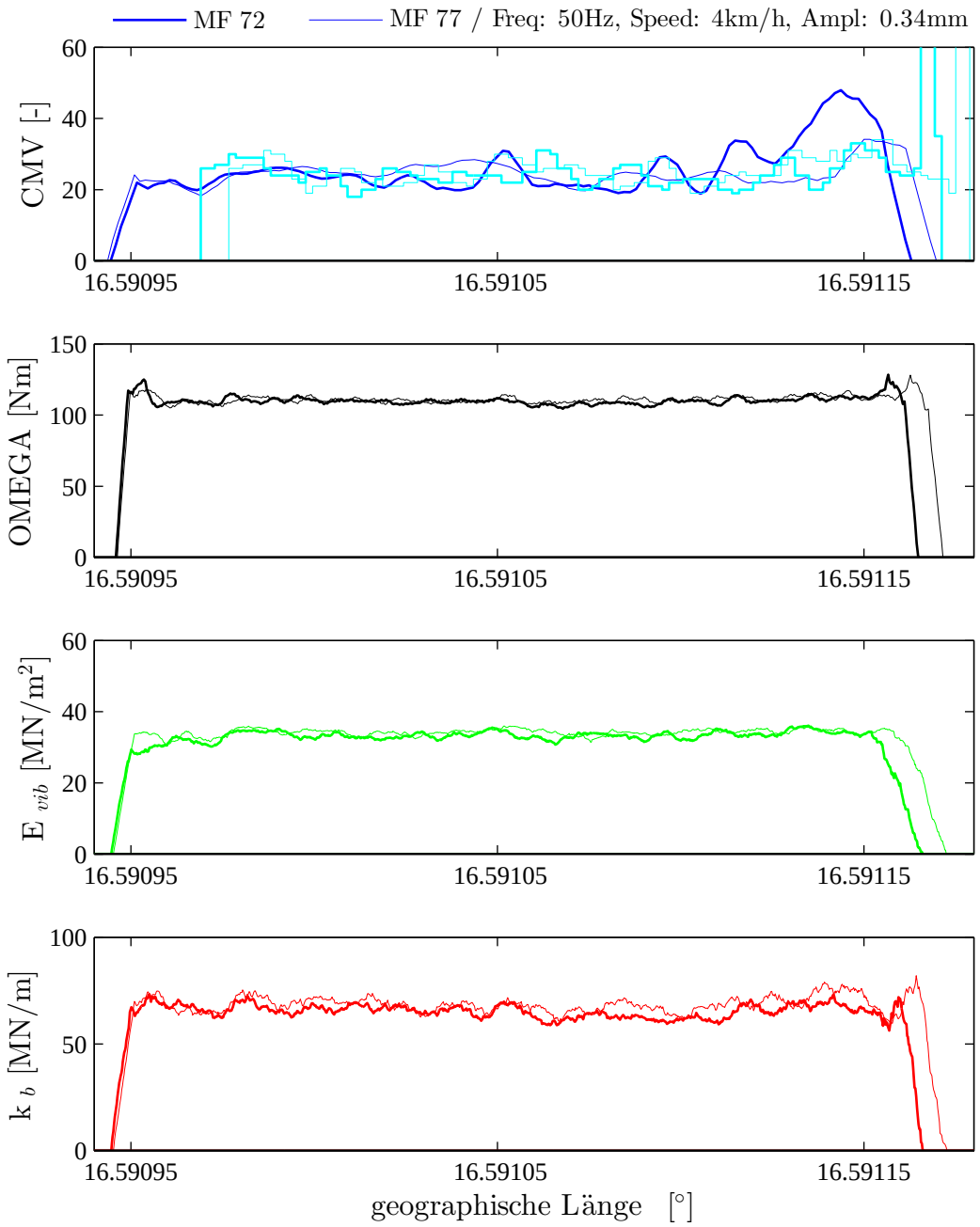


Abbildung 5.23: Gegenüberstellung der Messfahrten 72 (dicke Linie) und 77 (dünne Linie) mit konstanter Geschwindigkeit (4 km/h), Frequenz (50 Hz) und Amplitude (0.34 mm) auf Spur 3.

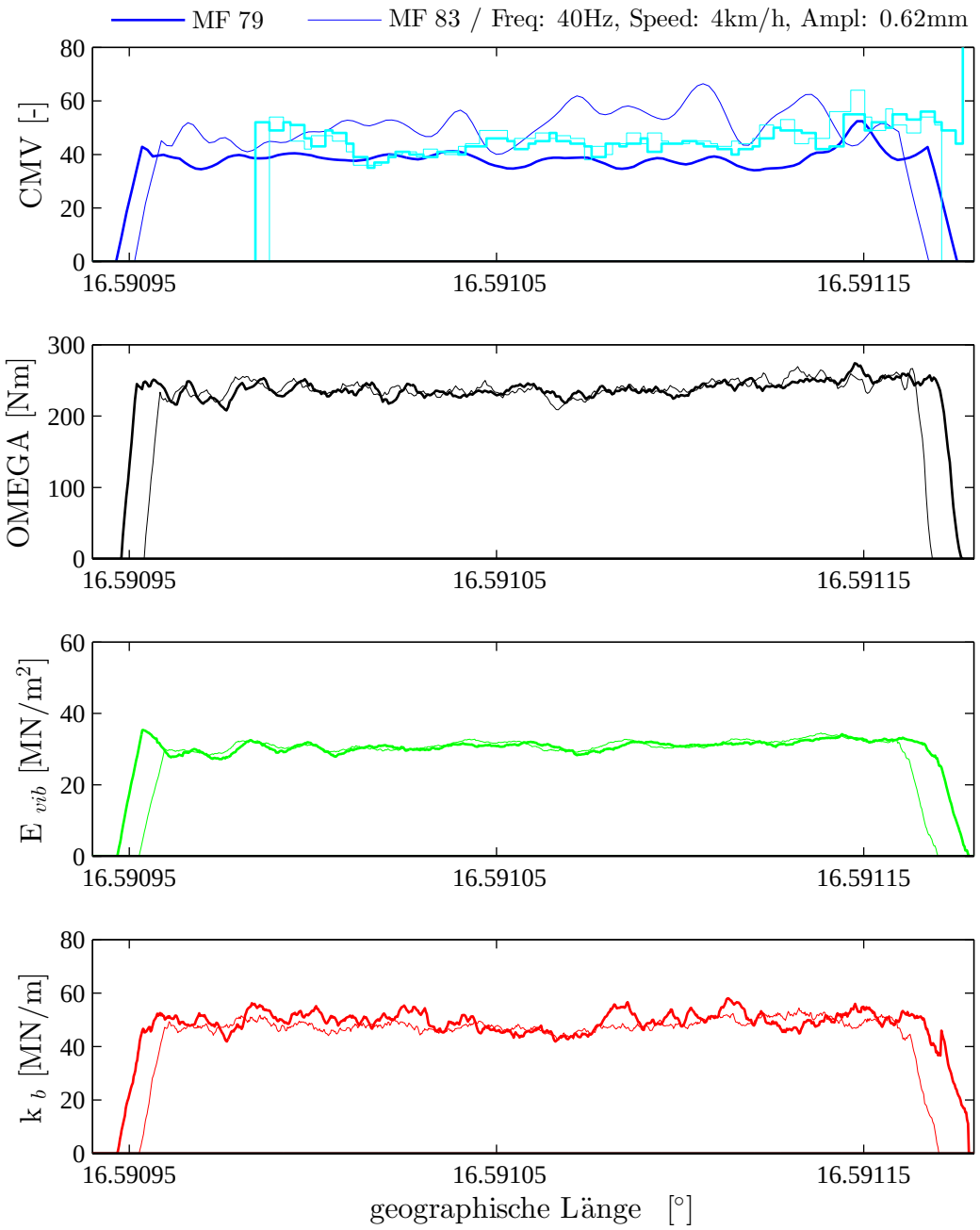


Abbildung 5.24: Gegenüberstellung der Messfahrten 79 (dicke Linie) und 83 (dünne Linie) mit konstanter Geschwindigkeit (4 km/h), Frequenz (40 Hz) und Amplitude (0.62 mm) auf Spur 3.

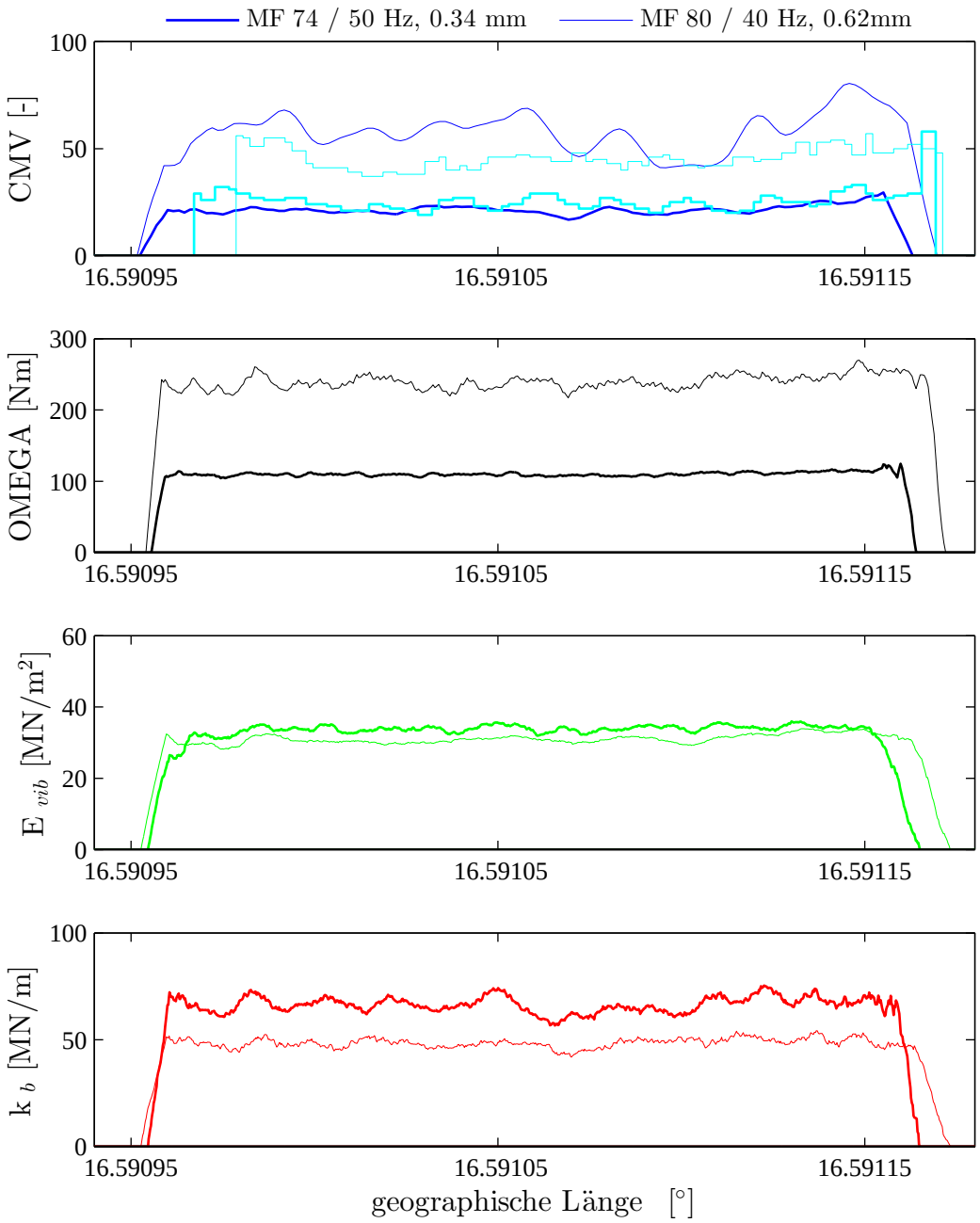


Abbildung 5.25: Gegenüberstellung der Messfahrten 74 (dicke Linie) und 80 (dünne Linie) aus Bereich 1 und 2 auf Spur 3.

5.3.3 Spur 5

Die Testfahrten auf Spur 5 wurden direkt auf dem in der Kiesgrube anstehenden Planum durchgeführt. Bereits während den Überfahrten war, aufgrund der extrem steifen, inhomogenen und holprigen Spur, ein abwechselndes und unkontrolliertes Abheben und Springen des Verdichtungsgerätes, begleitet von lautem Dröhnen, mit freiem Auge erkenn- bzw. hörbar.
Der anstehende Untergrund war durch den täglichen Baustellenverkehr mit schwerem Gerät schon so gut verdichtet, dass mit der verwendeten Walze kein weiterer Verdichtungszuwachs mehr zu erzielen war.

Besonders am Beginn der Teststrecke nahm die Bodenkontaktkraft, vor allem bei den Fahrten mit “großer” Amplitude, ungewöhnlich große Werte von bis zu -100 kN an und schwankte zudem wertemäßig innerhalb nur weniger Unwuchtumdrehungen eklatant und schlagartig. Die an der Lagerschale der Bandage gemessenen Beschleunigungssignale in diesem Bereich, waren aufgrund der schwierigen Untergrundverhältnisse mit Vorsicht zu genießen und auch dementsprechend schwer zu interpretieren.
Die Ermittlung und Studie von FDVK-Werten auf derartigen Untergrundverhältnissen erweist sich als weitestgehend sinnfrei, da die extrem holprige und steife Spur wenig Praxisbezug zulässt und zweifelslos gewaltigen Einfluss auf das Niveau und den Verlauf der Messwerte nimmt, wie in Abbildung 5.26 unschwer zu erkennen ist.

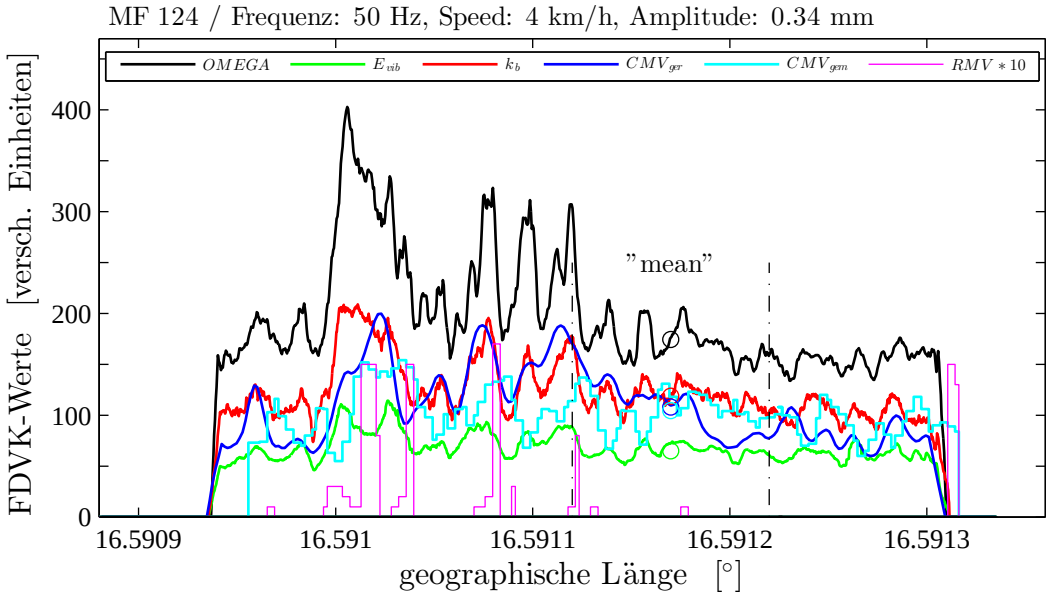


Abbildung 5.26: Darstellung der FDVK Werte über die gesamte Messfahrt 124.

Die Messwerte übertreffen dabei, die vom jeweiligen Hersteller angegebenen Wertebereiche bei weitem (siehe v. a. *CMV*- und k_b-Wert). In Abbildung 5.26 ist auch der mittels *Compactometer* gemessene *RMV*-Wert, zur besseren Darstellung in 10-facher Überhöhung, abgebildet. Zu berücksichtigen ist dabei freilich, wie auch beim zugehörigen gemessenen *CMV*-Messwert, die bereits in Kapitel 5.3.1.4 erwähnte, zeitliche Phasenverschiebung.

Mit dem Versuch dennoch einige Erkenntnisse aus diesen Überfahrten gewinnen zu können, wurde für die Analyse ein einigermaßen homogener Bereich der Teststrecke ausgewählt und, wie aus Abbildung 5.26 ersichtlich, abermals mit "mean" gekennzeichnet. Die Verläufe der vertikalen Bandagenbeschleunigung und der vertikalen Kräfte zeigen in diesem Bereich zumindest abschnittsweise vernünftige Verläufe, die auf eine Ermittlung von plausiblen FDVK-Messwerten hoffen lassen. Sie sind in den Unterabschnitten 5.3.3.2 und 5.3.3.3 grafisch dargestellt.

5.3.3.1 Dynamische Lastplatte

Die dynamischen Lastplattenversuche auf Spur 5 wurden lediglich vor der ersten bzw. nach der letzten Walzenüberfahrt durchgeführt, weshalb an dieser Stelle von einer grafischen Darstellung abgesehen wird. Die dazwischenliegenden, fehlenden Werte, die für die spätere Korrelationsbildung in Kapitel 5.4 von Nöten sind, wurden demnach linear interpoliert.

5.3.3.2 Bandagenbeschleunigung

Die gemessenen Signale in Abbildung 5.27 zeigen ein wiederkehrendes Verhalten mit der einfachen Periode der Anregung. Sie werden aufgrund der hohen Bodenkontaktkräfte jedoch massiv verzerrt. Während sich die Walze in obiger Grafik 5.27.a eindeutig im Zustand Abheben befindet, gestaltet sich eine Interpretation der Bandagenbeschleunigung bei Messfahrt 136 weitaus schwieriger. Die ersichtliche, extreme Abweichung von einer harmonischen Schwingung deutet auf beträchtliche Bondenkontaktkräfte hin (vgl. Abbildung 5.3.3.3).
Kennzeichnend für den Betriebszustand Springen ist, dass sich das Bewegungsverhalten der Bandage nur mehr jede zweite Unwuchtumdrehung wiederholt. Das heißt einer Periode mit großer Krafteintragung, sollte eine mit einer niedrigeren folgen. Anzeichen für einen typischen Sprungbetrieb, wonach das Beschleunigungssignal die doppelte Periodendauer der Erregerfrequenz aufweisen müsste, fehlen jedoch.

Der zweimalig zu beobachtende, schlagartige Ansteig der Beschleunigung in Grafik 5.27.b könnte auf Wiegeschwingungen der Bandage, hervorgerufen durch die extrem holprige und unebene Spur, zurückzuführen sein.

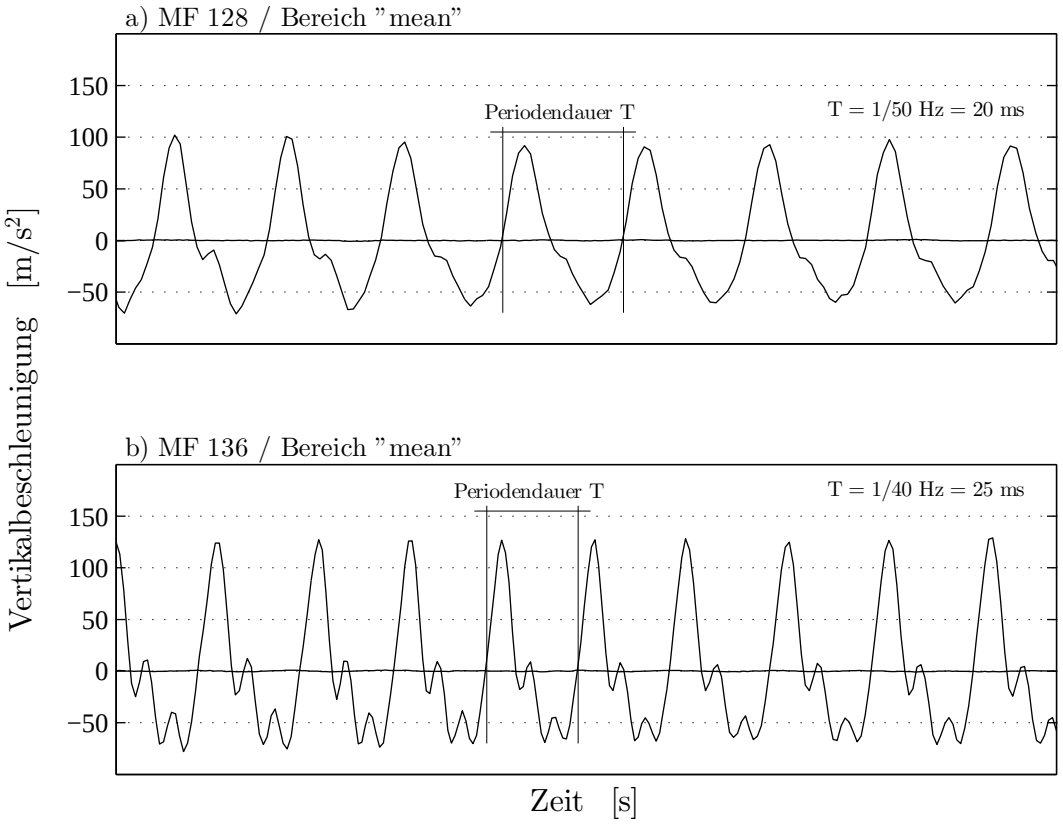


Abbildung 5.27: Ausschnitt der gemessenen vertikalen Bandagenbeschleunigung im Bereich "mean" für ausgewählte Messfahrten auf Spur 5.

5.3.3.3 Vertikale Kräfte - Betriebszustand

Eine Verzerrung der Beschleunigungskraft ist, aufgrund der auftretenden Nichtlinearitäten, deutlich erkennbar. Die Bodenreaktionskraft erreicht mit etwa 200 kN, im Vergleich zu Spur 2 bzw. 3, ein beträchtlich höheres Werteniveau; sie steigt in etwa um das Doppelte.

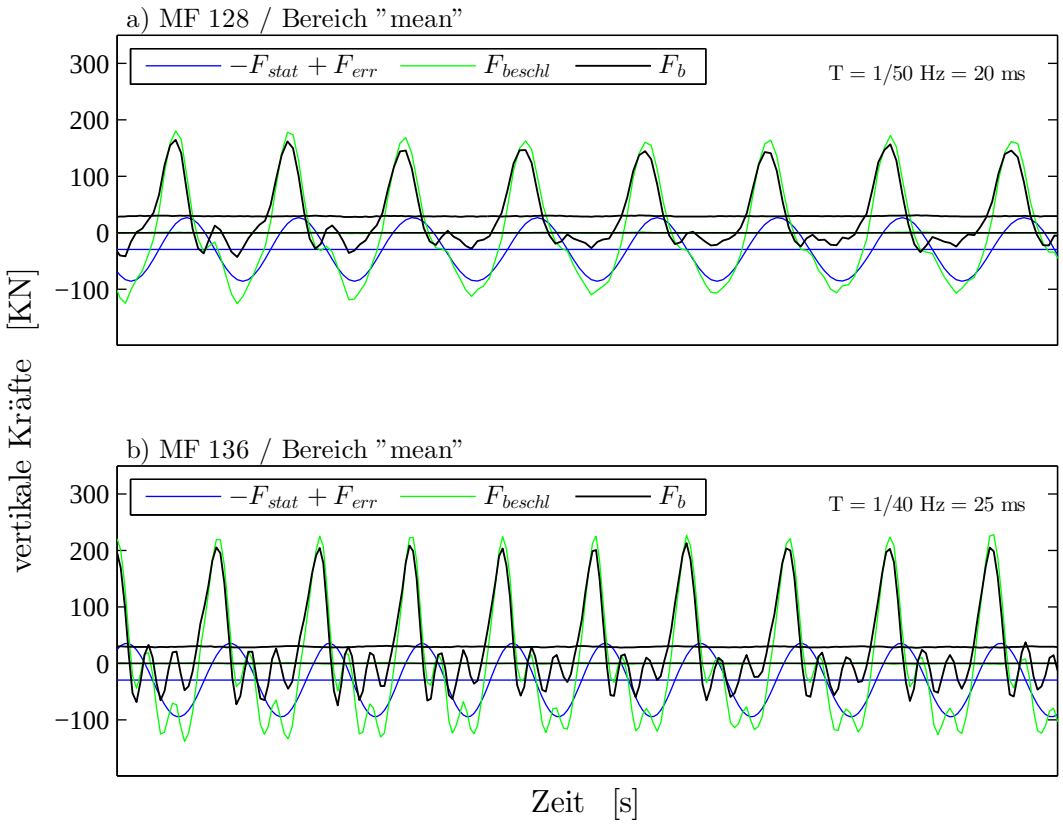


Abbildung 5.28: Darstellung der vertikalen Kräfte und der daraus resultierenden Bodenkontaktkraft F_b für ausgewählte Messfahrten auf Spur 5.

5.3.3.4 FDVK-Messwerte

Zur Analyse der Messwertentwicklung im angesprochenen Abschnitt "mean" ergeben sich auf Spur 5 folgende Bereiche, ersichtlich in den folgenden Abbildungen 5.29 und 5.30:

- Bereich 1 mit MF 123 - 128: Geschwindigkeitsvariation bei konstanter Frequenz von 50 Hz und einer Amplitude von 0.34 mm.
- Bereich 2 mit MF 129 - 134: Frequenzänderung bei konstanter Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.34 mm.
- Bereich 3 mit MF 135 - 140: Geschwindigkeitsvariation bei konstanter Frequenz von 40 Hz und einer Amplitude von 0.62 mm.
- Bereich 4 mit MF 141 - 144: Frequenzänderung bei konstanter Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.62 mm.

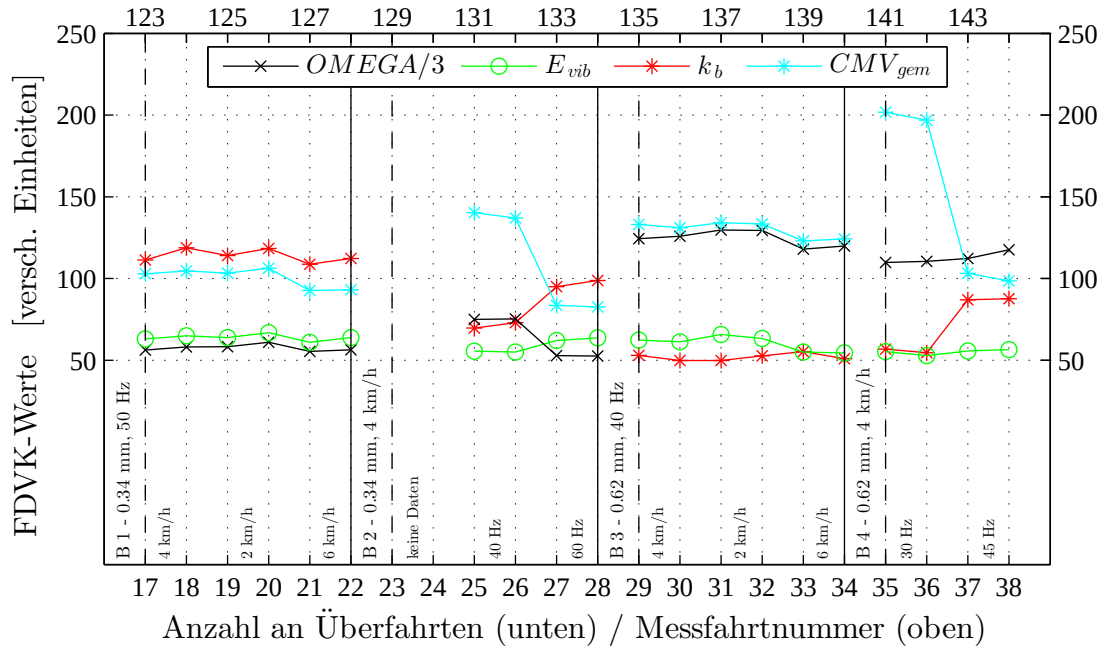


Abbildung 5.29: Entwicklung der im Abschnitt “mean” gemittelten FDVK-Werte über die gesamten Messfahrten auf Spur 5.

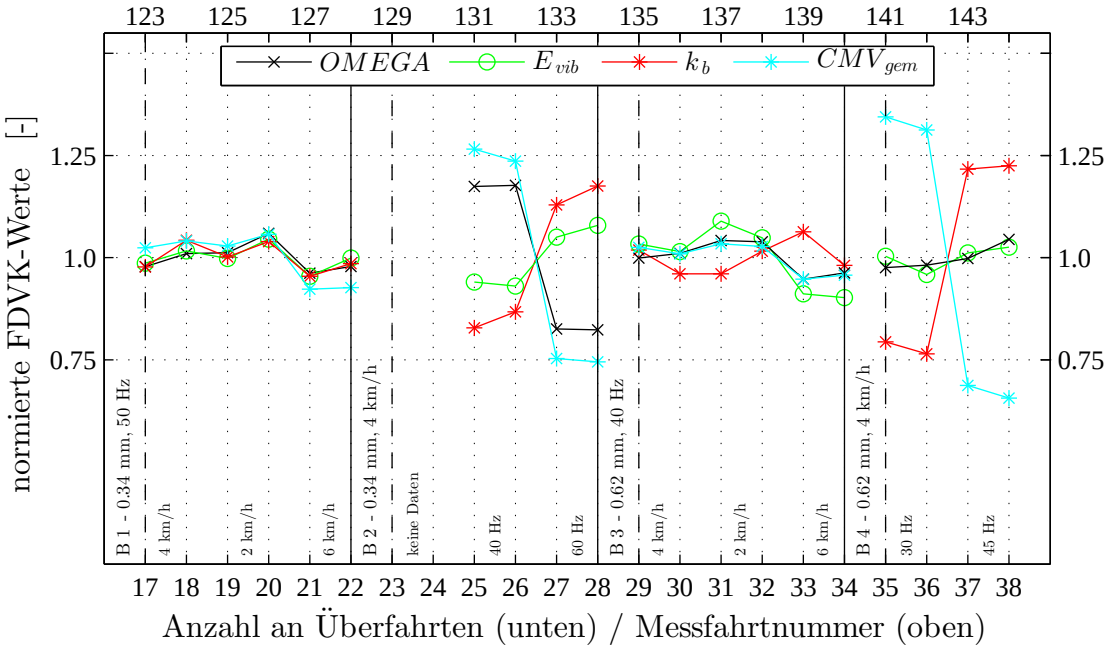


Abbildung 5.30: Darstellung der, innerhalb der jeweiligen Bereiche normierten, FDVK-Größen im Bereich “mean” der Spur 5.

Die im Bereich “mean” gemittelten FDVK-Werte der Messfahrten 123 - 128 (Bereich 1), wurden mit kleiner Erregeramplitude durchgeführt. Eine systematische Geschwindigkeitsabhängigkeit der Messgrößen kann dabei nur schwer festgestellt werden. Sieht man sich im Gegensatz dazu die Messfahrten 135 bis 140 in Bereich 3 an, so zeigen alle Messwerte (mit Ausnahme des k_b-Wertes) exakt jenes Verhalten, welches bereits auf Spur 2 beobachtet werden konnte. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit verursacht einen geringfügigen Rückgang der Messwerte, und lässt den Untergrund somit “weicher” erscheinen.

Bei einem Vergleich der Bereiche 1 und 3 bezüglich des Messwertniveaus, wird abermals die Sensibilität der Werte gegenüber der Variation der Erregeramplitude deutlich. *OMEGA*- und *CMV*-Wert steigen, während der k_b-Wert sinkt. Der E_{vib}-Wert zeigt sich diesbezüglich unbeeindruckt, er hält sein Niveau.

Die dargestellten Messfahrten innerhalb der Bereiche 2 und 4 lassen Rückschlüsse auf die Anfälligkeit der FDVK-Werte im Hinblick auf Frequenzvariationen zu.
Betrachtet man zunächst die Ergebnisse der MF 131 - 134 in Bereich 2, so reagieren *CMV*- und *OMEGA*-Wert mit einem empfindlichen Werteabfall auf die 1,5-fache Frequenzerhöhung. E_{vib}- und k_b-Wert hingegen, reagieren genau gegensinnig und nehmen zu. Dieser Werteanstieg fällt beim E_{vib}-Wert jedoch wesentlich verhaltener aus.

Die Messfahrten 141 - 144 in Bereich 4 wurden mit fast doppelter Amplitude (von 0.32 auf 0.64 mm erhöht) durchgeführt. Die Frequenz der Unwucht wurde dabei erneut um das 1,5-fache, von 30 auf 45 Hz, gesteigert. k_b- und *CMV*-Wert verhalten sich analog zu Bereich 2. Ihr Niveau steigt, bzw. sinkt gleichermaßen und zwar erheblich. Der *OMEGA*- bzw. E_{vib}-Wert reagiert hier, im Gegensatz zu den Fahrten mit geringerer Amplitude in Bereich 2, jedoch nur mehr mit einem geringen Anstieg der Messwerte auf die Frequenzerhöhung. Die beiden Messwerte der Firma *BOMAG* antworten qualitativ betrachtet, vollkommen ident.

5.3.4 Spur 7

Für die Fahrten auf Spur 7 wurde ein Bereich der Kiesgrube herangezogen, auf dem noch keine Überfahrten mit Baugeräten stattgefunden haben. Die Unterlage bestand aus bindigem, feinkornreichem Material mit hohem Sättigungsgrad und präsentierte sich demzufolge sehr "weich".

Nun ist hinreichend bekannt, dass sowohl bindige Böden als auch Sande, vor allem bei geringer Dichte, lockerer Lagerung und hohen Sättigungsgraden zum Aufweichen unter der dynamischen Belastung einer Vibrationswalze neigen (siehe Kapitel 2.3.1). Demnach wurde auch bereits nach wenigen Überfahrten eine regelrechte Wellenbildung auf dem Untergrund erkennbar. Dies lässt sich durch die auftretenden steigenden Porenwasserüberdrücke, resultierend aus der dynamischen Verdichtung des bindigen Bodens und dessen geringer Durchlässigkeit, erklären.
Das Wasser in den Poren verhindert, aufgrund seiner sehr geringen Kompressibilität, eine Verdichtung.

Dieser Tatsache hätte man entgegenwirken und mit zeitlich größeren Abständen zwischen den Verdichtungsfahrten begegnen können. Die Porenwasserüberdrücke hätten sich dann auf ein Mindestmaß abgebaut und die Steifigkeit des Untergrunds wäre vermutlich nicht gesunken. Auf diese Weise wäre eine Sicherstellung der Befahrbarkeit der Messstrecke mit einer Vibrationswalze und der Erhalt von zuverlässigeren Messdaten wahrscheinlicher gewesen.

In der Praxis ist eine Anwendung dieser Verdichtungsmethode unter vorherrschenden Untergrundbedingungen nicht zielführend. Gegebenenfalls würde man eine Erhöhung der Tragfähigkeit mit einer Reduzierung des Wassergehaltes, etwa durch Trockenlegung der Testspur oder durch Zugabe von bodenverbessernden Stoffen, erreichen. Weiters wäre eine Verwendung von profilierten Schaffuß- bzw. Polygonbandagen (siehe Abschnitt 2.3.3.3) denkbar, um ein Aufreißen von Wasserwegigkeiten zu erreichen und auf diese Weise den Abbau der Porenwasserüberdrücke zu beschleunigen.

Dieser Umstand war bei der Auswertung und Interpretation der FDVK-Werte im Besonderen zu berücksichtigen.

5.3.4.1 Dynamische Lastplatte

Die Ergebnisse der, abermals im Bereich "mean" der Testspur durchgeführten, dynamischen Lastplattenversuche bestätigen eben dargelegten Sachverhalt. Mit zunehmender Anzahl an Walzüberfahrten war eine Verringerung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} festzustellen. Da der Modul lediglich sporadisch vor Beginn der ersten, nach Absolvierung der fünften, sowie nach der letzten Messfahrt ermittelt wurde, wurden die fehlenden Werte linear interpoliert (siehe Abbildung 5.31).

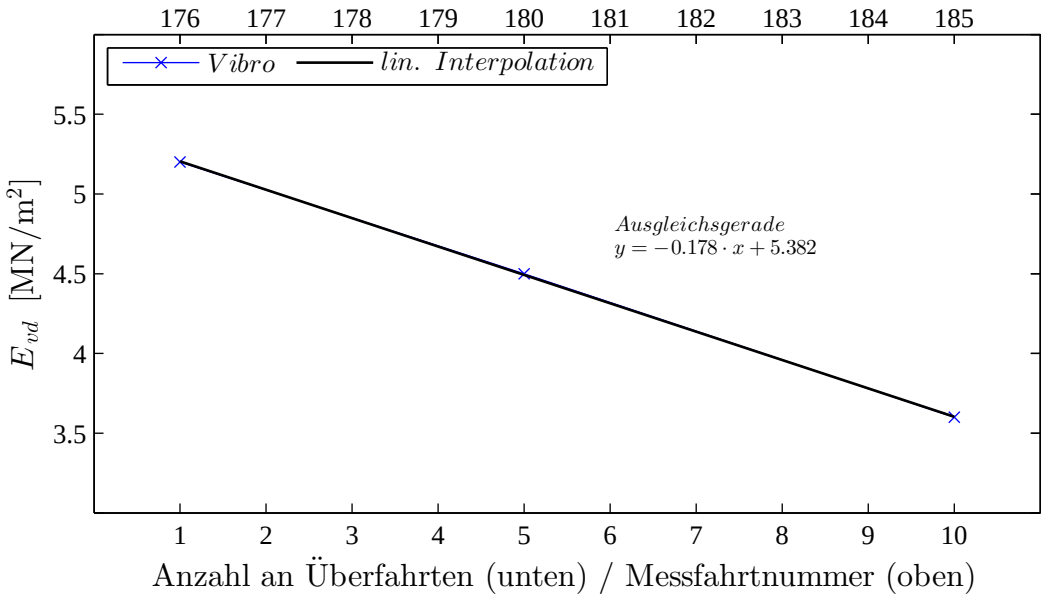


Abbildung 5.31: Entwicklung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} über alle getätigten Messfahrten auf Spur 7.

5.3.4.2 Bandagenbeschleunigung

Abbildung 5.32 zeigt Ausschnitte des vertikalen Bandagenbeschleunigungsverlaufes während der Messfahrten 178 (Amplitude: 0.34 mm) und 185 (0.62 mm) im Bereich "mean" auf Spur 7.
Die periodisch schwingende Bandage in Grafik 5.32.a zeigt keine Nichtlinearitäten zufolge Kontaktverlust. Das Schwingungverhalten der Bandage ist, wie das Erregersignal, praktisch harmonisch. Aufgrund der extrem weichen Untergrundverhältnisse ist bei Messfahrt 185, die mit großer Amplitude durchgeführt wurde, lediglich ein marginaler Werteanstieg der Beschleunigungen zu beobachten. Das Signal wird nur geringfügig verzerrt.

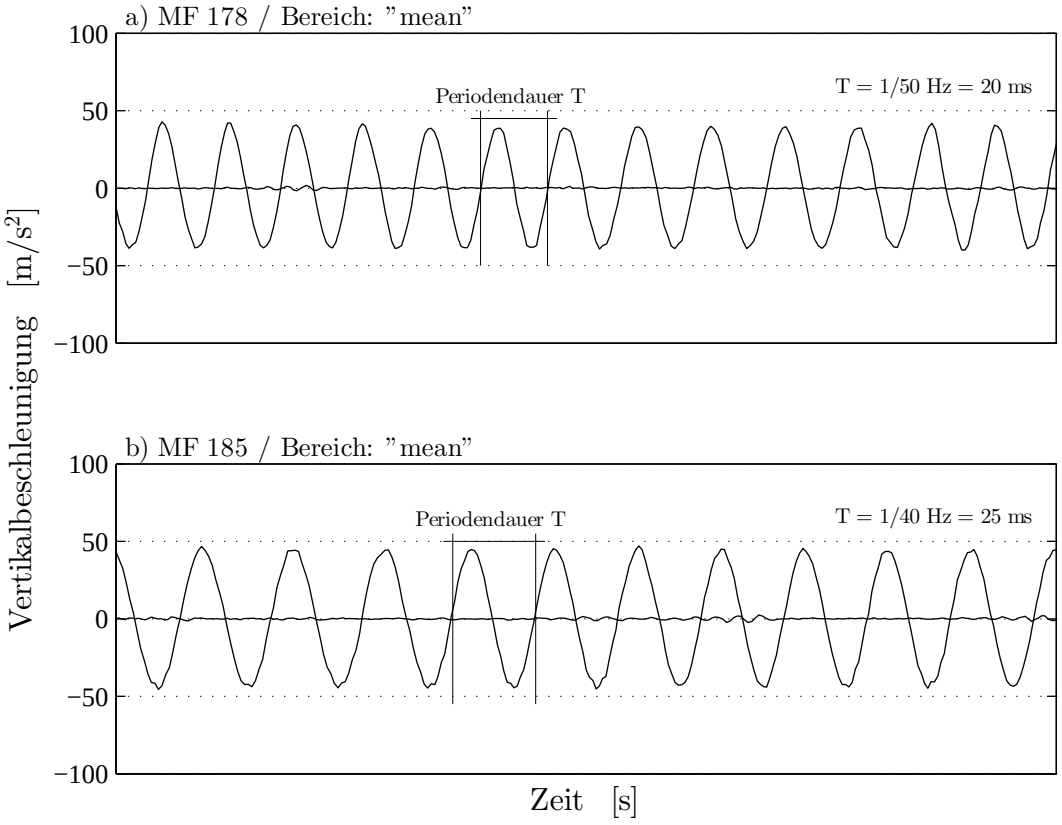


Abbildung 5.32: Ausschnitt der gemessenen vertikalen Bandagenbeschleunigung im Bereich "mean" für ausgewählte Messfahrten auf Spur 7.

5.3.4.3 Vertikale Kräfte - Betriebszustand

Abbildung 5.33 zeigt einen Ausschnitt des Verlaufes der vertikalen Kräfte im Bereich "mean" (siehe Abbildung 5.34). Die periodisch schwingende Bandage hat zu jedem Zeitpunkt Kontakt mit dem Untergrund. Nichtlinearitäten zufolge Kontaktverlust treten somit nicht auf. Die Beschleunigungskraft stellt einen nahezu perfekten, sinusförmigen Verlauf dar und wird nur geringfügig verzerrt. Die Maximalwerte der Bodenkontaktkraft sind, wie zu erwarten war, mit nur rund 50 kN sehr klein.

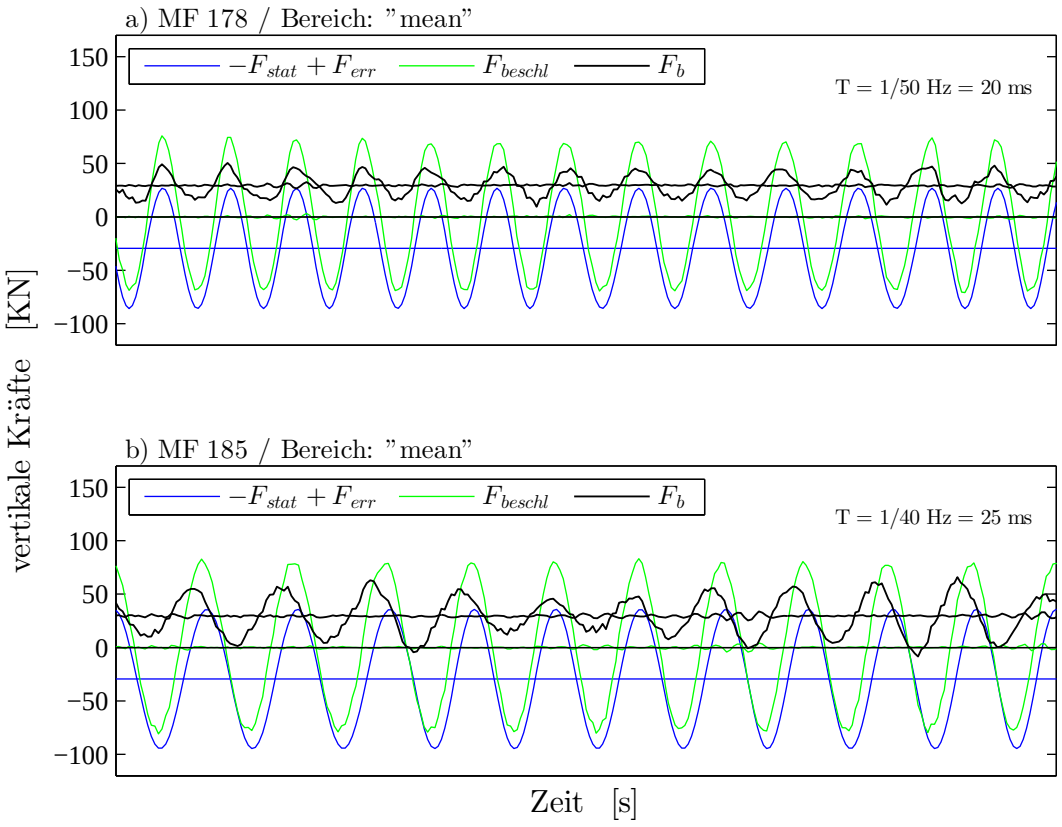


Abbildung 5.33: Darstellung der vertikalen Kräfte und der daraus resultierenden Bodenkontaktkraft F_b für ausgewählte Messfahrten auf Spur 7.

5.3.4.4 FDVK-Messwerte

Die auftretenden Porenwasserüberdrücke lassen die Walze auf einem regelrechten "Wasserbett" verdichten, was sich in niedrigen bzw. extrem niedrigen Messwerten ($CMV < 5$) niederschlägt. Jener Bereich, in dem die Entwicklung der Messwerte in weiterer Folge genauer betrachtet wird, ist, wie schon aus den vorherigen Kapiteln bekannt, mit "mean" gekennzeichnet.

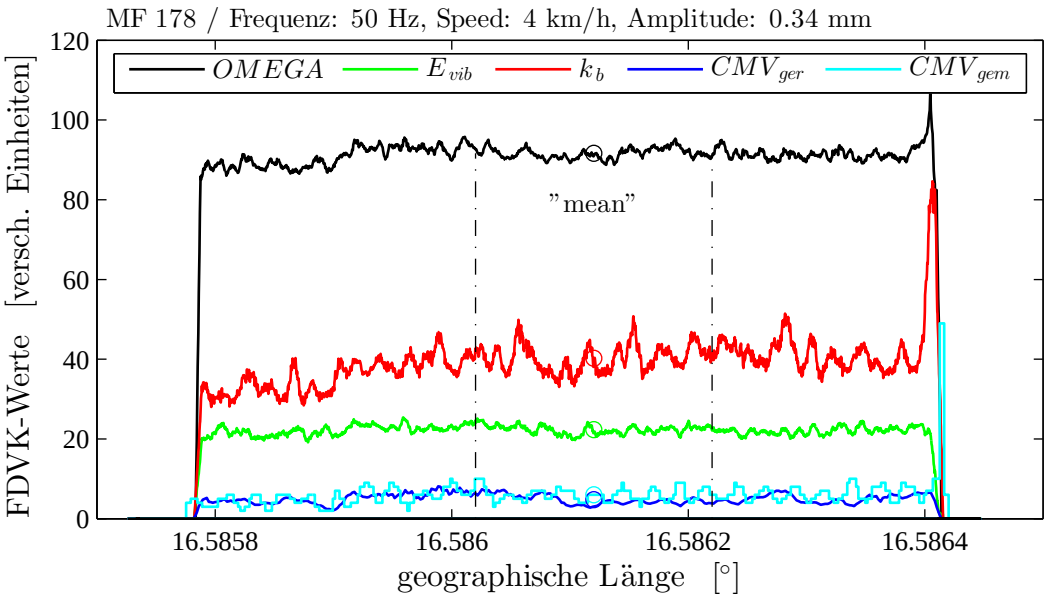


Abbildung 5.34: Darstellung der FDVK-Werte über die gesamte Messfahrt 178.

Da sich der bindige Boden unter den vorherrschenden Bedingungen (Porenwasserüberdrücke entlasten das Korngerüst und verhindern somit eine volumetrische Bodendeformation) nicht verdichten lässt, können etwaige Änderungen in den Messwertverläufen abermals den Parametervariationen zugerechnet werden.
Im Zuge der MF 176 - 184 wurde der Untergrund mit unterschiedlichen Frequenzen abgewalzt, MF 185 wurde mit großer Amplitude durchgeführt.

Zur Analyse der Messwertentwicklung im angesprochenen Abschnitt „mean“ ergeben sich demnach folgende 2 Bereiche:

- Bereich 1 mit MF 176 - 184: Frequenzänderung bei konstanter Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.34 mm.
- Bereich 2 mit MF 185: konstante Frequenz von 40 Hz, Geschwindigkeit von 4 km/h und eine Amplitude von 0.62 mm.

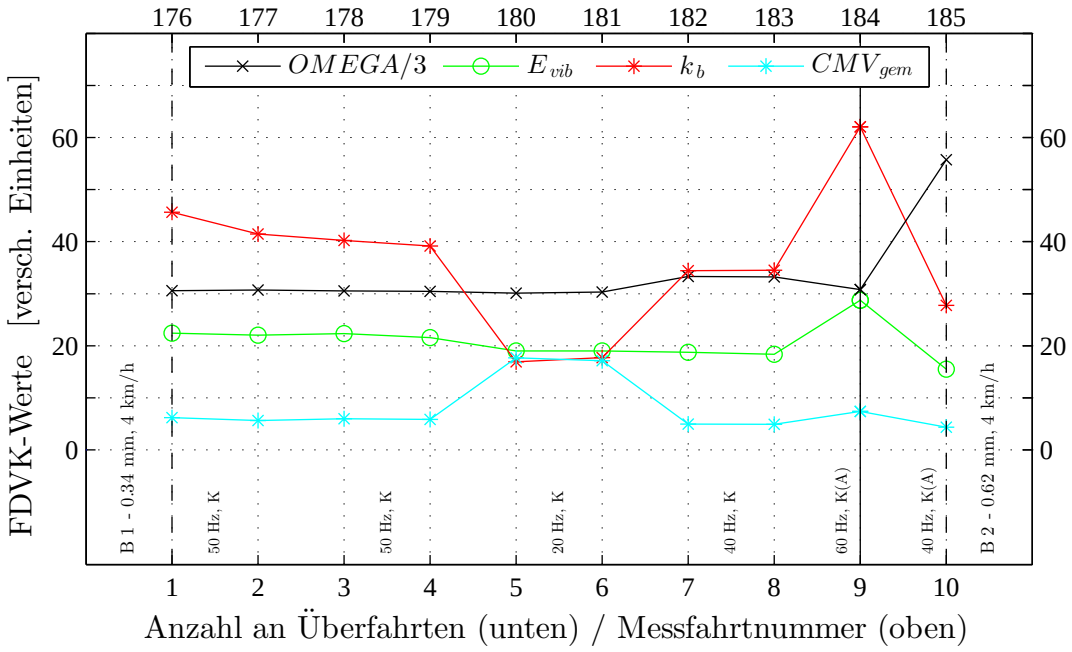


Abbildung 5.35: Entwicklung der im Abschnitt “mean” gemittelten FDVK-Werte über die gesamten Messfahrten auf Spur 7.

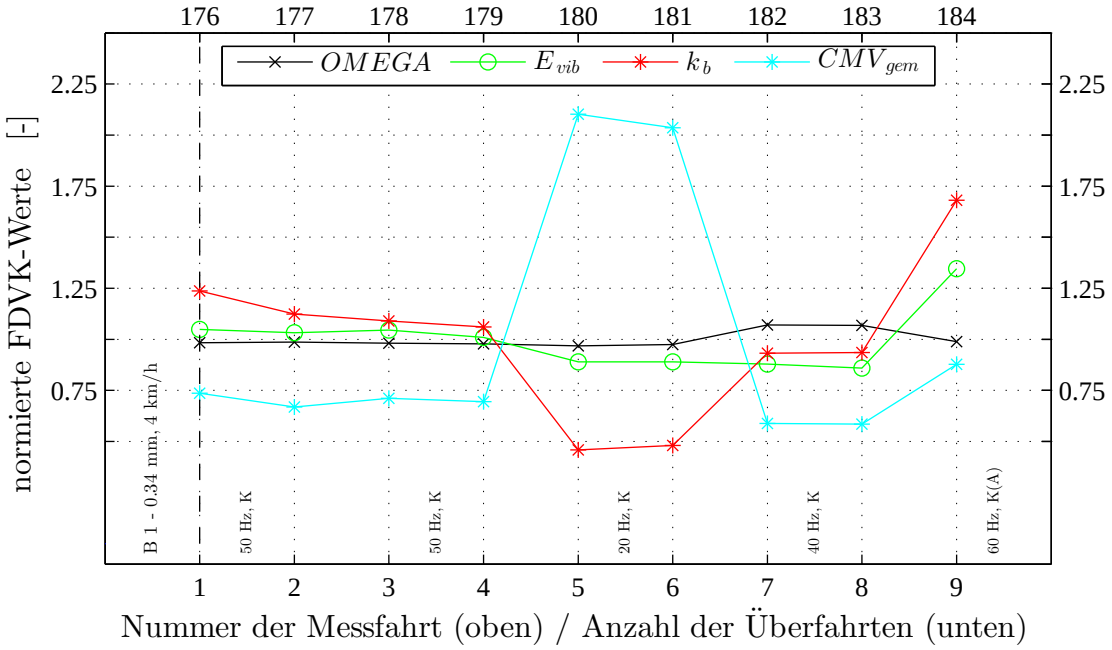


Abbildung 5.36: Darstellung der, innerhalb der jeweiligen Bereiche normierten, FDVK-Größen im Bereich “mean” der Spur 7.

Der *CMV*-Wert weist nur ein sehr geringes Werteniveau auf und schwankt zudem extrem (siehe auch Abbildungen 5.37 und 5.38). Eine wertemäßige Übereinstimmung des gerechneten und gemessenen *CMV*-Wertes ist jedoch durchaus gegeben. Weiters fällt auf, dass er seine Frequenzabhängigkeit lediglich bei den Messfahrten 180 und 181 zeigt. Eine Erhöhung des Messwertes zufolge der Amplitudenerhöhung (vgl. MF 183 und 185), wie man sie aufgrund der bisherigen Erkenntnisse aus den anderen Fahrspuren erwarten würde, bleibt aufgrund des extrem niedrigen Werteniveaus ebenfalls aus (siehe Abbildung 5.1).
Der *OMEGA*-Messwert zeigt sich bezüglich der Frequenzänderungen völlig unbeeindruckt, reagiert jedoch auf die Erhöhung der Erregeramplitude von 0.34 mm auf 0.62 mm mit einer Verdoppelung seines Werteniveaus.
Der k_b-Wert zeigt die größte Frequenzabhängigkeit aller Messgrößen. Er sinkt und steigt mit fallender bzw. steigender Unwuchtfrequenz, und zwar annähernd auf jenes Werteniveau, dass der eingestellten Frequenz entspricht (siehe Abbildung 5.35). Auf eine Erhöhung der Amplitude antwortet er, wie bereits von den vorherigen Testspuren bekannt, mit einem geringfügigen Werteabfall.
Der E_{vib}-Wert reagiert ähnlich auf die Amplitudenerhöhung, präsentiert sich jedoch weitaus frequenzunabhängiger, als eben besprochener k_b-Wert (mit Ausnahme von MF 184).

Zum Abschluss der Analyse auf Spur 7 werden die Messwertverläufe für je 2 vergleichbare Messfahrten untereinander dargestellt, um auf etwaige Besonderheiten in den Verläufen über die gesamte Fahrspur eingehen zu können und die eben gewonnenen Erkenntnisse darzustellen.
Abbildung 5.37 veranschaulicht die Frequenzabhängigkeit der Messwerte.
E_{vib}- und k_b-Wert sinken mit Abnahme der Frequenz. Bei Letztgenanntem fällt dieser Werteabfall wesentlich drastischer aus, zudem zeigt sich der gesamte Verlauf bei kleiner Frequenz entschieden ausgeglichener und stabiler. Der *OMEGA*-Wert bleibt auf konstantem Niveau; eine Frequenzabhängigkeit ist hier, ganz im Gegensatz zum *CMV*-Wert, nicht zu bemerken. Dieser antwortet auf einen Rückgang der Unwuchtfrequenz, im Gegensatz zum k_b-Wert, mit einem beträchtlichen Werteanstieg.
Ein Urteil über die Amplitudenabhängigkeit des *CMV*-Wertes, angesichts der in Abbildung 5.38 dargestellten Messwertverläufe abzugeben, ist zwar möglich, erscheint aber nicht zielführend. E_{vib}- und k_b-Wert reagieren gleichermaßen mit einem geringfügigen Rückgang des Niveaus, während der *OMEGA*-Wert nahezu auf das Doppelte anwächst.

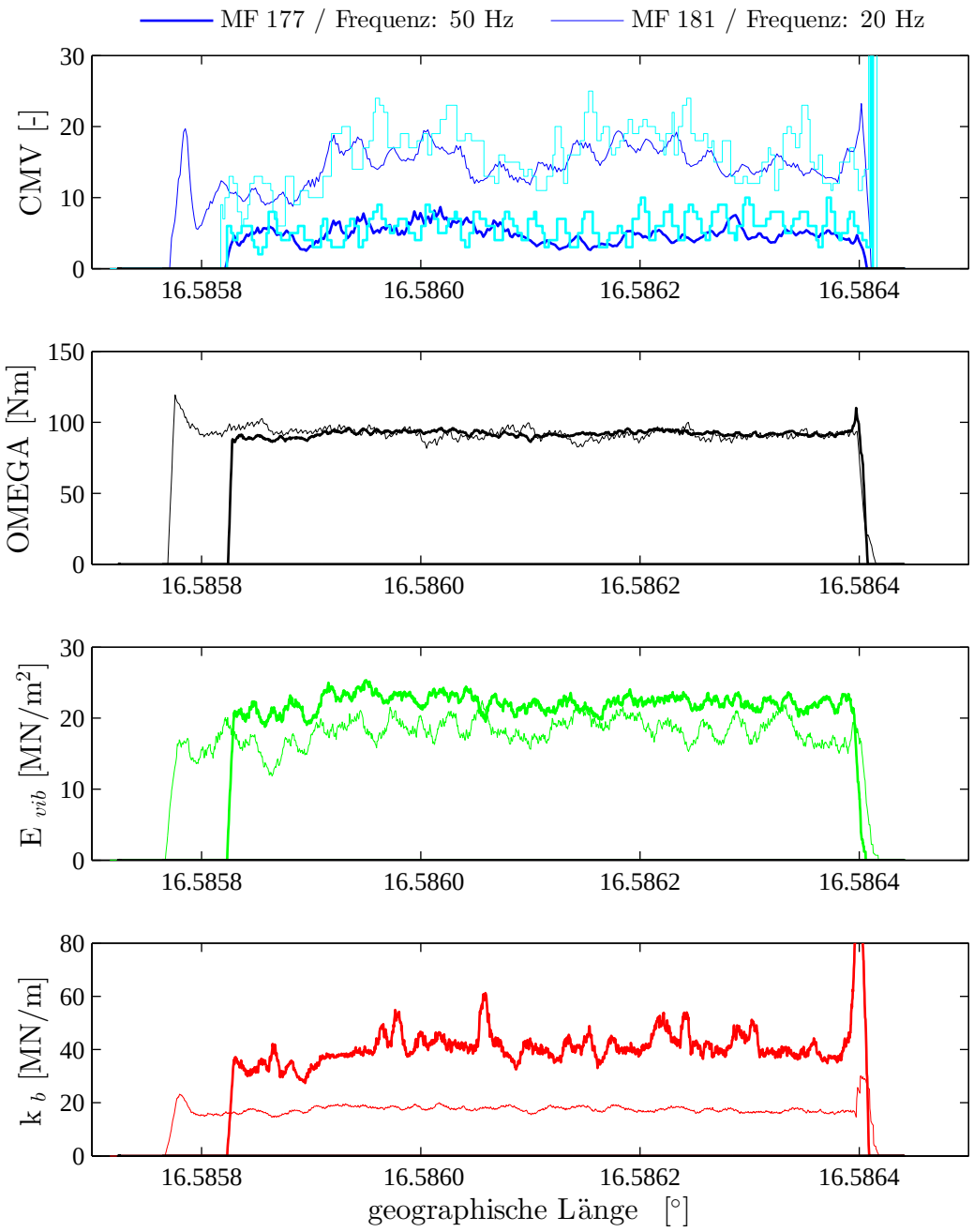


Abbildung 5.37: Gegenüberstellung zweier Messfahrten mit einer Frequenz von 50 Hz (dicke Linie) bzw. 20 Hz (dünne Linie), konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) und Amplitude (0.34 mm) auf Spur 7.

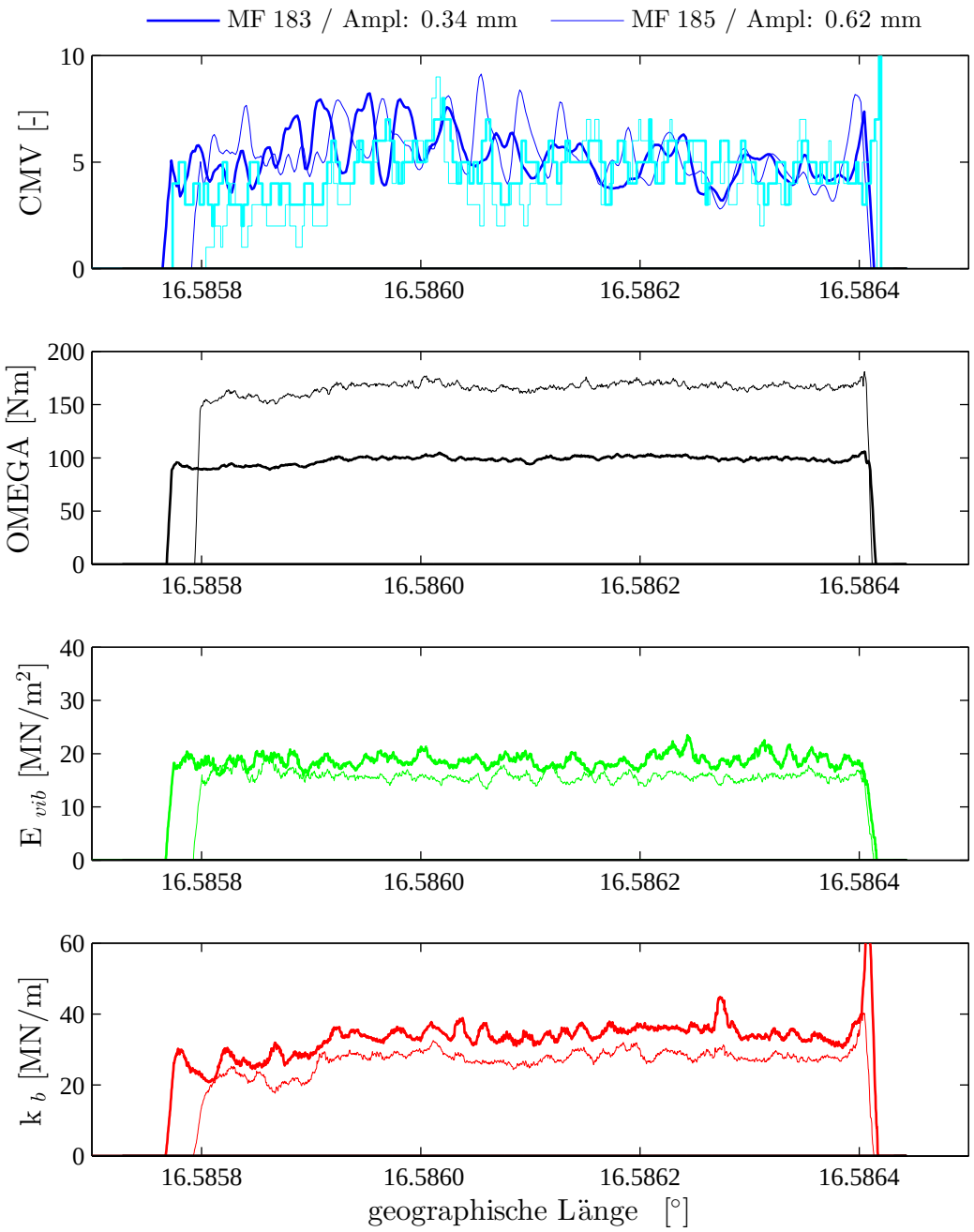


Abbildung 5.38: Gegenüberstellung zweier Messfahrten aus den Bereichen 1 und 2 auf Spur 7, die sich lediglich durch die Wahl der Amplitude von 0.34 mm (dicke Linie) bzw. 0.62 mm (dünne Linie) unterscheiden.

5.4 Korrelationsbildung

Stellt man Korrelationen zwischen Lastplattenversuchen, egal ob statischer oder dynamischer Natur, und den Messwerten der FDVK an, wie im Folgenden geschehen, so muss man sich stets über deren signifikant unterschiedliche Tiefenwirkung bewusst sein (siehe Kapitel 3.4 bzw. 3.5.3).
Da sowohl der E_{vd}-Wert, als auch die untersuchten FDVK-Größen, primär von der Steifigkeit des Untergrundes beeinflusst werden, die Messungen auf bereits annähernd fertig verdichteten und weitestgehend homogenen Abschnitten der Fahrspur (Bereich "mean") durchgeführt wurden und es sich in beiden Fällen um eine dynamische Methode zur Steifigkeitsermittlung von Böden handelt, ist es möglich, dennoch sehr gute Zusammenhänge nachzuweisen.
Eine vollkommen unproblematische Korrelationsbildung hinsichtlich dieses Sachverhaltes wäre theoretisch nur bei vollständig fertig verdichteten, homogenen Schichten mit ausreichender Mächtigkeit zu erreichen (konstante Walzenparameter und Betriebszustände vorausgesetzt).

Ein sinnvoller und aussagekräftiger Zusammenhang kann selbstverständlich nur für Überfahrten mit gleichen Walzenparametereinstellungen festgestellt werden. Auch unterschiedliche Bewegungsmuster der Walze (Betriebszustände) sind dabei allenfalls zu berücksichtigen. Dafür kamen im Wesentlichen 3 Parameterkombinationen in Frage, die mit den zugehörigen Messfahrtennummern jeweils oberhalb der nachstehenden Abbildungen 5.39, 5.40 und 5.41 angegeben sind.
Um dabei ein möglichst breites und somit zuverlässigeres Spektrum an Steifigkeitswerten abdecken zu können, wurden die Korrelationsanalysen mit Messfahrten auf allen vier Spuren durchgeführt. Es sind deshalb auch die Ergebnisse der Fahrten auf den „extremen" Spuren 5 und 7 miteinbezogen.

Die Abbildungen 5.39 bis 5.41 zeigen die Ergebnisse der Korrelationsanalyse.
Der in den Grafiken angeführte Korrelationskoeffizient r stellt ein dimensionsloses Maß für die Stärke und Richtung des linearen Zusammenhangs zwischen 2 Merkmalen dar und bewegt sich dabei in einem Wertebereich von $[-1 \leq r \leq +1]$.
Es gilt: je näher der Koeffizient bei 1 liegt, desto größer ist die lineare Abhängigkeit zwischen den Merkmalen.

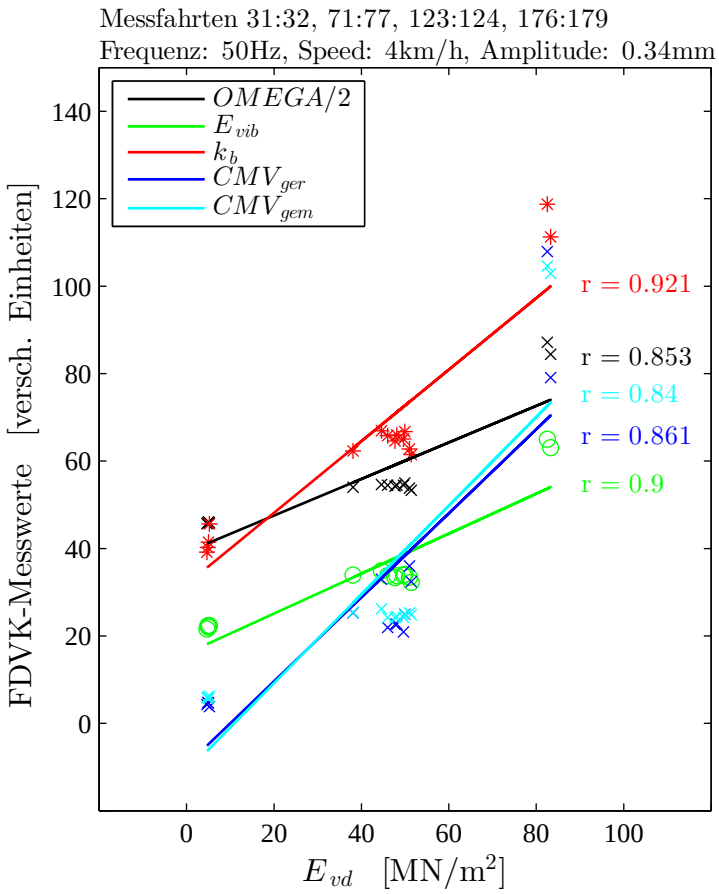


Abbildung 5.39: Korrelationsanalyse für Messfahrten, die mit einer Erregerfrequenz von 50 Hz, einer Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.34 mm durchgeführt wurden.

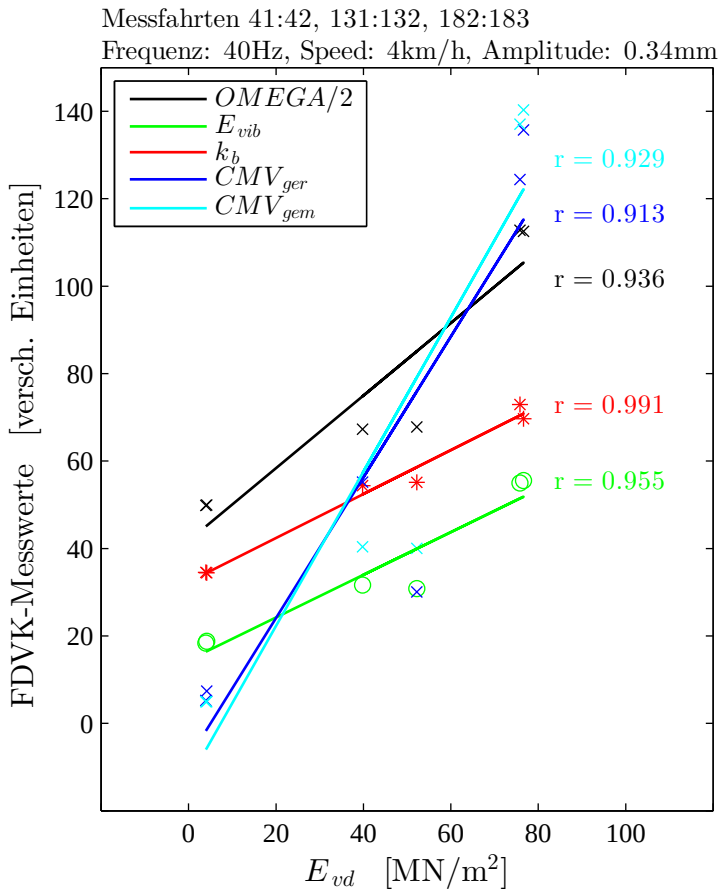


Abbildung 5.40: Korrelationsanalyse für Messfahrten, die mit einer Erregerfrequenz von 40 Hz, einer Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.34 mm durchgeführt wurden.

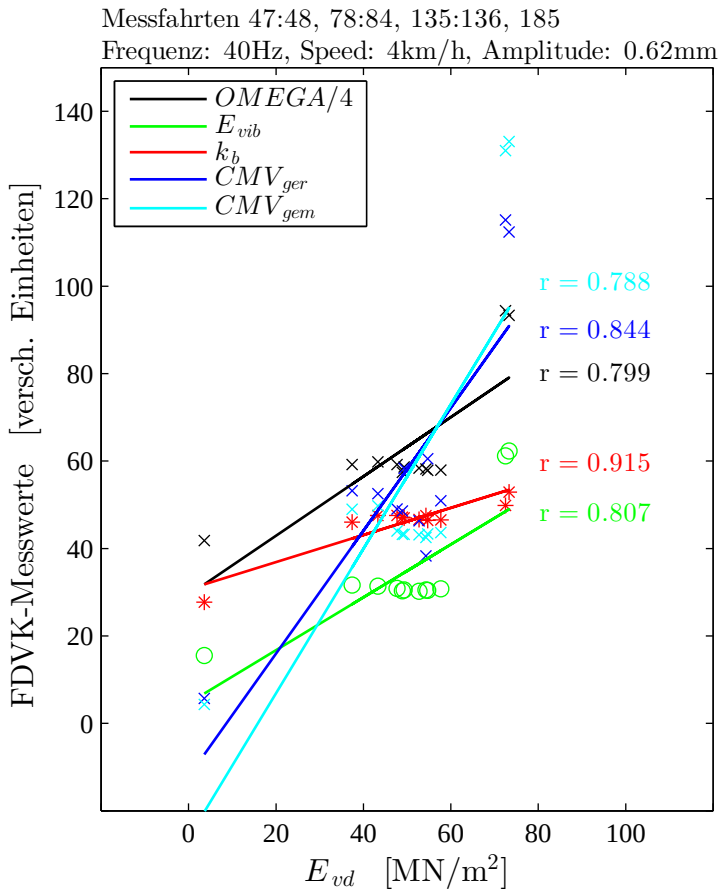


Abbildung 5.41: Korrelationsanalyse für Messfahrten, die mit einer Erregerfrequenz von 40 Hz, einer Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.62 mm durchgeführt wurden.

Obwohl sich die jeweiligen Formeln zur Messwertfindung sehr stark voneinander unterscheiden, konnte bei allen durchgeführten Parameterkombinationen eine hohe $(0,7 < r < 0,9)$ bzw. sehr hohe $(r > 0,9)$, positive Korrelation nachgewiesen werden. Auffallend ist, dass bei allen 3 Korrelationsbildungen die Ausgleichsgeraden des *OMEGA*- und E_{vib}-Wertes annähernd parallel verlaufen. Der CMV-Wert weist im Vergleich dazu, eine wesentlich größere Steigung auf.

Die Werte der FDVK sind auf der weichen Spur 7, mit Ausnahme des CMV-Wertes, wesentlich höher als die zugehörigen, gemessenen E_{vd}-Werte. Auf der steifen Spur 5 kann selbiger Sachverhalt in gegensinniger Weise festgestellt werden. Dies liegt in den bereits eingangs erwähnten, unterschiedlichen Tiefenwirkungen der beiden Messmethoden begründet. Die Walze erreicht schlichtweg tiefere Bodenbereiche, die auf oberflächennahen, weichen bzw. harten Untergrundverhältnissen ein höheres bzw. niedriges Messniveau vortäuschen.
Dieser Effekt schlägt sich, aufgrund der kleinen Erregeramplituden, der niedrigen Unwuchtmasse und der geringen schwingenden Gesamtmasse aber ohnehin in abgeschwächter Art und Weise nieder.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In den ersten Kapiteln vorliegender Diplomarbeit wurden die Grundlagen der Oberflächenverdichtung mit Walzen, dabei im Speziellen jene der Verdichtung mit Vibrationswalzen, sowie deren Anwendung zur Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle ausführlich behandelt und detailliert erläutert. Diese einleitenden Abschnitte bilden das theoretische Fundament und stellen das Grundgerüst für das eigentliche Herzstück dieser Arbeit dar.

Im Mittelpunkt standen die, mit einer speziell ausgerüsteten Tandemwalze im Zuge von groß angelegten experimentellen Versuchsreihen durchgeführten, Messfahrten mit vibratorisch angeregter Bandage. Aus den daraus gewonnen Daten und Signalen, die in Ihrer Gesamtheit das charakteristische Bewegungsverhalten des Verdichtungsgerätes während den Überfahrten beschreiben, wurden mit Hilfe von geeigneter Computersoftware die gängigen FDVK-Messwerte errechnet und entsprechend grafisch aufbereitet, um sie schlussendlich zu diskutieren und vergleichend gegenüberstellen zu können.

Die wesentlichen Erkenntnisse werden im Folgenden noch einmal ausformuliert und zusammengefasst:

- Allgemeines:
  - Da aufgrund der bereits durchgeführten hohen Anzahl an Messüberfahrten im Rahmen des Versuchsprogrammes (Oszillationsfahrten auf Spur 2 und 3), dem regen täglichen Baustellenverkehr in der Kiesgrube (steifes Planum auf Spur 5) und dem extrem weichen Untergrund auf Spur 7, auf keiner der befahrenen Spuren ein feststellbarer Verdichtungszuwachs, infolge der Vibrationsfahrten, zu verzeichnen war, konnten Änderungen in den berechneten FDVK-Messwertverläufen eindeutig der Variation der jeweiligen

Walzenparameter bzw. den daraus resultierenden Betriebszuständen der Walze zugeschreiben werden.

- Die Untersuchungen der Messwerte auf Spur 5 und 7 sind, aufgrund der "extremen" Untergrundverhältnisse, rein theoretischer Natur. Ein Praxisbezug lässt sich dabei nur schwer ausmachen. Umso bemerkenswerter sind die doch plausiblen Ergebnisse, zumal sie in der Mehrzahl auch noch mit den gewonnen Erkenntnissen aus Spur 2 und 3 übereinstimmen.
- Die Reproduzierbarkeit aller berechneten FDVK-Messwerte ist, selbst auf den Spuren 5 und 7, sehr gut. Die Verläufe von nacheinander durchgeführten Messfahrten ("Wiederholungsfahrten mit gleichen Parametereinstellungen") zeigen sich qualitativ, sowie quantitativ nahezu ident.
  Überfahrten mit unterschiedlichen Parametereinstellungen weisen ebenso nahezu gleiche Verläufe auf, sie unterscheiden sich lediglich durch einen Faktor und stehen somit in linearem Zusammenhang.
- Überraschend ist die überwiegend gute, qualitative Übereinstimmung der einzelnen Messwertverläufe über alle durchgeführten Fahrten auf den jeweiligen Spuren, unterscheiden sich die Formelapparate zur Ermittlung der Größen per Definition, doch sehr stark voneinander.

- Schwachstelle auf Spur 2:
  - Alle untersuchten FDVK-Werte lokalisierten die künstlich erzeugte Schwachstelle problemlos und antworteten mit einem Abfall des Messwertniveaus. Dieser war beim CMV- bzw. k_b-Wert verhältnismäßig am deutlichsten zu beobachten.
  - Aus einer Verschiebung der Matratzen im Zuge der Versuchsfahrten resultierte ein kurzzeitiger Anstieg der Messwerte zwischen den Matratzen. Dieser war bei Fahrten mit kleiner Amplitude und geringer Fahrgeschwindigkeit am deutlichsten ausgeprägt.

- Geschwindigkeitsabhängigkeit:
  - Nahezu alle FDVK-Werte, mit Ausnahme des k_b-Wertes, zeigen sich, wenn auch nur geringfügig, systematisch abhängig von der gewählten Fahrgeschwindigkeit.

Je geringer die Überfahrtgeschwindigkeit, desto „steifer“ erscheint der Boden. Das Messwertniveau sinkt also bei Messfahrten mit höheren Geschwindigkeiten.
Dieser Sachverhalt war in Bereich 1 der Testfahrten auf Spur 2, bzw. in Bereich 3 der Testfahrten auf Spur 5, besonders gut zu beobachten.

- Amplitudenabhängigkeit:
  - keine Messgröße zeigt sich unbeeindruckt von der Größe der dynamischen Anregung.
    Beim *OMEGA*- und *CMV*-Wert ist diese Abhängigkeit allerdings weitaus markanter ausgeprägt. Ihr Werteniveau steigt mit zunehmender Unwuchtexzentrizität signifikant an.
    Anders verhält es sich mit den beiden “jüngeren” Messwerten. Während der k_b-Wert bei Amplitudenerhöhung sogar geringfügig sinkt, behält der E_{vib}-Wert im Wesentlichen sein Werteniveau. Letzterer zeigt sich demnach am unsensibelsten in Bezug auf Amplitudenänderungen.

- Frequenzabhängigkeit:
  - Die Frequenz mit der sich die Unwucht in der Bandage dreht, nimmt ebenso Einfluss auf die Messgrößen.
    CMV- und *OMEGA*-Wert sinken mit zunehmender Frequenz. Der k_b-Wert hingegen zeigt einen deutlichen Anstieg bei Frequenzerhöhung. Ähnliches Verhalten lässt sich beim dynamischen Vibrationsmodul E_{vib} feststellen. Dieser legt zwar tendenziell auch zu, im Vergleich zu den übrigen Messgrößen jedoch wesentlich geringfügiger.
    Somit präsentiert sich der dynamische Vibrationsmodul, auch bezüglich den Frequenzvariationen, abermals als stabilster Messwert. Der festzustellende Werteanstieg (von k_b und E_{vib}) bzw. Abfall (von *CMV* und *OMEGA*) scheint im Übrigen, neben dem Differenzbetrag, auch vom Frequenzlevel abhängig zu sein.
    Bei mittleren Frequenzen (Bandbreite in etwa 30-45 Hz) fällt dieser Sachverhalt wesentlich unerheblicher aus, wie etwa bei, für die FDVK ohnehin untypischen, Frequenzen von 20 oder 60 Hz.

- Korrelation mit dem dynamischen Lastplattenversuch:
  - Es konnten bei allen 3 durchgeführten Korrelationsanalysen durchwegs gute bzw. sehr gute Zusammenhänge zwischen den Moduln der dynamischen Lastplatte und den FDVK-Werten festgestellt werden.
    Dabei stach der hervorragende lineare Zusammenhang zwischen E_{vd}- und k_b-Wert (mit Koeffizienten $r > 0.9$) besonders hervor.

Fazit

- Mit der Einführung des E_{vib}-Wertes ist es der Firma *BOMAG* gelungen, die Amplituden und Frequenzabhängigkeit des alten *OMEGA*-Wertes weitestgehend in den Griff zu bekommen. Der E_{vib}-Wert war unter allen untersuchten Messwerten derjenige, welcher sich am ehesten unbeeindruckt von den durchgeführten Parametervariationen präsentierte.
  Zudem sei an dieser Stelle angemerkt, dass der E_{vib}-Wert als einziger Messwert bereits im Ansatz, neben der Bestimmung der Bodenkontaktkraft, ebenso die Geometrie der Walze (Breite, Durchmesser) berücksichtigt und somit eine Übertragbarkeit des ermittelten Vibrationsmoduls auf andere Maschinentypen möglich erscheint.
- Die Steifigkeitsgröße k_b zeigt sich vor allem beim Umschalten auf geringe (20 Hz) und hohe (60 Hz) Erregerfrequenzen anfällig. Auf Amplitudenerhöhungen reagiert er mit einer merkbaren Änderung des Werteniveaus, wenngleich der resultierende Werterückgang auch nicht nur annähernd so stark ausgeprägt ist, wie dies bei den Messwerten *CMV* und *OMEGA*, allerdings in entgegengesetzter Richtung, beobachtet werden konnte.
  Die untersuchten Geschwindigkeitsvariationen verursachten, im Vergleich zu den übrigen Messgrößen, keine deutlich ausgeprägten Auffälligkeiten. Eine gewisse Tendenz in Richtung Werterückgang bei höheren Fahrgeschwindigkeiten, lässt sich dennoch erkennen.
  Alles in allem erscheint die Verwendung von zwei, doch unterschiedlich aufgebauten, Formeln zur Messwertermittlung für den Kontaktbetrieb bzw. -verlust, nicht förderlich um eine weitestgehend unabhängige Messgröße zu erhalten.
- Die Schwächen des *CMV*-Wertes liegen zweifelsohne in der sehr auffälligen Amplituden- und Frequenzabhängigkeit.

Während er auf Amplitudenerhöhungen mit einem signifikanten Anstieg der Werte antwortet, verursachen Frequenzerhöhungen einen Rückgang selbiger. Die Abhängigkeit gegenüber den Unwuchtfrequenzen liegt allerdings in der Natur der Sache, wenn man bedenkt, dass der *Compaction Meter Value* als einziger Messwert im Frequenzbereich ausgewertet wird.

- Der *OMEGA*-Wert zeigt, bezüglich Modifikationen von Erregeramplituden und -frequenzen, ähnliches Verhalten wie der Messwert des *Compactometer*-Systems, wenn auch in abgeschwächter Art und Weise. Bei einem Vergleich mit seinem "Nachfolger", dem dynamischen Vibrationsmodul E_{vib}, kommen die Schwächen des *OMEGA*-Wertes am besten zur Geltung.

Vergleicht man nun die, in Kapitel 5.1 zusammengefassten, Aussagen früherer Forschungsarbeiten mit den Erkenntnissen vorliegender Arbeit, so wird man durchwegs weitreichende Übereinstimmungen feststellen können.

6.2 Ausblick

Den Innovations- und Entwicklungsschub, den die Verdichtungstechnik, bezogen auf die Qualitätssicherung bei der Errichtung von Erdbauwerken, und dabei im Speziellen die FDVK, in den vergangenen Jahren erlebt hat, ist enorm.
Die stetige Weiterentwicklung von Elektronik, Mess- und Regelungstechnik, Datenerfassung, sowie verbesserte Rechnerleistungen, GPS-Einsatz etc. haben die Voraussetzungen für die Analyse der dynamischen Interaktion von Walze und Boden geschaffen und somit den Weg für die arbeitsintegrierte Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle geebnet.

Mittlerweile ist die FDVK-Technik mit Vibrationswalzen soweit ausgereift, dass sie bereits als Stand der Technik gilt und den "alt eingesessenen" punktuellen Verdichtungsprüfmethoden zunehmend ihre Grenzen aufgezeigt hat.
Die Erkenntnisse, Erfahrungen und das Verständnis für die bei der dynamischen Verdichtung auftretenden Effekte und Phänomene, sind in erster Linie den zahlreichen und umfangreichen Forschungsvorhaben in Form von theoretischen und praktischen Modellierungen, Simulationen und Versuchen zu verdanken [11, 24, 25, 36, 44, 61, 62, 1, 45, 49, 30, 31, 41, 48, 50, 66, 57, 63, etc.].
Durch theoretisch fundierte Forschungsaktivität in Kombination mit wertvoller Praxiserfahrung, infolge von vermehrtem Baustelleneinsatz bzw. experimentellen Untersuchungen, ist die Aussagekraft, Zuverlässigkeit und Bedienerfreundlichkeit der FDVK-Systeme zunehmend gestiegen und hat deren Einsatz und Anwendbarkeit gefördert.

Nichtsdestotrotz herrscht vor allem im Verständnis rund um die Einflussnahme von Maschinen- und Bodenparametervariationen auf das Messwertniveau und die daraus resultierende Empfindlichkeit von FDVK-Messgrößen, Entwicklungsbedarf.
Aufgrund der Vielzahl und der Komplexität an Einflussparametern auf die Messwerte (Betriebszustand, Amplitude, Frequenz, Bodensteifigkeit, Heterogenität des Untergrunds) stellt die richtige Interpretation der Werte an und für sich schon eine herausfordernde Aufgabe dar, die in Wahrheit nur durch Erfahrung und Ingenieursverstand erfolgen kann.

Wünschenswert wären demnach Messwerte, die sich weitgehend und nahezu unbeeindruckt von den gewählten Walzeneinstellungen bzw. Betriebszuständen der Walze zeigen und allein von der, sich während der Verdichtung steifigkeitsmäßig ändernden, Unterlage beeinflusst werden.

Mit der Einführung der “neuen”, direkt physikalisch interpretierbaren Größen, wie sie der dynamische Vibrationsmodul E_{vib} [MN/m²] und die dynamische Bodensteifigkeit k_b [MN/m] darstellen, konnte man diesbezüglich bereits einen Schritt in die richtige Richtung setzen (Reduktion der Amplitudenabhängigkeit im Gegensatz zu *CMV* und *OMEGA*), um eines Tages das ambitionierte Ziel einer “idealen” Messgröße zu erreichen.

Ebenso wäre eine direkte Zuordnung von FDVK-Messwerten an Tragfähigkeitswerte bzw. Verformungsmoduln von großem Vorteil, um sich die doch relativ aufwändige Kalibrierung zu ersparen, die auch aufgrund ihrer mannigfaltigen Beeinflussbarkeit von diversen Faktoren problematisch erscheint.

Die Vergleichbarkeit von Messwerten untereinander würde ebenfalls Erleichterung im Umgang mit FDVK-System schaffen und stellt ein weiteres Ziel, welches in diesem Zusammenhang nicht unerwähnt bleiben sollte, dar.

Hauptaugenmerk der Bodenmechaniker wird auch auf der Weiterentwicklung bzw. Neuentwicklung von geeigneten Regelkriterien für Walzen liegen, um das ehrgeizige Ziel einer intelligenten, selbstlernenden Walze, wie sie bereits in Kapitel 2.4.2.5 beschrieben wurde, eines Tages realisieren zu können.

Die Phase der Verdichtungskontrolle wird auch in Zukunft eine extrem bedeutsame und immer wichtiger werdende Rolle im Bauprozess spielen, da sie für die Qualitätssicherung von Bauwerken nun einmal unerlässlich ist. Den aufstrebenden, arbeitsintegrierten, dynamischen Verdichtungskontrollen wird dabei immense Bedeutung zukommen.
Gerade deswegen gilt es, anwendungsorientierte und praxisrelevante Forschung und Entwicklung rund um den Umgang mit der FDVK stetig und konsequent weiter voranzutreiben, um neue Erkenntnisse gewinnen zu können und dadurch neue Lösungsansätze für anstehende Probleme parat zu haben.

Denn eines ist klar: Davon profitiert am Ende des Tages jeder. Der Auftragnehmer, der Auftraggeber und letztlich wir alle, wenn schlussendlich ein qualitativ besseres und zuverlässigeres Erdbauwerk mit längerer Lebensdauer zur Verfügung steht.

Literaturverzeichnis

[1] Adam, D.: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen.* Dissertation, Technische Universität Wien, 1996

[2] Adam, D.: *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik.* Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Wien, 2011

[3] Adam, D.: *Aktuelle Entwicklungen in der Geotechnik.* Leibzig : 9. Erdbaufachtagung, Bauakademie Sachsen, Januar, 2013

[4] Adam, D. ; Kopf, F.: *Anwendung der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) im Deponiebau, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft ; 56, 5-6, S.64-70.* 2004

[5] Adam, D. ; Kopf, F.: *Operational devices for compaction optimization and quality control (Continuous Compaction Control, Light Falling Weight Device).* Athens, Greece : Proc. Intl. Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, S. 97-106, December 16 - 17, 2004

[6] Adam, D. ; Kopf, F. ; Paulmichl, I.: *Untersuchungen des dynamischen Lastplattenversuches mit dem leichten Fallgewichtsgerät unter Verwendung der Randelementmethode.* Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (ÖIAZ), 150. Jahrgang, Heft 4-5/2005

[7] Adam, D. ; Mooney, M.: *Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork Compaction: An Overview.* FMGM 2007: Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 2007

[8] Adam, D. ; Paulmichl, I.: *Bodenmechanische und bodenphysikalische Grundlagen der Bodenverbesserung.* Veranstaltung der VÖBU: Neue Entwicklung auf dem Gebiet der Bodenverbesserung, 2009

[9] Adam, D. ; Szabo, M. ; Paulmichl, I.: *Einsatz von innovativen Verdichtungstechnologien zur Sanierung von Hochwasserschutzdämmen in Ideen werden Wirklichkeit - 50 Jahre Ingenieurleistungen.* Wien : FCP - Fritsch, Chiari und Partner ZT GmbH, Eigenverlag 2010, S.60-75, 2010

[10] AMMANN AG, Group H.: *Broschüren und Prospekte.* Langenthal, Schweiz,

[11] Anderegg, R.: *Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern.* Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, ETH Nr. 12419, 1997

[12] Anderegg, R.: *Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern.* Fortschrittberichte VDI, Reihe 4, VDI Verlag, Düsseldorf, 1998

[13] Anderegg, R.: *Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors.* Windisch,Schweiz : FHNW, Hochschule für Technik, Institut für Automation, Jahresbericht 2010, 2004

[14] Anderegg, R.: *Intelligent Compaction with Vibratory Rollers.* Transportation Research Board TRB 2004 Annual Meeting, CD-ROM, 2004

[15] Anderegg, R.: *Dynamik der Verdichtungsgeräte - Chaos und Nichtlinearität.* Langenthal, Schweiz : SGA-Schweizerische Gesellschaft für Automatik, Bulletin Nr. 56, 2010

[16] Anderegg, R.: *Ammann/Case/Texana IC System.* Dallas TX : Presentation TPF ICS initial TWG meeting, 23-24. Januar 2008

[17] Anderegg, R. ; Felten, D. von: *Verdichtungsgeräte und Chaostheorie.* Workshop Bodenverdichtung, pp. 167-184, TU Hamburg-Harburg, 2003

[18] Anderegg, R. ; Felten, D. von: *Chaos und Nichtlinearität.* Isernhagen : Strassen und Tiefbau, Heft 12/2004, S. 3 - 9, 2004

[19] Anderegg, R. ; Felten, D. von ; Kaufmann, K.: *Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors.* Langenthal,Schweiz : Ammann, 2004

[20] Anderegg, R. ; Kaufmann, K.: *Intelligent compaction with vibratory rollers.* Washington D.C. : Transportation Research Record 1868, Transportation Research Board, S. 124 - 134, 2004

[21] Blovsky, S.: *Vergleich bestehender Normen und Richtlinien zum Thema flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) sowie Vergleich der marktführenden Mess-Systeme und ihrer normgerechten Anwendbarkeit.* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 1997

[22] BOMAG, MaschinenhandelsgesellschaftmbH: *Broschüren und Prospekte.* Deutschland,

[23] Brandl, H.: *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik.* Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Wien, 2006

[24] Brandl, H. ; Adam, D.: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen - Grundlagenforschung und praktische Anwendung.* Republik Österreich , Bundesministerium für Verkehr, Innovation u. Technologie, Bundesstrassenverwaltung, Heft 506, 2000

[25] Brandl, H. ; Adam, D. ; Kopf, F.: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit unterschiedlich angeregten dynamischen Walzen - Grundlagenforschung und praktische Anwendung.* Republik Österreich , Bundesministerium für Verkehr, Innovation u. Technologie, Bundesstrassenverwaltung, Heft 517, 2002

[26] Bräu, G. ; Hartmann, K. ; Pelz, G.: *Flächendeckende Prüfung der Verdichtung (FDVK) - baupraktische Umsetzung und verfahrensbezogene Verdichtungsanforderungen.* Bonn; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 897, 2004

[27] Bräu, G. ; Vogt, S. ; Vogt, N.: *Ermittlung der bodenspezifischen Anwendungsgrenzen der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK).* Bonn:Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1015, 2009

[28] Cohrs, H.H.: *Innovative Technologien bei der Asphalt- und Bodenverdichtung.* BMT 4, S.174 - 182, August, 1991

[29] DIN 18125-2: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 2: Feldversuche.* März 2011

[30] Floss, R.: *Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erd- und Straßenbauten.* Bundesministerium für Verkehr, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 612, 1991

[31] Floss, R. ; Henning, J.: *Variomatic - ein entscheidender Schritt zur Qualitätssicherung im modernen Erd- und Verkehrswegebau.* Boppard : Bomag, BA 049 [3/98], 1998

[32] Forssblad, L.: *Compaction meter on vibratoring rollers for improved compaction control.* Proceedings of International Conference on Compaction, Paris, Vol II, 541-546, 1980

[33] Forssblad, L. ; Thurner, H.: *Compaction meter on vibrating rollers.* Solna : Research Bulletin of Dynapac AB, No.8022, 1980

[34] Geodynamik, AB: *Compactometer Verdichtungsmesser für vibrierende Walzen ALFA-022R.* Stockholm, 1996

[35] Geodynamik, AB: *Dokumentationssystem für flächendeckende Verdichtungskontrolle CDS-012-J.* Stockholm, 1996

[36] Grabe, J.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle.* Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1991

[37] HAMM AG, Wirtgen G.: *Broschüren und Prospekte.* Tirschenreuth, Deutschland,

[38] Hartmann, K.: *Untersuchung zur Prognose von Anforderungswerten an die Beschleunigungsmesswerte der FDVK.* Dissertation, Schriftenreihe Heft 34, Technische Universität München, 2002

[39] Hertz, H.: *Über die Berührung fester elastischer Körper.* Leibzig : Gesammelte Werke, Band 1, 1895

[40] Jaderny, D.: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) im Vergleich mit konventionellen Versuchen.* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 1999

[41] Kelm, M.: *Numerische Simulation der Verdichtung rolliger Böden mittels Vibrationswalzen.* Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2003

[42] Kloubert, H.J.: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle als Beitrag zur Qualitätssicherung im Erd- und Straßenbau.* Boppard : Bomag GmbH, 1993

[43] Kloubert, H.J. ; R.Thiele: *Dynamische Baugrundverbesserung durch den Einsatz schwerer Polygonwalzen.* BauPortal 5 /2011, 2011

[44] Kopf, F.: *Grossversuch zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK).* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 1995

[45] Kopf, F.: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bei der Verdichtung von Böden durch dynamische Walzen mit unterschiedlichen Anregungsarten.* Dissertation, Technische Universität Wien, 1999

[46] Kopf, F.: *Grundsatzversuch Oszillationsverdichtung Fischamend.* Power Point Präsentation (unveröffentlicht), Wien, 2012

[47] Kopf, F. ; D.Adam: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) - Kalibrierung und Anwendung gemäß RVS 8S.02.6.* Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (ÖIAZ), 150.Jahrgang, Heft 4-5/2005

[48] Kopf, F. ; Erdmann, P.: *Numerische Untersuchungen der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle.* Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (ÖIAZ), 150.Jahrgang, Heft 4-5/2005, 2005

[49] Kröber, W.: *Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverichtung von Böden.* Dissertation, Technische Universität München, 1988

[50] Kröber, W.: *Vario-Control und FDVK im Erdbau - schwierige Verdichtungsaufgaben sicher und wirtschaftlich gelöst.* Braunlage,Deutschland : Tagungsband "Wachstum durch Innovation", 24 - 26. Februar1999

[51] Kröber, W. ; Floss, R. ; Wallrath, W.: *Dynamische Bodensteifigkeit als Qualitätskriterium für die Bodenverdichtung.* München : Berichte, Internationales Symposium Technik,Technologie des Verkehrswegebaus, 2001

[52] Lundberg, G.: *Elastische Berührung zweier Halbräume.* Göteborg : Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens, Band 10, 201-211, 1939

[53] Markiewicz, R.: *Untersuchungen zur Arbeitsweise und Tiefenwirkung der Polygonbandage auf nichtbindigem Boden.* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, März, 2001

[54] ÖNORM B 4414-2: *Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Dichte des Bodens, Feldverfahren.* Oktober 1979

[55] ÖNORM B 4418: *Geotechnik - Durchführung von Proctorversuchen im Erdbau.* Jänner 2007

[56] Pistrol, J. ; Kopf, F. ; Adam, D. ; Villwock, S. ; Völkel, W.: *Ambient vibration of oscillating and vibrating rollers.* Wien : Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013), 28-30 August 2013

[57] Preisig, M. ; Caprez, M. ; Amann, P.: *Validieren von Methoden der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK).* Workshop Bodenverdichtung, pp. 235-242, TU Hamburg-Harburg, 2003

[58] Richtlinien und Vorschriften für den Strassenbau: *RVS 08.03.02: Erdarbeiten - Kontinuierlicher walzenintegrierter Verdichtungsnachweis.* 1999

[59] Richtlinien und Vorschriften für den Strassenbau: *RVS 08.03.04: Erdarbeiten - Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches.* 2008

[60] Richtlinien und Vorschriften für den Strassenbau: *RVS 08.03.01: Erdarbeiten.* 2010

[61] Schaller, C.: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) im Erdbau mittels Compactometer im Vergleich mit konventionellen Prüfmethoden.* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 1995

[62] Schwarzendorfer, O.: *Wirtschaftliche Untersuchung zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle.* Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 1996

[63] Thurner, H.: *Verfahren und Vorrichtung zur Beurteilung des Verdichtungsgrades beim Verdichten einer Unterlage mit einem vibrierenden Verdichtungsgerät.* Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift 2710811, Aktenzeichen P2710811.8, 1978

[64] Thurner, H. ; Sandström, A.: *Compaction meter on vibrating roller.* Solna : Dynapac Research, 1980

[65] Thurner, H. ; Sandström, A.: *A new device for instant compaction control.* Proceedings of International Conference on Compaction, Paris, Vol II, 611-614, 1980

[66] White, D. ; Vennapusa, P. ; Mooney, M. ; Rinehart, R. ; Rutledge, J. ; Facas, N. ; Musimbi, O.: *Intelligent Soil Compaction Systems - Report 676.* Washington D.C. : National Cooperative Highway Research Program, 2010

[67] Wolf, J.P.: *Foundation Analysis Using Simple Physical Models.* Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, N.J., 1994

[68] Yoo, T.S. ; Selig, E.T.: *New concepts for vibratory compaction of soil.* Proceedings of International Conference on Compaction, Paris, Vol II, 703-707, 1980

Abbildungsverzeichnis

2.1 Übersicht über Bodenverbesserungsmaßnahmen [8, adaptiert]. 6
2.2 Methoden der mechanischen Bodenverdichtung [2, adaptiert]. 7
2.3 Gegenüberstellung der Verdichtungseigenschaften von bindigen und nicht bindigen Böden [8]. 12
2.4 Walzenzüge der Firma BOMAG mit verschiedenen Bandagentypen a) Glattmantelbandage b) Schaffußbandage/Stampffußbandage c) Polygonbandage [22, adaptiert]. 16
2.5 Prinzip der statischen Walze 18
2.6 Prinzip der Oszillationswalze [2]. 20
2.7 Ausbreitung der Oberflächenwellen bei Oszillationswalzen (links) und Vibrationswalzen (rechts) [28]. 20
2.8 Prinzip der Vibrationswalze [2]. 21
2.9 Vibrationswalze mit geteilten Unwuchten [48, adaptiert]. 22
2.10 VARIO-Walze [48, adaptiert]. 23
2.11 VARIOCONTROL-Walze der Firma BOMAG [22, adaptiert]. 25
2.12 ACE-Walze [48, adaptiert]. 26
2.13 Mit zunehmender Verdichtungszeit bzw. Anzahl an Überfahrten steigt die Bodensteifigkeit, die Amplitude wird zurückgeschalten und die Frequenz erhöht [16, adaptiert]. 26
2.14 Betriebszustände einer Vibrationswalze [1, adaptiert]. 28
2.15 Übersicht über punktuelle Verdichtungsprüfmethoden [2]. 32
2.16 Ausstechzylinderverfahren (links) und Sandersatzverfahren (rechts) [22, adaptiert]. 33
2.17 Isotopensonde 34
2.18 Proctorversuch [2]. 35
2.19 Komponenten (links) bzw. Bodenpressung, Verschiebung und Arbeitsdiagramm (rechts) der Dynamischen Lastplatte [23, adaptiert] 37

2.20 Bildhafter Vergleich von punktueller und flächendeckender Verdichtungsprüfung [22]. 38

3.1 Komponenten eines FDVK-Systems (oben), gemessene Bandagenbeschleunigung (unten) und Darstellung des Verdichtungsfortschrittes auf dem Display (rechts) [2, adaptiert]. 41
3.2 Messtiefe vs. Verdichtungstiefe [24]. 47
3.3 Probefeld für die Kalibrierung der FDVK-Messwerte nach RVS 08.03.02 [58]. 48
3.4 Kalibrierung der FDVK[2]. 50
3.5 Ermittlung der Grenzwerte der FDVK gemäß RVS 08.03.02 [2]. . . . 50
3.6 Messtiefe der FDVK im Vergleich zu konventionellen Versuchen [24]. . 52
3.7 Übersicht über etablierte FDVK-Systeme, zugehörige Messwerte und deren Definitionen, sowie Hersteller. 56
3.8 Verdichtungsmess- und Dokumentationssystem der schwedischen Firma *Geodynamik AB*, Stockholm [34]. 58
3.9 Möglichkeiten des Ausdrucks des FDVK-Protokolls a) über PC mit Software oder b) direkt über das CDS [35, adaptiert]. 58
3.10 Prinzip des Compactometers. 60
3.11 Methode zur Ermittlung des *CMV*-Wertes: 2 Zyklen des vertikalen Bandagenbeschleunigungssignals (Amplitude) im Zeitbereich werden einer Spektralanalyse im Frequenzbereich unterzogen [7, adaptiert]. . 61
3.12 Darstellung der FDVK-Messwerte am Beispiel der BOMAG-Messtechnik; a) bahngebundene, b) GPS-basierte Vorgangsweise; jeweils links: Darstellung der Baustelle, in der Mitte: die Ansicht auf dem Messmonitor in der Walze und rechts: Dokumentation der Messdaten am PC. . . . 64
3.13 Übersicht über die Verdichtungsmess- und Dokumentationstechnik der Firma BOMAG [22, adaptiert]. 64
3.14 Indikatordiagramm als Kraft-Weg Diagramm [26, 49]. 65
3.15 Vertikales Kräftegleichgewicht an der Bandage. 66
3.16 Zunehmende Bodensteifigkeiten führen zu steileren Belastungskurven im Kraft-Weg Diagramm [51, adaptiert]. 68
3.17 Arbeitsdiagramm der schwingenden Bandage für die Berechnung des *OMEGA*- und des E_{vib}-Wertes [48]. 68
3.18 Mit zunehmender Verdichtung steigt auch der E_{vib}-Wert [42, 31, adaptiert]. 70

3.19 Zusammenhang zwischen Bodensteifigkeit und E-Modul basierend auf der Theorie des elastischen Halbraumes [7, adaptiert]. 71
3.20 Funktionsweise Ammann Compaction Expert System - ACE [15]. . . 72
3.21 Komponenten des ACE-Systems [10, adaptiert]. 74
3.22 Analytisches Maschine - Boden Interaktionsmodell [20, adaptiert]. . . 75
3.23 Arbeitsdiagramm bei ständigem Kontakt (links) und Kontaktverlust (rechts) [66]. 76
3.24 Erregerkraft und Schwingweg der Bandage, mit eingezeichneter Phasenverschiebung und maximalem Schwingweg, zur Berechnung von k_b im Kontaktbetrieb [48]. 77
3.25 Arbeitsdiagramm mit eingezeichneten Hilfsgrößen zur Berechnung des k_b-Wertes bei Kontaktverlust [48]. 78

4.1 Satellitenbild der Umgebung der Kiesgrube 79
4.2 Luftbildaufnahme des Testgeländes 80
4.3 Spureneinteilung 81
4.4 "Brimos Wireless" Einheit [46] 82
4.5 Haupttestfeld mit den Spuren 1 - 4 82
4.6 Prinzipskizze der Spuren 1 - 4 mit Messsensoren [46, adaptiert] 83
4.7 Einbau der Matratzen als "Schwachstelle" 83
4.8 Spur 5 auf steifem Planum 84
4.9 Prinzipskizze der Spur 5 [46, adaptiert] 84
4.10 Spur 6 und 7 85
4.11 Prinzipskizze der Spuren 6 und 7 [46, adaptiert] 85
4.12 HAMM HD+ 90 VO 86
4.13 Kräfte und Momente an der Bandage; vorne Vibration, hinten Oszillation [56] 87
4.14 Datenblatt HAMM HD+ 90 VO [37] 88
4.15 Messlayout Übersicht [46, adaptiert] 89
4.16 Für die Vibrationsversuche installierte Messsysteme [46, adaptiert] . . 89
4.17 GPS Bezug Walze [46] 90
4.18 Translatorisches Messsystem der Vibrationsbandage [46, adaptiert] . . 91
4.19 Messprotokoll vom 18/19.04.2012 93
4.20 Messprotokoll vom 23.04.2012 94
4.21 Bestimmung des E_{vd} mit der dynamischen Lastplatte 95
4.22 Messprotokoll der Dynamischen Lastplatte vom 18/19.04.2012 96

4.23 Messprotokoll der Dynamischen Lastplatte vom 23.04.2012 97

5.1 FDVK-Werte (*CMV*, *RMV* und *OMEGA*) in Abhängigkeit des Schubmoduls G [MN/m²] des Bodens, bei verschiedenen Betriebszuständen der Vibrationsbandage [1]. 99
5.2 Relative FDVK-Werte (*CMV*, *OMEGA*, E_{vib}und k_b) in Abhängigkeit des *E-Moduls* [MN/m²] des Bodens, bestimmt aus numerischen Simulationen [5]. 100
5.3 Graphische Darstellung von FDVK-Messwerten (*CMV*, *OMEGA*, E_{vib} und k_b) aus Simulationsberechnungen [48]. 101
5.4 Entwicklung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} über alle durchgeführten Messfahrten auf Spur 2. 109
5.5 Ausschnitt der gemessenen vertikalen Bandagenbeschleunigung im Bereich “weak” (oben) und “mean” (unten) für ausgewählte Messfahrten auf Spur 2. 110
5.6 Darstellung der vertikalen Kräfte und der daraus resultierenden Bodenkontaktkraft F_b für ausgewählte Messfahrten auf Spur 2. 112
5.7 Vergleich des mittels Compactometer gemessenem und dem aus unabhängigen Beschleunigungsmessungen errechnetem *CMV*-Wertes. . . 113
5.8 Darstellung der FDVK-Werte über die gesamte Messfahrt 37. 114
5.9 Entwicklung der im Abschnitt “mean” gemittelten FDVK-Werte über die gesamten Messfahrten auf Spur 2. 116
5.10 Darstellung der, innerhalb der jeweiligen Bereiche normierten, FDVK-Größen im Bereich “mean” der Spur 2. 116
5.11 Entwicklung der im Abschnitt “weak” gemittelten FDVK-Werte über die gesamten Messfahrten auf Spur 2. 118
5.12 Darstellung der, innerhalb der jeweiligen Bereiche normierten, FDVK-Größen im Bereich “weak” der Spur 2. 118
5.13 Gegenüberstellung zweier Messfahrten mit einer Geschwindigkeit von 4 km/h (dicke Linie) bzw. 2 km/h (dünne Linie), konstanter Frequenz (50 Hz) und Amplitude (0.34 mm) auf Spur 2. 120
5.14 Gegenüberstellung zweier Messfahrten mit einer Frequenz von 40 Hz (dicke Linie) bzw. 60 Hz (dünne Linie), konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) und Amplitude (0.34 mm) auf Spur 2. 121

5.15 Gegenüberstellung zweier Messfahrten mit einer Frequenz von 30 Hz (dicke Linie) bzw. 40 Hz (dünne Linie), konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) und Amplitude (0.62 mm) auf Spur 2. 122
5.16 Gegenüberstellung normierter FDVK-Messwertverläufe mit ausgewählten Messfahrten aus je einem Bereich auf Spur 2. 123
5.17 Entwicklung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} über alle durchgeführten Messfahrten auf Spur 3. 125
5.18 Ausschnitt der gemessenen vertikalen Bandagenbeschleunigung im Bereich "mean" für ausgewählte Messfahrten auf Spur 3. 126
5.19 Darstellung der vertikalen Kräfte und der daraus resultierenden Bodenkontaktkraft F_b für ausgewählte Messfahrten auf Spur 3. 127
5.20 Darstellung der FDVK-Werte über die gesamte Messfahrt 73. 128
5.21 Entwicklung der im Abschnitt "mean" gemittelten FDVK-Werte über die gesamten Messfahrten auf Spur 3. 129
5.22 Darstellung der, innerhalb der jeweiligen Bereiche normierten, FDVK-Größen im Bereich "mean" der Spur 3. 129
5.23 Gegenüberstellung der Messfahrten 72 (dicke Linie) und 77 (dünne Linie) mit konstanter Geschwindigkeit (4 km/h), Frequenz (50 Hz) und Amplitude (0.34 mm) auf Spur 3. 131
5.24 Gegenüberstellung der Messfahrten 79 (dicke Linie) und 83 (dünne Linie) mit konstanter Geschwindigkeit (4 km/h), Frequenz (40 Hz) und Amplitude (0.62 mm) auf Spur 3. 132
5.25 Gegenüberstellung der Messfahrten 74 (dicke Linie) und 80 (dünne Linie) aus Bereich 1 und 2 auf Spur 3. 133
5.26 Darstellung der FDVK Werte über die gesamte Messfahrt 124. 134
5.27 Ausschnitt der gemessenen vertikalen Bandagenbeschleunigung im Bereich "mean" für ausgewählte Messfahrten auf Spur 5. 136
5.28 Darstellung der vertikalen Kräfte und der daraus resultierenden Bodenkontaktkraft F_b für ausgewählte Messfahrten auf Spur 5. 137
5.29 Entwicklung der im Abschnitt "mean" gemittelten FDVK-Werte über die gesamten Messfahrten auf Spur 5. 138
5.30 Darstellung der, innerhalb der jeweiligen Bereiche normierten, FDVK-Größen im Bereich "mean" der Spur 5. 138
5.31 Entwicklung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} über alle getätigten Messfahrten auf Spur 7. 141

5.32 Ausschnitt der gemessenen vertikalen Bandagenbeschleunigung im Bereich “mean” für ausgewählte Messfahrten auf Spur 7. 142
5.33 Darstellung der vertikalen Kräfte und der daraus resultierenden Bodenkontaktkraft F_b für ausgewählte Messfahrten auf Spur 7. 143
5.34 Darstellung der FDVK-Werte über die gesamte Messfahrt 178. 144
5.35 Entwicklung der im Abschnitt “mean” gemittelten FDVK-Werte über die gesamten Messfahrten auf Spur 7. 145
5.36 Darstellung der, innerhalb der jeweiligen Bereiche normierten, FDVK-Größen im Bereich “mean” der Spur 7. 145
5.37 Gegenüberstellung zweier Messfahrten mit einer Frequenz von 50 Hz (dicke Linie) bzw. 20 Hz (dünne Linie), konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) und Amplitude (0.34 mm) auf Spur 7. 147
5.38 Gegenüberstellung zweier Messfahrten aus den Bereichen 1 und 2 auf Spur 7, die sich lediglich durch die Wahl der Amplitude von 0.34 mm (dicke Linie) bzw. 0.62 mm (dünne Linie) unterscheiden. 148
5.39 Korrelationsanalyse für Messfahrten, die mit einer Erregerfrequenz von 50 Hz, einer Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.34 mm durchgeführt wurden. 150
5.40 Korrelationsanalyse für Messfahrten, die mit einer Erregerfrequenz von 40 Hz, einer Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.34 mm durchgeführt wurden. 151
5.41 Korrelationsanalyse für Messfahrten, die mit einer Erregerfrequenz von 40 Hz, einer Geschwindigkeit von 4 km/h und einer Amplitude von 0.62 mm durchgeführt wurden. 152