



## DIPLOMARBEIT

Master Thesis

### **Ermittlung der Verformungsmoduln von Böden durch Auswertung der Kontaktlänge zwischen der Bandage einer Walze und dem Boden**

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 Pistorl**, BSc.

E220-2

Institut für Geotechnik

Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Nora Camilla Sonderegger**, BSc.

9571344

Wien, im Oktober 2014

.....

# Danksagung

Mein Dank gilt allen Personen, die mich während meines Studiums und des Verfassens dieser Arbeit unterstützt haben.

Im Besonderen richtet sich dieser Dank an Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam, für das Thema der Arbeit, die Betreuung derselben und für seine Förderung, nicht zuletzt im Rahmen dieser Diplomarbeit.

Ebenso danke ich Univ.Ass. Dipl.-Ing. Johannes Pistor, BSc. für die hervorragende Betreuung meiner Arbeit.

Ein herzliches Dankeschön an alle Beteiligten der Versuche in Fischamend, insbesondere an Priv.Doiz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Fritz Kopf und Dipl.-Ing.(FH) Martin Fritz, die durch ihr Engagement wesentlich zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Besonders möchte ich meiner guten Freundin Melanie Latschenberger für die tolle gemeinsame Studienzeit danken, viele gemeinsame Stunden des Lernens wurden so einfacher und schöner.

Ein spezieller Dank gilt auch meinen Freunden Eva Binder, Julia Reisinger, Michael Jonke, Klaus Hausleitner, Thomas List und Hannah Grafl für die gegenseitige Unterstützung und die gemeinsamen Aktivitäten neben dem Studienalltag.

Mein herzlicher Dank gilt Christian Umprecht für seine generelle Unterstützung und die vielen Fachdiskussionen während meiner gesamten Studienzeit.

Meinen Eltern Adelheid Sonderegger und Wenzel Müller sowie meiner Schwester Lea danke ich für die immerwährende Unterstützung, besonders während meiner Ausbildungszeit, und das Ermöglichen des Studiums an der Technischen Universität Wien. Vielen Dank auch an meinen Vater für das Korrekturlesen und die hilfreichen Anmerkungen, die diese Arbeit wesentlich verbessert haben.

# Kurzfassung

Der Untergrund mit seinen speziellen Eigenschaften ist für jedes Bauwerk von wesentlicher Bedeutung. Insbesondere wichtig ist eine gute Verdichtung. Verfahren zur Oberflächenverdichtung und entsprechende Geräte wurden in den letzten Jahren stetig verbessert. Die Überprüfung des Verdichtungserfolges gewinnt immer mehr an Bedeutung, jedoch sind die meisten Prüfmethode immer noch punktuell, weshalb die Ergebnisse mit Unsicherheiten behaftet sind.

In dieser Arbeit werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Oberflächenverdichtung erörtert und die verschiedenen Anregungsarten der Walzen und ihre Betriebszustände erläutert. Auch werden die momentan eingesetzten Arten der Prüfmethode des Verdichtungserfolges genannt und kurz beschrieben.

Neben den theoretischen Grundlagen sind Feldversuche ein wichtiger Ausgangspunkt und Bestandteil dieser Arbeit. Ausführlich werden die im Frühjahr 2014 in Fischamend durchgeführten Versuche zur Oberflächenverdichtung vorgestellt. Das Versuchskonzept wird beschrieben, wobei besonders auf die verwendete Walze und das eingebaute Mess-equipment eingegangen wird.

Im Zentrum dieser Arbeit stehen die bei den Walzenversuchen erzielten Messwerte der Kontaktlänge zwischen Boden und Walzenbandage. Die einzelnen Messfahrten wurden ausgewertet, die Ergebnisse grafisch dargestellt und anschließend interpretiert und erläutert. Die Ergebnisse der Auswertungen der Kontaktlängen werden mit den gemessenen dynamischen Verformungsmoduln, bestimmt mit dynamischen Lastplattenversuchen mittels des leichten Fallgewichtes, und den Setzungsmessungen verglichen.

Abschließend werden die Erkenntnisse aus den Versuchen zusammengefasst und Anregungen für weitere Forschungsarbeit angegeben.

Im Anhang dieser Arbeit werden alle Ergebnisse nochmals tabellarisch angeführt.

# Abstract

The ground and its properties are essential for every building. Therefore a good compaction of the soil is important. Methods and equipment for the near-surface compaction have been improved significantly over the past years. The importance of monitoring and control of compaction is for this reason increasing as well. However, most of the control methods are still spot tests. An uncertainty regarding the results of the measurements is the result of those punctual methods.

At first, this thesis deals with the theoretical background of the near surface compaction performed with rollers. The different types of excitation of dynamic roller drums and their modes of operation are explained and the existing types of control measurements for the proof of the compacting quality are listed and described.

Field tests are in addition to the theoretical background an essential part of this thesis. The realisation of the tests performed in Fischamend in spring 2014, the used roller and the equipment for the measurements are described.

The processing of the measured data of the contact length between the roller drum and the soil during the field tests is the main part of the presented thesis. Numerous test runs have been evaluated, their results have been compared and interpreted. The detailed evaluation focuses on the dynamic deformation modulus determined with dynamic load plate tests using the light Falling Weight Device (LFD), and the results of settlement measurements.

Finally, the scientific findings are summarised and motivation for further research is given. The appendix of this thesis comprises tables with the full test results.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel der Arbeit . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Oberflächenverdichtung</b>	<b>4</b>
2.1	Ziel der Oberflächenverdichtung . . . . .	4
2.2	Walzentypen und Aufbau . . . . .	5
2.2.1	Statische Walzen . . . . .	5
2.2.2	Dynamische Walzen . . . . .	6
2.2.2.1	Vibrationswalzen . . . . .	6
2.2.2.2	Oszillationswalzen . . . . .	7
2.2.2.3	Walzen mit Richtschwinger . . . . .	8
2.2.2.4	Selbstregelnde Walzen . . . . .	9
2.3	Betriebszustände und Bewegungsverhalten . . . . .	10
2.3.1	Betriebszustände der Vibrationswalze . . . . .	10
2.3.1.1	Kontakt . . . . .	11
2.3.1.2	Abheben . . . . .	11
2.3.1.3	Springen . . . . .	12
2.3.1.4	Taumeln . . . . .	12
2.3.1.5	Chaos . . . . .	12
2.3.2	Betriebszustände der Oszillationswalze . . . . .	13
2.3.2.1	Haften . . . . .	13
2.3.2.2	Gleiten und asymmetrisches Gleiten . . . . .	13
2.3.2.3	Einseitiges Gleiten . . . . .	13
2.4	Arten der Walzen und Bandagen . . . . .	14
2.4.1	Walzen . . . . .	14
2.4.1.1	Anhängewalzen . . . . .	14
2.4.1.2	Walzenzüge . . . . .	14
2.4.1.3	Tandemwalzen . . . . .	15

2.4.1.4	Kombiwalzen . . . . .	15
2.4.2	Bandagen . . . . .	16
2.4.2.1	Glattmantelbandagen . . . . .	16
2.4.2.2	Schafffußbandagen . . . . .	16
2.4.2.3	Polygonbandagen . . . . .	16
2.4.3	Einfluss des Bodens auf den Verdichtungserfolg . . . . .	17
2.5	Kontrollmessungen des Verdichtungserfolges . . . . .	18
2.5.1	Dichtemessung . . . . .	19
2.5.1.1	Proctorversuch . . . . .	20
2.5.1.2	Ausstechzylinder . . . . .	21
2.5.1.3	Ersatzverfahren . . . . .	22
2.5.1.4	Isotopsonde nach Troxler . . . . .	23
2.5.2	Steifigkeitsmessung . . . . .	24
2.5.2.1	Statischer Lastplattenversuch . . . . .	25
2.5.2.2	Dynamischer Lastplattenversuch . . . . .	27
2.5.3	Rammsondierung . . . . .	29
2.5.4	Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Großversuch in Fischamend</b>	<b>35</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	35
3.1.1	Ort der Versuche . . . . .	35
3.1.2	Grundsatzversuch in Fischamend . . . . .	36
3.2	Versuchsfeld . . . . .	36
3.2.1	Spur 1 - 4: sandiger Kies . . . . .	37
3.2.2	Spur 5: „steifer“ Untergrund . . . . .	41
3.2.3	Spur 6 - 7: „weicher“ Untergrund . . . . .	42
3.3	Walze HD+ 90 VO . . . . .	44
3.4	Messausrüstung und Ausstattung . . . . .	47
3.4.1	Walze . . . . .	47
3.4.2	Spur 1 - 4 . . . . .	49
3.4.3	Spur 5 . . . . .	54
3.4.4	Spur 6 - 7 . . . . .	54
3.5	Versuche . . . . .	54
3.5.1	Versuchsdurchführung . . . . .	55
3.5.2	Dokumentation . . . . .	59
3.5.3	Auftretende Probleme . . . . .	59

<b>4</b>	<b>Formelgrundlagen für die Auswertung</b>	<b>61</b>
4.1	Hertz'sche Pressung . . . . .	61
4.2	Elastizitätsmodul - Verformungsmodul . . . . .	63
4.3	Querdehnzahl $\nu$ . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Auswertung und Ergebnisse</b>	<b>66</b>
5.1	Vorgangsweise der Auswertung . . . . .	67
5.1.1	Verformungsmoduln . . . . .	67
5.1.2	Bug- und Heckwelle . . . . .	71
5.1.3	Setzungen . . . . .	72
5.2	Darstellung und Interpretation der Ergebnisse . . . . .	73
5.2.1	Auswertung der Spur 1 und Schüttlage 2 . . . . .	74
5.2.2	Auswertung der Spur 2 und Schüttlage 1 . . . . .	76
5.2.3	Auswertung der Spur 2 und Schüttlage 2 . . . . .	85
5.2.4	Auswertung der Spur 5 . . . . .	94
5.2.5	Auswertung der Spur 6 . . . . .	97
5.2.6	Auswertung und Korrelationsbildung . . . . .	100
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>103</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	103
6.2	Ausblick . . . . .	105
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>110</b>
<b>A</b>	<b>Messfahrtprotokolle</b>	<b>114</b>
<b>B</b>	<b>Protokolle der Ergebnisse</b>	<b>121</b>
B.1	Protokolle der $E_{vd}$ -Auswertungen . . . . .	122
B.2	Protokolle der Bug- und Heckwellen-Auswertungen . . . . .	129
B.3	Protokolle der Setzungs-Auswertungen . . . . .	135

# 1 Einleitung

Der Baugrund und dessen Eigenschaften stellen für jedes Bauwerk das Fundament dar. Ein ausgereiftes und in sich stabiles Gebäude wird nur dann funktionieren und stand sicher sein, wenn der Untergrund entsprechend tragfähig ist. Das heißt, die auftretenden Belastungen müssen vom vorhandenen Baugrund aufgenommen und abgetragen werden, dieser muss demnach eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen. Wenn das jedoch nicht der Fall ist, so muss man aktiv einschreiten und gezielte Maßnahmen setzen, damit eine ausreichende Tragfähigkeit des Untergrunds gewährleistet werden kann. Durch Bodenverbesserungsmaßnahmen werden neben der Steigerung der Tragfähigkeit auch Setzungen vorweggenommen und somit die auftretenden Gesamtsetzungen reduziert. Außerdem, und das ist der wesentliche Vorteil, werden Baugrund, Bodenverhältnisse und Setzungen homogenisiert. Die Möglichkeiten der Verbesserungsmaßnahmen sind vielschichtig und sind je nach Projekt und den daraus abgeleiteten Anforderungen entsprechend vorzunehmen [2, 3].

Bei der Bodenverdichtung, die zu den Bodenverbesserungsmaßnahmen zählt, unterscheidet man zwischen Oberflächenverdichtung und Tiefenverdichtung. Wie der Name schon verrät, unterscheiden sich diese zwei Verdichtungsarten in ihrer Tiefenwirkung: oberflächennah bzw. in mittleren bis in große Tiefen.

Im Weiteren wird insbesondere auf die Walzenverdichtung als wichtigsten Vertreter der Oberflächenverdichtung eingegangen.

Die Walzenverdichtung hat mit Dampfwalzen begonnen und findet schon lange im Straßenbau Anwendung, jedoch ist diese Art der Verdichtung auch nicht mehr aus dem Erdbau, Deponie- und Wasserbau, Damm- und Eisenbahnbau, Hallen- und Industriebau sowie bei Flächenfundierungen, langemweiser Schüttung und Herstellung von Hinterfüllungen wegzudenken [27]. Das Einsatzgebiet ist mit der Zeit gewachsen und ist mittlerweile sehr weit gefächert. Gestiegen ist ebenfalls das Interesse und die Notwendigkeit an der Kontrolle und Qualitätssicherung der erreichten Verdichtung der verdichteten Böden und Schüttmaterialien. Trotzdem sind die Prüfverfahren zur Untergrundbeurteilung bis in

die 80er Jahre des letzten Jahrhunderts kaum weiterentwickelt worden [8]. Neben der Dokumentation des Verdichtungsvorganges werden auch Kontrollmessungen ausgeführt, diese sind jedoch vorwiegend nur punktuell und zudem kosten- und zeitaufwändig. Hinzu kommt, dass die punktuellen Ergebnisse für die gesamte Fläche lediglich gemittelt bzw. interpoliert werden können. Der Nachteil ist klar ersichtlich: Stichproben können nicht für die gesamte Fläche ein zuverlässiges Ergebnis liefern, eventuelle Schwachstellen oder noch nicht ausreichend verdichtete Bereiche werden leicht übersehen und führen eventuell später zu kostenintensiven und oft praktisch unlösbaren Problemen. Ein weiterer Nachteil dieser punktuellen Messungen liegt darin, dass sie den Bauablauf stören können, da während ihrer Durchführung die Walze nicht eingesetzt werden kann und somit unproduktive Wartezeiten unumgänglich sind. Werden die Messungen erst nach Beendigung des Verdichtungsablaufes durchgeführt, kann teilweise bereits eine Überverdichtung in gewissen Bereichen stattgefunden haben. Überverdichtungen sollten aus geotechnischer Sicht vermieden werden, da dem Boden in diesen Fällen Kornzertrümmerung oder Wiederauflockerung widerfahren kann. Des Weiteren wird bei einer Überverdichtung auch die Walze unnötig beansprucht und es kommt zu einem erhöhten Verschleiß, der letztendlich zu einer geringeren Lebensdauer des Baugerätes und somit zu erhöhten Kosten führt.

Die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) für Vibrationswalzen macht eine mit dem Arbeitsvorgang zeitgleiche und flächenhafte Verdichtungskontrolle möglich. Dadurch wird der Arbeitsablauf nicht unterbrochen oder gestört und der Geräteführer kann die Auswertung der Messwerte für jede Schicht und Verdichtungsfahrt augenblicklich wahrnehmen und darauf reagieren. Schwachstellen können leicht erkannt und eine Überverdichtung vermieden werden. Ein optimales Endergebnis in kürzerer Zeit ist dadurch möglich. Jedoch wurde die FDVK für den Einsatz in der Praxis bislang nur für Vibrationswalzen entwickelt. Ein vergleichbares System für Oszillationswalzen befindet sich in der Entwicklungsphase.

### **1.1 Ziel der Arbeit**

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden zunächst die theoretischen Grundlagen der Oberflächenverdichtung und die Arten und Unterschiede der Bewegungsverhalten der dynamisch angeregten Walzentypen beschrieben. Verschiedene Typen von Walzen und von Anregungsarten der Bandagen (Walzentrommeln) werden dabei vorgestellt.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt jedoch auf den Ergebnissen und Erkenntnissen aus den Messdaten eines Großversuches mit Oszillationswalzen. Ein Zusammenhang zwischen

der Kontaktlänge des Bandagenabschnittes mit dem Boden und dem dynamischen Verformungsmodul des Bodens soll auf Grundlage der Theorie der Hertz'schen Pressung entwickelt und gewonnen werden.

Des Weiteren wird untersucht, wie sich die Kontaktlänge zwischen Bandage und Boden bei unterschiedlichen Frequenzen und Geschwindigkeiten verhält.

Mit diesen Erkenntnissen soll ein Beitrag zur Entwicklung von FDVK-Systemen für Oszillationswalzen geschaffen werden.

# 2 Grundlagen der Oberflächenverdichtung

## 2.1 Ziel der Oberflächenverdichtung

Die Anforderung an den Untergrund besteht darin, die auftretenden Belastungen, bestehend aus Eigengewicht und äußeren Einwirkungen, sicher abzuleiten. Wenn die Tragfähigkeit des Baugrundes nicht gegeben ist oder die auftretenden Verformungen zu hoch sind und somit zu Schäden führen könnten, werden der Untergrund und dessen Eigenschaften gezielt verbessert.

Durch Anwendung der Bodenverdichtung werden die Porenräume des Bodens (gefüllt mit Wasser und/oder Luft) verringert, dadurch wird die Lagerungsdichte und somit auch die Tragfähigkeit erhöht.

Zu den Bodenverbesserungsmaßnahmen zählt die Oberflächenverdichtung. Der oberflächennahe Bereich des Untergrundes wird hierbei zumeist mit Hilfe von Walzen verdichtet, wobei folgende Effekte erzielt werden [2]:

- Erhöhung der Tragfähigkeit
- Reduktion und Vorwegnahme der Setzungen
- Homogenisierung der Setzungen
- Homogenisierung der Bodenverhältnisse
- Erhöhung der Dichte
- Änderung der Durchlässigkeit
- Verringerung des Verflüssigungspotenzials und somit Erhöhung der Erdbebenbeständigkeit

Die Oberflächenverdichtung hat eine Tiefenwirkung von im Allgemeinen 0,2-1,5 m, der Maximalwert liegt in Ausnahmefällen bei ca. 2-3 m. Durch diese recht geringe Tiefenwirkung

liegt das Anwendungsgebiet hauptsächlich beim Verdichten von lagenweise eingebauten Schüttungen in den unterschiedlichsten Bereichen [27]:

- Erdbau
- Eisenbahnbau
- Flugplatzbau
- Straßenbau
- Wasserbau
- Deponiebau
- Dammbau
- Leitungsgräben
- Hinterfüllungen
- Flachgründungen, beispielsweise für Hallen und Industriebauten

Aus dem breiten Anwendungsspektrum der Walzenverdichtung ist erkennbar, dass auf diese Verdichtungsmaßnahme im heutigen Bauwesen nicht mehr zu verzichten ist. Neben der Verdichtung selbst ist die Dokumentation und Kontrolle des Verdichtungserfolges ein Hauptbestandteil der Arbeit, darauf wird im Kapitel 2.5 näher eingegangen.

## 2.2 Walzentypen und Aufbau

Grundsätzlich wird je nach Art der geleisteten Verdichtung zwischen zwei verschiedenen Walzentypen unterschieden: Statische und dynamische Walzen.

### 2.2.1 Statische Walzen

Die statische Walze leistet allein durch ihr Eigengewicht Verdichtungsarbeit in Form von Zusammendrückung des Bodens. Die Tiefenwirkung ist dementsprechend geringer als bei dynamischen Walzen. Sowohl die Verdichtungsarbeit als auch die Tiefenwirkung können ausschließlich durch Verwendung einer Walze mit größerem Eigengewicht oder einer anderen Bandagenform (siehe Kapitel 2.4) erhöht werden. Im Erdbau wird die statische Walze in Ländern mit hohen Technologiestandards wegen ihrer geringeren Tiefenwirkung kaum noch verwendet. Bei bindigen, wassergesättigten Böden findet die statische Walze

oftmals mit profilierter Bandage noch Anwendung, da es durch die Kraftanregung einer dynamischen Walze zur Konsistenzänderung und somit sogar zur Verschlechterung der Bodeneigenschaften kommen kann [3].

### 2.2.2 Dynamische Walzen

Für die Verdichtung von grob- und gemischtkörnigen Böden im Erdbau werden mittlerweile hauptsächlich dynamische Walzen verwendet. Die dynamische Kraftanregung erfolgt über Unwuchten in den Bandagen und zusammen mit dem statischen Eigengewicht erfolgt die Verdichtung: Die Bodenteilchen werden in Schwingung versetzt und es erfolgt eine Kornumlagerung, somit sinkt der Porenanteil und die Lagerungsdichte des Bodens steigt. Je nach Anordnung der Unwuchten wird zwischen vibrierender und oszillierender Anregung unterschieden.

#### 2.2.2.1 Vibrationswalzen

Die dynamische Krafterregung erfolgt bei der Vibrationswalze durch eine zentrische Unwucht in der Bandage (siehe Abbildung 2.1). Die Rotation der Unwucht versetzt die Bandage in Schwingung. Die Bandage wird durch einen Rahmen gehalten und ist mit Gummipuffern von diesem entkoppelt, somit werden die übertragenen Schwingungen auf das übrige Gerät auf ein Minimum reduziert. Die vorwiegend vertikal gerichtete Kraftübertragung in den Boden erfolgt durch Scher- und Druckwellen [13, 3].

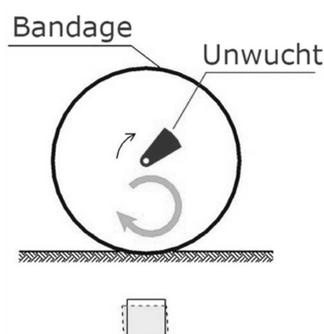


Abbildung 2.1: Aufbau und Anregung der Bandage einer Vibrationswalze [2]

Beim Bedarf der Regelung der Amplitude für einen effizienteren Einsatz der Walze wird eine zweigeteilte Unwucht verwendet. Der Vorteil: Die Amplitude kann variiert und damit an die vorhandenen Bodeneigenschaften angepasst werden, wodurch die Verdichtung

optimiert wird. Je nach Drehrichtung der beiden Unwuchtmassen zueinander ändert sich der Gesamtschwerpunkt und es können so die Amplitudengrößen jeweils geändert werden (siehe Abbildung 2.2).

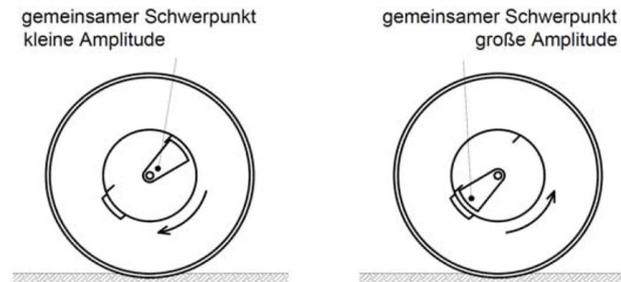


Abbildung 2.2: Kleine und große Amplitude der Bandage einer Vibrationswalze mit geteilter Unwucht [3]

### 2.2.2.2 Oszillationswalzen

Im Gegensatz zu Vibrationswalzen, deren Anfänge die Dampfwalzen waren, wurden Oszillationswalzen erst im Jahre 1980 von der Firma GEODYNAMIK AB entwickelt [13].

Oszillationswalzen sind mit zwei gleich großen Unwuchten ausgestattet, die exzentrisch und punktsymmetrisch um den Bandagenmittelpunkt angeordnet sind (siehe Abbildung 2.3). Die Rotation dieser beiden Unwuchten erfolgt gleichsinnig, wodurch sich die Horizontal- und Vertikalkomponenten der Zentrifugalkräfte jeweils aufheben und nur ein periodisches Moment um die Bandagenachse übrig bleibt. Dieses Torsionsmoment wirkt in periodischen Abständen, also während der Drehung der Unwuchten, vorwärts bzw. rückwärts, daraus ergibt sich eine oszillierende Bewegung der Bandage.

Die Krafteinleitung erfolgt vorwiegend in tangentialer Richtung. Zusätzlich zu der geringeren, statischen, vertikalen Krafteintragung werden dynamische Horizontalkräfte zufolge des Torsionsmomentes über Reibung in den Untergrund übertragen. Die hervorgerufenen Schubverzerrungen im Boden bewirken eine gute Verdichtung des Bodens.

Durch die gegenüber der Vibrationsverdichtung geringeren Vertikalkräfte bei der Oszillationsverdichtung ist die Tiefenwirkung auch dementsprechend geringer. Aus diesem Grund sind geringere Schütthöhen vorzusehen.

Die geringeren Erschütterungen sprechen eindeutig für oszillierende Walzen, besonders in innerstädtischen Gebieten und in der Nähe sensibler Bauwerke. Als Folge der horizontalen Krafteinleitung in den Boden sorgen Oszillationswalzen für eine sehr glatte Oberfläche,

deswegen eignen sie sich insbesondere für den Asphalt- und Deponiebau, zur Versiegelung der Oberfläche. Das Problem der Kornzertrümmerung und Auflockerung stellt sich bei der Oszillationsverdichtung kaum [13].

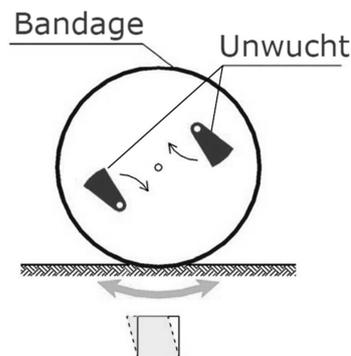


Abbildung 2.3: Aufbau und Anregung der Bandage einer Oszillationswalze [4, bearbeitet]

### 2.2.2.3 Walzen mit Richtschwinger

Walzen mit Richtschwinger, auch bekannt als VARIO-Walzen, wurden 1998 von der Firma BOMAG entwickelt [13].

Die Bandagen solcher Walzen beinhalten zwei Unwuchten, die zentrisch in der Bandage angeordnet sind, wie bei Vibrationswalzen. Die Rotation erfolgt jedoch gegensinnig, also auch anders als bei Oszillationswalzen.

Die Besonderheit bei diesem System liegt darin, dass sich die gesamte Erregereinheit (d.h. die Unwuchten) verdrehen lässt und sich somit die Fliehkräfte entweder aufheben oder verdoppeln. Durch Variation der Einstellung ist ein stufenloser Übergang von vertikaler (ähnlich wie bei Vibrationswalzen) zu horizontaler Kraftübertragung möglich (siehe Abbildung 2.4). Bei vertikaler ( $90^\circ$ ) und schräger (ca.  $30^\circ$ - $90^\circ$ ) Kraftübertragung verhalten sich die Walzen nahezu wie Vibrationswalzen, der Vorteil der größeren Tiefenwirkung ist bei diesen Einstellungen gegeben. Die Oszillationsverdichtung ist mit einer horizontalen ( $0^\circ$ ) Einstellung der Richtschwinger vergleichbar, jedoch ist die grundsätzliche Walzenbewegung anders.

Die Änderung der Einstellung der Erregereinheit kann vom Walzenfahrer während der Fahrt erfolgen. Auf diese Weise kann direkt und ohne Zeitverlust auf den angetroffenen Boden reagiert werden. Vorteil dieses Systems ist, dass nur mittels Walze mit Richtschwinger sowohl eine vibrierende als auch annähernd eine oszillierende Verdichtung erzielt werden kann [13, 9].

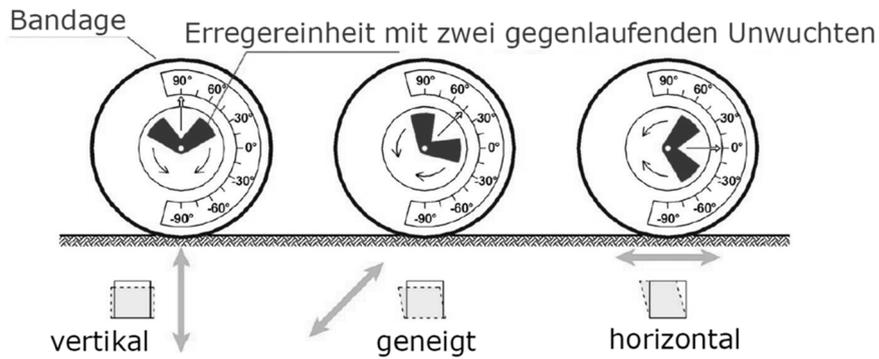


Abbildung 2.4: Variation der Richtung der Erregereinheit bei Walzen mit Richtschwinger [4]

### 2.2.2.4 Selbstregelnde Walzen

Selbstregelnde Walzen, auch VARIOCONTROL-Walzen genannt, sind eine Weiterentwicklung der im Kapitel 2.2.2.3 vorgestellten VARIO-Walzen durch die Fairma BOMAG [13]. Der Aufbau beider Walzen ist identisch, jedoch regelt die VARIOCONTROL-Walze selbst und automatisch die Richtung der Erregereinheit auf Basis des Betriebsverhaltens der Bandage, primär abhängig von der Steifigkeit des angetroffenen Bodens (siehe Abbildung 2.5). Vorteile dieses Systems sind: Es findet eine optimierte Anzahl an Verdichtungsvorgängen statt, es kommt durch Anpassung der Amplitude zu keiner Überverdichtung oder Kornzertrümmerung, und dies führt zu einer verbesserten und schonenderen Verdichtung mit einem homogenen Ergebnis. In Bereichen mit geringen Bodensteifigkeiten wird die Amplitude durch das steiler Stellen der Unwuchten zueinander automatisch erhöht und somit wird an diesen Stellen mehr Verdichtungsenergie in den Boden eingebracht. Falls erwünscht, kann von automatischer zu manueller Regelung übergegangen werden, jedoch entspricht dies dann nicht dem Hauptziel der selbstregelnden Walzen.

Bei Anwendung der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) muss die Selbstregelung deaktiviert werden.

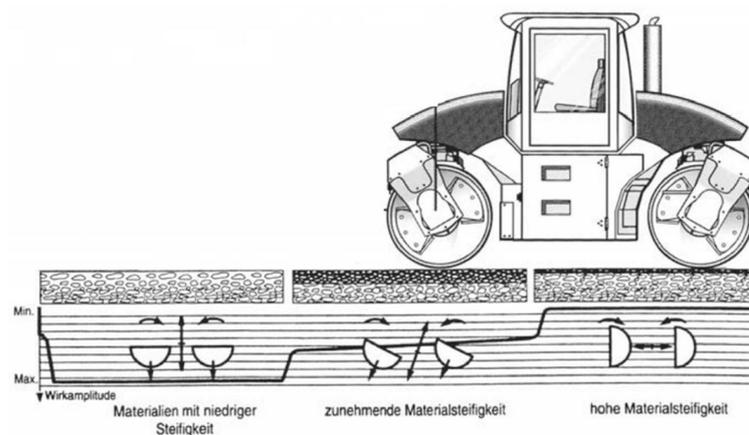


Abbildung 2.5: Selbstregelnde Walze mit Veränderung der Ausrichtung der Erregereinheiten je nach Bodensteifigkeit [12]

Für die automatische Regelung der Walzen gibt es grundsätzlich zwei Kriterien: [13]

- Sprungkriterium: Dieses besagt, dass bei den Verdichtungsüberfahrten der Betriebszustand „Springen“ (siehe Kapitel 2.3) nicht erlaubt ist. Bevor es dazu kommt, wird die Erregereinheit flacher gestellt.
- Kraftkriterium: Die maximale vertikale Bodenkontaktkraft zwischen Boden und Bandage wird vom Benutzer festgelegt.

## 2.3 Betriebszustände und Bewegungsverhalten

Jeder Walzentyp kann während der Verdichtung verschiedene Betriebszustände aufweisen. Unterschieden wird generell zwischen den Betriebszuständen von Vibrations- und von Oszillationswalzen.

### 2.3.1 Betriebszustände der Vibrationswalze

Das Bewegungsverhalten für Vibrationswalzen gilt auch für VARIO-Walzen mit vertikaler (90°) oder schräger (ca. 30°-90°) Einstellung der Erregereinheiten. Indirekt gelten die Betriebszustände auch für die selbstregelnde Walze, jedoch wird man bei ihr Springen, Taumeln oder Chaos nicht antreffen, da dies über das Sprungkriterium (Kapitel 2.2.2.4) ausgeschlossen wird [13, 1, 3, 8].

Wie man in Abbildung 2.6 erkennt, gibt es fünf verschiedene Betriebszustände: Kontakt, Abheben, Springen, Taumeln und Chaos.

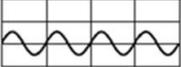
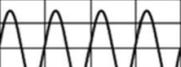
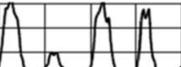
Bewegung der Bandage	Interaktion Bandage - Boden	Betriebszustand	Verlauf der Bodenkontaktkraft	Anwendung der FDVK	Bodensteifigkeit	Fahrgeschwindigkeit	Erregeramplitude
periodisch	ständiger Kontakt	KONTAKT		ja	↓ gering ↑ hoch ↓	↑ hoch ↓ niedrig ↓	↓ klein ↓ groß ↓
	periodischer Kontaktverlust	ABHEBEN	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

Abbildung 2.6: Betriebszustände einer Vibrationswalze [4]

### 2.3.1.1 Kontakt

Bei diesem Betriebszustand ist die Walze im ständigen Kontakt mit dem Boden. Voraussetzung dafür ist ein sehr „weicher“ Boden, eine geringe Erregeramplitude (geringe Unwucht) oder eine hohe Fahrgeschwindigkeit.

### 2.3.1.2 Abheben

Bei Zunahme der Bodensteifigkeit findet ein Wechsel von Kontakt zu Abheben statt. Die nach oben gerichteten Kräfte nehmen zu, diese Zugkräfte können zwischen Boden und Walze nicht aufgenommen werden, die Bandage hebt ab und ist somit fortan nicht mehr in ständigem Kontakt mit dem Boden. Das Abheben und das darauf folgende Auftreffen auf dem Boden finden periodisch innerhalb einer Unwuchtumdrehung statt.

Dieser Betriebszustand ist der wichtigste für die Verdichtung mit dynamischen Vibrationswalzen, hierbei wird die Verdichtungsarbeit am effizientesten umgesetzt.

### 2.3.1.3 Springen

Bei weiterer Steigerung der Steifigkeit des Bodens tritt der Betriebszustand Springen ein. Hierbei ist ebenfalls kein permanenter Kontakt zwischen Boden und Bandage vorhanden, doch im Gegensatz zum Betriebszustand Abheben kommt es hierbei abwechselnd zu einem größeren und einem kleineren „Schlag“ bzw. zu einer periodisch unterschiedlichen Krafteintragung in den Boden. Die Periodendauer hierbei beträgt zwei Unwuchtumdrehungen.

Durch das unterschiedlich starke Aufkommen der Bandage auf dem Boden kommt es zu höheren Erschütterungen und anderen Vibrationsgeräuschen, somit ist dies vom erfahrenen Walzenfahrer auch deutlich zu erkennen. Einerseits wegen der größeren Erschütterungen für Umgebung und Walzenfahrer und andererseits aufgrund des erhöhten Verschleißes des Verdichtungsgerätes sowie des verstärkten Auftretens von Kornzertrümmerung sollte Springen möglichst vermieden werden.

### 2.3.1.4 Taumeln

Bei einer weiteren Steigerung der Bodensteifigkeit kann es zum Betriebszustand Taumeln kommen. Dabei bewegt sich die Bandagentrommel rotatorisch um ihre Längsachse und „schlägt“ durch diese Wiegeschwingung abwechselnd rechts und links auf dem Untergrund „auf“.

Bei diesem Zustand ist die Walze schwer steuerbar und es findet keine produktive und gleichmäßige Verdichtung des Bodens statt. Taumeln führt außerdem zu hohem Verschleiß und ist deswegen auf jeden Fall zu vermeiden.

### 2.3.1.5 Chaos

Chaos findet bei hohen Bodensteifigkeiten, großer Erregeramplitude und geringen Fahrgeschwindigkeiten statt. Das Bewegungsverhalten ist hierbei nicht mehr periodisch und unkontrolliert. Auch bei diesem Betriebszustand ist die Walze sehr schwer bzw. überhaupt nicht mehr steuerbar, es findet keine Verdichtung statt und die Beanspruchung des Verdichtungsgerätes ist sehr hoch. Eine Verdichtungsfahrt im Chaos-Zustand ist abzubrechen und erst nach Änderung der Parameter und somit Vermeidung von dessen erneutem Auftreten fortzufahren.

### 2.3.2 Betriebszustände der Oszillationswalze

Auch bei den Betriebszuständen der Oszillationswalze gilt, dass sie auf die VARIO-Walzen mit horizontaler (ca.  $0^\circ$ - $30^\circ$ ) Einstellung der Erregereinheiten annähernd angewendet werden können [13].

#### 2.3.2.1 Haften

Während des Betriebszustands Haften befindet sich die Bandage im permanenten Kontakt mit dem Boden und es kommt zu keinem Schlupf und keiner dynamischen Relativverschiebung zwischen der Bandagenoberfläche und dem Boden. Die Haftreibung zwischen Boden und Bandage wird demnach nicht überschritten.

#### 2.3.2.2 Gleiten und asymmetrisches Gleiten

Wenn die Haftreibungskraft von der Bodenkontaktkraft überschritten wird, kommt es zum Gleiten zwischen Bandage und Boden. Die dabei auftretende dynamische Relativverschiebung wird während des Gleitvorganges immer geringer, bis sie schließlich ganz verschwindet und sich Haften erneut einstellt. Diese Abwechslung zwischen auftretendem Schlupf, also Gleiten, und Haften findet periodisch und abwechselnd in und gegen die Fahrtrichtung statt. Asymmetrisches Gleiten wird jener Zustand genannt, bei dem die Dauer der Gleitphasen in und gegen die Fahrtrichtung unterschiedlich lang ist.

Erhöhter Verschleiß des Bandagenmantels und Feinteilbildung an der Oberfläche des Untergrundes treten bei einem stark ausgebildeten Gleitvorgang auf, dies sind unerwünschte Erscheinungen und sollten daher vermieden werden.

#### 2.3.2.3 Einseitiges Gleiten

Bei diesem Betriebszustand kommt es nur in einer Richtung zur Überschreitung der Haftreibung und somit zum Gleiten, in die andere Richtung herrscht immer der Zustand Haften. Grund dafür ist die „Verspannung“ zwischen Antriebsrädern und Bandage: Sowohl die Gummiräder bzw. die zweite Bandage als auch die (erste) Bandage werden mechanisch angetrieben, durch unterschiedlich starke Antriebswirkungen entsteht diese „Verspannung“. Ein weiterer Grund für das Auftreten von einseitigem Gleiten besteht in der Überlagerung von Fahr- und Oszillationsbewegung.

### 2.4 Arten der Walzen und Bandagen

Aufgrund der verschiedenen Anwendungsbereiche und unterschiedlichen Bodenarten wurden verschiedene Walzen- und Bandagenarten entwickelt, um die gewünschte Verdichtung und Oberflächenbeschaffenheit zu erzielen [12, 5].

#### 2.4.1 Walzen

Im Folgenden werden die dynamischen Walzenarten beschrieben.

Neben Walzen gibt es auch noch kleine handgeführte dynamische Oberflächenverdichtungsgeräte (wie beispielsweise Stampfer oder Platten), auf diese wird jedoch hier nicht weiter eingegangen.

##### 2.4.1.1 Anhängewalzen

Anhängewalzen gehören eher zu Kleingeräten, da sie nicht selbst fahren, sondern z.B. von einer Raupe gezogen werden müssen. Sie besitzen eine Anhängvorrichtung und einen Rahmen, der dynamisch entkoppelt mit der Walzentrommel verbunden ist.

Sie spielen in der Baupraxis eine untergeordnete Rolle, wurden jedoch zu Walzenzügen weiterentwickelt und diese sind im Erdbau stark vertreten.

##### 2.4.1.2 Walzenzüge

Die Walzenzüge haben sich aus der Anhängewalze entwickelt und brauchen kein zusätzliches Zuggerät mehr. Sie bestehen aus einer Bandage an der Vorderachse und zwei Gummirädern an der Hinterachse (siehe Abbildung 2.7). Fahrerkabine und Motor befinden sich über den Gummirädern, von dort erfolgt zumeist auch der Antrieb. Mit einem Knickgelenk wird der hintere Teil mit dem Rahmen und dieser wiederum mit der Bandage verbunden. Rahmen und Bandage sind durch Gummipuffer dynamisch entkoppelt.

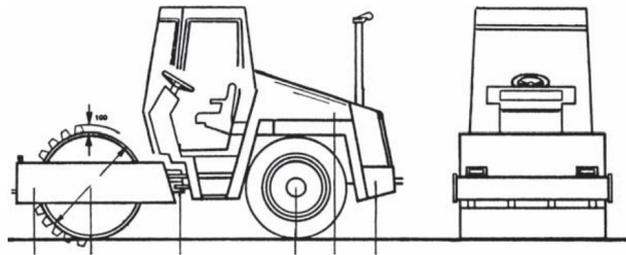


Abbildung 2.7: Walzenzug [12]

### 2.4.1.3 Tandemwalzen

Tandemwalzen sind mit je einer Bandage mit Fahrtrieb an Vorder- und Hinterachse ausgestattet (siehe Abbildung 2.8). Vorder- und Hinterteil können entweder starr oder mit Knickgelenk miteinander verbunden sein. Für die Berieselung gegen Verkleben der Bandagen sind entsprechende Wassertanks eingebaut, diese dienen gleichzeitig als zusätzliche Last. Das Anwendungsgebiet liegt hauptsächlich im Straßen- und Asphaltbau.

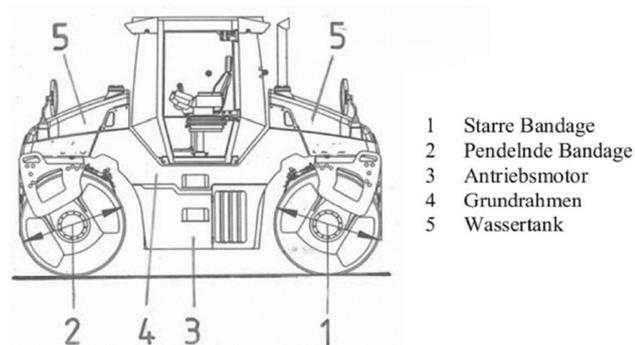


Abbildung 2.8: Tandemwalze [12, bearbeitet]

### 2.4.1.4 Kombiwalzen

Der Aufbau einer Kombiwalze entspricht dem einer Tandemwalze mit dem Unterschied, dass sich auf der Hinterachse keine Bandage, sondern Gummiräder befinden. Die vordere Bandage verdichtet durch Vibration oder Oszillation in die Tiefe, und die hinteren statischen Gummiräder verdichten und schließen durch knetende Wirkung die Oberfläche. Auch hier ist die Anwendung hauptsächlich der Straßen- und Asphaltbau.

### 2.4.2 Bandagen

Die Form, Geometrie und Oberfläche der Bandage spielt eine wesentliche Rolle bei der Verdichtungswirkung, besonders bei feinkörnigen und nicht bindigen Böden.

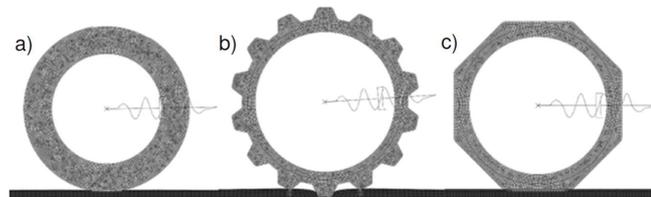


Abbildung 2.9: Arten den Bandagen: a) Glattmantelbandage, b) Schafffußbandage, c) Polygonbandage [25, bearbeitet]

#### 2.4.2.1 Glattmantelbandagen

Die Glattmantelbandage in Form eines Zylinders (Abbildung 2.9 a) ist die älteste Form der Bandage. Eine im statischen Fall kontinuierliche Kraft wird auf den Boden übertragen, wobei eine gleichmäßige Verdichtung der oberen Schicht sowohl bei bindigen als auch bei nicht bindigen Böden erreicht wird.

#### 2.4.2.2 Schafffußbandagen

Die Schafffußbandage (Abbildung 2.9 b), auch Stampffußbandage genannt, hat Stampffüße, sogenannte Stollen, um den ganzen Bandagenumfang verteilt. Dadurch können diese Walzen den Untergrund durch zusätzliche Knetwirkung verdichten. Es kommt zu Knetwirkung zwischen den Füßen und zum Aufbrechen des bindigen Bodens, somit kann sich der Porenwasserüberdruck abbauen und eine bessere Verdichtungswirkung wird erreicht.

#### 2.4.2.3 Polygonbandagen

Die Polygonbandage (Abbildung 2.9 c) ist die jüngste Entwicklung [19, 2] und besteht aus drei achteckigen Bandagenelementen, die nebeneinander liegen. Diese Elemente sind versetzt zum Nachbarsegment angeordnet. Der Boden wird durch die kontinuierliche Drehbewegung der Walze abwechselnd durch eine Krafteinwirkung von Platten- und Keilsegmenten bearbeitet. Die Scherkraftbeanspruchung durch das Keilsegment knetet

und reißt den Boden auf, somit wird dieser entspannt und die Porenwasserdrücke reduziert. Vertikalkräfte werden durch die Platten auf den Boden übertragen und verdichten ihn.

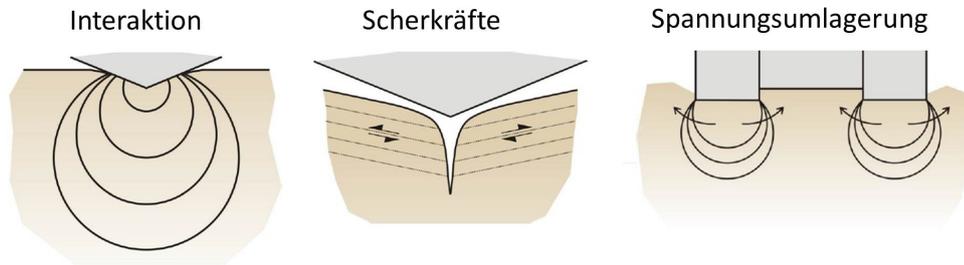


Abbildung 2.10: Wirkungsweise der Polygonbandage [4]

Die abwechselnde Krafteinwirkung verhindert eine nur oberflächennahe Kornverzahnung und dadurch wird gleichzeitig eine größere Tiefenwirkung erzielt (siehe Abbildung 2.11). Anwendung findet die Polygonbandage besonders auf Felsbruchmaterial und bei bindigen Böden [2, 4, 3].

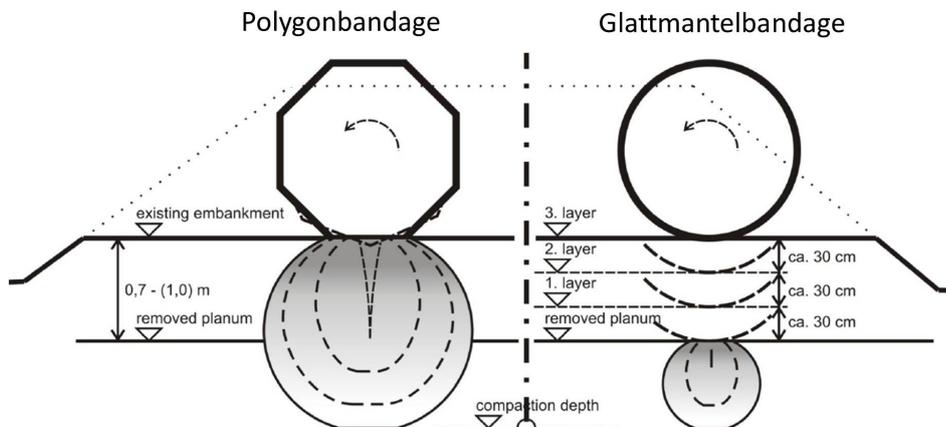


Abbildung 2.11: Tiefenwirkung der Polygonbandage [2]

### 2.4.3 Einfluss des Bodens auf den Verdichtungserfolg

Für die optimale Verdichtung ist das Verdichtungsgerät samt Ausstattung von Bedeutung, doch um das bestimmen zu können, muss man wissen, welchen Untergrund man verdichten will und welche Eigenschaften dieser aufweist.

Wesentliche Einflussfaktoren werden nun aufgelistet und kurz beschrieben [1, 12, 5, 2]:

- Korngröße: Für die Wahl der optimalen Verdichtungsmethode muss zwischen grobkörnigen, also nicht bindigen Böden und feinkörnigen, bindigen Böden unterschieden werden.
- Kornform: Kugelige Körner weisen ein wesentlich besseres Verdichtungsverhalten als plättchenförmige auf.
- Kornrauigkeit: Je glatter und abgerundeter ein Korn ist, desto leichter lässt sich der Untergrund verdichten.
- Kornverteilung: Einen großen Einfluss spielt die Kornverteilungslinie eines Bodens. Ein weitgestufter Untergrund ist gut verdichtbar, da die kleineren Körner die Poren besser auffüllen können und somit die Dichte steigt.
- Wassergehalt: Bei bindigen Böden ist der Wassergehalt ein sehr wichtiges Kriterium für die Verdichtbarkeit. Je höher dieser ist, desto größer werden die Porenwasserüberdrücke durch die Verdichtung und desto geringer die Verdichtbarkeit. Entgegenwirken kann man diesem Verhalten mit knetender und bodenaufreißender Wirkung des Bandagenprofils. Auch zu nasse und zu trockene Böden weisen ungünstige Verdichtungseigenschaften auf, auf den idealen Wassergehalt sollte deswegen Wert gelegt werden. Der ideale Wassergehalt kann mit Hilfe des Proctorversuches (siehe Kapitel 2.5.1.1) ermittelt werden.
- Lagerungsdichte bzw. Konsistenz: Für die Veränderung der Lagerungsdichte bei nicht bindigen Böden muss die Korn-zu-Korn-Reibung überwunden werden und eine Umlagerung stattfinden. Die Konsistenz von bindigen Böden hängt vom Wassergehalt ab. Wie bereits erläutert wurde, sind bindige Böden für eine dynamische Verdichtung nur untergeordnet geeignet.

Generell ist zu sagen, dass bei nicht bindigen Böden dynamische Walzen gute Verdichtungsresultate erzielen, jedoch muss man aufpassen, dass es zu keiner Kornzertrümmerung oder Wiederauflöckerung kommt. Bei nicht bindigen Böden ist das Problem oft der sich aufbauende Porenwasserüberdruck. Deswegen sollten Walzen verwendet werden, die einen Abbau des Überdruckes unterstützen, deswegen wird auch der statischen Verdichtung mit profilierten Bandagen oft der Vorzug gegeben.

### 2.5 Kontrollmessungen des Verdichtungserfolges

Mit der Verdichtung selbst ist die Arbeit noch nicht getan. Es wird immer eine Qualitätskontrolle zur Feststellung des Verdichtungsgrades in Bezug auf die Anforderungen

benötigt. Die RVS 08.03.01 für Erdarbeiten [26] regelt die Mindestanforderungen an die Verdichtung von unterschiedlichen Lagen. Hierbei muss je nach Art der Kontrollmessung einer der folgenden Werte einen vorgegebenen Grenzwert erreichen:

- $E_{vd}$ : dynamischer Verformungsmodul des dynamischen Lastplattenversuches mit dem Leichten Fallgewicht; [MN/m<sup>2</sup>]
- $E_{v1}$ : statischer Verformungsmodul des statischen Lastplattenversuches aus der Erstbelastungskurve; [MN/m<sup>2</sup>]
- $D_{Pr}$ : erzielter Verdichtungsgrad bezogen auf die Proctordichte; [%]

Die RVS gibt außerdem für die dynamischen Messwerte der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle einen maximalen Verdichtungszuwachs ( $\Delta_{FDVK}$ ) zwischen zwei aufeinanderfolgenden Überfahrten auf derselben Walzspur und eine Standardabweichung ( $SD_{FDVK}$ ) des Mittelwertes der dynamischen Messwerte der FDVK auf dem jeweiligen Prüffeld an. Zusätzlich dazu werden die Grenzwerte 0,8 MIN, MIN und MAX, die mittels Kalibrierung mit punktuellen Versuchen festgelegt werden, angegeben.

Für die Überprüfung der Verdichtung stehen demnach drei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Dichtemessung: Das sind direkte Methoden zur Bestimmung der Dichte im Feld. (siehe Kapitel 2.5.1)
- Steifigkeitsmessung: Diese indirekten Messmethoden liefern als Ergebnis einen Verformungsmodul. (siehe Kapitel 2.5.2)
- Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK): Eine flächenhafte Überprüfung der erreichten Verdichtung ist hier das Ergebnis. (siehe Kapitel 2.5.4)

In der RVS 08.03.01 wird empfohlen, die Steifigkeitsmessung mit dynamischer Lastplatte jener der statischen Lastplatte bzw. der Dichtemessung vorzuziehen. Ab einer Fläche von 30.000 m<sup>2</sup> ist die FDVK verpflichtend anzuwenden, da die anderen Methoden nur punktuelle Ergebnisse der Verdichtung liefern.

### 2.5.1 Dichtemessung

Die Dichtemessung ist, wie bereits erläutert wurde, eine direkte Methode, um die Dichte im Feld zu bestimmen und somit die erfolgte Verdichtung nachzuweisen. Mit dieser punktuellen Messung wird der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  (siehe Formel 2.1) bestimmt und mit dem Referenzwert, der Proctordichte, verglichen.

$$D_{Pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{Pr}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

mit:

- $D_{Pr}$  Verdichtungsgrad [%]
- $\rho_d$  örtlich bestimmte Trockendichte [g/cm<sup>3</sup>]
- $\rho_{Pr}$  im Labor bestimmte Proctordichte [g/cm<sup>3</sup>]

Beispielsweise bedeutet ein geforderter Verdichtungsgrad  $D_{Pr} \geq 100\%$  demnach, dass die Trockendichte, die im Feld bestimmt wurde, die im Labor ermittelte Proctordichte zumindest erreichen muss. Somit ist es immer ein vom Boden abhängiges Verhältnis und kein fixer zu erreichender Wert. Der jeweils geforderte Verdichtungsgrad ist beispielsweise in Österreich für den Autobahn- und Straßenbau sowie für den Eisenbahnbau (Erdarbeiten) der RVS 08.03.01 [26] zu entnehmen (siehe Abbildung 2.12).

Tiefenbereich	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$D_{Pr}$ [%]	$\Delta_{FDVK}$ [%]	$SD_{FDVK}$ [%]
Unterbauplanum	38	35	100	≤ 5 (0)	≤ 20
ab 1 m unter Unterbauplanum	24 (26)	20	99	≤ 5 (0)	≤ 20
ab Dammaufstandfläche (einschl. Bodenauswechslung)	18 (16)	15 (7,5)	97 (95)	≤ 5 (0)	≤ 20 *)
Hinterfüllung	38	35	100		

Abbildung 2.12: Mindestanforderungen an die Verdichtung lt. RVS 08.03.01 [26]

Im Folgenden werden zuerst der Proctorversuch zur Quantifizierung der Proctordichte im Labor und anschließend die Verfahren zur Bestimmung der Trockendichte im Feld beschrieben.

### 2.5.1.1 Proctorversuch

Der Proctorversuch ist in der ÖNORM B 4418 [22] geregelt.

Beim Proctorversuch im Labor wird die maximal erreichbare Trockendichte eines Bodens bei einer konstanten Verdichtungsenergie bestimmt. Dafür wird bei mehreren Versuchsdurchgängen der Wassergehalt des Bodens jeweils variiert. Bei jedem einzelnen Durchgang wird die Bodenprobe lagenweise in einen genormten Zylinder (mit bekanntem Volumen) mit einer bestimmten Verdichtungsarbeit eingebracht. Nach Bestimmung der Feuchtdichte

$\rho$  der Bodenprobe wird mit Hilfe des bekannten Wassergehaltes  $w$  die Trockendichte  $\rho_d$  berechnet.

Nach mehreren Versuchen werden die Ergebnisse in das Diagramm (wie in Abbildung 2.13 dargestellt) eingetragen und man erhält die maximale Trockendichte, die Proctordichte  $\rho_{Pr}$ , bei einem optimalen Wassergehalt  $w_{opt}$  (bzw.  $w_{Pr}$ ) [3].

Die Verdichtungsenergie des Versuches kann  $0,60 \text{ MNm/m}^3$  (beim Standard-Procotorversuch) oder  $2,65 \text{ MNm/m}^3$  (beim modifizierten Proctorversuch) betragen. Wie aus dem Diagramm erkennbar ist, steigt bei zunehmender Verdichtungsenergie die Proctordichte und zugleich sinkt der zugehörige optimale Wassergehalt. Dies lässt sich physikalisch bei Betrachtung der Linien gleicher Sättigung (z.B.  $S_r=0,7$  bzw.  $S_r=1,0$  bei voller Sättigung) einfach nachvollziehen.

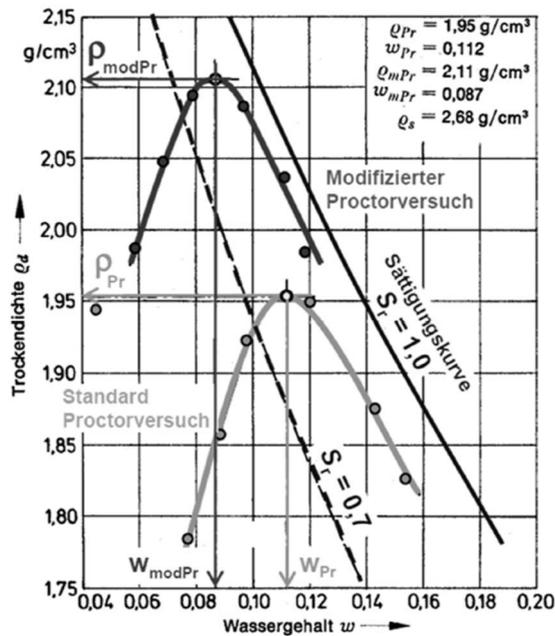


Abbildung 2.13: Proctorkurve des Standard- und modifizierten Proctorversuchs [3]

### 2.5.1.2 Ausstechzylinder

Dieses Verfahren zur Bestimmung der Dichte im Feld wird in der ÖNORM B 4414-2 [20] geregelt. Der Anwendungsbereich begrenzt sich auf bindige, feinkörnige Böden sowie auf Fein- und Mittelsande mit einem gewissen Feinkornanteil.

Der Ausstechzylinder mit innenliegender Schnittkante (Abbildung 2.14) wird nach den Verdichtungsvorgängen an gewünschter Messstelle senkrecht, je nach Konsistenz bzw.

Lagerung, in den Boden gedrückt bzw. geschlagen. Anschließend wird der Ausstechzylinder auf einer Seite freigegeben und das Ausstechblech unter dem Zylinder hineingedrückt. Beides wird vorsichtig geborgen, der Boden am oberen Zylinderrand eben abgeglichen und der Deckel aufgesetzt. Diesen Vorgang wiederholt man mit dem unteren Ende des Zylinders, indem er umgedreht wird.

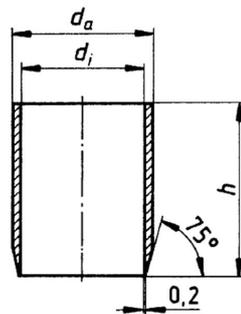


Abbildung 2.14: Ausstechzylinder [20]

Das Volumen des Ausstechzylinders ist bekannt, und durch Ermittlung der trockenen Masse der entnommenen Probe kann nach Trocknung bei  $105^\circ\text{C}$  die Trockendichte (Formel 2.2) und der dazugehörige Wassergehalt (Formel 2.3) bestimmt werden [20, 3].

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad (2.2)$$

$$w = \frac{m_f - m_d}{m_d} \quad (2.3)$$

mit:

$\rho_d$  Trockendichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

$w$  Wassergehalt [%]

### 2.5.1.3 Ersatzverfahren

Der Ablauf und die Auswertung dieses Verfahrens ist ebenfalls in der ÖNORM B 4414-2 [20] beschrieben. An einer Stelle des verdichteten Bodens wird eine Probe entnommen und im Labor werden Wassergehalt und Trockendichte bestimmt. Um das Volumen des entstandenen Hohlraumes im Boden zu bestimmen, macht man sich das Wissen über die Schüttdichte  $\rho_E$  von Ersatzmaterialien (wie u.a. Normensand, Wasser, Gips) zu Nutze.

Man misst die benötigte Masse  $m_E$  des Ersatzstoffes, um den Hohlraum zu füllen, und kann so das Volumen der Prüfgrube wie folgt berechnen [20, 3].

$$V = \frac{m_E}{\rho_E}$$

mit:

- $V$     Volumen der Prüfgrube [ $\text{cm}^3$ ]
- $m_E$     Masse des Ersatzstoffes [g]
- $\rho_E$     Schüttdichte des Ersatzstoffes [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

Das Ersatzverfahren funktioniert je nach Ersatzmaterial immer ähnlich und lässt sich unterteilen in:

- Sandersatz-Verfahren
- Gipsersatz-Verfahren
- Flüssigkeitersatz-Verfahren
- Ballon-Verfahren
- Schürfgruben-Verfahren (bevorzugt für Böden mit Steinen und Blöcken)
- Schüttkörper-Verfahren (bevorzugt für Böden mit Steinen und Blöcken)

### 2.5.1.4 Isotopsonde nach Troxler

Bei diesem radiometrischen Verfahren werden direkt vor Ort und ohne Probenentnahme die Dichte und der Wassergehalt des Bodens bestimmt. Grundlage dafür ist die Aussendung von radioaktiver Strahlung und die Messung der Intensität der Rückreflexion, also jener Strahlen, die nicht gestreut oder absorbiert werden (siehe Abbildung 2.15). Für die Messung der Feuchtdichte des Bodens  $\rho$  wird das Isotop Cäsium 137 und für die Bestimmung des Wassergehaltes  $w$  Americium-Beryllium verwendet. Die Trockendichte  $\rho_d$  wird aus Feuchtdichte und Wassergehalt bestimmt [1]:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w}$$

mit:

- $\rho_d$  Trockendichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
- $\rho$  Feuchtdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
- $w$  Wassergehalt [%]

Vorteil dieses Verfahrens ist die zerstörungsfreie und schnelle Durchführung, jedoch arbeitet man mit radioaktiver Strahlung und dafür sind strenge Vorschriften einzuhalten. Durch die radioaktiven Stoffe in der Sonde gibt es genau definierte Regeln für den Erwerb und die Verwendung der Sonde einerseits und andererseits auch für den Transport [9]. Da dieses Verfahren ohne direkte Beschau des Bodens durchgeführt wird, sollten die Ergebnisse zum einen von einem Experten mit Erfahrung auf diesem Gebiet beurteilt werden und zum anderen durch andere Verfahren bestätigt werden. Eine hohe Streuung der Ergebnisse kann außerdem auftreten.

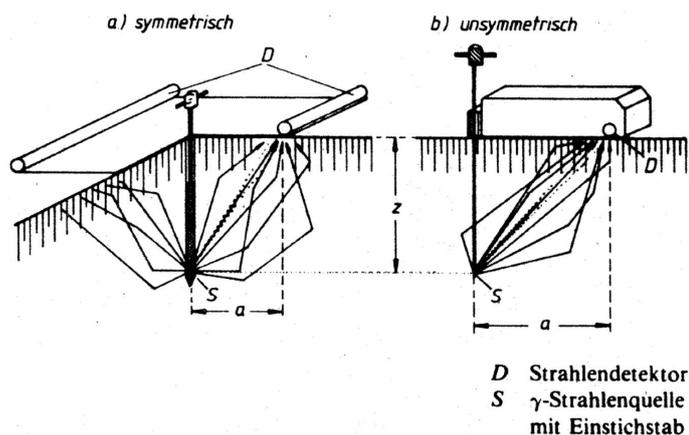


Abbildung 2.15: Isotopsonde nach Troxler [3]

### 2.5.2 Steifigkeitsmessung

Steifigkeitsmessungen sind ein indirektes Verfahren zur Kontrolle der geleisteten Verdichtung. Diese Feldversuche sind keine direkten Verdichtungsprüfmethoden, da man als Ergebnis keinen Verdichtungsgrad, sondern einen Vorformungsmodul erhält. Eine Korrelation zwischen Trockendichte und Steifigkeit besteht darin, dass mit zunehmender Trockendichte auch die Steifigkeit höher wird.

### 2.5.2.1 Statischer Lastplattenversuch

In der ÖNORM B 4417 [21] ist der statische Lastplattenversuch hinsichtlich Versuchsdurchführung und Auswertung geregelt.

Die kreisförmige Lastplatte mit einem Durchmesser von 30 cm wird bei dem Versuch kraftschlüssig auf den Boden aufgesetzt - bei Unebenheiten ist eventuell ein Ausgleich mit einer dünnen Sandschicht zu erzielen -, und der Druckstempel wird zwischen Lastplatte und Gegengewicht gesetzt. Als Gegengewicht dient auf der Baustelle meist eine schwere Baumaschine (z.B. Walze oder LKW). Mit einer hydraulischen Presse wird die Last stufenweise gesteigert und jeweils die dabei hervorgerufenen Verformungen an einer oder an drei Messuhren abgelesen (Einuhren bzw. Dreihuhrenmessgerät). Sowohl die Ent- als auch die Wiederbelastung erfolgt stufenweise [3, 21, 2].

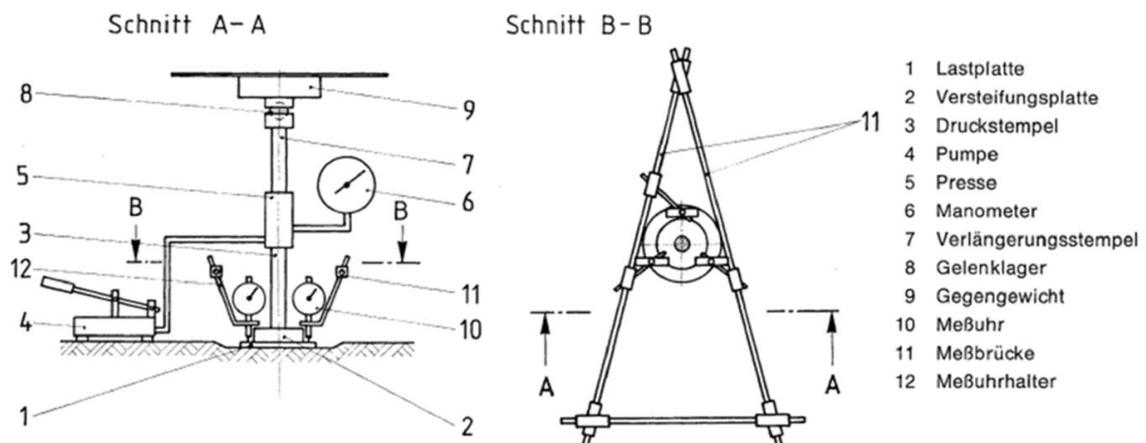


Abbildung 2.16: Versuchsaufbau der statischen Lastplatte [21]

Der lt. RVS [26] geforderte  $E_{v1}$ -Wert (Verformungsmodul der Erstbelastung) kann aus dem Last-Verformungsdiagramm (siehe Abbildung 2.17) gemäß Formel 2.4 (lt ÖNORM B 4417 [21]), die sich aus der Theorie des elastisch-isotropen Halbraums ergibt, ermittelt werden.

$$E_v = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} \quad (2.4)$$

mit:

- $E_v$  Verformungsmodul [ $\text{MN}/\text{m}^2$ ]
- $r$  Radius der Lastplatte [m]
- $\Delta\sigma$  Belastungsänderung [ $\text{MN}/\text{m}^2$ ]
- $\Delta s$  Setzungsänderung bei  $\Delta\sigma$  [m]

Vorausgesetzt wird, dass die Querdehnzahl des Bodens einen Wert von  $\nu=0,214$  annimmt.

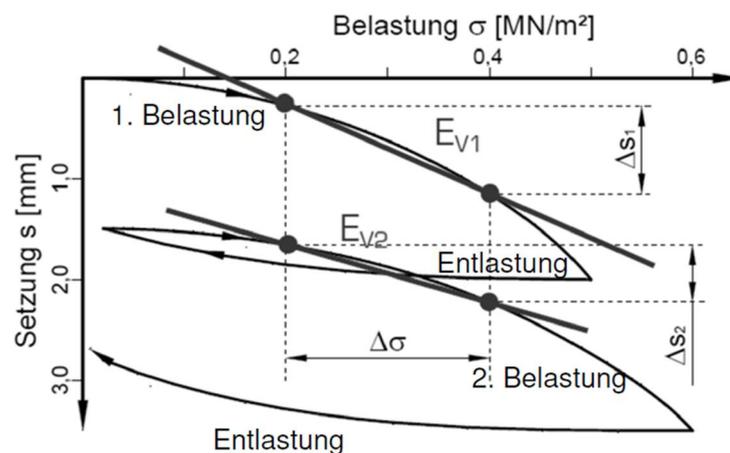


Abbildung 2.17: Last-Verformungs-Diagramm des statischen Lastplattenversuchs [3, bearbeitet]

Durch die Belastung erfolgt zwar eine Verformung an der Stelle der Versuchsdurchführung, jedoch wird der Boden in unmittelbarer Nähe durch Verwendung des Gegengewichtes ebenfalls entlastet [2]. Deswegen werden die Ergebnisse in Abhängigkeit von mehreren Faktoren (Schichten, Aufstellung des Messgestänges) zu einem oft nicht unerheblichen Maß verfälscht [17]. Ein weiterer Nachteil ist die lange Dauer der Versuchsdurchführung, die sich aus Versuchsaufbau, Kraftaufbringung und definierten Wartezeiten zwischen den Ablesungen und dem Versuchsabbau ergibt. All dies kostet Zeit und hält den Bauablauf auf, da während der Versuchsdurchführung keine Arbeiten durchgeführt werden dürfen, welche die Messuhren dynamisch beeinflussen.

Aus diesem Grund wird die dynamische Lastplatte der statischen vorgezogen. In jener Zeit, in der man einen statischen Lastplattenversuch durchführt, können weitaus mehr dynamische Lastplattenversuche gemacht werden, so spart man nicht nur Zeit, sondern bekommt zudem Ergebnisse von mehreren Messpunkten und ist bereits dadurch statistisch betrachtet aussagekräftiger.

### 2.5.2.2 Dynamischer Lastplattenversuch

Der dynamische Lastplattenversuch mittels des Leichten Fallgewichtes (LFG) ist in der RVS 08.03.04 [28] geregelt.

Bei diesem Lastplattenversuch wird ein Fallgewicht mit einer Masse von 10 kg aus der Verankerung ausgeklinkt und fällt entlang der Führungsstange (diese muss vertikal und locker gehalten werden) auf ein Feder-Dämpfer-Element. Der Stoß wird über die Lastplatte in den Boden übertragen und bewirkt eine Verformung des Bodens, die mit dem Beschleunigungssensor aufgenommen wird. Die Führungsstange inklusive Fallgewicht und Feder-Dämpfer-Element wird lediglich über eine Zentrierkugel auf die Lastplatte gesetzt, womit nur Druckkräfte übertragen werden können. Die kreisrunde Stahl-Lastplatte selbst hat einen Durchmesser von 30 cm und an ihr ist die Führungsstange zentrisch angeordnet. Erkennbar ist der Versuchsaufbau in der Abbildung 2.18.

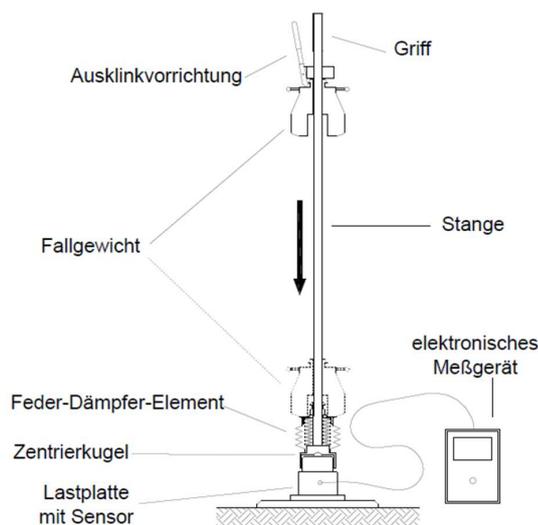


Abbildung 2.18: Versuchsaufbau der dynamischen Lastplatte [3]

An der gewünschten Messstelle wird die Lastplatte kraftschlüssig auf den Untergrund aufgesetzt und drei Vorbelastungsstöße werden zur Sicherstellung des vollflächigen Kontaktes mit dem Untergrund durchgeführt. Bei den drei darauffolgenden Stößen werden jeweils die Beschleunigungen durch den Sensor und das Messgerät aufgenommen, durch zweifache Integration des Beschleunigungssignals wird der Schwingweg der Platte (entspricht der Vorformung des Bodens bei Druckbelastung) ermittelt und folglich zu einem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  verarbeitet, der augenblicklich abgelesen werden kann.

Der dynamische Verformungsmodul wird analog zur Formel des statischen Lastplatten-

versuches durchgeführt, wobei die maximale Kontaktspannung mit  $\Delta\sigma=0,1 \text{ MN/m}^2$  als konstant vorausgesetzt wird. Der Radius  $r=0,15 \text{ m}$  ist ebenso bekannt, somit ergibt sich der dynamische Verformungsmodul zu:

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} = \frac{22,5}{s_{max}} \quad (2.5)$$

mit:

- $E_{vd}$  dynamischer Verformungsmodul [ $\text{MN/m}^2$ ]
- $r$  Radius der Lastplatte [ $\text{mm}$ ] Richtungsschwinger
- $\Delta\sigma$  mittlere Normalspannung [ $\text{MN/m}^2$ ]
- $\Delta s$  vertikale Setzung der Lastplatte [ $\text{mm}$ ]
- $s_{max}$  maximale vertikale Setzung der Lastplatte [ $\text{mm}$ ]

Die maximale Kontaktspannung weist zufolge der Wahl der Federsteifigkeit und der Dämpfungskonstante in Abstimmung mit der Bandbreite der zu erwartenden Untergrundsteifigkeit nur eine geringe Variation auf, womit dies als konstant angenommen werden kann [7].

Die grafische Auswertung ist in Abbildung 2.19 zu sehen [2, 3, 28].

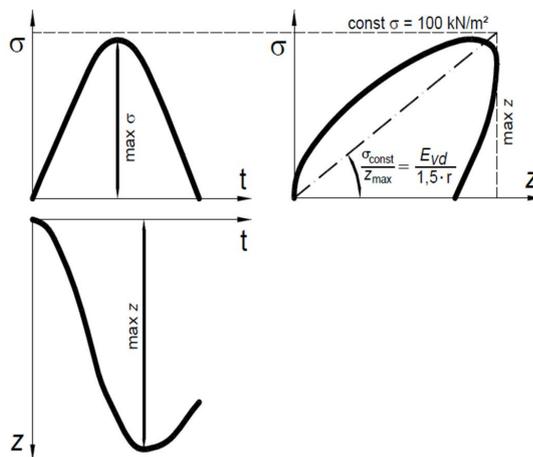


Abbildung 2.19: Bodenpressung, Verschiebung und Arbeitsdiagramm der dynamischen Lastplatte [3]

Zu den Vorteilen des dynamischen Lastplattenversuches zählt die rasche Versuchsdurchführung auf Grund der leichten Handhabung und des geringen Gewichtes des Gerätes. Zudem können die dynamischen Lastplattenversuche ohne Gegengewicht und zeitgleich

neben dem normalen Bauablauf stattfinden, ohne diesen aufzuhalten oder zu stören. Da ein Versuch inklusive Auf-, Abbau und Umstellen des Gerätes nur ungefähr drei Minuten dauert, kann innerhalb kurzer Zeit eine Vielzahl an Versuchen durchgeführt werden und man bekommt einen besseren Überblick über die geleistete Verdichtungsarbeit des gesamten Bereiches [3].

Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass versuchsbedingte Fehler im Vergleich zum statischen Versuch praktisch ausgeschlossen werden können und die messtechnisch bedingte Streuung der Ergebnisse sehr gering ist [7]. Die Gerätschaft ist zumindest einmal im Jahr zu kalibrieren, um die Funktionstüchtigkeit regelmäßig zu überprüfen.

### 2.5.3 Rammsondierung

Rammsondierungen sind in der ÖNORM EN ISO 22476-2 [24] geregelt, bzw. besondere Rammsondiervverfahren werden in der ÖNORM B 4419 [23] beschrieben.

Die Rammsondierung ist ein Verfahren, das weder direkt die Dichte noch den Verformungsmodul ergibt. Jedoch ist sie für einen Vorher-Nachher-Vergleich der Lagerungsdichte des Bodens über ein großes Schichtpaket sehr anschaulich.

Durchgeführt wird es, indem die Sondierstange mit einer definierten Energie in den Boden geschlagen wird. Dabei misst man die Schlaganzahl, die benötigt wird, um die Sonde 10 cm in den Untergrund einzuschlagen, dies ist der  $N_{10}$ -Wert. In einem Diagramm wird dieser Wert über die Rammtiefe aufgetragen. Für die Interpretation eines solchen Diagrammes sollte man einerseits Erfahrungen damit haben und andererseits noch andere Aufschlüsse heranziehen, um etwaige Fremdeinflüsse und Verfälschungen eliminieren zu können. In Abhängigkeit von der verwendeten Bodenart werden i.A. die schwere Rammsondierung (DPH, früher SRS 15) bzw. die leichte Rammsondierung (DPL, früher LRS 10) verwendet, es gibt auch überschwere bzw. mittelschwere Ausführungen.

Neben der Rammsondierung gibt es noch andere Sondierverfahren:

- Bohrlochrammsondierung
- Nutsondierung
- Drucksondierung
- Flügelsondierung
- Seitendrucksondierung

Für herkömmliche Verdichtungskontrollen im Erdbau werden Sondierungen jedoch nur selten eingesetzt.

### **2.5.4 Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK)**

Die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) ist momentan nur mit Vibrationswalzen oder Walzen mit Richtschwinger (vertikale und schräge Einstellung der Erregereinheit) möglich. Ein funktionierendes System für Oszillationswalzen befindet sich momentan noch nicht auf dem Markt. Die RVS 08.03.02 [27] regelt das Anwendungsgebiet und die Durchführung.

Diese walzen- und arbeitsintegrierte Methode zur Verdichtungskontrolle misst und dokumentiert den Verdichtungserfolg und Verdichtungszuwachs. Eine sofortige Darstellung des Verdichtungszustandes nach jedem Walzenübergang ist möglich, dadurch kann der Walzenfahrer auf den Boden reagieren und entweder erneut verdichten oder den Verdichtungsprozess auf Grund des erreichten Verdichtungserfolgs beenden. Schwachstellen können ebenso erkannt wie behoben werden. Eine sehr gleichmäßige Verdichtung wird gewährleistet und es findet keine Wiederauflockerung oder Kornzertrümmerung statt.

Das Prinzip der FDVK beruht auf der dynamischen Wechselwirkung zwischen der dynamisch angeregten Bandage und dem Untergrund und besteht darin, dass beim Konstanthalten aller Walzenparameter (Fahrgeschwindigkeit, schwingende Masse, Erregerkraft, -richtung und -frequenz, statische Auflast) die Änderung des Bewegungsverhaltens der Bandage nur auf eine Änderung der Bodenkennwerte zurückgeführt werden kann. Die Bandagenschwingung wird mittels Sensor erfasst und ausgewertet (siehe Abbildung 2.20), somit dient die Walze gleichzeitig als Verdichtungs- und Messgerät. Beispielsweise kann man mit Hilfe eines GPS-Systems die erhaltenen Verdichtungswerte einem Ort auf der Messstrecke zuordnen. Die Messtiefe, nicht zu verwechseln mit der Tiefenwirkung der Verdichtung, liegt bei einer 12 t Walze etwa bei 2,5 m [2, 3, 13, 1].

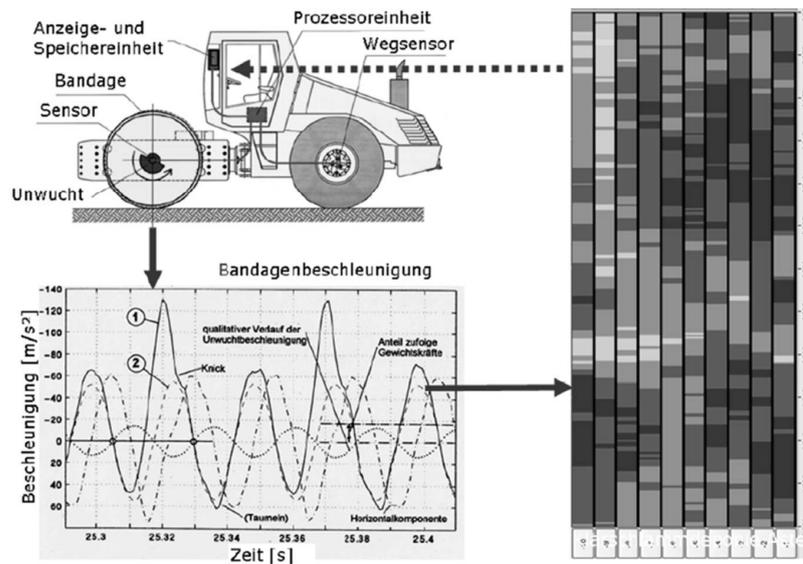


Abbildung 2.20: FDVK-Messsystem und Auswertung der Beschleunigungssignale [2]

Vor Verwendung der FDVK muss zuerst das passende Messgerät mit den Sensoren auf die Walze montiert bzw. eine Walze mit integriertem Messsystem muss verwendet werden. Vor jeder Messung ist eine Kalibrierung mittels einer Probeverdichtung, meist durch dynamische Lastplattenversuche, durchzuführen.

Drei Messwertsysteme (Compactometer, Terrameter, ACE) mit vier FDVK-Messwerten ( $CMV$ ,  $OMEGA$ ,  $E_{VIB}$ ,  $k_B$ ) sind momentan auf dem Markt erhältlich [3, 2, 1, 13]:

- Compactometer -  $CMV$ -Wert:  
 Der Compaction-Meter-Value ( $CMV$ ) ist ein dimensionsloser FDVK-Messwert, der die Beschleunigungssignale im Frequenzbereich auswertet (Abbildung 2.21, oben links). Die Vertikalbeschleunigungen der Bandagenachse werden an der Lagerschale der Bandage gemessen. Der  $CMV$ -Wert ist das Verhältnis von der Amplitude der Vertikalbeschleunigung bei doppelter Erregerkreisfrequenz zu der Amplitude bei der Erregerkreisfrequenz.
- Terrameter -  $OMEGA$ -Wert:  
 Der dimensionslose  $OMEGA$ -Wert wertet die Beschleunigungssignale im Zeitbereich aus (Abbildung 2.21, oben rechts). Im Arbeitsdiagramm wird die Bodenkontaktkraft und der Schwingweg, beides muss zuvor aus der schwingenden Masse bzw. dem Beschleunigungssignal ermittelt werden, dargestellt. Die dabei entstehende Fläche entspricht der in den Boden eingebrachten Verdichtungsarbeit. Je steifer der Untergrund ist, desto kleiner wird die an den Boden abgegebene Verdichtungsenergie und die im Arbeitsdiagramm dargestellte Fläche wird ebenfalls kleiner.

- Terrameter -  $E_{VIB}$ -Wert:  
 Der  $E_{VIB}$ -Wert ist eine Auswertung im Zeitbereich und hat die Einheit  $[MN/m^2]$  (Abbildung 2.21, unten links). Der dynamische Vibrationsmodul  $E_{VIB}$  entspricht der Steigung der Sekante in der Belastungsphase der Arbeitslinie. Die Sekante liegt zwischen 40 % und 90 % der Bodenkontaktkraft und ist somit durch  $\Delta F$  und  $\Delta z$  genau definiert. Das Arbeitsdiagramm wird wie zuvor beim OMEGA-Wert beschrieben ermittelt.
- ACE -  $k_B$ -Wert:  
 Die Bodensteifigkeit  $k_B$  wird im Zeitbereich ausgewertet und hat die Einheit  $[MN/m]$  (Abbildung 2.21, unten rechts). Erneut sind die Arbeitslinie und das Arbeitsdiagramm Ausgangspunkt für die Auswertung. Die Bodenkontaktkraft am Umkehrpunkt wird herangezogen. Jedoch wird bei der Auswertung zwischen Kontaktbetrieb und periodischem Kontaktverlust unterschieden.

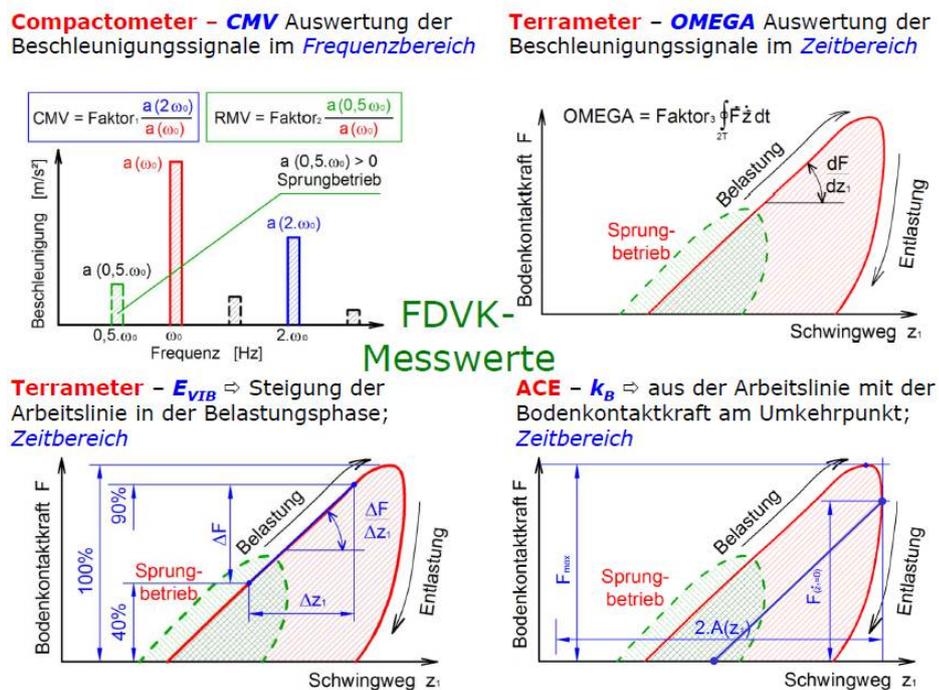


Abbildung 2.21: FDVK-Messwerte CMV, Omega,  $E_{VIB}$  und  $k_B$  für Vibrationswalzen [2]

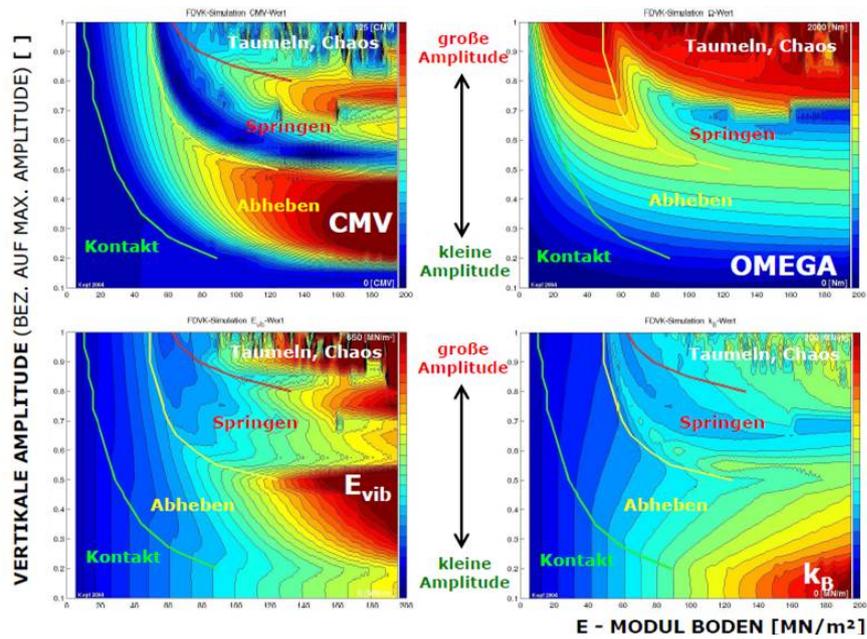


Abbildung 2.22: Verlauf der FDVK-Messgrößen aus Simulationsberechnungen von unterschiedlich stark angeregten Vibrationswalzen auf homogenem Untergrund variabler Steifigkeit [2]

Abbildung 2.22 zeigt, dass keiner der vier FDVK-Messwerte unabhängig von der Größe der dynamischen Anregung ist. Diese Abhängigkeit ist bei den Messwerten  $E_{VIB}$  und  $k_B$  nicht so stark ausgeprägt [2]. Für eine richtige Interpretation der erhaltenen Messwerte nach einer Verdichtungsfahrt ist es notwendig, den Betriebszustand der Walze während der Überfahrt zu kennen.

Die Grafiken zeigen außerdem, welcher Messwert für welchen Betriebszustand gute Ergebnisse liefert. Je gleichmäßiger der Abstand und je senkrechter die Iso-Linien sind, desto geeigneter ist das Messwertsystem. Somit ist der OMEGA-Wert beispielsweise im Gegensatz zu den anderen drei Messwerten schlecht geeignet für die Auswertung im Betriebszustand des Abhebens, dies zeigt auch die Abbildung 2.23. Ideal wäre ein Messwert, der über den gesamten Wertebereich linear zunimmt, dies ist jedoch bei keinem dieser Messwerte der Fall. Der  $E_{VIB}$  und der  $k_B$ -Wert verhalten sich jedoch, bis auf den Übergang vom Abheben zum Springen, über den gesamten Wertebereich annähernd linear.

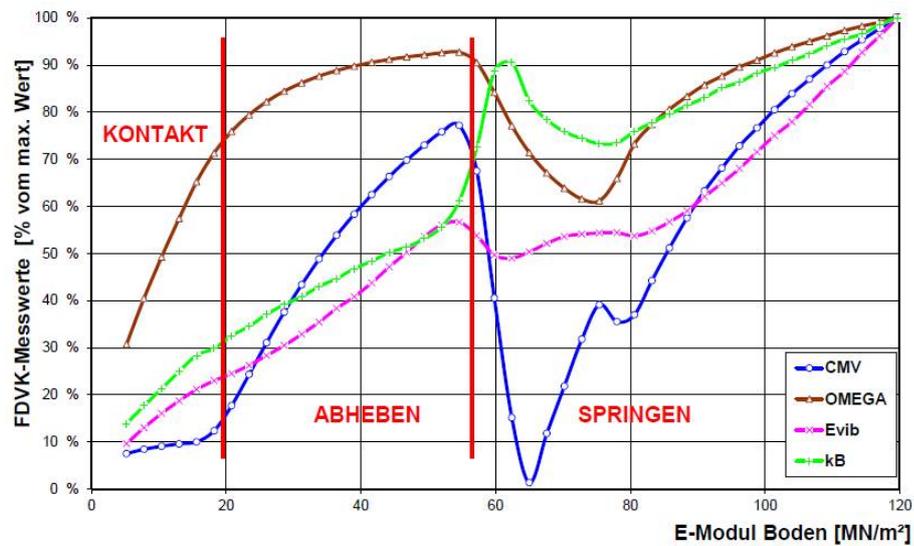


Abbildung 2.23: Vergleich der FDVK-Messwerte bei den verschiedenen Betriebszuständen [4]

Ein FDVK-Messsystem für oszillierende Walzen wurde von der Firma GEODYNAMIK AB entwickelt: Mit einem Oszillometer wurde der OMV-Wert bestimmt. Jedoch hat dieses System nicht wirklich funktioniert und ist somit nie in der Praxis angewendet worden. Wie man sieht, ist aber die Motivation vorhanden, ein funktionierendes FDVK-System für Oszillationswalzen zu entwickeln [13] .

# 3 Großversuch in Fischamend

## 3.1 Allgemeines

Experimente sind sowohl in der Forschung als auch in der Entwicklung und Überprüfung von Theorien und somit zur Erlangung neuer Erkenntnisse notwendig und unumgänglich.

Im Zuge des Forschungsprojektes zur Optimierung von Oszillationswalzen wurden zwei groß angelegte Versuchsreihen durchgeführt: der „Grundsatzversuch“ im Jahr 2012 und der „Großversuch“ im Jahr 2014.

Ziel der Versuche war vorrangig die Erforschung der Oszillationsverdichtung: Wie reagiert der Boden auf diese Maßnahme? Welche Änderungen kann man nach mehreren Überfahrten feststellen? Welche Beschleunigungen, Bewegungsverhalten, Drücke, Setzungen treten in Abhängigkeit von Frequenz und Fahrgeschwindigkeit auf? Wie verändert sich der Verformungsmodul (gemessen durch die dynamische Lastplatte) des Bodens mit Zunahme der Überfahrten? Wie tief sinkt die Bandage in den Boden ein? Wie lange ist die Aufstandszeit eines Punktes auf der Bandage in Abhängigkeit von der Anzahl der Überfahrten bzw. von der bereits geleisteten Verdichtungsarbeit? Wie verhält sich das Bewegungsverhalten der Oszillationsbandage in Abhängigkeit der Maschinenparameter und der sich durch die Verdichtung veränderten Bodenparameter?

### 3.1.1 Ort der Versuche

Beide Versuche konnten auf dem Gelände der Kiesgrube der Firma HABAU Hoch- und Tiefbaugesellschaft m.b.H. durchgeführt werden. Das Areal war für diese Art der Versuche ideal: Die Kiesgrube befindet sich in Fischamend und somit in der Nähe von Wien (direkt neben dem Flughafen Wien Schwechat), es handelt sich um ein großflächiges Gebiet mit ausreichendem Platzangebot, ohne jegliche Anrainer, die belästigt werden könnten. Ein weiterer großer Vorteil bestand in der Möglichkeit, die Erdbaugeräte vor Ort zu nutzen,

inklusive der Geräteführern. Geeignetes Schüttmaterial für die Teststrecke war in der Kiesgrube auch reichlich vorhanden und konnte verwendet werden.

#### **3.1.2 Grundsatzversuch in Fischamend**

Im April 2012 fanden in Fischamend die Grundsatzversuche für dynamische Verdichtung, mit speziellem Augenmerk auf Oszillationswalzen, statt.

Die Verdichtungsfahrten wurden auf einer 50 cm starken Schüttlage aus sandigem Kies durchgeführt, und zwar auf vier Spuren mit je 1,60 m Breite und 20 m Länge. Jede Spur wurde mit einer anderen Verdichtungserregung befahren: Statisch, Oszillation, Vibration, Oszillation und Vibration. In dem Testfeld waren Sensoren zur Messung der Beschleunigung, der Verformungen und des Druckes eingebaut. Des Weiteren gab es eine künstlich hergestellte Schwachstelle in Form von zwei Matratzen in der Schüttung, um deren Einfluss auf die Messergebnisse zu ermitteln.

Zu Vergleichszwecken wurden auch Messfahrten auf einem steifen Planum (eine Spur) und weichem Untergrund (zwei Spuren: je eine für Oszillations- bzw. Vibrationsverdichtung) durchgeführt. In diesen Testfeldern wurden weniger Messsensoren eingebaut, da hier hauptsächlich die Messwerte im Fokus standen, die von den auf der Walze montierten Sensoren ermittelt wurden.

Die Verdichtungsversuche wurden mit der HD+ 90 VO Tandemwalze mit Vibrations- und Oszillationsbandage der Firma HAMM AG durchgeführt (genauere Beschreibung der Walze siehe Kapitel 3.3). Die erforderlichen Messsensoren wurden speziell für diese Versuchsreihe auf die Walze montiert.

### **3.2 Versuchsfeld**

Der Großversuch in Fischamend fand im April 2014 statt und wurde im Wesentlichen wie der Grundsatzversuch aufgebaut. Hierbei wurde versucht, die Messsensorik, die beim Grundsatzversuch 2012 Probleme bereitet hatte, zu optimieren. Jene Parameter, die gut funktioniert hatten und vielversprechende Ergebnisse geliefert hatten, behielt man bei, und die Versuche wurden teilweise in diese Richtung ausgebaut. Deswegen wurden beim Großversuch ebenfalls Verdichtungsfahrten auf steifem und weichem Untergrund als Vergleichsmessfahrten durchgeführt.

#### 3.2.1 Spur 1 - 4: sandiger Kies

Das Hauptaugenmerk lag bei den Versuchen auf den Spuren 1 - 4 (siehe Abbildung 3.1 und 3.6), dementsprechend wurden diese intensiver und öfter mit der Walze befahren.

Das Testfeld hatte eine Länge von 40 m (exklusive Rampen am Anfang und am Ende) und eine Breite von 6,4 m, es war 40 cm (erste Schüttlage) bzw. 70 cm (zweite Schüttlage 30 cm) mächtig. Die Breite der einzelnen Spuren betrug jeweils 1,60 m; da die Bاندage eine Breite von 1,68 m hat, war eine Überlappung zwischen den Spuren gegeben. Die Absteckung des Testfeldes erfolgte mittels Theodolit auf dem nicht ganz ebenen Unterbauplanum. Kontrolliert wurden die Abmessungen der Teststrecke nach beiden Schüttlagen mit Theodolit und Maßband.

Jede Spur wurde mit einer anderen Art der Verdichtung befahren:

- Spur 1: Statische Walzenverdichtung - sowohl vorwärts als auch rückwärts
- Spur 2: Oszillierende Walzenverdichtung vorwärts - statische Rückwärtsfahrt
- Spur 3: Vibrierende Walzenverdichtung vorwärts - statische Rückwärtsfahrt
- Spur 4: Oszillierende und vibrierende Walzenverdichtung vorwärts - statische Rückwärtsfahrt



Abbildung 3.1: Spuren 1 - 4, a) dynamischer Lastplattenversuch, b) Nivellement

In jeder Spur wurden mehrere Messfahrten durchgeführt, wobei Frequenz, Amplitude und Geschwindigkeit variiert wurden.

Insgesamt wurden zwei Lagen mit 40 cm bzw. 30 cm auf das steife Planum, welches durch etliche Überfahrten von Baugeräten in der Kiesgrube stark verdichtet war, geschüttet. In jeder Lage wurde das Versuchsprogramm durch Überfahrten mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Das Material war sandiger Kies (siehe Abbildung 3.2) und wurde mit dem LKW innerhalb der Kiesgrube antransportiert und mit einem Radlader verteilt. Besonders bei der Schüttung der zweiten Lage wurde darauf geachtet, dass das Material mit dem Bagger und dem Böschungslöffel ohne Überfahrten verteilt wurde, um es zu keiner Verdichtung vor Versuchsbeginn kommen zu lassen.

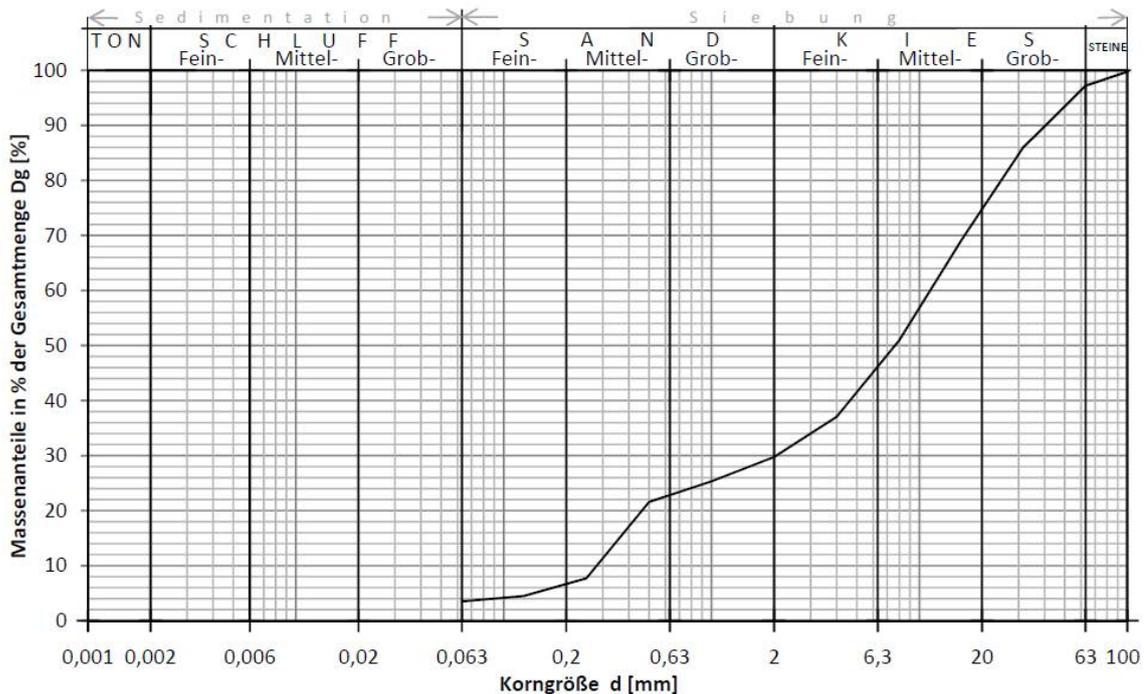


Abbildung 3.2: Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung

Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 105,000$ mm	$Dg_{63} = 97,2$ %	$C_U = 40,2$ [-] Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 40,446$ mm	$Dg_{31,5} = 85,9$ %	$C_C = 1,327$ [-] Krümmungszahl
$d_{85} = 30,335$ mm	$Dg_{20} = 74,7$ %	$G = 185,75$ cm <sup>2</sup> Grobfaktor
$d_{80} = 24,766$ mm	$Dg_{16} = 69,2$ %	<b>Kornfraktionen</b>
$d_{70} = 16,506$ mm	$Dg_{6,3} = 46,2$ %	$C_o = 2,8$ % Steine
$d_{60} = 11,273$ mm	$Dg_2 = 29,7$ %	$Gr = 67,4$ % Kies
$d_{50} = 7,626$ mm	$Dg_{0,63} = 22,8$ %	$Sa = 26,3$ % Sand
$d_{40} = 4,634$ mm	$Dg_{0,2} = 6,7$ %	$Si+Cl = 3,5$ % Schluff+Ton
$d_{30} = 2,048$ mm	$Dg_{0,063} = 3,5$ %	$Cl = -$ % Tonanteil nicht bekannt
$d_{20} = 0,463$ mm	$Dg_{0,02} = -$ %	<b>Kornanteile</b>
$d_{15} = 0,360$ mm	$Dg_{0,006} = -$ %	$A_{>63} = 2,8$ % Anteil mit $d > 63$ mm
$d_{10} = 0,281$ mm	$Dg_{0,002} = -$ %	$A_{>2,0} = 70,3$ % Anteil mit $d > 2,0$ mm
$d_{min} = 0,000$ mm	$Dg_{0,001} = -$ %	$A_{<0,063} = 3,5$ % Anteil mit $d < 0,063$ mm

Abbildung 3.3: Kennzahlen der Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung

Der natürliche Wassergehalt  $w_n = 1,9\%$  und die Korndichte  $\rho_s = 2,70 \text{ g/cm}^3$  wurden für die Bodenprobe vor der Verdichtung ebenfalls im Labor ermittelt.

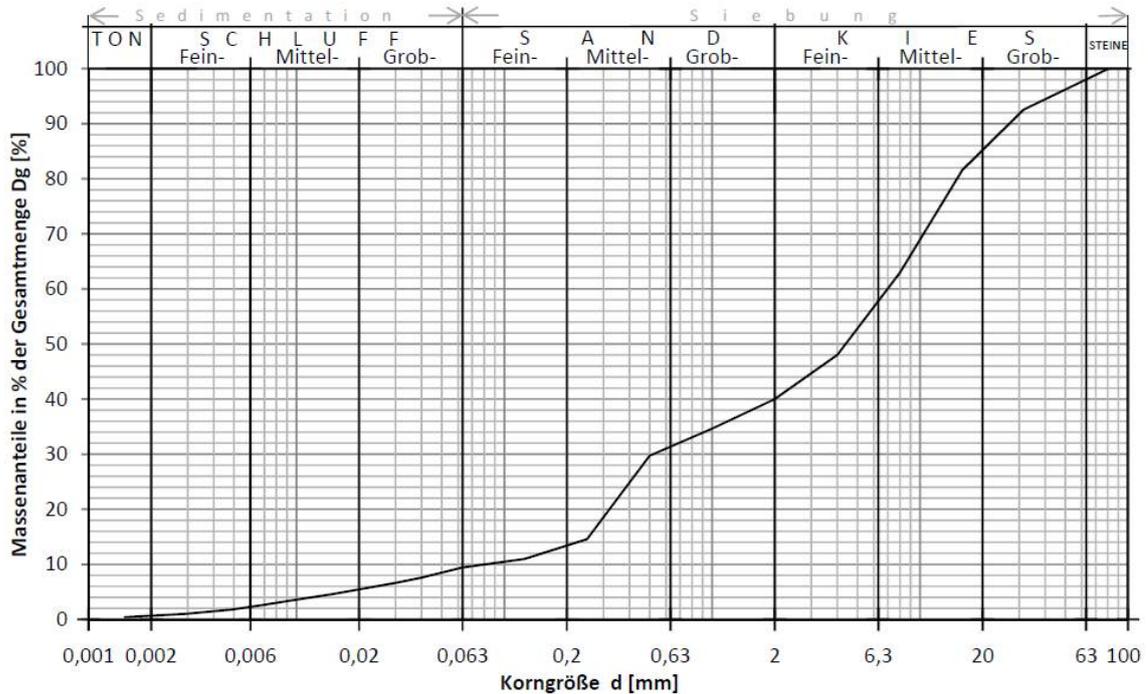


Abbildung 3.4: Kornverteilungslinie der Spur 1-4 nach der Verdichtung

Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{\max} = 81,000 \text{ mm}$	$Dg_{63} = 98,0 \%$	$C_U = 85,6$ [-] Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 26,928 \text{ mm}$	$Dg_{31,5} = 92,5 \%$	$C_C = 0,475$ [-] Krümmungszahl
$d_{85} = 19,755 \text{ mm}$	$Dg_{20} = 85,2 \%$	$G = 159,64 \text{ cm}^2$ Grobfaktor
$d_{80} = 15,078 \text{ mm}$	$Dg_{16} = 81,6 \%$	<b>Kornfraktionen</b>
$d_{70} = 10,396 \text{ mm}$	$Dg_{6,3} = 57,8 \%$	$C_o = 2,0 \%$ Steine
$d_{60} = 6,975 \text{ mm}$	$Dg_2 = 40,0 \%$	$Gr = 57,9 \%$ Kies
$d_{50} = 4,386 \text{ mm}$	$Dg_{0,63} = 31,4 \%$	$Sa = 30,6 \%$ Sand
$d_{40} = 1,997 \text{ mm}$	$Dg_{0,2} = 13,4 \%$	$Si = 8,8 \%$ Schluff
$d_{30} = 0,519 \text{ mm}$	$Dg_{0,063} = 9,4 \%$	$Cl = 0,7 \%$ Ton
$d_{20} = 0,321 \text{ mm}$	$Dg_{0,02} = 5,5 \%$	<b>Kornanteile</b>
$d_{15} = 0,255 \text{ mm}$	$Dg_{0,006} = 2,3 \%$	$A_{>63} = 2,0 \%$ Anteil mit $d > 63 \text{ mm}$
$d_{10} = 0,081 \text{ mm}$	$Dg_{0,002} = 0,7 \%$	$A_{>2,0} = 60,0 \%$ Anteil mit $d > 2,0 \text{ mm}$
$d_{\min} = 0,000 \text{ mm}$	$Dg_{0,001} = - \%$	$A_{<0,063} = 9,4 \%$ Anteil mit $d < 0,063 \text{ mm}$

Abbildung 3.5: Kennzahlen der Kornverteilungslinie der Spur 1-4 nach der Verdichtung

Der natürliche Wassergehalt  $w_n = 1,1\%$  und die Korndichte  $\rho_s = 2,70 \text{ g/cm}^3$  wurden für die Bodenprobe nach der Verdichtung ebenfalls im Labor ermittelt.

Die Rampen am Anfang und am Ende des Prüffeldes hatten zum einen den Zweck, die Walze auf die Teststrecke zu bekommen, und zum anderen, die Walze auf die konstante Geschwindigkeit für die Versuchsdurchführung zu beschleunigen.

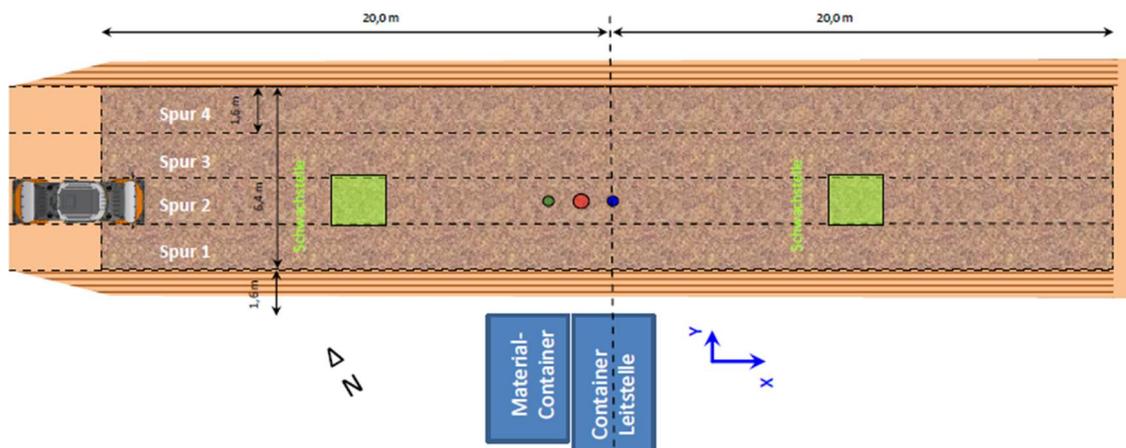


Abbildung 3.6: Skizze von Lage und Abmessungen Spur 1 - 4 [15, bearbeitet]

Besonders Spur 2 war für die Versuchsdurchführung von Bedeutung, da sie mit Oszillation befahren wurde. Somit wurden in dieser Spur zusätzliche Messensoren für Beschleunigung, Setzung und Druck installiert (genauere Beschreibung und Lage siehe Kapitel 3.4.2). Außerdem wurde eine künstliche Schwachstelle pro Lage in Form von zwei Matratzen mit jeweils 90 cm x 200 cm eingebaut. Diese Schwachstellen waren jedoch nicht übereinander angeordnet (siehe Skizze 3.23): In der ersten Lage wurde die Schwachstelle in der ersten Hälfte des Testfeldes und in der zweiten Lage in der zweiten Hälfte eingebaut. Somit konnte auch die Tiefenwirkung der Messensoren auf der Walze getestet werden: Es stellt sich die Frage, ob man in den aufgezeichneten Messdaten eine Schwachstelle erkennt, auch wenn diese 70 cm überschüttet ist. Generell ist der Sinn der Schwachstellenversuche, das veränderte Verhalten des Untergrundes in diesen Bereichen festzustellen, und daraus wiederum abzuleiten, in welcher Form sich dieses auf die Messwerte auswirkt.



Abbildung 3.7: Schüttung der Schwachstelle in der ersten und zweiten Lage

### 3.2.2 Spur 5: „steifer“ Untergrund

Die Versuchsfahrten auf steifem Untergrund (Kornverteilungslinie siehe Abbildung 3.8) wurden direkt auf dem Planum der Kiesgrube durchgeführt. Der Untergrund war durch die vielen Überfahrten der LKWs und diverser Erdbaugeräte ausreichend stark verdichtet und es waren somit keine zusätzlichen Vorarbeiten notwendig. Das Versuchsfeld befand sich 4 m von Spur 4 entfernt, verlief parallel zu Spur 4 und war 40 m lang.

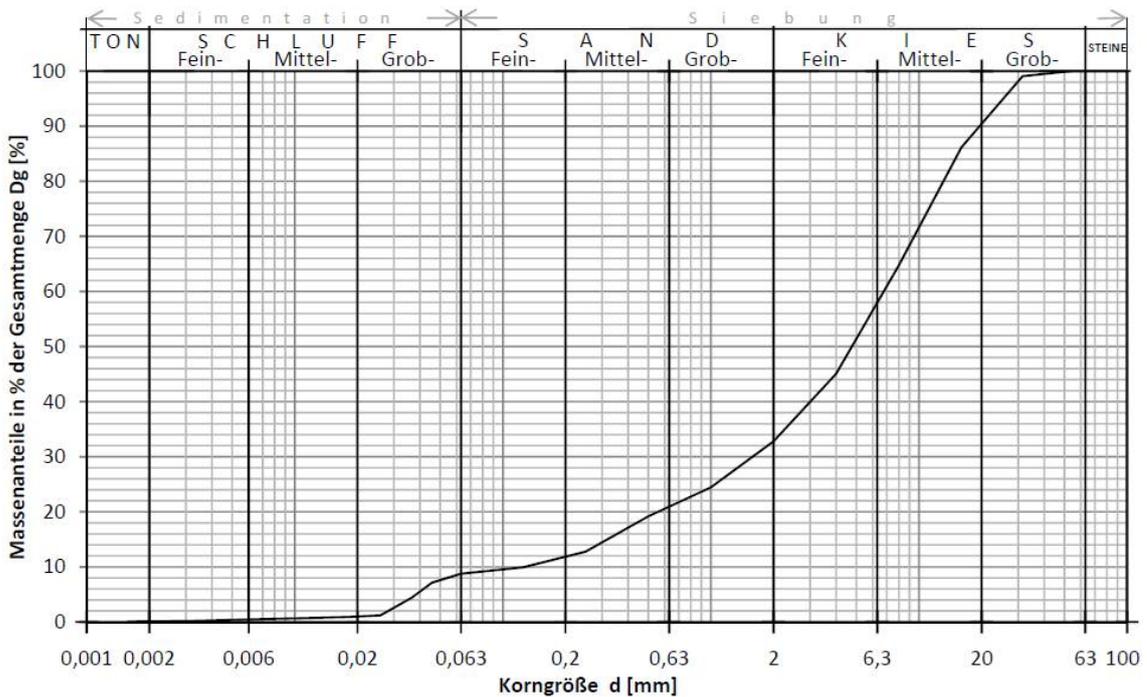


Abbildung 3.8: Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung

Durchmesser <sup>r</sup> (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 54,000$ mm	$Dg_{63} = 100,0$ %	$C_U = 53,1$ [-] Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 19,575$ mm	$Dg_{31,5} = 99,1$ %	$C_C = 2,906$ [-] Krümmungszahl
$d_{85} = 15,415$ mm	$Dg_{20} = 90,4$ %	$G = 165,60$ cm <sup>2</sup> Grobfaktor
$d_{80} = 13,111$ mm	$Dg_{16} = 86,1$ %	<b>Kornfraktionen</b>
$d_{70} = 9,484$ mm	$Dg_{6,3} = 58,0$ %	$C_o = 0,0$ % Steine
$d_{60} = 6,769$ mm	$Dg_2 = 32,8$ %	$Gr = 67,2$ % Kies
$d_{50} = 4,760$ mm	$Dg_{0,63} = 20,9$ %	$Sa = 24,0$ % Sand
$d_{40} = 3,005$ mm	$Dg_{0,2} = 11,9$ %	$Si = 8,7$ % Schluff
$d_{30} = 1,584$ mm	$Dg_{0,063} = 8,8$ %	$Cl = 0,1$ % Ton
$d_{20} = 0,556$ mm	$Dg_{0,02} = 1,0$ %	<b>Kornanteile</b>
$d_{15} = 0,318$ mm	$Dg_{0,006} = 0,5$ %	$A_{>63} = 0,0$ % Anteil mit $d > 63$ mm
$d_{10} = 0,128$ mm	$Dg_{0,002} = 0,1$ %	$A_{>2,0} = 67,2$ % Anteil mit $d > 2,0$ mm
$d_{min} = 0,000$ mm	$Dg_{0,001} = -$ %	$A_{<0,063} = 8,8$ % Anteil mit $d < 0,063$ mm

Abbildung 3.9: Kennzahlen der Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung

Der natürliche Wassergehalt  $w_n=5,3\%$  und die Korndichte  $\rho_s=2,57\text{ g/cm}^3$  wurden ebenfalls im Labor ermittelt.

#### 3.2.3 Spur 6 - 7: „weicher“ Untergrund

Die Vergleichsmessfahrten auf weichem Untergrund fanden auf bindigem, feinkornreichem Boden (Kornverteilungslinie siehe Abbildung 3.11) in einem anderen Teil der Kiesgrube statt. Das Versuchsfeld bestand aus zwei Spuren (Spur 6 und 7), zwischen denen ca. 1 m Abstand war. Die beiden Spuren waren ca. 75 m lang. Auf Spur 6 wurde mit Oszillationsbetrieb gefahren und Spur 7 wurde mit Vibration dynamisch verdichtet. Außerdem wurden neben den beiden Spuren noch zusätzliche Fahrten durchgeführt, da sich in den beiden Spuren sehr schnell Wellen im Boden (siehe Abbildung 3.10) ausgebildet hatten, die wohl einen großen Einfluss auf die Messergebnisse haben würden.



Abbildung 3.10: Spur 6-7 und die extreme Wellenbildung in diesen Spuren

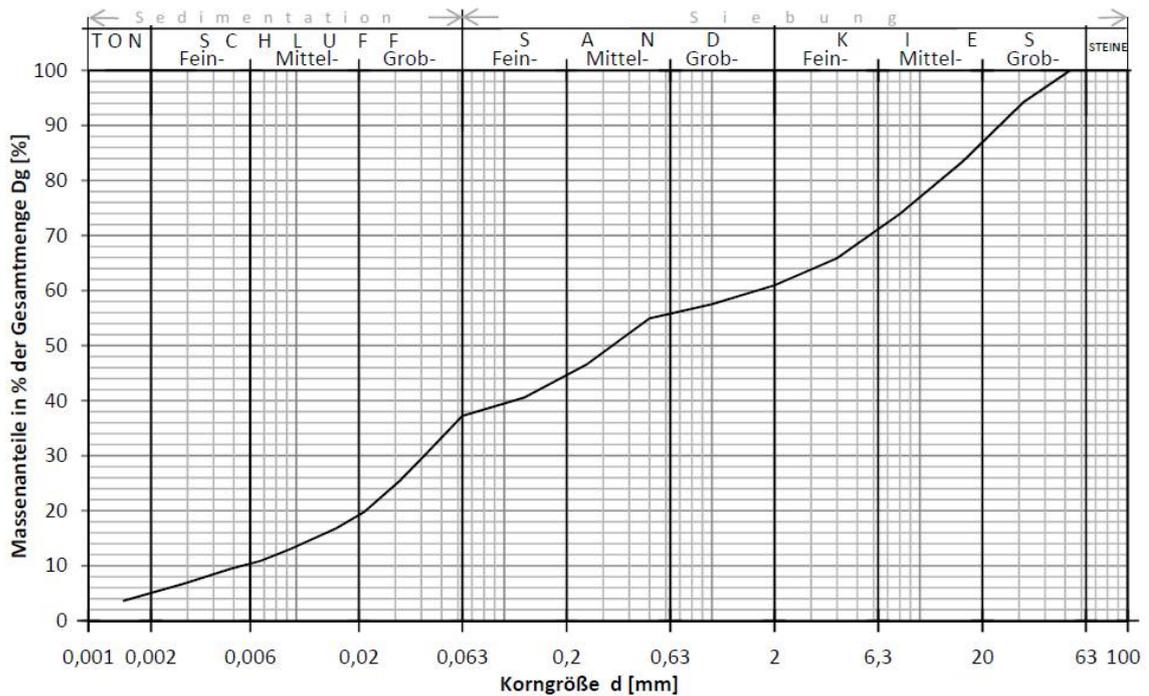


Abbildung 3.11: Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung

Durchmesser (bei Durchgang)	Durchgang (bei Durchmesser)	Kennzahlen
$d_{max} = 53,000 \text{ mm}$	$Dg_{63} = 100,0 \%$	$C_U = 299,2 \text{ [-]}$ Ungleichförmigkeitszahl
$d_{90} = 24,214 \text{ mm}$	$Dg_{31,5} = 94,2 \%$	$C_C = 0,189 \text{ [-]}$ Krümmungszahl
$d_{85} = 17,705 \text{ mm}$	$Dg_{20} = 86,9 \%$	$G = 105,90 \text{ cm}^2$ Grobfaktor
$d_{80} = 12,494 \text{ mm}$	$Dg_{16} = 83,4 \%$	<b>Kornfraktionen</b>
$d_{70} = 5,712 \text{ mm}$	$Dg_{6,3} = 71,1 \%$	$C_o = 0,0 \%$ Steine
$d_{60} = 1,648 \text{ mm}$	$Dg_2 = 61,0 \%$	$Gr = 39,0 \%$ Kies
$d_{50} = 0,332 \text{ mm}$	$Dg_{0,63} = 55,8 \%$	$Sa = 23,8 \%$ Sand
$d_{40} = 0,112 \text{ mm}$	$Dg_{0,2} = 44,6 \%$	$Si = 32,2 \%$ Schluff
$d_{30} = 0,041 \text{ mm}$	$Dg_{0,063} = 37,2 \%$	$Cl = 5,0 \%$ Ton
$d_{20} = 0,022 \text{ mm}$	$Dg_{0,02} = 19,2 \%$	<b>Kornanteile</b>
$d_{15} = 0,012 \text{ mm}$	$Dg_{0,006} = 10,4 \%$	$A_{>63} = 0,0 \%$ Anteil mit $d > 63 \text{ mm}$
$d_{10} = 0,006 \text{ mm}$	$Dg_{0,002} = 5,0 \%$	$A_{>2,0} = 39,0 \%$ Anteil mit $d > 2,0 \text{ mm}$
$d_{min} = 0,000 \text{ mm}$	$Dg_{0,001} = - \%$	$A_{<0,063} = 37,2 \%$ Anteil mit $d < 0,063 \text{ mm}$

Abbildung 3.12: Kennzahlen der Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung

Der natürliche Wassergehalt  $w_n = 7,5 \%$  und die Korndichte  $\rho_s = 2,74 \text{ g/cm}^3$  wurden ebenfalls im Labor ermittelt.

## 3.3 Walze HD+ 90 VO

Die Walze, mit der sämtliche Versuche (sowohl Grundsatzversuch als auch Großversuch) durchgeführt wurden, ist eine HD+ 90 VO der Firma HAMM AG und wurde von der Firma HAMM AG für die Versuche zur Verfügung gestellt. Die Tandemwalze trennt die beiden Bandagen durch ein Knickgelenk. Die vordere Bandage ist mit einer Vibrationserregereinheit ausgestattet, während die hintere Bandage oszillierend verdichten kann. Die dynamischen Erregereinheiten können getrennt voneinander gesteuert und nach Belieben eingesetzt werden. Je nach Wunsch kann die Walze statisch, vibrierend, oszillierend oder vibrierend und oszillierend betrieben werden.



Abbildung 3.13: Walze HD+ 90 VO der Firma HAMM AG

Das Betriebsgewicht der Walze inklusive Kabine beträgt 9,38 t, wobei die Verteilung auf die beiden Bandagen nicht ident ist: Die Achslast der Vibrationsbandage (vorne) beträgt 4,77 t und jene der Oszillationsbandage (hinten) 4,61 t. Die Bandagenbreite beträgt jeweils 1,68 m, somit ergibt sich eine statische Linienlast von 28,4 kg/cm für die Vibrationsbandage bzw. 27,4 kg/cm für die Oszillationsbandage.

Die Bandagen selbst sind Glattmantelbandagen mit einem Außendurchmesser von 1,20 m und einer Stärke von 1,7 cm. Der Achsabstand der beiden Bandagen beträgt 3,40 m, die Walze ist insgesamt 4,60 m lang, 1,80 m breit und 3,05 m hoch.

Betrieben wird die Walze mit einem Vierzylinder-Dieselmotor der Firma DEUTZ. Der Fahrtrieb erfolgt über je einen Radmotor vorne und hinten und es können während des Arbeitsvorgangs Geschwindigkeiten von 0 - 6 km/h eingestellt werden. Die Abstufung zwischen den Geschwindigkeiten erfolgt in halben km/h-Stufen.

Die Einstellungen für die Vibrations- bzw. Oszillationsbandagen können getrennt voneinander vorgenommen werden. Es kann jeweils die gewünschte Frequenz eingestellt werden und diese kann auch direkt während der Verdichtungsfahrt geändert werden. Extra für

die Versuche in Fischamend wurde die Walze von der Firma HAMM AG so programmiert, dass die Bandbreite der einstellbaren Frequenzen größer war. Ein größeres Spektrum der Walzeinstellungen konnte somit mit den Versuchen getestet und ausgewertet werden.

Bei der Amplitude kann man zwischen großer und kleiner Amplitude wählen, wobei hier der Unterschied in der Drehrichtung der Unwuchten liegt: Große Amplitude bedeutet, dass die Unwuchten sich in Fahrtrichtung bewegen, bei kleiner Amplitude bewegen sie sich gegen die Fahrtrichtung. Bei Vibrationsbetrieb beträgt die große Amplitude 0,62 mm, die kleine Amplitude 0,34 mm. Bei der Oszillation gibt es theoretisch keinen wertemäßigen Unterschied zwischen großer und kleiner Amplitude, sie beträgt jeweils 1,44 mm. Um zu überprüfen, ob bei den Messergebnissen auch kein Unterschied feststellbar ist, wurden Messfahrten mit beiden Amplituden-Einstellungen gemacht.

Weitere Informationen über die Walze HD+ 90 VO können dem Produktdatenblatt (siehe Abbildung 3.14) entnommen werden.

# HD+ 90 W / HD+ 90 VO

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

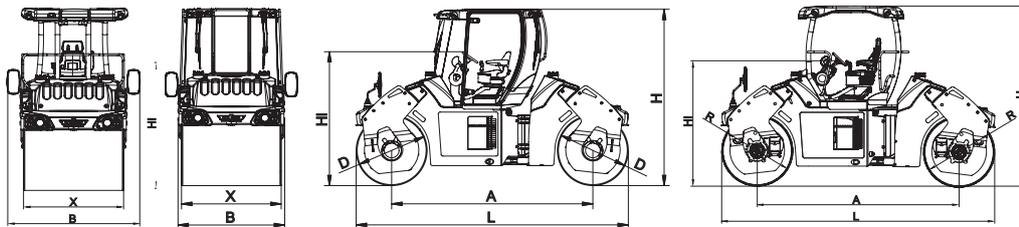


		HD+ 90 W	HD+ 90 VO
<b>Gewichte</b>			
Betriebsgewicht mit ROPS	kg	9220	9220
Betriebsgewicht mit Kabine	kg	9380	9380
Betriebsgewicht max.	kg	11900	11900
Achslast, vorn/hinten	kg	4740/4610	4770/4610
Statische Linienlast, vorn/hinten	kg/cm	28,4/27,4	28,4/27,4
Franz. Klassifizierung, Wert/Klasse		22,4/VT1	22,4/VT1
<b>Abmessungen Maschine</b>			
Maximale Arbeitsbreite	mm	1850	1850
Seitlicher Überstand, links/rechts	mm	60/60	60/60
Bordsteinfreiheit, links/rechts	mm	790/790	790/790
Bodenfreiheit, mitte	mm	330	330
Spurkreisradius, innen	mm	5250	5250
Bandagenart, vorn		glatt	glatt
Bandagenart, hinten		glatt	glatt
Bandagenstärke, vorn/hinten	mm	17/17	17/17
<b>Dieselmotor</b>			
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
Kraftstofftank, Inhalt	L	150	150
<b>Fahrertrieb</b>			
Fahrertrieb hydrost., vorn/hinten		Radmotor/Radmotor	Radmotor/Radmotor
Regelung, stufenlos		Hammtronic	Hammtronic
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
<b>Vibration</b>			
Vibrationsfrequenz, vorn, I/II	Hz	42/50	42/50
Vibrationsfrequenz, hinten, I/II	Hz	42/50	42/50
Amplitude, vorn, I/II	mm	0,62/0,34	0,62/0,34
Amplitude, hinten, I/II	mm	0,62/0,34	0,62/0,34
Zentrifugalkraft, vorn, I/II	kN	75/60	75/60
Zentrifugalkraft, hinten, I/II	kN	75/60	75/60
<b>Oszillation</b>			
Oszillationsfrequenz, hinten	Hz		39
Tangentialamplitude, hinten	mm		1,44
Oszillationskraft, hinten	kN		144
<b>Lenkung</b>			
Lenkung, Art		Knicklenkung	Knicklenkung
Lenkung, Betätigung		hydrostatisch, Lenkrad	hydrostatisch, Lenkrad
Lenkeinschlag +/-	°	30	30
Pendelwinkel +/-	°	10	10
<b>Berieselungsanlage</b>			
Wasserberieselung, Art		Druck	Druck
Betätigung, Wasserberieselung		intervall/manuell	intervall/manuell
Wassertank, Inhalt	L	834	834

**Ausstattung**  
gedeckter Fahrersitz, Schwenk- und verschiebbarer Komfortsitz, Multifunktionsfahrhebel rechts vom Sitz, Amplitude schaltbar: groß/klein, Vibration schaltbar: vorne/hinten/doppelt, Kontrollleuchten und Notstopp, Batterie Hauptschalter, Dreifach-Ölfilterung, Wasserstandsanzeige, Geschwindigkeitsmesser, 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, Schallsolisierung, 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	1800	1800
Gesamthöhe	H	3050	3050
Achsabstand	A	3400	3400
Bandagenbreite	X	1680/1680	1680/1680
Bandagendurchmesser	D	1200/1200	1200/1200
Höhe Verladung, Minim.	HI	2185	2185



HAMM AG • Hammstrasse 1 • D-95643 Tirschenreuth • Tel. +49 (0) 9631 80-0 • Fax +49 (0) 9631 80-111 • www.hamm.de

HD+ 90 W/VO 03.14.21.47.693 de-DE V8 - Weitere Daten auf Anfrage / Änderungen vorbehalten

Abbildung 3.14: Produktdatenblatt der HD+ 90 VO der Firma HAMM AG [10]

## 3.4 Messausrüstung und Ausstattung

Die Messausrüstung ist besonders wichtig. Im Vorfeld muss überlegt werden, welche Daten für die Bearbeitung der Aufgabenstellung benötigt werden und wie man am besten an diese gelangt. Dementsprechend muss die Messtechnik geplant und eingebaut werden.

Beim Großversuch hatte man den Vorteil, dass bereits zuvor ähnliche Versuche im Zuge des Grundsatzversuches durchgeführt worden waren. Dadurch waren die relevanten Überlegungen schon zuvor angestellt worden, und man konnte sich konkret um die Detailplanung kümmern.

### 3.4.1 Walze

Zu den standardmäßigen Installationen (FDVK, GPS) auf der Walze wurden zusätzlich noch folgende Sensoren eingebaut:

- Beschleunigungsaufnehmer: Es wurden eindimensionale Aufnehmer auf der Bandage direkt montiert (siehe Abbildung 3.15), damit wurden rotierende Messungen vorgenommen. Außerdem wurden auch rein translatorische Messungen (Lage der Beschleunigungsaufnehmer siehe Abbildung 3.16) durchgeführt, hierfür waren die Aufnehmer auf dem Rahmen bzw. auf den Lagerschalen der Bandagen montiert. Die Sensoren wurden sowohl auf der Oszillations- als auch auf der Vibrationsbandage angebracht. Unterschieden haben sie sich in ihrer Messbandbreite:  $\pm 10$  g bzw.  $\pm 30$  g (Anmerkung: g steht für die Erdbeschleunigung). Der Messbereich bei  $\pm 30$  g ist größer, jedoch ist die Genauigkeit des  $\pm 30$  g Sensors geringer.

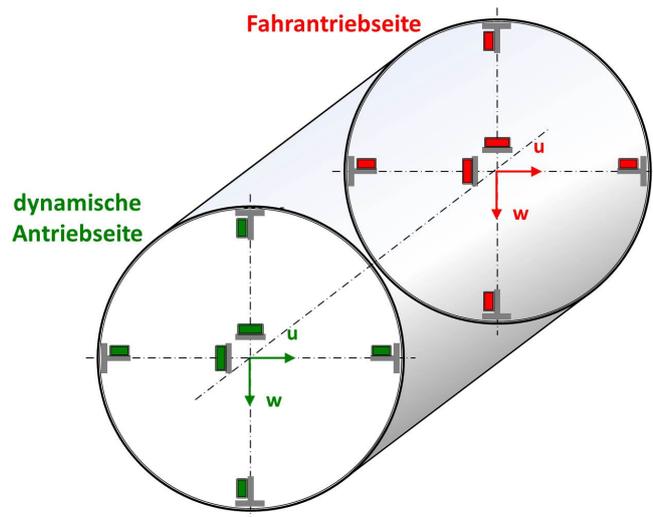


Abbildung 3.15: Rotierendes Messsystem Oszillationsbandage [15, bearbeitet]

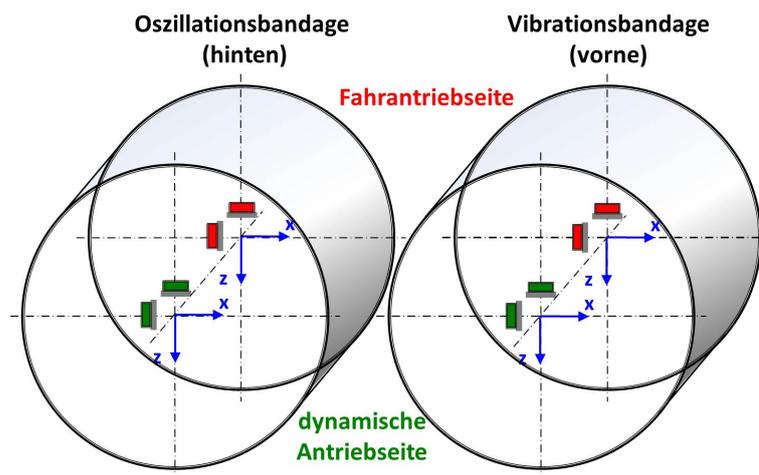


Abbildung 3.16: Translatorisches Messsystem Walze [15, bearbeitet]

- Potentiometer: Vier Potentiometer wurden auf die Oszillationsbandage montiert (siehe Abbildung 3.17) und mit einer Speisespannung versorgt. Bei Kontakt mit dem Boden bzw. dem zusätzlich montierten Referenzrad (siehe Abbildung 3.18) wurde der bewegliche Teil des Potentiometers in den feststehenden Teil gedrückt und somit eine Spannungsänderung bewirkt, wie in den Messdaten erkennbar ist. Durch die Potentiometer kann im Weiteren die Kontaktlänge zwischen Walzenmantel und Untergrund bestimmt werden.

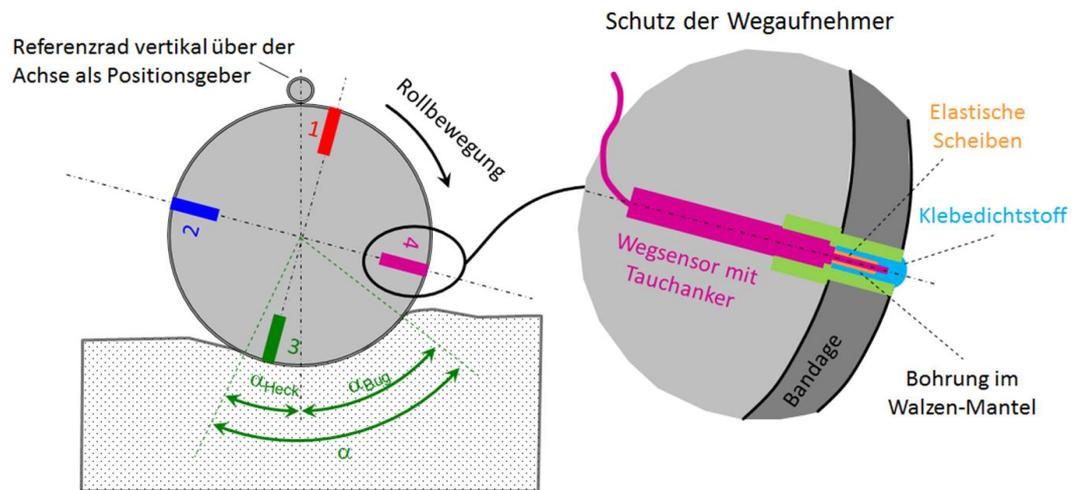


Abbildung 3.17: Skizze Potentiometer [15]



Abbildung 3.18: Referenzrad zur Bestimmung der Asymmetrie

#### 3.4.2 Spur 1 - 4

Bei den Versuchen auf sandigem Kies wurden nur in Spur 2 Messensoren eingebaut:

- Beschleunigungsaufnehmer (Kinematics EpiSensor FBA32): Damit konnten Bodenbeschleunigungen in den drei Raumrichtungen x, y und z aufgezeichnet werden. Der Sensor wurde genau in der Mitte der Oszillationsspur auf der Ebene des Planums eingebaut (siehe Abbildungen 3.20, 3.23 und 3.24). Beim Einbau musste auf die Lagerichtigkeit geachtet werden: die positive x-Achse zeigt in Fahrtrichtung, die positive y-Achse zeigt orthogonal dazu (in Richtung Spur 3), die positive z-Achse zeigt in Richtung Erdmittelpunkt. Zwei weitere, weniger sensible Beschleunigungsaufnehmer wurden oberflächennah jeweils in der ersten und zweiten Schüttlage eingebaut. Die Sensoren lagen jeweils

direkt übereinander und es konnten somit mehrere Messungen in unterschiedlichen Tiefen aufgezeichnet werden.

- Druckmessdosen (GEOKON 3500-2-100): Die ausgeübten Drücke der Walze auf den Boden konnten mit Hilfe der dynamischen Erddruckmessdosen gemessen werden. Eingebaut wurden die Druckmessdosen im Planum, etwa in der Mitte der Spur 2, genaue Lage siehe Abbildung 3.23 (siehe Abbildungen 3.20, 3.23 und 3.24).
- Setzungsmessgerät: Zwei eigens hergestellte Setzungsmessgeräte, die bereits für ähnlich gelagerte Versuche 1995 entwickelt worden waren [1] (siehe Abbildungen 3.19, 3.21, 3.23 und 3.24), wurden in zwei Metern Entfernung von der Mitte in Richtung Prüffeldanfang eingegraben. Nach der Schüttung der ersten Lage wurde eines der beiden Messgeräte auf die Oberkante der Schüttung verlängert. Das zweite war ausgefallen und somit nicht weiter zu verwenden. Die Differenzverformungen „Setzungen“ zwischen Planum und Oberfläche der ersten Schüttlage wurden gemessen und aufgezeichnet. Nach den Versuchen auf dieser Lage wurde die zweite Lage geschüttet und das Setzungsmessgerät erneut bis an die Oberfläche der Schüttung verlängert. Bei den darauffolgenden Versuchsüberfahrten konnten die Setzungen ebenfalls gemessen werden.

Ursprünglich war geplant, ein Setzungsmessgerät auf der Höhe der ersten Lage zu belassen und ein anderes bis zur Endhöhe der zweiten Lage zu verlängern, doch durch den Ausfall des einen Gerätes war dies nicht möglich.

Die eigens hergestellten Setzungsmessgeräte funktionieren über einen induktiven Wegaufnehmer, die die aufgezeichneten Daten über ein Kabel anschließend an einen Computer weiterleiten. Die Platte an der Oberfläche wird bei einer Walzenüberfahrt hinuntergedrückt, dadurch bewegt sich der mit Draht verbundene Kolben ebenfalls nach unten und der Fühler des Wegaufnehmers wird bewegt und die vertikale Verschiebung gemessen. Der Kolben ist noch zusätzlich durch eine Führung gegen Verdrehen gesichert.

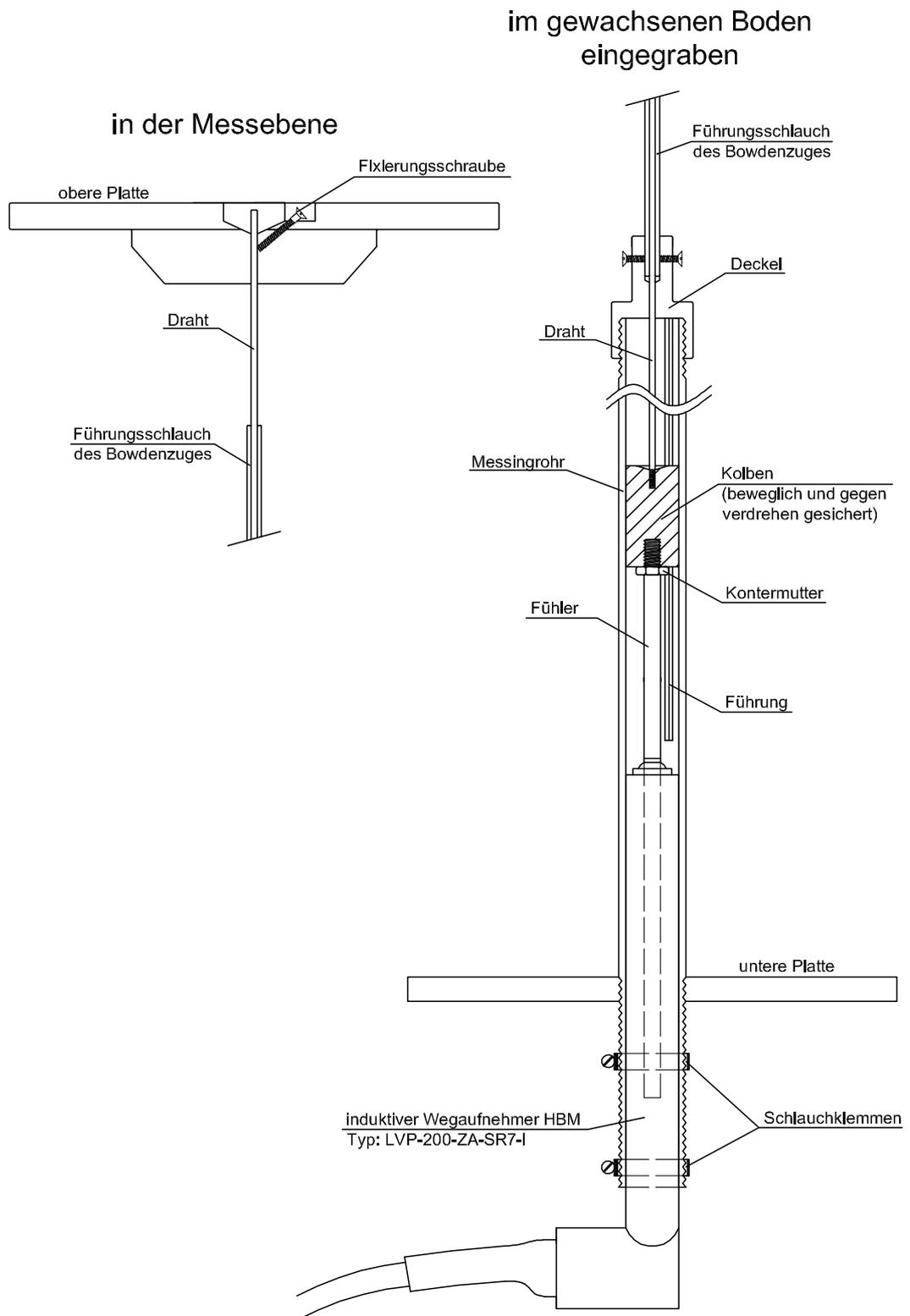


Abbildung 3.19: Skizze des Setzungsmessgerätes [13, bearbeitet]

Zwar wurden diese Messgeräte nur in einer Spur eingebaut, jedoch ließen sich mit ihnen auch Aufzeichnungen bei Überfahrten auf den anderen Spuren (Spur 1, 3 und 4) durchführen, wobei die Ergebnisse jedoch nicht so aussagekräftig sind wie bei Spur 2.



Abbildung 3.20: Druckmessdose, Beschleunigungsaufnehmer



Abbildung 3.21: Setzungsmessgerät während des Einbaus und in Endlage

Zusätzlich zu diesen Messungen wurden auch Messungen zur Erschütterungsausbreitung durchgeführt. Hierfür wurden Beschleunigungsaufnehmer orthogonal zum Versuchsfeld in unterschiedlichen Abständen (siehe Abbildung 3.22, 3.23 und 3.24) aufgestellt. Die Sensoren konnten ebenfalls die Beschleunigungen in drei Richtungen aufnehmen, dafür war eine raumgetreue Positionierung bezüglich der Achsen wichtig. Durch Überfahrten auf den Spuren 1 - 4 konnte man die Beschleunigungsausbreitung an der Bodenoberfläche mittels der aufgestellten Messgeräte aufzeichnen.



Abbildung 3.22: Messungen zur Erschütterungsausbreitung mit den entlang einer Linie aufgestellten Beschleunigungssensoren

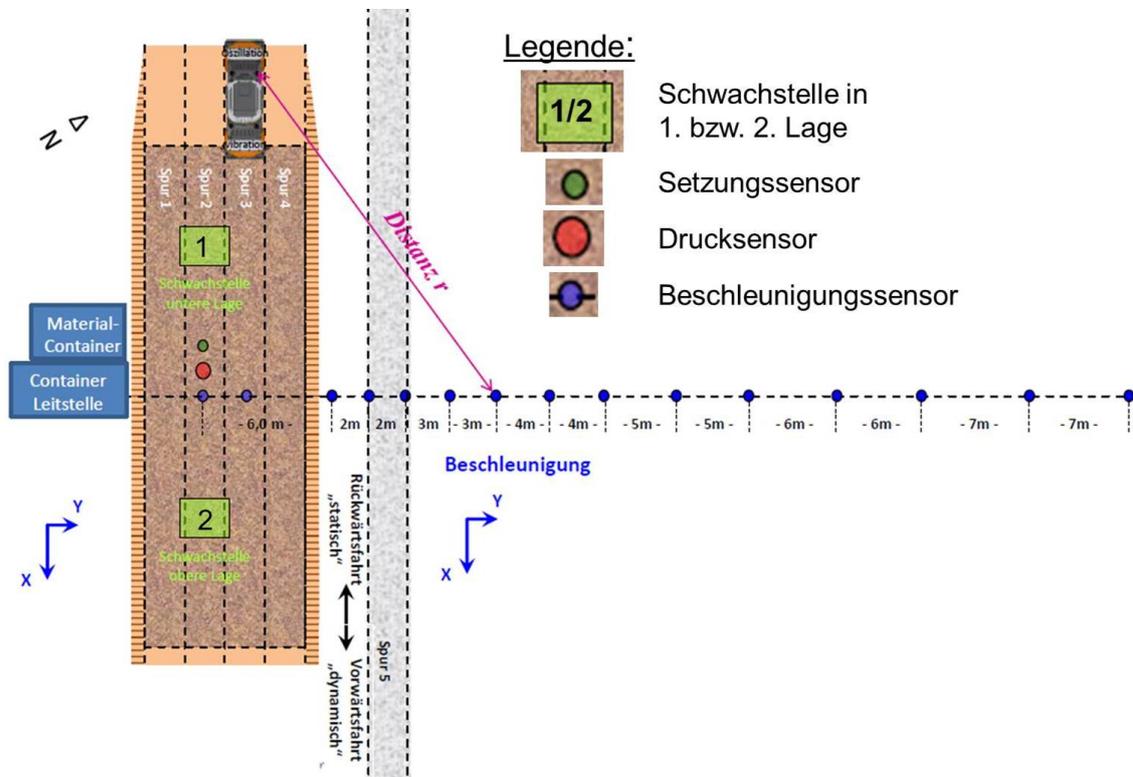


Abbildung 3.23: Skizze Lage Spur 1 - 5 mit Messsensoren und Schwachstellen [15, bearbeitet]

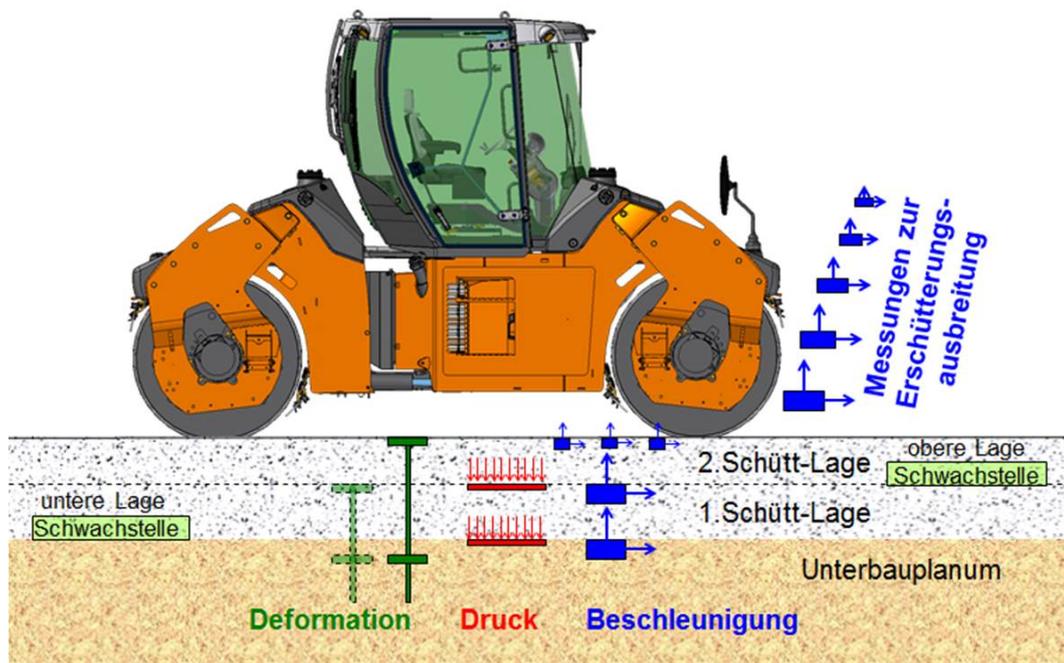


Abbildung 3.24: Skizze Schnitt der Spur 2 mit Messsensoren und Schwachstellen [15, bearbeitet]

#### 3.4.3 Spur 5

Für die Messfahrten auf dem steifen Planum wurden keine zusätzlichen Sensoren in den Untergrund eingebaut, da es sich dabei nur um Vergleichsfahrten handelte.

#### 3.4.4 Spur 6 - 7

In den Spuren 6 bzw. 7 wurden zusätzlich je zwei Beschleunigungsaufnehmer knapp unter der Oberfläche eingebaut. Diese Sensoren können, wie auch jene in Spur 2, Beschleunigungen in drei Richtungen aufzeichnen. Weil die Spuren 6 und 7 nur zu Vergleichszwecken befahren wurden, erschien es nicht sinnvoll, weitere Sensoren mit großem Aufwand einzubauen.

### 3.5 Versuche

Der Großversuch in Fischamend fand im April 2014 statt. Insgesamt waren 3-4 Wochen eingeplant worden, doch die Überfahrten auf den Testfeldern konnten schlussendlich

innerhalb von fünf Tagen durchgeführt werden. Derart groß angelegte Versuche sollten immer großzügiger kalkuliert werden, da Walzenversuche aufgrund der Messensorik nur bei schönem Wetter stattfinden sollten. Außerdem sind alleine schon der Versuchsaufbau und die ganze Einrichtung sehr zeitaufwändig. Weiters können immer unerwartete Probleme (siehe dafür Kapitel 3.5.3) auftreten. Die gute Vorbereitung, die Erfahrung aus dem Grundsatzversuch und günstige Witterungsverhältnisse führten schließlich dazu, dass die Versuche in nur wenigen Tagen durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen werden konnten.

#### **3.5.1 Versuchsdurchführung**

Anfangs wurde das Testfeld auf dem vorhandenen und nicht ganz ebenen Unterbauplanum abgesteckt, die Messgeräte wurden in den Untergrund eingebaut (siehe Kapitel 3.4.2) und die Matratzen für die künstlichen Schwachstellen positioniert. Daraufhin konnte die erste Lage geschüttet und die Spuren markiert werden.

Nachdem alle Sensoren angeschlossen und getestet worden waren, konnte mit den Walzüberfahrten begonnen werden. Wichtig war dabei, vor und nach jeder Versuchsreihe einen Latenzzeittest durchzuführen, um später die Zeitdifferenz zwischen den Daten des translatorischen Messsystems und des rotatorischen Messsystems, das direkt auf der Bandage befestigt war und durch die Telemetrie übertragen wurde, eliminieren zu können.

Die Spuren wurden in folgender Reihenfolge befahren: Spur 1, Spur 2, Spur 4 und Spur 3 zum Schluss. Auf jeder Spur erfolgten mehrere Überfahrten, wobei bei der Oszillationsverdichtung (Spur 2) das Versuchsprogramm hinsichtlich Anzahl der Überfahrten und verschiedenen Einstellungen am größten war. Jede Spur hatte ihr eigenes Versuchsprogramm, wobei die Einstellungen von Frequenz, Amplitude und Geschwindigkeit variiert wurden. Zu jeder Einstellung gab es eine Überfahrt und eine anschließende Wiederholungsfahrt, bei der die eingestellten Parameter gleich blieben.

Die Geschwindigkeit wurden zwischen 2, 4 und 6 km/h variiert. Bei der Amplitude gab es nur die Unterscheidung zwischen großer und kleiner Amplitude. Im Oszillationsbetrieb wurde mit 20, 39 und 60 Hertz und im Vibrationsbetrieb mit 30, 40, 50 und 60 Hertz verdichtet.

Die Standardeinstellung der Oszillationsverdichtung waren: kleine Amplitude, 39 Hertz und 4 km/h.

Bei den Überfahrten mit Vibration wurde standardmäßig einerseits bei großer Amplitude

mit 40 Hertz und 4 km/h und andererseits bei kleiner Amplitude mit 50 Hertz und ebenfalls 4 km/h gefahren.

Die Standardeinstellungen sind die Empfehlungen der Walzenherstellungsfirma HAMM AG. Nachdem alle vier Spuren verdichtet worden waren, wurden die zweite Lage geschüttet, die Sensoren eingebaut bzw. verlängert und die Bahnen des Testfeldes erneut abgesteckt. Ein weiteres Versuchsprogramm wurde auf jeder Spur durchgeführt, die Messdaten wurden aufgezeichnet und gespeichert.

Grundsätzlich wurde versucht, die Messfahrten der vier Spuren an einem Tag durchzuführen, damit die Bodenverhältnisse annähernd gleich waren und somit die Messergebnisse vergleichbar sind, leider hat dies aus Gründen der Witterung nicht immer funktioniert.

Bei jeder Überfahrt, auf der ersten und zweiten Lage, wurden drei Videos aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen, um die Fahrgeschwindigkeit der Bandagen gegenüber dem Boden später in Zeitlupe betrachten zu können. Es wurde dadurch auch die Veränderung des Reaktionsverhaltens des Bodens mit zunehmender Anzahl der Überfahrten und damit in Abhängigkeit vom Verdichtungszuwachs aufgezeichnet. Die drei Aufnahmewinkel der Kameras wurden folgendermaßen gewählt:

- Von einem Stativ auf dem Boden wurde die Walze von der Seite gefilmt. Beachtet wurde, dass die Kamera dynamisch entkoppelt ist und somit nicht die Bodenbewegungen mitmacht.
- Die zweite Kamera war direkt über eine Konstruktion an der Walze angebracht und hat die Situation von oben gefilmt.
- Neben der Walze ist immer eine Person mitgegangen und hat die Bewegungen mit der Handkamera aufgenommen.



Abbildung 3.25: Aufnahmen mit drei Kameras

Während der Messfahrten auf den vier Spuren wurden auch Messungen zur Erschütterungsausbreitung vorgenommen. Die Beschleunigungsaufnehmer dafür (siehe Kapitel 3.4.2) wurden zuvor aufgestellt und anschließend die Spuren befahren. Dabei wurden weiterhin auch alle Messdaten der anderen Sensoren gespeichert.

Vor der ersten und nach jeder bzw. teilweise nach jeder zweiten Walzenüberfahrt wurde mit der dynamischen Lastplatte (Versuchsdurchführung siehe Kapitel 2.5.2.2) der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  ermittelt. Der Aufstellungsort der Lastplatte variierte immer etwas, es wurde nicht immer dieselbe Stelle geprüft und man erhielt so ein breiteres und zuverlässigeres Ergebnisspektrum. Zudem wurden auf der Spur 2 auch die Bodenverhältnisse über den Schwachstellen regelmäßig mit dem Leichten Fallgewicht getestet.

Beim Nivellieren der Spur verhielt es sich ähnlich wie bei den Lastplattenversuchen, es wurde nach jeder bzw. nach jeder zweiten Überfahrt gemessen, jedoch dabei immer an derselben Stelle, um höhenmäßige Veränderungen dokumentieren zu können. Auch die Höhe der künstlichen Schwachstellen wurden regelmäßig mit dem Theodoliten aufgenommen. Um ein relatives Höhenmaß, auch bei erneutem Aufstellen des Theodoliten, zu bekommen, wurde immer ein Fixpunkt mit aufgenommen. Dieser Fixpunkt befand sich außerhalb des Testfeldes.

Drei Bodenproben für Laboruntersuchungen wurden in jeder Lage entnommen.

Die Dichte des durch die Walzenüberfahrten verdichteten Prüffelds wurde in Spur 2 mittels Sandersatzverfahren (dieses wurde bereits im Kapitel 2.5.1.3 genauer beschrieben) ermittelt. Drei Versuche wurden in der ersten Lage und drei weitere in der zweiten Lage, jeweils nach den Walzübergängen, durchgeführt (siehe Abbildung 3.26 bzw. Ergebnisse siehe Abbildung 3.27).



Abbildung 3.26: Durchführung des Sandersatzverfahrens

	$m_f$ [kg]	$m_d$ [kg]	$m_w$ [kg]	$w_N$ [%]	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]
Schüttlage 1-1	3,455	3,450	0,070	2,0%	2,08
Schüttlage 1-2	4,634	4,564	0,076	1,7%	2,21
Schüttlage 1-3	2,647	2,867	0,053	1,8%	1,96
Schüttlage 2-1	4,229	4,126	0,095	2,3%	2,11
Schüttlage 2-2	3,500	3,410	0,110	3,2%	2,01
Schüttlage 2-3	4,217	4,124	0,116	2,8%	2,11

Abbildung 3.27: Ergebnisse des Sandersatzverfahrens

Die Testfahrten auf dem steifen Planum, der Spur 5, waren nur Vergleichsfahrten, es wurden auch keine Lastplattenversuche nach den Überfahrten gemacht. Das Planum war schon so gut verdichtet, dass mit der verwendeten Walze kein weiterer Verdichtungszuwachs erzielt werden konnte.

Bei den Versuchen auf weichem Planum konnte ein Bereich der Kiesgrube verwendet werden, in dem feinkörniger Boden vorhanden war und noch kaum Überfahrten mit Baugeräten stattgefunden hatten. Die Spur wurde markiert und die Beschleunigungsmesser wurden oberflächennahe eingebaut. Bei den darauffolgenden Oszillationsüberfahrten auf Spur 6 wurde sehr bald eine Wellenbildung des zuvor ebenen Versuchsfeldes erkennbar, weshalb die weiteren Überfahrten eine starke zusätzliche Belastung für Walze und Fahrer bedeuteten. Deswegen wurden die Vibrationsversuche anschließend auf einer neuen Spur, Spur 7, durchgeführt. Es kam erneut zur Wellenbildung. Bei der Auswertung der aufgezeichneten Messwerte musste dies berücksichtigt werden. Des Weiteren wurde bei den dynamischen Lastplattenversuchen eine Verringerung des dynamischen Verformungsmoduls bei zunehmender Anzahl der Walzüberfahrten festgestellt. Dies lässt sich auf die steigenden Porenwasserüberdrücke des bindigen Bodens zurückführen. Diesem Phänomen hätte man entgegenwirken können, indem man zwischen den Versuchen so lange wartet, bis sich die Überdrücke abgebaut haben. Zur Untersuchung des Bodens im Labor wurden Bodenproben entnommen, die Ergebnisse wurden im Kapitel 3.2 dargestellt.

Sowohl bei den Versuchen auf steifem als auch auf weichem Untergrund wurden bei jeder Überfahrt ebenfalls Videoaufnahmen mit den drei Kameras gemacht. Dies war besonders wichtig, um bei der späteren Betrachtung das unterschiedliche Verhalten von Walze und Boden, je nach Bodenart und Verdichtungsgrad, analysieren zu können.

#### 3.5.2 Dokumentation

Die Dokumentation ist bei so groß angelegten Versuchen von großer Bedeutung. Für jeden Versuchstag wurde ein eigenes Protokoll erstellt, in dem festgehalten wurde, wann und mit welchen Einstellungen (Verdichtungsart, Frequenz, Amplitude, Geschwindigkeit) jede Spur befahren wurde. Besondere Vorkommnisse, Sensoren- und Kameraausfälle oder sonstige technische Probleme wurden ebenfalls vermerkt. In die Protokolle wurden auch die Ergebnisse der Lastplattenversuche und die Höhen der Nivellements aufgezeichnet. Dadurch waren alle relevanten Informationen kompakt in einer Datei zusammengefasst. Die relevanten Informationen dieser Protokolle sind in den Tabellen im Anhang A und B zusammengefasst.

Besonders für die Auswertung der Messdaten ist solch ein Protokoll sehr wichtig. Somit ist immer klar, welche Messdatei zu welcher Überfahrt mit welchen Einstellungen gehört und warum gewisse Sensoren für bestimmte Walzenfahrten keine Messergebnisse geliefert haben. Ohne Dokumentation wäre die Auswertung chaotisch und würde leicht zu Verwechslungen und dadurch eventuell zu falschen Erkenntnissen führen.

Auch die Dokumentation mittels Fotos oder Videoaufnahmen kann spätere Unklarheiten klären helfen und eine Nachvollziehbarkeit der Versuchsdurchführung zu einem späteren Zeitpunkt gewährleisten.

#### 3.5.3 Auftretende Probleme

Auch wenn Versuche im Vorfeld gut durchdacht und organisiert werden, kann es immer zu kleineren oder größeren unerwarteten Problemen kommen. Dies gehört zum Wesen von Forschung und Entwicklung! An einer raschen Lösungsentwicklung und -entscheidung sind alle Beteiligten interessiert, damit das Problem zu keinem großen Zeitverlust führt.

Im Folgenden werden die aufgetretenen Probleme des Großversuchs in Fischamend und ihre jeweilige Lösung kurz beschrieben:

Wie bereits im Kapitel 3.4.2 beschrieben wurde, fiel eines der beiden Setzungsmessgeräte aus und konnte nicht aktiviert werden. Eine mechanische Verklemmung war wahrscheinlich der Grund dafür. Ein Ausbau mit anschließender Reparatur hätte zu lange gedauert und deswegen wurde entschieden, die Zeit besser für Versuchsfahrten zu nutzen und auf die zusätzliche Setzungsmessung zu verzichten. So wurden Setzungsmessungen nur mit einem Gerät ausgeführt.

Der plötzliche Ausfall des Aggregates, kurz vor dem Start der Versuche, als bereits alle Sensoren getestet und bereit waren, führte zu einer Verzögerung und konnte durch die Beschaffung eines neuen Gerätes aus einem Baumarkt behoben werden.

Auch das Wetter ist ein Faktor, der im Vorfeld nicht präzise geplant werden kann. So wurden die Versuche wegen schlechten Wetters gleich am ersten Tag um eine Woche verschoben. Auch an zwei weiteren Tagen hat das Wetter zu einer Reduktion des Versuchsprogramms und zum Versuchsabbruch vor Fertigstellung aller vier Spuren geführt. Idealerweise hätten alle vier Spuren an einem Tag verdichtet werden sollen, damit die Bodenbedingungen identisch und somit gut vergleichbar sind.

Ein weiteres Problem war der häufige Ausfall von Messsensoren auf der Walze. Es wurde festgestellt, dass die Telemetrie genau bei 39 Hertz (Standardfrequenz bei Oszillationsbetrieb) eine große Eigenschwingung entwickelte. Dieses Problem wurde durch Erhöhung des Eigengewichtes der Telemetrie durch ein zusätzliches Gewicht von 1,25 kg gelöst. Bei der Frequenz von 39 Hertz wurde demnach genau die Eigenfrequenz bzw. Eigenkreisfrequenz des Systems erreicht, wodurch es zu zusätzlichen Schwingungen kam. Durch Erhöhung der Masse  $m$  wurde die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  kleiner, wodurch keine Eigenschwingungen bei 39 Hertz auftraten (vergleiche Formel 3.1 und 3.2).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.1)$$

$$f = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi} \quad (3.2)$$

mit:

- $\omega_0$  Eigenkreisfrequenz [rad/s]
- $k$  Federsteifigkeit des Systems [kg/s<sup>2</sup>]
- $m$  Masse des Systems [1]
- $f$  Frequenz [Hz=1/s]

Eine Problemlösung erfordert immer Kreativität und Kompromisse, es muss schnell reagiert werden und man muss sich im Vorfeld darüber klar sein, dass kein Versuch genau wie geplant abläuft.

Zusammenfassend verliefen die Versuche jedoch überaus positiv, was einerseits dem sehr erfahrenen Personal der TU Wien und von VCE und andererseits der hohen Qualität der Messtechnik und der gründlichen Planung zu verdanken war.

# 4 Formelgrundlagen für die Auswertung

In diesem Kapitel werden jene Formeln und Theorien kurz beschrieben, die für die weitere Versuchsauswertung der erhaltenen Messdaten des Großversuches nötig sind. Die genaue Beschreibung der Auswertung und die Darstellung der Ergebnisse erfolgt im Kapitel 5.

Die Theorie der Hert'schen Pressung und die Umrechnung von Elastizitätsmodul in dynamischen Verformungsmodul wird beschrieben. Außerdem wird auf die Querdehnzahl eingegangen und die Annahme für die weiteren Auswertungen erläutert.

## 4.1 Hertz'sche Pressung

Werden zwei gekrümmte Körper gegeneinander gepresst, so entsteht eine kreis-, ellipsen- oder rechteckförmige Berührungsfläche. Die hierbei auftretenden Spannungen und die Aufstandsbreite der Berührfläche können mit den Hertz'schen Gleichungen ermittelt werden.

Für die spätere Auswertung werden diese Formeln als Grundlage dienen, da bei bekannter Druckkraft, Aufstandsbreite und Geometrie eine Rückrechnung auf den vorhandenen Elastizitätsmodul möglich ist (siehe Kapitel 5.1).

Voraussetzungen für die Anwendung der Theorie nach Hertz [6, 12] sind:

- Die Werkstoffe der beiden Körper verhalten sich linear-elastisch, homogen und isotrop. Das Hooke'sche Gesetz  $\sigma = E \cdot \varepsilon$  ist somit gültig.
- Die elastischen Verformungen der Körper sind klein gegenüber ihren Abmessungen.
- In der Berührungsfläche treten nur Normalspannungen und keine Schubspannungen (Reibung) auf.

Diese Voraussetzungen werden in praktischen Fällen kaum alle gleichzeitig erfüllt, jedoch liefern die Hertz'schen Gleichungen brauchbare Näherungen für die Aufstandsweite der Berührfläche bzw. für den maximalen Druck in der Mitte der Berührfläche [29].

Aus den allgemeinen Hertz'schen Gleichungen lassen sich Formeln für Pressungen zwischen unterschiedlich gekrümmten Körpern ableiten. Für die Versuchsauswertung werden jene für die Pressung zwischen Zylinder und Ebene benötigt, wobei der Zylinder die Walze und die Ebene das ebene Versuchsfeld darstellt.

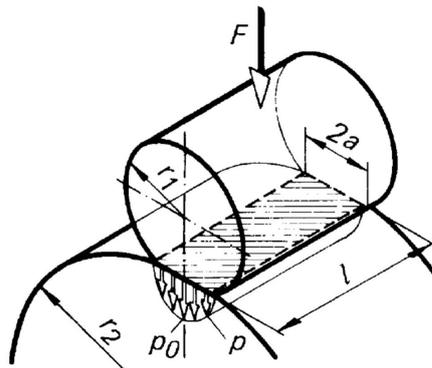


Abbildung 4.1: Flächenpressung Zylinder-Zylinder [6]

Für den Fall Pressung zwischen Zylinder und Ebene können die Gleichungen des Falles Zylinder-Zylinder mit  $r_2 = \infty$  herangezogen werden und ergeben sich somit wie folgt:

$$a = \sqrt{\frac{8 \cdot (1 - \nu^2) \cdot F \cdot r}{\pi \cdot E \cdot l}} \quad (4.1)$$

$$p_{max} = p_0 = \sqrt{\frac{F \cdot E}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l \cdot (1 - \nu^2)}} \quad (4.2)$$

mit:

$a$	Halbe Aufstandsweite [m]
$F$	Druckkraft zwischen den beiden Körpern [kN]
$\nu$	Querdehnzahl [1]
$r$	Krümmungsradius [m]
$E$	Elastizitätsmodul [kN/m <sup>2</sup> ]
$l$	Länge des Zylinders [m]
$p_{max} = p_0$	Maximaler Druck in der Mitte der Berührfläche [kN/m <sup>2</sup> ]

Die Gleichungen 4.1 und 4.2 gelten für Körper aus gleichen Werkstoffen. Werden unterschiedliche Werkstoffe mit verschiedenen Materialeigenschaften verwendet, so muss man die Gleichungen entsprechend anpassen. Dafür gibt es in der Literatur unterschiedliche Ansätze. Die Anpassung erfolgt entweder mit Gleichung 4.3 [6] oder 4.4 [29]. Da bei den durchgeführten Versuchen (siehe Kapitel 3) angenommen wird, dass die Walze einen unendlichen Elastizitätsmodul hat, ist  $E_1 = \infty$ . Somit ergibt sich  $E = 2 \cdot E_2$ , wobei  $E_2$  der Elastizitätsmodul des Bodens ist.

$$E = \frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2}{(E_1 + E_2)} \quad (4.3)$$

$$\frac{(1 - \nu^2)}{E} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \right) \quad (4.4)$$

Der Krümmungsradius  $r$  lässt sich im Allgemeinen durch Gleichung 4.5 berechnen, wobei  $r_1$  der Radius des Zylinders und  $r_2$  jener der Ebene und somit unendlich ist. Daraus folgt  $r = r_1$ .

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2} \quad (4.5)$$

Die Gleichungen 4.1 und 4.2 können für  $\nu = 0,214$  noch vereinfacht werden und ergeben somit die Gleichungen 4.6 und 4.7. Der Ansatz der Querdehnzahl mit  $\nu = 0,214$  wird im Kapitel 4.3 genauer erläutert.

$$a = 1,55 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot r}{E \cdot l}} = 1,55 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot r}{2 \cdot E_2 \cdot l}} = 1,10 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot r}{E_2 \cdot l}} \quad (4.6)$$

$$p_{max} = p_0 = 0,408 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot E}{r \cdot l}} = 0,578 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot E_2}{r \cdot l}} \quad (4.7)$$

## 4.2 Elastizitätsmodul - Verformungsmodul

Die Umrechnung zwischen dem Elastizitätsmodul und dem Verformungsmodul des Bodens spielt in weiterer Folge eine Rolle und wird deshalb vorab beschrieben. Eine Umrechnung wird bei der Versuchsauswertung im Kapitel 5 wichtig sein, damit die errechneten Elastizitätsmoduln mit den gemessenen dynamischen Verformungsmoduln der dynamischen Lastplatte verglichen werden können.

Der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  wird durch den Versuch mit der dynamischen Lastplatte, wie bereits im Kapitel 2.5.2.2 beschrieben, ermittelt. Die theoretische Herleitung wurde in Formel 2.5 erläutert.

Der Elastizitätsmodul  $E$  eines Bodens wird mit dem einaxialen Zylinderdruckversuch mit unbehinderter Seitendehnung im Labor ermittelt. Der Modul steht in folgendem Zusammenhang mit der aufgebrachten Spannung  $\sigma$  und der resultierenden Dehnung  $\varepsilon$  [3]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4.8)$$

Die Umrechnung zwischen den beiden Moduln erfolgt nach Gleichung 4.9 [3].

$$E_{vd} = \frac{3}{\pi \cdot (1 - \nu^2)} \cdot E \quad (4.9)$$

mit:

- $E$     Elastizitätsmodul [kN/m<sup>2</sup>]
- $E_{vd}$  dynamischer Verformungsmodul [kN/mm<sup>2</sup>]
- $\nu$     Querdehnzahl [1]

Für die für die Auswertung angenommene Querdehnzahl von  $\nu = 0,214$  (siehe Kapitel 4.3) ergibt sich folgender Zusammenhang aus Gleichung 4.9:

$$E_{vd} = E \quad (4.10)$$

### 4.3 Querdehnzahl $\nu$

Die Querdehnzahl  $\nu$  gibt das Verhältnis zwischen Querdehnung  $\varepsilon_q$  und Längsdehnung  $\varepsilon$  an. Sie ist somit ein Maß für die Kompressibilität eines Materials [3].

$$\nu = -\frac{\varepsilon_q}{\varepsilon} \quad (4.11)$$

Für elastische Stoffe bewegt sich die Querdehnzahl innerhalb der Grenzen  $0 \leq \nu \leq 0,5$ . Ermittelt werden kann die Querdehnzahl eines Materials auf zwei Arten: Entweder über die Messung der beiden Dehnungen bei einem einaxialen Druckversuch („große“ Verformungen treten hierbei auf) oder durch Messung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten

(„kleine“ Verformungen treten auf), die Gleichung 4.12 zeigt die Berechnung durch letztere Methode [3, 4].

$$\nu = \frac{c_p^2 - 2 \cdot c_s^2}{2 \cdot (c_p^2 - c_s^2)} \quad (4.12)$$

mit:

$c_p$  Kompressionswellengeschwindigkeit [m/s]

$c_s$  Scherwellengeschwindigkeit [m/s]

Die Ermittlung zufolge statischer Versuche mit „großen“ Verformungen liefert im Allgemeinen (deutlich) andere Ergebnisse als dynamische Versuche mit „kleinen“ Verformungen. Letztere geben die Werte für elastodynamische Parameter an, die jedoch nur für kleine Verzerrungen gelten. Bei der Verdichtung von Böden kommen jedoch immer große Verformungen vor, wobei deren plastischer Anteil gegenüber dem elastischen deutlich überwiegt.

Folgend sind Erfahrungswerte für die Querdehnzahlen unterschiedlicher Böden angegeben [3]:

Fels	$\nu = 0,15 - 0,25$
Sande und Kiese	$\nu = 0,25 - 0,35$
Sande und Kiese (im Grundwasser)	$\nu = 0,45$
Schluffe (je nach Sand-, Ton- und Wassergehalt)	$\nu = 0,35 - 0,45$
Tone (je nach Wassergehalt)	$\nu = 0,45 - 0,49$
Tone (wassergesättigt)	$\nu = 0,5$

Bei den Großversuchen in Fischamend wurden die Versuchsfahrten primär auf sandigen Kiesen gemacht. Eine gute Annahme wäre deswegen eine Querdehnzahl von  $\nu = 0,3$ . Jedoch erfolgt die Berechnung des dynamischen Verformungsmoduls des dynamischen Lastplattenversuches mit einer Querdehnzahl von  $\nu = 0,214$ . Damit die Ergebnisse der Auswertung der Messdaten aus dem Großversuch mit den  $E_{vd}$ -Werten des dynamischen Lastplattenversuches verglichen werden können, wird für die Auswertung ebenfalls eine Querdehnzahl von  $\nu = 0,214$  angenommen. Eine genaue Untersuchung des angetroffenen Materials hinsichtlich seiner Querdehnzahl wurde nicht durchgeführt, das Treffen einer Annahme war somit notwendig.

## 5 Auswertung und Ergebnisse

In dieser Arbeit sind die Messdaten zur Ermittlung der Kontaktlänge zwischen Boden und Walzenbandage der Ausgangspunkt. Ein weiterer Bestandteil der Auswertung sind die gemessenen Setzungen mittels Setzungsmessgerät in Spur 2 und die gemessenen dynamischen Verformungsmoduln der dynamischen Lastplattenversuche.

Das Hauptziel dieser Arbeit besteht in der Umrechnung der gemessenen Kontaktlängen in entsprechende Verformungsmoduln mittels der Theorie der Hertz'schen Pressung und dem anschließenden Vergleich mit den  $E_{vd}$ -Werten der dynamischen Lastplatte bzw. den Verformungsmoduln, die aus den gemessenen Setzungen berechnet wurden. Das Verhalten der ermittelten Moduln aus den Kontaktlängen bei variierenden Walzeneneinstellungen bzw. bei konstanten Einstellungen über einen Zeitraum mit mehreren Überfahrten wird ebenfalls betrachtet und erläutert.

In weiterer Folge wurden die Kontaktlängen in ihre beiden Teillängen für Bug- und Heckwelle unterteilt, und die Entwicklung dieser Längen über einen Zeitraum bei konstanten Einstellungen wird dargestellt.

Die ermittelten Kontaktlängen wurden zu Bodenverformungen rückgerechnet und den tatsächlich aufgezeichneten Setzungen gegenübergestellt.

Bei der Darstellung der Ergebnisse wird meist zwischen den einzelnen Spuren und Schüttlagen unterschieden. Auch die Ergebnisse der Vor- und Rückwärtsfahrt werden getrennt dargestellt, da die Vorwärtsfahrt meist mit dynamisch angeregter Bandage erfolgt ist, die Spur bei der Rückwärtsfahrt hingegen immer statisch befahren wurde. Ein Unterschied zwischen Vor- und Rückwärtsfahrt ist in den Ergebnissen erkennbar.

Im Folgenden wird zuerst die genaue Vorgangsweise der Auswertung beschrieben und anschließend werden die Ergebnisse dargestellt und interpretiert.

## 5.1 Vorgangsweise der Auswertung

### 5.1.1 Verformungsmoduln

Im Rahmen des Großversuches wurde bei jeder Messfahrt unter anderem die Kontaktzeit zwischen Walze und Boden, sowohl bei der Vorwärts- als auch bei der Rückwärtsfahrt, aufgezeichnet. Durch die konstant gehaltene Geschwindigkeit während der Fahrt ist es möglich, die Kontaktlänge zwischen Bandage und Boden zu berechnen. Hierfür ist auch das Referenzrad von großer Bedeutung, da von diesem die exakte Kontaktlänge und Asymmetrie mit der Bandage bekannt ist. Somit können die gemessenen bzw. errechneten Kontaktlängen zwischen der Bandage und dem Untergrund einerseits und zwischen Bandage und Referenzrad andererseits mit Hilfe der bekannten Kontaktlänge kalibriert werden. Mit der errechneten Kontaktlänge und Gleichung 4.6, der Theorie der Hertz'schen Pressung, kann der Elastizitätsmodul  $E$  des Bodens folgendermaßen errechnet werden:

$$E = 1,10^2 \cdot \frac{F \cdot r}{a^2 \cdot l} = 1,10^2 \cdot \frac{F \cdot r}{\left(\frac{L_c}{2}\right)^2 \cdot l} \quad (5.1)$$

mit:

$a$	$= L_c/2$	Halbe Kontaktlänge [m]
$L_c$		Kontaktlänge [m]
$E$		Elastizitätsmodul des Bodens [kN/m <sup>2</sup> ]
$F$	$= 4,61t \cdot 9,81m/s = 45,22kN$	Druckkraft zw. Boden und Bandage [kN]
$r$	$= 0,60m$	Krümmungsradius der Bandage [m]
$l$	$= 1,68m$	Länge der Bandage [m]

Die Druckkraft  $F$  wird sowohl für statische als auch für dynamische Überfahrten aus dem Eigengewicht der Bandage mit  $F = 45,22$  kN errechnet. Die Richtigkeit dieser Annahme, also dass  $F = F_{stat} \approx F_{dyn}$  ist, wird in Abbildung 5.1 gezeigt. Auch bei Vibrationsbetrieb der vorderen Bandage kann diese Annahme getroffen werden, da sich die Messeinrichtung weiterhin auf der hinteren Bandage befindet und auch bei diesen Überfahrten dort die Daten für die Kontaktlängenberechnung gemessen werden, es wird also nicht direkt auf der Vibrationsbandage gemessen.

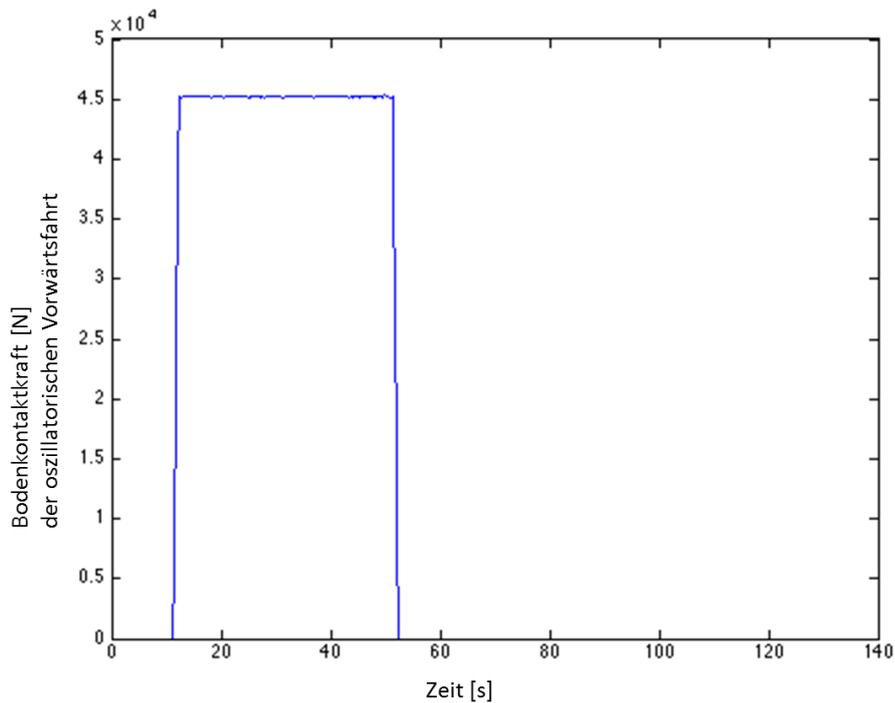


Abbildung 5.1: Bodenkontaktkraft der oszillatorischen Vorwärtsfahrt

Um die Ergebnisse mit den vor Ort mittels dynamischer Lastplatte ermittelten dynamischen Verformungsmoduln vergleichen zu können, wird der Elastizitätsmodul nach Gleichung 5.1 mittels Gleichung 4.10 in einen Verformungsmodul umgerechnet.

In weiterer Folge wird folgende Notation eingeführt:

- $E_{vd}$  dynamischer Verformungsmodul aus dem dynamischen Lastplattenversuch
- $E_{vOszi}$  Verformungsmodul für Fahrten mit Oszillationsanregung, ermittelt aus den Kontaktlängen der Oszillationsbandage
- $E_{vVibro}$  Verformungsmodul für Fahrten mit Vibrationsanregung, ermittelt aus den Kontaktlängen der Oszillationsbandage
- $E_{vStat}$  Verformungsmodul für statische Fahrten, ermittelt aus den Kontaktlängen der Oszillationsbandage
- $E_{vSetz}$  Verformungsmodul ermittelt aus den Setzungsmessungen des Setzungsmessgerätes

Mit dem Setzungsmessgerät, das im Boden in Spur 2 eingebaut war, wurden die Setzungen während jeder Überfahrt aufgezeichnet (siehe Abbildung 5.2).

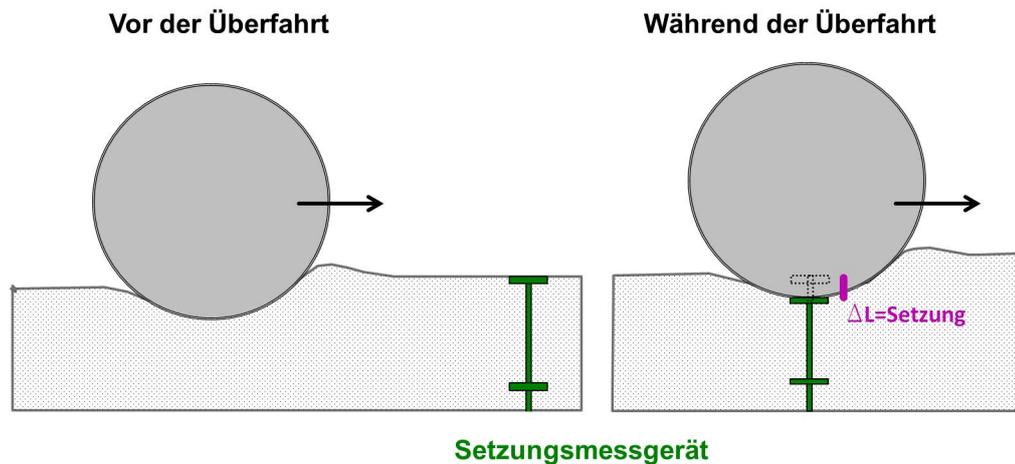


Abbildung 5.2: Skizze Setzungsmessungen in Spur 2

Aus den elastischen Setzungen des Bodens, welche die Bandage der Walze bei der Überfahrt bewirkt, wird eine Kontaktlänge zwischen Bandage und Boden mit den allgemeinen Kreissegmentformeln (5.4 und 5.5) berechnet. Umgewandelt ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$\alpha = 2 \cdot \arccos\left(1 - \frac{t}{r}\right) \quad (5.2)$$

$$L_c = \frac{\alpha \cdot r \cdot \pi \cdot 180}{180} \quad (5.3)$$

mit:

$t$	gemessene Setzungen im Boden [m]
$r = 0,60\text{m}$	Krümmungsradius der Bandage [m]
$\alpha$	Öffnungswinkel der Kontaktlänge [°]
$L_c$	Kontaktlänge [m]

Über die Kontaktlänge kann wiederum ein Elastizitätsmodul (Gleichung 5.1) und in weiterer Folge ein Verformungsmodul  $E_{vSetz}$  (Gleichung 4.10) errechnet werden.

Somit können Verformungsmoduln auf drei verschiedene Arten ermittelt werden:

- über die dynamische Lastplatte:  $E_{vd}$   
Diese Werte wurden punktuell ermittelt, sie haben eine große Messtiefe und die Kraftübertragung erfolgte über eine kreisförmige Aufstandsfläche.

- über die gemessenen Kontaktlängen zwischen Bandage und Boden:  $E_{vOszi}$ ,  $E_{vVibro}$ ,  $E_{vStat}$ , je nach Art der Anregung bei der jeweiligen Überfahrt  
Diese Werte sind die gemittelten Ergebnisse der gesamten Messstrecke, jedoch unterteilt in Vorwärts- und Rückwärtsfahrt, bei einer Überfahrt, die Messtiefe ist nur oberflächennahe. Die Kraft wurde über eine rechteckige Aufstandsfläche von der Walze in den Boden eingeleitet.
- über die Setzungsmessungen des Setzungsmessgerätes:  $E_{vSetz}$   
Diese punktuellen Ergebnisse haben eine geringere Messtiefe als die dynamischen Lastplattenversuche. Das Setzungsmessgerät hat eine kreisrunde Platte an der Bodenoberfläche, über die die Setzungsänderungen aufgenommen werden.

Die unterschiedlichen Messtiefen und die Tatsache, dass es teilweise punktuelle und teilweise über die gesamte Länge gemittelte Werte sind, die miteinander im Weiteren verglichen werden, müssen bei der Betrachtung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird es keine genaue Übereinstimmung der Messwerte geben.

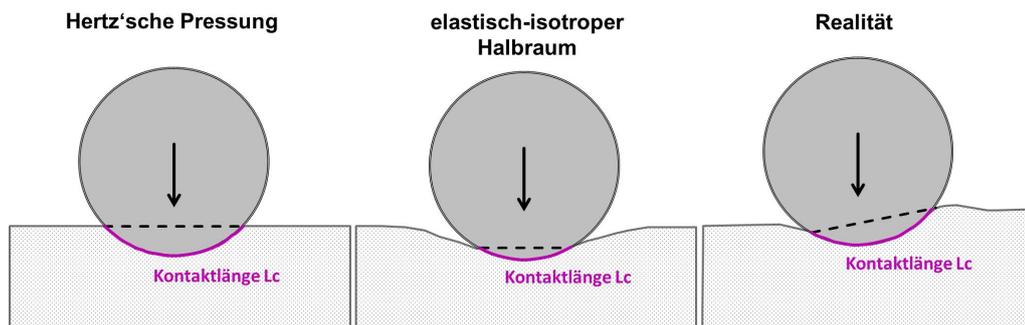


Abbildung 5.3: Gegenüberstellung Theorie Hertz'sche Pressung, elastisch-isotroper Halbraum und Realität

Abbildung 5.3 zeigt die Unterschiede der Kontaktlängen auf Grund von unterschiedlichen Setzungsmulden, zufolge zweier Theorien (Hertz'sche Pressung und elastisch-isotroper Halbraum) und der Realität. In der Realität bilden sich sogenannte Bug- und Heckwellen (siehe Kapitel 5.1.2) vor und nach der Bandage aus. Die tatsächlich gemessenen Kontaktlängen werden anschließend mit der Theorie der Hertz'schen Pressung zu Verformungsmoduln umgerechnet. Auf der Theorie des elastisch-isotropen Halbraumes basiert die Auswertung des dynamischen Lastplattenversuches und die daraus ermittelten dynamischen Verformungsmoduln. Die Mischung der verschiedenen Ansätze der Setzungsmulde und der daraus resultierenden Unterschiede der Kontaktlänge wird sich auch in den Ergebnissen der Verformungsmoduln widerspiegeln.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der unterschiedlich ermittelten Verformungsmoduln grafisch dargestellt, beschrieben und miteinander verglichen. Die Verformungsmoduln werden für Vorwärts- und Rückwärtsfahrt getrennt dargestellt. Die Unterscheidung zwischen Vorwärts- und Rückwärtsfahrt resultiert daraus, dass die Anregungsart unterschiedlich ist und dadurch der Boden anders reagiert.

### 5.1.2 Bug- und Heckwelle

Die Kontaktlänge ist bezüglich der Bandagenachse asymmetrisch (siehe Abbildung 5.4). Die Bandage schiebt während der Fahrt eine sogenannte Bugwelle vor sich her. Auch unmittelbar hinter der Bandage kann oftmals die Ausbildung einer Welle beobachtet werden. Diese wird als Heckwelle bezeichnet und ist deutlich kleiner als die Bugwelle, was zu einer Asymmetrie der Kontaktlänge führt.

Um die Teillängen vor und hinter der Bandagenachse bzw. das Verhältnis dieser Teillängen berechnen und in weiterer Folge Informationen daraus ablesen zu können, war der Zeitpunkt des Kontaktes mit dem Referenzrad maßgebend. Eine Unterteilung der Kontaktlänge zwischen Boden und Walze in Bug- und Heckwellenanteil (siehe Abbildung 5.4) ist damit möglich.

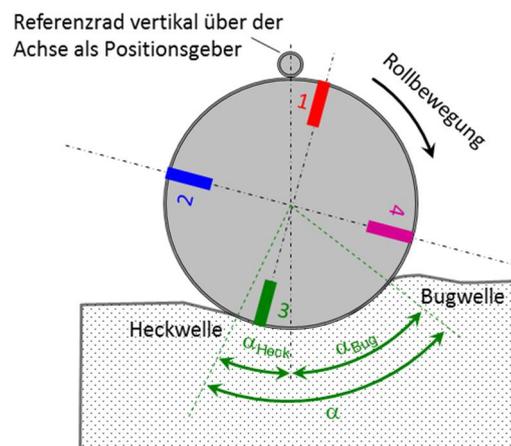


Abbildung 5.4: Bug- und Heckwelle [15, bearbeitet]

Auch bei der Auswertung von Bug- und Heckwelle wird zwischen Vorwärts- und Rückwärtsfahrt unterschieden und die Ergebnisse werden einander gegenüber gestellt. Die unterschiedlichen Einstellungen der Walzenparameter der einzelnen Fahrten führen zu einer Veränderung der Ausprägung von Bug- und Heckwelle.

Je größer die einzelnen Längen sind, desto größer ist auch die Kontaktlänge, die sich ja aus Bugwellenlänge und Heckwellenlänge zusammensetzt, und desto geringer wird der daraus errechnete Verformungsmodul der jeweiligen Überfahrt.

### 5.1.3 Setzungen

Die Eindringtiefe der Walze in den Boden wird aus den gemessenen Setzungen des in Spur 2 eingebauten Messgerätes errechnet. Aus den Messdaten des Setzungsmessgerätes können elastische und plastische Setzungen getrennt voneinander ermittelt werden. Die elastischen Setzungen sind im Allgemeinen, vor allem bedingt durch die Krümmung der Bandage und die bereits erfolgte Setzung, deutlich größer als die plastischen.

Auch aus der Kontaktlänge zwischen Walze und Boden kann die Eindringtiefe in den Boden über die Kreissegmentformeln berechnet werden:

$$t = r \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad (5.4)$$

$$\alpha = \frac{L_c \cdot 180}{r \cdot \pi} \quad (5.5)$$

mit:

$t$	Eindringtiefe der Walze in den Boden [m]
$r = 0,60m$	Krümmungsradius der Bandage [m]
$\alpha$	Öffnungswinkel der Kontaktlänge [°]
$L_c$	Kontaktlänge [m]

Bei der Setzungsberechnung aus den gemessenen Kontaktlängen kann nicht zwischen elastischen und plastischen Verformungsanteilen unterschieden werden.

Die grafische Gegenüberstellung soll zeigen, wie stark die über die Kontaktlänge berechneten Setzungen von den direkt gemessenen Setzungen abweichen. Für diese Auswertung konnte nur die Spur 2 betrachtet werden, da eben nur dort das Setzungsmessgerät eingebaut war.

## 5.2 Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Auswertung (für die Vorgangsweise der Auswertung siehe Kapitel 5.1) werden nun dargestellt und interpretiert. Die Oszillationsmessfahrten stehen bei der Auswertung im Vordergrund und auf diese wird im Folgenden speziell eingegangen. Es werden nicht alle Ergebnisse von jeder Spur und Schüttlage dargestellt, diese können jedoch den Tabellen in Anhang B entnommen werden.

Zuerst wird die Entwicklung der einzelnen Verformungsmoduln je Spur und Schüttlage innerhalb einer Messfahrtreihe dargestellt, wobei ein Übersichtsdiagramm der jeweiligen Spur bzw. Schüttlage den Anfang macht. Die jeweiligen Walzeneinstellungen (Geschwindigkeit, Frequenz, Amplitude) der einzelnen Messfahrten können dem Anhang A entnommen werden. Nach den Übersichtsdiagrammen folgt eine Auswertung der Verformungsmoduln hinsichtlich ihrer Geschwindigkeits- bzw. Frequenzabhängigkeit.

Für Spur 2 wird die Entwicklung der Verformungsmoduln, der Bug- und Heckwellenausbildung und der Setzungen aller Messfahrten auf dieser Spur mit den konstanten Walzeinstellungen von 39 Hz und 4 km/h bei Oszillationbetrieb gezeigt.

Abschließend werden Korrelationen der Verformungsmoduln aller Spuren bei gleichen Einstellungen (39 Hz und 4 km/h bei Oszillationbetrieb) dargestellt. Zusammenhänge und Korrelationen können bei dieser Art der Darstellung gut erkannt werden.

In den Diagrammen (ausgenommen jene der Korrelation) stellt die obere x-Achse dar, um welche Überfahrt es sich auf dieser Spur und Schüttlage handelt, und auf der unteren x-Achse kann abgelesen werden, welche Messfahrtnummer die jeweilige Überfahrt hat. Alle Überfahrten, also über alle Spuren und Schüttlagen, wurden bei der Versuchsdurchführung in Fischamend durchnummeriert. Die genauen Parametereinstellungen (Geschwindigkeit, Frequenz und Amplitude) jeder Messfahrt können den Tabellen im Anhang A entnommen werden.

### 5.2.1 Auswertung der Spur 1 und Schüttlage 2

Die Spur 1 wurde sowohl vorwärts als auch rückwärts statisch befahren.

Die Ergebnisse dieser Spur und Schüttlage dienen für Vergleichszwecke der Spur 2, die mit Oszillationsbetrieb befahren wurde.

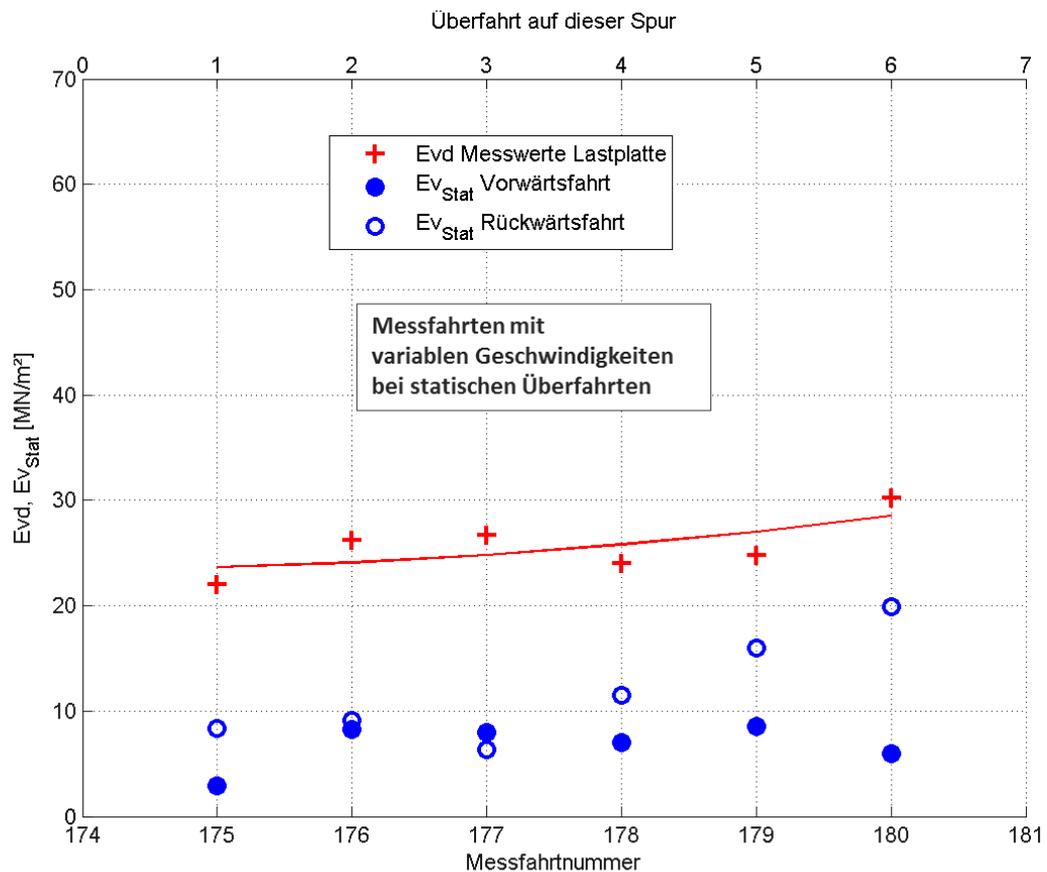


Abbildung 5.5: Übersichtsdiagramm der  $E_{vd}$  und  $E_{vStat}$  -Werte für variable Geschwindigkeiten bei statischen Überfahrten für Spur 1, Schüttlage 2

Das Übersichtsdiagramm (Abbildung 5.5) zeigt die Verformungsmoduln der statischen Vorwärts- bzw. Rückwärtsfahrt ( $E_{vStat}$ ) und die dynamischen Verformungsmoduln ( $E_{vd}$ ) der dynamischen Lastplattenversuche.

Die Berechnung der Verformungsmoduln der statischen Überfahrten erfolgte über die Kontaktlänge zwischen Boden und Bandage (siehe Kapitel 5.1.1).

Bei den dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd}$  ist eine Zunahme der Werte mit steigender Anzahl der Überfahrten erkennbar.

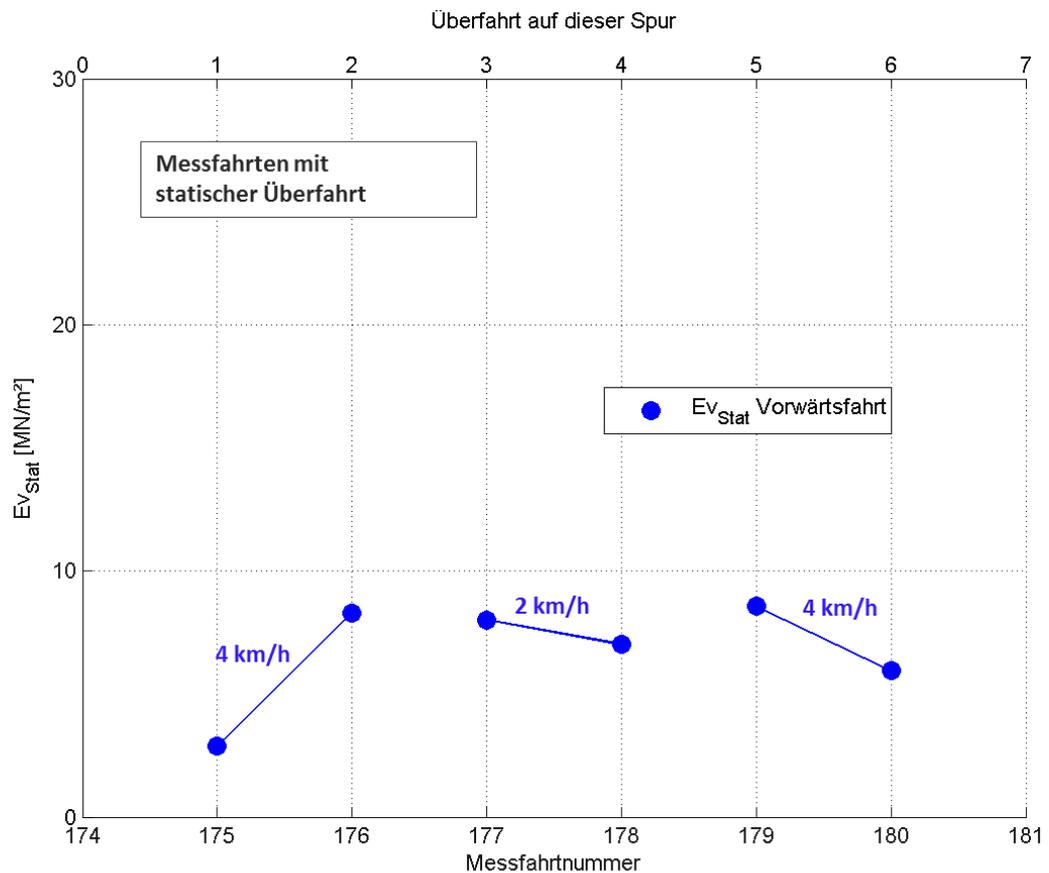


Abbildung 5.6: Auswertung der Geschwindigkeitsabhängigkeit bei statischen Überfahrten für Spur 1, Schüttlage 2

Abbildung 5.6 zeigt einen Teilbereich des Übersichtsdiagrammes von Abbildung 5.5, wobei nur die Verformungsmoduln der statischen Vorwärtsfahrten dargestellt werden.

Die Walze wurde bei den dargestellten Messfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (2 km/h und 4 km/h) gefahren. Es ist keine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Verformungsmoduln erkennbar. Der Grund dafür sind die statischen Überfahrten. Bei Spur 2 beispielsweise, die dynamisch befahren wurde, ist sehr wohl eine Geschwindigkeitsabhängigkeit (Abbildung 5.8 und 5.14) bzw. auch eine Frequenzabhängigkeit (Abbildung 5.9 und 5.15) erkennbar.

## 5.2.2 Auswertung der Spur 2 und Schüttlage 1

Die folgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse der Spur 2 und Schüttlage 1 von den Überfahrten, die mit Oszillationbetrieb bei der Vorwärtsfahrt und statisch bei der Rückwärtsfahrt befahren wurden.

Hauptaugenmerk wird bei der Darstellung der Ergebnisse auf die Spur 2 (Kapitel 5.2.2 und Kapitel 5.2.3) gelegt, da das Verhalten der Verformungsmoduln bei oszillatorischer Anregung untersucht wird.

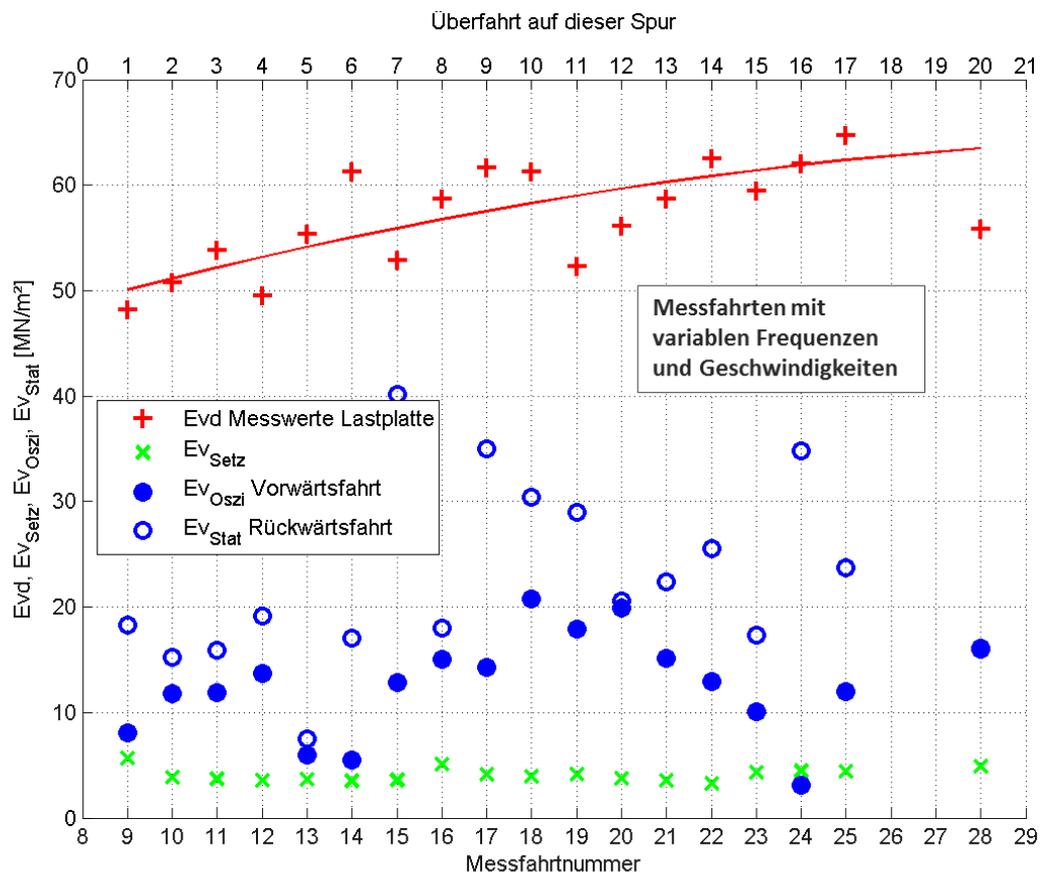


Abbildung 5.7: Übersichtsdiagramm der  $E_{vd}$ ,  $E_{vSetz}$ ,  $E_{vOszi}$  und  $E_{vStat}$ -Werte für variable Frequenzen und Geschwindigkeiten für Spur 2, Schüttlage 1

Das Übersichtsdiagramm (Abbildung 5.7) zeigt die Verformungsmoduln der dynamischen Vorwärtsfahrt ( $E_{vOszi}$ ) und der statischen Rückwärtsfahrt ( $E_{vStat}$ ), sowie die Verformungsmoduln, die aus den Setzungsmessungen ( $E_{vSetz}$ ) errechnet wurden, und die dynamischen Verformungsmoduln ( $E_{vd}$ ) der dynamischen Lastplattenversuche.

Die Berechnung von  $E_{vOsz}$  und  $E_{vStat}$  erfolgte über die Kontaktlängen zwischen Boden und Bandage, und  $E_{vSetz}$  wurde aus den Setzungsmessungen errechnet (siehe Kapitel 5.1.1).

Bei den dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd}$  ist eine Zunahme der Werte mit steigender Anzahl der Überfahrten erkennbar.

Für die Interpretation des Verhaltens der Verformungsmoduln müssen die Überfahrten mit konstanten Einstellungen betrachtet werden (siehe Abbildung 5.10). Die Walzeinstellungen im Übersichtsdiagramm variieren und wegen der Geschwindigkeits- und Frequenzabhängigkeit können die dargestellten Verformungsmoduln nicht direkt miteinander verglichen werden. Angaben zu den Einstellungen der jeweiligen Messfahrt können dem Anhang A entnommen werden.

Die deutlichen Unterschiede der verschiedenen ermittelten Verformungsmoduln haben mehrere Ursachen:

- Unterschiedliche Messtiefen der einzelnen Verfahren führen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Beim Boden handelt es sich nicht um ein Kontinuum, sondern um ein granulares Medium, wodurch die Messtiefe eine erhebliche Rolle spielt. Die gemessenen Kontaktlängen haben keine große Messtiefe, aus diesem Grund werden Kontaktlängen gemessen, die zu einer Unterschätzung der Bodensteifigkeit führen. Erst mit zunehmender Tiefe wird das Verhalten des Bodens kontinuumsähnlicher und in diesem Bereich liegt die Messtiefe der dynamischen Lastplatte, weswegen größere Bodensteifigkeiten gemessen werden.
- Einen Unterschied macht auch die Art der Belastung und die Form der Aufstandsfläche. Zum einen wird die Reaktion des Bodens auf eine stoßförmige Beanspruchung auf einer kreisförmigen Aufstandsfläche wie bei der dynamischen Lastplatte gemessen, zum anderen die Reaktion auf eine annähernd kontinuierliche, dynamische bzw. statische Anregung der Walze auf einer rechteckigen Aufstandsfläche, wie bei der Kontaktlängenmessung.
- Ein punktueller Versuch, wie der dynamische Lastplattenversuch oder die Setzungsmessung, liefert andere Ergebnisse als eine Untergrunduntersuchung, die flächenhaft ist. Bei der flächenhaften Kontaktlängenermittlung wird ein Mittelwert über die ganze Spur gebildet.
- Bei der Kontaktlängenmessung haben Bug- und Heckwelle einen Einfluss auf die Messwerte. Die Auswertung beruht anschließend jedoch auf der Theorie der Hertz'schen Pressung, wo die Bug- und Heckwelle bzw. die entstandene Setzungs-

mulde nicht weiter berücksichtigt wird. Der dynamische Lastplattenversuch hingegen beruht auf der Theorie des elastisch-isotropen Halbraumes. Somit werden unterschiedliche Theorien (siehe Abbildung 5.3), wie bereits im Kapitel 5.1.1 erläutert wurde, als Ausgangspunkt für die Berechnung der verschiedenen Verformungsmoduln herangezogen, eine Abweichung der Ergebnisse ist somit erklärbar.

- Bei dynamischen Überfahrten ist eine Geschwindigkeits- bzw. Frequenzabhängigkeit der Messwerte vorhanden. Bei den dynamischen Verformungsmoduln des dynamischen Lastplattenversuches ist ein Einfluss der Anregungsart der Verdichtung nicht gegeben. Dieser Umstand lässt die Unterschiede zwischen den Verformungsmoduln mitbegründen.

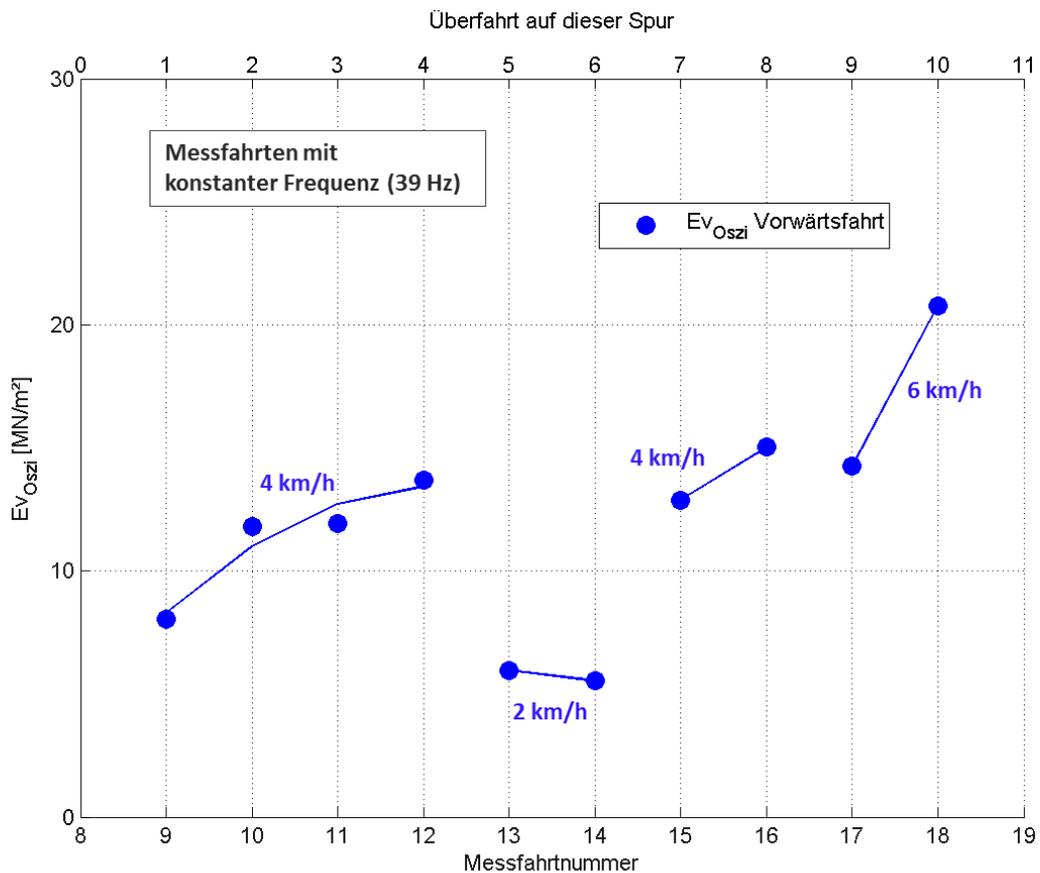


Abbildung 5.8: Auswertung der Geschwindigkeitsabhängigkeit bei konstanter Frequenz (39 Hz) für Spur 2, Schüttlage 1

Abbildung 5.8 zeigt einen Teilbereich des Übersichtsdiagrammes von Abbildung 5.7, wobei nur die Verformungsmoduln der oszillationsbetriebenen Vorwärtsfahrten dargestellt werden.

Die Walze wurde bei den dargestellten Messfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (2 km/h, 4 km/h und 6 km/h) und konstanter Frequenz (39 Hz) gefahren. Es ist gut erkennbar, dass bei Steigerung der Geschwindigkeit die Verformungsmoduln auch steigen. Bei geringeren Geschwindigkeiten hält sich die Walze länger an einer Stelle auf, wodurch sich die dynamisch angeregte Bandage an dieser Stelle tiefer in den Untergrund rütteln kann. Dadurch werden höhere Kontaktlängen gemessen und daraus ergeben sich wiederum geringere Verformungsmoduln.

Bei den Messfahrten 9-12 ist außerdem eine Zunahme der Bodensteifigkeit durch einen Anstieg der Verformungsmoduln erkennbar.

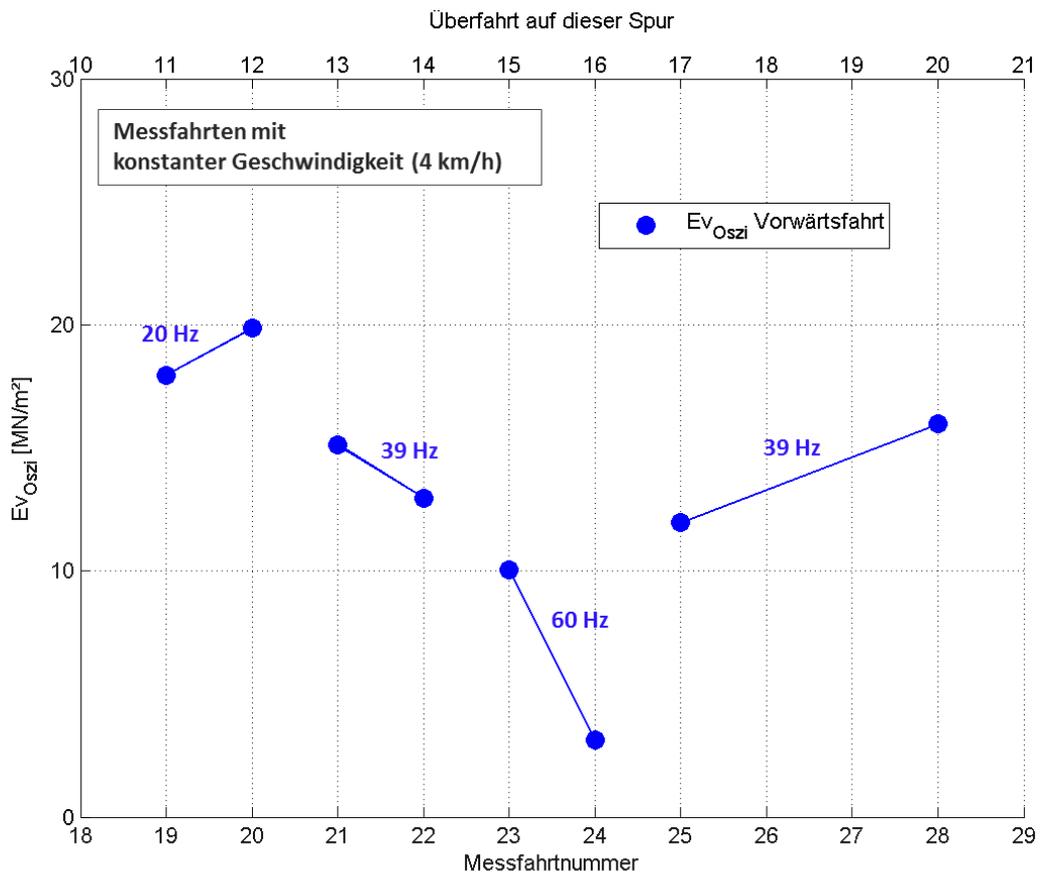


Abbildung 5.9: Auswertung der Frequenzabhängigkeit bei konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 1

Abbildung 5.9 zeigt einen Teilbereich des Übersichtsdiagrammes von Abbildung 5.7, wobei nur die Verformungsmoduln der oszillationsbetriebenen Vorwärtsfahrten dargestellt werden.

Die Walze wurde bei den dargestellten Messfahrten mit unterschiedlichen Frequenzen (20 Hz, 39 Hz und 60 Hz) und konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) gefahren. Es ist gut erkennbar, dass bei Steigerung der Frequenz die Verformungsmoduln sinken. Die Bandage rüttelt sich bei einer größeren Frequenz stärker in den Boden, wodurch die Kontaktlänge steigt und die  $E_{v_{Oszi}}$ -Werte dieser Messfahrt sinken.

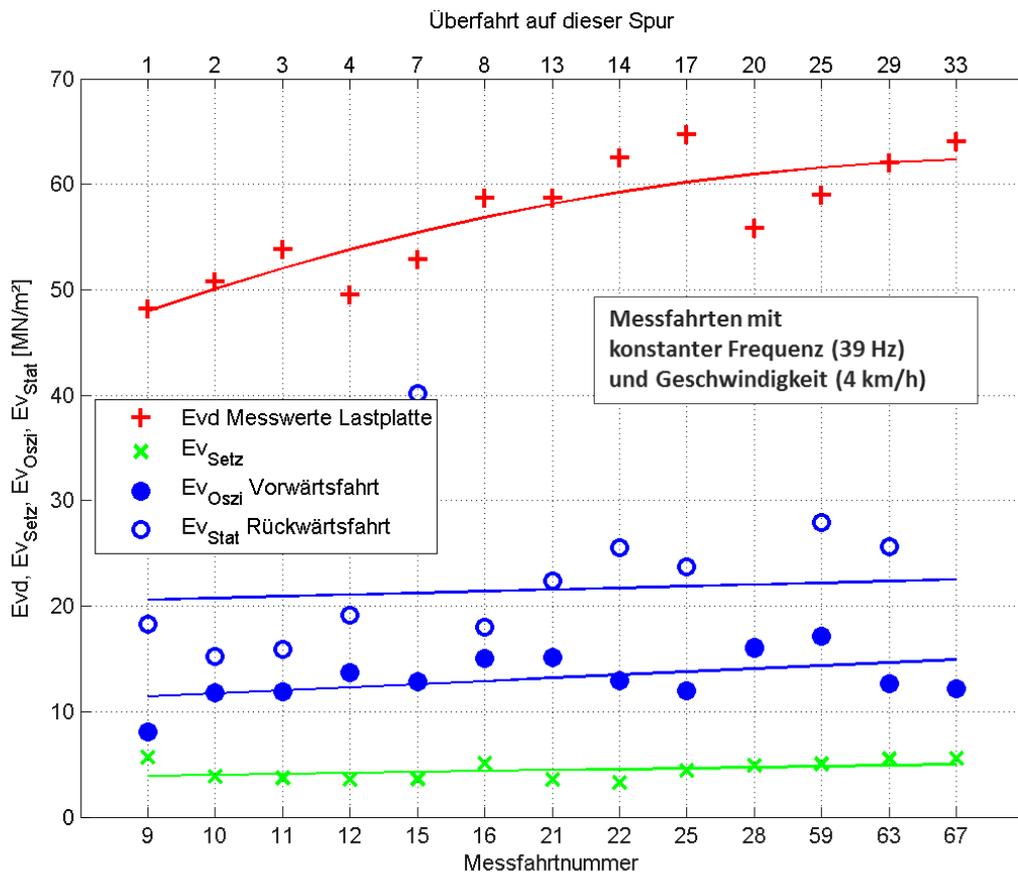


Abbildung 5.10: Auswertung der  $E_{vd}$ ,  $E_{vSetz}$ ,  $E_{vOszi}$  und  $E_{vStat}$  -Werte für konstante Walzeneinstellungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 1

Abbildung 5.10 zeigt die verschiedenen Verformungsmoduln ( $E_{vd}$ ,  $E_{vSetz}$ ,  $E_{vOszi}$  und  $E_{vStat}$ ) für Spur 2 und Schüttlage 1 bei den konstanten Einstellungen von 39 Hz und 4 km/h. Diese Walzeneinstellungen sind die zuvor festgelegten Standardeinstellungen für Oszillationsverdichtung. Die Trendlinien sind parabelförmig ( $E_{vd}$ ) bzw. Geraden ( $E_{vSetz}$ ,  $E_{vOszi}$  und  $E_{vStat}$ ).

Bei allen Verformungsmoduln ist ein Anstieg bei zunehmender Anzahl der Überfahrten erkennbar.

Die größte Streuung der in Abbildung 5.10 dargestellten Ergebnisse liefern die Verformungsmoduln  $E_{vStat}$  der statischen Rückwärtsfahrten.

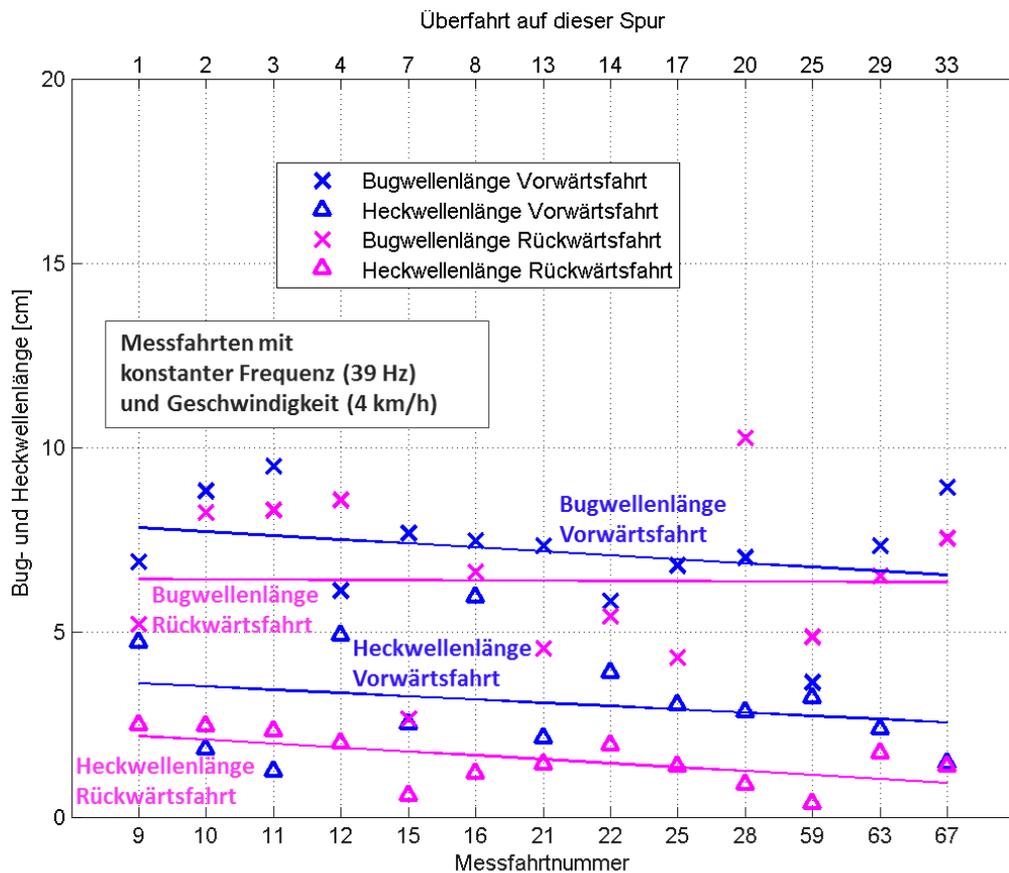


Abbildung 5.11: Auswertung der Bug- und Heckwellenlängen für konstante Walzeinstellungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 1

Abbildung 5.11 zeigt die Bug- und Heckwellenlängen für Spur 2 und Schüttlage 1 bei den konstanten Standardeinstellungen für Oszillationsverdichtung von 39 Hz und 4 km/h. Die Trendlinien für die Bug- und Heckwellenlängen sind Geraden.

Die Grafik zeigt sehr gut, dass die Bugwelle sowohl bei der Vorwärtsfahrt als auch bei der Rückwärtsfahrt stets größer ist als die Heckwelle. Durch die dynamische Bandagenanregung bilden sich die Bug- und Heckwelle bei der Vorwärtsfahrt stärker aus als bei der Rückwärtsfahrt.

Die Teillängen der Kontaktlängen, also die Bug- und Heckwellenlängen, nehmen mit Anzahl der Überfahrten ab. Dadurch sinkt auch die Kontaktlänge, die sich aus den beiden Teillängen ergibt, und somit steigt der Verformungsmodul, wie in Abbildung 5.10 erkennbar ist.

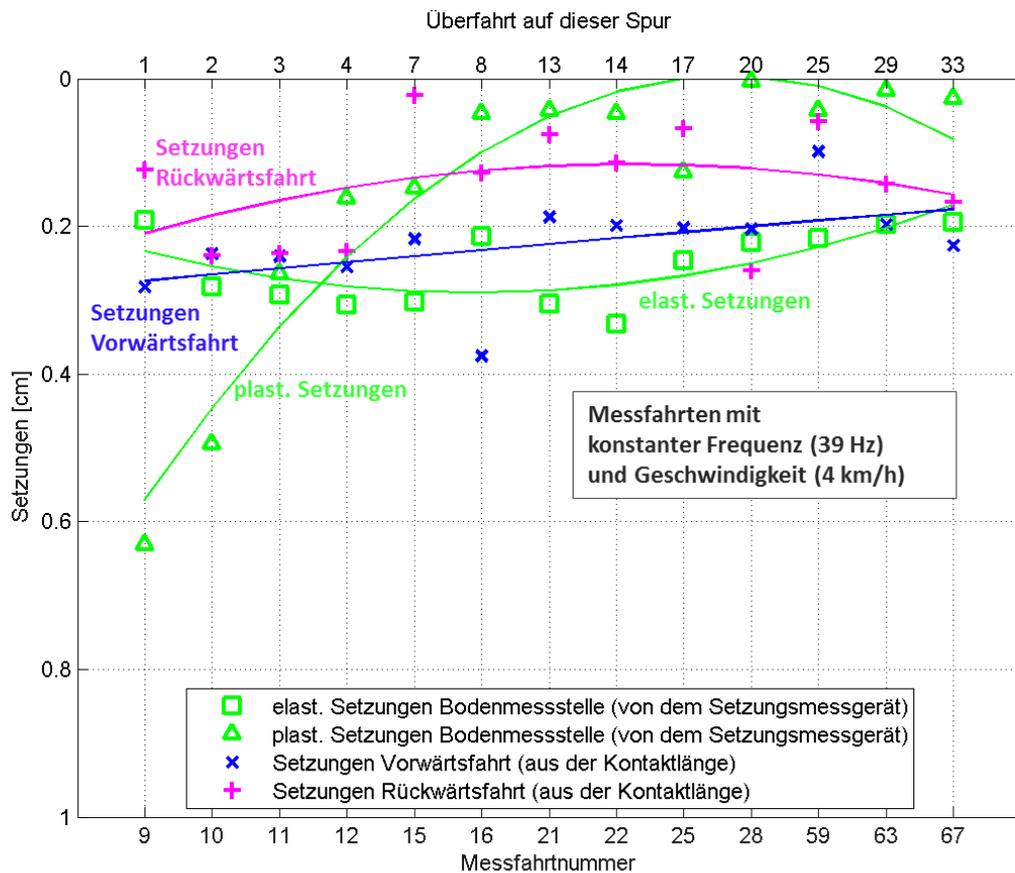


Abbildung 5.12: Auswertung der Setzungen für konstante Walzeinstellungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 1

Die Abbildung 5.12 zeigt die Setzungen, einerseits die gemessenen Setzungen und andererseits die aus den Kontaktlängen berechneten Setzungen, für Spur 2 und Schüttlage 1 bei den konstanten Standardeinstellungen für Oszillationsverdichtung von 39 Hz und 4 km/h. Die Trendlinien sind parabelförmig, nur die Trendlinie der Setzungen bei der Vorwärtsfahrt ist eine Gerade.

Die plastischen Setzungen sind anfangs groß, sie nehmen nach wenigen Überfahrten jedoch schnell ab. Wie daraus gut erkennbar ist, findet während der ersten Überfahrten die größte Verdichtung des Bodens statt.

Die plastischen Setzungen sind nach den ersten Überfahrten geringer als die elastischen Setzungen, da die plastischen Setzungen durch die bereits stattgefundenen Verdichtung des Bodens reduziert werden.

Die Setzungen der Vorwärtsfahrt sind größer als jene der Rückwärtsfahrt, dies resultiert aus der dynamischen Anregung bei der Vorwärtsfahrt und der sich dadurch ergebenden

größeren Kontaktlängen. Die Kontaktlängen sind anschließend die Grundlagen für die Setzungsberechnung.

### 5.2.3 Auswertung der Spur 2 und Schüttlage 2

Die folgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse der Spur 1 von den Überfahrten, die mit Oszillationbetrieb bei der Vorwärtsfahrt und statisch bei der Rückwärtsfahrt befahren wurden.

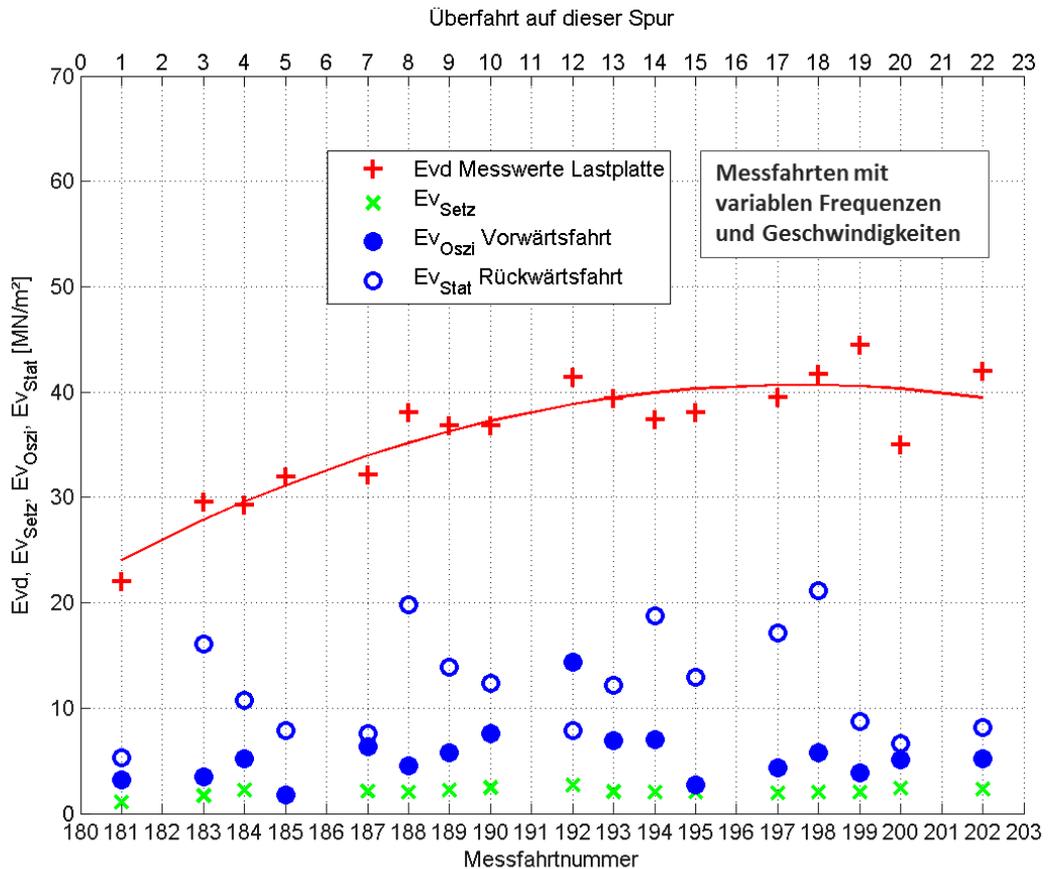


Abbildung 5.13: Übersichtsdiagramm der  $E_{vd}$ ,  $E_{vSetz}$ ,  $E_{vOszi}$  und  $E_{vStat}$  -Werte für variable Frequenzen und Geschwindigkeiten für Spur 2, Schüttlage 2

Das Übersichtsdiagramm (Abbildung 5.13) zeigt die Verformungsmoduln der dynamischen Vorwärtsfahrt ( $E_{vOszi}$ ) und der statischen Rückwärtsfahrt ( $E_{vStat}$ ), sowie die Verformungsmoduln, die aus den Setzungsmessungen ( $E_{vSetz}$ ) errechnet wurden, und die dynamischen Verformungsmoduln ( $E_{vd}$ ) der dynamischen Lastplattenversuche.

Die Berechnung von  $E_{vOszi}$  und  $E_{vStat}$  erfolgte über die Kontaktlängen zwischen Boden und Bandage, und  $E_{vSetz}$  wurde aus den Setzungsmessungen errechnet (siehe Kapitel 5.1.1).

Die deutlichen Unterschiede der verschiedenen ermittelten Verformungsmoduln wurden bereits im Kapitel 5.2.2 genau erläutert, die Überlegungen gelten auch für diese Abbildung.

Bei den dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd}$  ist eine Zunahme der Werte mit steigender Anzahl der Überfahrten erkennbar.

Für die Interpretation des Verhaltens der Verformungsmoduln müssen die Überfahrten mit konstanten Einstellungen betrachtet werden (siehe Abbildung 5.16). Die Walzeinstellungen im Übersichtsdiagramm variieren und wegen der Geschwindigkeits- und Frequenzabhängigkeit können die dargestellten Verformungsmoduln nicht direkt miteinander verglichen werden. Angaben zu den Einstellungen der einzelnen Messfahrten können dem Anhang A entnommen werden.

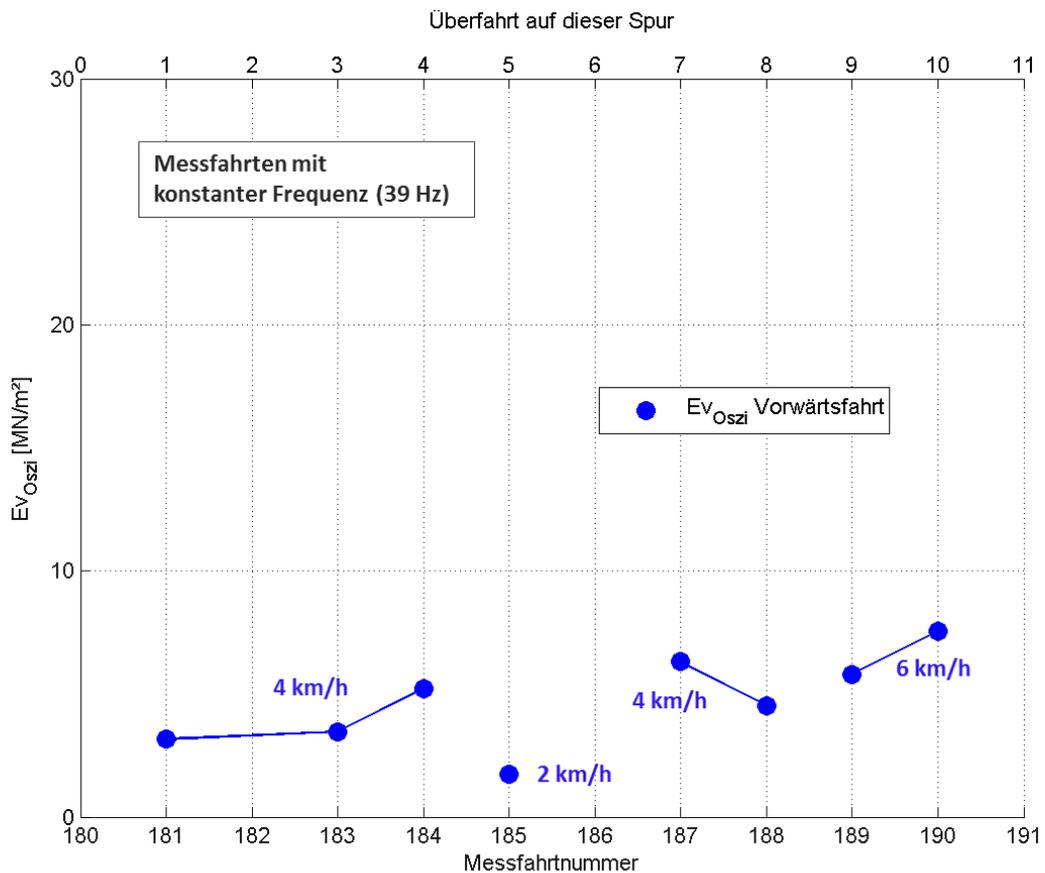


Abbildung 5.14: Auswertung der Geschwindigkeitsabhängigkeit bei konstanter Frequenz (39 Hz) für Spur 2, Schüttlage 2

Abbildung 5.14 zeigt einen Teilbereich des Übersichtsdiagrammes von Abbildung 5.13, wobei nur die Verformungsmoduln der oszillationsbetriebenen Vorwärtsfahrten dargestellt werden.

Die Walze wurde bei den dargestellten Messfahrten mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (2 km/h, 4 km/h und 6 km/h) und konstanter Frequenz (39 Hz) gefahren. Es ist auch in dieser Abbildung gut erkennbar, dass bei Steigerung der Geschwindigkeit auch die Verformungsmoduln steigen. Die Erklärung hierfür liegt ebenfalls in der kürzeren Aufenthaltszeit der Bandage an einer Stelle und den daraus folgenden vergleichsweise kürzeren Kontaktlängen.

Ein Anstieg der Bodensteifigkeit ist bei den Messfahrten mit 4 km/h durch den Anstieg der Verformungsmoduln erkennbar.

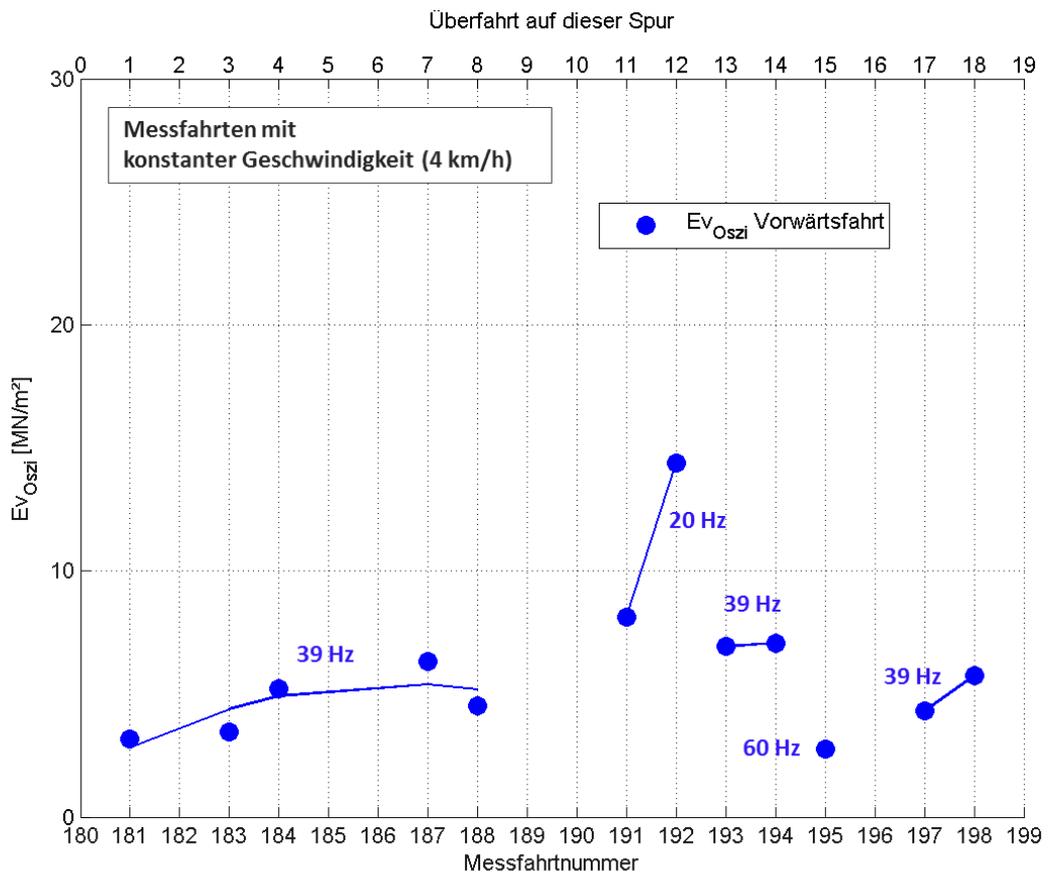


Abbildung 5.15: Auswertung der Frequenzabhängigkeit bei konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 2

Abbildung 5.15 zeigt einen Teilbereich des Übersichtsdiagrammes von Abbildung 5.13, wobei nur die Verformungsmoduln der oszillationsbetriebenen Vorwärtsfahrten dargestellt werden.

Die Walze wurde bei den dargestellten Messfahrten mit unterschiedlichen Frequenzen (20 Hz, 39 Hz und 60 Hz) und konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) gefahren. Die Erkenntnisse der Frequenzabhängigkeit aus den vorherigen Diagrammen sind durch diese Abbildung bestätigt: Bei Steigerung der Frequenzen sinken die Verformungsmoduln.

Ein Anstieg der Bodensteifigkeit ist bei den Messfahrten mit 39 Hz durch den Anstieg der Verformungsmoduln erkennbar.

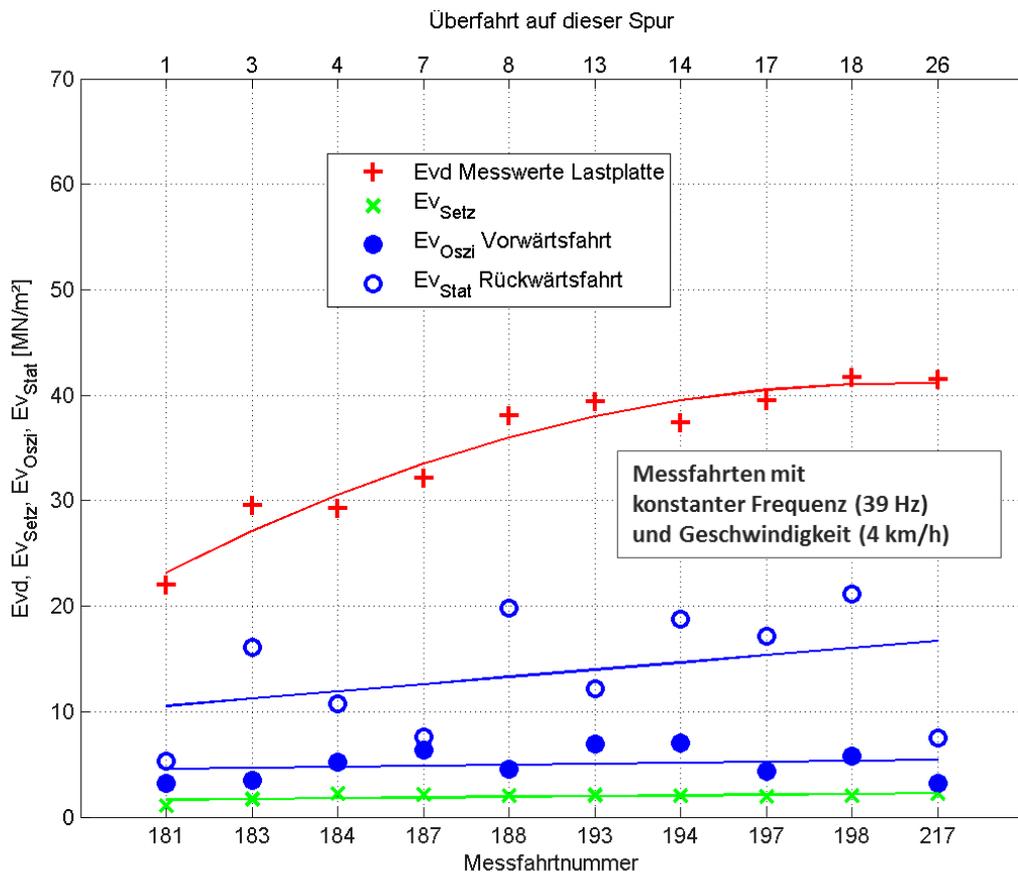


Abbildung 5.16: Auswertung der  $E_{vd}$ ,  $E_{vSetz}$ ,  $E_{vOsz}$  und  $E_{vStat}$  -Werte für konstante Walzeinstellungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 2

Abbildung 5.16 zeigt die verschiedenen Verformungsmoduln ( $E_{vd}$ ,  $E_{vSetz}$ ,  $E_{vOsz}$  und  $E_{vStat}$ ) für Spur 2 und Schüttlage 2 bei den konstanten Einstellungen von 39 Hz und 4 km/h. Diese Walzeinstellungen sind die zuvor festgelegten Standardeinstellungen für Oszillationsverdichtung. Die Trendlinien sind parabelförmig ( $E_{vd}$ ) bzw. Geraden ( $E_{vSetz}$ ,  $E_{vOsz}$  und  $E_{vStat}$ ).

Bei den dynamischen Verformungsmoduln  $E_{vd}$  und den Verformungsmoduln der statischen Rückwärtsfahrt  $E_{vStat}$  ist ein Anstieg bei zunehmender Anzahl der Überfahrten erkennbar.

Die Verformungsmoduln der dynamischen Vorwärtsfahrt  $E_{vOsz}$  zeigen kaum einen Verdichtungszuwachs, sofern alle dargestellten Messfahrten betrachtet werden. Betrachtet man hingegen nur die ersten Überfahrten (Messfahrtnummer 181-187), so sieht man sehr wohl einen Anstieg der Bodensteifigkeit. Eine Verdichtung des Bodens wird in den ersten Überfahrten erzielt, danach wird kaum noch ein Zuwachs der Steifigkeit erreicht, der Boden ist fertig verdichtet. Es wird weiters darauf hingewiesen, dass zusätzliche

Überfahrten stattgefunden haben, jedoch diese in Abbildung 5.16 nicht dargestellt werden, da sie mit anderen Frequenz- und Geschwindigkeitseinstellungen durchgeführt wurden.

Auch in dieser Abbildung zeigen die Verformungsmoduln der statischen Rückwärtsfahrt  $E_{vStat}$  die größte Streuung.

Die Verformungsmoduln, die aus den Setzungsmessungen berechnet wurden, sind über alle Messfahrten hinweg annähernd gleich groß, ein Verdichtungszuwachs ist aus der Setzungsmessung nicht erkennbar.

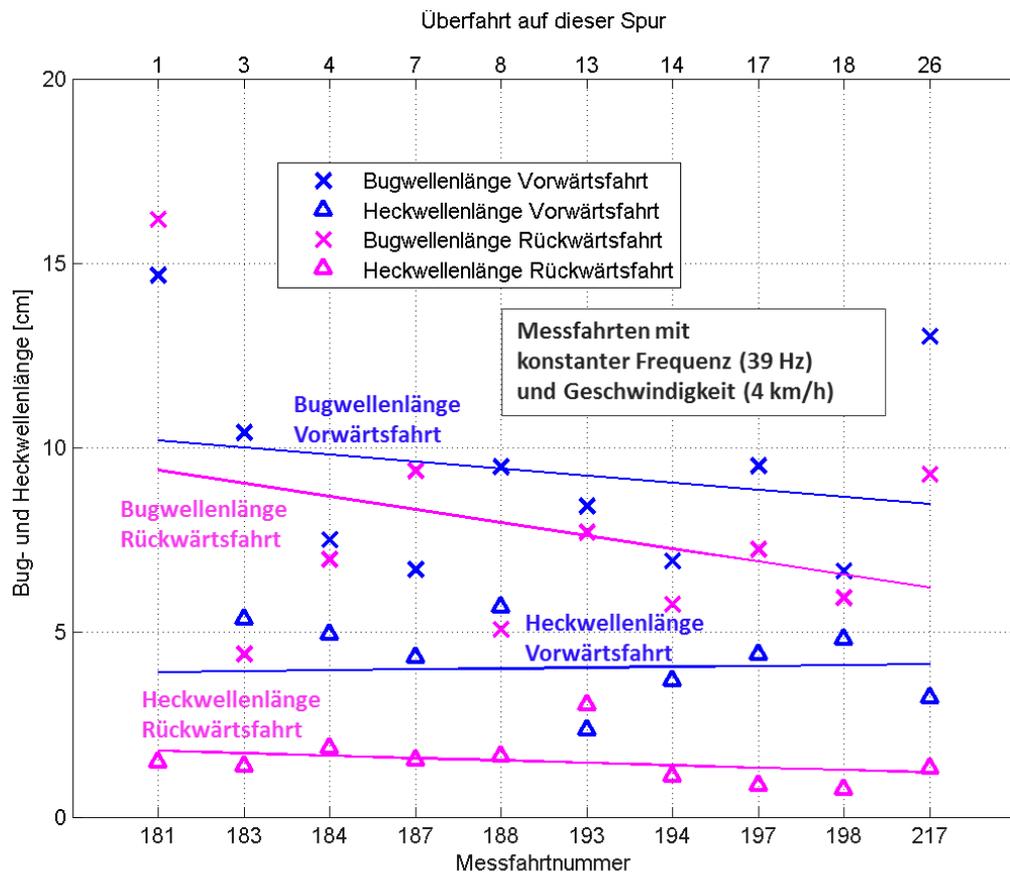


Abbildung 5.17: Auswertung der Bug- und Heckwellenlängen für konstante Walzeinstellungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 2

Abbildung 5.17 zeigt die Bug- und Heckwellenlängen für Spur 2 und Schüttlage 2 bei den konstanten Standardeinstellungen für Oszillationsverdichtung von 39 Hz und 4 km/h. Die Trendlinien für die Bug- und Heckwellenlängen sind Geraden.

Auch hier, wie schon zuvor in Abbildung 5.11, zeigt die Grafik, dass die Bugwelle sowohl bei der Vorwärtsfahrt als auch bei der Rückwärtsfahrt stets größer ist als die Heckwelle. Durch die dynamische Bandagenanregung bilden sich die Bug- und Heckwelle bei der Vorwärtsfahrt stärker aus als bei der Rückwärtsfahrt.

Die Teillängen der Kontaktlängen, also die Bug- und Heckwellenlängen, nehmen mit Anzahl der Überfahrten ab. Ausnahme ist die Heckwelle der Vorwärtsfahrt, diese steigt leicht an. Weswegen in Abbildung 5.16 kein Anstieg des Verformungsmoduls bei der dynamischen Vorwärtsfahrt erkennbar war. Die beiden Teillängen der Rückwärtsfahrt sinken bei Zunahme der Anzahl der Überfahrten und somit steigt der Verformungsmodul, wie in Abbildung 5.16 erkennbar ist.

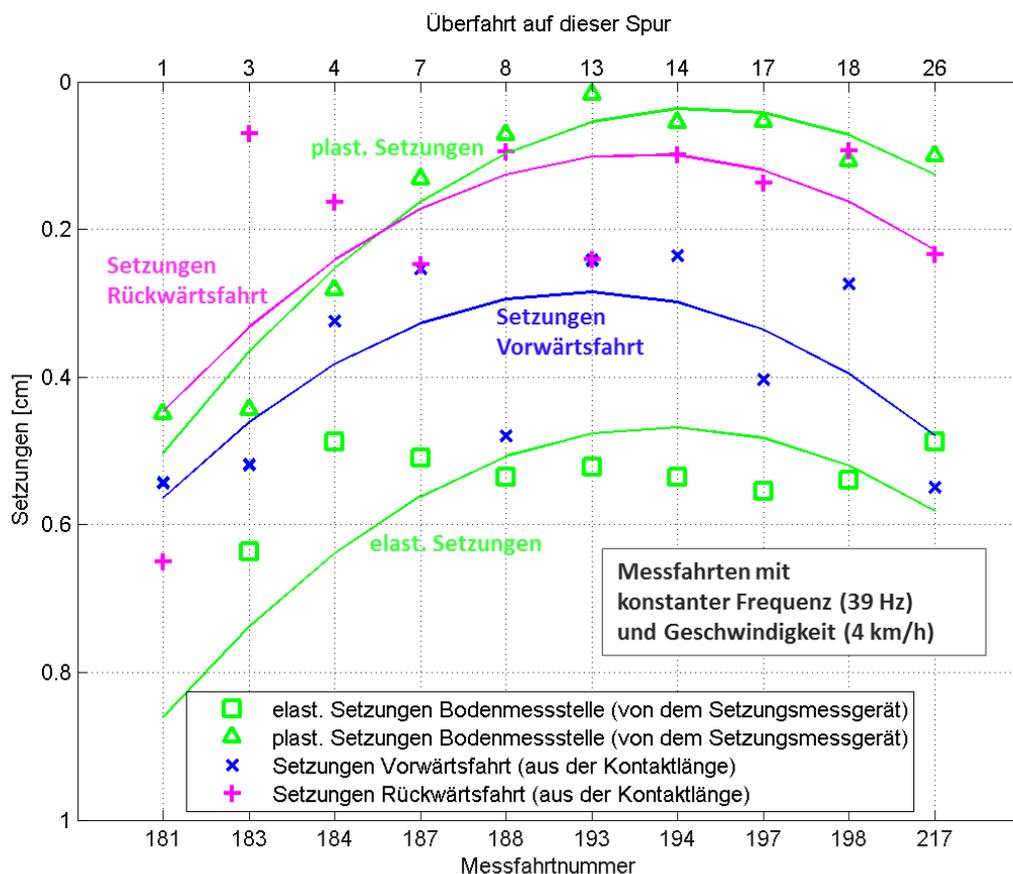


Abbildung 5.18: Auswertung der Setzungen für konstante Walzeneinstellungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 2

Abbildung 5.18 zeigt die Setzungen, einerseits die gemessenen Setzungen und andererseits die aus den Kontaktlängen berechneten Setzungen, für Spur 2 und Schüttlage 2 bei den konstanten Standardeinstellungen für Oszillationsverdichtung von 39 Hz und 4 km/h. Die Erkenntnisse aus der Darstellung der Setzungen der Abbildung 5.12 sind durch diese Abbildung bestätigt. Die Trendlinien sind für alle dargestellten Setzungen parabelförmig.

Die plastischen Setzungen sind auch bei dieser Schüttlage anfangs groß, sie nehmen nach wenigen Überfahrten jedoch schnell ab. Wie auch in dieser Abbildung gut erkennbar ist, findet während der ersten Überfahrten die größte Verdichtung des Bodens statt.

Alle Setzungskurven haben ein ähnliches Aussehen: Große Setzungen zu Beginn, die jedoch bei steigender Anzahl der Überfahrten geringer werden.

Die plastischen Setzungen sind auch für die Messfahrten auf der zweiten Schüttlage geringer als die elastischen Setzungen.

Bestätigt wird auch die Beobachtung, dass die Setzungen der Vorwärtsfahrt größer sind als jene der Rückwärtsfahrt. Dieses Verhalten resultiert aus der dynamischen Anregung während der Vorwärtsfahrt und der sich dadurch ergebenden größeren Kontaktlängen, die für die Setzungsberechnung herangezogen werden.

### 5.2.4 Auswertung der Spur 5

Die folgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse der Spur 5 von den Überfahrten, die mit Oszillationsbetrieb bei der Vorwärtsfahrt und statisch bei der Rückwärtsfahrt befahren wurden.

Die Messfahrten auf der Spur 5 dienten als Vergleich des Bodenverhaltens bei Messfahrten auf „steifem“ und hochgradig verdichtetem Untergrund (Kornverteilungslinie siehe Abbildung 3.8) im Gegensatz zur Verdichtung von locker geschüttetem sandigen Kies von Spur 2.

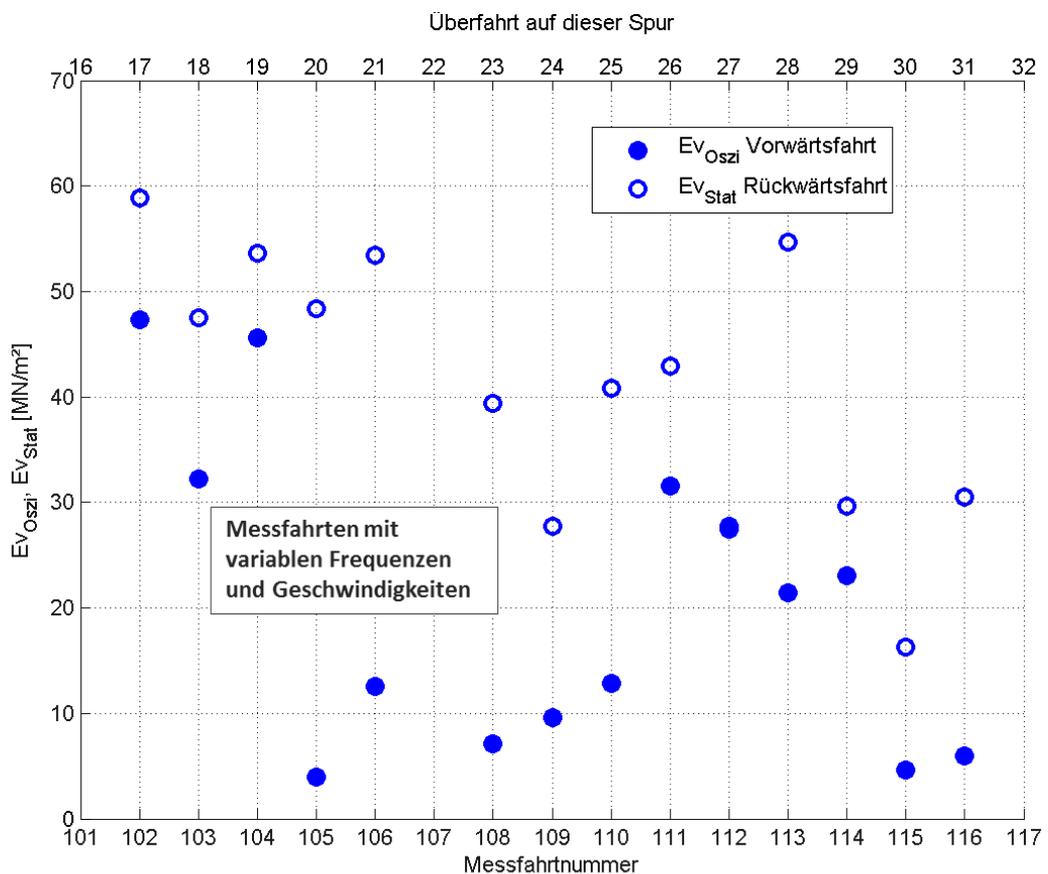


Abbildung 5.19: Übersichtsdiagramm der  $E_{vOsz}$  und  $E_{vStat}$ -Werte für variable Frequenzen und Geschwindigkeiten für Spur 5

Das Übersichtsdiagramm (Abbildung 5.19) zeigt die Verformungsmoduln der dynamischen Vorwärtsfahrt ( $E_{vOsz}$ ) und der statischen Rückwärtsfahrt ( $E_{vStat}$ ). Bei diesen Messfahrten wurden keine dynamischen Lastplattenversuche durchgeführt.

Die Berechnung von  $E_{vOszi}$  und  $E_{vStat}$  erfolgt über die Kontaktlängen zwischen Boden und Bandage (siehe Kapitel 5.1.1).

Aus der Grafik ist erkennbar, dass sich die Verformungsmoduln über eine große Bandbreite streuen. Grund hierfür war die sehr inhomogene Oberfläche dieser Spur, weshalb ein ständiger Kontakt zwischen Bandage und Boden nicht sichergestellt werden konnte.

Eine zusätzliche Verdichtung war bei diesen Messfahrten nicht zu erwarten, da der Boden bereits sehr stark verdichtet war und die Walze zu leicht war, um einen weiteren Verdichtungszuwachs hervorrufen zu können. Jedoch ist aus der Grafik erkennbar, dass der Verdichtungsgard des Bodens recht hoch ist, die Werte der Verformungsmoduln sind zum Teil deutlich größer, als dies bei der Spur 2 der Fall war.

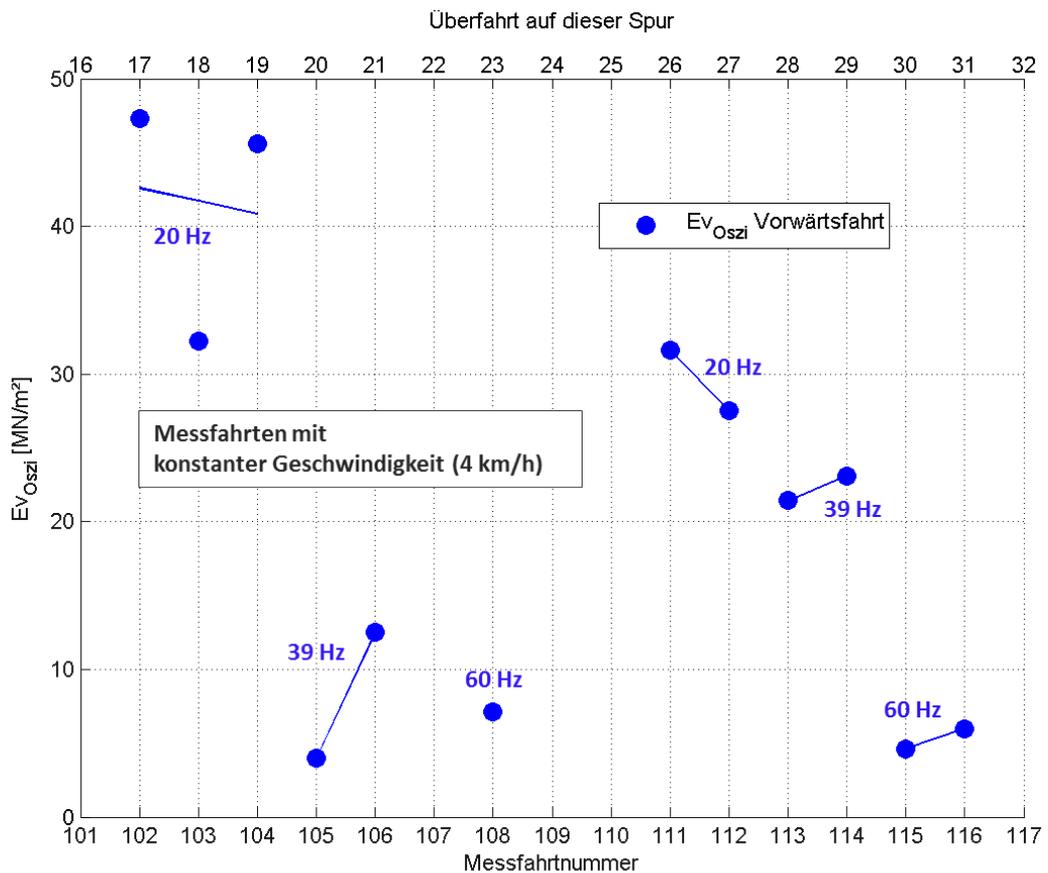


Abbildung 5.20: Auswertung der Frequenzabhängigkeit bei konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) für Spur 5

Abbildung 5.20 zeigt einen Teilbereich des Übersichtsdiagrammes von Abbildung 5.19, wobei nur die Verformungsmoduln der oszillationsbetriebenen Vorwärtsfahrt dargestellt werden.

Die Walze wurde bei den dargestellten Messfahrten mit unterschiedlichen Frequenzen (20 Hz, 39 Hz und 60 Hz) und konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) gefahren. Die Grafik zeigt eine gewisse Frequenzabhängigkeit der Verformungsmoduln. Die Verformungsmoduln von den Überfahrten mit 20 Hz sind deutlich größer als jene von den Überfahrten mit 60 Hz. Eine größere Streuung der Verformungsmoduln durch die inhomogene Oberfläche dieser Spur ist außerdem erkennbar.

### 5.2.5 Auswertung der Spur 6

Die folgenden Diagramme zeigen die Ergebnisse der Spur 6. Diese Spur wurde oszillierend bei der Vorwärtsfahrt und statisch bei der Rückwärtsfahrt befahren.

Die Messfahrten auf der Spur 6 dienten als Vergleich des Bodenverhaltens bei der Verdichtung von „weichem“ und bindigem Untergrund (Kornverteilungslinie siehe Abbildung 3.11) im Gegensatz zur Verdichtung vom sandigem Kies auf Spur 2.

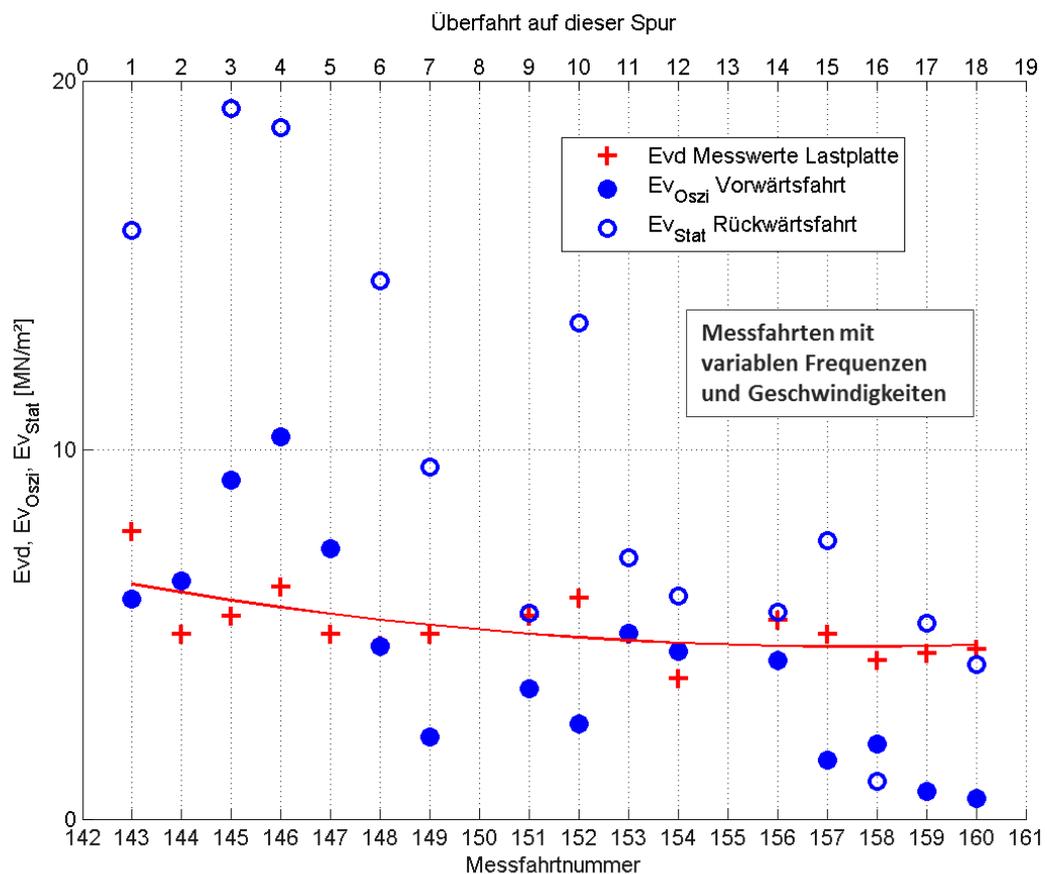


Abbildung 5.21: Übersichtsdiagramm der  $E_{vd}$ ,  $E_{vOszi}$  und  $E_{vStat}$  -Werte für variable Frequenzen und Geschwindigkeiten für Spur 6

Das Übersichtsdiagramm (Abbildung 5.21) zeigt die Verformungsmoduln der dynamischen Vorwärtsfahrt ( $E_{vOszi}$ ) und der statischen Rückwärtsfahrt ( $E_{vStat}$ ), sowie die dynamischen Verformungsmoduln ( $E_{vd}$ ) der dynamischen Lastplattenversuche.

Die Berechnung von  $E_{vOszi}$  und  $E_{vStat}$  erfolgte über die Kontaktlängen zwischen Boden und Bandage (siehe Kapitel 5.1.1).

Aus der Grafik ist erkennbar, dass die Verformungsmoduln mit der Anzahl der Überfahrten sinken. Grund für die Abnahme der Verformungsmoduln sind der bindige Untergrund und die durch die dynamische Verdichtung entstehenden Porenwasserdrücke. Durch das Ansteigen der Porenwasserüberdrücke sinkt die Steifigkeit des Bodens. Durch Abwarten des Abbaus der Überdrücke hätte eine bessere Verdichtung stattgefunden und dies wäre auch in der Grafik durch höhere Verformungsmoduln erkennbar gewesen.

Infolge des extrem weichen Untergrundes ist es während der Messfahrten zu einer starken Wellenbildung an der Oberfläche gekommen. Dadurch kam es insbesondere bei später durchgeführten Messfahrten zu einem Aufschaukeln der Walze. Die Messergebnisse sind somit nur bedingt aussagekräftig.

Vergleicht man diese Abbildung mit den Diagrammen von Spur 2 bzw. Spur 5, so ist deutlich erkennbar, dass die Verformungsmoduln bei der Spur 6 viel kleiner sind, der „weiche“ Untergrund ist aus den Ergebnissen erkennbar.

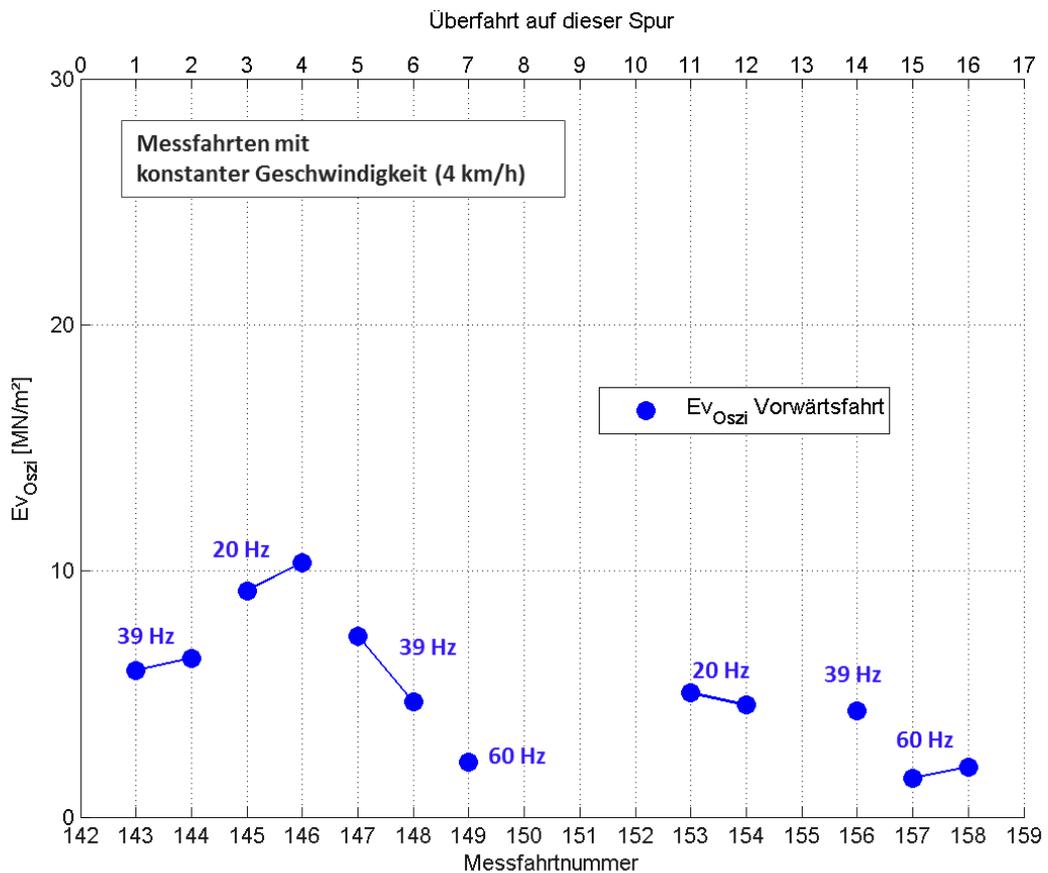


Abbildung 5.22: Auswertung der Frequenzabhängigkeit bei konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) für Spur 6

Abbildung 5.22 zeigt einen Teilbereich des Übersichtsdiagrammes von Abbildung 5.21, wobei nur die Verformungsmoduln der oszillationsbetriebenen Vorwärtsfahrt dargestellt werden.

Die Walze wurde bei den dargestellten Messfahrten mit unterschiedlichen Frequenzen (20 Hz, 39 Hz und 60 Hz) und konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) gefahren.

Die Grafik zeigt eine Frequenzabhängigkeit der Verformungsmoduln: Je größer die Frequenz ist, desto kleiner sind die Verformungsmoduln dieser Messfahrt.

Die ersten Messfahrten zeigen höhere Verformungsmoduln als spätere Messfahrten bei derselben Frequenz. Dies liegt an dem zuvor beschriebenen Porenwasserüberdruck, der sich bei dynamischer Beanspruchung aufbaut.

### 5.2.6 Auswertung und Korrelationsbildung

Eine Korrelation der Verformungsmoduln wurde zur besseren Interpretation der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Moduln gewählt. Die Auswertungen für die Korrelationen wurden für die Messfahrten mit Oszillationsbetrieb bei 39 Hz und 4 km/h gewählt, da dies die Standardeinstellungen für Oszillationsanregung sind. Somit sind bei den folgenden Diagrammen keine  $E_{vVibro}$ -Werte dargestellt. Für die Auswertung wurden alle Spuren betrachtet, um ein breiteres Spektrum an Ergebnissen zu bekommen, somit werden auch die Ergebnisse der Fahrten auf „weichem“ und „steifem“ Boden dargestellt.

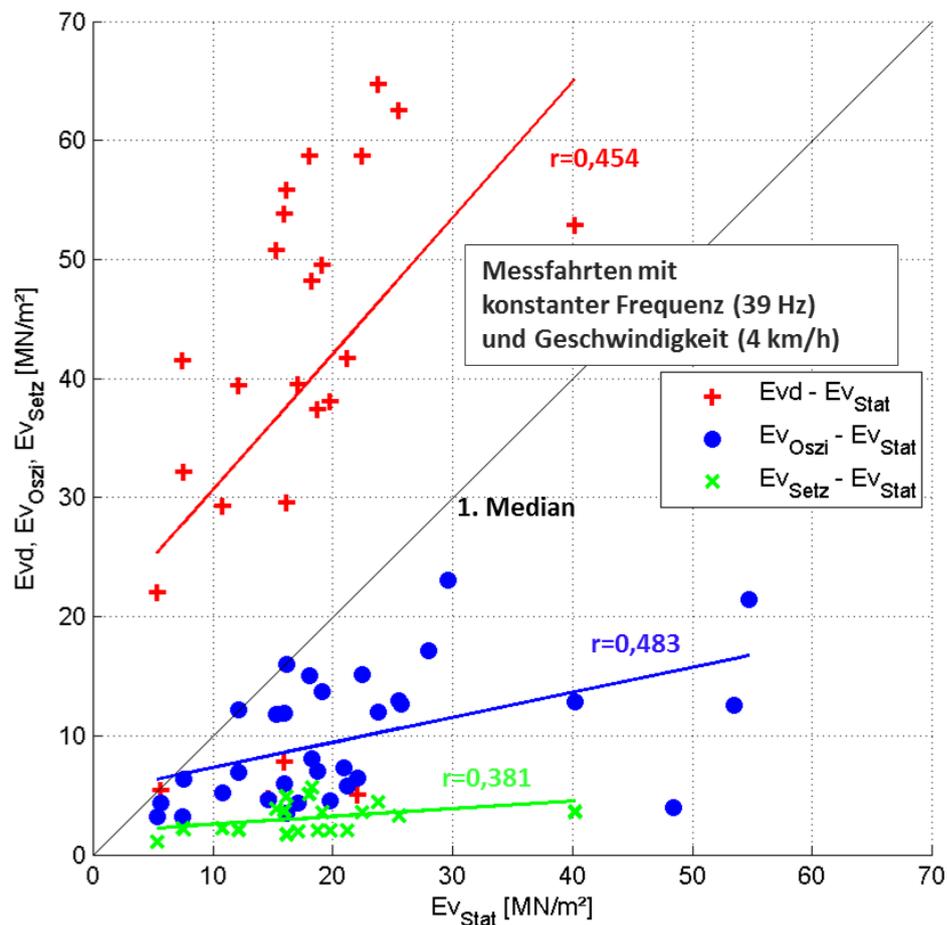


Abbildung 5.23: Korrelation  $E_{vd}-E_{vStat}$ ,  $E_{vOszi}-E_{vStat}$ ,  $E_{vSetz}-E_{vStat}$  für 39 Hz und 4 km/h

Bei der ersten Korrelation, Abbildung 5.23, wird der Verformungsmodul der statischen Rückwärtsfahrten ( $E_{vStat}$ ) als Bezugsgröße auf der x-Achse dargestellt. Da für alle

Messfahrten ein  $E_{vStat}$ -Wert vorhanden war, wurde dieser als Bezug ausgewählt. Setzungen wurden im Vergleich nur bei Messfahrten auf Spur 2 gemessen, da das Setzungsmessgerät nur in dieser Spur eingebaut wurde. Eine Auswertung bezogen auf den  $E_{vSetz}$ -Wert würde somit eine geringere Anzahl an Messpunkten ergeben.

Der Korrelationskoeffizient  $r$  ist ein dimensionsloses Maß, das die Stärke des linearen Zusammenhangs ausdrückt, je höher demnach der Wert ist, desto größer ist die Übereinstimmung der Punkte mit der Geraden.

Bei der dargestellten Korrelation ist ein eindeutiger Trend erkennbar, alle drei Korrelationskoeffizienten liegen jedoch unter 0,5, was eine schlechte Übereinstimmung bedeutet. Der Bezug der Verformungsmoduln auf  $E_{vStat}$  ist somit nicht die beste Lösung.

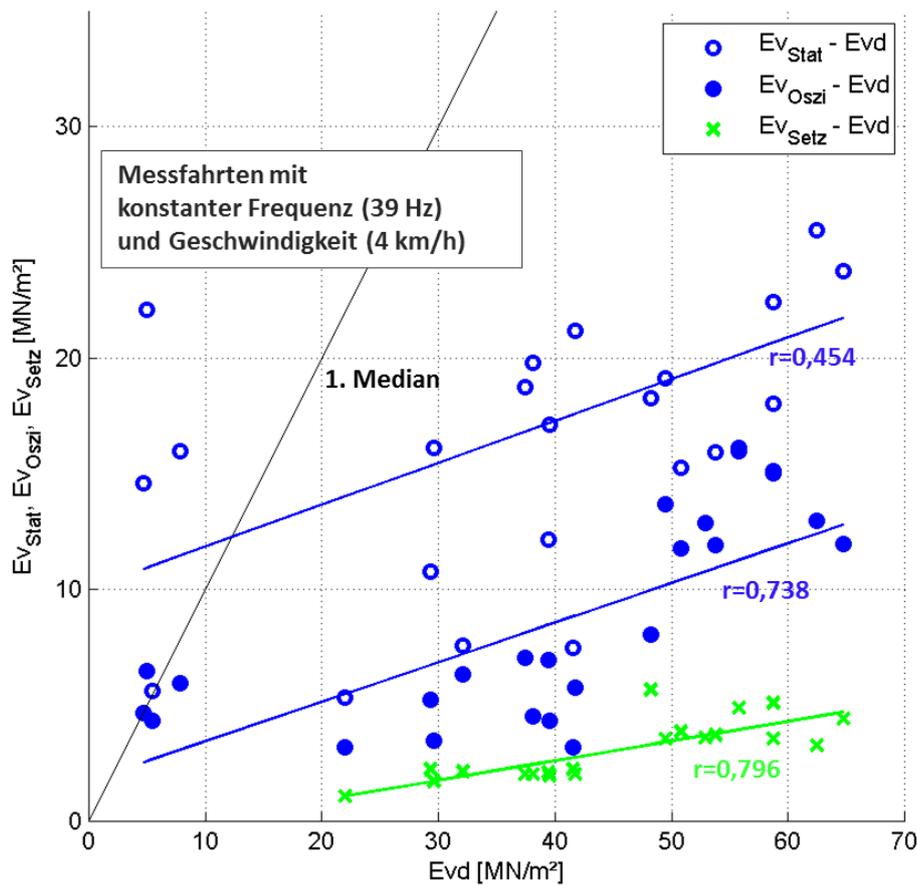


Abbildung 5.24: Korrelation  $E_{vStat}-E_{vd}$ ,  $E_{vOszi}-E_{vd}$ ,  $E_{vSetz}-E_{vd}$  für 39 Hz und 4 km/h

Bei der Korrelation in Abbildung 5.24 wird der dynamische Verformungsmodul ( $E_{vd}$ ) des

dynamischen Lastplattenversuches als Bezugsgröße auf der x-Achse verwendet.

Die Korrelationen sind in dieser Darstellung deutlicher erkennbar. Ein besserer Zusammenhang zwischen  $E_{vOszl}$ - $E_{vd}$  bzw.  $E_{vSetz}$ - $E_{vd}$  ist erkennbar, der Korrelationskoeffizient liegt beide Male zwischen 0,7 und 0,8. Dies ist eine gute Übereinstimmung, besonders da auch eventuelle Ausreißer der Messergebnisse nicht von der Korrelation ausgeschlossen wurden.

Die flache Gerade in der Korrelation bedeutet, dass bei stark zunehmendem  $E_{vd}$ -Wert der  $E_{vOszl}$ - bzw.  $E_{vSetz}$ -Wert nur minimal ansteigt. Eine genaue Messung der  $E_{vOszl}$ - bzw.  $E_{vSetz}$ -Werte ist erforderlich, denn auch nur eine geringe Ungenauigkeit, würde beim Ablesen der zugehörigen  $E_{vd}$ -Werte zu großen Unterschieden führen.

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

## 6.1 Zusammenfassung

Großmaßstäbliche Feldversuche zur Untersuchung der Verdichtungswirkung unterschiedlich angeregter Bandage einer Erdbauwalze waren der Ausgangspunkt dieser Arbeit.

Das Leitmotiv war die Berechnung des Verformungsmoduls des Bodens über die Messung der Kontaktlänge zwischen Walzenbandage und Boden und der anschließende Vergleich bzw. der Nachweis einer Korrelation mit dem dynamischen Verformungsmodul des dynamischen Lastplattenversuches.

Am Beginn der Diplomarbeit wurden die Grundlagen der Oberflächenverdichtung erarbeitet. Die unterschiedlichen Betriebszustände und Bewegungsverhalten der verschieden dynamisch angeregten Walzen sowie verschiedene Arten von Walzen und Bandagen wurden beschrieben. Außerdem wurden die momentan auf dem Markt angewendeten Kontrollmessungen des Verdichtungserfolges erläutert.

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit waren die Verdichtungsversuche mit der Walze der Firma HAMM AG in Fischamend im Frühjahr 2014. Die Messausrüstung für die Versuche wurde sowohl auf der Walze selbst montiert als auch in den Untergrund eingebaut. Die Kontaktlängen zwischen Bandage und Boden wurden mit Potentiometern gemessen, diese waren für die weitere Auswertung die wichtigsten Daten. Außerdem wurden die Setzungen mit dem im Boden eingebauten Setzungsmessgerät aufgezeichnet. Zwischen den Überfahrten wurden zusätzlich Vergleichsversuche mit der dynamischen Lastplatte gemacht und so die dynamischen Verformungsmoduln ermittelt.

Die aufgezeichneten Kontaktlängen und Setzungen wurden mit der Theorie der Hertz'schen Pressung ausgewertet und in Verformungsmoduln umgerechnet. Anschließend wurden diese Verformungsmoduln den dynamischen Verformungsmoduln der dynamischen Lastplattenversuche gegenübergestellt. Eine eindeutige Korrelation war nicht erkennbar, doch die Gegenüberstellungen von den Verformungsmoduln der oszillatorischen Vorwärtsfahrten

bzw. die Verformungsmoduln der Setzungsmessungen mit den dynamischen Verformungsmoduln ergaben brauchbare Ergebnisse und Zusammenhänge.

Bei den Verformungsmoduln der dynamischen Überfahrten muss beachtet werden, dass diese geschwindikeits- und frequenzabhängig sind. Hohe Frequenzen bzw. niedrige Geschwindigkeiten liefern kleine Verformungsmoduln. Die Bandage „rüttelt“ sich bei einer höheren Frequenz stärker in den Boden, wodurch die Kontaktlänge steigt und der Verformungsmodul dieser Messfahrt sinkt. Bei kleineren Geschwindigkeiten hat die Bandage einen längeren Aufenthalt an einer Stelle als bei höheren Geschwindigkeiten, wodurch sich die Walze stärker in den Boden „rüttelt“. Somit ist der dazugehörige Verformungsmodul kleiner als bei größeren Geschwindigkeiten.

Die Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche sind im Gegensatz zu den Kontaktlängen unabhängig von der Art der Verdichtung und den Parametereinstellungen der Walze.

Ein Unterschied in den Ergebnissen der dynamischen Verformungsmoduln und der Verformungsmoduln aus den Kontaktlängen ist sicherlich auch durch die Geschwindigkeits- bzw. Frequenzabhängigkeit verursacht.

Ein weiterer wichtiger Grund für die Unterschiede der  $E_{vd}$ -Werte der dynamischen Lastplattenversuche und den Verformungsmoduln aus der Kontaktlängenberechnung besteht darin, dass sich die Messtiefe beider Verfahren sehr stark voneinander unterscheidet. Die Kontaktlänge der Bandage wird an der Oberfläche gemessen, wo der Boden einen anderen Spannungszustand aufweist und weicher erscheint. Somit führen die gemessenen Kontaktlängen zu einer Unterschätzung der Bodensteifigkeit. Die Messtiefe der dynamischen Lastplatte hingegen ist eine ganz andere, der Boden ist in dem Bereich schon kontinuumsähnlicher, wodurch sich andere Messergebnisse ergeben.

Die unterschiedliche Art der Belastung (stoßförmig bzw. kontinuierlich und dynamisch) und die unterschiedliche Form der Aufstandsfläche (kreisförmig bzw. rechteckig) sind ebenfalls Grund für unterschiedliche Ergebnisse der verschieden berechneten Verformungsmoduln.

Auch liefern punktuelle (wie bei den dynamischen Lastplattenversuchen oder Setzungsmessungen) bzw. flächenhafte (wie bei den Kontaktlängenmessungen) Untergrunduntersuchungen verschiedene Verformungsmoduln.

Ein weiterer Grund für die überschätzte Kontaktlänge besteht darin, dass sich bei der Überfahrt der Walze eine Bug- und eine Heckwelle ausbildet. Durch dieses zusätzliche Bodenmaterial wird eine größere Kontaktlänge gemessen als tatsächlich vorhanden ist. Aus

einer größeren Kontaktlänge wird wiederum ein kleinerer Verformungsmodul berechnet. Auch werden verschiedene Ansätze der ausgebildeten Setzungsmulde durch die unterschiedlichen Theorien angewandt. So wird die Theorie der Hertz'schen Pressung für die Verformungsmodulberechnung aus den Kontaktlängen und die Theorie des elastisch-isotropen Halbraumes für die Auswertung der dynamischen Lastplattenversuche herangezogen. Keine der beiden Theorien berücksichtigt jedoch die in der Realität auftretende Bug- und Heckwellenausbildung.

Bezüglich der Bug- und Heckwellen kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die gemessenen Bugwellen größer waren als die Heckwellen und zumeist die dynamische Vorwärtsfahrt eine größere Asymmetrie zugunsten der Bugwelle hervorrief als die statische Rückwärtsfahrt.

Die Auswertung der Setzungen hat ergeben, dass die plastischen Setzungen während der ersten Messfahrten stark abnehmen, ein Großteil der Verdichtung findet demnach während der ersten Überfahrten statt. Die plastischen Setzungen sind im Vergleich zu den elastischen Setzungen geringer, die bereits stattgefundene Verdichtung spiegelt sich in den zunehmend geringer werdenden plastischen Setzungen wider.

Die Setzungen, die bei der Vorwärtsfahrt auftreten, sind größer als bei der Rückwärtsfahrt, dies liegt an der dynamischen Verdichtung während der Vorwärtsfahrt. Die Bandage „rüttelt“ sich bei der Vorwärtsfahrt tiefer in den Boden, wodurch die aus den Kontaktlängen rückgerechneten Setzungen größer sind als bei der statischen Rückwärtsfahrt.

## 6.2 Ausblick

Die Parameterabhängigkeit ist in den Messergebnissen der Kontaktlängen deutlich erkennbar. Jedoch ist bei konstanten Einstellungen der Frequenz und Geschwindigkeit eine Korrelation der Trendlinien vorhanden. Ein Unterschied der Verformungsmoduln aus den Kontaktlängenmessungen zu den gemessenen dynamischen Verformungsmoduln der dynamischen Lastplattenversuche besteht auch bei konstanten Parametereinstellungen weiterhin, doch dieser Unterschied ist erklärbar und nicht weiter problematisch, da es sich um mit unterschiedlichen Methoden ermittelte Werte handelt. Somit können die ermittelten Verformungsmoduln nur bei konstant gehaltenen Walzeneinstellungen mit zuvor definierten Parametern als Verdichtungskontrolle herangezogen werden. Eine Änderung der Ergebnisse würde, unter Voraussetzung konstanter Parametereinstellungen, somit auf eine Änderung des Bodenverhaltens, insbesondere der Bodensteifigkeit, schließen lassen.

Die Berechnung des Verformungsmoduls ist sowohl für statische Überfahrten als auch für solche mit oszillatorischer Anregung der Bandage möglich. Die Kontaktlänge einer vibratorisch angeregten Bandage kann mit den Formeln der Hertz'schen Pressung nicht ermittelt werden, da die Bodenkontaktkraft in diesem Fall durch den Betriebszustand Abheben stark beeinflusst wird und nicht der statischen Kraft entspricht, die bei der Auswertung vorausgesetzt wird.

Das Verfahren zur Berechnung des Verformungsmoduls über die Kontaktlänge kann im Unterschied zu FDVK-Systemen auch für statische Überfahrten herangezogen werden. Eine „Flächendeckende **Statische** Verdichtungskontrolle“ (FSVK) mit Walzen wäre somit erstmals möglich. Bei der bereits für Vibrationswalzen entwickelten FDVK ist eine Anwendung bei statischen Verdichtungsfahrten hingegen nicht möglich und auch nicht sinnvoll, da immer eine dynamische Bandagenanregung benötigt wird.

Weitere Untersuchungen für FSVK für verschiedene Böden und Schüttlagen mit konstanten Walzeinstellungen wären lohnenswert, da weitere Ergebnisse für eine breitere Anwendung gewonnen werden könnten.

Somit ist auf jeden Fall Potenzial für eine weiterführende Entwicklung gegeben.

# Literaturverzeichnis

- [1] ADAM, D.: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen*. Wien : Dissertation, 1996
- [2] ADAM, D.: Aktuelle Entwicklungen im Erd- und Grundbau für Straßen und Eisenbahnen. In: *9.Erdbaufachtagung - aktuelle Entwicklungen in der Geotechnik*. Leipzig, 2013
- [3] ADAM, D.: *Studienunterlagen zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*. Wien : Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Wien, 2013
- [4] ADAM, D. ; KOPF, F.: *Studienunterlagen zur Bodendynamik*. Wien : Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Wien, 2013
- [5] BAUER, H.: *Baubetrieb*. Berlin : Springer-Verlag, 2007
- [6] BÖGE, A.: *Technische Mechanik - Statik - Dynamik - Fluidmechanik - Festigkeitslehre*. Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2011
- [7] BRANDL, H. ; ADAM, D. ; KOPF, F. ; NIEDERBRUCKER, R.: Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät. In: *Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten - Straßenforschung, Heft 533* (2003)
- [8] GRABE, J.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle. In: *Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe* (1992)
- [9] HAGER, M.: *Messwerte der Flächendeckenden dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) im theoretischen und experimentellen Vergleich*. Wien : Diplomarbeit, 2014
- [10] HAMM-AG: *Broschüren, Prospekte und Produktdatenblätter*. Tirschenreuth, Deutschland,
- [11] JODL, H.: *Studienunterlagen zur Vorlesung Bauverfahrenstechnik*. Wien : Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement an der Technischen Universität Wien, 2010

- [12] KÖNIG, H.: *Maschinen im Baubetrieb - Grundlagen und Anwendungen*. Augsburg : Vieweg+Teubner, 2011
- [13] KOPF, F.: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bei der Verdichtung von Böden durch dynamische Walzen mit unterschiedlichen Anregungsarten*. Wien : Dissertation, 1999
- [14] KOPF, F.: Grundsatzversuch Oszillationsverdichtung Fischamend. Power Point Präsentation. (2012)
- [15] KOPF, F.: Großversuch Oszillationsverdichtung Fischamend. Power Point Präsentation. (2014)
- [16] KOPF, F. ; ADAM, D. ; PAULMICHL, I.: Untersuchungen des dynamischen Lastplattenversuches mit dem Leichten Fallgewichtsgerät unter Verwendung der Randelementmethode. In: *Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, Heft 4-5/2005* (2005)
- [17] KOPF, F. ; ADAM, D. ; PAULMICHL, I.: Untersuchungen des statischen Lastplattenversuches mit der Randelementmethode. In: *Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, Heft 4-5/2005* (2005)
- [18] KRZEMIEN, R. ; LANGER, W. ; ROTH, W. ; THURNER, H.: Oszillierende Verdichtung und flächendeckende Verdichtungskontrolle von ungebundenen Schichten. In: *Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten - Straßenforschung, Heft 445* (1995)
- [19] MARKIEWICZ, R.: *Untersuchungen zur Arbeitsweise und Tiefenwirkung der Polygonbandage auf nicht bindigem Boden*. Wien : Dissertation, 2001
- [20] ÖNORM B 4414-2: *Erd- und Grundbau - Untersuchungen von Bodenproben - Bestimmungen der Dichte - Feldverfahren*. Oktober 1979
- [21] ÖNORM B 4417: *Erd- und Grundbau - Untersuchungen von Böden - Lastplattenversuch*. Dezember 1979
- [22] ÖNORM B 4418: *Geotechnik - Durchführung von Proctorversuchen im Erdbau*. Jänner 2007
- [23] ÖNORM B 4419: *Geotechnik - Besondere Rammsondierversahren*. Dezember 2006
- [24] ÖNORM EN ISO 22476-2: *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 2: Rammsondierungen*. April 2005

- [25] PISTROL, J. ; FALKNER, F. ; ADAM, D. ; ADAM, C.: Numerische Simulation zur Wirkungsweise verschiedener Bandagetypen bei der Verdichtung mit Walzen im Erdbau. In: *2. Symposium Baugrundverbesserung in der Geotechnik* (2012)
- [26] RVS 08.03.01: *Erdarbeiten*. Oktober 2010
- [27] RVS 08.03.02: *Erdarbeiten - Kontinuierlicher walzenintegrierter Verdichtungsnachweis*. Juli 1999
- [28] RVS 08.03.04: *Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuch*. Juni 2008
- [29] STEINHILPER, W. ; SAUER, B.: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1 - Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen*. Berlin : Springer-Verlag, 2012
- [30] STUDER, J. ; LAUE, J. ; KOLLER, M.: *Bodendynamik - Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze*. Berlin : Springer, 2007

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufbau und Anregung der Bandage einer Vibrationswalze [2] . . . . .	6
2.2	Kleine und große Amplitude der Bandage einer Vibrationswalze mit geteilter Unwucht [3] . . . . .	7
2.3	Aufbau und Anregung der Bandage einer Oszillationswalze [4, bearbeitet]	8
2.4	Variation der Richtung der Erregereinheit bei Walzen mit Richtschwinger [4]	9
2.5	Selbstregelnde Walze mit Veränderung der Ausrichtung der Erregereinheiten je nach Bodensteifigkeit [12] . . . . .	10
2.6	Betriebszustände einer Vibrationswalze [4] . . . . .	11
2.7	Walzenzug [12] . . . . .	15
2.8	Tandemwalze [12, bearbeitet] . . . . .	15
2.9	Arten den Bandagen: a) Glattmantelbandage, b) Schafffußbandage, c) Polygonbandage [25, bearbeitet] . . . . .	16
2.10	Wirkungsweise der Polygonbandage [4] . . . . .	17
2.11	Tiefenwirkung der Polygonbandage [2] . . . . .	17
2.12	Mindestanforderungen an die Verdichtung lt. RVS 08.03.01 [26] . . . . .	20
2.13	Proctorkurve des Standard- und modifizierten Proctorversuchs [3] . . . . .	21
2.14	Ausstechzylinder [20] . . . . .	22
2.15	Isotopsonde nach Troxler [3] . . . . .	24
2.16	Versuchsaufbau der statischen Lastplatte [21] . . . . .	25
2.17	Last-Verformungs-Diagramm des statischen Lastplattenversuchs [3, bearbeitet] . . . . .	26
2.18	Versuchsaufbau der dynamischen Lastplatte [3] . . . . .	27
2.19	Bodenpressung, Verschiebung und Arbeitsdiagramm der dynamischen Lastplatte [3] . . . . .	28
2.20	FDVK-Messsystem und Auswertung der Beschleunigungssignale [2] . . . . .	31
2.21	FDVK-Messwerte CMV, Omega, $E_{VIB}$ und $k_B$ für Vibrationswalzen [2] . . . . .	32

2.22	Verlauf der FDVK-Messgrößen aus Simulationsberechnungen von unterschiedlich stark angeregten Vibrationswalzen auf homogenem Untergrund variabler Steifigkeit [2] . . . . .	33
2.23	Vergleich der FDVK-Messwerte bei den verschiedenen Betriebszuständen [4]	34
3.1	Spuren 1 - 4, a) dynamischer Lastplattenversuch, b) Nivellement . . . . .	37
3.2	Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung . . . . .	38
3.3	Kennzahlen der Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung . . . . .	38
3.4	Kornverteilungslinie der Spur 1-4 nach der Verdichtung . . . . .	39
3.5	Kennzahlen der Kornverteilungslinie der Spur 1-4 nach der Verdichtung . . . . .	39
3.6	Skizze von Lage und Abmessungen Spur 1 - 4 [15, bearbeitet] . . . . .	40
3.7	Schüttung der Schwachstelle in der ersten und zweiten Lage . . . . .	40
3.8	Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung . . . . .	41
3.9	Kennzahlen der Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung . . . . .	41
3.10	Spur 6-7 und die extreme Wellenbildung in diesen Spuren . . . . .	42
3.11	Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung . . . . .	43
3.12	Kennzahlen der Kornverteilungslinie der Spur 1-4 vor der Verdichtung . . . . .	43
3.13	Walze HD+ 90 VO der Firma HAMM AG . . . . .	44
3.14	Produktdatenblatt der HD+ 90 VO der Firma HAMM AG [10] . . . . .	46
3.15	Rotierendes Messsystem Oszillationsbandage [15, bearbeitet] . . . . .	48
3.16	Translatorisches Messsystem Walze [15, bearbeitet] . . . . .	48
3.17	Skizze Potentiometer [15] . . . . .	49
3.18	Referenzrad zur Bestimmung der Asymmetrie . . . . .	49
3.19	Skizze des Setzungsmessgerätes [13, bearbeitet] . . . . .	51
3.20	Druckmessdose, Beschleunigungsaufnehmer . . . . .	52
3.21	Setzungsmessgerät während des Einbaus und in Endlage . . . . .	52
3.22	Messungen zur Erschütterungsausbreitung mit den entlang einer Linie aufgestellten Beschleunigungssensoren . . . . .	53
3.23	Skizze Lage Spur 1 - 5 mit Messsensoren und Schwachstellen [15, bearbeitet]	53
3.24	Skizze Schnitt der Spur 2 mit Messsensoren und Schwachstellen [15, bearbeitet] . . . . .	54
3.25	Aufnahmen mit drei Kameras . . . . .	56
3.26	Durchführung des Sandersatzverfahrens . . . . .	57
3.27	Ergebnisse des Sandersatzverfahrens . . . . .	58
4.1	Flächenpressung Zylinder-Zylinder [6] . . . . .	62

5.1	Bodenkontaktkraft der oszillatorischen Vorwärtsfahrt . . . . .	68
5.2	Skizze Setzungsmessungen in Spur 2 . . . . .	69
5.3	Gegenüberstellung Theorie Hertz'sche Pressung, elastisch-isotroper Halb- raum und Realität . . . . .	70
5.4	Bug- und Heckwelle [15, bearbeitet] . . . . .	71
5.5	Übersichtsdiagramm der $E_{vd}$ und $E_{vStat}$ -Werte für variable Geschwin- digkeiten bei statischen Überfahrten für Spur 1, Schüttlage 2 . . . . .	74
5.6	Auswertung der Geschwindigkeitsabhängigkeit bei statischen Überfahrten für Spur 1, Schüttlage 2 . . . . .	75
5.7	Übersichtsdiagramm der $E_{vd}$ , $E_{vSetz}$ , $E_{vOszi}$ und $E_{vStat}$ -Werte für variable Frequenzen und Geschwindigkeiten für Spur 2, Schüttlage 1 . . . . .	76
5.8	Auswertung der Geschwindigkeitsabhängigkeit bei konstanter Frequenz (39 Hz) für Spur 2, Schüttlage 1 . . . . .	79
5.9	Auswertung der Frequenzabhängigkeit bei konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 1 . . . . .	80
5.10	Auswertung der $E_{vd}$ , $E_{vSetz}$ , $E_{vOszi}$ und $E_{vStat}$ -Werte für konstante Walzeinstellungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 1 . . . . .	81
5.11	Auswertung der Bug- und Heckwellenlängen für konstante Walzeinstel- lungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 1 . . . . .	82
5.12	Auswertung der Setzungen für konstante Walzeinstellungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 1 . . . . .	83
5.13	Übersichtsdiagramm der $E_{vd}$ , $E_{vSetz}$ , $E_{vOszi}$ und $E_{vStat}$ -Werte für variable Frequenzen und Geschwindigkeiten für Spur 2, Schüttlage 2 . . . . .	85
5.14	Auswertung der Geschwindigkeitsabhängigkeit bei konstanter Frequenz (39 Hz) für Spur 2, Schüttlage 2 . . . . .	87
5.15	Auswertung der Frequenzabhängigkeit bei konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 2 . . . . .	88
5.16	Auswertung der $E_{vd}$ , $E_{vSetz}$ , $E_{vOszi}$ und $E_{vStat}$ -Werte für konstante Walzeinstellungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 2 . . . . .	89
5.17	Auswertung der Bug- und Heckwellenlängen für konstante Walzeinstel- lungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 2 . . . . .	91
5.18	Auswertung der Setzungen für konstante Walzeinstellungen (39 Hz, 4 km/h) für Spur 2, Schüttlage 2 . . . . .	92
5.19	Übersichtsdiagramm der $E_{vOszi}$ und $E_{vStat}$ -Werte für variable Frequenzen und Geschwindigkeiten für Spur 5 . . . . .	94

5.20	Auswertung der Frequenzabhängigkeit bei konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) für Spur 5 . . . . .	96
5.21	Übersichtsdiagramm der $E_{vd}$ , $E_{vOszi}$ und $E_{vStat}$ -Werte für variable Fre- quenzen und Geschwindigkeiten für Spur 6 . . . . .	97
5.22	Auswertung der Frequenzabhängigkeit bei konstanter Geschwindigkeit (4 km/h) für Spur 6 . . . . .	99
5.23	Korrelation $E_{vd}-E_{vStat}$ , $E_{vOszi}-E_{vStat}$ , $E_{vSetz}-E_{vStat}$ für 39 Hz und 4 km/h	100
5.24	Korrelation $E_{vStat}-E_{vd}$ , $E_{vOszi}-E_{vd}$ , $E_{vSetz}-E_{vd}$ für 39 Hz und 4 km/h . .	101

# **A Messfahrtprotokolle**

Im Folgenden werden die Protokolle der Messfahrten vom April 2014 aufgelistet. In den Tabellen sind die Parameter und Walzeneinstellungen zur jeweiligen Messfahrt für den besseren Überblick dargestellt.

# A MESSFAHRTPROTOKOLLE

Messfahrtnummer	Datum	Spur	Schüttlage	Anregungsart	Amplitude	Frequenz [Hz]	Geschwindigkeit [km/h]
1	23.04.2014	1	1	statisch	statisch	statisch	4
2	23.04.2014	1	1	statisch	statisch	statisch	4
3	23.04.2014	1	1	statisch	statisch	statisch	2
4	23.04.2014	1	1	statisch	statisch	statisch	2
5	23.04.2014	1	1	statisch	statisch	statisch	4
6	23.04.2014	1	1	statisch	statisch	statisch	4
7	23.04.2014	1	1	statisch	statisch	statisch	6
8	23.04.2014	1	1	statisch	statisch	statisch	6
9	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
10	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
11	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
12	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
13	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	2
14	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	2
15	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
16	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
17	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	6
18	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	6
19	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	20	4
20	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	20	4
21	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
22	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
23	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	60	4
24	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	60	4
25	23.04.2014	2	1	Oszi	groß	39	4
26*	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
27*	23.04.2014	2	1	Oszi	groß	39	4
28	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
29	23.04.2014	4	1	Oszi/Vibro	klein/klein	39/50	2
30	23.04.2014	4	1	Oszi/Vibro	klein/klein	39/50	2
31	23.04.2014	4	1	Oszi/Vibro	klein/klein	39/50	4
32	23.04.2014	4	1	Oszi/Vibro	klein/klein	39/50	4
33	23.04.2014	4	1	Oszi/Vibro	klein/klein	39/50	6
34	23.04.2014	4	1	Oszi/Vibro	klein/klein	39/50	6
35	23.04.2014	4	1	Oszi/Vibro	klein/klein	20/40	4
36	23.04.2014	4	1	Oszi/Vibro	klein/klein	20/40	4
37	23.04.2014	4	1	Oszi/Vibro	klein/klein	60/60	4
38	23.04.2014	4	1	Oszi/Vibro	klein/klein	60/60	4
39	23.04.2014	3	1	Vibro	groß	40	2
40	23.04.2014	3	1	Vibro	groß	40	2
41	23.04.2014	3	1	Vibro	groß	40	4
42	23.04.2014	3	1	Vibro	groß	40	4

# A MESSFAHRTPROTOKOLLE

Messfahrtnummer	Datum	Spur	Schüttlage	Anregungsart	Amplitude	Frequenz [Hz]	Geschwindigkeit [km/h]
43	23.04.2014	3	1	Vibro	groß	40	6
44	23.04.2014	3	1	Vibro	groß	40	6
45	23.04.2014	3	1	Vibro	groß	gleitend 30-50	4
46	23.04.2014	3	1	Vibro	groß	gleitend 30-50	4
47	23.04.2014	3	1	Vibro	klein	50	2
48	23.04.2014	3	1	Vibro	klein	50	2
49	23.04.2014	3	1	Vibro	klein	50	4
50	23.04.2014	3	1	Vibro	klein	50	4
51*	23.04.2014	3	1	Vibro	klein	50	6
52	23.04.2014	3	1	Vibro	klein	50	6
53	23.04.2014	3	1	Vibro	klein	gleitend 40-60	4
54	23.04.2014	3	1	Vibro	klein	gleitend 40-60	4
55	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
56	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
57	23.04.2014	2	1	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
58*	24.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
59	24.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
60	24.04.2014	2	1	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
61	24.04.2014	2	1	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
62*	24.04.2014	2	1	Oszi	groß	39	4
63	24.04.2014	2	1	Oszi	groß	39	4
64*	24.04.2014	2	1	Oszi	groß	gleitend 20-60	4
65	24.04.2014	2	1	Oszi	groß	gleitend 20-60	4
66	24.04.2014	2	1	Oszi	klein	20	4
67	24.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
68	24.04.2014	2	1	Oszi	klein	60	4
69	24.04.2014	2	1	Vibro	groß	40	4
70	24.04.2014	2	1	Vibro	groß	40	4
71	24.04.2014	2	1	Vibro	groß	40	2
72	24.04.2014	2	1	Vibro	groß	40	2
73	24.04.2014	2	1	Vibro	groß	40	6
74	24.04.2014	2	1	Vibro	groß	40	6
75	24.04.2014	2	1	Vibro	groß	gleitend 30-50	4
76	24.04.2014	2	1	Vibro	groß	gleitend 30-50	4
77	24.04.2014	2	1	Vibro	klein	50	2
78	24.04.2014	2	1	Vibro	klein	50	2
79	24.04.2014	2	1	Vibro	klein	50	4
80	24.04.2014	2	1	Vibro	klein	50	4
81	24.04.2014	2	1	Vibro	klein	50	6
82	24.04.2014	2	1	Vibro	klein	50	6
83	24.04.2014	2	1	Vibro	klein	gleitend 40-60	4
84	24.04.2014	2	1	Vibro	klein	gleitend 20-60	4

# A MESSFAHRTPROTOKOLLE

Messfahrtnummer	Datum	Spur	Schüttlage	Anregungsart	Amplitude	Frequenz [Hz]	Geschwindigkeit [km/h]
85	24.04.2014	2	1	Vibro	klein	gleitend 20-60	4
86	24.04.2014	5	1	Vibro	groß	30	4
87	24.04.2014	5	1	Vibro	groß	30	4
88	24.04.2014	5	1	Vibro	groß	40	4
89	24.04.2014	5	1	Vibro	groß	40	4
90	24.04.2014	5	1	Vibro	groß	50	4
91	24.04.2014	5	1	Vibro	groß	50	4
92	24.04.2014	5	1	Vibro	groß	gleitend 30-50	4
93	24.04.2014	5	1	Vibro	groß	gleitend 30-50	4
94	24.04.2014	5	1	Vibro	klein	40	4
95	24.04.2014	5	1	Vibro	klein	40	4
96	24.04.2014	5	1	Vibro	klein	50	4
97	24.04.2014	5	1	Vibro	klein	50	4
98	24.04.2014	5	1	Vibro	klein	60	4
99	24.04.2014	5	1	Vibro	klein	60	4
100	24.04.2014	5	1	Vibro	klein	gleitend 20-60	4
101	24.04.2014	5	1	Vibro	klein	gleitend 20-60	4
102	24.04.2014	5	1	Oszi	klein	20	4
103	24.04.2014	5	1	Oszi	klein	20	4
104	24.04.2014	5	1	Oszi	klein	20	4
105	24.04.2014	5	1	Oszi	klein	39	4
106	24.04.2014	5	1	Oszi	klein	39	4
107*	24.04.2014	5	1	Oszi	klein	60	4
108	24.04.2014	5	1	Oszi	klein	60	4
109	24.04.2014	5	1	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
110	24.04.2014	5	1	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
111	24.04.2014	5	1	Oszi	groß	20	4
112	24.04.2014	5	1	Oszi	groß	20	4
113	24.04.2014	5	1	Oszi	groß	39	4
114	24.04.2014	5	1	Oszi	groß	39	4
115	24.04.2014	5	1	Oszi	groß	60	4
116	24.04.2014	5	1	Oszi	groß	60	4
117	24.04.2014	5	1	Oszi	groß	gleitend 20-60	4
118*	24.04.2014	5	1	Oszi	groß	gleitend 20-60	4
119	24.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
120	24.04.2014	2	1	Oszi	klein	39	4
143	28.04.2014	6	1	Oszi	klein	39	4
144	28.04.2014	6	1	Oszi	klein	39	4
145	28.04.2014	6	1	Oszi	klein	20	4
146	28.04.2014	6	1	Oszi	klein	20	4
147	28.04.2014	6	1	Oszi	klein	39	4
148	28.04.2014	6	1	Oszi	klein	39	4

# A MESSFAHRTPROTOKOLLE

Messfahrtnummer	Datum	Spur	Schüttlage	Anregungsart	Amplitude	Frequenz [Hz]	Geschwindigkeit [km/h]
149	28.04.2014	6	1	Oszi	klein	60	4
150*	28.04.2014	6	1	Oszi	klein	60	4
151	28.04.2014	6	1	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
152	28.04.2014	6	1	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
153	28.04.2014	6	1	Oszi	groß	20	4
154	28.04.2014	6	1	Oszi	groß	20	4
155*	28.04.2014	6	1	Oszi	groß	39	4
156	28.04.2014	6	1	Oszi	groß	39	4
157	28.04.2014	6	1	Oszi	groß	60	4
158	28.04.2014	6	1	Oszi	groß	60	4
159	28.04.2014	6	1	Oszi	groß	gleitend 20-60	4
160	28.04.2014	6	1	Oszi	groß	gleitend 20-60	4
161*	28.04.2014	6	1	Vibro	groß	40	4
162	28.04.2014	6	1	Vibro	klein	50	4
164	28.04.2014	7	1	Vibro	groß	30	4
165	28.04.2014	7	1	Vibro	groß	30	4
166*	28.04.2014	7	1	Vibro	groß	40	4
167*	28.04.2014	7	1	Vibro	groß	40	4
168*	28.04.2014	7	1	Vibro	groß	50	4
169	28.04.2014	7	1	Vibro	groß	gleitend 30-50	4
170	28.04.2014	7	1	Vibro	groß	gleitend 30-50	4
171	28.04.2014	7	1	Vibro	klein	gleitend 20-60	4
172	28.04.2014	7	1	Vibro	klein	gleitend 20-60	4
173	28.04.2014	7	1	Vibro	klein	50	4
174	28.04.2014	7	1	Vibro	klein	50	4
175	29.04.2014	1	2	statisch	statisch	statisch	4
176	29.04.2014	1	2	statisch	statisch	statisch	4
177	29.04.2014	1	2	statisch	statisch	statisch	2
178	29.04.2014	1	2	statisch	statisch	statisch	2
179	29.04.2014	1	2	statisch	statisch	statisch	4
180	29.04.2014	1	2	statisch	statisch	statisch	4
181	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	4
182*	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	4
183	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	4
184	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	4
185	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	2
186*	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	2
187	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	4
188	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	4
189	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	6
190	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	6
191	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	20	4

# A MESSFAHRTPROTOKOLLE

Messfahrtnummer	Datum	Spur	Schüttlage	Anregungsart	Amplitude	Frequenz [Hz]	Geschwindigkeit [km/h]
192	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	20	4
193	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	4
194	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	4
195	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	60	4
196*	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	60	4
197	29.04.2014	2	2	Oszi	groß	39	4
198	29.04.2014	2	2	Oszi	groß	39	4
199	29.04.2014	2	2	Oszi	groß	gleitend 20-60	4
200	29.04.2014	2	2	Oszi	groß	gleitend 20-60	4
201*	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
202	29.04.2014	2	2	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
203	29.04.2014	4	2	Oszi/Vibro	klein/klein	39/50	2
204	29.04.2014	4	2	Oszi/Vibro	klein/klein	39/50	2
205	29.04.2014	4	2	Oszi/Vibro	klein/klein	39/50	4
206	29.04.2014	4	2	Oszi/Vibro	klein/klein	39/50	4
207	29.04.2014	4	2	Oszi/Vibro	klein/klein	20/40	4
208	29.04.2014	4	2	Oszi/Vibro	klein/klein	20/40	4
209	29.04.2014	4	2	Oszi/Vibro	klein/klein	60/60	4
210	29.04.2014	4	2	Oszi/Vibro	klein/klein	60/60	4
211	29.04.2014	3	2	Vibro	groß	40	2
212	29.04.2014	3	2	Vibro	groß	40	4
214	30.04.2014	2	2	Oszi	klein	20	4
215	30.04.2014	2	2	Oszi	klein	20	4
216*	30.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	4
217	30.04.2014	2	2	Oszi	klein	39	4
218*	30.04.2014	2	2	Oszi	klein	60	4
219	30.04.2014	2	2	Oszi	klein	60	4
220	30.04.2014	2	2	Vibro	klein	40	4
221	30.04.2014	2	2	Vibro	klein	40	4
222	30.04.2014	2	2	Vibro	klein	50	4
223	30.04.2014	2	2	Vibro	klein	50	4
224	30.04.2014	2	2	Vibro	klein	60	4
225*	30.04.2014	2	2	Vibro	klein	60	4
226	30.04.2014	2	2	Vibro	groß	30	4
227	30.04.2014	2	2	Vibro	groß	30	4
228*	30.04.2014	2	2	Vibro	groß	40	4
229*	30.04.2014	2	2	Vibro	groß	40	4
230	30.04.2014	2	2	Vibro	groß	50	4
231	30.04.2014	2	2	Vibro	groß	50	4
232	30.04.2014	3	2	Oszi	klein	gleitend 20-60	2
233	30.04.2014	3	2	Vibro	groß	40	2
234	30.04.2014	3	2	Vibro	groß	40	2

Messfahrtnummer	Datum	Spur	Schüttlage	Anregungsart	Amplitude	Frequenz [Hz]	Geschwindigkeit [km/h]
235	30.04.2014	3	2	Vibro	groß	40	4
236	30.04.2014	3	2	Vibro	groß	40	4
237	30.04.2014	3	2	Vibro	groß	gleitend 30-50	4
238	30.04.2014	3	2	Vibro	groß	gleitend 30-50	4
239	30.04.2014	3	2	Vibro	klein	50	2
240	30.04.2014	3	2	Vibro	klein	50	2
241	30.04.2014	3	2	Vibro	klein	50	4
242	30.04.2014	3	2	Vibro	klein	50	4
243	30.04.2014	3	2	Vibro	klein	gleitend 40-60	4
244	30.04.2014	3	2	Vibro	klein	gleitend 40-60	4
245	30.04.2014	3	2	Oszi	klein	gleitend 20-60	2
246	30.04.2014	3	2	Oszi	klein	gleitend 20-60	4
247	30.04.2014	3	2	Oszi	klein	gleitend 20-60	2

Anmerkungen:

\* ... fehlerhafte Messdaten

## **B Protokolle der Ergebnisse**

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Großversuches und deren Auswertung in Tabellenform dargestellt.

## B.1 Protokolle der $E_{vd}$ -Auswertungen

Messfahrtnummer	Evd aus der dynam. Lastplatte [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V_{setz}}$ aus den Setzungen des Setzungsmessgerätes [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V_{Ossi}}/E_{V_{vibro}}/E_{V_{stat}}$ aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{V_{stat}}$ aus den Kontaktlänge Rückwärtsfahrt [MN/m <sup>2</sup> ]
1	33,60	4,89	17,74	22,52
2	53,20	0,00	30,41	21,82
3	40,00	0,00	15,92	33,06
4	48,70	0,00	17,95	18,11
5	43,60	0,00	22,51	25,42
6	42,60	0,00	20,59	21,65
7	30,40	0,00	16,35	16,19
8	48,90	0,00	14,89	11,71
9	48,20	8,12	8,03	18,28
10	50,80	5,51	11,79	15,26
11	53,80	5,30	11,92	15,90
12	49,50	5,08	13,70	19,12
13	55,30	5,22	5,97	7,51
14	61,30	5,00	5,53	17,03
15	52,90	5,14	12,89	40,18
16	58,70	7,28	15,02	18,01
17	61,60	5,92	14,27	35,00
18	61,30	5,64	20,76	30,37
19	52,30	5,95	17,95	29,01
20	56,10	5,34	19,87	20,56
21	58,70	5,09	15,11	22,41
22	62,50	4,67	12,96	25,53
23	59,40	6,16	10,05	17,31
24	62,00	6,39	3,14	34,79
25	64,70	6,31	11,96	23,76
26*	59,40	0,00	0,00	0,00
27*	60,60	0,00	0,00	0,00
28	55,80	6,99	15,97	16,10
29	48,30	0,00	3,59	11,40
30	46,90	0,00	5,79	18,90
31	50,10	0,00	9,89	22,70
32	47,90	0,00	13,33	17,20
33	49,20	0,00	18,67	13,98
34	57,30	0,00	12,83	26,55
35	44,50	0,00	16,87	19,79
36	46,80	0,00	13,73	17,66
37	48,90	0,00	5,72	12,80
38	43,50	0,00	5,86	26,37
39	59,40	0,00	12,06	15,49
40	52,40	0,00	14,52	14,58
41	0,00	0,00	19,85	18,69
42	55,10	0,00	22,56	27,62

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

Messfahrtnummer	Evd aus der dynam. Lastplatte [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>setz</sub> aus den Setzungen des Setzungsmessgerätes [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Ossi</sub> / Ev <sub>Vibro</sub> / Ev <sub>Stat</sub> aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Stat</sub> aus den Kontaktlänge Rückwärtsfahrt [MIN/m <sup>2</sup> ]
43	0,00	0,00	25,60	21,44
44	59,80	0,00	28,06	20,58
45	0,00	0,00	20,33	25,79
46	63,00	0,00	24,67	23,44
47	0,00	0,00	27,85	24,35
48	47,50	0,00	19,65	23,85
49	0,00	0,00	24,44	28,18
50	65,60	0,00	18,78	26,43
51*	0,00	0,00	0,00	0,00
52	63,20	0,00	15,61	23,21
53	0,00	0,00	16,71	22,64
54	62,50	0,00	18,40	14,67
55	0,00	8,97	11,11	27,17
56	0,00	7,97	12,76	30,54
57	61,80	2206,00	11,48	0,35
58*	0,00	0,00	0,00	0,00
59	0,00	7,20	17,17	27,96
60	0,00	6,13	7,75	39,47
61	0,00	5,74	7,11	28,49
62*	0,00	0,00	0,00	0,00
63	0,00	7,88	12,66	25,64
64*	0,00	0,00	0,00	0,00
65	0,00	7,01	5,64	21,02
66	0,00	6,96	15,57	25,63
67	0,00	7,97	12,18	12,16
68	0,00	7,03	3,34	32,68
69	0,00	11,22	23,71	18,67
70	0,00	9,24	19,21	22,22
71	0,00	9,27	16,78	32,70
72	0,00	7,83	15,54	23,20
73	0,00	8,16	20,40	26,90
74	0,00	48,36	25,34	23,02
75	0,00	9,92	27,18	30,29
76	0,00	30,55	19,93	18,69
77	0,00	11,17	15,67	20,19
78	0,00	11,37	14,71	22,46
79	0,00	15,27	18,13	25,11
80	0,00	17,32	22,50	26,81
81	0,00	11,95	39,97	19,88
82	0,00	13,66	19,49	29,58
83	0,00	16,00	14,88	19,56
84	0,00	10,63	29,49	24,55

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

Messfahrtnummer	Evd aus der dynam. Lastplatte [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>setz</sub> aus den Setzungen des Setzungsmessgerätes [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Ossi</sub> / Ev <sub>Vibro</sub> / Ev <sub>Stat</sub> aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Stat</sub> aus den Kontaktlänge Rückwärtsfahrt [MIN/m <sup>2</sup> ]
85	0,00	36,03	27,67	18,32
86	0,00	0,00	25,13	51,58
87	0,00	0,00	60,78	49,43
88	0,00	0,00	47,60	33,35
89	0,00	0,00	36,39	56,70
90	0,00	0,00	30,22	54,11
91	0,00	0,00	33,33	33,36
92	0,00	0,00	43,87	47,19
93	0,00	0,00	51,73	54,73
94	0,00	0,00	38,02	53,58
95	0,00	0,00	45,79	42,42
96	0,00	0,00	55,04	29,10
97	0,00	0,00	61,03	49,83
98	0,00	0,00	40,84	49,85
99	0,00	0,00	48,77	54,75
100	0,00	0,00	34,83	40,68
101	0,00	0,00	38,03	54,31
102	0,00	0,00	47,34	58,90
103	0,00	0,00	32,21	47,47
104	0,00	0,00	45,61	53,66
105	0,00	0,00	3,96	48,38
106	0,00	0,00	12,54	53,46
107*	0,00	0,00	0,00	0,00
108	0,00	0,00	7,13	39,37
109	0,00	0,00	9,64	27,74
110	0,00	0,00	12,89	40,79
111	0,00	0,00	31,60	42,90
112	0,00	0,00	27,50	27,72
113	0,00	0,00	21,44	54,68
114	0,00	0,00	23,10	29,63
115	0,00	0,00	4,62	16,24
116	0,00	0,00	5,98	30,48
117	0,00	0,00	7,33	13,21
118*	0,00	0,00	0,00	0,00
119	0,00	0,00	26,21	24,12
120	0,00	0,00	10,58	24,97
143	7,80	0,00	5,96	15,96
144	5,00	0,00	6,45	22,07
145	0,00	0,00	9,19	19,26
146	6,30	0,00	10,34	18,74
147	0,00	0,00	7,33	20,91
148	4,70	0,00	4,68	14,58

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

Messfahrtnummer	Evd aus der dynam. Lastplatte [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>setz</sub> aus den Setzungen des Setzungsmessgerätes [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Ossi</sub> / Ev <sub>Vibro</sub> / Ev <sub>Stat</sub> aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Stat</sub> aus den Kontaktlänge Rückwärtsfahrt [MIN/m <sup>2</sup> ]
149	0,00	0,00	2,23	9,54
150*	5,20	0,00	0,00	0,00
151	0,00	0,00	3,54	5,58
152	6,00	0,00	2,57	13,43
153	0,00	0,00	5,04	7,07
154	3,80	0,00	4,55	6,05
155*	0,00	0,00	0,00	0,00
156	5,40	0,00	4,30	5,59
157	0,00	0,00	1,59	7,55
158	4,30	0,00	2,03	1,02
159	0,00	0,00	0,75	5,31
160	4,60	0,00	0,55	4,19
161*	5,00	0,00	0,00	0,00
162	4,70	0,00	4,70	7,44
164	13,20	0,00	8,79	8,58
165	11,10	0,00	7,40	12,28
166*	0,00	0,00	0,00	0,00
167*	12,00	0,00	0,00	0,00
168*	0,00	0,00	0,00	0,00
169	0,00	0,00	7,13	11,74
170	5,80	0,00	4,33	8,19
171	0,00	0,00	5,08	7,61
172	0,00	0,00	3,62	5,36
173	0,00	0,00	4,00	8,50
174	7,10	0,00	5,39	7,17
175	22,00	0,00	2,88	8,36
176	26,20	0,00	8,30	9,14
177	26,70	0,00	8,02	6,31
178	24,00	0,00	7,01	11,46
179	24,80	0,00	8,57	16,03
180	30,20	0,00	5,94	19,91
181	22,00	1,51	3,16	5,33
182*	24,60	0,00	0,00	0,00
183	29,60	2,44	3,47	16,10
184	29,30	3,18	5,23	10,75
185	31,90	2,50	1,75	7,91
186*	33,80	0,00	0,00	0,00
187	32,10	3,05	6,31	7,58
188	38,10	2,90	4,52	19,78
189	36,80	3,19	5,80	13,86
190	36,80	3,51	7,56	12,33
191	39,90	0,00	8,14	7,02

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

Messfahrtnummer	Evd aus der dynam. Lastplatte [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>setz</sub> aus den Setzungen des Setzungsmessgerätes [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Ossi</sub> / Ev <sub>Vibro</sub> / Ev <sub>Stat</sub> aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Stat</sub> aus den Kontaktlänge Rückwärtsfahrt [MIN/m <sup>2</sup> ]
192	41,40	3,86	14,38	7,83
193	39,40	2,98	6,92	12,16
194	37,40	2,90	7,06	18,76
195	38,10	2,95	2,76	12,91
196*	41,90	0,00	0,00	0,00
197	39,50	2,80	4,31	17,13
198	41,70	2,88	5,74	21,17
199	44,50	2,91	3,88	8,78
200	35,00	3,47	5,09	6,62
201*	41,00	0,00	0,00	0,00
202	42,00	3,31	5,24	8,18
203	20,40	0,00	1,85	5,94
204	26,50	0,00	2,02	14,41
205	0,00	0,00	6,47	9,88
206	30,80	0,00	5,06	13,28
207	0,00	0,00	5,73	13,90
208	30,90	0,00	6,12	1,78
209	0,00	0,00	2,01	3,68
210	32,90	0,00	1,87	13,95
211	20,90	0,00	2,31	5,66
212	0,00	0,00	3,17	3,34
214	48,90	4,25	5,38	6,97
215	47,20	4,62	5,36	5,14
216*	46,90	0,00	0,00	0,00
217	41,50	3,19	3,18	7,49
218*	50,00	0,00	0,00	0,00
219	48,10	2,87	1,53	7,90
220	48,80	0,00	3,40	12,84
221	35,80	0,00	3,99	8,73
222	51,60	0,00	5,65	9,38
223	51,10	0,00	5,75	11,57
224	49,50	4,33	9,33	12,49
225*	46,20	0,00	0,00	0,00
226	51,30	5,23	5,86	7,05
227	48,40	6,35	7,76	7,87
228*	46,60	0,00	0,00	0,00
229*	54,10	0,00	0,00	0,00
230	52,20	5,09	5,80	11,34
231	43,00	4,89	11,56	16,95
232	31,10	0,00	0,63	4,87
233	31,80	0,00	2,89	5,54
234	32,50	0,00	6,24	9,04

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

---

Messfahrtnummer	Evd aus der dynam. Lastplatte [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Setz</sub> aus den Setzungen des Setzungsmessgerätes [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Ossi</sub> / Ev <sub>Vibro</sub> / Ev <sub>Stat</sub> aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [MIN/m <sup>2</sup> ]	Ev <sub>Stat</sub> aus den Kontaktlänge Rückwärtsfahrt [MIN/m <sup>2</sup> ]
235	24,10	0,00	6,12	11,59
236	35,90	0,00	4,45	9,50
237	40,80	0,00	11,59	9,24
238	43,20	0,00	6,22	8,52
239	37,30	0,00	2,05	7,68
240	41,00	0,00	5,77	7,03
241	51,30	0,00	10,11	9,28
242	44,70	0,00	7,78	12,15
243	0,00	0,00	7,05	12,24
244	45,90	0,00	6,83	14,26
245	40,00	0,00	1,62	14,38
246	0,00	0,00	4,40	7,36
247	38,70	0,00	1,55	9,03

Anmerkungen:

\* ... fehlerhafte Messdaten

0,00....fehlende Messdaten



## B.2 Protokolle der Bug- und Heckwellen-Auswertungen

Messfahrtnummer	Bugwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Bugwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Vorwärtsfahrt	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Rückwärtsfahrt
1	0,11	0,10	0,10	0,02	1,11	6,19
2	0,03	0,02	0,05	0,02	1,46	2,79
3	0,06	0,05			1,24	
4			0,12	0,01		10,22
5	0,04	0,04	0,24	0,01	1,14	16,53
6	0,06	0,07	0,07	0,04	0,89	1,87
7	0,05	0,05	0,11	0,05	1,04	2,19
8			0,10	0,04		2,62
9	0,07	0,05	0,05	0,03	1,46	2,09
10	0,09	0,02	0,08	0,02	4,82	3,33
11	0,09	0,01	0,08	0,02	7,59	3,57
12	0,06	0,05	0,09	0,02	1,25	4,26
13	0,16	0,02	0,14	0,04	7,71	3,65
14	0,11	0,04			2,81	
15	0,08	0,03	0,03	0,01	3,06	4,54
16	0,07	0,06	0,07	0,01	1,26	5,53
17	0,06	0,05	0,04	0,01	1,35	3,31
18	0,05	0,04	0,06	0,01	1,07	5,73
19	0,05	0,04	0,04	0,01	1,38	2,53
20	0,04	0,03	0,07	0,01	1,34	9,03
21	0,07	0,02	0,05	0,01	3,44	3,17
22	0,06	0,04	0,05	0,02	1,50	2,78
23	0,10	0,03	0,08	0,01	3,40	6,08
24	0,14	0,03	0,04	0,01	5,02	3,27
25	0,07	0,03	0,04	0,01	2,25	3,12
26*	0,00	0,00	0,00	0,00		
27*	0,00	0,00	0,00	0,00		
28	0,07	0,03	0,10	0,01	2,47	11,52
29	0,16	0,01			11,80	
30	0,12	0,03	0,07	0,02	4,34	3,25
31	0,08	0,05	0,06	0,01	1,78	4,14
32	0,08	0,02	0,14	0,04	3,21	3,61
33	0,04	0,03	0,07	0,02	1,26	4,37
34	0,05	0,06	0,03	0,01	0,85	2,76
35	0,04	0,04	0,58	0,14	1,23	4,06
36	0,06	0,04	0,15	0,05	1,52	3,24
37	0,10	0,03	0,09	0,02	3,14	4,00
38	0,14	0,04	0,04	0,01	3,79	3,55
39						
40	0,08	0,05	0,05	0,17	1,46	0,29
41	0,04	0,03	0,14	0,05	1,33	2,73
42	0,03	0,03	0,04	0,01	1,13	3,66

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

Messfahrtnummer	Bugwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Bugwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Vorwärtsfahrt	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Rückwärtsfahrt
43	0,02	0,03	0,11	0,02	0,76	6,12
44	0,05	0,00	0,07	0,02	97,16	3,23
45	0,07	0,07	0,04	0,00	1,05	9,10
46	0,03	0,02	0,08	0,02	1,56	3,61
47	0,03	0,03	0,04	0,01	0,96	3,36
48	0,07	0,03	0,04	0,01	2,64	3,05
49	0,03	0,03	0,06	0,01	1,11	4,32
50	0,09	0,09	0,04	0,01	0,96	4,00
51*	0,00	0,00	0,00	0,00		
52	0,04	0,06	0,07	0,01	0,70	5,94
53	0,06	0,06	0,11	0,04	0,91	2,86
54	0,06	0,07	0,10	0,04	0,85	2,50
55	0,06	0,04	0,18	0,05	1,71	3,98
56	0,08	0,02	0,04	0,01	4,67	3,16
57	0,10	0,01			6,55	
58*	0,00	0,00	0,00	0,00		
59	0,04	0,03	0,05	0,00	1,13	12,91
60	0,09	0,02	0,04	0,01	4,21	5,76
61	0,10	0,05	0,07	0,01	2,02	5,33
62*	0,00	0,00	0,00	0,00		
63	0,07	0,02	0,07	0,02	3,08	3,77
64*	0,00	0,00	0,00	0,00		
65	0,13	0,02	0,11	0,02	6,17	4,92
66	0,07	0,06	0,08	0,01	1,08	8,29
67	0,09	0,01	0,08	0,01	6,07	5,44
68	0,15	0,03	0,09	0,02	4,92	4,56
69	0,04	0,05	0,11	0,03	0,81	3,65
70	0,05	0,04	0,14	0,04	1,09	3,24
71	0,06	0,08	0,03	0,01	0,69	3,85
72	0,13	0,08	0,14	0,02	1,61	8,35
73	0,04	0,04	0,05	0,02	0,85	3,12
74	0,06	0,00	0,07	0,02	14,38	3,54
75	0,03	0,02	0,04	0,01	1,22	8,32
76	0,04	0,06	0,15	0,05	0,80	3,05
77	0,05	0,03	0,06	0,01	1,50	5,46
78	0,16	0,12	0,13	0,05	1,32	2,68
79	0,08	0,03	0,05	0,01	2,53	4,59
80	0,04	0,03	0,05	0,02	1,40	3,13
81	0,01	0,03	0,13	0,03	0,42	4,64
82	0,09	0,00	0,07	0,02	32,90	3,18
83	0,14	0,10	0,14	0,03	1,37	4,26
84	0,02	0,03	0,06	0,02	0,84	4,19

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

Messfahrtnummer	Bugwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Bugwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Vorwärtsfahrt	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Rückwärtsfahrt
85	0,02	0,03	0,11	0,02	0,71	5,91
86	0,03	0,09	0,08	0,04	0,30	1,94
87	0,03	0,03	0,11	0,04	0,80	2,86
88	0,02	0,04	0,16	0,02	0,47	8,60
89	0,05	0,13	0,03	0,01	0,40	3,79
90	0,08	0,04	0,07	0,03	2,11	2,06
91	0,03	0,05	0,12	0,05	0,57	2,31
92	0,05	0,09	0,03	0,01	0,61	3,40
93	0,06	0,01	0,05	0,02	4,23	3,40
94	0,02	0,06	0,03	0,01	0,42	4,92
95	0,04	0,07	0,03	0,01	0,53	3,98
96	0,01	0,03	0,06	0,01	0,47	7,07
97	0,01	0,02	0,02	0,01	0,56	3,14
98	0,04	0,04	0,02	0,01	0,95	3,45
99	0,02	0,02	0,02	0,00	0,79	4,83
100	0,03	0,06	0,10	0,03	0,56	2,91
101	0,02	0,03	0,03	0,01	0,62	3,53
102	0,03	0,06	0,03	0,00	0,45	8,08
103	0,10	0,10	0,03	0,01	1,04	3,20
104	0,01	0,03	0,04	0,01	0,46	4,36
105	0,09	0,05	0,05	0,01	1,86	4,27
106	0,08	0,06	0,10	0,01	1,44	16,49
107*	0,00	0,00	0,00	0,00		
108	0,16	0,03	0,04	0,01	5,39	7,11
109	0,11	0,07	0,07	0,02	1,60	2,90
110	0,11	0,03	0,04	0,00	3,56	8,71
111	0,02	0,06	0,04	0,01	0,38	2,93
112	0,05	0,04	0,10	0,03	1,24	3,21
113	0,07	0,00	0,04	0,02	22,85	2,49
114	0,05	0,05	0,07	0,02	1,07	3,07
115	0,16	0,06	0,07	0,04	2,50	1,68
116	0,10	0,09	0,07	0,03	1,08	2,32
117	0,13	0,06	0,12	0,05	2,41	2,45
118*	0,00	0,00	0,00	0,00		
119	0,05	0,03	0,06	0,02	2,10	3,28
120	0,08	0,02	0,05	0,02	5,38	3,57
143	0,07	0,06	0,05	0,02	1,12	2,10
144	0,07	0,05	0,04	0,02	1,46	1,99
145	0,08	0,05	0,05	0,02	1,61	2,86
146	0,04	0,05	0,04	0,02	0,77	2,29
147	0,07	0,05	0,04	0,02	1,33	2,08
148	0,08	0,05	0,04	0,02	1,48	1,86

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

Messfahrtnummer	Bugwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Bugwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Vorwärtsfahrt	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Rückwärtsfahrt
149	0,14	0,05	0,08	0,05	2,79	1,70
150*	0,00	0,00	0,00	0,00		
151	0,15	0,03	0,09	0,05	5,63	1,75
152	0,13	0,05	0,06	0,02	2,99	2,91
153	0,07	0,07	0,11	0,08	0,94	1,38
154	0,06	0,09	0,09	0,06	0,69	1,42
155*	0,00	0,00	0,00	0,00		
156	0,06	0,07	0,09	0,03	0,88	2,80
157	0,19	0,04	0,16	0,09	4,26	1,71
158	0,18	0,03	0,21	0,08	6,23	2,81
159	0,29	0,04	0,14	0,02	7,26	7,08
160	0,30	0,07	0,24	0,05	4,42	5,34
161*	0,00	0,00	0,00	0,00		
162	0,10	0,08	0,07	0,03	1,18	2,61
164	0,05	0,05	0,06	0,03	0,86	1,86
165	0,11	0,02	0,05	0,03	5,87	2,09
166*	0,00	0,00	0,00	0,00		
167*	0,00	0,00	0,00	0,00		
168*	0,00	0,00	0,00	0,00		
169	0,07	0,08	0,06	0,04	0,87	1,63
170	0,13	0,05	0,08	0,03	2,53	2,46
171	0,09	0,11	0,07	0,04	0,88	1,85
172	0,11	0,13	0,09	0,05	0,82	1,97
173	0,15	0,02	0,07	0,04	6,32	1,63
174	0,05	0,08	0,07	0,03	0,70	2,08
175	0,14	0,03	0,14	0,03	4,15	5,52
176	0,08	0,02	0,08	0,02	3,53	4,19
177	0,07	0,03	0,12	0,03	2,04	4,78
178	0,08	0,03	0,06	0,02	2,77	3,13
179	0,06	0,03	0,06	0,01	2,11	4,97
180	0,09	0,05	0,05	0,01	1,69	4,06
181	0,15	0,01	0,16	0,01	9,90	10,90
182*	0,00	0,00	0,00	0,00		
183	0,10	0,05	0,04	0,01	1,94	3,21
184	0,08	0,05	0,07	0,02	1,51	3,74
185	0,14	0,08	0,08	0,02	1,61	3,58
186*	0,00	0,00	0,00	0,00		
187	0,07	0,04	0,09	0,02	1,55	6,10
188	0,09	0,06	0,05	0,02	1,67	3,10
189	0,01	0,10	0,06	0,01	0,14	5,22
190	0,02	0,10	0,06	0,02	0,25	2,93
191	0,08	0,05	0,12	0,02	1,76	4,84

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

Messfahrtnummer	Bugwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Bugwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Vorwärtsfahrt	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Rückwärtsfahrt
192	0,08	0,01	0,09	0,01	6,27	6,04
193	0,08	0,02	0,08	0,03	3,58	2,54
194	0,07	0,04	0,06	0,01	1,88	5,16
195	0,16	0,02	0,08	0,04	9,72	2,20
196*	0,00	0,00	0,00	0,00		
197	0,10	0,04	0,07	0,01	2,16	8,46
198	0,07	0,05	0,06	0,01	1,39	7,95
199	0,13	0,04	0,10	0,02	3,51	4,66
200	0,10	0,03	0,12	0,02	2,92	4,88
201*	0,00	0,00	0,00	0,00		
202	0,11	0,02	0,10	0,02	5,37	6,16
203	0,19	0,03	0,11	0,03	6,94	4,47
204	0,18	0,06	0,12	0,03	3,23	4,59
205	0,07	0,04	0,08	0,01	1,72	6,04
206	0,10	0,02	0,07	0,01	3,94	4,72
207	0,08	0,04	0,06	0,02	1,97	3,90
208	0,10	0,03	0,20	0,07	3,10	3,07
209	0,17	0,05	0,16	0,07	3,34	2,15
210	0,20	0,05	0,11	0,03	3,67	3,37
211	0,16	0,10	0,16	0,02	1,52	9,76
212	0,11	0,07	0,13	0,04	1,59	3,05
214	0,09	0,06	0,08	0,04	1,68	1,84
215	0,08	0,05	0,10	0,03	1,71	2,88
216*	0,00	0,00	0,00	0,00		
217	0,13	0,03	0,09	0,01	4,02	7,05
218*	0,00	0,00	0,00	0,00		
219	0,19	0,04	0,06	0,05	4,30	1,22
220	0,14	0,06	0,06	0,01	2,35	4,25
221	0,08	0,13	0,08	0,03	0,59	3,17
222	0,11	0,05	0,08	0,02	2,40	4,53
223	0,11	0,04	0,06	0,02	2,51	2,76
224	0,07	0,02	0,07	0,01	2,81	8,66
225*	0,00	0,00	0,00	0,00		
226						
227	0,08	0,04	0,11	0,06	1,92	1,85
228*	0,00	0,00	0,00	0,00		
229*	0,00	0,00	0,00	0,00		
230	0,12	0,04	0,09	0,01	2,92	11,02
231	0,06	0,02	0,06	0,01	2,65	4,53
232	0,33	0,06	0,19	0,06	5,88	3,04
233			0,16	0,04		3,75
234	0,07	0,04	0,07	0,02	1,79	3,09

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

---

Messfahrtnummer	Bugwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Vorwärtsfahrt [m]	Bugwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Heckwellenlänge Rückwärtsfahrt [m]	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Vorwärtsfahrt	Verhältnis Bug- zu Heckwelle Rückwärtsfahrt
235	0,06	0,06	0,07	0,01	0,94	7,45
236	0,13	0,06	0,07	0,02	2,28	3,12
237	0,05	0,03	0,08	0,02	1,93	4,92
238	0,07	0,06	0,10	0,01	1,29	7,08
239	0,20	0,10	0,08	0,02	1,97	4,21
240	0,07	0,16	0,15	0,04	0,45	3,94
241	0,05	0,03	0,11	0,02	1,49	4,82
242	0,08	0,05	0,06	0,02	1,56	2,93
243	0,07	0,06	0,06	0,01	1,23	4,77
244	0,10	0,08	0,06	0,01	1,21	5,03
245	0,24	0,04	0,05	0,02	5,99	2,75
246	0,08	0,06	0,08	0,03	1,26	2,77
247	0,17	0,06	0,07	0,02	2,87	2,74

Anmerkungen:

\* ... fehlerhafte Messdaten

0,00....fehlende Messdaten

### B.3 Protokolle der Setzungs-Auswertungen

Messfahrtnummer	Setzungen des Setzungsmessgerätes elastisch [cm]	Setzungen des Setzungsmessgerätes plastisch [m]	Setzungen aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [cm]	Setzungen aus den Kontaktlängen Rückwärtsfahrt [cm]
1	0,000	0,000	0,877	0,291
2	0,000	0,000	0,051	0,086
3	0,000	0,000	0,215	0,026
4	0,000	0,000	0,187	0,348
5	0,000	0,000	0,119	1,315
6	0,000	0,000	0,331	0,242
7	0,000	0,000	0,229	0,552
8	0,000	0,000	0,242	0,432
9	0,191	0,631	0,282	0,124
10	0,282	0,495	0,237	0,240
11	0,293	0,265	0,241	0,236
12	0,306	0,161	0,255	0,234
13	0,297	0,109	0,720	0,692
14	0,311	0,126	0,490	0,184
15	0,302	0,148	0,217	0,022
16	0,213	0,046	0,375	0,128
17	0,263	0,059	0,261	0,045
18	0,276	0,082	0,171	0,109
19	0,261	0,043	0,168	0,054
20	0,291	0,036	0,128	0,112
21	0,305	0,042	0,187	0,075
22	0,332	0,047	0,199	0,114
23	0,252	0,086	0,335	0,164
24	0,243	0,366	0,615	0,049
25	0,246	0,127	0,202	0,068
26*	0,000	0,000	0,000	0,000
27*	0,000	0,000	0,000	0,000
28	0,222	0,004	0,204	0,259
29	0,000	0,000	0,629	0,137
30	0,000	0,000	0,434	0,182
31	0,000	0,000	0,334	0,099
32	0,000	0,000	0,216	0,711
33	0,000	0,000	0,128	0,172
34	0,000	0,000	0,252	0,034
35	0,000	0,000	0,136	10,633
36	0,000	0,000	0,196	0,784
37	0,000	0,000	0,373	0,288
38	0,000	0,000	0,609	0,059
39	0,000	0,000	2,791	0,144
40	0,000	0,000	0,370	0,994
41	0,000	0,000	0,123	0,750
42	0,000	0,000	0,069	0,057

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

---

Messfahrtnummer	Setzungen des Setzungsmessgerätes elastisch [cm]	Setzungen des Setzungsmessgerätes plastisch [m]	Setzungen aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [cm]	Setzungen aus den Kontaktlängen Rückwärtsfahrt [cm]
43	0,000	0,000	0,062	0,319
44	0,000	0,000	0,059	0,166
45	0,000	0,000	0,407	0,034
46	0,000	0,000	0,065	0,239
47	0,000	0,000	0,063	0,065
48	0,000	0,000	0,218	0,071
49	0,000	0,000	0,065	0,100
50	0,000	0,000	0,718	0,060
51*	0,000	0,000	0,000	0,000
52	0,000	0,000	0,213	0,127
53	0,000	0,000	0,307	0,429
54	0,000	0,000	0,317	0,396
55	0,173	0,040	0,201	1,105
56	0,195	0,043	0,212	0,069
57	0,001	-0,021	0,265	0,280
58*	0,000	0,000	0,000	0,000
59	0,216	0,043	0,098	0,057
60	0,254	0,044	0,278	0,040
61	0,271	0,042	0,433	0,125
62*	0,000	0,000	0,000	0,000
63	0,197	0,016	0,197	0,142
64*	0,000	0,000	0,000	0,000
65	0,222	0,009	0,457	0,359
66	0,223	0,024	0,329	0,171
67	0,195	0,027	0,226	0,167
68	0,221	-0,021	0,652	0,236
69	0,139	0,043	0,142	0,412
70	0,168	0,041	0,182	0,663
71	0,168	0,030	0,407	0,027
72	0,199	0,072	0,987	0,520
73	0,190	-0,006	0,126	0,109
74	0,032	-0,051	0,091	0,192
75	0,157	0,080	0,058	0,053
76	0,051	-0,013	0,211	0,829
77	0,139	0,018	0,118	0,101
78	0,137	0,003	1,697	0,708
79	0,102	0,026	0,265	0,072
80	0,090	-0,006	0,079	0,091
81	0,130	0,045	0,041	0,488
82	0,114	0,009	0,194	0,201
83	0,097	0,010	1,256	0,596
84	0,146	0,024	0,054	0,129

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

---

Messfahrtnummer	Setzungen des Setzungsmessgerätes elastisch [cm]	Setzungen des Setzungsmessgerätes plastisch [m]	Setzungen aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [cm]	Setzungen aus den Kontaktlängen Rückwärtsfahrt [cm]
85	0,043	-0,030	0,057	0,332
86	0,000	0,000	0,271	0,291
87	0,000	0,000	0,073	0,472
88	0,000	0,000	0,071	0,644
89	0,000	0,000	0,682	0,032
90	0,000	0,000	0,270	0,200
91	0,000	0,000	0,116	0,568
92	0,000	0,000	0,434	0,034
93	0,000	0,000	0,098	0,094
94	0,000	0,000	0,147	0,036
95	0,000	0,000	0,267	0,039
96	0,000	0,000	0,031	0,102
97	0,000	0,000	0,026	0,018
98	0,000	0,000	0,134	0,018
99	0,000	0,000	0,033	0,016
100	0,000	0,000	0,156	0,351
101	0,000	0,000	0,066	0,029
102	0,000	0,000	0,159	0,028
103	0,000	0,000	0,825	0,041
104	0,000	0,000	0,035	0,053
105	0,000	0,000	0,421	0,078
106	0,000	0,000	0,388	0,251
107*	0,000	0,000	0,000	0,000
108	0,000	0,000	0,764	0,054
109	0,000	0,000	0,608	0,166
110	0,000	0,000	0,442	0,041
111	0,000	0,000	0,154	0,067
112	0,000	0,000	0,154	0,328
113	0,000	0,000	0,112	0,069
114	0,000	0,000	0,233	0,174
115	0,000	0,000	1,047	0,296
116	0,000	0,000	0,789	0,205
117	0,000	0,000	0,744	0,595
118*	0,000	0,000	0,000	0,000
119	0,000	0,000	0,130	0,131
120	0,000	0,000	0,211	0,100
143	0,000	0,000	0,357	0,102
144	0,000	0,000	0,287	0,084
145	0,000	0,000	0,310	0,088
146	0,000	0,000	0,159	0,087
147	0,000	0,000	0,292	0,089
148	0,000	0,000	0,369	0,060

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

Messfahrtnummer	Setzungen des Setzungsmessgerätes elastisch [cm]	Setzungen des Setzungsmessgerätes plastisch [m]	Setzungen aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [cm]	Setzungen aus den Kontaktlängen Rückwärtsfahrt [cm]
149	0,000	0,000	0,768	0,353
150*	0,000	0,000	0,000	0,000
151	0,000	0,000	0,626	0,426
152	0,000	0,000	0,675	0,140
153	0,000	0,000	0,408	0,698
154	0,000	0,000	0,477	0,490
155*	0,000	0,000	0,000	0,000
156	0,000	0,000	0,383	0,308
157	0,000	0,000	1,124	1,270
158	0,000	0,000	0,920	1,733
159	0,000	0,000	2,325	0,511
160	0,000	0,000	2,809	1,693
161*	0,000	0,000	0,000	0,000
162	0,000	0,000	0,672	0,217
164	0,000	0,000	0,204	0,190
165	0,000	0,000	0,361	0,129
166*	0,000	0,000	0,000	0,000
167*	0,000	0,000	0,000	0,000
168*	0,000	0,000	0,000	0,000
169	0,000	0,000	0,432	0,182
170	0,000	0,000	0,725	0,234
171	0,000	0,000	0,810	0,235
172	0,000	0,000	1,142	0,396
173	0,000	0,000	0,628	0,233
174	0,000	0,000	0,358	0,225
175	0,000	0,000	0,594	0,597
176	0,000	0,000	0,233	0,201
177	0,000	0,000	0,207	0,469
178	0,000	0,000	0,228	0,148
179	0,000	0,000	0,186	0,106
180	0,000	0,000	0,418	0,098
181	1,027	6,270	0,544	0,650
182*	0,000	0,000	0,000	0,000
183	0,636	0,444	0,519	0,070
184	0,488	0,282	0,324	0,163
185	0,622	0,011	1,015	0,217
186*	0,000	0,000	0,000	0,000
187	0,510	0,131	0,253	0,248
188	0,536	0,071	0,480	0,094
189	0,487	0,081	0,283	0,115
190	0,443	-0,039	0,297	0,154
191	0,000	0,000	0,356	0,441

## B PROTOKOLLE DER ERGEBNISSE

Messfahrtnummer	Setzungen des Setzungsmessgerätes elastisch [cm]	Setzungen des Setzungsmessgerätes plastisch [m]	Setzungen aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [cm]	Setzungen aus den Kontaktlängen Rückwärtsfahrt [cm]
192	0,403	0,062	0,188	0,216
193	0,522	0,017	0,242	0,240
194	0,536	0,055	0,236	0,099
195	0,527	0,120	0,643	0,267
196*	0,000	0,000	0,000	0,000
197	0,554	0,053	0,403	0,137
198	0,539	0,107	0,274	0,093
199	0,533	0,037	0,553	0,329
200	0,447	0,096	0,375	0,400
201*	0,000	0,000	0,000	0,000
202	0,469	0,024	0,333	0,277
203	0,000	0,000	0,961	0,404
204	0,000	0,000	1,156	0,478
205	0,000	0,000	0,268	0,193
206	0,000	0,000	0,316	0,150
207	0,000	0,000	0,316	0,121
208	0,000	0,000	0,391	1,496
209	0,000	0,000	0,994	1,085
210	0,000	0,000	1,323	0,394
211	0,000	0,000	1,380	0,623
212	0,000	0,000	0,616	0,644
214	0,365	-0,043	0,452	0,334
215	0,336	-0,020	0,363	0,363
216*	0,000	0,000	0,000	0,000
217	0,487	-0,121	0,550	0,234
218*	0,000	0,000	0,000	0,000
219	0,541	0,184	1,133	0,258
220	0,000	0,000	0,863	0,128
221	0,000	0,000	0,867	0,244
222	0,000	0,000	0,494	0,191
223	0,000	0,000	0,448	0,135
224	0,359	0,018	0,167	0,125
225*	0,000	0,000	0,000	0,000
226	0,297	0,078	0,517	0,439
227	0,245	0,051	0,277	0,600
228*	0,000	0,000	0,000	0,000
229*	0,000	0,000	0,000	0,000
230	0,305	0,007	0,529	0,184
231	0,318	0,027	0,144	0,097
232	0,000	0,000	3,122	1,263
233	0,000	0,000	0,718	0,882
234	0,000	0,000	0,254	0,188

Messfahrtnummer	Setzungen des Setzungsmessgerätes elastisch [cm]	Setzungen des Setzungsmessgerätes plastisch [m]	Setzungen aus den Kontaktlängen Vorwärtsfahrt [cm]	Setzungen aus den Kontaktlängen Rückwärtsfahrt [cm]
235	0,000	0,000	0,314	0,145
236	0,000	0,000	0,746	0,164
237	0,000	0,000	0,141	0,178
238	0,000	0,000	0,342	0,245
239	0,000	0,000	1,963	0,218
240	0,000	0,000	1,174	0,689
241	0,000	0,000	0,157	0,390
242	0,000	0,000	0,371	0,129
243	0,000	0,000	0,319	0,127
244	0,000	0,000	0,718	0,110
245	0,000	0,000	1,652	0,112
246	0,000	0,000	0,428	0,250
247	0,000	0,000	1,148	0,181

Anmerkungen:

\* ... fehlerhafte Messdaten

0,00....fehlende Messdaten