

## DIPLOMARBEIT Master Thesis

### **Auswertung und Interpretation akustischer Messungen zur Ermittlung der Kontaktlänge und Schiebewirkung von Erdbauwalzen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von  
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam  
und  
Univ.Ass. Dipl.-Ing. Johannes Pistol, BSc

E220-2  
Institut für Geotechnik  
Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Lukas Stöberl, BSc

0626442

Dörfelstraße 14/25  
1120 Wien

Wien, im September 2015

## **Danksagung**

Ich danke allen Personen die mich während meiner Studienzeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam für die Ermöglichung und Betreuung dieser Arbeit.

Ein großer Dank gebührt auch meinem guten Freund Univ.Ass. Dipl.-Ing. Johannes Pistor BSc., der mich mit großem Fachwissen unterstützt und bei der Erstellung dieser Arbeit hervorragend betreut hat. Doch auch für die schöne gemeinsame Studienzeit möchte ich mich bei ihm, wie auch bei Dominik Stadler, Bernhard Eichwalder, Mario Hager und Patrick Huber besonders bedanken.

Allen Beteiligten des Grundsatzversuches, insbesondere Priv.Do. Dipl.-Ing. Dr.techn. Fritz Kopf und Dipl.-Ing.(FH) Martin Fritz, danke ich ebenfalls recht herzlich.

Meiner Freundin Valeria Kisyma danke ich für die Motivation und den Rückhalt, den sie mir während der Erstellung dieser Arbeit gegeben hat und dass sie mich auch in stressigen Zeiten unterstützt hat.

Meinen Eltern Christoph und Gabriele Stöberl gebührt allerdings der größte Dank, da sie mir durch die finanzielle Unterstützung und den moralischen Beistand mein Studium an der Technischen Universität Wien erst ermöglicht haben.

## **Kurzfassung**

Im April und Mai 2012 wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes der Technischen Universität Wien auf einem Testfeld in der Nähe von Fischamend Feldversuche mit einer Tandemwalze durchgeführt. Ziel der Forschungsarbeit ist die Untersuchung des Bewegungsverhaltens dynamisch angeregter Walzen, wobei das Hauptinteresse auf der Erforschung der Oszillationswalze liegt. Unter anderem wurde eine akustische Messmethode zur Bestimmung der Kontaktlänge zwischen Bandage und Untergrund sowie der Schiebewirkung der Walze entwickelt. Die Kontaktlänge kann als direkter Indikator für die Steifigkeit des Bodens verwendet werden.

Inhalt dieser Arbeit ist die Beschreibung des Versuches und der akustischen Messmethode sowie die Auswertung und Interpretation der gemessenen Kontaktlängen. Darüber hinaus werden die theoretischen Hintergründe erläutert und rechnerisch ermittelte Werte der Kontaktlänge mit den gemessenen Werten verglichen. Ziel der Arbeit ist es über die Kontaktlänge genauere Rückschlüsse auf die Steifigkeit des verdichteten Bodens ziehen zu können.

## **Abstract**

In April and May 2012 in-situ tests with a tandem roller were carried out on a test field near Fischamend as part of a research project performed at Vienna University of Technology. The aim of the research is to examine the motion behavior of dynamically excited rollers, with the main focus on oscillating rollers. Amongst other research activities and investigations an acoustic measurement method for the determination of the contact length between the drum of the roller and the compacted soil and the banking effect of the roller was developed. The contact length shall be used as an indicator of the modulus of stiffness of the soil.

The presented thesis summarizes the tests and the acoustic measurement as well as the evaluation and interpretation of the measured data. Moreover, the theoretical background is explained and the calculated values of the contact length are compared to the measured values. The ambition is to draw conclusions from the contact length about the stiffness of the compacted soil.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung – Zielsetzung.....	6
2	Grundlagen der Verdichtung mit Walzen.....	7
2.1	Ziel der Verdichtung .....	7
2.2	Walzentypen.....	7
2.2.1	Statische Walzen .....	7
2.2.2	Dynamische Walzen .....	8
2.3	Walzenarten und Bandagenformen .....	11
2.3.1	Walzen .....	11
2.3.2	Bandagenformen.....	12
2.4	Möglichkeiten zur Ermittlung des Verdichtungserfolges .....	14
2.4.1	Dichtemessung .....	14
2.4.2	Steifigkeitsmessung.....	17
2.4.3	Rammsondierung .....	20
2.4.4	Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) .....	20
3	Grundsatzversuch.....	22
3.1	Versuchsfeld .....	22
3.1.1	Spuren 1 – 4: Testfeld, sandiger Kies.....	23
3.1.2	Spur 5: steifes Planum .....	26
3.1.3	Spur 6 – 7: „weicher“ Untergrund.....	27
3.2	Verdichtungsgerät: HAMM HD+90 VO.....	28
3.2.1	Technische Daten .....	28
3.3	Messtechnische Ausrüstung zur Bestimmung der Kontaktlänge.....	31
3.3.1	Messung der Kontaktlänge zwischen Bandage und Boden – Idee.....	31
3.3.2	Pfeifen .....	34
3.3.3	Luftversorgung .....	35
3.3.4	Aufnahmegeräte.....	36
3.4	Vergleichsversuche mit der dynamischen Lastplatte.....	36
4	Theoretische Grundlagen der Versuchsauswertung.....	38
4.1	Hertz'sche Pressung .....	38
4.2	Numerische Simulation - FE-Modell ABAQUS .....	42
5	Versuchsauswertung .....	45
5.1	Aufbereitung der Audio-Dateien.....	45



5.2	Auswertung der Kontaktlänge.....	48
5.3	Messung der Bugwelle – Asymmetrie .....	53
5.4	Ergebnisse der ausgewerteten Messungen .....	55
5.5	Ergebnisse der Vergleichsversuche mit der dynamischen Lastplatte .....	67
5.6	Qualitativer Zusammenhang zwischen dem E-Modul des Bodens und der Kontaktlänge ...	71
5.6.1	Grundlagen .....	71
5.6.2	Ermittlung des $f$ -Faktors .....	73
5.7	Gegenüberstellung der Kontaktlängen des FE-Modells mit den Kontaktlängen nach der Theorie der Hertz'schen Pressung .....	80
6	Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen .....	82
6.1	Zunahme des E-Moduls .....	82
6.2	Zusammenhang E-Modul – Kontaktlänge .....	83
6.3	Variationen der Einstellungen bei den Messfahrten und Zusammenhang mit der Kontaktlänge .....	84
6.3.1	Variation der Geschwindigkeit .....	86
6.3.2	Variation der Frequenz der Oszillation.....	87
6.4	Verhalten der Bugwelle .....	88
6.4.1	Verhalten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit .....	89
6.4.2	Verhalten in Abhängigkeit von der Oszillationsfrequenz .....	91
6.5	Vergleich der Messwerte der Kontaktlänge mit den berechneten Werten nach der Theorie der Hertz'schen Pressung.....	93
6.6	Probleme bei der Messung an der Vibrationsbandage.....	102
6.7	Alternativen zur akustischen Methode .....	103
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	104
8	Literaturverzeichnis.....	105

## **1 Einleitung – Zielsetzung**

Oberflächennahe Verdichtung erfolgt im Erdbau zumeist mit Walzen. Diese Walzen können dynamisch angeregt werden oder der Boden wird nur mit der statischen Auflast der Walzen belastet. Die Verdichtung findet üblicherweise durch oftmaliges Überrollen des Materials statt.

Das Prinzip der Verdichtung mittels Walzen ist, dass dem Material plastische Verformungen unter Auflast aufgeprägt werden und dadurch eine Verringerung des Porenvolumens erreicht wird, was die Reduktion des Gesamtvolumens bei gleichzeitiger Erhöhung der Dichte zur Folge hat. Vorwiegend durch plastische Schubverzerrungen entsteht vor der Walze eine Bugwelle, die in gewissen Grenzen nicht störend, sondern sogar notwendig ist. Tritt dieses Phänomen jedoch massiv auf, spricht man von der Schiebewirkung der Walze, welche auch zu Problemen mit der Integrität des zu verdichtenden Materials führen kann und in diesen Dimensionen einen unerwünschten Effekt darstellt, den es zu erkennen gilt.

Die Verdichtung von Materialien führt üblicherweise zu einer Erhöhung deren Steifigkeit. Eine Walze, die zum Beispiel mit konstanter Auflast das Material überrollt, verursacht bei unverdichtetem, weichem Material eine tiefe Setzungsmulde mit großer Kontaktlänge. Mit zunehmender Verdichtung des Materials und dessen erhöhter Steifigkeit dringt die Walze bei den folgenden Übergängen sukzessive weniger in das Material ein, was durch eine geringere Kontaktlänge ersichtlich wird. Ist die Walze wesentlich steifer als das zu verdichtende Material, so eignet sich die Messung der Kontaktlänge zur Beurteilung der Materialsteifigkeit und somit auch des Verdichtungszustandes. Auch Inhomogenitäten im Material können so erkannt werden.

Im Zuge von Versuchsfahrten mit einer Tandemwalze mit Vibrations- und Oszillationsbandage im Mai 2012 wurde mittels einer akustischen Messmethode die Kontaktlänge und die Schiebewirkung der Walze auf verschiedenen Untergründen ermittelt. Ziel dieser Arbeit war es bei der Versuchsdurchführung mitzuhelfen, die Rohmessdaten auszuwerten, aufzubereiten und zu interpretieren, um eine Aussage über den Verdichtungserfolg treffen zu können.

## 2 Grundlagen der Verdichtung mit Walzen

### 2.1 Ziel der Verdichtung

Die Lastableitung ist für den Bauingenieur schon immer ein zentrales Thema und stellt in all seinen Facetten eines der wichtigsten Teilgebiete dieser Profession dar. Worin sich so gut wie alle Bauwerke gleichen ist, dass die Lasten schlussendlich in den Untergrund geleitet werden und der Untergrund eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen muss, um die Lasten aufnehmen zu können. Oftmals reicht die Tragfähigkeit des natürlich gewachsenen Bodens nicht aus. In diesem Fall kann man durch Bodenverbesserungsmaßnahmen das bodenmechanische Verhalten beeinflussen und verbessern. Eine dieser Maßnahmen stellt die Oberflächenverdichtung durch Walzen dar.

Beim Überrollen des Untergrundes mit Walzen wird durch Verringerung des Porenvolumens eine höhere Lagerungsdichte erzielt, wodurch sich auch die Tragfähigkeit des Bodens erhöht. Die Tiefenwirkung dieser Methode liegt im Allgemeinen bei ungefähr 0,2–1,5m, wodurch das Anwendungsgebiet größtenteils im Verdichten von lagenweise eingebauten Schüttungen liegt und somit vor allem in folgenden Bereichen zum Einsatz kommt [1]:

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

### 2.2 Walzentypen

Die grundlegendste Einteilung der Walzen kann in statische und dynamische Walzen erfolgen.

#### 2.2.1 Statische Walzen

Bei statischen Walzen wird durch das Zusammendrücken des Bodens infolge des Eigengewichtes der Walze das Porenvolumen verringert und somit die Tragfähigkeit erhöht. Die charakteristische Größe ist die statische Linienlast. Die Tiefenwirkung ist geringer als bei dynamischen Walzen und kann sinngemäß durch Erhöhung des Eigengewichts beeinflusst werden. Alternativ kann man die Verdichtungswirkung auch durch die Bandagenform erhöhen (siehe Kapitel 2.3.2).

Aufgrund der geringeren Tiefenwirkung im Vergleich zu dynamischen Walzen werden statische Walzen seltener eingesetzt. Lediglich in wassergesättigten bindigen Böden kann es durch das Aufsteigen des Porenwassers durch die dynamische Anregung zu einer Verschlechterung der Bodeneigenschaften kommen, weshalb sich in solchen Fällen die Verdichtung mit statischen Walzen empfiehlt.

### 2.2.2 Dynamische Walzen

Aufgrund des größeren Verdichtungserfolges kommen heute hauptsächlich dynamische Walzen zum Einsatz. Durch Unwuchten in der Bandage werden Schwingungen auf den Boden übertragen, wodurch die innere Reibung zwischen den Bodenkörnern herabgesetzt wird und somit eine Kornumlagerung begünstigt wird. Durch die zusätzliche Wirkung des Eigengewichtes der Walze kommt es zu einer Verringerung des Porenvolumens, wodurch die Dichte sowie die Tragfähigkeit steigen. Je nach Anordnung der Unwuchten wird zwischen vibrierender und oszillierender Anregung unterschieden.

#### Vibrationswalzen:

In der Vibrationsbandage befindet sich eine, in der Bandagenachse angeordnete, Unwucht, welche die Bandage bei Betrieb in eine kreisförmige Bewegung versetzt und somit, zusätzlich zur statischen Auflast der Walze, Druck- beziehungsweise Scherwellen in den Boden leitet, wodurch eine vorwiegend vertikal gerichtete Belastung auf den Boden übertragen wird und somit eine größere Tiefenwirkung erzielt wird. Die Schütthöhen betragen bis zu 50 cm. Durch die auftretenden Schwingungen kann die Vibrationswalze allerdings nicht überall eingesetzt werden, da es zu Beschädigungen an naheliegenden Bauwerken kommen kann.

Von großer Bedeutung für den Verdichtungserfolg sind die statische Linienlast, die Masse der Bandage, die Unwuchtmasse und deren Exzentrizität(en), die Erregerfrequenz(en) und die Laufrichtung der Unwucht.

Da für den effizienteren Einsatz der Vibrationserregung eine zweigeteilte Unwucht verwendet wird, kann man durch die Drehrichtung der beiden Unwuchtmassen den Gesamtschwerpunkt ändern und es kann die Größe der Schwingungsamplitude geändert werden (Abbildung 2-1).

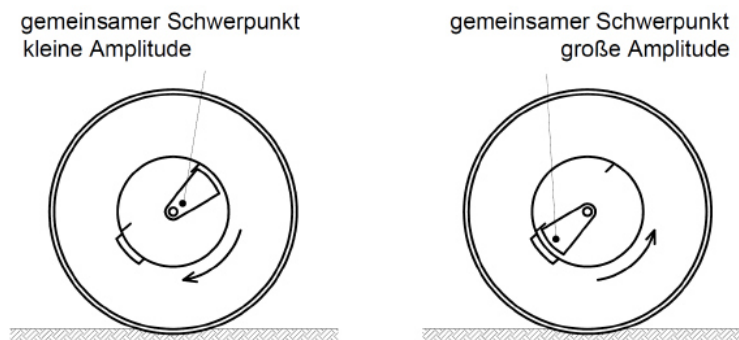


Abbildung 2-1: Kleine und große Amplitude in Abhängigkeit der Drehrichtung [2]

In Abhängigkeit von den Maschinenparametern und Bodeneigenschaften arbeiten Vibrationswalzen in unterschiedlichen Betriebszuständen (siehe Abbildung 2-2). Bei weichem Boden befinden sich die Bandage der Walze und der Untergrund in ständigem Kontakt. Das Abheben findet bei etwas steiferem Boden statt. Hier verliert die Bandage bei jeder Umdrehung den Kontakt mit dem Untergrund. Die Verdichtungswirkung ist in diesem Zustand sehr gut und so ist das Abheben auch der angestrebte Betriebszustand.

Bei weiterem Ansteigen der Bodensteifigkeit kommt es zum Springen. Die Bandage schlägt abwechselnd mit einem weichen und einem harten Schlag auf. Verschwindet der weiche Schlag vollkommen, so kommt es zum vollen Springen, bei dem die Bandage nur bei jeder zweiten

## 2 - Grundlagen der Verdichtung mit Walzen

Umdrehung Bodenkontakt hat. Die Verdichtungswirkung nimmt hierbei ab und die Walze wird außerdem überproportional belastet.

Noch steiferer Untergrund bewirkt das Taumeln, bei dem die Walze abwechselnd auf der rechten und linken Seite aufschlägt. Ein weiteres Ansteigen der Bodenfestigkeit führt zu chaotischen Bewegungen, die vom Walzenfahrer nicht mehr kontrollierbar sind. Die beiden letztgenannten Zustände sollten in jedem Fall vermieden werden.

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

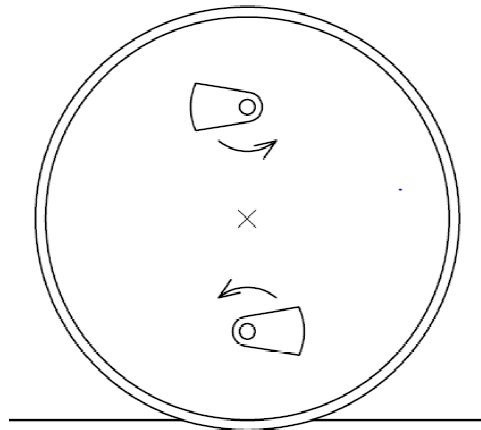
Abbildung 2-2: Betriebszustände einer Vibrationswalze [2]

### Oszillationswalzen:

In der Oszillationsbandage erzeugen gleichsinnig drehende Massen ein Moment um die Bandagenachse. Das Moment ändert während einer Drehung der Massen seine Wirkrichtung (vor- und rückwärts), sodass eine oszillierende Bandagenbewegung entsteht. Hierbei werden vorwiegend Schubkräfte in den Boden eingeleitet, wodurch die Bodenpartikel in Schwingung versetzt werden. Dadurch wird die innere Reibung des Materials wesentlich herabgesetzt und damit eine Kornumlagerung begünstigt. Dieser Vorgang bewirkt eine Verringerung des Porenvolumens und ein Ansteigen der Dichte.

Durch die Oszillation werden deutlich geringere Schwingungsbelastungen der Umgebung erzeugt als bei der Vibration. Dadurch können mit Oszillation auch empfindliche Strecken (wie zum Beispiel auf Brückenbauwerken oder im Stadtgebiet) verdichtet werden. Allerdings ist auch die Tiefenwirkung geringer, weshalb geringere Schüttthöhen (ca. 20 cm) anzuwenden sind.

Durch die horizontale Krafteinleitung in den Boden erzielen Oszillationswalzen eine sehr glatte Oberfläche, wodurch sie sich auch besonders für den Asphalt und Deponiebau zur Versiegelung der Oberfläche eignen.



**Abbildung 2-3: Prinzip der Oszillation**

Grundsätzlich treten drei Betriebszustände bei der dynamischen Verdichtung mit Oszillation auf. Ist der Boden weich, so tritt der Betriebszustand „Haften“ auf. Hier kann der Boden den oszillierenden Bewegungen der Bandage noch folgen und es kommt zu keinem Schlupf und keiner dynamischen Relativverschiebung zwischen der Bandagenoberfläche und dem Boden. Die Haftreibung zwischen Boden und Bandage wird also nicht überschritten.

Bei größerer Steifigkeit des Untergrundes wird die Haftreibungskraft von der Bodenkontaktkraft überschritten und es kommt zum „Symmetrischen Gleiten“ zwischen Bandage und Boden. Es tritt Schlupf auf und die dynamische Relativverschiebung ist demnach ungleich null. Ist die Dauer der Gleitphase in und gegen die Fahrtrichtung unterschiedlich lang, spricht man vom „Asymmetrischen Gleiten“. Der Zustand des Symmetrischen und Asymmetrischen Gleitens sollte vermieden werden, da der Verschleiß des Bandagenmantels höher ist und es zur Feinteilbildung an der Oberfläche des Untergrundes kommt.

Zwischen den Betriebszuständen des Haftens und Gleitens liegt der Zustand „Einseitiges Gleiten“, bei dem es aufgrund der Ausbildung einer Bugwelle oder dem Antriebsmoment nur in einer Richtung zur Überschreitung der Haftreibung und somit zum Gleiten kommt, in der anderen Richtung herrscht immer noch der Zustand Haften.

#### *VARIO-Walzen und VARIO CONTROL-Walzen:*

Walzen mit Richtschwinger, auch VARIO-Walzen genannt, wurden 1998 von der Firma BOMAG entwickelt [4]. Es handelt sich hierbei um eine Weiterentwicklung von Vibrationswalzen, wobei die Bandagen solcher Walzen zwei Unwuchten besitzen, die zentrisch angeordnet sind. Im Gegensatz zur Vibrationswalze erfolgt die Rotation jedoch gegensinnig.

Durch die Verdrehung der Erregereinheit (d.h. der Unwuchten) lässt sich die Schwingungsrichtung (vertikal, schräg, horizontal) steuern (siehe Abbildung 2-4). Bei vertikaler (90°) und schräger (ca 30°-90°) Einstellung verhalten sich die Walzen nahezu wie Vibrationswalzen. Die Tiefenwirkung ist dann am größten. Bei horizontaler (0°) Einstellung kann man die Verdichtung mit jener von Oszillationswalzen vergleichen, auch wenn die grundsätzliche Walzenbewegung anders ist.

Der Walzenfahrer kann während der Fahrt die Einstellungen direkt verändern und somit ohne Zeitverlust auf den angetroffenen Boden reagieren.

## 2 - Grundlagen der Verdichtung mit Walzen

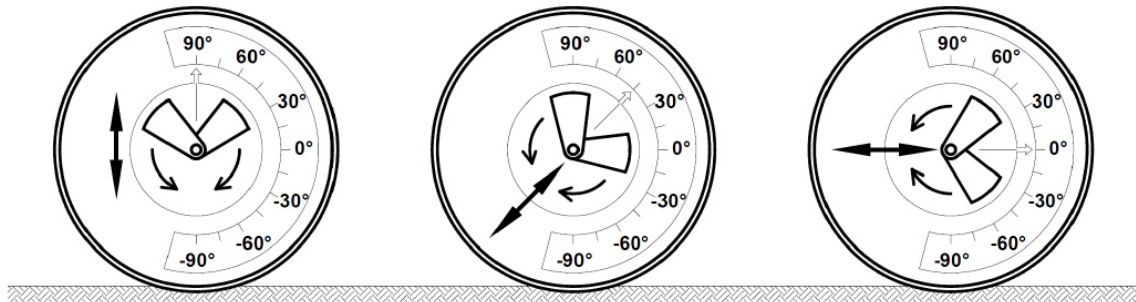


Abbildung 2-4: Variation der Richtung der Erregereinheit bei VARIO-Walzen [2]

Eine Weiterentwicklung der VARIO-Walzen sind die VARIO-CONTROL-Walzen, die im Prinzip gleich aufgebaut sind wie VARIO-Walzen, jedoch selbstständig aufgrund des Betriebsverhaltens der Bandage, das primär von der Bodensteifigkeit abhängig ist, die Einstellungen des Richtungsschwingers wählen. Durch die genaue Anpassung an den Untergrund kann eine gezielte und schonende Verdichtung gewährleistet werden und eine Überverdichtung oder Kornzertrümmerungen vermieden werden.

### 2.3 Walzenarten und Bandagenformen

#### 2.3.1 Walzen

Im Folgenden werden kurz die verschiedenen Walzenarten beschrieben, wobei auf handgeführte Oberflächenverdichtungsgeräte nicht weiter eingegangen wird.

##### Walzenzüge:

Walzenzüge bestehen aus einer Bandage an der Vorderseite die der Verdichtung dient, sowie zwei Gummirädern an der Hinterseite für den Antrieb. Üblicherweise wird die Bandage über ein Knickgelenk mit dem hinteren Teil der Walze, auf dem sich auch die Fahrerkabine und der Motor befinden, verbunden. Die Bandage ist vom Rahmen über Gummipuffer dynamisch entkoppelt. Anwendung finden Walzenzüge vor allem im Erd- und Dammbau. Auf Abbildung 2-7 und Abbildung 2-8 sind Walzenzüge zu sehen.

##### Tandemwalzen:

Im Unterschied zum Walzenzug übernehmen die Bandagen bei der Tandemwalze (Abbildung 2-5) nicht nur die Verdichtung sondern auch den Antrieb, weshalb es möglich ist die Tandemwalze mit zwei Bandagen zu bestücken. Vorder- und Hinterteil können entweder starr oder mit Knickgelenk miteinander verbunden sein. Aufgrund des leichteren Eigengewichtes im Vergleich mit Walzenzügen, arbeiten Tandemwalzen hauptsächlich mit dynamischer Anregung. Das Haupteinsatzgebiet stellt der Straßen- und Asphaltbau dar.



Abbildung 2-5: Tandemwalze mit zwei Glattmantelbandagen [3]

### Kombiwalzen:

Ähnlich der Tandemwalze sind auch bei der Kombiwalze (Abbildung 2-6) beide Achsen zur Verdichtung vorgesehen, allerdings befindet sich auf der Hinterachse keine Bandage sondern Gummiräder. Die vordere Bandage verdichtet durch Vibration oder Oszillation in die Tiefe, während die hinteren Gummiräder statisch und durch ihre knetende Wirkung die Oberfläche verdichten. Wie bei Tandemwalzen werden Kombiwalzen ebenfalls hauptsächlich im Straßen- und Asphaltbau angewendet.



Abbildung 2-6: Kombiwalze [3]

## 2.3.2 Bandagenformen

### Glattmantelbandagen

Die gängigste Bandagenform ist die Glattmantelbandage. Es handelt sich hierbei um die Form eines gewöhnlichen Zylinders. Findet keine zusätzliche dynamische Verdichtung statt, so wird im statischen Fall eine kontinuierliche Kraft auf den Boden übertragen. Das Ergebnis ist eine gleichmäßige



## 2 - Grundlagen der Verdichtung mit Walzen

Verdichtung der oberen Schicht sowohl bei bindigen also auch bei nicht bindigen Böden. In Abbildung 2-7 ist die linke Walze mit einer Glattmantelbandage ausgestattet.

### Schafffußbandagen

Auf einer Schafffußbandage, die oft auch Stampffußbandage genannt wird, sind über den gesamten Bandagenumfang Stollen verteilt (rechte Walze in Abbildung 2-7). Diese Stollen bewirken einen stetigen Krafrichtungswechsel, wodurch es zu einer Knetwirkung kommt. Dadurch wird eine mögliche Verkeilung der Körner verhindert und das Porenvolumen des Bodens somit effektiver verkleinert. Außerdem kommt es zwischen den Stollen zu einem Aufbrechen des bindigen Bodens, wodurch sich der Porenwasserüberdruck abbauen kann, was zu einem besseren Verdichtungsergebnis als mit Glattmantelbandagen führt.



Abbildung 2-7: Glattmantelbandage (links) und Schafffußbandage (rechts) [3]

### Polygonbandagen

Die Polygonbandage besteht aus drei achteckigen Bandagenelementen, welche zueinander versetzt angeordnet sind (Abbildung 2-8). Durch die kontinuierliche Drehbewegung der Walze wechseln sich die Krafteinwirkung von Platten- und Keilsegmenten ab, weshalb ebenfalls wie bei der Schafffußbandage eine Knetwirkung erzielt wird und die vertikalen Druckkräfte konzentrierter eingeleitet werden. Dadurch wird eine größere Tiefenwirkung erzielt und Verkeilungen der Bodenkörner können vermieden werden. Außerdem kommt es bei bindigen Böden durch das Aufreißen des Bodens zu einem Abbauen des Porenwasserüberdrucks. Anwendung findet die Polygonbandage hauptsächlich auf Felsbruchmaterial und bindigen Böden.



Abbildung 2-8: Polygonbandage [5]

## 2.4 Möglichkeiten zur Ermittlung des Verdichtungserfolges

Für alle Maßnahmen zur Bodenverbesserung, worunter auch die Oberflächenverdichtung mit Walzen fällt, muss es auch eine entsprechende Qualitätskontrolle geben, um zu prüfen, ob die gestellten Anforderungen an den Untergrund schlussendlich auch erreicht wurden.

Es stehen grundsätzlich drei Möglichkeiten zur Verfügung, den Verdichtungserfolg nachzuweisen:

- ◆ Dichtemessung – direkte Methode zur Bestimmung der Dichte im Feld (Kapitel 2.4.1)
- ◆ Steifigkeitsmessung – indirekte Messmethode; liefert einen Verformungsmodul (Kapitel 2.4.2)
- ◆ Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) - indirekte Messmethode - Aus dem Bewegungsverhalten der Bandage wird auf den Verdichtungszustand geschlossen. Eine flächenhafte Beurteilung ist möglich. (Kapitel 2.4.4)

Abbildung 2-9 zeigt eine Übersicht der direkten und indirekten punktuellen Verdichtungsprüfmethode.

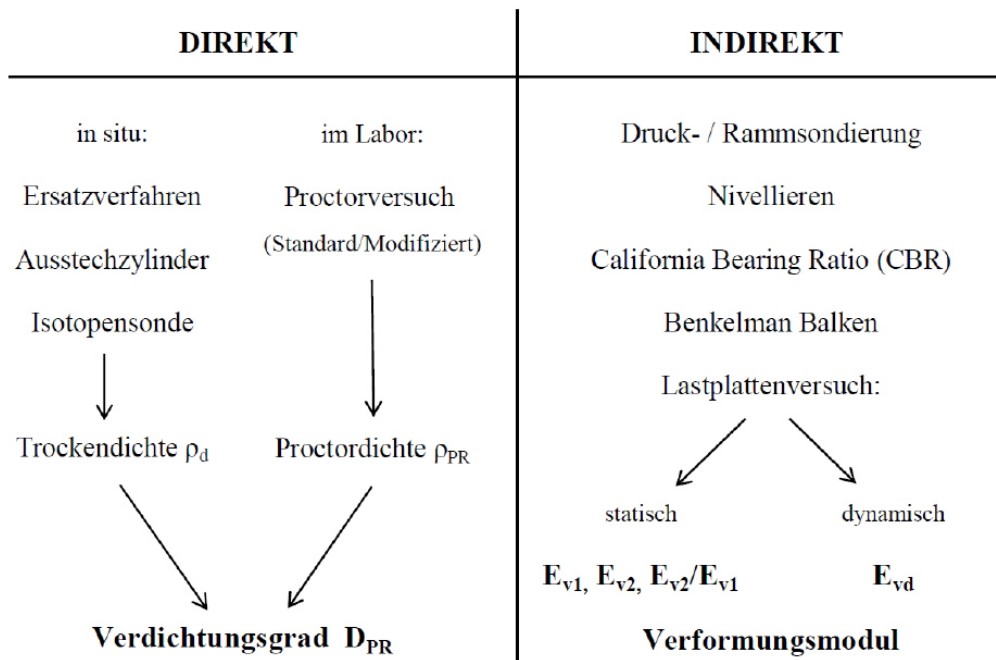


Abbildung 2-9: Übersicht über punktuellen Verdichtungsprüfmethode [6]

### 2.4.1 Dichtemessung

Bei der Dichtemessung handelt es sich um eine direkte Methode um punktuell den Verdichtungserfolg nachzuweisen. Über die im Labor ermittelte Proctordichte kann man den Verdichtungsgrad  $D_{PR}$  bestimmen.

$$D_{PR} = \frac{\rho_D}{\rho_{Pr}} \cdot 100 \quad (1)$$

mit:

$D_{PR}$  Verdichtungsgrad [%]

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

$\rho_{Pr}$  im Labor bestimmte Proctordichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

## 2 - Grundlagen der Verdichtung mit Walzen

RVS 08.03.01 [7] gibt Mindestanforderungen für den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  für den Autobahn- und Straßenbau sowie für den Eisenbahnbau an.

Beträgt der geforderte Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  beispielsweise 100%, so muss die im Feld ermittelte Dichte mindestens der im Labor ermittelten Proctordichte entsprechen.

### Proctorversuch

Mit Hilfe des Proctorversuches wird die Proctordichte ermittelt, die die erzielbare Trockendichte in Abhängigkeit vom Wassergehalt einer Bodenprobe bei vorgegebener Verdichtungsarbeit angibt. Geregelt wird der Proctorversuch in ÖNORM B 4418:2007 [8]. Der Versuch dient der Abschätzung der im Feld unter Einwirkung von Verdichtungsgeräten erreichbaren Dichte des Bodens und liefert eine Bezugsgröße für die Beurteilung der örtlich vorhandenen Dichte.

Die Durchführung des Proctorversuches besteht aus mehreren Einzelversuchen. Die Bodenprobe wird auf mehrere Teilmengen aufgeteilt, welche sich nur durch den Wassergehalt  $w$  voneinander unterscheiden. In einem genormten Stahlzylinder mit dem Volumen  $V$  werden die Einzelproben mit einem Fallkörper verdichtet. Beim Standard-Proctorversuch beträgt die volumenbezogene Verdichtungsenergie  $0,60 \text{ MNm/m}^3$ , beim modifizierten Proctorversuch  $2,65 \text{ MNm/m}^3$ . Anschließend wird aus der Dichte der feuchten Probe  $\rho$  mit dem bekannten Wassergehalt  $w$  die Trockendichte  $\rho_d$  errechnet. Aus den Werten aller Einzelproben kann man dann in einem Diagramm den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt  $w$  und der erzielbaren Trockendichte  $\rho_d$  ermitteln, wodurch sich dann auch die maximal erreichbare Trockendichte (Proctordichte)  $\rho_{Pr}$  und der zugehörige optimale Wassergehalt  $w_{Pr}$  beziehungsweise  $w_{opt}$  ergeben. (siehe Abbildung 2-10).

Aus diesem Diagramm erkennt man auch, dass bei größerer Verdichtungsenergie größere Trockendichten erreicht werden können, sowie dass der zugehörige optimale Wassergehalt geringer ist. Die Proctorkurven schmiegen sich asymptotisch an den sogenannten „nassen Ast“ der Sättigungskurve ( $S_r = 1,0$ ) an, können diesen jedoch aus physikalischen Gründen nie überschreiten.

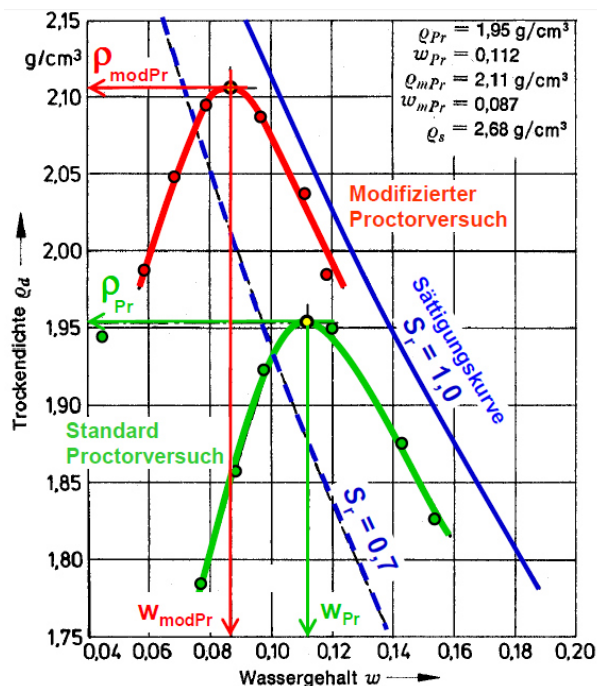


Abbildung 2-10: Auswertung Proctorversuch [9]

### Ausstechzylinder:

Mit diesem Verfahren zum Einsatz im Feld wird die Dichte von bindigen, feinkörnigen Böden sowie von Fein- und Mittelsanden mit einem gewissen Feinkornanteil bestimmt. Geregelt ist dieses Verfahren in ÖNORM B 4414-2 [10].

Nach den Verdichtungsvorgängen wird der Ausstechzylinder (Abbildung 2-11) in den Boden gedrückt beziehungsweise gerammt und danach auf einer Seite freigegeben, um das Ausstechblech unter dem Zylinder hineindrücken zu können. Beides wird anschließend vorsichtig geborgen, der Boden am oberen Zylinderrand eben abgeglichen und der Deckel aufgesetzt. Gleiches wiederholt man mit dem unteren Ende, nachdem der Zylinder umgedreht wurde.

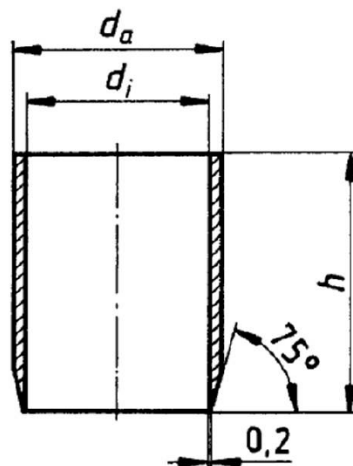


Abbildung 2-11: Ausstechzylinder [10]

Nachdem das Volumen des Ausstechzylinders bekannt ist, werden durch Abwiegen vor und nach der Trocknung bei 105°C die Trockendichte sowie der Wassergehalt bestimmt.

### Ersatzverfahren:

Ebenfalls in ÖNORM B 4414-2 [10] geregelt, werden beim Ersatzverfahren an einer Stelle des verdichteten Untergrundes eine Probe entnommen und im Labor Wassergehalt und Trockendichte bestimmt. Das Volumen des durch die Probenentnahme entstandenen Hohlraumes wird durch das Wissen über die Schüttdichte  $\rho_E$  von Ersatzmaterialien bestimmt. Der Hohlraum wird mit dem Ersatzstoff gefüllt und gleichzeitig wird die Masse des benötigten Ersatzstoffes  $m_E$  dokumentiert. Das Volumen der Prüfgrube kann dann folgendermaßen berechnet werden:

$$V = \frac{m_E}{\rho_E} \quad (2)$$

Das Ersatzverfahren wird nach den verwendeten Ersatzmaterialien unterteilt. Zur Anwendung kommen beispielsweise:

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

### Isotopensonde:

Der Vorteil der Dichtebestimmung mit einer Isotopensonde ist, dass es sich um ein zerstörungsfreies Schnellprüfverfahren handelt. Grundlage ist die Aussendung von radioaktiver Strahlung und die Messung der Intensität der Rückreflexion. Aufgrund der Gefahr von radioaktiver Strahlung ist die Anwendung von radiometrischen Prüfmethode an strenge Auflagen geknüpft und genehmigungspflichtig. Genormt wird das Verfahren in ÖNORM B 4418 [8].

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

Für die Dichtemessung des verdichteten Bodens werden Gammastrahlen verwendet. Die Sonde wird dabei auf das zu untersuchende Material gesetzt. Die von der Sonde emittierten Gammastrahlen werden durch das Material abgeschwächt und gestreut. Mit Hilfe des integrierten Zählrohrs können die Intensitätsunterschiede bestimmt und daraus auf die Dichte des Materials geschlossen werden.

Die Wassergehaltmessung hingegen erfolgt mit Neutronenstrahlen, die an Wasserstoffatomen aufgrund der geringeren Masse abgebremst und abgelenkt werden.

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

### **2.4.2 Steifigkeitsmessung**

Im Gegensatz zu Dichtemessungen geben Steifigkeitsmessungen nur indirekt Aufschluss über die Verdichtung. Da jedoch mit steigender Trockendichte auch die Steifigkeit höher wird, lassen sich durch die Ermittlung des Verformungsmoduls, der ein Maß für die Steifigkeit ist, auch Rückschlüsse auf die Verdichtung ziehen. Zudem ist die Steifigkeit auch für die Lastabtragung maßgebend.

### Statischer Lastplattenversuch:

Die Regelungen für den Lastplattenversuch findet man in ÖNORM B 4417 [11].

Vor der Versuchsdurchführung wird die kreisförmige Lastplatte ( $d = 30 \text{ cm}$ ) auf das möglichst ebene und waagrechte Planum aufgelegt, wobei mögliche leichte Unebenheiten durch eine dünne Sandschicht ausgeglichen werden dürfen. Anschließend wird die Messbrücke aufgestellt und der Druckstempel zwischen Lastplatte und Gegengewicht gesetzt. Als Gegengewicht dient auf der Baustelle meist ein schweres Baufahrzeug. Weiters werden die Messuhren zur Verschiebungsmessung angebracht. Die Lastplatte wird nun hydraulisch in vorgegebenen Laststufen belastet und entlastet. Nach jeder Laststufe sind die Verformungen abzuwarten, bis sie auf weniger als  $0,02 \text{ mm/min}$  gefallen sind. Dann folgt die Ablesung der Messuhren und es wird mit der nächsten Laststufe gestartet.

## 2 - Grundlagen der Verdichtung mit Walzen

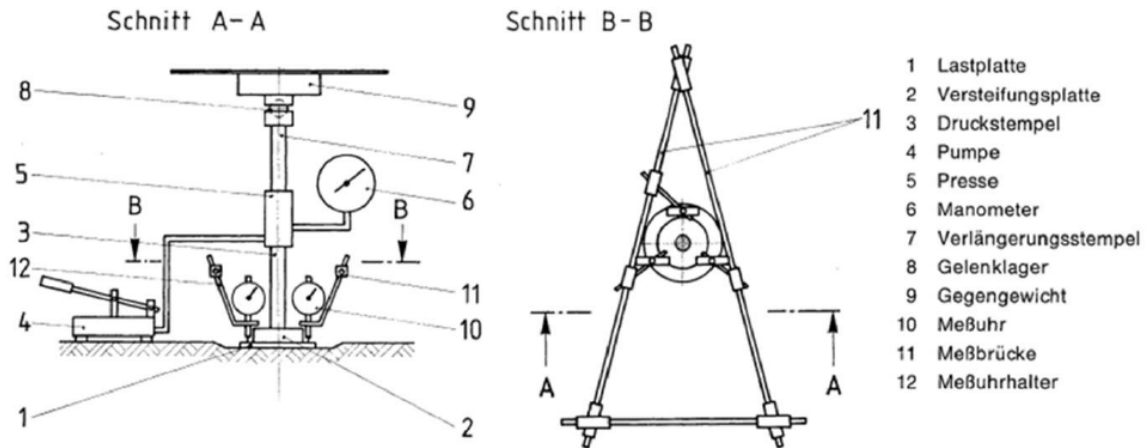


Abbildung 2-12: Versuchsaufbau des statischen Lastplattenversuches [11]

Nach Durchführung aller Belastungsstufen erhält man eine im Allgemeinen nichtlineare Last-Verformungsbeziehung, aus der die Verformungsmoduln, nämlich der Erstbelastungsmodul  $E_{V1}$  und gegebenenfalls der Zweitbelastungsmodul  $E_{V2}$ , zwischen definierten Laststufen berechnet werden können (siehe Abbildung 2-13).

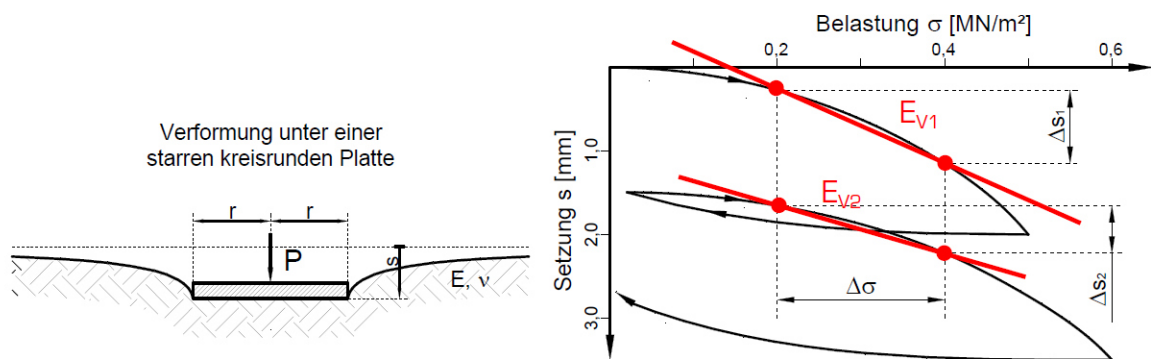


Abbildung 2-13: Geometrie und Auswertung des statischen Lastplattenversuches [6]

Die RVS 08.03.01 [7] gibt Mindestwerte für den Erstbelastungsmodul  $E_{V1}$  an. Aufgrund des großen Zeitaufwandes bei der Durchführung des statischen Lastplattenversuches werden andere Arbeiten auf der Baustelle behindert, da es zu keiner dynamischen Beeinflussung des Versuches kommen darf. Aus diesem Grund wird üblicherweise der schneller durchführbare dynamische Lastplattenversuch vorgezogen.

### Dynamischer Lastplattenversuch:

Der dynamische Lastplattenversuch wird zur Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls  $E_{vd}$  von Böden und Schüttlagen angewendet. Geregelt wird der Versuch in RVS 08.03.04 [12].

Das Leichte Fallgewichtsgerät, mit dem der Versuch durchgeführt wird, besteht aus einer kreisrunden Stahlplatte mit einem Durchmesser von 30 cm. Darauf steht auf einer Zentrierkugel die Belastungsvorrichtung mit dem Fallgewicht von 10 kg. Dieses fällt bei der Versuchsdurchführung nach dem Ausklinken durch eine Stange geführt aus rund 75 cm Höhe auf ein Feder-Dämpfer-Element und führt so einen genau definierten Stoß auf die Stahlplatte aus (Abbildung 2-15). Ein Beschleunigungssensor, welcher in der Platte zentrisch montiert ist, sendet dann die Signale an ein

## 2 - Grundlagen der Verdichtung mit Walzen

angeschlossenes elektronisches Messgerät, welches daraus den dynamischen Verformungsmodul berechnet. Dies geschieht durch zweimalige Integration der Beschleunigungssignale, wodurch man eine Verschiebung  $z$  erhält. Diese wird in die Formel  $E_{vd} = 22,5/z$  eingesetzt. Diese Formel ergibt sich dadurch, dass die maximale Bodenspannung  $\sigma_{max}$  mit  $100\text{kN/m}^2$  konstant angenommen wird, was der Amplitude der maximalen Bodenspannung beim Stoß entspricht.

$$E_{vd} = 1,5 \cdot r \cdot \frac{\sigma_{const}}{z_{max}} \quad (3)$$

$r$  entspricht hier dem Radius der Stahlplatte, der  $15\text{ cm}$  beträgt. Somit kommt man für  $E_{vd}$  zur bereits oben angeführten Formel:

$$E_{vd} = \frac{22,5}{z_{max}} \quad (4)$$

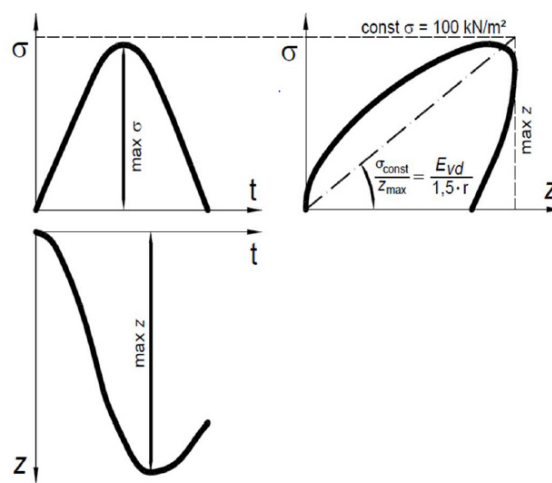


Abbildung 2-14: Bodenpressung, sowie Verschiebung und Arbeitsdiagramm der Platte des leichten Fallgewichtgerätes [9]

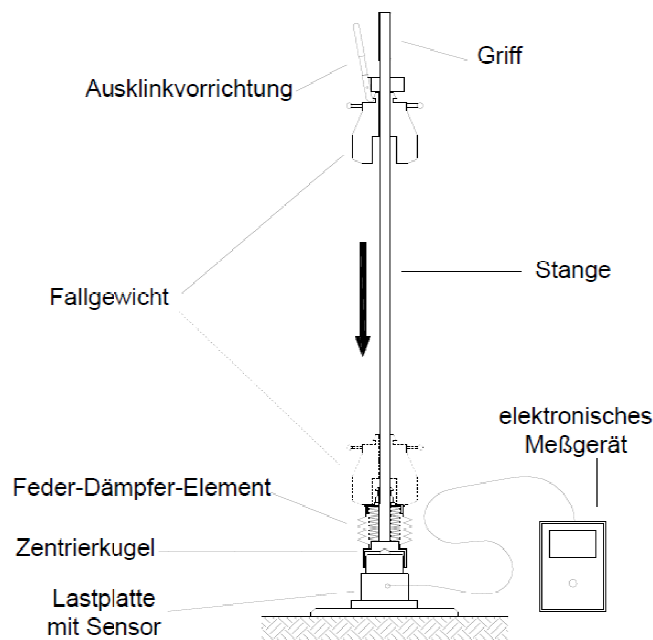


Abbildung 2-15: Komponenten des Leichten Fallgewichtgerätes [9]



## 2 - Grundlagen der Verdichtung mit Walzen

Bei der Ausführung des Versuches wird zunächst die Stahlplatte möglichst kraftschlüssig auf den Untergrund aufgelegt. Dann folgen drei Vorbelastungsstöße um ein sattes Aufliegen der Platte zu gewährleisten. Die Ergebnisse der Vorbelastungsstöße werden bereits notiert. Im Anschluss erfolgen die drei Messstöße, aus deren Mittelwert der Setzung der  $E_{vd}$  berechnet wird.

### 2.4.3 Rammsondierung

Rammsondierungen werden in der Praxis für die Kontrolle der Verdichtung durch Walzen eher selten eingesetzt. Das Ergebnis einer Rammsondierung ist weder die Dichte noch ein Verformungsmodul, jedoch gibt sie bei einem vorher-nachher Vergleich Rückschlüsse über die Lagerungsdichte des Bodens. Genormt wird die Rammsondierung entweder in der ÖNORM EN ISO 22476-2 [13] oder im Falle besonderer Rammsondierverfahren in ÖNORM B 4419 [14].

Durchgeführt wird der Versuch mit einer Sondierstange, die mit definierten Schlägen in den Boden gerammt wird. Die Anzahl der Schläge, die benötigt wird um die Sonde 10 cm in den Untergrund einzuschlagen, nennt man  $N_{10}$ -Wert, der dann in ein Diagramm eingetragen wird.

In Abhängigkeit vom Boden gibt es verschiedene Verfahren, unter anderem die schwere Rammsondierung (DPH, früher SRS 15) oder die leichte Rammsondierung (DPL, früher LRS 15).

### 2.4.4 Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK)

Die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle ist eine walzen- und arbeitsintegrierte Methode zur Verdichtungskontrolle. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Verdichtungskontrollen erzielt die FDVK nicht nur punktförmige Resultate sondern dokumentiert den Verdichtungserfolg flächendeckend. Die Anwendung ist derzeit noch auf Vibrationswalzen beschränkt. In RVS 08.03.02 [1] finden sich Regelungen für die Durchführung und Kalibrierung der FDVK.

Bei der Messung mittels FDVK dient die Vibrationswalze nicht nur zur Verdichtung, sondern auch als Messgerät. Voraussetzung ist, dass die Walze mit einem FDVK-System ausgestattet ist, das aus mehreren Komponenten besteht (Abbildung 2-16). Die Sensoreinheit ist an der Lagerschale der Bandage angebracht und misst die Beschleunigungen der Bandage in vertikaler Richtung. Die Prozesseinheit berechnet aus diesen Daten den aktuellen FDVK-Messwert, welcher dann von einer Anzeige- und Speichereinheit visualisiert und gespeichert wird. Zusätzlich gibt es einen Weg- bzw. Geschwindigkeitssensor oder in den moderneren Ausführungen ein GPS-Gerät um die Messwerte eindeutig einem geografischen Ort zuweisen zu können und die Abweichungen von der festgelegten Fahrgeschwindigkeit dokumentieren zu können.

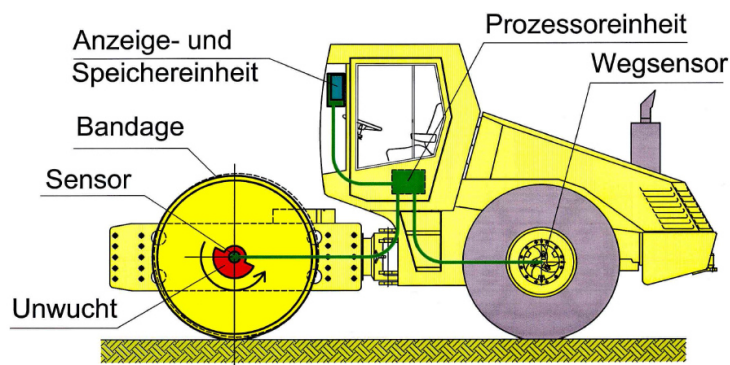


Abbildung 2-16: Komponenten eines FDVK-Messsystems [2]



## 2 - Grundlagen der Verdichtung mit Walzen

Das Prinzip der FDVK besteht aus der Analyse der Bandagenschwingung. Würde die Bandage ohne Kontakt mit dem Boden dynamisch angeregt, so würden die Beschleunigungssensoren eine Sinusschwingung aufzeichnen. Kommt die Bandage nun in Wechselwirkung mit dem Boden, so wird diese Sinusschwingung verzerrt. Bleiben die Walzenparameter konstant (Gerät, Amplitude, Frequenz, Fahrtrichtung, Fahrgeschwindigkeit, statische Auflast), so ändern sich die Schwingungsbewegung lediglich aufgrund einer Änderung der Untergrundverhältnisse.

Bei der Messung werden keine Absolutwerte betrachtet, da sich bei einer Änderung der Walzenparameter unterschiedliche Zahlenwerte ergeben würden. Vielmehr ist bei Fahrten mit konstanten Walzenparametern lediglich die Änderung der Messwerte für den Verdichtungserfolg relevant. Steigen die Messwerte nicht mehr signifikant an, so ist der Verdichtungsprozess abgeschlossen. In der Regel wird hier die Zuwachsgrenze mit 5% definiert. Da jede weitere Verdichtungsfahrt zu einer Kornzertrümmerung und damit einer Wiederauflöckerung des Untergrundes führen würde, ist ein FDVK-System für die Verdichtungsqualität von enormem Vorteil. Einen wesentlichen Einfluss auf die Messwerte der FDVK haben die in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Betriebszustände der Bandage.

Durch die Speicherung der Messwerte inklusive deren geografischer Lage, lässt sich der Verdichtungserfolg sehr gut illustrieren und für den Walzenfahrer in Echtzeit darstellen (siehe Abbildung 2-17). Somit ist eine gleichmäßige Verdichtung und Dokumentation des Untergrundes gewährleistet und Schwachstellen können auch in größerer Tiefe erkannt und behoben werden.



Abbildung 2-17: Illustration des Verdichtungserfolges [3]

### 3 Grundsatzversuch

Der Grundsatzversuch fand von 18. April bis 3. Mai 2012 statt. Die Versuchsleitung hatte Dipl.-Ing. Johannes Pistor vom Institut für Geotechnik inne. Für die messtechnische Ausstattung der Walze zeichnete sich die Firma VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH, mit den Projektbeteiligten Dipl.-Ing. Dr. Fritz Kopf sowie Dipl.-Ing. (FH) Martin Fritz, verantwortlich. Meine Aufgaben bei diesem Versuch waren das Steuern der Walze, allgemeine Mithilfe sowie die Auswertung der akustischen Messungen der Kontaktlänge zwischen Bandage und Untergrund, was den Kern dieser Arbeit darstellt.

Auf 7 Fahrspuren wurden in dieser Zeit 185 Messfahrten durchgeführt. Eine Messfahrt bestand aus der Vorwärtsfahrt mit jeweils verschiedenen Einstellungen der dynamischen Anregung der Walze, sowie der Rückwärtsfahrt, welche bei allen Fahrten statisch erfolgte. Nach jeder Messfahrt wurde mit Hilfe der dynamischen Lastplatte der dynamische Verformungsmodul des Bodens zur Dokumentation des Verdichtungserfolges bestimmt.

#### 3.1 Versuchsfeld

Durch die freundliche Unterstützung der HABAU Hoch- und Tiefbaugesellschaft m.b.H. wurde in einer Kiesgrube nahe des Flughafens Wien-Schwechat ausreichend Platz für ein Testfeld zur Verfügung gestellt.

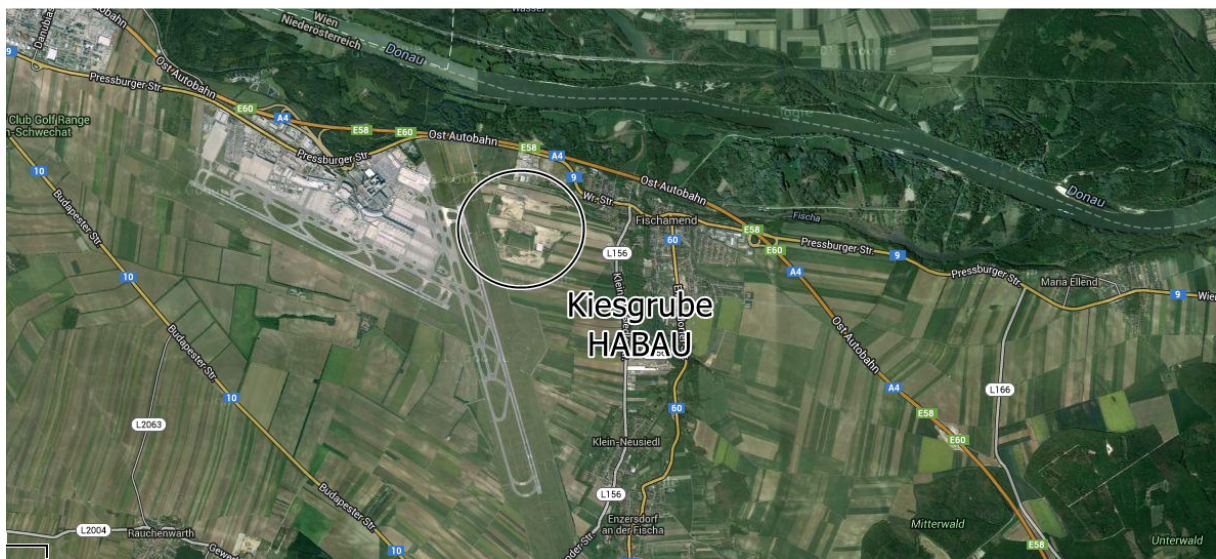


Abbildung 3-1: Satellitenbild der Umgebung des Messfeldes

Auf dem Areal der Kiesgrube wurden sehr gute Voraussetzungen für die Durchführung der Versuche vorgefunden. Insbesondere die homogene und annähernd ebene Umgebung für die Messungen der Erschütterungsausbreitung, die Möglichkeit auf dort stationierte Erdbaugeräte samt Fahrer zugreifen zu können (Radlader, LKW, Planierraupe oder Wasserwagen) sowie der Zugang zu geeignetem Schüttmaterial, Kraftstoff und das Vorhandensein eines leistungsfähigen Wasseranschlusses, der für die Gewichtsva-riation benötigt wurde, seien hierbei hervorgehoben. Auch wurde eine Garage zur Verfügung gestellt, in der anfallende Reparaturen an der Walze und deren Messtechnik durchgeführt werden konnten, sowie diverse Akkus der Messgerätschaften über Nacht aufgeladen werden konnten.

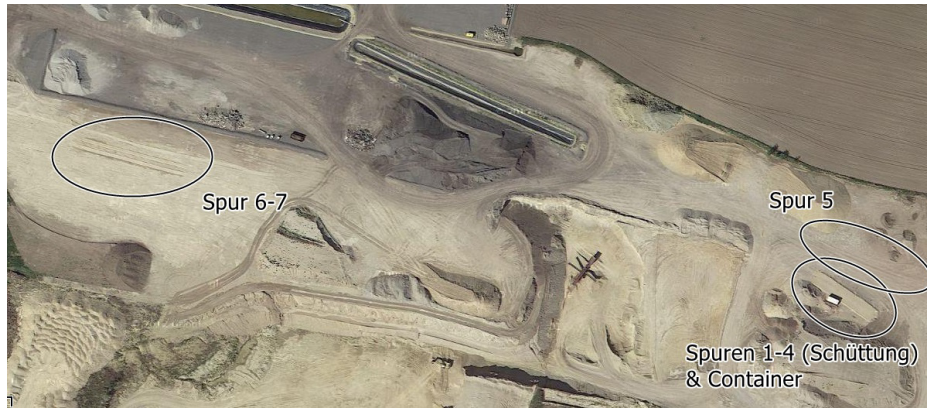


Abbildung 3-2: Anordnung der Spuren in der Kiesgrube

Es wurde ein Testfeld, bestehend aus 50cm Schüttung eines sandigen Kieses, eingerichtet (Spuren 1-4). Darüber hinaus konnten abseits dieses Testfeldes Vergleichsversuche auf unterschiedlichen Böden beziehungsweise auf unterschiedlichen Steigungen durchgeführt werden.

### 3.1.1 Spuren 1 – 4: Testfeld, sandiger Kies

Ein Großteil der Versuchsfahrten wurde auf den Spuren 1 bis 4 durchgeführt, die auf 50 cm Schüttung eines sogenannten „Wandschotters“ auf dem Planum eingerichtet und mit 20 m x 1,6 m dimensioniert wurden. Um bei den Messfahrten eine konstante Geschwindigkeit zu gewährleisten wurde eine ebene Vorlaufstrecke vor dem Beginn der eigentlichen Messspur berücksichtigt.

Spur 1 diente hauptsächlich Fahrten mit gleichzeitiger Oszillation und Vibration. Auf Spur 2 wurde lediglich mit Oszillation verdichtet und auf Spur 3 überwiegend mit Vibration. Statische Überfahrten fanden auf der Spur 4 statt.

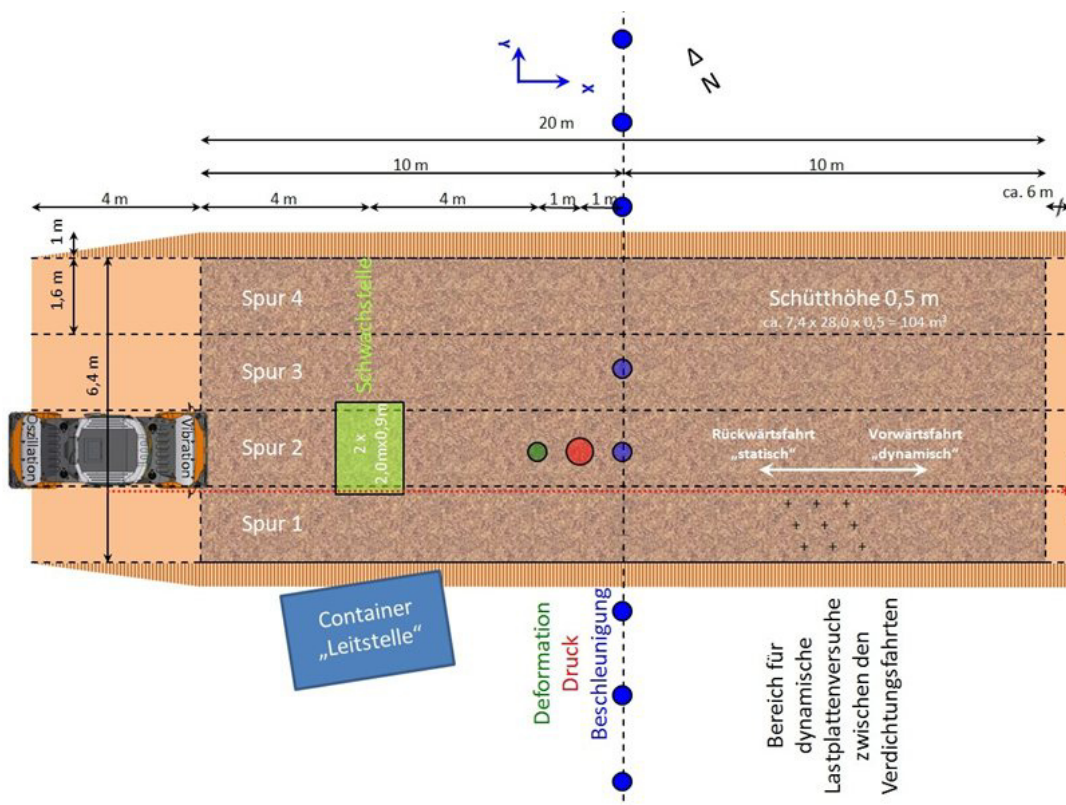


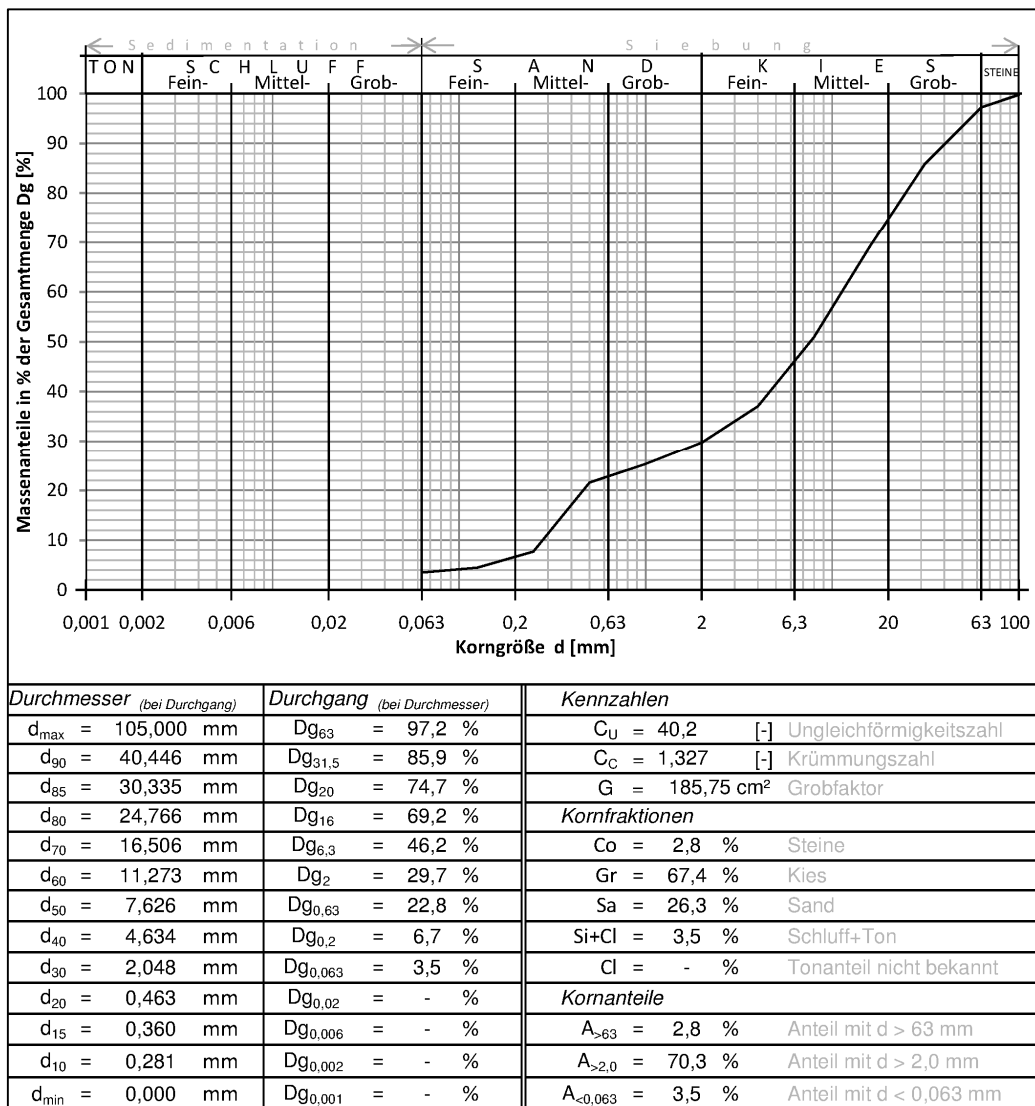
Abbildung 3-3: Spuren 1 – 4

### 3 - Grundsatzversuch

In Tabelle 3-1 sind die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen des Wandschotters vor und nach der Verdichtung angegeben. In Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5 ist die Kornverteilung dargestellt.

**Tabelle 3-1: Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchung des sandigen Kieses**

			Wandschotter vor Verdichtung	Wandschotter nach Verdichtung
Natürlicher Wassergehalt:	$w_N$	[%]	1,9	1,1
Korndichte	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,70	2,70



**Abbildung 3-4: Kornverteilungskurve des unverdichteten Wandschotters auf den Spuren 1-4**



### 3 - Grundsatzversuch

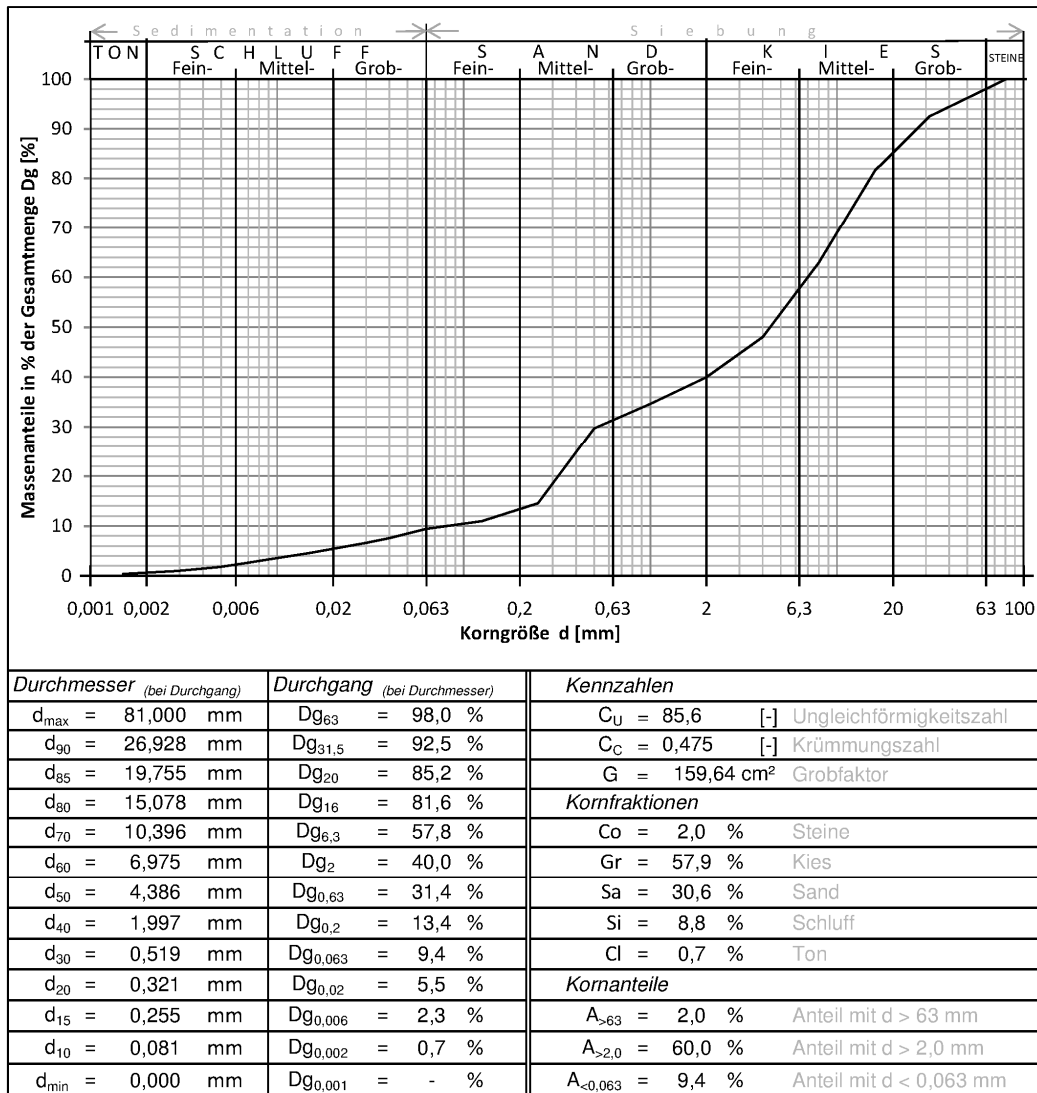


Abbildung 3-5: Kornverteilungskurve des verdichteten Wandschotters auf den Spuren 1-4

Während der Messfahrten auf allen 4 Spuren wurde eine Messung der Erschütterungsausbreitung durchgeführt. Hier wurden normal zur Fahrtrichtung der Walze, bis in 50 Meter Entfernung zu den Spuren, triaxial messende Beschleunigungssensoren (Kinematics Epi ES-T) aufgestellt um die Erschütterungsausbreitung genau zu erfassen (siehe auch Abbildung 3-3 und Abbildung 3-8).

Spur 2 war mit einem Setzungsmessgerät, einer Druckmessdose und einem Beschleunigungssensor ausgestattet. Außerdem wurden zur Simulation einer Schwachstelle im Boden zwei handelsübliche 2,0 m x 0,9 m Matratzen auf dem Planum aufgelegt und überschüttet (siehe Abbildung 3-6).



Abbildung 3-6: Einbau der Schwachstelle

Spur 3 wurde mit einem Beschleunigungsmessgerät versehen.

### 3.1.2 Spur 5: steifes Planum

Auf Spur 5 wurden Fahrten auf dem steifen Planum durchgeführt. Die Bodenwerte sind in Tabelle 3-2 beziehungsweise in Abbildung 3-7 angegeben. Auf diesem schon im Vorfeld durch viele Überfahrten diverser Erdbaugeräte hochgradig verdichteten Material war mit keiner Steifigkeitszunahme nach Überrollen mit der Walze zu rechnen. Hier wurde neben den Messungen direkt an der Walze lediglich eine Messung der Beschleunigungsausbreitung normal zur Achse der Spur durchgeführt (siehe Abbildung 3-8).

Tabelle 3-2: Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchung des steifen Planums

			Steifes Planum
Natürlicher Wassergehalt:	$w_N$	[%]	5,3
Korndichte	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,57

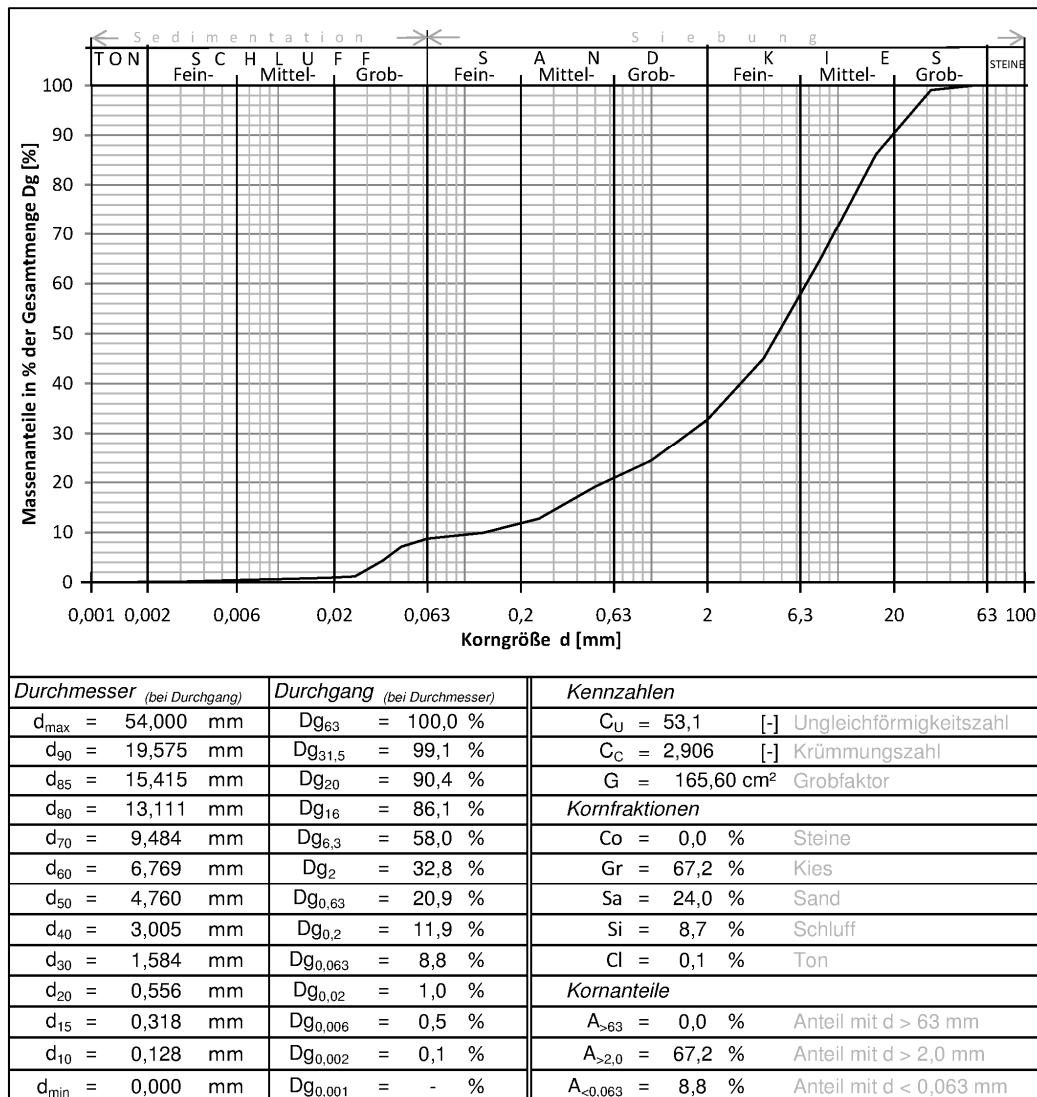


Abbildung 3-7: Kornverteilung des steifen Planums auf Spur 5

### 3 - Grundsatzversuch

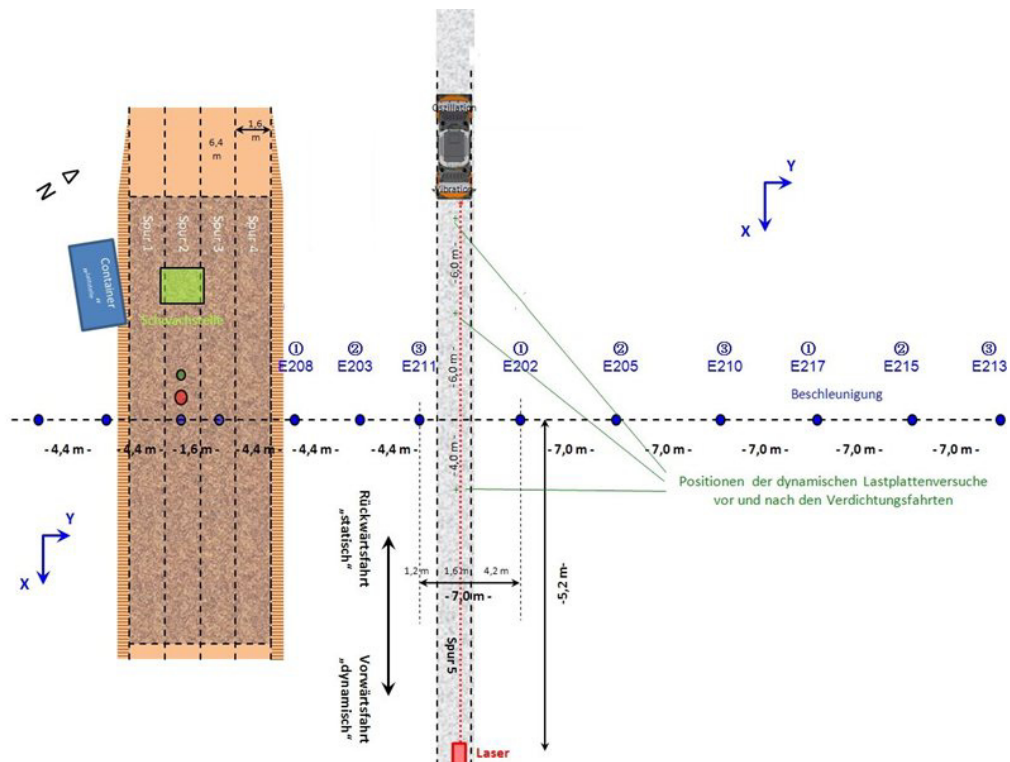


Abbildung 3-8: Spur 5

#### 3.1.3 Spur 6 – 7: „weicher“ Untergrund

Auf den Spuren 6 und 7 wurden Messfahrten auf einer Schüttung über weichem Untergrund, bestehend aus feinkörnigem, bindigem Material durchgeführt (Bodenwerte siehe Tabelle 3-3 und Abbildung 3-10). Die Beschleunigungssensoren wurden parallel zu den Spuren aufgestellt (Abbildung 3-9). Somit konnte zwar keine Beschleunigungsausbreitung gemessen werden, doch konnten durch diese Konstellation Rückschlüsse auf die Position der Walze gezogen werden.

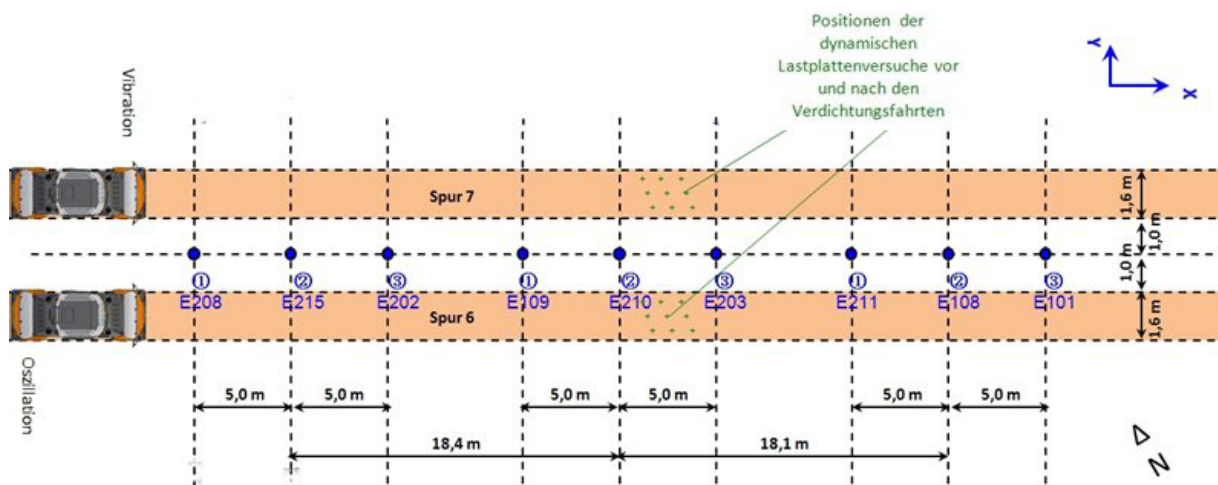


Abbildung 3-9: Spuren 6 – 7

In der Baupraxis ist mit derart weichen Untergründen eher selten zu rechnen. Um jedoch das generelle Verhalten der Walze verstehen zu können, sollen solch extreme Bedingungen wie auf der Spur 5 („steifes“ Planum) und auf den Spuren 6 und 7 („weicher“ Untergrund) helfen.

Tabelle 3-3: Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchung des weichen Untergrundes

			Weicher Untergrund
Natürlicher Wassergehalt:	$w_N$	[%]	5,3
Korndichte	$\rho_s$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,57

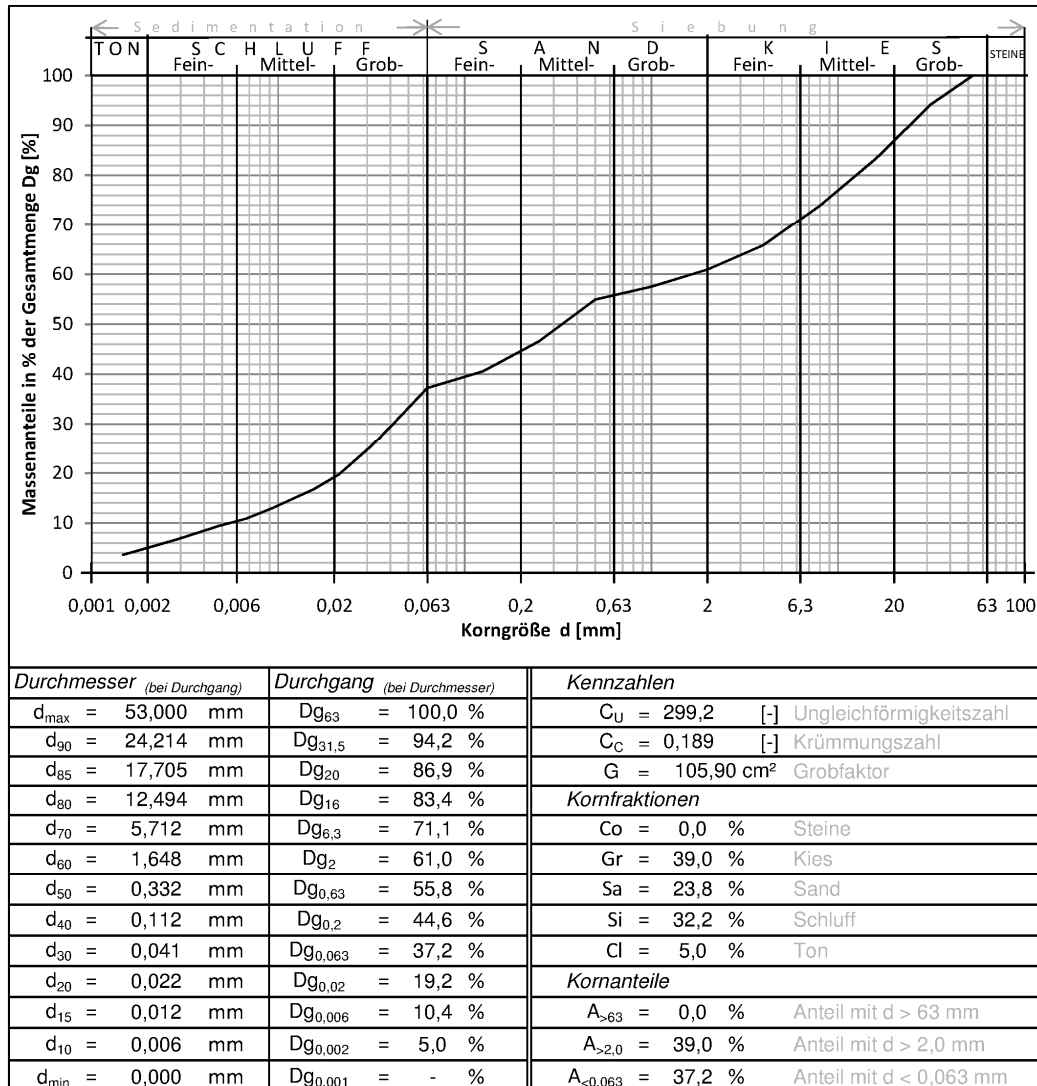


Abbildung 3-10: Kornverteilung des weichen Untergrundes auf Spur 6&7

### 3.2 Verdichtungsgerät: HAMM HD+90 VO

Für die Versuche wurde von der Firma Hamm AG eine knickgelenkte Tandemwalze mit Vibrations- und Oszillationsbandage des Typs HD+ 90 VO zur Verfügung gestellt. Dieser Walzentyp wird vor allem zur Verdichtung von Asphalt eingesetzt.

#### 3.2.1 Technische Daten

Die Walze hat ein Betriebsgewicht von 9380 kg wobei die vordere Achslast (Vibrationsbandage) 4770 kg und die hintere Achslast (Oszillationsbandage) 4610 kg beträgt. Die vordere statische Linienlast unter der Bandage beläuft sich auf 28,4 kg/cm, die Linienlast unter der Oszillationsbandage



### 3 - Grundsatzversuch

beträgt 27,4 kN/cm. Die beiden Bandagen haben einen Durchmesser von jeweils 1,20 m und eine Breite von 1,68 m. Der Achsabstand beträgt 3,40 m.

Die Geschwindigkeit kann zwischen 1 km/h und 12 km/h in ganzen km/h-Schritten variiert werden. Bei den Versuchsfahrten wurde zumeist mit einer Standardgeschwindigkeit von 4 km/h gefahren, wobei auch Geschwindigkeitsvariationen mit 2 km/h und 6 km/h durchgeführt wurden. Die Walze ist mit einem Vierzylinder – Dieselmotor mit 100 kW (136 PS) Leistung ausgestattet. Der Antrieb, die Bremsanlage sowie die Lenkung erfolgen mittels hydrostatischen Antriebs.



**Abbildung 3-11: HAMM HD+ 90 VO**

Die Standardeinstellung der Oszillationsfrequenz beträgt 39 Hz. Bei einer Tangentialamplitude von 1,44 mm ergibt sich eine Oszillationskraft von 144 kN. Bei den Versuchen wurde die Oszillationsfrequenz zwischen 20 und 70 Hz variiert. Eine Variation der Oszillationsamplitude war nicht möglich, allerdings konnte die Drehrichtung der Unwuchtmassen geändert werden.

Bei der Vibration kann die Amplitude zwischen 0,34 mm (kleine Amplitude) und 0,62 mm (große Amplitude) variiert werden. Hierbei wird der Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Unwuchten und der Unwuchtachse geändert. Die Zentrifugalkraft beträgt somit 60 kN beziehungsweise 75 kN. Die Standardeinstellung der Vibrationsfrequenz beträgt 50 Hz für die kleine Amplitude und 40 Hz für die große Amplitude. Bei den Messfahrten wurde die Amplitude außerdem zwischen 20 Hz und 60 Hz variiert.

Die Unwuchterregungen bei der Vibrations- und der Oszillationsbandage werden hydrostatisch betrieben.

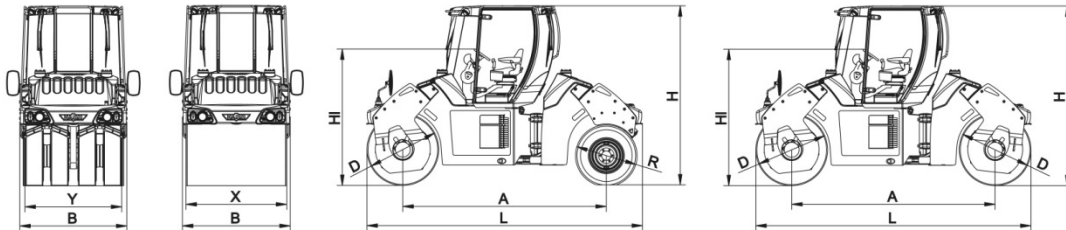
# HD+ 90 VW / HD+ 90 VO

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



		HD+ 90 VW	HD+ 90 VO
<b>Gewichte</b>			
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
<b>Abmessungen Maschine</b>			
Maximale Arbeitsbreite	mm	1850	1850
Spurkreisradius, innen	mm	5250	5250
<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
<b>Fahrertrieb</b>			
Fahrertrieb hydrost., vorn/hinten		Radmotor/Radmotor	Radmotor/Radmotor
Geschwindigkeit, Arbeitsgang	km/h	0-6,0	0-6,0
Geschwindigkeit, Transportgang	km/h	0-12,0	0-12,0
Steigfähigkeit, mit/ohne Vibration	%	35/40	35/40
<b>Schwingungssystem</b>			
Hydrostatischer Antrieb			
<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>Bremsanlage</b>			
Betriebsbremse, Wirkung		hydrostatisch	hydrostatisch
Betriebsbremse, Betätigung		Fahrhebel	Fahrhebel
Parkbremse, Wirkung		Federspeicher/mechanisch	Federspeicher/mechanisch
Parkbremse, Betätigung		elektr. u. autom.	elektr. u. autom.
Hilfsbremse, Wirkung		hydr./mech.	hydr./mech.
Hilfsbremse, Betätigung		Not-Stop	Not-Stop
<b>Berieselungsanlage</b>			
Wasserberieselung, Art		Druck	Druck
Betätigung, Wasserberieselung		intervall/manuell	intervall/manuell
Wassertank, Inhalt	L	834	834
<b>Ausstattung</b>			
gefederters Fahrersitz, schwenk- und verschiebbarer Komfortsitz, Multifunktionsfahrhebel rechts vom Sitz, Amplitude schaltbar: groß/klein, Vibration schaltbar: vorne/hinten/doppelt, Scheibenwischer vorn und hinten, Kontrollleuchten und Notstopp, CE vorbereitet, Batterie Hauptschalter, Dreifach-Ölfilterung, Beleuchtung nach StVZO, Wasserstandsanzeige, Geschwindigkeitsmesser, ROPS-Komfort-Großraumkabine, Aufstiegsgriffe			
<b>Sonderausstattung</b>			
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, Schallsollierung, Kantendruck- und Schneidgerät, Radio, Back-up-Alarm, zweiter Multifunktionsfahrhebel, Bandagenbeleuchtung, Kabine: 4 Scheinwerfer, alle Scheinwerfer auch in Xenon erhältlich, Stoffsitz, Fahrersitz-Rückenverlängerung, Sicherheitsgurt, Sonnendach			

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



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

HD+ 90 VW/VO 11.11 2147693 D1 - Weitere Daten auf Anfrage / Änderungen vorbehalten

Abbildung 3-12: Datenblatt HD+ 90 VO [3]

### 3.3 Messtechnische Ausrüstung zur Bestimmung der Kontaktlänge

#### 3.3.1 Messung der Kontaktlänge zwischen Bandage und Boden – Idee

In der schematischen Abbildung 3-13 ist erkennbar, dass die Bandage während der Vorwärtsfahrt der Walze eine Bugwelle vor sich „herschreibt“. Die Erfassung der genauen Geometrie, also die Kontaktlänge sowie die Größe der Bugwelle, sind die Ziele dieser Messung.

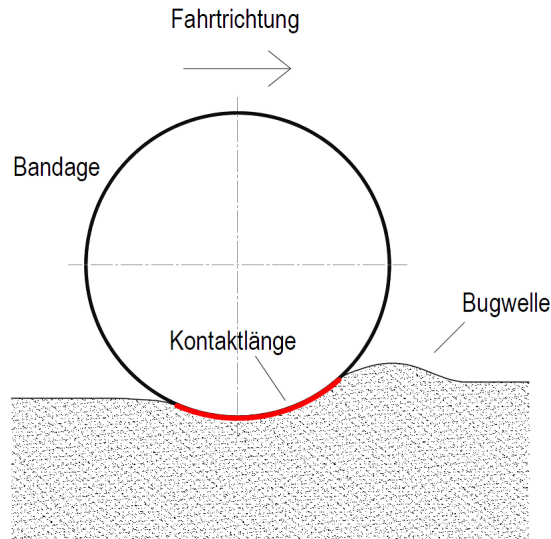


Abbildung 3-13: Schematische Darstellung der Kontaktlänge zwischen Bandage und Boden

Um die oben beschriebenen Messziele zu erfüllen, wurde nach einer Idee von Dr. Fritz Kopf eine akustische Lösung gewählt. Die Bandagen wurden jeweils mit vier, um 90° versetzte, Bohrungen durch den Walzenmantel versehen, in denen dann Pfeifen installiert wurden, die durch einen Ventilator mit Luft versorgt wurden (siehe auch Abbildung 3-16). Wird nun eine Bohrung durch das Überrollen des Bodens verschlossen, so verringert sich die Pfeifentönhöhe in der Theorie um eine Oktave, das heißt die Wellenlänge verdoppelt sich (siehe Abbildung 3-14). Dieses akustische Phänomen der gedeckten Pfeife findet zum Beispiel auch bei Orgeln Anwendung. In der Praxis verschließt der Boden allerdings die Pfeifenbohrungen der Bandage nicht absolut luftdicht, sodass die Tonänderung nicht exakt einer Oktave entspricht, aber dennoch in Form einer deutlichen Frequenzänderung zu erkennen ist. Die Pfeifen wurden jeweils mit einem Mikrofon ausgestattet, welche an ein batteriebetriebenes Aufnahmegerät, das sich ebenfalls direkt in der Bandage befand, angeschlossen wurden. Das Prinzip ist in Abbildung 3-15 dargestellt.

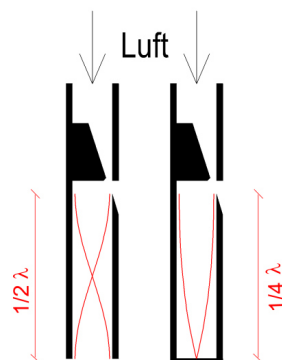


Abbildung 3-14: Wellenlängenänderung bei offener bzw. gedeckter Pfeife

Führt die Walze mit konstanter Geschwindigkeit, so sind die Zeit für eine Umdrehung der Bandage und die zugehörige Wegstrecke, welche dem Umfang der Bandage ( $=3,77\text{ m}$ ) entspricht, bekannt. Bestimmt man die Dauer der Tonhöhenabsenkung zufolge Zudecken der Bohrung, so ist auch die Kontaktlänge bestimmbar.

Um auch Informationen über die Größe der Bugwelle zu erhalten, wurde ein Positionsgeberrad installiert, welches vertikal über der Lagerachse auf der Bandage situiert ist und somit Referenzsignale liefert. Abbildung 3-16 zeigt das Prinzip hiervon. Zur Aufnahme der akustischen Signale der Pfeifen wurden handelsübliche Telefonmikrophone eingebaut, die an ein Aufnahmegerät angeschlossen waren.

Bei der Vibrationsbandage wurden 4 Pfeifen angebracht. Auf der Oszillationsbandage hingegen wurden lediglich zwei, sich gegenüberliegende, Pfeifen installiert. In den übrigen zwei Bohrungen wurden Ultraschallsensoren angebracht, die im Vergleich zu dem oben beschriebenen Pfeifensystem nicht analog sondern digital arbeiten. Es stellte sich jedoch heraus, dass das akustische Pfeifensystem gegenüber den Ultraschallsensoren einige Vorteile hat, die im Folgenden aufgezählt werden:

◆ Selbstreinigung

Durch den ständigen Luftzug aus der Bandage hinaus verstopfen die Öffnungen nicht so schnell. Zudem ist eine Reinigung mit Druckluft von der Bandageninnen- und außenseite möglich.

◆ Funktionskontrolle

Nach jeder Versuchsfahrt kann sehr einfach durch Hören festgestellt werden, ob das System noch intakt ist. Bei den Ultraschallsensoren kann dies erst nach dem Überspielen der Messdaten auf den Laptop erfolgen.

◆ Kalibrierung

Dadurch, dass die Messung analog erfolgt, kann man sie (z.B. durch das Positionsgeberrad vertikal über der Achse) sehr gut kalibrieren. Die Ultraschallsensoren werden einmal angelernt und liefern dann fertige Ergebnisse, die nicht mehr anpassbar sind.

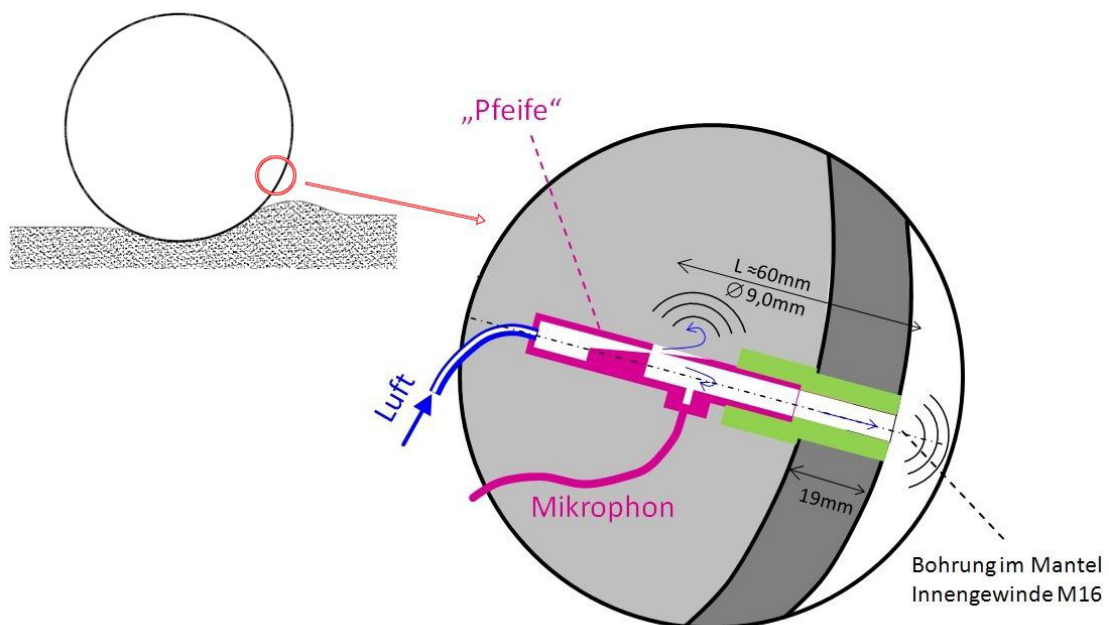


Abbildung 3-15: Prinzip der Pfeifen





### 3.3.2 Pfeifen

In Abbildung 3-18 ist der Detailplan einer in der Bandage eingebauten Pfeife dargestellt.

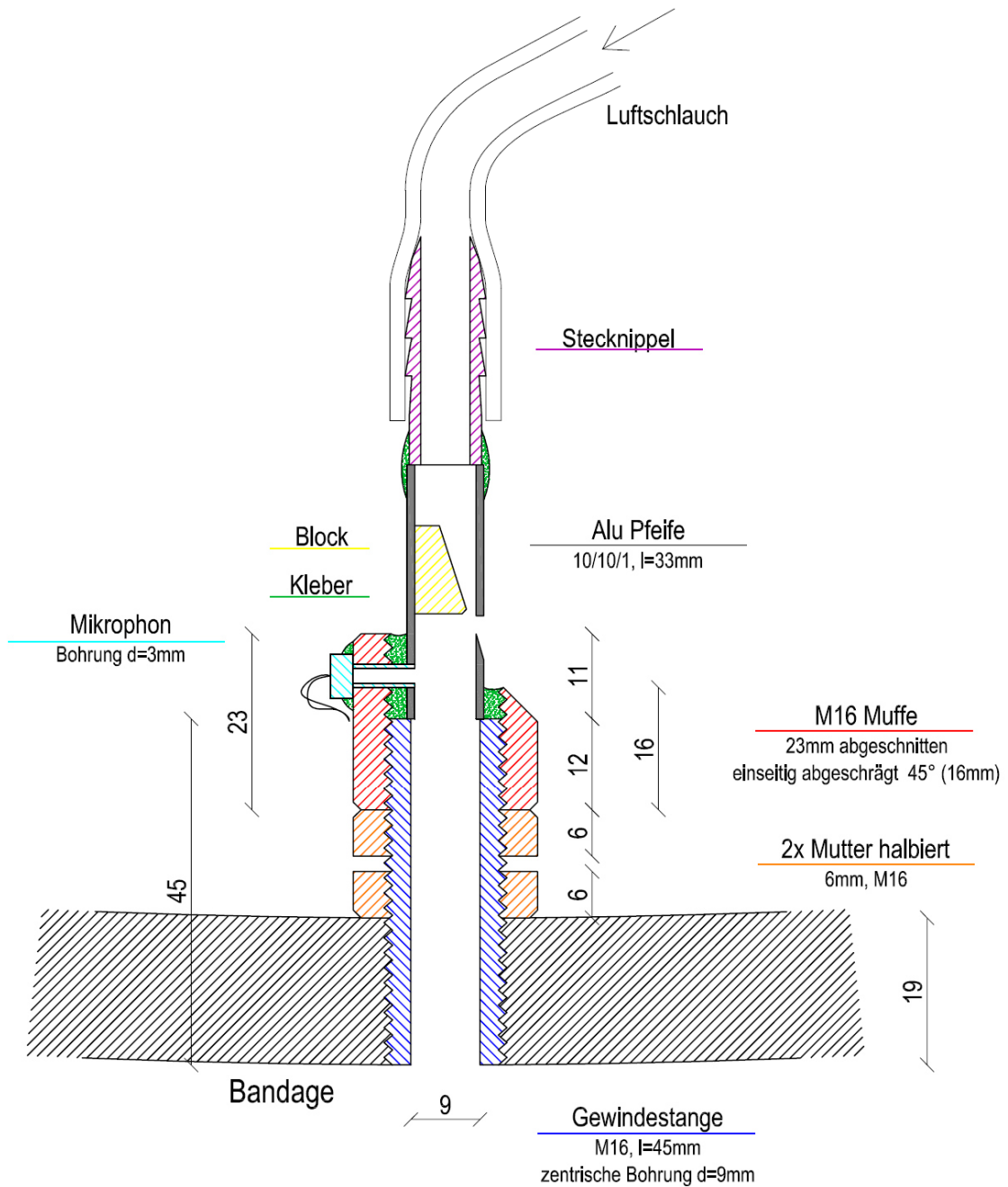


Abbildung 3-18: Querschnitt einer eingebauten Pfeife

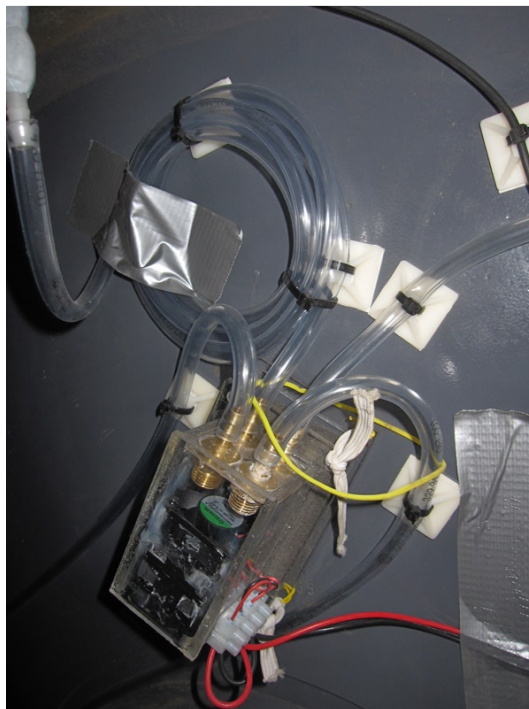


**Abbildung 3-19: Eingebaute Pfeife**

Abbildung 3-19 zeigt die eingebaute Pfeife, aufgenommen im Inneren der Bandage. Gut zu erkennen ist der an der Pfeife angeschlossene durchsichtige Schlauch, der zur Luftversorgung diente, sowie das schwarze Kabel, das vom Mikrofon, welches an der Pfeife montiert ist, zum Aufnahmegerät führte.

### **3.3.3 Luftversorgung**

Die Luftversorgung der Pfeifen erfolgte durch zwei seriell angeordnete, gegengleich drehende Computerbelüftungs-Ventilatoren. Die Gummischläuche, die vom Gebläse zu den Pfeifen führten, waren jeweils gleich lang, um den gleichen Luftdruck an den Pfeifen zu gewährleisten.



**Abbildung 3-20: Luftversorgung der Pfeifen**

### 3.3.4 Aufnahmegeräte

Als Aufnahmegeräte wurden handelsübliche „ZOOM Handy Recorder H4n“ verwendet. Die Stromversorgung erfolgte über 2xAA Batterien. Die Aufnahmegeräte wurden direkt in der Bandage montiert und betrieben. Zur Schwingungsentkopplung von der stark beanspruchten Bandage, wurde das Aufnahmegerät mittels eines Klettverschlussystems auf einen Schaumstoffquader gespannt (siehe Abbildung 3-21). Das Aufnahmeformat war WAVE.



Abbildung 3-21: Das montierte Aufnahmegerät

## 3.4 Vergleichsversuche mit der dynamischen Lastplatte

Um Rückschlüsse von den Ergebnissen der Messung der Kontaktlänge auf die Materialsteifigkeit ziehen zu können, war eine unabhängige Messung des Verformungsmoduls des Bodens notwendig. Der dynamische Verformungsmodul wurde durch den dynamischen Lastplattenversuch ermittelt. Eine genaue Erklärung des Versuchs findet sich in Kapitel 2.4.2.

Die Gesamtsetzung einer Bodenschicht besteht im Allgemeinen aus der Sofortsetzung, die unmittelbar nach der Spannungserhöhung auftritt und auf das seitliche Abweichen des Bodens sowie auf die Kompression der Bodenluft zurückgeführt wird, sowie aus der Primär- und Sekundärsetzung, die sich erst nach einer bestimmten Zeit einstellen.

Für die weiteren Berechnungen der Kontaktlänge zwischen Boden und Walzenbandage reicht die Betrachtung der Sofortsetzung aus, die durch den Elastizitätsmodul  $E$  charakterisiert wird, welchen man grundsätzlich versuchstechnisch durch den einaxialen Druckversuch (Druckversuch mit unbehinderter Seitendehnung) ermittelt.



### 3 - Grundsatzversuch

Um aus dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$ , den die dynamische Lastplatte liefert, den benötigten Elastizitätsmodul  $E$  zu ermitteln, werden folgende Beziehungen für die Umrechnung angewandt:

Nach RVS 08.03.04 [12] gilt folgender Zusammenhang zwischen dem dynamischen Verformungsmodul  $E_{vd}$  und dem Erstbelastungsmodul  $E_{v1}$  des statischen Lastplattenversuches, wobei zwischen bindigen und nichtbindigen Böden unterschieden wird:

Nichtbindige Böden:

$$E_{vd} = \frac{6}{5} E_{v1} \quad (5)$$

für  $E_{v1} < 25 \text{ MN/m}^2$

$$E_{vd} = 10 + \frac{4}{5} E_{v1} \quad (6)$$

für  $E_{v1} \geq 25 \text{ MN/m}^2$

Bindige Böden:

$$E_{vd} = 10 + \frac{4}{5} E_{v1} \quad (7)$$

Für den Zusammenhang zwischen  $E$  und  $E_{v1}$  gilt:

$$E = \frac{\pi \cdot (1 - \nu^2)}{3} \cdot E_{v1} \quad (8)$$

Die Querdehnzahl  $\nu$  wird mit 0,214 angenommen, wodurch der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  mit dem Elastizitätsmodul  $E$  gleichgesetzt werden kann und somit folgende Umrechnungsformel gilt:

$$E = \frac{\pi \cdot (1 - \nu^2)}{3} \cdot \frac{5}{6} E_{vd} \quad (9)$$

## 4 Theoretische Grundlagen der Versuchsauswertung

### 4.1 Hertz'sche Pressung

Heinrich Hertz untersuchte bereits 1881 [15] den Spannungs- und Verformungszustand zweier Körper mit gekrümmten Oberflächen (Radkontakt bei Eisenbahnen). Werden ebensolche elastische Körper mit einer konstanten Kraft gegeneinander gepresst, so flachen sie ab und es entsteht nach Hertz eine sogenannte gemeinsame Druckfläche. Mit folgenden Näherungen konnte er eine theoretische Lösung des Problems finden:

- ◆ Die Abmessungen der Abplattungen sind klein gegenüber den Hauptkrümmungsradien der Körper. Das heißt die Körper berühren sich nur in einem sehr kleinen Teil ihrer Oberflächen. Weiters sind die Oberflächen, die sich berühren, glatt.
- ◆ Es treffen zwei elastisch isotrope Körper aufeinander, wobei die Elastizitätsgrenze nicht überschritten wird. Somit gilt das Hookesche Gesetz.
- ◆ Es treten lediglich Normalspannungen an den Druckoberflächen auf. Schubspannungen (z.B.: Reibkräfte) sind nicht vorhanden.
- ◆ Zwischen den Körpern wirkt keine Adhäsion.

Bei der Anwendung der Hertz'schen Pressung auf den konkreten Fall der Pressung einer steifen Bandage auf einen granularen Untergrund werden die meisten hier angeführten Bedingungen verletzt. Somit ist eine Berechnung des absoluten Wertes der Kontaktlänge nicht sinnvoll. Unter Berücksichtigung der Nichteinhaltung dieser Bedingungen wird zur Vergleichsrechnung dennoch die Hertz'sche Pressung herangezogen, da sich mit ihrer Hilfe Rückschlüsse über die relativen Kontaktlängenänderungen bei unterschiedlichen Untergründen oder Walzenparametern erzielen lassen. Im Folgenden wird näher auf die Hertz'sche Pressung eingegangen.

In der Kontaktfläche entsteht eine charakteristische Spannungsverteilung, die in der Mitte der Kontaktfläche ihr Maximum erreicht. Dieser Wert wird auch „Hertz'sche Pressung“ genannt ( $p_{max}$  - siehe auch Abbildung 4-2).

Für die maximale Kontaktspannung gilt im allgemeinen Fall folgende Formel:

$$p_{max} = \frac{1}{\xi \cdot \eta} \cdot \sqrt[3]{\frac{3F \cdot (\sum k)^2}{8\pi^3} \cdot \left(\frac{E}{2 \cdot (1 - \nu^2)}\right)^2} \quad (10)$$

wobei gilt:

$F$  Kraft mit denen die Körper gegeneinander gepresst werden [N]

$E$  E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]

Der E-Modul berechnet sich folgenderweise aus den beiden E-Moduln  $E_1$  und  $E_2$  der beiden Körper:

$$\frac{1 - \nu^2}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (11)$$

$\nu_{1,2}$  Querdehnzahl der Körper 1 und 2 [-]

$E_{1,2}$  E-Moduln der Körper 1 und 2 [N/mm<sup>2</sup>]

#### 4 - Theoretische Grundlagen der Versuchsauswertung

$k$  Krümmung [1/mm]

$\eta, \xi$  Beiwerte nach Hertz für die Berührung gekrümmter Oberflächen. Für den Berührungsfall Zylinder – Zylinder siehe (30) [-]

Die Herleitung erfolgt nach Popov [16]:

Im Rahmen der Halbraumnäherung wird angenommen, dass die Steigung der sich berührenden Oberflächen im Kontaktgebiet und in der relevanten Umgebung viel kleiner als 1 ist, was bedeutet dass die Oberflächen eben sind. Die Zusammenhänge zwischen den Oberflächenkräften und den Verschiebungen können nun als identisch mit jenen in einem elastischen Halbraum angesehen werden.

Bei Kontaktproblemen ohne Reibung sind nur die Verschiebungen in z-Richtung (also normal auf die Kontaktfläche) von Bedeutung. Die Verschiebung der Oberfläche berechnet sich durch:

$$u_z = \frac{1}{\pi \cdot E^*} \cdot \iint p'(x', y') \frac{dx' dy'}{r} \quad (12)$$

mit

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$$

$$E^* = \frac{E}{(1 - \nu^2)}$$

Es wird angenommen, dass in einem kreisförmigen Gebiet mit dem Radius  $l$  eine Druckverteilung der Form

$$p = p_{max} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{l^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

erzeugt wird. Es wird nun die vertikale Verschiebung der Oberflächenpunkte im Kontaktgebiet gesucht.

Für die Hertz'sche Druckverteilung erhält man:

$$u_z = \frac{\pi \cdot p_{max}}{4E^* \cdot l} \cdot (2l^2 - r^2) \quad (14)$$

Für die Gesamtkraft folgt:

$$F = \int_0^l p(r) \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr = \frac{2}{3} p_{max} \cdot \pi \cdot l^2 \quad (15)$$

In Abbildung 4-1 wird der Kontakt einer starren Kugel (Radius  $R$ ) mit dem elastischen Halbraum gezeigt. Für die Verschiebungen in z-Richtung erhält man:

$$u_z = d - \frac{r^2}{2R} \quad (16)$$

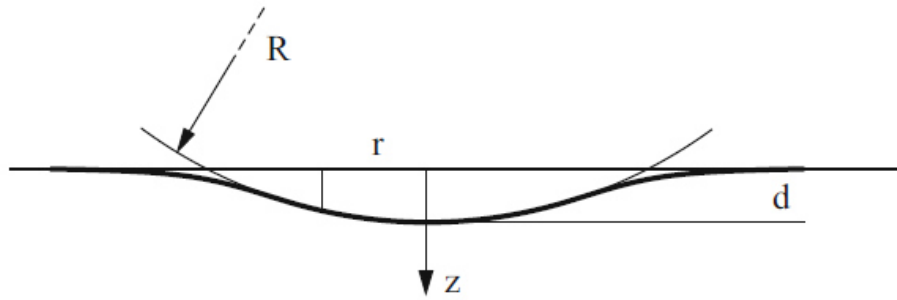


Abbildung 4-1: Eine starre Kugel im Kontakt mit einem elastischen Halbraum [16]

Setzt man die vertikalen Verschiebungen aus der Hertz'schen Druckverteilung mit der geometrisch ermittelten Verschiebung gleich, so erhält man:

$$\frac{\pi \cdot p_{max}}{4E^* \cdot l} (2l^2 - r^2) = d - \frac{r^2}{2R} \quad (17)$$

Daraus lassen sich für  $l$  und  $d$  folgende Forderungen formulieren:

$$l = \frac{\pi \cdot p_{max} \cdot R}{2E^*} \quad (18)$$

$$d = \frac{\pi \cdot l \cdot p_{max}}{2E^*} \quad (19)$$

Daraus folgt für den Kontaktradius:

$$l^2 = R \cdot d \quad (20)$$

für den maximalen Druck:

$$p_{max} = \frac{2}{\pi} E^* \cdot \left(\frac{d}{R}\right)^{1/2} \quad (21)$$

und für die Normalkraft:

$$F = \frac{4}{3} E^* \cdot R^{1/2} \cdot d^{3/2} \quad (22)$$

Sind beide sich berührenden Körper elastisch, so muss für  $E^*$  folgender Ausdruck eingesetzt werden:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (23)$$

wobei  $E_1$  und  $E_2$  die beiden E-Moduln beziehungsweise  $\nu_1$  und  $\nu_2$  die Querdehnzahlen der sich berührenden Körper sind.

Für den **Berührungsfall Zylinder – Zylinder** ergibt sich eine langgezogene rechteckige Berührungsfläche mit der Breite  $b$  in Achsenrichtung und der Kontaktlänge  $2l$ . Man spricht hierbei auch von Walzenpressung. Lässt man den Radius eines Zylinders unendlich werden, ergibt sich der zur weiteren Betrachtung interessante Fall Zylinder-Ebene. (siehe Abbildung 4-2).

#### 4 - Theoretische Grundlagen der Versuchsauswertung

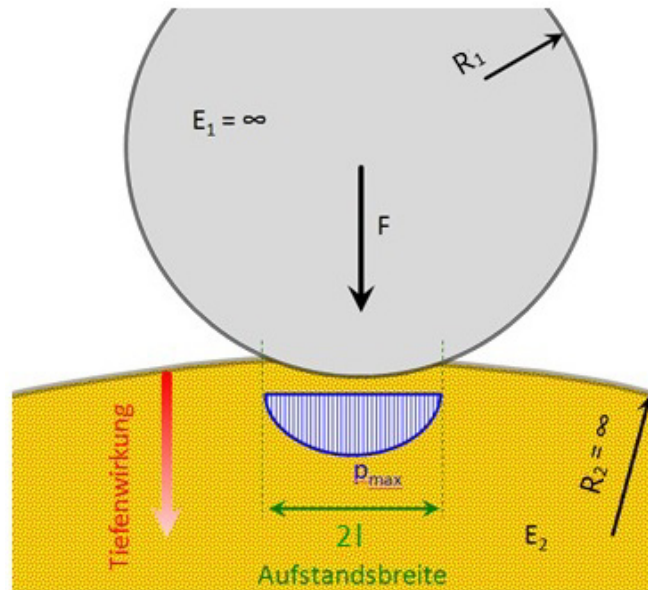


Abbildung 4-2: Sonderfall Walzenpressung

Die Kraft  $F$  ist proportional zur Eindringtiefe. Interessant ist, dass der Krümmungsradius in der Beziehung nicht aufscheint.

$$F = \frac{\pi}{4} E^* \cdot b \cdot d \quad (24)$$

Die halbe Kontaktbreite wird durch dieselbe Beziehung beschrieben, wie im Kontakt zwischen zwei Kugeln:

$$l = \sqrt{R \cdot d} \quad (25)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (26)$$

Somit ergibt sich die Formel für die Kontaktlänge  $2l$ :

$$2l = 2 \sqrt{\frac{4R \cdot F}{\pi \cdot E^* \cdot b}} \quad (27)$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung (29) wird die Formel wie folgt im weiteren Verlauf der Berechnungen verwendet:

$$2l = 2 \sqrt{\frac{8R \cdot F \cdot (1 - \nu^2)}{\pi \cdot E_{Ers} \cdot b}} \quad (28)$$

$$E_{Ers} = 2 \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \quad (29)$$

Der maximale Druck ist gegeben durch:

$$p_{max} = \frac{E^*}{2} \cdot \frac{d}{l} = \frac{E^*}{2} \left( \frac{d}{R} \right)^{1/2} = \left( \frac{E^* \cdot F}{\pi \cdot L \cdot R} \right)^{1/2} \quad (30)$$

## 4.2 Numerische Simulation - FE-Modell ABAQUS

Zur Validierung der gemessenen Kontaktlängen wurden numerische Simulationsberechnungen mit der kommerziellen FE-Software Abaqus durchgeführt [17].

Alle Berechnungen setzen die Unabhängigkeit des Verzerrungszustandes von der Koordinatenachse in Richtung der Bandagenachse voraus. Damit sind die Bedingungen für den ebenen Verzerrungszustand erfüllt.

Es wird vorausgesetzt, dass auf ein fertig verdichtetes Planum eine 0,47 m mächtige, locker gelagerte Schicht sandigen Kieses aufgebracht und verdichtet wird. Der zu verdichtenden Schicht mit horizontal unendlicher Ausdehnung wird einerseits linear-elastisches sowie in einer weiteren Berechnung konstitutives Verhalten nach dem elasto-plastischen Drucker-Prager/Kappen Modell zugewiesen. Der darunter befindliche fertig verdichtete Untergrund ist ein elastischer, homogener und isotroper Halbraum [17].

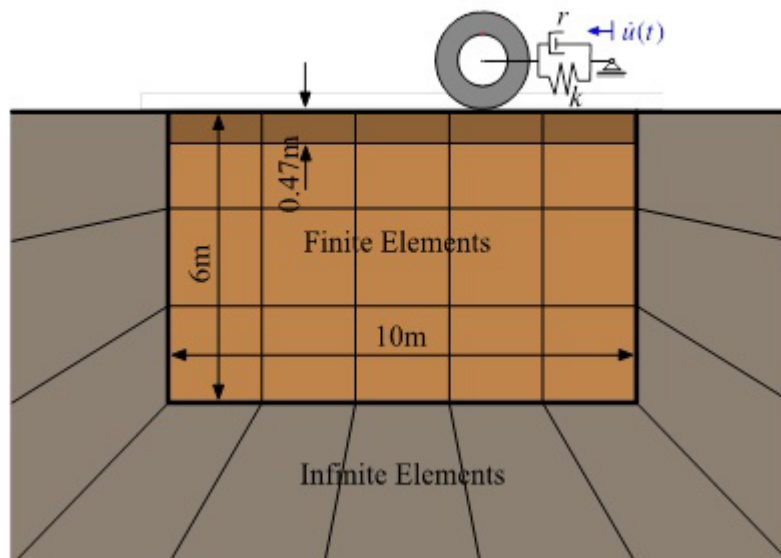


Abbildung 4-3: Skizze des numerischen Modells

Die Materialparameter für den verdichteten elastischen Untergrund sind in Tabelle 4-1 gegeben.

Tabelle 4-1: Materialparameter des verdichteten elastischen Untergrundes

Parameter	Symbol	Betrag	Einheit
E-Modul	E	250E6	N/m <sup>2</sup>
Querdehnzahl	$\nu$	0,3	-
Dichte	$\rho$	2.200	kg/m <sup>3</sup>

Die Materialparameter für das Drucker-Prager/Kappen Modell des zu verdichtenden Untergrundes sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Materialparameter für das Drucker-Prager/Kappen Modell

Parameter	Symbol	Kies	Einheit
E-Modul	E	variabel	N/m <sup>2</sup>
Querdehnzahl	$\nu$	0,3	-
Dichte	$\rho$	1.900	kg/m <sup>3</sup>
Reibungswinkel	$\beta(\varphi)$	52,16(32)	°
Kohäsion	d(c)	412(200)	N/m <sup>2</sup>
Kompressionsbeiwert	$C_c$	0,001	-
Schwellbeiwert	$C_s$	0,0001	-
Porenzahl	$e_0$	0,6	-
Anpassungsparameter	K	0,778	-
Halbmesserverhältnis	R	0,2	-

Die Rayleigh Parameter  $\alpha$  und  $\beta$ , zur Berücksichtigung der Dämpfung, werden für eine Bodendämpfung von  $\zeta = 5\%$  an die erste Eigenkreisfrequenz des diskretisierten Bodenmodells und an die maßgebliche Eigenkreisfrequenz nach [18] angepasst. Für die konkrete Problemstellung ergeben sich die Dämpfungsparameter zu  $\alpha = 6,607875$  und  $\beta = 0,000255$ .

Für das Nahfeld wird ein 10 m langer und 6 m tiefer Erdkörper mit finiten Elementen diskretisiert. Infinite Elemente werden an der Berandung zwischen dem diskretisierten Nahfeld und dem Fernfeld angeordnet, um Energie zu absorbieren und so Reflexionen an den Rändern zwischen Nah- und Fernfeld zu vermeiden. Um hohe Spannungsgradienten, große Verformungen, aber auch die Kontaktformulierung zwischen Bandage und Untergrund mit hinreichender Genauigkeit abbilden zu können, ist eine sehr feine Diskretisierung, speziell in Oberflächennähe der zu verdichtenden Schicht, erforderlich. Dies resultiert in einem Modell mit 33.607 Elementen und 74.073 Freiheitsgraden. Den verwendeten finiten und infiniten Elementen liegen quadratische Ansätze zugrunde. Für die Kontaktformulierung zwischen der Erdoberfläche und dem Walzmantel der Bandage kommt das Coulomb'sche Reibungsgesetz mit einem Reibungsbeiwert von  $\mu = 0,3$  zur Anwendung.

Die Bandage wird als starrer Hohlzylinder modelliert. Der zugehörige innere Radius  $r_1$  und die Dichte der Bandage wird derart gewählt, dass Masse und Massenträgheitsmoment der Hohlzylinder mit den Herstellerangaben der Firma HAMM AG für die Oszillationsbandage einer HD+90 VO Tandemwalze übereinstimmen, welche auch bei den Feldversuchen eingesetzt wurde.

Der Antrieb der Bandage erfolgt in der Realität durch eine gekoppelte Kraft-Weg Steuerung der Walze. Im Modell wird dazu dem Referenzknoten in der Achse des starren Bandagenkörpers ein konstantes Antriebsmoment aufgeprägt. Zusätzlich wird ein Verlauf der Horizontalgeschwindigkeit an einem zweiten Referenzknoten definiert. Beide Referenzknoten sind über ein Feder-Dämpfer Element miteinander gekoppelt, damit die Bandage auf die tatsächlichen Untergrundverhältnisse reagieren kann und dennoch eine nahezu konstante Fahrgeschwindigkeit von 4km/h gewährleistet ist. Auf diese Weise kann darüber hinaus der im Feld beobachtete Effekt der Verspannung zwischen den zwei Bandagen einer Tandemwalze Berücksichtigung finden.

#### 4 - Theoretische Grundlagen der Versuchsauswertung

Um die Oszillation zu simulieren, wird ein Oszillationsmoment um die Bandagenachse gemäß den Standardeinstellungen bei den Versuchsfahrten mit einer Frequenz von 39 Hz eingepägt. Zusätzlich wird der Referenzknoten mit der Achslast, reduziert um das Eigengewicht der Bandage, belastet. Während der ersten Sekunde der Simulation wird der geostatische Spannungszustand aufgebracht. Danach wird in der zweiten Sekunde der Rechenzeit die Bandage mit ihrem Eigengewicht belastet und in den Erdkörper eingedrückt. Zum Rechenzeitpunkt  $t = 2 \text{ s}$  beginnt die Simulation einer dynamischen Verdichtungsfahrt. Die Bandage bewegt sich dann von rechts nach links, beschleunigt dabei für 0,25 s, um für weitere 4,5 s mit der konstanten Geschwindigkeit  $\dot{u} = 4 \text{ km/h}$  zu fahren, ehe sie während der letzten 0,25 s verzögert und zum Rechenzeitpunkt  $t = 7 \text{ s}$  zum Stillstand kommt.



## 5 Versuchsauswertung

### 5.1 Aufbereitung der Audio-Dateien

Die Auswertung der, während der Versuchsfahrten aufgenommenen, Audio-Dateien erfolgte mit dem Programm „imc Famos“ des deutschen Herstellers „imc Meßsysteme GmbH“. Das Programm ist ein grafisches Auswerteprogramm zum Analysieren, Beurteilen und Visualisieren von Messergebnissen.

Im Folgenden wird genauer auf die programmierte Famos-Sequenz eingegangen, um zu beschreiben wie aus dem analogen Eingangssignal die benötigten Daten herausgelesen wurden.

Aufgrund von Problemen bei der Aufnahme in der Vibrationsbandage (genauer beschrieben in Kapitel 6.6) wurde lediglich die Kontaktlänge für die Oszillationsbandage ausgewertet.

Zuerst wurden alle Audiodateien geschnitten, so dass für jede Messfahrt ein eigenes File vorliegt. Jedes WAVE-File hat zwei Kanäle (left, right) in denen jeweils eine Pfeife der Oszillationsbandage aufgenommen wurde. Die Files wurden mittels folgender Sequenz eingelesen und automatisch nummeriert.

```
b_i = 1
SOLANGE b_i <= 185
wenn b_i < 10
    a_file = "V:\00-BRIMOS-Eingang\Oszi-
HAMM\akustik_pfeifen\oszi\00"+Tform( b_i, "")+".wav"
    sonst
        wenn b_i < 100
            a_file = "V:\00-BRIMOS-Eingang\Oszi-
HAMM\akustik_pfeifen\oszi\0"+Tform( b_i, "")+".wav"
            sonst
                a_file = "V:\00-BRIMOS-Eingang\Oszi-
HAMM\akustik_pfeifen\oszi\"+Tform( b_i, "")+".wav"
        ende
    ende
ende
```

```
b_left_freq = "left_freq"+Tform( b_i, "")
b_right_freq = "right_freq"+Tform( b_i, "")
```

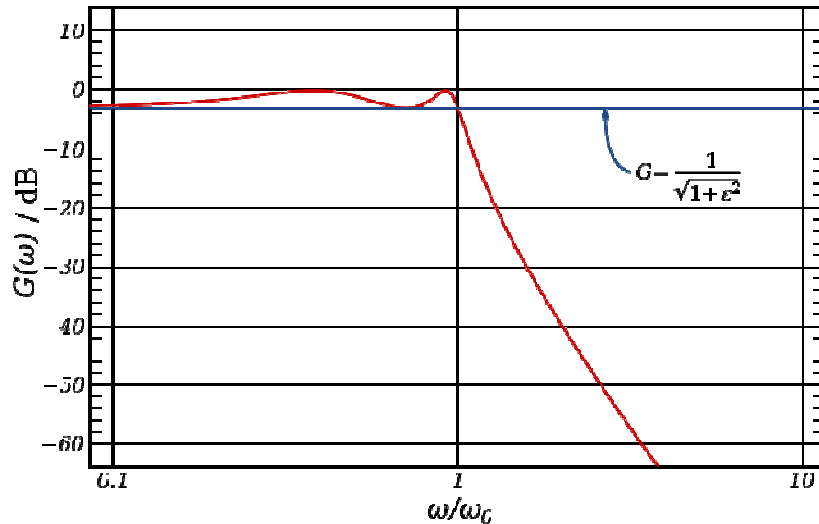
```
a_del = 1/700          ;Abtastzeit in Hz
a_fenst = 0.025       ;Fenster in Sekunden
```

```
;-----
a_left = SndReadF(a_file,1)
a_Right = SndReadF(a_file,2)
```

Da während der Messfahrten einige störende Nebengeräusche auftraten, wie zum Beispiel starker Wind, Motorengeräusche oder auch kleinere Gesteinskörner, die den Weg in die Pfeife fanden, wurde versucht, diese so gut wie möglich auszufiltern. Verwendet wurde ein Bandsperren Filter, genauer ein Tschebyscheff-Filter. Tschebyscheff-Filter sind kontinuierliche Frequenzfilter, die auf ein möglichst scharfes Abknicken des Frequenzgangs bei der Grenzfrequenz  $\omega_g$  ausgelegt sind. Dafür

## 5 - Versuchsauswertung

verläuft die Verstärkung im Durchlassbereich oder im Sperrbereich nicht monoton, sondern besitzt eine festzulegende Welligkeit (Ripple). Innerhalb einer Ordnung ist der Abfall umso steiler, je größer die zugelassene Welligkeit ist. (siehe Abbildung 5-1). Als Welligkeit wurde 1 dB gewählt. Die Grenzfrequenzen wurden mit 2050 Hz als untere Grenze beziehungsweise 4000 Hz als obere Grenze definiert.



**Abbildung 5-1: Übertragungsfunktion eines Tschebyscheff-Filters 4. Ordnung vom Typ I mit auf die Grenzfrequenz bezogenem Frequenzverlauf**

Ebenso wurde ein Bandpassfilter mit den gleichen Einstellungen angewandt. Die untere Grenzfrequenz wurde mit 1 Hz gewählt, die obere mit 2049 Hz.

```
a_Left = FiltBS(a_Left,2,1,15,2050,4000)
a_right = FiltBS(a_right,2,1,15,2050,4000)
```

```
a_Left = FiltBP(a_Left,2,1,15,1,2049)
a_right = FiltBP(a_right,2,1,15,1,2049)
```

Im nächsten Schritt wurde das Signal einer Fast-Fourier Transformation unterzogen. Die Fourier-Transformation ist ein fundamentales Verfahren in der Signalverarbeitung. Durch die Fourier-Transformation lassen sich Signale von der Darstellung {(Zeitpunkt, Abtastwert)} in die Darstellung {(Frequenzanteil, Amplitude, Phase)} überführen. Als Ergebnis erhält man ein Frequenzspektrum.

```
a_n = 0
solange a_n < lang?(a_Right)*xdel?(a_Right) ;lang? = Punktezahl
eines Datensatzes; xdel? = Abtastzeit
```

```
    a_part_l = gren(a_left,xoff?(a_left) + a_n,xoff?(a_left) +
a_n + a_fenst)
```

```
    a_part_r = gren(a_right,xoff?(a_right) + a_n,xoff?(a_right)
+ a_n + a_fenst)
```

```
FFTOPTION 1 1 ;Voreinstellungen für FFT: (Hamming, Ausfüllen
```

## 5 - Versuchsauswertung

```
auf nächste 2er Potenz)
  a_part_l = fft(a_part_l)
  a_part_l_max = max(a_part_l.b)
  a_erg_l = posiex(a_part_l.b, a_part_l_max)

  a_part_r = fft(a_part_r)
  a_part_r_max = max(a_part_r.b)
  a_erg_r = posiex(a_part_r.b, a_part_r_max)
  FFTOPTION 0 0

  wenn a_n = 0
    a_Left_Freq = a_erg_l
    a_Right_Freq = a_erg_r
  sonst
    a_Left_Freq = Binde(a_Left_Freq, a_erg_l)
    a_Right_Freq = Binde(a_Right_Freq, a_erg_r)
  ende

  a_n = a_n + a_del
ende

a_Left_Freq  =xdel(a_Left_Freq, a_del)
a_Right_Freq  =xdel(a_Right_Freq, a_del)

a_Left_Freq  =xoff(a_Left_Freq, xoff?(a_left))
a_Right_Freq  =xoff(a_Right_Freq, xoff?(a_right))

a_Left_Freq_glatt = glatt(a_left_freq, 0.04)
a_Right_Freq_glatt = glatt(a_right_freq, 0.04)

<b_left_freq> = a_left_freq_glatt
<b_right_freq> = a_right_freq_glatt
entfernen a_*

b_i = b_i+1
ENDE
entfernen b_*
```

Das Ergebnis einer beliebig gewählten Messfahrt (Fahrt Nr. 27) ist in Abbildung 5-2 bzw. Abbildung 5-3 zu erkennen, wobei eine Pfeife der Oszillationsbandage rot und die andere blau dargestellt wird. Werden die Pfeifen nicht zugehalten (berühren also nicht den Boden oder das Positionsrads), so stellt sich eine Frequenz von etwas mehr als 2000 Hz ein. Werden die Pfeifen zugedeckt, so sinkt die Tonhöhe und damit die Frequenz. In Abbildung 5-3 kann man gut den kleineren Peak bei Berührung mit dem Positionsrads erkennen, der zeitlich mit dem größeren Peak der gegenüberliegenden Pfeife bei Berührung mit dem Boden, übereinstimmt.

## 5 - Versuchsauswertung

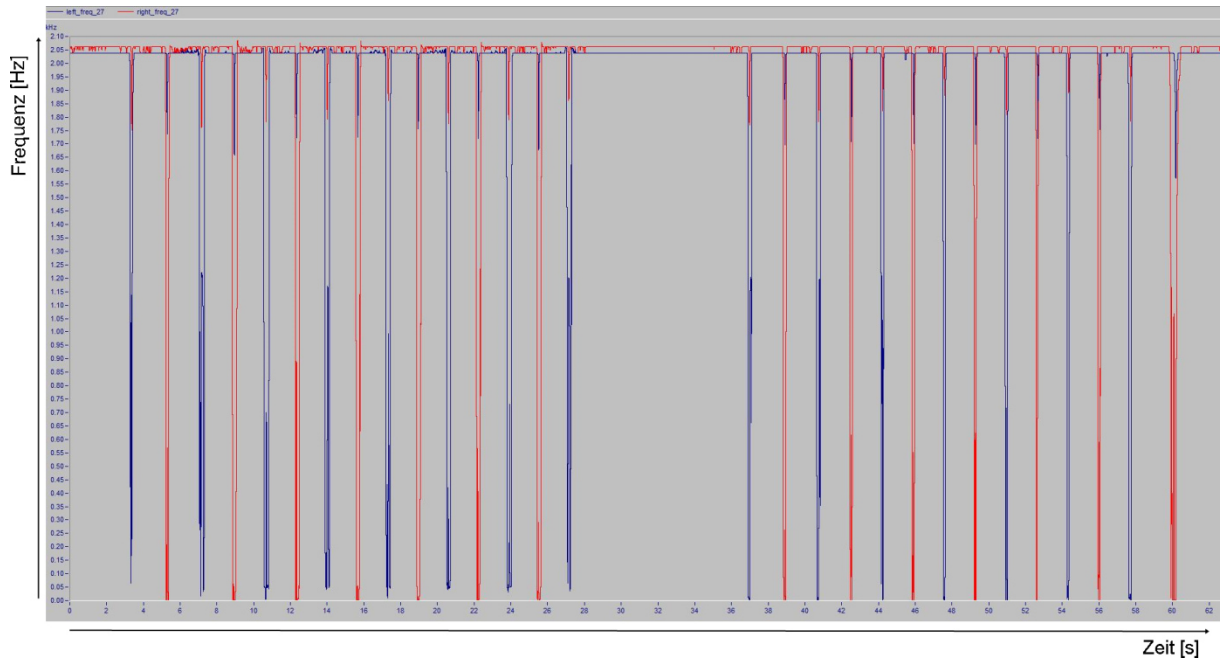


Abbildung 5-2: Grafisches Ergebnis der Famos-Auswertung von Messfahrt 27 – 2 Pfeifen (rot und blau) auf der Oszillationsbandage

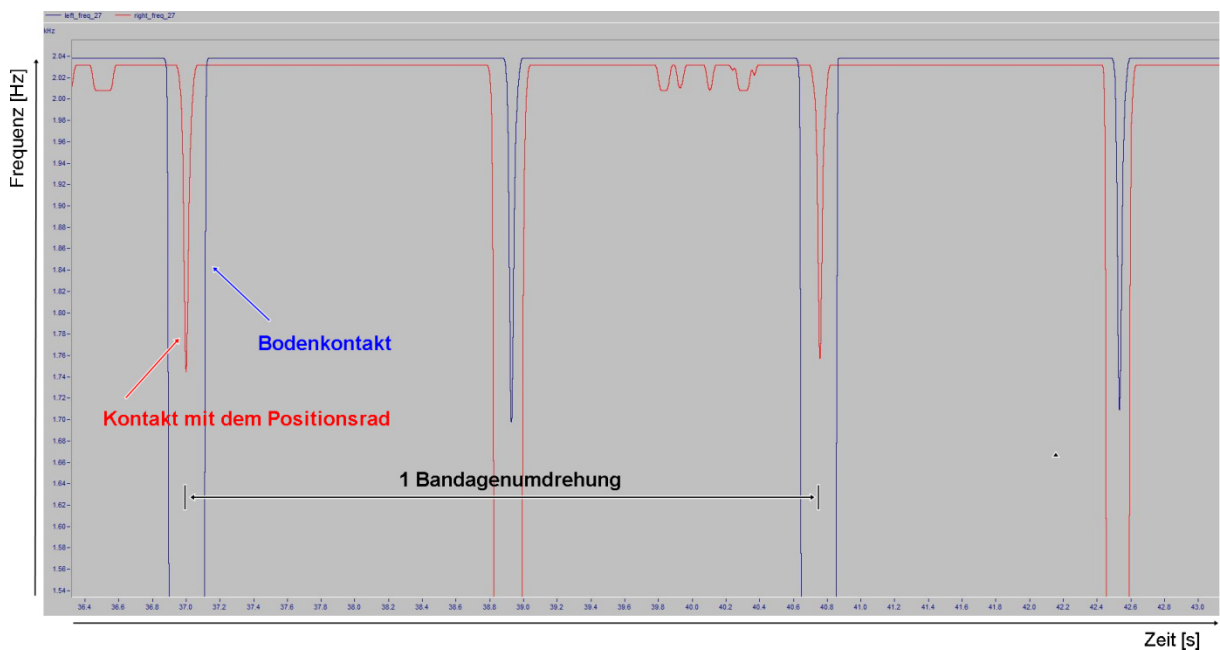


Abbildung 5-3: Detail der Famos-Auswertung von Messfahrt 27 für 2 Bandagenumdrehungen

### 5.2 Auswertung der Kontaktlänge

Die gewonnenen Datenreihen aus der „Famos-Sequenz“ (siehe Abbildung 5-2 bzw. Abbildung 5-3) wurden zur weiteren Auswertung in das Programm „MS Excel“ importiert und weiter bearbeitet.

Im Prinzip wurden in diesem Schritt die Datenreihen bei einer bestimmten Frequenz geschnitten und die Abstände der Schnittpunkte (= Zeitintervall) ausgewertet. Da die Geschwindigkeit für jede

## 5 - Versuchsauswertung

Messfahrt bekannt ist, kann problemlos vom ermittelten Zeitintervall und dem bekannten Umfang der Bandage auf die in diesem Intervall zurückgelegte Strecke und somit auf die Kontaktlängen der Pfeifen mit dem Positionsrad (= Kontaktlänge Positionsrad) beziehungsweise mit dem Untergrund (= Kontaktlänge Boden) als auch auf die Intervalle, in denen die Pfeifen in der Luft sind und somit nicht vom Boden verdeckt werden, geschlossen werden.

Die gewählte Grenzfrequenz bei der die Datenreihe geschnitten wurde ist grundsätzlich bei jeder Messfahrt unterschiedlich. Sie wurde iterativ bestimmt, unter der Vorgabe, dass die Kontaktlänge der Pfeifen mit dem Positionsrad dem wahren Wert, der während des Versuchs mit 1,5 cm gemessen wurde, möglichst nahe liegt. Gleichzeitig wurde aber auch darauf geachtet, dass möglichst viele „Peaks“ geschnitten werden, denn durch verschiedene Störfaktoren variiert die Länge der Peaks. Somit wurde eine möglichst hohe Frequenz gewählt, um auch die kurzen Peaks mit auszuwerten. Aus diesen Faktoren ergibt sich bei den meisten Messfahrten eine ausgewertete Kontaktlänge mit dem Positionsrad zwischen 1,5 und 2,0 cm.

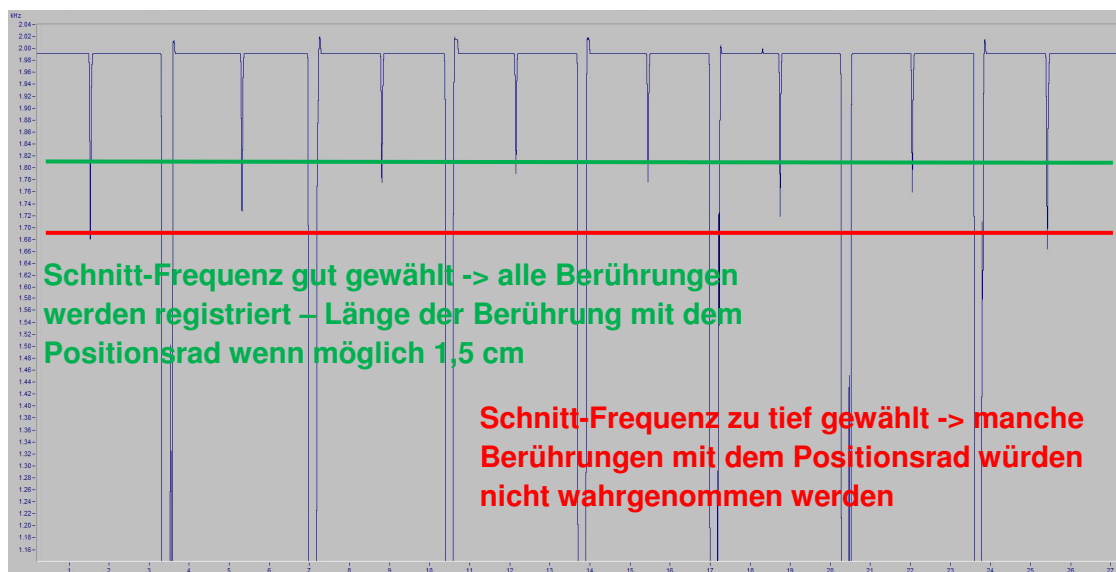


Abbildung 5-4: Wahl der Schnitt-Frequenz

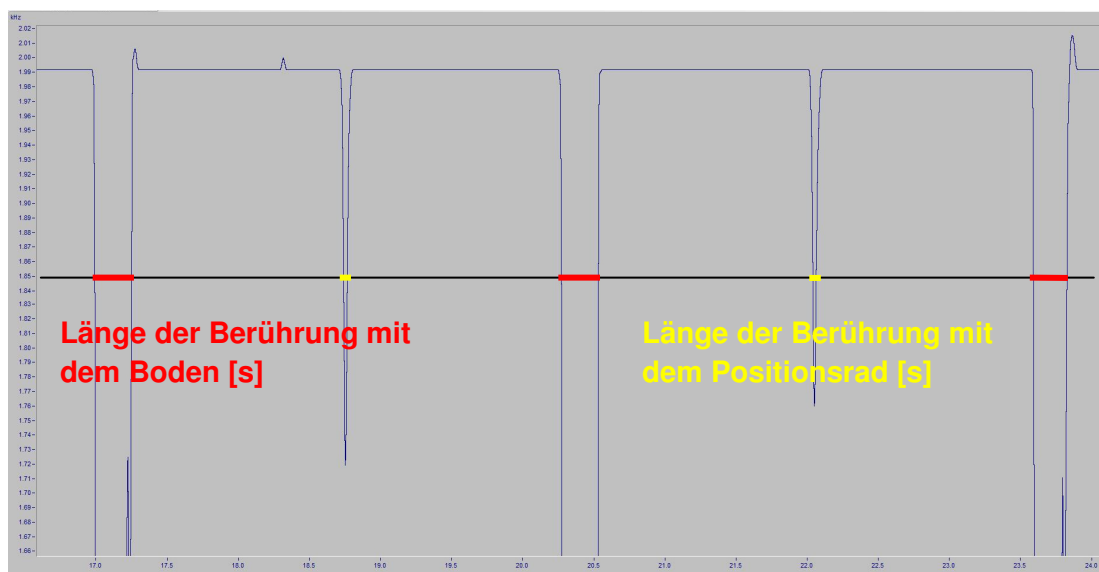


Abbildung 5-5: Illustration der Auswertung mit Excel

## 5 - Versuchsauswertung

Die Frequenz der Pfeifen im nicht zugedeckten Zustand lag bei rund 2000 Hz. Die Grenzfrequenz, an der geschnitten wurde, wurde zwischen 1700 und 1900 Hz gewählt.

Mit Hilfe des beschriebenen Prinzips wurden aus der, durch Famos ermittelten, Datenreihe folgende Werte mit Hilfe der Excel-Auswertung berechnet (siehe auch Abbildung 5-6):

- ◆ Kontaktlänge mit dem Boden
- ◆ Kontaktlänge mit dem Positionsrad
- ◆ Asymmetrie der Kontaktlänge mit dem Boden
- ◆ Anteil Bug der Kontaktlänge mit dem Boden
- ◆ Anteil Heck der Kontaktlänge mit dem Boden

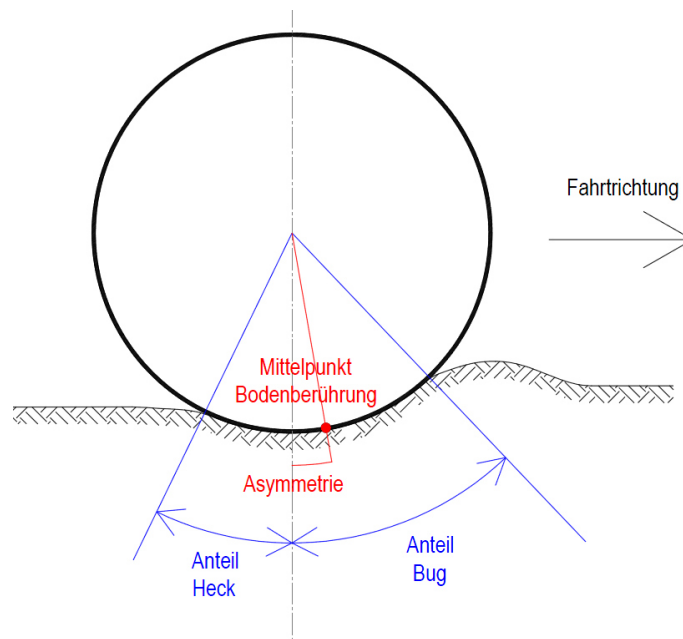


Abbildung 5-6: Definition Asymmetrie, Anteil Bug, Anteil Heck

Da bei vielen Messfahrten die Aufnahmen stark durch Störfaktoren beeinflusst wurden und so die Gefahr bestand, dass falsche Messwerte in die Auswertung gelangten, wurden einige Kontrollen in die Excel-Auswertung integriert:

- ◆ Umfangkontrolle

Da der Umfang der Bandage bekannt ist (Durchmesser = 120 cm  $\rightarrow U = 120 \cdot \pi = 377$  cm), konnte verglichen werden, ob die Summe der ausgewerteten Längen für eine Umdrehung (also die Länge der Berührung mit dem Boden, die Länge zwischen Bodenberührung und Positionsradberührung, die Länge der Berührung mit dem Positionsrad sowie die Länge zwischen Positionsradberührung und Bodenberührung) mit dem Umfang übereinstimmt. Als Toleranz wurden  $\pm 35$ cm gewählt, das heißt die ermittelte Länge des Umfangs muss zwischen 3,42 m und 4,12 m liegen.

Mit der Umfangkontrolle wurde einerseits überprüft ob die Geschwindigkeit der Walze während der Messfahrt konstant war, da die daraus ermittelten Kontaktlängen durch die Kontaktzeit berechnet wurden und somit die tatsächliche Geschwindigkeit auch wirklich mit dem eingestellten Wert übereinstimmen musste. Andererseits wurden durch die Umfangkontrolle Auswertungsfehler erkannt. Entweder wurde ein Peak nicht registriert (siehe Abbildung 5-4) wodurch ein längerer Umfang als erlaubt errechnet werden würde, oder ein durch Störfaktoren verursachter



Frequenzanstieg oder -abfall verfälscht das Ergebnis. Dies würde einen zu kleinen Umfang zur Folge haben (Abbildung 5-7).

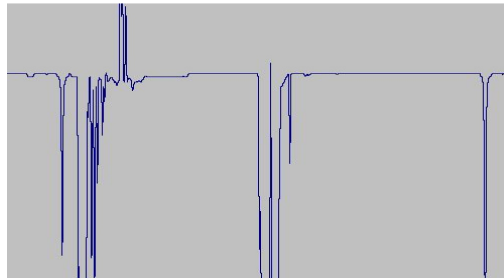


Abbildung 5-7: Durch Störfaktoren verursachter Frequenzanstieg

◆ Toleranzkontrollen

Da die Streuung der Ergebnisse bei einigen Messfahrten erheblich war, wurde der Mittelwert der „Kontaktlänge Boden“ und der „Kontaktlänge Positionsrad“ ermittelt. Lagen die Messwerte außerhalb eines voreingestellten Toleranzbereiches um diesen Mittelwert, so wurden sie nicht mitberücksichtigt. Die eingestellte Toleranz der „Kontaktlänge Boden“ lag zwischen 0,1 m und 0,6 m. Bei der „Kontaktlänge Positionsrad“ wurde mit einer Toleranz zwischen  $\pm 0,005$  m und  $\pm 0,010$  m gearbeitet.

◆ „Visuelle“ Kontrolle

Abschließend wurden alle Ergebnisse noch einmal durch eine visuelle Kontrolle auf Plausibilität geprüft, um offensichtlich falsche Ergebnisse zu eliminieren.

Für jede einzelne Messfahrt wurden dann jeweils für Vorwärts- und Rückwärtsfahrt getrennt Mittelwerte aus den einzelnen Umdrehungen gebildet, die alle Kontrollen positiv absolviert haben. Um Rückschlüsse auf die Qualität einer Messfahrt zu gewinnen, wurden zum Schluss die „korrekten Umdrehungen“ der Bandage gezählt. Das heißt nur die Umdrehungen bei denen alle Messwerte die Kontrollen bestanden haben, wurden mit eingerechnet und lassen bei einem höheren Wert auf ein genaueres Messergebnis schließen.

Als Beispiel einer solchen Auswertung wird zur Veranschaulichung die Excel-Auswertungstabelle einer Pfeife von Messfahrt 039 gezeigt:

In die grau hinterlegte Tabelle, die sich am linken Blattrand befindet, wurden die Werte aus Famos kopiert. Rechts davon werden die Schnittpunkte dieses importierten Frequenzverlaufes mit der Grenzfrequenz evaluiert und daraus die Berührlänge sowie die Asymmetrie jeder einzelnen Umdrehung berechnet. Um die Vorwärtsfahrt von der Rückwärtsfahrt zu trennen, was nötig war, da die Vorwärtsfahrt zumeist dynamisch, die Rückwärtsfahrt jedoch statisch erfolgte, musste in die grüne Spalte händisch ein „X“ an der Stelle eingetragen werden, an der die Fahrtrichtung geändert wurde. Da die Walze am Umkehrpunkt kurz zum Stillstand kam, ist diese Pause an einem größeren berechneten Umfang zu erkennen.

Bei der Versuchsfahrt 29 wurden während der Vorwärtsfahrt 6 „korrekte“ Umdrehungen aufgezeichnet. In dem rot eingefärbten Kasten im oberen Bereich sind die Mittelwerte der verschiedenen Messergebnisse über diese 6 Umdrehungen aufgelistet. Das Selbe geschieht im blauen Kasten für die 5 „korrekten“ Umdrehungen, die bei der Rückwärtsfahrt aufgezeichnet wurden. In den beiden Kästen links des roten Kastens wurden die Parameter für die Grundeinstellungen beziehungsweise für die Kontrollen angegeben.

5 - Versuchsauswertung

Tabelle 5-1: Auswertung der FAMOS-Daten von Messfahrt 039

										VORWÄRTSFAHRT				RÜCKWÄRTSFAHRT			
Abtaste:	1/700 Hz	Mittelwert Bodenberührung vor Bereinigung				0,22 m		"korrekte" Umdrehungen				"korrekte" Umdrehungen					
fenster:	0,025 s	Toleranz Mittelwert Bodenberührung Kontrolle				0,2 m		Mittelwert Bodenberühr.				Mittelwert Bodenberühr.					
		Mittelwert Pos.rad vor Bereinigung				0,0192 m		Mittelwert Positionsr.				Mittelwert Positionsr.					
Grenze Berührung	1800 Hz	Toleranz Mittelwert Kontrolle Pos.rad				0,0100 m		Mittelwert Asymmetrie				Mittelwert Asymmetrie					
Geschw	4,00 km/h	Mittelwert Pos.rad nach Bereinigung gesamt				0,0195 m		Anteil Bug				Anteil Bug					
Geschw	1,11 m/s							Anteil Heck				Anteil Heck					
Umfang Bandage	3,77 m																
Toleranz Umfangkontrolle	0,35 m																
Datenpunkte	Zeit	Frq	wenn berührt =1	sekunden	Felder	Berührlänge	Länge nicht berühren	Umdrehung	Walze dreht um = X	Umfang	Umfang-Kontrolle	Berührung Boden	Berührung Positionsr. d	Berührung Boden nach Kontrolle	Berührung Pos.rad nach Kontrolle	Asymmetrie	
	[s]	[Hz]				[m]	[m]			[m]		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	
0	0,0000	2039	0	trifft auf	2,49714	SB\$1761	SD\$1761	0,2016									
1	0,0014	2039	0	geht weg	2,67857	SB\$1888	SD\$1888										
2	0,0029	2039	0	trifft auf	4,54143	SB\$3192	SD\$3192	0,0254									
3	0,0043	2039	0	geht weg	4,56429	SB\$3208	SD\$3208										
4	0,0057	2039	0	trifft auf	6,34571	SB\$4455	SD\$4455	0,2143			4,28 NEIN						
5	0,0071	2039	0	geht weg	6,53857	SB\$4590	SD\$4590										
6	0,0086	2039	0	trifft auf	8,23000	SB\$5774	SD\$5774	0,0190									
7	0,0100	2039	0	geht weg	8,24714	SB\$5786	SD\$5786										
8	0,0114	2039	0	trifft auf	9,91286	SB\$6952	SD\$6952	0,1968			3,96 OK	0,2143	0,0190	0,2143	0,0190	0,0187	
9	0,0129	2039	0	geht weg	10,09000	SB\$7076	SD\$7076										
10	0,0143	2039	0	trifft auf	11,71143	SB\$8211	SD\$8211	0,0190									
11	0,0157	2039	0	geht weg	11,72857	SB\$8223	SD\$8223										
12	0,0171	2039	0	trifft auf	13,35000	SB\$9358	SD\$9358	0,2222			3,82 OK	0,1968	0,0190	0,1968	0,0190	-0,0063	
13	0,0186	2039	0	geht weg	13,55000	SB\$9498	SD\$9498										
14	0,0200	2039	0	trifft auf	15,14571	SB\$10615	SD\$10615	0,0190									
15	0,0214	2039	0	geht weg	15,16286	SB\$10627	SD\$10627										
16	0,0229	2039	0	trifft auf	16,77857	SB\$11758	SD\$11758	0,1984			3,81 OK	0,2222	0,0190	0,2222	0,0190	-0,0052	
17	0,0243	2039	0	geht weg	16,95714	SB\$11883	SD\$11883										
18	0,0257	2039	0	trifft auf	18,55000	SB\$12998	SD\$12998	0,0175									
19	0,0271	2039	0	geht weg	18,56571	SB\$13009	SD\$13009										
20	0,0286	2039	0	trifft auf	20,15714	SB\$14123	SD\$14123	0,2524									
21	0,0300	2039	0	geht weg	20,38429	SB\$14282	SD\$14282										
22	0,0314	2039	0	trifft auf	21,95000	SB\$15378	SD\$15378	0,0222									
23	0,0329	2039	0	geht weg	21,97000	SB\$15392	SD\$15392										
24	0,0343	2039	0	trifft auf	23,56571	SB\$16509	SD\$16509	0,2000			3,79 OK	0,2524	0,0222	0,2524	0,0222	-0,0036	
25	0,0357	2039	0	geht weg	23,74571	SB\$16635	SD\$16635										
26	0,0371	2039	0	trifft auf	25,36000	SB\$17765	SD\$17765	0,0159									
27	0,0386	2039	0	geht weg	25,37429	SB\$17775	SD\$17775										
28	0,0400	2039	0	trifft auf	27,04714	SB\$18946	SD\$18946	0,3254									
29	0,0414	2039	0	geht weg	27,34000	SB\$19151	SD\$19151										
30	0,0429	2039	0	trifft auf	34,24286	SB\$23983	SD\$23983	0,3063									
31	0,0443	2039	0	geht weg	34,51857	SB\$24176	SD\$24176										
32	0,0457	2039	0	trifft auf	36,49857	SB\$25562	SD\$25562	0,0190									
33	0,0471	2039	0	geht weg	36,51571	SB\$25574	SD\$25574										
34	0,0486	2039	0	trifft auf	38,30143	SB\$26824	SD\$26824	0,2063									
35	0,0500	2039	0	geht weg	38,48714	SB\$26954	SD\$26954										
36	0,0514	2039	0	trifft auf	40,20143	SB\$28154	SD\$28154	0,0206			4,11 OK	0,2063	0,0190	0,2063	0,0190	-0,0393	
37	0,0529	2039	0	geht weg	40,22000	SB\$28167	SD\$28167										
38	0,0543	2039	0	trifft auf	41,84286	SB\$29303	SD\$29303	0,2508									
39	0,0557	2039	0	geht weg	42,06857	SB\$29461	SD\$29461										
40	0,0571	2039	0	trifft auf	43,66429	SB\$30578	SD\$30578	0,0206			3,85 OK	0,2508	0,0206	0,2508	0,0206	-0,0151	
41	0,0586	2039	0	geht weg	43,68286	SB\$30591	SD\$30591										
42	0,0600	2039	0	trifft auf	45,26571	SB\$31699	SD\$31699	0,2079									
43	0,0614	2039	0	geht weg	45,45286	SB\$31830	SD\$31830										
44	0,0629	2039	0	trifft auf	47,04429	SB\$32944	SD\$32944	0,0206			3,76 OK	0,2079	0,0206	0,2079	0,0206	0,0048	
45	0,0643	2039	0	geht weg	47,06286	SB\$32957	SD\$32957										
46	0,0657	2039	0	trifft auf	48,64143	SB\$34062	SD\$34062	0,2032									
47	0,0671	2039	0	geht weg	48,82429	SB\$34190	SD\$34190										
48	0,0686	2039	0	trifft auf	50,43286	SB\$35316	SD\$35316	0,0206			3,77 OK	0,2032	0,0206	0,2032	0,0206	0,0167	
49	0,0700	2039	0	geht weg	50,45143	SB\$35329	SD\$35329										
50	0,0714	2039	0	trifft auf	52,04286	SB\$36443	SD\$36443	0,1651									
51	0,0729	2039	0	geht weg	52,19143	SB\$36547	SD\$36547										
52	0,0743	2039	0	trifft auf	53,82571	SB\$37691	SD\$37691	0,0175			3,77 OK	0,1651	0,0206	0,1651	0,0206	0,0230	
53	0,0757	2039	0	geht weg	53,84143	SB\$37702	SD\$37702										
54	0,0771	2039	0	trifft auf	55,42143	SB\$38808	SD\$38808	0,2016									
55	0,0786	2039	0	geht weg	55,60286	SB\$38935	SD\$38935										
56	0,0800	2039	0	trifft auf	57,90429	SB\$40546	SD\$40546	0,0397			4,53 NEIN						
57	0,0814	2039	0	geht weg	57,94000	SB\$40571	SD\$40571										
58	0,0829	2039	0	trifft auf	63,05429	SB\$44151	SD\$44151	0,6889									
59	0,0843	2039	0	geht weg	63,67429	SB\$44585	SD\$44585										
60	0,0857	2039	0	trifft auf	67,47857	SB\$47248	SD\$47248	#NV			10,64 NEIN						
61	0,0871	2039	0	geht weg	#NV	#NV	#NV	#NV									
62	0,0886	2039	0	trifft auf	#NV	#NV	#NV	#NV									
63	0,0900	2039	0	geht weg	#NV	#NV	#NV	#NV									
64	0,0914	2039	0	trifft auf	#NV	#NV	#NV	#NV									
65	0,0929	2039	0	geht weg	#NV	#NV	#NV	#NV									
66	0,0943	2039	0	trifft auf	#NV	#NV	#NV	#NV									
67	0,0957	2039	0	geht weg	#NV	#NV	#NV	#NV									
68	0,0971	2039	0	trifft auf	#NV	#NV	#NV	#NV									
69	0,0986	2039	0	geht weg	#NV	#NV	#NV	#NV									
70	0,1000	2039	0	trifft auf	#NV	#NV	#NV	#NV									
71	0,1014	2039	0	geht weg	#NV	#NV	#NV	#NV									
72	0,1029	2039	0	trifft auf	#NV	#NV	#NV	#NV									
73	0,1043	2039	0	geht weg	#NV	#NV	#NV	#NV									
74	0,1057	2039	0	trifft auf	#NV	#NV	#NV	#NV									
75	0,1071	2039	0	geht weg	#NV	#NV	#NV	#NV									
76	0,1086	2039	0	trifft auf	#NV	#NV	#NV	#NV									
77	0,1100	2039	0	geht weg	#NV	#NV	#NV	#NV									
78	0,1114	2039	0	trifft auf	#NV	#NV	#NV	#NV									
79	0,1129	2039	0	geht weg	#NV	#NV	#NV	#NV									
80	0,1143	2039	0														
81	0,1157	2039	0														
82	0,1171	2039	0														
83	0,1186	2039	0														
84	0,1200	2039	0														
85	0,1214	2039	0														
86	0,1229	2039	0														
87	0,1243	2039	0														
88	0,1257	2039	0														
89	0,1271	2039	0														

Kopierte Werte aus FAMOS

### 5.3 Messung der Bugwelle – Asymmetrie

Wie bereits in Kapitel 3.3.1 angedeutet, war ein Ziel der Messungen die Bestimmung der Größe der Bugwelle, zur Beurteilung der Schiebewirkung der Walze. Dies erfolgte mit Hilfe des Referenzsignals, welches das Positionsrاد lieferte. Das Positionsrاد war direkt über der Lagerachse montiert und lässt somit Rückschlüsse auf die Asymmetrie  $A$  zu, die den Abstand zwischen dem Mittelpunkt der Bodenberührung und der Lagerachse beschreibt (siehe Abbildung 5-8) und nach folgender Formel ermittelt wird:

$$A = \frac{y - x}{2} \quad (31)$$

Die Variablen aus Formel (31) sind in Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 erklärt.

Existiert eine Bugwelle so ist die Asymmetrie  $A$  bei Vorwärtsfahrt positiv.

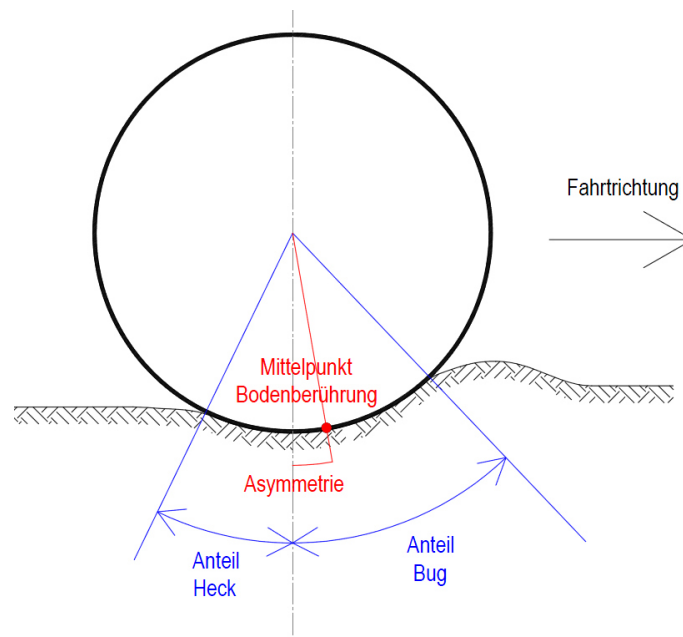


Abbildung 5-8: Prinzip der Ermittlung von Asymmetrie und Anteil der Bugwelle

Nach der ersten Durchsicht der Ergebnisse lagen allerdings nicht die erwarteten Werte für die Asymmetrie vor. Bei den Vorwärtsfahrten lieferte die Berechnung meist negative Ergebnisse, was bedeuten würde, dass die Heckwelle größer als die Bugwelle wäre, ganz im Gegenteil zur Rückwärtsfahrt, wo der Wert der Asymmetrie tendenziell positiv war. Dies lässt den Rückschluss zu, dass das Positionsrاد nicht exakt über der Lagerachse lag, sondern etwas nach hinten versetzt war. Nach genauerer Befassung mit dieser Problematik ist folgender Grund naheliegend: Die Einmessung des Positionsrades erfolgte im aufgebockten Zustand, das heißt die Gummipuffer der Bandagen waren nicht durch das Eigengewicht der Walze belastet, sondern lediglich durch das Gewicht der Bandagen in entgegengesetzter Richtung. Wird die Walze jedoch auf den Boden gestellt, so tritt im Vergleich zum aufgebockten Zustand durch den Dehnweg der Gummipuffer eine horizontale Änderung der Position des Positionsrades auf, da die Bandagen in diesem Zustand etwas nach außen ausweichen.

Um diese Theorie zu prüfen wurde das Positionsrاد der auf dem Boden stehenden Walze vermessen. Wie vermutet konnte ein Fehler von 1,3 cm festgestellt werden, um den das Positionsrاد bezüglich der Lagerachse nach hinten versetzt war.

## 5 - Versuchsauswertung

Um diesen Wert zu prüfen, wurde der vermutete Fehler auch in den ausgewerteten Kontaktlängen verifiziert. Die Fahrten 1-7 wurden sowohl vorwärts als auch rückwärts statisch durchgeführt, es erfolgte keine dynamische Anregung der Bandagen. Die Asymmetrie sollte demnach in der Theorie während der Vorwärts- und Rückwärtsfahrt jeweils den gleichen Wert annehmen.

Während der Vorwärtsfahrt ergibt sich der wahre Wert  $A_V$  der Asymmetrie nach Abbildung 5-9 zu:

$$A_V = \frac{y - x}{2} + F \quad (32)$$

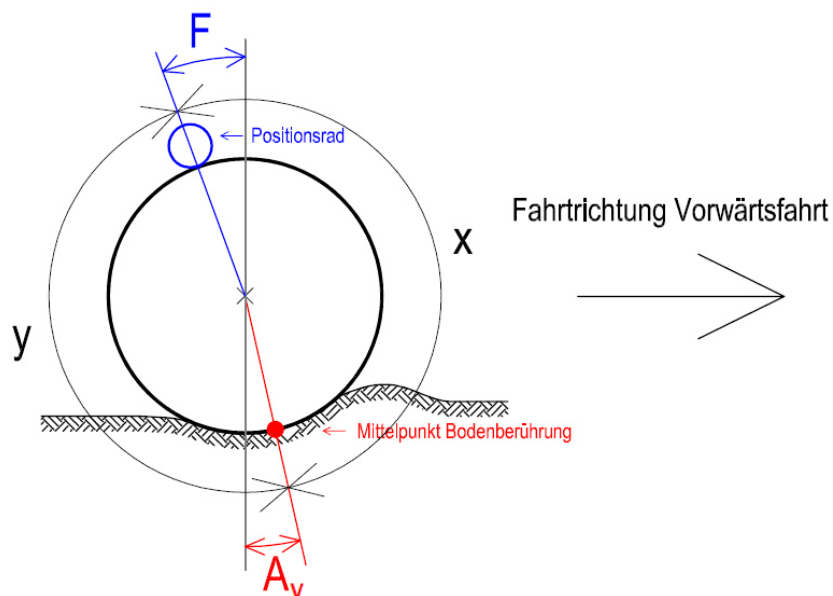


Abbildung 5-9: Vermuteter Fehler  $F$  bei Vorwärtsfahrt

Während der Rückwärtsfahrt kann die Asymmetrie  $A_R$  nach folgender Formel berechnet werden:

$$A_R = \frac{y - x}{2} - F \quad (33)$$

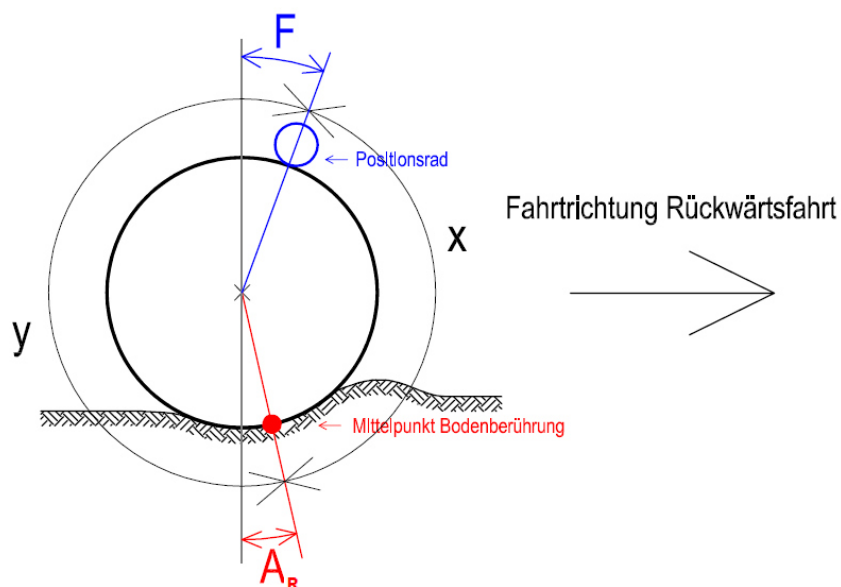


Abbildung 5-10: Vermuteter Fehler  $F$  bei Rückwärtsfahrt

Aus diesen beiden Formeln lässt sich nun ohne weiteres die Formel für den Fehler  $F$  herleiten:

$$F = \frac{A_V - A_R}{2} \quad (34)$$

Ist  $F$  negativ, so stimmt das Ergebnis mit der Annahme, dass das Positionsrads der Oszillationsbandage zu weit hinten sitzt, überein.

Setzt man nun für die Werte  $A_V$  und  $A_R$  die Mittelwerte der statischen Fahrten 1-7 ein, so erhält man:

$$F = \frac{A_V - A_R}{2} = -1,34 \text{ cm}$$

Dieses Ergebnis bestätigt die Messung (1,30 cm). Die Werte für die Asymmetrie werden im weiteren Verlauf um den Wert 1,32 cm berichtigt (Mittelwert aus Messung und Verifizierung aus den Messdaten).

#### 5.4 Ergebnisse der ausgewerteten Messungen

In diesem Abschnitt werden die ermittelten Messergebnisse für jeweils beide Pfeifen (bezeichnet mit „l“ und „r“) auf der Oszillationsbandage, für jede Messfahrt einzeln, aufgelistet. Die Ergebnisse sind außerdem getrennt nach Vorwärtsfahrt (Tabelle 5-2), bei der mit verschiedenen Einstellungen der Oszillations- beziehungsweise Vibrationsbandage gefahren wurde, und Rückwärtsfahrt (Tabelle 5-3), bei der alle Fahrten statisch erfolgten.

Im linken Bereich der Tabellen sind die Einstellungen der dynamischen Anregung und die Wahl der Geschwindigkeit und Spur (die Spuren wurden in Kapitel 3.1 beschrieben) dokumentiert. Ebenfalls wird der dynamische Verformungsmodul als Ergebnis der Messung mit der dynamischen Lastplatte nach jeder Fahrt angeführt, sowie die nach Gleichung (9) durchgeführte Umrechnung in den E-Modul.

Der farbig hinterlegte Teil der Tabelle zeigt die ermittelten Ergebnisse der akustischen Auswertung. Die Beschreibung der einzelnen Positionen erfolgte in Kapitel 5.2, beziehungsweise die Beschreibung der „bereinigten Asymmetrie“ in Kapitel 5.3.

Für die rot markierten Messfahrten konnten aus verschiedenen Fehlerursachen keine brauchbaren Ergebnisse berechnet werden. Die genauere Erläuterung der Fehler kann ebenfalls in Kapitel 5.2 nachgelesen werden.

5 - Versuchsauswertung

Auswertung der Vorwärtsfahrt:

Tabelle 5-2: Auswertung der Vorwärtsfahrt

Mess- fahrt	kanal	Spur	Geschw	Anregung	Frequenz	Amplit.-groß/klein	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	VORWÄRTSFAHRT						
											"korrekte" Umdrehungen	Boden- berührung	Positionen- rad	Asymmetrie	Asymmetrie (bereinigt)	Anteil Bug	Anteil Heck
			[km/h]		[Hz]				[MN/m2]	[MN/m2]		[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
001	l	4	4	statisch			voll	trocken	38,3	30,4	2	15,2	1,7	-0,6	0,7	8,3	6,8
	r	4	4	statisch			voll	trocken	38,3	30,4	3	19,6	3,4	1,1	2,4	12,2	7,4
002	l	4	4	statisch			voll	trocken	31,5	25,0	3	21,5	1,6	0,5	1,8	12,6	9,0
	r	4	4	statisch			voll	trocken	31,5	25,0	5	16,7	1,6	-0,7	0,7	9,0	7,7
003	l	4	4	statisch			voll	trocken	31,9	25,3	5	19,2	1,6	0,2	1,5	11,1	8,1
	r	4	4	statisch			voll	trocken	31,9	25,3	3	13,7	1,9	-2,1	-0,8	6,1	7,6
004	l	4	4	statisch			voll	trocken	35,1	27,9	3	18,5	1,8	0,21	1,5	10,8	7,7
	r	4	4	statisch			voll	trocken	35,1	27,9	5	17,8	1,7	0,8	2,1	11,0	6,8
005	l	4	4	statisch			voll	trocken	34,9	27,7	5	18,8	1,9	0,3	1,7	11,0	7,7
	r	4	4	statisch			voll	trocken	34,9	27,7	3	19,4	1,8	-1,4	-0,1	9,6	9,8
006	l	4	4	statisch			voll	trocken	34,4	27,3	4	18,3	1,5	0,9	2,2	11,4	6,9
	r	4	4	statisch			voll	trocken	34,4	27,3	3	17,9	1,6	-2,7	-1,3	7,6	10,3
007	l	4	4	statisch			voll	trocken	35,3	28,0	5	18,6	1,9	0,3	1,7	10,9	7,6
	r	4	4	statisch			voll	trocken	35,3	28,0	1	17,7	1,7	-4,0	-2,7	6,2	11,5
008	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	30,3	24,1	5	31,8	1,7	-0,8	0,5	16,4	15,4
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	30,3	24,1	5	30,2	1,9	-0,7	0,6	15,7	14,5
009	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	28,7	22,8	5	29,5	1,9	-0,9	0,4	15,2	14,3
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	28,7	22,8	5	29,4	2,2	1,0	2,3	17,0	12,4
010	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	29,3	23,3	5	31,5	1,9	-1,9	-0,5	15,2	16,3
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	29,3	23,3	3	23,8	1,9	1,0	2,3	14,2	9,5
011	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	34,7	27,6	5	29,0	1,8	-1,7	-0,4	14,1	14,9
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	34,7	27,6	3	26,0	1,4	0,0	1,4	14,4	11,7
012	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	29,7	23,6	5	29,0	1,9	0,0	1,4	15,8	13,1
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	29,7	23,6	6	24,9	1,5	-0,8	0,5	13,0	11,9
013	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	34,5	27,4	4	27,5	1,7	-1,0	0,4	14,1	13,4
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	34,5	27,4	4	26,0	2,1	-0,6	0,7	13,7	12,3
014	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	32,8	26,0	5	28,6	1,8	-2,1	-0,8	13,5	15,1
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	32,8	26,0	4	25,6	1,8	-0,3	1,0	13,8	11,8
015	l	2	4	Oszi	39	groß	voll	trocken	32,7	26,0	5	29,0	1,9	-1,6	-0,3	14,3	14,8
	r	2	4	Oszi	39	groß	voll	trocken	32,7	26,0	4	24,2	1,8	0,1	1,4	13,5	10,7
016	l	2	4	Oszi	39	groß	voll	trocken	36,5	29,0	6	27,7	2,2	-1,6	-0,3	13,6	14,2
	r	2	4	Oszi	39	groß	voll	trocken	36,5	29,0	6	25,3	1,9	-1,5	-0,2	12,4	12,9
017	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	33,8	26,8	5	28,5	2,6	-0,7	0,7	14,9	13,6
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	33,8	26,8	3	25,8	2,1	-1,5	-0,2	12,7	13,1
018	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	32,9	26,1	6	27,8	1,9	0,1	1,4	15,3	12,5
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	32,9	26,1	5	26,7	1,8	-1,3	0,0	13,4	13,3
019	l	2	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	37,2	29,5	6	28,3	2,0	-0,3	1,0	15,1	13,1
	r	2	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	37,2	29,5	5	24,0	2,1	0,9	2,2	14,2	9,8
020	l	2	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	34,6	27,5	6	30,2	1,9	-0,5	0,8	15,9	14,3
	r	2	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	34,6	27,5	2	24,6	1,9	-0,5	0,8	13,1	11,5
021	l	2	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	36,5	29,0	5	28,7	1,9	-2,5	-1,2	13,2	15,5
	r	2	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	36,5	29,0	3	27,6	2,1	-1,2	0,2	14,0	13,6
022	l	2	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	41,7	33,1	2	28,0	1,5	-2,0	-0,7	13,3	14,7
	r	2	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	41,7	33,1	2	27,3	1,8	-4,3	-3,0	10,6	16,7
023	l	2	2-6	Oszi	39	klein	voll	trocken	40,8	32,4							
	r	2	2-6	Oszi	39	klein	voll	trocken	40,8	32,4							
024	l	2	2-6	Oszi	39	klein	voll	trocken	39,6	31,4							
	r	2	2-6	Oszi	39	klein	voll	trocken	39,6	31,4							
025	l	2	4	Oszi	20	klein	voll	trocken	42,3	33,6	5	24,6	1,7	-3,0	-1,7	10,6	14,0
	r	2	4	Oszi	20	klein	voll	trocken	42,3	33,6	3	22,5	1,7	-1,8	-0,5	10,8	11,7
026	l	2	4	Oszi	20	klein	voll	trocken	38,0	30,2	5	25,0	1,9	-1,9	-0,6	11,9	13,1
	r	2	4	Oszi	20	klein	voll	trocken	38,0	30,2	3	23,0	1,5	-0,9	0,4	11,9	11,1
027	l	2	4	Oszi	50	klein	voll	trocken	50,0	39,7	5	30,4	1,8	-1,3	0,0	15,2	15,2
	r	2	4	Oszi	50	klein	voll	trocken	50,0	39,7	3	28,7	1,8	-2,6	-1,3	13,1	15,6
028	l	2	4	Oszi	50	klein	voll	trocken	41,5	33,0	6	32,8	1,3	-1,9	-0,6	15,8	17,0
	r	2	4	Oszi	50	klein	voll	trocken	41,5	33,0	4	28,8	1,9	-2,5	-1,2	13,2	15,6
029	l	2	4	Oszi	70	klein	voll	trocken	42,4	33,7	6	32,2	1,8	0,7	2,0	18,1	14,1
	r	2	4	Oszi	70	klein	voll	trocken	42,4	33,7	2	29,0	2,8	-1,5	-0,1	14,3	14,6
030	l	2	4	Oszi	70	klein	voll	trocken	42,5	33,8	6	31,7	1,9	-0,5	0,8	16,7	15,0
	r	2	4	Oszi	70	klein	voll	trocken	42,5	33,8	1	28,9	3,7	-3,0	-1,7	12,8	16,1
031	l	2	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	38,1	30,3	4	22,9	1,7	0,0	1,3	12,8	10,1
	r	2	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	38,1	30,3	4	19,0	2,6	-1,0	0,3	9,8	9,2
032	l	2	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	44,6	35,4	6	21,4	1,9	-1,2	0,1	10,8	10,6
	r	2	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	44,6	35,4	5	21,2	1,7	1,0	2,3	12,9	8,3
033	l	2	2	Vibro	50	klein	voll	trocken	46,2	36,7	5	19,6	1,7	-0,2	1,1	10,9	8,7
	r	2	2	Vibro	50	klein	voll	trocken	46,2	36,7	4	16,4	2,4	2,2	3,5	11,7	4,7
034	l	2	2	Vibro	50	klein	voll	trocken	45,6	36,2	5	18,4	1,8	0,1	1,4	10,6	7,8
	r	2	2	Vibro	50	klein	voll	trocken	45,6	36,2	6	14,3	2,0	1,8	3,2	10,3	4,0
035	l	2	6	Vibro	50	klein	voll	trocken	48,7	38,7	3	20,1	1,9	-2,6	-1,2	8,8	11,3
	r	2	6	Vibro	50	klein	voll	trocken	48,7	38,7	4	27,1	1,9	-1,6	-0,3	13,3	13,8



5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-2: Auswertung der Vorwärtsfahrt

Mess- fahrt	Kanal	Spur	Geschw	Anregung	Frequenz	Amplit. groß/klein	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	VORWÄRTSFAHRT						
											"korrekte" Umdrehungen	Boden- berührung	Positionen- rad	Asymmetrie	Asymmetrie (bereinigt)	Anteil Bug	Anteil Heck
			[km/h]		[Hz]				[MN/m2]	[MN/m2]		[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
036	l	2	6	Vibro	50	klein	voll	trocken	43,3	34,4	3	21,7	1,9	-1,5	-0,2	10,6	11,0
	r	2	6	Vibro	50	klein	voll	trocken	43,3	34,4	3	25,8	1,5	-2,3	-1,0	11,9	13,9
037	l	2	2-6	Vibro	50	klein	voll	trocken	44,8	35,6							
	r	2	2-6	Vibro	50	klein	voll	trocken	44,8	35,6							
038	l	2	2-6	Vibro	50	klein	voll	trocken	49,5	39,3							
	r	2	2-6	Vibro	50	klein	voll	trocken	49,5	39,3							
039	l	2	4	Vibro	20	klein	voll	trocken	48,8	38,8	5	21,0	1,8	-1,7	-0,4	10,1	10,9
	r	2	4	Vibro	20	klein	voll	trocken	48,8	38,8	3	15,9	2,0	-0,3	1,0	8,9	7,0
040	l	2	4	Vibro	20	klein	voll	trocken	52,4	41,6	4	21,8	1,7	-1,7	-0,4	10,5	11,3
	r	2	4	Vibro	20	klein	voll	trocken	52,4	41,6	2	21,1	3,1	-0,9	0,4	11,0	10,1
041	l	2	4	Vibro	40	klein	voll	trocken	52,2	41,5	4	20,4	1,8	-1,0	0,3	10,5	9,9
	r	2	4	Vibro	40	klein	voll	trocken	52,2	41,5	1	20,6	1,1	-1,0	0,3	10,6	10,0
042	l	2	4	Vibro	40	klein	voll	trocken	39,8	31,6	4	21,8	1,7	-0,9	0,5	11,4	10,5
	r	2	4	Vibro	40	klein	voll	trocken	39,8	31,6	2	22,0	2,9	-1,2	0,1	11,1	10,9
043	l	2	4	Vibro	60	klein	voll	trocken	39,8	31,6	4	21,6	1,7	-1,0	0,3	11,1	10,5
	r	2	4	Vibro	60	klein	voll	trocken	39,8	31,6	1	22,4	2,9	-0,3	1,0	12,2	10,1
044	l	2	4	Vibro	60	klein	voll	trocken	48,7	38,7	4	21,0	1,9	-1,0	0,3	10,8	10,2
	r	2	4	Vibro	60	klein	voll	trocken	48,7	38,7	1	26,2	2,4	-3,9	-2,6	10,5	15,7
045	l	2	4	Vibro	30	groß	voll	trocken	50,2	39,9	5	21,7	1,9	-1,2	0,1	10,9	10,7
	r	2	4	Vibro	30	groß	voll	trocken	50,2	39,9	1	21,3	2,9	0,1	1,4	12,0	9,2
046	l	2	4	Vibro	30	groß	voll	trocken	47,5	37,7	5	23,3	1,7	-2,4	-1,1	10,6	12,8
	r	2	4	Vibro	30	groß	voll	trocken	47,5	37,7	1	21,3	1,7	0,4	1,7	12,4	9,0
047	l	2	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	43,3	34,4	5	21,5	1,8	-1,4	-0,1	10,7	10,8
	r	2	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	43,3	34,4	1	20,2	2,7	0,5	1,8	11,9	8,3
048	l	2	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	37,4	29,7	5	21,6	1,9	-0,7	0,6	11,4	10,2
	r	2	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	37,4	29,7	2	20,6	1,8	1,1	2,5	12,7	7,8
049	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	58,9	46,8							
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	58,9	46,8	4	23,9	3,2	-2,0	-0,7	11,2	12,6
050	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	57,3	45,5							
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	57,3	45,5	3	27,3	3,5	-0,1	1,2	14,9	12,4
051	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	53,3	42,3							
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	53,3	42,3	5	25,5	2,5	0,1	1,4	14,2	11,3
052	l	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	53,6	42,6							
	r	2	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	53,6	42,6	4	23,8	3,2	4,0	5,4	17,3	6,6
053	l	2	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	52,2	41,5							
	r	2	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	52,2	41,5	5	22,2	2,5	1,3	2,6	13,7	8,5
054	l	2	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	57,0	45,3							
	r	2	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	57,0	45,3	5	22,6	2,4	2,1	3,4	14,7	7,9
055	l	2	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	51,0	40,5							
	r	2	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	51,0	40,5	1	27,7	2,6	1,0	2,3	16,1	11,6
056	l	2	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	51,0	40,5							
	r	2	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	51,0	40,5	5	28,0	3,6	-0,4	1,0	15,0	13,1
057	l	2	4	Oszi	20	klein	voll	trocken	54,2	43,0							
	r	2	4	Oszi	20	klein	voll	trocken	54,2	43,0							
058	l	2	4	Oszi	20	klein	voll	trocken	52,8	41,9							
	r	2	4	Oszi	20	klein	voll	trocken	52,8	41,9							
059	l	2	4	Oszi	50	klein	voll	trocken	50,0	39,7							
	r	2	4	Oszi	50	klein	voll	trocken	50,0	39,7							
060	l	2	4	Oszi	50	klein	voll	trocken	51,5	40,9							
	r	2	4	Oszi	50	klein	voll	trocken	51,5	40,9							
061	l	2	4	Oszi	70	klein	voll	trocken	50,8	40,3							
	r	2	4	Oszi	70	klein	voll	trocken	50,8	40,3	6	24,5	1,7	-0,4	0,9	13,1	11,4
062	l	2	4	Oszi	70	klein	voll	trocken	49,1	39,0							
	r	2	4	Oszi	70	klein	voll	trocken	49,1	39,0	5	24,6	1,9	-38,9	-37,6	-25,3	49,9
063	l	3	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	40,0	31,8							
	r	3	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	40,0	31,8	4	29,5	2,0	-3,3	-2,0	12,8	16,7
064	l	3	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	40,8	32,4							
	r	3	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	40,8	32,4	6	27,8	1,6	1,3	2,6	16,6	11,3
065	l	3	4	Oszi	39	groß	voll	trocken	46,2	36,7							
	r	3	4	Oszi	39	groß	voll	trocken	46,2	36,7	5	27,0	1,7	-1,1	0,2	13,7	13,3
066	l	3	4	Oszi	39	groß	voll	trocken	44,5	35,3							
	r	3	4	Oszi	39	groß	voll	trocken	44,5	35,3	4	23,2	1,8	-0,2	1,1	12,7	10,5
067	l	3	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	42,5	33,8							
	r	3	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	42,5	33,8	6	25,0	1,5	2,5	3,8	16,3	8,7
068	l	3	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	51,6	41,0							
	r	3	2	Oszi	39	klein	voll	trocken	51,6	41,0	6	26,1	1,6	1,4	2,7	15,7	10,4
069	l	3	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	44,2	35,1							
	r	3	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	44,2	35,1	5	27,4	1,9	-2,1	-0,7	13,0	14,4
070	l	3	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	43,9	34,9							
	r	3	6	Oszi	39	klein	voll	trocken	43,9	34,9	4	26,7	2,0	-1,7	-0,4	13,0	13,8

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-2: Auswertung der Vorwärtsfahrt

Mess- fahrt	Kanal	Spur	Geschw	Anregung	Frequenz	Amplit. groß/ klein	W. tank voll/ leer	nass/ trocken	Evd	E	VORWÄRTSFAHRT						
											"korrekte" Umdrehungen	Boden- berührung [cm]	Positionen- rad [cm]	Asymmetrie [cm]	Asymmetrie (bereinigt) [cm]	Anteil Bug [cm]	Anteil Heck [cm]
071	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	51,4	40,8							
	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	51,4	40,8	5	21,1	1,7	-1,9	-0,6	10,0	11,1
072	l	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	47,7	37,9	2	27,4	1,7	-1,3	0,0	13,7	13,7
	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	47,7	37,9	5	20,7	1,6	-1,9	-0,6	9,8	10,9
073	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	46,0	36,5							
	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	46,0	36,5	5	20,3	1,8	-1,7	-0,3	9,8	10,5
074	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	49,6	39,4							
	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	49,6	39,4	5	21,3	1,7	-2,3	-0,9	9,7	11,6
075	l	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	48,1	38,2	3	21,4	1,9	0,7	2,0	12,8	8,7
	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	48,1	38,2	4	20,7	1,9	-2,1	-0,7	9,6	11,1
076	l	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	51,0	40,5	2	22,9	3,3	0,9	2,2	13,7	9,3
	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	51,0	40,5	4	19,9	1,9	-2,1	-0,8	9,1	10,7
077	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	49,9	39,6							
	r	3	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	49,9	39,6	4	21,0	2,1	-2,2	-0,9	9,6	11,4
078	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	47,7	37,9							
	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	47,7	37,9	5	21,6	1,5	-1,6	-0,3	10,5	11,0
079	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	54,3	43,1							
	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	54,3	43,1	4	21,6	2,1	-0,2	1,1	11,9	9,7
080	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	49,3	39,2							
	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	49,3	39,2	5	22,8	1,7	-0,6	0,8	12,2	10,7
081	l	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	52,7	41,9	1	15,6	1,1	3,6	4,9	12,7	2,9
	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	52,7	41,9	3	21,5	2,1	-1,6	-0,2	10,5	11,0
082	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	54,7	43,4							
	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	54,7	43,4	4	20,4	1,8	-1,1	0,2	10,4	10,0
083	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	57,7	45,8							
	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	57,7	45,8	4	21,1	2,0	-2,0	-0,7	9,8	11,2
084	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	48,9	38,8							
	r	3	4	Vibro	40	groß	voll	trocken	48,9	38,8	4	19,5	2,1	-2,7	-1,4	8,4	11,1
085	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	32,7	26,0							
	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	32,7	26,0	5	30,1	1,9	-2,3	-1,0	14,0	16,1
086	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	34,6	27,5							
	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	34,6	27,5	4	27,9	1,8	5,2	6,5	20,5	7,4
087	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	27,7	22,0							
	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	27,7	22,0	5	32,4	1,8	2,5	3,9	20,1	12,3
088	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	27,7	22,0							
	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	27,7	22,0	3	32,0	1,9	-2,3	-1,0	15,0	17,0
089	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	39,3	31,2							
	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	39,3	31,2	4	30,8	2,1	-1,2	0,2	15,6	15,2
090	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	32,0	25,4							
	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	32,0	25,4	2	30,6	2,2	-0,3	1,0	16,3	14,3
091	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	36,5	29,0							
	r	1	4	Vibro+Oszi	40/39	klein/kle	voll	trocken	36,5	29,0	2	29,0	2,6	-2,4	-1,1	13,4	15,5
092	r	4	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	34,5	27,4							
	r	4	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	34,5	27,4	1	26,8	2,5	-1,4	-0,1	13,3	13,5
093	r	4	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	40,0	31,8							
	r	4	4	Vibro	50	klein	voll	trocken	40,0	31,8	3	27,0	1,3	0,5	1,9	15,4	11,6
094	r	4	4	Oszi	39	klein	leer	trocken	38,7	30,7							
	r	4	4	Oszi	39	klein	leer	trocken	38,7	30,7	5	24,8	1,9	-4,8	-3,5	8,9	15,9
095	r	4	4	Oszi	39	klein	leer	trocken	40,3	32,0							
	r	4	4	Oszi	39	klein	leer	trocken	40,3	32,0	3	22,5	1,5	1,9	3,2	14,5	8,1
096	r	4	4	Vibro	50	klein	leer	trocken	50,2	39,9							
	r	4	4	Vibro	50	klein	leer	trocken	50,2	39,9	5	20,3	2,5	-2,7	-1,4	8,8	11,5
097	r	4	4	Vibro	50	klein	leer	trocken	46,2	36,7							
	r	4	4	Vibro	50	klein	leer	trocken	46,2	36,7	3	21,4	2,0	-3,0	-1,6	9,0	12,3
098	l	4	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	48,3	38,4	5	33,8	1,6	1,3	2,6	19,6	14,3
	r	4	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	48,3	38,4	3	25,7	2,4	-2,6	-1,3	11,6	14,2
099	l	4	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	40,5	32,2	5	33,9	1,7	-1,7	-0,4	16,6	17,4
	r	4	4	Oszi	39	klein	voll	trocken	40,5	32,2	5	24,2	1,8	-1,6	-0,3	11,8	12,4
100	l	4	4	Oszi	39	klein	voll	nass	45,9	36,5	1	20,6	2,5	0,1	1,4	11,7	8,9
	r	4	4	Oszi	39	klein	voll	nass	45,9	36,5	3	16,8	3,8	50,1	51,4	59,8	-43,1
101	l	4	4	Oszi	39	klein	voll	nass	38,8	30,8	3	26,9	2,2	-2,3	-1,0	12,5	14,5
	r	4	4	Oszi	39	klein	voll	nass	38,8	30,8	6	23,1	1,5	0,4	1,7	13,3	9,8
102	l	4	4	Oszi	39	klein	voll	nass	39,4	31,3							
	r	4	4	Oszi	39	klein	voll	nass	39,4	31,3	2	23,0	2,1	-1,7	-0,4	11,1	11,9
103	l	4	4	Oszi	39	klein	leer	nass	51,0	40,5	3	27,0	2,8	-0,6	0,8	14,3	12,7
	r	4	4	Oszi	39	klein	leer	nass	51,0	40,5	4	21,9	1,4	-1,2	0,1	11,0	10,8
104	l	4	4	Oszi	39	klein	leer	nass	44,5	35,3	4	24,1	2,0	-1,3	0,0	12,0	12,1
	r	4	4	Oszi	39	klein	leer	nass	44,5	35,3	3	23,0	2,1	-0,7	0,6	12,1	10,9
105	l	4	4	Vibro	50	klein	leer	nass	43,7	34,7							
	r	4	4	Vibro	50	klein	leer	nass	43,7	34,7	4	16,3	1,4	-1,7	-0,4	7,8	8,6

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-2: Auswertung der Vorwärtsfahrt

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	Anregung	Frequenz	Amplit. groß/klein	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	VORWÄRTSFAHRT						
											"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung [cm]	Positions-rad [cm]	Asymmetrie [cm]	Asymmetrie (bereinigt) [cm]	Anteil Bug [cm]	Anteil Heck [cm]
106	l	4	4	Vibro	50	klein	leer	nass	43,5	34,5	4	20,2	1,9	-2,1	-0,8	9,3	10,8
	r	4	4	Vibro	50	klein	leer	nass	43,5	34,5	2	19,1	2,3	-2,2	-0,9	8,6	10,5
107	l	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	6	10,4	2,3	-2,8	-1,4	3,8	6,7
	r	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	2	10,8	1,6	-1,5	-0,2	5,2	5,6
108	l	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	1	7,3	2,0	-2,5	-1,1	2,5	4,8
	r	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	2	10,5	2,3	-0,4	0,9	6,1	4,4
109	l	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	2	12,3	1,7	-2,8	-1,5	4,7	7,6
	r	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	3	12,0	2,0	-1,6	-0,3	5,7	6,2
110	l	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	9	14,0	1,8	-1,7	-0,4	6,6	7,4
	r	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	4	9,4	1,9	-2,2	-0,9	3,8	5,6
111	l	5	2	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	5	10,3	1,7	0,2	1,5	6,7	3,6
	r	5	2	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	3	8,4	1,5	0,8	2,2	6,4	2,1
112	l	5	2	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	8	12,6	1,4	-1,0	0,3	6,6	6,0
	r	5	2	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	5	9,8	1,7	-3,2	-1,9	3,0	6,8
113	l	5	6	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	3	14,1	2,5	-3,0	-1,7	5,3	8,8
	r	5	6	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	8	13,1	2,1	-2,3	-0,9	5,6	7,5
114	l	5	6	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	5	13,8	1,9	-2,4	-1,1	5,8	8,0
	r	5	6	Oszi	39	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	5	13,2	1,8	-2,2	-0,9	5,7	7,5
115	l	5	4	Oszi	39	groß	1/3	trocken	93,0	73,9	9	12,2	1,7	-1,5	-0,1	6,0	6,2
	r	5	4	Oszi	39	groß	1/3	trocken	93,0	73,9	9	12,3	2,3	-3,3	-2,0	4,2	8,1
116	l	5	4	Oszi	39	groß	1/3	trocken	93,0	73,9	9	14,6	1,9	-1,6	-0,3	7,0	7,6
	r	5	4	Oszi	39	groß	1/3	trocken	93,0	73,9	5	9,2	2,3	-4,5	-3,2	1,4	7,8
117	l	5	4	Oszi	20	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	8	11,0	1,9	-2,1	-0,8	4,8	6,3
	r	5	4	Oszi	20	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	10	13,0	1,8	-3,1	-1,8	4,8	8,3
118	l	5	4	Oszi	20	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	6	11,1	1,6	-2,9	-1,6	4,0	7,1
	r	5	4	Oszi	20	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	9	13,3	1,9	-2,7	-1,4	5,3	8,0
119	l	5	4	Oszi	50	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	7	13,3	1,5	-2,8	-1,5	5,2	8,1
	r	5	4	Oszi	50	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	8	13,1	1,8	-1,6	-0,3	6,3	6,8
120	l	5	4	Oszi	50	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	9	13,8	1,7	-3,9	-2,6	4,3	9,5
	r	5	4	Oszi	50	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	6	14,2	1,6	-0,9	0,4	7,5	6,7
121	l	5	4	Oszi	70	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	8	14,0	1,4	-5,0	-3,7	3,3	10,7
	r	5	4	Oszi	70	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	6	13,1	2,3	-1,6	-0,2	6,3	6,8
122	l	5	4	Oszi	70	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	7	13,4	1,3	-5,1	-3,7	3,0	10,4
	r	5	4	Oszi	70	klein	1/3	trocken	93,0	73,9	5	12,1	2,2	-0,7	0,6	6,7	5,4
123	l	5	4	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	7	13,4	1,3	-5,1	-3,7	3,0	10,4
	r	5	4	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	6	11,3	2,2	-0,3	1,0	6,7	4,6
124	l	5	4	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	10,6	1,5	-2,3	-1,0	4,4	6,3
	r	5	4	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	13,3	2,0	-2,4	-1,0	5,6	7,7
125	l	5	2	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	9,1	1,3	-1,1	0,2	4,7	4,4
	r	5	2	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	7	11,3	1,6	-4,4	-3,1	2,6	8,7
126	l	5	2	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	9	9,8	1,2	0,6	1,9	6,9	3,0
	r	5	2	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	7	12,3	1,5	-4,5	-3,2	3,0	9,3
127	l	5	6	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	7	11,7	2,0	-3,0	-1,7	4,2	7,5
	r	5	6	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	6	13,6	2,3	-5,9	-4,6	2,2	11,4
128	l	5	6	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	9	10,6	2,0	-0,9	0,4	5,7	4,9
	r	5	6	Vibro	50	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	14,0	2,3	-3,8	-2,4	4,5	9,4
129	l	5	4	Vibro	20	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	10	9,4	1,7	-2,8	-1,5	3,2	6,2
	r	5	4	Vibro	20	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	13,8	1,9	-3,4	-2,1	4,8	9,0
130	l	5	4	Vibro	20	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	9,7	1,8	-2,0	-0,6	4,2	5,5
	r	5	4	Vibro	20	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	12,8	2,0	-3,1	-1,7	4,7	8,1
131	l	5	4	Vibro	40	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	9,5	1,5	-1,2	0,2	4,9	4,6
	r	5	4	Vibro	40	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	7	14,2	2,1	-3,4	-2,0	5,1	9,1
132	l	5	4	Vibro	40	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	10,6	1,6	-1,5	-0,1	5,2	5,5
	r	5	4	Vibro	40	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	13,9	1,8	-3,7	-2,4	4,6	9,4
133	l	5	4	Vibro	60	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	9	12,2	1,9	-1,6	-0,3	5,8	6,4
	r	5	4	Vibro	60	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	7	13,9	2,0	-3,5	-2,2	4,7	9,1
134	l	5	4	Vibro	60	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	9	11,8	1,4	-1,3	0,1	5,9	5,8
	r	5	4	Vibro	60	klein	1/3	trocken	91,9	73,0	8	13,7	1,8	-4,0	-2,7	4,2	9,5
135	l	5	4	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	8	12,4	1,7	-1,8	-0,4	5,8	6,6
	r	5	4	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	6	14,7	2,4	-3,2	-1,9	5,4	9,2
136	l	5	4	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	6	13,4	1,7	-1,5	-0,2	6,6	6,9
	r	5	4	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	8	14,7	2,1	-3,1	-1,8	5,6	9,1
137	l	5	2	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	1	11,0	1,7	2,9	4,2	9,7	1,3
	r	5	2	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	1	1,7	1,6	3,2	4,6	5,4	-3,7
138	l	5	2	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	1	12,1	1,6	-1,9	-0,5	5,5	6,6
	r	5	2	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	1	11,6	1,9	-1,1	0,2	6,0	5,6
139	l	5	6	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	7	14,4	2,0	-1,5	-0,2	7,0	7,4
	r	5	6	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	5	14,9	2,1	-2,8	-1,5	6,0	9,0
140	l	5	6	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	6	15,4	1,9	-2,2	-0,8	6,8	8,5
	r	5	6	Vibro	40	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	5	14,5	2,5	-2,4	-1,0	6,2	8,3

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-2: Auswertung der Vorwärtsfahrt

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	Anregung	Frequenz	Amplit. groß/klein	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	VORWÄRTSFAHRT						
											"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung [cm]	Positionen- rad [cm]	Asymmetrie [cm]	Asymmetrie (bereinigt) [cm]	Anteil Bug [cm]	Anteil Heck [cm]
141	l	5	4	Vibro	30	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	7	10,0	1,9	-4,1	-2,8	2,2	7,8
	r	5	4	Vibro	30	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	5	12,8	1,6	-1,8	-0,5	5,9	6,9
142	l	5	4	Vibro	30	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	8	12,2	1,8	-3,2	-1,8	4,2	7,9
	r	5	4	Vibro	30	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	8	13,1	1,7	-2,2	-0,9	5,6	7,5
143	l	5	4	Vibro	45	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	8	13,6	1,7	-2,6	-1,3	5,5	8,1
	r	5	4	Vibro	45	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	8	15,3	2,1	-2,0	-0,7	7,0	8,3
144	l	5	4	Vibro	45	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	7	13,5	1,5	-0,9	0,5	7,2	6,3
	r	5	4	Vibro	45	groß	1/3	trocken	91,9	73,0	6	15,1	2,0	-2,9	-1,6	5,9	9,2
145	l	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	92,0	73,1	8	13,1	1,5	-2,5	-1,2	5,3	7,8
	r	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	92,0	73,1	6	13,4	2,0	-2,1	-0,8	5,9	7,5
146	l	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	92,0	73,1							
	r	5	4	Oszi	39	klein	1/3	trocken	92,0	73,1	6	13,2	2,1	-2,0	-0,7	6,0	7,3
147	l	5	4	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1	9	12,4	1,9	-2,8	-1,5	4,7	7,6
	r	5	4	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1	9	15,4	1,7	-2,2	-0,9	6,8	8,6
148	l	5	4	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1	7	12,2	1,6	-2,7	-1,4	4,7	7,5
	r	5	4	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1	8	12,3	2,1	-1,9	-0,6	5,5	6,7
149	l	5	4	Oszi	20	klein	1/3	nass	92,0	73,1	7	12,8	1,9	-2,3	-1,0	5,4	7,4
	r	5	4	Oszi	20	klein	1/3	nass	92,0	73,1	6	16,8	2,3	-3,4	-2,1	6,3	10,5
150	l	5	4	Oszi	20	klein	1/3	nass	92,0	73,1	7	12,0	1,8	-1,8	-0,5	5,5	6,5
	r	5	4	Oszi	20	klein	1/3	nass	92,0	73,1	5	15,0	1,7	-2,3	-1,0	6,5	8,5
151	l	5	4	Oszi	50	klein	1/3	nass	92,0	73,1	8	11,3	2,1	-1,6	-0,2	5,4	5,9
	r	5	4	Oszi	50	klein	1/3	nass	92,0	73,1	7	12,6	2,0	0,8	2,1	8,4	4,2
152	l	5	4	Oszi	50	klein	1/3	nass	92,0	73,1							
	r	5	4	Oszi	50	klein	1/3	nass	92,0	73,1	7	14,9	2,0	-0,1	1,3	8,7	6,2
153	l	5	4	Oszi	70	klein	1/3	nass	92,0	73,1	10	10,7	1,9	-2,4	-1,1	4,3	6,4
	r	5	4	Oszi	70	klein	1/3	nass	92,0	73,1	5	12,3	1,9	-1,8	-0,5	5,7	6,6
154	l	5	4	Oszi	70	klein	1/3	nass	92,0	73,1	5	12,2	2,2	-4,5	-3,2	3,0	9,3
	r	5	4	Oszi	70	klein	1/3	nass	92,0	73,1	6	12,4	1,9	-0,3	1,1	7,3	5,1
155	l	5	2	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1	7	10,5	1,7	-0,6	0,7	6,0	4,5
	r	5	2	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1	6	11,1	1,7	-2,7	-1,3	4,2	6,9
156	l	5	2	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1							
	r	5	2	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1	5	9,0	1,6	1,4	2,7	7,3	1,8
157	l	5	6	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1	3	12,6	1,9	-4,2	-2,9	3,4	9,2
	r	5	6	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1	4	12,4	1,7	-2,5	-1,2	5,0	7,4
158	l	5	6	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1							
	r	5	6	Oszi	39	klein	1/3	nass	92,0	73,1	2	12,6	2,0	-4,0	-2,7	3,6	9,0
159	l	6	4	Oszi+Vibro	39	klein	1/10	trocken	15,2	12,1							
	r	6	4	Oszi+Vibro	39	klein	1/10	trocken	15,2	12,1	8	21,1	1,7	-0,2	1,2	11,7	9,4
160	l	6	4	Oszi+Vibro	39	klein	1/10	trocken	11,0	8,7							
	r	6	4	Oszi+Vibro	39	klein	1/10	trocken	11,0	8,7							
161	l	6	4	Oszi	39	klein	1/10	trocken	5,0	4,0							
	r	6	4	Oszi	39	klein	1/10	trocken	5,0	4,0							
162	l	6	4	Oszi	39	klein	1/10	trocken	4,9	3,9	14	32,7	1,7	-0,5	0,8	17,1	15,6
	r	6	4	Oszi	39	klein	1/10	trocken	4,9	3,9	13	28,4	1,8	0,1	1,4	15,6	12,7
163	l	6	2	Oszi	39	klein	1/10	trocken	5,7	4,5	12	33,0	1,7	-0,9	0,4	16,9	16,1
	r	6	2	Oszi	39	klein	1/10	trocken	5,7	4,5	12	27,1	1,5	0,4	1,7	15,3	11,8
164	l	6	2	Oszi	39	klein	1/10	trocken	6,4	5,1							
	r	6	2	Oszi	39	klein	1/10	trocken	6,4	5,1	10	27,1	1,6	0,4	1,7	15,3	11,8
165	l	6	6	Oszi	39	klein	1/10	trocken	5,2	4,1							
	r	6	6	Oszi	39	klein	1/10	trocken	5,2	4,1							
166	l	6	6	Oszi	39	klein	1/10	trocken	4,0	3,2	7	41,4	1,5	-1,4	-0,1	20,6	20,8
	r	6	6	Oszi	39	klein	1/10	trocken	4,0	3,2	6	33,7	2,1	-0,1	1,2	18,1	15,6
167	l	6	4	Oszi	39	groß	1/10	trocken	4,5	3,5							
	r	6	4	Oszi	39	groß	1/10	trocken	4,5	3,5							
168	l	6	4	Oszi	39	groß	1/10	trocken	4,9	3,9	14	34,9	1,5	-0,5	0,8	18,3	16,6
	r	6	4	Oszi	39	groß	1/10	trocken	4,9	3,9	14	31,3	1,7	0,3	1,6	17,3	14,1
169	l	6	4	Oszi	20	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	13	32,6	1,5	-0,3	1,0	17,3	15,3
	r	6	4	Oszi	20	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	11	28,2	1,5	-0,7	0,6	14,7	13,5
170	l	6	4	Oszi	20	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	12	36,7	1,8	-0,4	1,0	19,3	17,4
	r	6	4	Oszi	20	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	13	30,5	1,7	0,2	1,5	16,7	13,7
171	l	6	4	Oszi	50	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	9	38,9	1,7	-2,2	-0,9	18,5	20,3
	r	6	4	Oszi	50	klein	1/10	trocken	4,5	3,6							
172	l	6	4	Oszi	50	klein	1/10	trocken	4,5	3,6							
	r	6	4	Oszi	50	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	11	37,8	2,0	-0,5	0,8	19,7	18,1
173	l	6	4	Oszi	70	klein	1/10	trocken	4,5	3,6							
	r	6	4	Oszi	70	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	12	37,6	1,7	-1,2	0,1	18,9	18,7
174	l	6	4	Oszi	70	klein	1/10	trocken	3,6	2,9							
	r	6	4	Oszi	70	klein	1/10	trocken	3,6	2,9							
175	l	7	4	statisch			1/10	trocken	5,2	4,1							
	r	7	4	statisch			1/10	trocken	5,2	4,1							

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-2: Auswertung der Vorwärtsfahrt

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	Anregung	Frequenz	Amplit. groß/klein	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	VORWÄRTSFAHRT						
											"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung [cm]	Positions- rad [cm]	Asymmetrie [cm]	Asymmetrie (bereinigt) [cm]	Anteil Bug [cm]	Anteil Heck [cm]
176	r	7	4	Vibro	50	klein	1/10	trocken	4,5	3,6							
177	r	7	4	Vibro	50	klein	1/10	trocken	4,5	3,6							
178	r	7	4	Vibro	50	klein	1/10	trocken	4,5	3,6							
179	r	7	4	Vibro	50	klein	1/10	trocken	4,5	3,6							
180	r	7	4	Vibro	20	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	7	28,2	1,8	-2,3	-1,0	13,1	15,1
181	r	7	4	Vibro	20	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	8	31,2	1,8	-2,3	-1,0	14,6	16,6
182	r	7	4	Vibro	40	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	9	30,4	1,4	-1,7	-0,4	14,8	15,6
183	r	7	4	Vibro	40	klein	1/10	trocken	4,5	3,6	13	30,5	1,6	-1,9	-0,6	14,7	15,9
184	r	7	4	Vibro	60	klein	1/10	trocken	4,0	3,2	12	29,7	1,4	-2,1	-0,8	14,0	15,7
185	r	7	4	Vibro	40	groß	1/10	trocken	3,6	2,9	5	34,6	2,0	-2,8	-1,4	15,9	18,8

Auswertung der Rückwärtsfahrt:

Alle Rückwärtsfahrten wurden statisch durchgeführt!

Tabelle 5-3: Auswertung der Rückwärtsfahrt

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT						
								"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung [cm]	Positions- rad [cm]	Asymmetrie [cm]	Asymmetrie (bereinigt) [cm]	Anteil Bug [cm]	Anteil Heck [cm]
001	l	4	4	voll	trocken	38,3	30,4	3	15,2	1,4	2,5	1,2	8,8	6,5
002	l	4	4	voll	trocken	38,3	30,4	2	9,6	3,1	4,9	3,6	8,4	1,2
003	l	4	4	voll	trocken	31,5	25,0	5	16,9	1,7	0,6	-0,7	7,7	9,1
004	l	4	4	voll	trocken	31,5	25,0	3	8,5	1,7	4,0	2,7	6,9	1,6
005	l	4	4	voll	trocken	31,9	25,3	4	16,2	1,5	0,9	-0,5	7,6	8,6
006	l	4	4	voll	trocken	31,9	25,3	2	15,0	2,0	0,6	-0,7	6,8	8,3
007	l	4	4	voll	trocken	35,1	27,9	4	14,6	2,0	2,6	1,2	8,5	6,0
008	l	4	4	voll	trocken	35,1	27,9	3	12,6	1,5	2,6	1,3	7,6	5,0
009	l	4	4	voll	trocken	34,9	27,7	5	16,8	2,1	0,6	-0,8	7,6	9,2
010	l	4	4	voll	trocken	34,9	27,7	3	15,5	1,8	2,5	1,2	8,9	6,6
011	l	4	4	voll	trocken	34,4	27,3	5	17,6	1,9	0,3	-1,0	7,8	9,7
012	l	4	4	voll	trocken	34,4	27,3	3	14,2	1,3	3,1	1,7	8,9	5,4
013	l	4	4	voll	trocken	35,3	28,0	2	17,0	1,9	2,2	0,9	9,4	7,6
014	l	4	4	voll	trocken	35,3	28,0	4	14,9	1,5	3,1	1,8	9,2	5,7
015	l	2	4	voll	trocken	30,3	24,1	1	25,6	1,7	3,7	2,4	15,2	10,4
016	l	2	4	voll	trocken	30,3	24,1	1	17,7	1,7	4,7	3,4	12,3	5,4
017	l	2	4	voll	trocken	28,7	22,8	2	21,4	1,7	3,2	1,9	12,6	8,8
018	l	2	4	voll	trocken	28,7	22,8	2	19,5	1,9	-0,6	-1,9	7,9	11,6
019	l	2	4	voll	trocken	29,3	23,3	2	18,3	1,8	3,2	1,8	11,0	7,3
020	l	2	4	voll	trocken	29,3	23,3	2	17,0	1,7	3,2	1,9	10,3	6,6
021	l	2	4	voll	trocken	34,7	27,6	2	21,0	1,9	1,7	0,4	10,9	10,1
022	l	2	4	voll	trocken	34,7	27,6	3	20,2	1,5	3,9	2,6	12,7	7,5
023	l	2	4	voll	trocken	29,7	23,6	3	17,0	2,1	0,9	-0,4	8,1	9,0
024	l	2	4	voll	trocken	29,7	23,6	2	21,0	1,9	5,4	4,1	14,6	6,4
025	l	2	4	voll	trocken	34,5	27,4	2	18,7	1,5	1,2	-0,2	9,2	9,5
026	l	2	4	voll	trocken	34,5	27,4	4	17,2	1,6	4,4	3,1	11,7	5,5
027	l	2	4	voll	trocken	32,8	26,0	2	20,0	1,7	3,6	2,3	12,3	7,7
028	l	2	4	voll	trocken	32,8	26,0	5	17,3	1,7	1,3	0,0	8,6	8,7
029	l	2	4	voll	trocken	32,7	26,0	2	18,7	1,9	0,7	-0,7	8,7	10,0
030	l	2	4	voll	trocken	32,7	26,0	4	17,7	1,7	2,4	1,1	10,0	7,7

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-3: Auswertung der Rückwärtsfahrt

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT							
								"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung [cm]	Positions- rad [cm]	Asymmetrie [cm]	Asymmetrie (bereinigt) [cm]	Anteil Bug [cm]	Anteil Heck [cm]	
			[km/h]			[MN/m2]	[MN/m2]								
016	l	2	4	voll	trocken	36,5	29,0	3	18,6	2,1	-1,7	-3,0	6,3	12,3	
	r	2	4	voll	trocken	36,5	29,0	2	17,0	2,1	4,1	2,7	11,3	5,8	
017	l	2	4	voll	trocken	33,8	26,8	2	18,7	2,2	14,9	13,5	22,9	-4,2	
	r	2	4	voll	trocken	33,8	26,8	2	18,0	1,8	3,6	2,3	11,3	6,7	
018	l	2	4	voll	trocken	32,9	26,1	4	19,2	1,8	2,0	0,7	10,3	8,9	
	r	2	4	voll	trocken	32,9	26,1	2	18,5	1,7	-0,4	-1,7	7,5	10,9	
019	l	2	2	voll	trocken	37,2	29,5	2	15,8	1,8	2,7	1,3	9,3	6,6	
	r	2	2	voll	trocken	37,2	29,5	6	16,2	2,1	4,4	3,1	11,2	5,0	
020	l	2	2	voll	trocken	34,6	27,5	3	17,5	1,8	-0,4	-1,7	7,1	10,5	
	r	2	2	voll	trocken	34,6	27,5	3	14,8	1,7	2,6	1,3	8,7	6,1	
021	l	2	6	voll	trocken	36,5	29,0	3	21,5	1,7	1,8	0,5	11,3	10,2	
	r	2	6	voll	trocken	36,5	29,0	3	20,5	2,3	2,3	1,0	11,2	9,3	
022	l	2	6	voll	trocken	41,7	33,1								
	r	2	6	voll	trocken	41,7	33,1								
									Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						
023	l	2	2-6	voll	trocken	40,8	32,4								
	r	2	2-6	voll	trocken	40,8	32,4								
024	l	2	2-6	voll	trocken	39,6	31,4								
	r	2	2-6	voll	trocken	39,6	31,4								
025	l	2	4	voll	trocken	42,3	33,6	2	22,2	1,6	3,3	2,0	13,1	9,2	
	r	2	4	voll	trocken	42,3	33,6	3	18,5	1,3	1,7	0,3	9,6	8,9	
026	l	2	4	voll	trocken	38,0	30,2	3	23,5	1,8	0,7	-0,6	11,1	12,4	
	r	2	4	voll	trocken	38,0	30,2	3	22,6	1,2	2,8	1,4	12,7	9,9	
027	l	2	4	voll	trocken	50,0	39,7	4	19,0	1,8	1,1	-0,2	9,3	9,8	
	r	2	4	voll	trocken	50,0	39,7	1	18,1	1,6	4,7	3,4	12,4	5,7	
028	l	2	4	voll	trocken	41,5	33,0	2	21,2	1,6	-0,7	-2,1	8,5	12,6	
	r	2	4	voll	trocken	41,5	33,0	3	20,4	1,9	1,6	0,3	10,5	9,9	
029	l	2	4	voll	trocken	42,4	33,7	2	18,3	1,6	4,2	2,9	12,0	6,3	
	r	2	4	voll	trocken	42,4	33,7	2	20,3	2,9	3,8	2,4	12,6	7,7	
030	l	2	4	voll	trocken	42,5	33,8	6	20,1	1,5	1,4	0,0	10,1	10,0	
	r	2	4	voll	trocken	42,5	33,8	1	12,5	3,1	5,3	3,9	10,2	2,3	
031	l	2	4	voll	trocken	38,1	30,3	3	22,0	1,8	3,3	2,0	13,0	9,0	
	r	2	4	voll	trocken	38,1	30,3	4	20,3	3,3	1,1	-0,2	10,0	10,4	
032	l	2	4	voll	trocken	44,6	35,4	5	20,7	2,0	-0,2	-1,5	8,8	11,9	
	r	2	4	voll	trocken	44,6	35,4	3	19,9	2,5	1,7	0,4	10,3	9,6	
033	l	2	2	voll	trocken	46,2	36,7	5	15,5	1,8	6,5	5,2	12,9	2,6	
	r	2	2	voll	trocken	46,2	36,7	5	16,0	3,0	1,6	0,3	8,3	7,7	
034	l	2	2	voll	trocken	45,6	36,2	5	16,2	2,0	3,7	2,4	10,5	5,7	
	r	2	2	voll	trocken	45,6	36,2	4	11,7	2,1	3,9	2,6	8,5	3,3	
035	l	2	6	voll	trocken	48,7	38,7								
	r	2	6	voll	trocken	48,7	38,7								
									Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						
036	l	2	6	voll	trocken	43,3	34,4								
	r	2	6	voll	trocken	43,3	34,4								
									Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						
037	l	2	2-6	voll	trocken	44,8	35,6								
	r	2	2-6	voll	trocken	44,8	35,6								
038	l	2	2-6	voll	trocken	49,5	39,3								
	r	2	2-6	voll	trocken	49,5	39,3								
039	l	2	4	voll	trocken	48,8	38,8	3	21,5	2,1	3,0	1,7	12,4	9,0	
	r	2	4	voll	trocken	48,8	38,8	3	20,1	2,5	3,3	2,0	12,1	8,0	
040	l	2	4	voll	trocken	52,4	41,6	5	21,6	1,9	2,2	0,9	11,7	9,9	
	r	2	4	voll	trocken	52,4	41,6	3	21,1	3,5	2,7	1,3	11,9	9,2	
041	l	2	4	voll	trocken	52,2	41,5	4	20,8	1,5	2,7	1,4	11,8	9,0	
	r	2	4	voll	trocken	52,2	41,5	0	20,0	2,7					
042	l	2	4	voll	trocken	39,8	31,6	5	20,7	1,8	1,9	0,6	10,9	9,7	
	r	2	4	voll	trocken	39,8	31,6	3	20,4	3,4	3,9	2,6	12,8	7,6	
043	l	2	4	voll	trocken	39,8	31,6	5	20,2	1,5	2,5	1,2	11,3	8,9	
	r	2	4	voll	trocken	39,8	31,6	2	20,1	3,3	3,7	2,4	12,4	7,7	
044	l	2	4	voll	trocken	48,7	38,7	4	19,8	1,5	6,7	5,4	15,3	4,5	
	r	2	4	voll	trocken	48,7	38,7	4	19,0	3,5	0,5	-0,8	8,6	10,3	
045	l	2	4	voll	trocken	50,2	39,9	4	19,3	1,8	0,7	-0,6	9,1	10,2	
	r	2	4	voll	trocken	50,2	39,9	4	20,0	3,6	4,5	3,1	13,1	6,8	
046	l	2	4	voll	trocken	47,5	37,7	4	17,8	1,7	3,2	1,9	10,8	7,0	
	r	2	4	voll	trocken	47,5	37,7	3	19,7	3,4	1,6	0,3	10,1	9,6	
047	l	2	4	voll	trocken	43,3	34,4	3	19,6	1,9	-0,8	-2,1	7,6	11,9	
	r	2	4	voll	trocken	43,3	34,4	3	17,8	1,9	1,0	-0,3	8,6	9,2	
048	l	2	4	voll	trocken	37,4	29,7	2	18,5	1,7	-5,5	-6,8	2,4	16,1	
	r	2	4	voll	trocken	37,4	29,7	4	19,8	2,5	4,4	3,1	13,0	6,8	
049	l	2	4	voll	trocken	58,9	46,8								
	r	2	4	voll	trocken	58,9	46,8	3	21,1	2,8	2,3	1,0	11,6	9,6	
050	l	2	4	voll	trocken	57,3	45,5								
	r	2	4	voll	trocken	57,3	45,5	1	20,8	4,0	0,2	-1,1	9,3	11,5	



5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-3: Auswertung der Rückwärtsfahrt

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT							
								"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung [cm]	Positions- rad [cm]	Asymmetrie [cm]	Asymmetrie (bereinigt) [cm]	Anteil Bug [cm]	Anteil Heck [cm]	
			[km/h]			[MN/m2]	[MN/m2]								
051	r	2	4	voll	trocken	53,3	42,3								
	r	2	4	voll	trocken	53,3	42,3	5	20,4	2,8	0,6	-0,7	9,5	10,9	
052	r	2	4	voll	trocken	53,6	42,6								
	r	2	4	voll	trocken	53,6	42,6	0	26,3						
053	r	2	2	voll	trocken	52,2	41,5								
	r	2	2	voll	trocken	52,2	41,5	2	17,4	3,1	5,8	4,5	13,2	4,2	
054	r	2	2	voll	trocken	57,0	45,3								
	r	2	2	voll	trocken	57,0	45,3	6	18,7	3,1	4,9	3,6	12,9	5,8	
055	r	2	6	voll	trocken	51,0	40,5								
	r	2	6	voll	trocken	51,0	40,5		Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						
056	r	2	6	voll	trocken	51,0	40,5								
	r	2	6	voll	trocken	51,0	40,5		Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						
057	r	2	4	voll	trocken	54,2	43,0								
	r	2	4	voll	trocken	54,2	43,0								
058	r	2	4	voll	trocken	52,8	41,9								
	r	2	4	voll	trocken	52,8	41,9								
059	r	2	4	voll	trocken	50,0	39,7								
	r	2	4	voll	trocken	50,0	39,7								
060	r	2	4	voll	trocken	51,5	40,9								
	r	2	4	voll	trocken	51,5	40,9								
061	r	2	4	voll	trocken	50,8	40,3								
	r	2	4	voll	trocken	50,8	40,3	5	19,8	1,5	2,0	0,6	10,5	9,2	
062	r	2	4	voll	trocken	49,1	39,0								
	r	2	4	voll	trocken	49,1	39,0	3	18,7	1,6	3,8	2,5	11,8	6,8	
063	r	3	4	voll	trocken	40,0	31,8								
	r	3	4	voll	trocken	40,0	31,8	4	22,2	1,5	4,2	2,8	14,0	8,3	
064	r	3	4	voll	trocken	40,8	32,4								
	r	3	4	voll	trocken	40,8	32,4	5	20,6	1,7	2,4	1,1	11,4	9,2	
065	r	3	4	voll	trocken	46,2	36,7								
	r	3	4	voll	trocken	46,2	36,7	4	19,6	1,5	3,4	2,0	11,8	7,8	
066	r	3	4	voll	trocken	44,5	35,3								
	r	3	4	voll	trocken	44,5	35,3	3	19,2	1,5	-1,4	-2,7	6,9	12,3	
067	r	3	2	voll	trocken	42,5	33,8								
	r	3	2	voll	trocken	42,5	33,8	4	17,5	1,4	-0,1	-1,4	7,4	10,2	
068	r	3	2	voll	trocken	51,6	41,0								
	r	3	2	voll	trocken	51,6	41,0	5	18,4	1,5	3,8	2,4	11,6	6,8	
069	r	3	6	voll	trocken	44,2	35,1								
	r	3	6	voll	trocken	44,2	35,1		Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						
070	r	3	6	voll	trocken	43,9	34,9								
	r	3	6	voll	trocken	43,9	34,9		Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						
071	r	3	4	voll	trocken	51,4	40,8								
	r	3	4	voll	trocken	51,4	40,8	5	18,4	1,6	2,7	1,4	10,6	7,9	
072	r	3	4	voll	trocken	47,7	37,9								
	r	3	4	voll	trocken	47,7	37,9	4	23,8	1,9	-1,9	-3,2	8,7	15,1	
	r	3	4	voll	trocken	47,7	37,9	4	20,0	2,1	2,3	1,0	11,0	9,0	
073	r	3	4	voll	trocken	46,0	36,5								
	r	3	4	voll	trocken	46,0	36,5	5	18,8	1,7	0,5	-0,8	8,5	10,2	
074	r	3	4	voll	trocken	49,6	39,4								
	r	3	4	voll	trocken	49,6	39,4	5	18,3	1,4	2,6	1,3	10,4	7,9	
075	r	3	4	voll	trocken	48,1	38,2								
	r	3	4	voll	trocken	48,1	38,2	5	21,1	1,6	3,3	2,0	12,5	8,5	
076	r	3	4	voll	trocken	51,0	40,5								
	r	3	4	voll	trocken	51,0	40,5	0	19,4	3,7					
	r	3	4	voll	trocken	51,0	40,5	4	19,1	1,7	0,5	-0,8	8,8	10,4	
077	r	3	4	voll	trocken	49,9	39,6								
	r	3	4	voll	trocken	49,9	39,6	3	17,5	1,7	0,1	-1,2	7,5	9,9	
078	r	3	4	voll	trocken	47,7	37,9								
	r	3	4	voll	trocken	47,7	37,9	4	19,6	1,4	-0,2	-1,5	8,3	11,3	
079	r	3	4	voll	trocken	54,3	43,1								
	r	3	4	voll	trocken	54,3	43,1	3	18,9	1,5	-0,9	-2,2	7,3	11,7	
080	r	3	4	voll	trocken	49,3	39,2								
	r	3	4	voll	trocken	49,3	39,2	5	19,1	1,6	2,0	0,6	10,2	8,9	
081	r	3	4	voll	trocken	52,7	41,9								
	r	3	4	voll	trocken	52,7	41,9	3	18,5	1,6	1,9	0,6	9,8	8,7	
	r	3	4	voll	trocken	52,7	41,9	5	18,3	1,6	3,2	1,9	11,1	7,3	
082	r	3	4	voll	trocken	54,7	43,4								
	r	3	4	voll	trocken	54,7	43,4	1	18,9	2,1	0,4	-0,9	8,6	10,3	
083	r	3	4	voll	trocken	57,7	45,8								
	r	3	4	voll	trocken	57,7	45,8	4	18,0	1,3	1,0	-0,3	8,6	9,3	
084	r	3	4	voll	trocken	48,9	38,8								
	r	3	4	voll	trocken	48,9	38,8	3	17,5	1,7	0,5	-0,8	7,9	9,6	
085	r	1	4	voll	trocken	32,7	26,0								
	r	1	4	voll	trocken	32,7	26,0	3	18,7	1,1	0,9	-0,4	8,9	9,7	

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-3: Auswertung der Rückwärtsfahrt

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT							
								"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung [cm]	Positions- rad [cm]	Asymmetrie [cm]	Asymmetrie (bereinigt) [cm]	Anteil Bug [cm]	Anteil Heck [cm]	
			[km/h]			[MN/m2]	[MN/m2]								
086	l	1	4	voll	trocken	34,6	27,5								
	r	1	4	voll	trocken	34,6	27,5	3	19,6	1,4	5,2	3,9	13,7	5,9	
087	l	1	4	voll	trocken	27,7	22,0								
	r	1	4	voll	trocken	27,7	22,0	3	19,7	1,5	4,3	3,0	12,9	6,9	
088	l	1	4	voll	trocken	27,7	22,0								
	r	1	4	voll	trocken	27,7	22,0	5	20,0	1,7	3,8	2,5	12,5	7,5	
089	l	1	4	voll	trocken	39,3	31,2								
	r	1	4	voll	trocken	39,3	31,2	4	19,5	1,4	2,3	1,0	10,7	8,8	
090	l	1	4	voll	trocken	32,0	25,4								
	r	1	4	voll	trocken	32,0	25,4	1	25,2	1,1	3,0	1,7	14,3	10,9	
091	l	1	4	voll	trocken	36,5	29,0								
	r	1	4	voll	trocken	36,5	29,0	2	20,6	2,4	3,6	2,3	12,5	8,0	
092	l	4	4	voll	trocken	34,5	27,4								
	r	4	4	voll	trocken	34,5	27,4	2	23,0	1,4	-0,5	-1,8	9,7	13,3	
093	l	4	4	voll	trocken	40,0	31,8								
	r	4	4	voll	trocken	40,0	31,8	3	20,6	1,6	1,3	0,0	10,3	10,3	
094	l	4	4	leer	trocken	38,7	30,7								
	r	4	4	leer	trocken	38,7	30,7	3	16,8	1,4	3,0	1,7	10,0	6,7	
095	l	4	4	leer	trocken	40,3	32,0								
	r	4	4	leer	trocken	40,3	32,0	2	17,7	1,0	5,5	4,2	13,1	4,6	
096	l	4	4	leer	trocken	50,2	39,9								
	r	4	4	leer	trocken	50,2	39,9	3	17,0	2,4	4,3	2,9	11,4	5,6	
097	l	4	4	leer	trocken	46,2	36,7								
	r	4	4	leer	trocken	46,2	36,7	4	16,9	1,4	1,7	0,4	8,9	8,0	
098	l	4	4	voll	trocken	48,3	38,4								
	r	4	4	voll	trocken	48,3	38,4	1	20,1	1,8	3,3	1,9	12,0	8,1	
099	l	4	4	voll	trocken	40,5	32,2								
	r	4	4	voll	trocken	40,5	32,2	2	27,5	1,6	3,2	1,9	15,7	11,9	
100	l	4	4	voll	nass	45,9	36,5								
	r	4	4	voll	nass	45,9	36,5	4	24,4	1,9	0,4	-0,9	11,2	13,1	
101	l	4	4	voll	nass	38,8	30,8								
	r	4	4	voll	nass	38,8	30,8	3	15,3	4,2	2,2	0,9	8,5	6,7	
102	l	4	4	voll	nass	39,4	31,3								
	r	4	4	voll	nass	39,4	31,3	3	18,8	1,7	-2,2	-3,5	5,9	13,0	
103	l	4	4	leer	nass	51,0	40,5								
	r	4	4	leer	nass	51,0	40,5	5	17,8	1,4	0,5	-0,8	8,1	9,7	
104	l	4	4	leer	nass	44,5	35,3								
	r	4	4	leer	nass	44,5	35,3	1	19,6	3,7	1,3	0,0	9,8	9,8	
105	l	4	4	leer	nass	43,7	34,7								
	r	4	4	leer	nass	43,7	34,7	4	25,5	2,7	-1,4	-2,7	10,0	15,4	
106	l	4	4	leer	nass	43,5	34,5								
	r	4	4	leer	nass	43,5	34,5	3	17,5	1,2	4,2	2,9	11,6	5,9	
107	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	2	26,3	1,3	-1,0	-2,3	10,8	15,5	
108	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	1	18,1	2,1	5,0	3,7	12,7	5,4	
109	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	4	14,9	1,8	3,0	1,7	9,2	5,7	
110	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	4	25,6	2,2	-1,1	-2,5	10,3	15,3	
111	l	5	2	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	2	1/3	trocken	93,0	73,9	3	16,8	3,3	5,5	4,2	12,6	4,2	
112	l	5	6	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	6	1/3	trocken	93,0	73,9	4	9,4	2,4	1,2	-0,1	4,6	4,8	
113	l	5	6	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	6	1/3	trocken	93,0	73,9	1	7,3	2,1	0,2	-1,1	2,5	4,8	
114	l	5	2	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	2	1/3	trocken	93,0	73,9	2	9,6	2,3	0,5	-0,8	4,0	5,6	
115	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	5	9,4	2,1	0,2	-1,1	3,6	5,8	
116	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	4	10,9	1,8	0,1	-1,2	4,2	6,6	
117	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	2	11,3	2,2	0,7	-0,6	5,0	6,3	
118	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	7	12,6	2,0	0,4	-0,9	5,4	7,2	
119	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	4	11,7	2,0	0,6	-0,7	5,1	6,5	
120	l	5	2	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	2	1/3	trocken	93,0	73,9	5	7,9	1,9	1,4	0,1	4,0	3,9	
121	l	5	6	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	6	1/3	trocken	93,0	73,9	6	7,9	1,7	0,2	-1,1	2,8	5,0	
122	l	5	2	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	2	1/3	trocken	93,0	73,9	5	10,7	1,5	1,9	0,6	5,9	4,8	
123	l	5	6	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	6	1/3	trocken	93,0	73,9	7	7,8	1,6	1,2	-0,1	3,8	4,0	
124	l	5	6	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	6	1/3	trocken	93,0	73,9		Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						
125	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	9	Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						
126	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	5	12,5	1,8	1,4	0,1	6,3	6,1	
127	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	5	9,8	2,0	1,2	-0,2	4,8	5,1	
128	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	6	11,7	1,9	1,7	0,4	6,3	5,4	
129	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	9	11,9	1,9	-0,3	-1,6	4,4	7,6	
130	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	7	11,8	1,9	-0,5	-1,8	4,1	7,7	
131	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	7	13,5	1,4	0,9	-0,4	6,4	7,1	
132	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	5	11,9	1,9	0,9	-0,4	5,6	6,3	
133	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	7	13,5	1,6	-0,6	-1,9	4,8	8,7	
134	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	7	12,8	1,7	-0,8	-2,2	4,2	8,5	
135	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	5	12,4	1,4	1,0	-0,4	5,8	6,6	
136	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	6	13,4	1,8	0,9	-0,4	6,2	7,1	
137	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9								
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	7	13,6	1,4	-1,3	-2,6	4,2	9,4	

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-3: Auswertung der Rückwärtsfahrt

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT							
								"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung [cm]	Positions- rad [cm]	Asymmetrie [cm]	Asymmetrie (bereinigt) [cm]	Anteil Bug [cm]	Anteil Heck [cm]	
			[km/h]			[MN/m2]	[MN/m2]								
121	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	9	13,5	1,5	0,6	-0,7	6,0	7,5	
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	6	13,8	1,7	0,5	-0,8	6,1	7,6	
122	l	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	5	13,1	1,6	0,2	-1,1	5,4	7,7	
	r	5	4	1/3	trocken	93,0	73,9	8	14,2	1,8	-0,4	-1,7	5,4	8,8	
123	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	5	13,1	1,6	0,2	-1,1	5,4	7,7	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	8	12,8	1,8	-0,1	-1,4	4,9	7,8	
124	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	6	11,6	1,7	0,0	-1,3	4,5	7,1	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	7	13,3	1,7	0,8	-0,5	6,2	7,1	
125	l	5	2	1/3	trocken	91,9	73,0	7	9,9	1,4	0,6	-0,7	4,2	5,7	
	r	5	2	1/3	trocken	91,9	73,0	6	10,7	1,3	1,8	0,5	5,8	4,9	
126	l	5	2	1/3	trocken	91,9	73,0	7	9,2	1,2	0,9	-0,5	4,1	5,0	
	r	5	2	1/3	trocken	91,9	73,0	8	10,6	1,4	-1,1	-2,4	2,9	7,7	
127	l	5	6	1/3	trocken	91,9	73,0								
	r	5	6	1/3	trocken	91,9	73,0								
128	l	5	6	1/3	trocken	91,9	73,0								
	r	5	6	1/3	trocken	91,9	73,0								
129	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	7	12,2	1,7	0,2	-1,1	5,0	7,3	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	6	13,2	1,4	-0,5	-1,9	4,7	8,5	
130	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	7	11,7	1,8	0,4	-0,9	4,9	6,7	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	7	13,2	1,5	-0,5	-1,8	4,8	8,4	
131	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	8	11,0	1,5	-0,2	-1,6	4,0	7,1	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	7	14,3	1,9	-0,3	-1,6	5,5	8,8	
132	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	8	11,8	1,8	-0,1	-1,4	4,5	7,3	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	8	14,1	1,6	0,1	-1,3	5,8	8,3	
133	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	7	12,4	1,9	0,6	-0,7	5,5	6,9	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	7	14,3	1,9	1,0	-0,4	6,8	7,5	
134	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	6	11,5	1,4	0,6	-0,7	5,1	6,5	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	8	13,8	1,9	-0,1	-1,5	5,4	8,3	
135	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	7	11,9	1,5	-0,1	-1,5	4,5	7,4	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	7	13,9	1,9	0,8	-0,5	6,4	7,5	
136	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	8	11,0	1,6	-0,5	-1,8	3,7	7,3	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	8	13,9	1,6	-0,3	-1,6	5,3	8,6	
137	l	5	2	1/3	trocken	91,9	73,0	8	7,8	1,4	0,7	-0,6	3,3	4,5	
	r	5	2	1/3	trocken	91,9	73,0	8	6,8	1,4	0,8	-0,5	2,9	3,9	
138	l	5	2	1/3	trocken	91,9	73,0	9	8,8	1,4	1,7	0,3	4,7	4,0	
	r	5	2	1/3	trocken	91,9	73,0	7	11,5	1,5	1,6	0,3	6,1	5,4	
139	l	5	6	1/3	trocken	91,9	73,0								
	r	5	6	1/3	trocken	91,9	73,0								
140	l	5	6	1/3	trocken	91,9	73,0								
	r	5	6	1/3	trocken	91,9	73,0								
141	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	6	12,9	2,1	0,0	-1,3	5,1	7,8	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	9	13,1	1,2	0,3	-1,0	5,5	7,5	
142	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	8	11,2	1,8	0,3	-1,0	4,6	6,7	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	9	12,8	1,3	0,4	-0,9	5,4	7,3	
143	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	9	11,0	1,4	1,0	-0,3	5,2	5,8	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	5	13,7	1,4	-0,1	-1,4	5,4	8,3	
144	l	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	7	11,5	1,2	0,1	-1,2	4,6	7,0	
	r	5	4	1/3	trocken	91,9	73,0	8	13,6	1,6	-0,1	-1,5	5,3	8,2	
145	l	5	4	1/3	trocken	92,0	73,1	9	12,4	1,7	-1,0	-2,3	3,9	8,5	
	r	5	4	1/3	trocken	92,0	73,1	7	13,6	1,3	0,2	-1,1	5,7	7,9	
146	l	5	4	1/3	trocken	92,0	73,1								
	r	5	4	1/3	trocken	92,0	73,1	6	14,1	1,5	1,5	0,2	7,2	6,9	
147	l	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	2	15,5	1,4	0,3	-1,0	6,8	8,7	
	r	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	9	14,6	1,8	-0,4	-1,7	5,6	9,0	
148	l	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	6	12,4	1,2	0,2	-1,1	5,1	7,3	
	r	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	4	13,6	1,4	0,9	-0,4	6,4	7,2	
149	l	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	9	12,1	2,2	0,7	-0,6	5,4	6,7	
	r	5	4	1/3	nass	92,0	73,1								
150	l	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	8	12,2	2,4	0,7	-0,6	5,5	6,7	
	r	5	4	1/3	nass	92,0	73,1								
151	l	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	1	9,2	1,4	1,7	0,4	5,0	4,2	
	r	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	7	12,6	1,9	1,9	0,6	6,9	5,7	
152	l	5	4	1/3	nass	92,0	73,1								
	r	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	6	10,4	1,7	1,8	0,4	5,6	4,8	
153	l	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	3	9,2	1,5	0,2	-1,1	3,4	5,7	
	r	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	2	10,1	1,4	1,7	0,4	5,4	4,6	
154	l	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	2	12,3	1,6	-0,9	-2,2	3,9	8,4	
	r	5	4	1/3	nass	92,0	73,1	4	11,9	1,7	3,2	1,9	7,9	4,0	
155	l	5	2	1/3	nass	92,0	73,1	6	9,9	1,3	2,3	1,0	6,0	3,9	
	r	5	2	1/3	nass	92,0	73,1	5	10,5	2,3	-0,2	-1,5	3,7	6,8	

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-3: Auswertung der Rückwärtsfahrt

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	W.tank voll/leer	nass/ trocken	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT									
								"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung [cm]	Positions- rad [cm]	Asymmetrie [cm]	Asymmetrie (bereinigt) [cm]	Anteil Bug [cm]	Anteil Heck [cm]			
			[km/h]			[MN/m2]	[MN/m2]										
156	l	5	2	1/3	nass	92,0	73,1										
	r	5	2	1/3	nass	92,0	73,1										
157	l	5	6	1/3	nass	92,0	73,1										
	r	5	6	1/3	nass	92,0	73,1										
158	l	5	6	1/3	nass	92,0	73,1										
	r	5	6	1/3	nass	92,0	73,1										
159	l	6	4	1/10	trocken	15,2	12,1										
	r	6	4	1/10	trocken	15,2	12,1	1	25,0	1,3	5,8	4,5	17,0	8,0			
160	l	6	4	1/10	trocken	11,0	8,7										
	r	6	4	1/10	trocken	11,0	8,7										
161	l	6	4	1/10	trocken	5,0	4,0										
	r	6	4	1/10	trocken	5,0	4,0										
162	l	6	4	1/10	trocken	4,9	3,9	10	28,4	1,8	1,9	0,6	14,8	13,6			
	r	6	4	1/10	trocken	4,9	3,9	13	25,2	1,4	2,9	1,6	14,2	11,0			
163	l	6	2	1/10	trocken	5,7	4,5	10	28,5	1,6	0,9	-0,4	13,9	14,6			
	r	6	2	1/10	trocken	5,7	4,5	11	24,5	1,4	2,7	1,4	13,6	10,9			
164	l	6	2	1/10	trocken	6,4	5,1										
	r	6	2	1/10	trocken	6,4	5,1	13	24,6	1,4	3,1	1,8	14,1	10,5			
165	l	6	6	1/10	trocken	5,2	4,1										
	r	6	6	1/10	trocken	5,2	4,1										
166	l	6	6	1/10	trocken	4,0	3,2										
	r	6	6	1/10	trocken	4,0	3,2										
167	l	6	4	1/10	trocken	4,5	3,5										
	r	6	4	1/10	trocken	4,5	3,5										
168	l	6	4	1/10	trocken	4,9	3,9	13	30,0	1,4	3,3	1,9	16,9	13,0			
	r	6	4	1/10	trocken	4,9	3,9	12	28,6	1,5	2,5	1,1	15,4	13,2			
169	l	6	4	1/10	trocken	4,5	3,6	11	30,1	1,4	2,2	0,9	16,0	14,1			
	r	6	4	1/10	trocken	4,5	3,6	14	27,3	1,2	3,3	2,0	15,6	11,7			
170	l	6	4	1/10	trocken	4,5	3,6	11	31,2	1,6	2,9	1,6	17,2	14,0			
	r	6	4	1/10	trocken	4,5	3,6	14	28,4	1,6	1,9	0,6	14,8	13,6			
171	l	6	4	1/10	trocken	4,5	3,6	8	31,8	1,9	3,1	1,7	17,6	14,2			
	r	6	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
172	l	6	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
	r	6	4	1/10	trocken	4,5	3,6	9	33,2	1,8	1,0	-0,3	16,3	16,9			
173	l	6	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
	r	6	4	1/10	trocken	4,5	3,6	12	31,6	1,9	1,6	0,3	16,0	15,5			
174	l	6	4	1/10	trocken	3,6	2,9										
	r	6	4	1/10	trocken	3,6	2,9										
175	l	7	4	1/10	trocken	5,2	4,1										
	r	7	4	1/10	trocken	5,2	4,1										
176	l	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
	r	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
177	l	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
	r	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
178	l	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
	r	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
179	l	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
	r	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
180	l	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
	r	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6	1	25,5	1,4	-0,8	-2,2	10,6	14,9			
181	l	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
	r	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6	8	29,3	1,7	0,8	-0,5	14,1	15,2			
182	l	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
	r	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6	10	30,0	1,3	0,6	-0,7	14,3	15,7			
183	l	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6										
	r	7	4	1/10	trocken	4,5	3,6	8	30,2	1,5	1,2	-0,1	15,0	15,2			
184	l	7	4	1/10	trocken	4,0	3,2										
	r	7	4	1/10	trocken	4,0	3,2	8	27,2	1,5	0,8	-0,5	13,1	14,1			
185	l	7	4	1/10	trocken	3,6	2,9										
	r	7	4	1/10	trocken	3,6	2,9	10	31,2	1,8	1,3	0,0	15,5	15,6			

## 5.5 Ergebnisse der Vergleichsversuche mit der dynamischen Lastplatte

Nach jeder Messfahrt auf den Spuren 1-4 wurde der dynamische Verformungsmodul mit Hilfe der dynamischen Lastplatte ermittelt, welcher in den Tabellen des Kapitel 5.4 zu finden ist. Somit war eine genaue Dokumentation des Verdichtungszuwachses möglich.

Auf dem „weichen“ Untergrund der Spuren 6-7 wurde durchschnittlich nach jeder 3. Messfahrt der dynamische Verformungsmodul ermittelt, da es durch das Heraufpumpen des Wassers durch die dynamischen Einwirkungen der Walze und den Stößen der dynamischen Lastplatte, zu keiner messbaren Verdichtung des Bodens kam, sondern ganz im Gegenteil, der Boden eher weicher wurde.

Auf dem „steifen“ Planum (Spur 5) wurden nur vereinzelt Messungen durchgeführt, da die bei den Versuchen verwendete Walze hier keine messbare Verdichtung mehr herbeiführen konnte.

In Tabelle 5-4 sind die Messwerte der einzelnen Stöße der dynamischen Lastplattenversuche aufgelistet (der E-Modul wurde aus dem  $E_{vd}$  gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.4 ermittelt):

5 - Versuchsauswertung

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Versuche mit der dynamischen Lastplatte

Messfahrt	Spur	dyn. Lastplatte Vorbelastung					dyn. Lastplatte Messschläge					F
		S1	S2	S3	S	E <sub>vd</sub>	S1	S2	S3	S	E <sub>vd</sub>	
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MN/m <sup>2</sup> ]	
001	4	1,27	0,76	0,65	0,89	25,20	0,61	0,59	0,57	0,59	38,30	30,41
002	4	2,25	1,26	0,86	1,46	15,40	0,76	0,72	0,67	0,71	31,50	25,01
003	4	1,56	0,98	0,80	1,11	20,30	0,73	0,72	0,67	0,71	31,90	25,33
004	4	1,56	0,93	0,73	1,07	21,00	0,67	0,65	0,61	0,64	35,10	27,87
005	4	2,72	0,91	0,75	1,46	15,40	0,68	0,64	0,61	0,64	34,90	27,71
006	4	2,52	1,17	0,79	1,49	15,10	0,69	0,66	0,62	0,65	34,40	27,32
007	4	2,17	1,03	0,75	1,32	17,10	0,67	0,63	0,61	0,64	35,30	28,03
008	2	2,61	1,47	0,94	1,67	13,40	0,79	0,74	0,70	0,74	30,30	24,06
009	2	4,05	0,94	0,92	1,97	11,40	0,85	0,77	0,73	0,79	28,70	22,79
010	2	2,71	1,30	0,92	1,64	13,70	0,81	0,76	0,73	0,77	29,30	23,27
011	2	2,14	1,05	0,77	1,32	17,10	0,69	0,65	0,61	0,65	34,70	27,56
012	2	5,43	1,79	0,94	2,72	8,30	0,80	0,77	0,70	0,76	29,70	23,59
013	2	1,95	0,96	0,77	1,22	18,40	0,67	0,66	0,63	0,65	34,50	27,40
014	2	2,28	1,12	0,80	1,40	16,10	0,72	0,69	0,66	0,69	32,80	26,05
015	2	2,54	1,23	0,83	1,53	14,70	0,72	0,70	0,65	0,69	32,70	25,97
016	2	2,06	0,87	0,69	1,21	18,60	0,63	0,63	0,58	0,62	36,50	28,99
017	2	2,71	1,05	0,76	1,50	15,00	0,70	0,67	0,63	0,67	33,80	26,84
018	2	3,21	1,33	0,83	1,79	12,60	0,72	0,69	0,64	0,68	32,90	26,13
019	2	2,01	0,93	0,72	1,22	18,50	0,64	0,60	0,57	0,61	37,20	29,54
020	2	2,64	1,05	0,76	1,49	15,10	0,69	0,65	0,62	0,65	34,60	27,48
021	2	2,85	1,13	0,74	1,57	14,30	0,65	0,62	0,59	0,62	36,50	28,99
022	2	2,73	0,90	0,62	1,41	15,90				0,54	41,70	33,12
023	2	1,64	0,78	0,65	1,02	22,00	0,55	0,56	0,54	0,55	40,80	32,40
024	2	2,59	0,87	0,66	1,37	16,40	0,60	0,58	0,52	0,57	39,60	31,45
025	2	2,10	0,87	0,63	1,20	18,80	0,56	0,53	0,51	0,53	42,30	33,59
026	2	1,84	0,72	0,60	1,05	21,40	0,72	0,55	0,51	0,59	38,00	30,18
027	2	1,69	0,68	0,60	0,99	22,80	0,43	0,47	0,46	0,45	50,00	39,71
028	2	2,34	0,89	0,63	1,28	17,50	0,57	0,55	0,52	0,54	41,50	32,96
029	2	2,23	0,81	0,63	1,22	18,40	0,56	0,53	0,50	0,53	42,40	33,67
030	2	2,20	0,87	0,62	1,23	18,30	0,56	0,53	0,51	0,53	42,50	33,75
031	2	1,74	0,83	0,67	1,08	20,90	0,61	0,59	0,58	0,59	38,10	30,26
032	2	1,50	0,66	0,58	0,91	24,70	0,53	0,50	0,49	0,51	44,60	35,42
033	2	1,62	0,71	0,57	0,97	23,20	0,51	0,49	0,46	0,49	46,20	36,69
034	2	1,55	0,72	0,56	0,94	23,90	0,52	0,49	0,47	0,49	45,60	36,21
035	2	1,80	0,70	0,56	1,02	22,00	0,49	0,46	0,44	0,46	48,70	38,67
036	2	2,08	0,86	0,62	1,19	19,80	0,54	0,52	0,50	0,52	43,30	34,39
037	2	1,44	0,69	0,57	0,90	25,00	0,52	0,50	0,49	0,50	44,80	35,58
038	2	1,08	0,58	0,51	0,72	31,20	0,48	0,45	0,44	0,46	49,50	39,31
039	2	1,47	0,65	0,54	0,89	25,40	0,48	0,46	0,44	0,46	48,80	38,75
040	2	1,35	0,62	0,50	0,82	27,30	0,44	0,43	0,42	0,43	52,40	41,61
041	2	1,13	0,57	0,49	0,73	30,80	0,46	0,44	0,40	0,43	52,20	41,45
042	2	2,88	0,86	0,67	1,47	15,30	0,59	0,57	0,54	0,57	39,80	31,61
043	2	1,03	0,56	0,53	0,71	31,90	0,74	0,49	0,47	0,57	39,80	31,61
044	2	1,50	0,68	0,53	0,90	25,00	0,48	0,46	0,44	0,46	48,70	38,67
045	2	1,43	0,54	0,50	0,83	27,30	0,47	0,44	0,43	0,40	50,20	39,87
046	2	1,08	0,61	0,52	0,74	30,50	0,49	0,47	0,46	0,47	47,50	37,72
047	2	1,39	0,72	0,58	0,90	25,10	0,57	0,51	0,49	0,52	43,30	34,39
048	2	1,74	0,76	0,72	1,07	20,90	0,63	0,60	0,58	0,60	37,40	29,70
049	2	0,57	0,46	0,43	0,49	46,10	0,39	0,39	0,36	0,38	58,90	46,77
050	2	0,83	0,50	0,44	0,59	38,00	0,40	0,39	0,39	0,39	57,30	45,50
051	2	0,92	0,54	0,54	0,67	33,70	0,46	0,40	0,41	0,42	53,30	42,33
052	2	0,81	0,51	0,46	0,60	37,80	0,43	0,43	0,40	0,42	53,60	42,57
053	2	1,45	0,55	0,48	0,76	29,80	0,45	0,43	0,42	0,43	52,20	41,45
054	2	0,73	0,48	0,44	0,55	41,00	0,41	0,40	0,38	0,40	57,00	45,27
055	2	0,83	0,55	0,51	0,63	35,60	0,46	0,45	0,41	0,44	51,00	40,50
056	2	1,32	0,55	0,50	0,69	32,70	0,46	0,44	0,43	0,44	51,00	40,50
057	2	1,24	0,53	0,47	0,75	30,20	0,44	0,40	0,40	0,42	54,20	43,04
058	2	0,77	0,51	0,46	0,58	38,80	0,43	0,42	0,42	0,43	52,80	41,93
059	2	1,09	0,57	0,47	0,71	31,80	0,46	0,45	0,44	0,45	50,00	39,71
060	2	1,22	0,55	0,47	0,75	30,10	0,45	0,44	0,43	0,44	51,50	40,90

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-4: Ergebnisse der Versuche mit der dynamischen Lastplatte

Messfahrt	Spur	dyn. Lastplatte Vorbelastung					dyn. Lastplatte Messschläge					F
		S1	S2	S3	S	E <sub>vd</sub>	S1	S2	S3	S	E <sub>vd</sub>	
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MN/m <sup>2</sup> ]	
061	2	1,50	0,59	0,50	0,74	30,30	0,47	0,45	0,42	0,44	50,80	40,34
062	2	0,85	0,57	0,50	0,68	35,30	0,47	0,46	0,44	0,46	49,10	38,99
063	3	0,98	0,67	0,61	0,75	30,00	0,57	0,56	0,56	0,56	40,00	31,76
064	3	1,08	0,64	0,59	0,77	29,20	0,57	0,55	0,54	0,55	40,80	32,40
065	3	0,93	0,59	0,55	0,69	32,80	0,51	0,49	0,46	0,49	46,20	36,69
066	3	1,33	0,60	0,54	0,72	31,10	0,51	0,51	0,50	0,51	44,50	35,34
067	3	1,11	0,72	0,56	0,80	28,30	0,55	0,52	0,52	0,53	42,50	33,75
068	3	0,65	0,54	0,48	0,55	40,70	0,46	0,42	0,43	0,44	51,60	40,98
069	3	0,75	0,57	0,54	0,62	36,30	0,49	0,50	0,54	0,51	44,20	35,10
070	3	0,74	0,63	0,58	0,65	34,60	0,54	0,52	0,48	0,51	43,90	34,86
071	3	0,69	0,39	0,37	0,48	46,50	0,45	0,44	0,43	0,44	51,40	40,82
072	3	0,84	0,56	0,52	0,64	35,30	0,49	0,46	0,47	0,47	47,70	37,88
073	3	1,11	0,56	0,54	0,73	30,70	0,50	0,49	0,48	0,49	46,00	36,53
074	3	0,86	0,61	0,50	0,66	34,20	0,47	0,45	0,44	0,45	49,60	39,39
075	3	0,87	0,64	0,62	0,71	31,70	0,53	0,42	0,46	0,47	48,10	38,20
076	3	0,78	0,51	0,45	0,58	38,80	0,45	0,44	0,43	0,44	51,00	40,50
077	3	0,77	0,55	0,51	0,61	36,90	0,48	0,44	0,44	0,45	49,90	39,63
078	3	1,70	0,54	0,48	0,73	30,80	0,47	0,43	0,53	0,47	47,70	37,88
079	3	0,72	0,51	0,46	0,56	39,90	0,43	0,43	0,38	0,41	54,30	43,12
080	3	0,74	0,54	0,48	0,59	38,50	0,48	0,44	0,44	0,46	49,30	39,15
081	3	1,13	0,57	0,46	0,72	31,30	0,44	0,43	0,42	0,43	52,70	41,85
082	3	0,69	0,49	0,44	0,54	41,80	0,43	0,40	0,40	0,41	54,70	43,44
083	3	0,60	0,48	0,42	0,50	45,20	0,39	0,40	0,38	0,39	57,70	45,82
084	3	0,83	0,55	0,49	0,62	46,30	0,47	0,45	0,47	0,46	48,90	38,83
085	1	1,52	0,80	0,73	1,02	22,10	0,71	0,72	0,64	0,69	32,70	25,97
086	1	1,17	0,84	0,74	0,92	24,50	0,67	0,64	0,65	0,65	34,60	27,48
087	1	1,77	1,38	1,08	1,41	16,00	0,89	0,81	0,74	0,81	27,70	22,00
088	1	1,65	1,07	0,96	1,22	18,40	0,86	0,84	0,74	0,81	27,70	22,00
089	1	1,13	0,76	0,66	0,85	26,60	0,59	0,59	0,54	0,57	39,30	31,21
090	1	1,41	0,92	0,76	1,03	21,80	0,77	0,69	0,65	0,70	32,00	25,41
091	1	0,95	0,83	0,71	0,83	27,10	0,75	0,60	0,60	0,62	36,50	28,99
092	4	2,08	1,07	0,80	1,31	17,10	0,66	0,66	0,63	0,65	34,50	27,40
093	4	0,98	0,66	0,61	0,75	30,00	0,58	0,56	0,55	0,56	40,00	31,76
094	4	0,97	0,68	0,65	0,77	29,30	0,59	0,59	0,57	0,58	38,70	30,73
095	4	0,68	0,65	0,61	0,64	34,40	0,60	0,55	0,52	0,56	40,30	32,00
096	4	0,68	0,62	0,47	0,56	40,50	0,45	0,44	0,45	0,45	50,20	39,87
097	4	0,70	0,88	0,53	0,70	32,00	0,52	0,48	0,47	0,49	46,20	36,69
098	4	0,73	0,56	0,53	0,61	37,10	0,48	0,47	0,45	0,47	48,30	38,36
099	4	0,84	0,64	0,62	0,70	32,30	0,60			0,56	40,50	32,16
100	4	0,91	0,59	0,56	0,69	32,80	0,52	0,47	0,48	0,49	45,90	36,45
101	4	1,18	0,67	0,60	0,82	27,50	0,57	0,57	0,60	0,58	38,80	30,81
102	4	1,37	0,69	0,66	0,91	24,90	0,61	0,54	0,57	0,57	39,40	31,29
103	4	0,85	0,50	0,46	0,60	37,30	0,46	0,44	0,43	0,44	51,00	40,50
104	4	0,97	0,67	0,56	0,73	30,70	0,50	0,57	0,46	0,51	44,50	35,34
105	4	0,99	0,62	0,60	0,73	30,70	0,52	0,53	0,50	0,52	43,70	34,70
106	4	0,97	0,64	0,59	0,73	30,70	0,54	0,52	0,49	0,52	43,50	34,54
107	5											
108	5											
109	5											
110	5											
111	5											
112	5											
113	5											
114	5											
115	5											
116	5											
117	5											
118	5											
119	5											
120	5											



5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-4: Ergebnisse der Versuche mit der dynamischen Lastplatte

Messfahrt	Spur	dyn. Lastplatte Vorbelastung					dyn. Lastplatte Messschläge					E
		S1	S2	S3	S	E <sub>vd</sub>	S1	S2	S3	S	E <sub>vd</sub>	
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MN/m <sup>2</sup> ]	
121	5											
122	5											
		0,45	0,32	0,29	0,35	63,90	0,28	0,26	0,27	0,27	83,30	66,15
		0,64	0,33	0,31	0,43	52,70	0,28	0,28	0,28	0,28	80,90	64,24
		0,39	0,25	0,22	0,28	79,20	0,20	0,19	0,19	0,20	114,80	91,17
123	5											
124	5											
125	5											
126	5											
127	5											
128	5											
129	5											
130	5											
131	5											
132	5											
133	5											
134	5											
135	5											
136	5											
137	5											
138	5											
139	5											
140	5											
141	5											
142	5											
143	5											
144	5											
		1,06	0,46	0,39	0,64	35,30	0,36	0,34	0,33	0,34	65,80	52,25
		0,52	0,24	0,24	0,33	67,40	0,22	0,21	0,21	0,21	106,10	84,26
		0,42	0,27	0,25	0,31	71,70	0,23	0,20	0,22	0,22	103,70	82,35
145	5											
146	5											
147	5											
148	5											
149	5											
150	5											
151	5											
152	5											
153	5											
154	5											
155	5											
156	5											
157	5											
158	5											
159	6	2,78	2,17	1,83	2,26	10,00	1,60	1,43	1,41	1,48	15,20	12,07
160	6	3,73	3,01	2,49	3,08	7,30	2,13	2,10	1,94	2,05	11,00	8,74
161	6	5,44	4,18	4,75	4,79	4,70	4,68	4,29	4,61	4,53	5,00	3,97
162	6	6,73	5,25	5,05	5,68	4,00	4,55	4,59	4,61	4,58	4,90	3,89
163	6											
164	6	5,05	4,03	3,82	4,30	5,20	3,48	3,49	3,50	3,49	6,40	5,08
165	6											
166	6	6,40	5,99	5,79	6,06	3,70	5,46	5,78	5,65	5,63	4,00	3,18
167	6											
168	6	5,19	4,82	4,76	4,92	4,60	4,45	4,55	4,70	4,57	4,90	3,89

Fortsetzung Tabelle 5-4: Ergebnisse der Versuche mit der dynamischen Lastplatte

Messfahrt	Spur	dyn. Lastplatte Vorbelastung					dyn. Lastplatte Messschläge					E
		S1	S2	S3	S	E <sub>vd</sub>	S1	S2	S3	S	E <sub>vd</sub>	
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]
169	6											
170	6											
171	6											
172	6											
173	6											
174	6	7,32	6,50	6,33	6,72	3,40	6,14	6,30	6,15	6,19	3,60	2,86
175	7	4,97	4,67	4,84	4,83	4,70	4,58	4,37	4,04	4,33	5,20	4,13
176	7											
177	7											
178	7											
179	7	5,98	5,31	5,32	5,54	4,10	5,00	5,06	4,98	5,01	4,50	3,57
180	7											
181	7											
182	7											
183	7											
184	7											
185	7	7,22	6,75	6,67	6,88	3,30	6,17	6,37	6,47	6,34	3,60	

## 5.6 Qualitativer Zusammenhang zwischen dem E-Modul des Bodens und der Kontaktlänge

### 5.6.1 Grundlagen

Das folgende Kapitel beschränkt sich auf die Betrachtung des sogenannten Normalkontaktes. Hierbei handelt es sich um zwei Körper, deren Anpresskräfte lediglich normal auf die Oberfläche wirken, weshalb auch keine Reibung oder Verschleiß auftritt. Zur Vereinfachung wird auch die Adhäsion vernachlässigt.

Nach Popov [16] kann man nach folgender Idee den korrekten qualitativen Zusammenhang zwischen der Kontaktkraft und der Eindringtiefe finden, der in den meisten Fällen bis auf einen dimensionslosen konstanten numerischen Faktor  $f$  dem korrekten Wert gleicht:

Wirkt eine Spannungsverteilung auf ein endliches Gebiet einer Oberfläche mit einer charakteristischen Länge  $b$ , so haben die Verformung und die Spannung im gesamten Volumen mit den Abmessungen  $b$  in allen drei räumlichen Dimensionen die gleiche Größenordnung. Außerhalb dieses „stark deformierten Volumens“ fallen die Deformation und die Spannung nach dem Gesetz  $r^{-2}$  ab. Das führt dazu, dass in dreidimensionalen Systemen das genannte Volumen  $\sim b^3$  den größten Beitrag zu allen energetischen oder Kraftbeziehungen liefert.

Für eine erste grobe Abschätzung reicht es daher anzunehmen, dass die Verformung im genannten Volumen konstant ist und dass nur dieses Volumen deformiert wird.

Wendet man diese Vorgehensweise auf das Beispiel „Kontakt zwischen einem starren Zylinder und einem elastischen Körper“ an (siehe Abbildung 5-11), so kommt man mit der Einschränkung, dass die Setzungsmulde nicht berücksichtigt wird, zu folgendem Ergebnis:

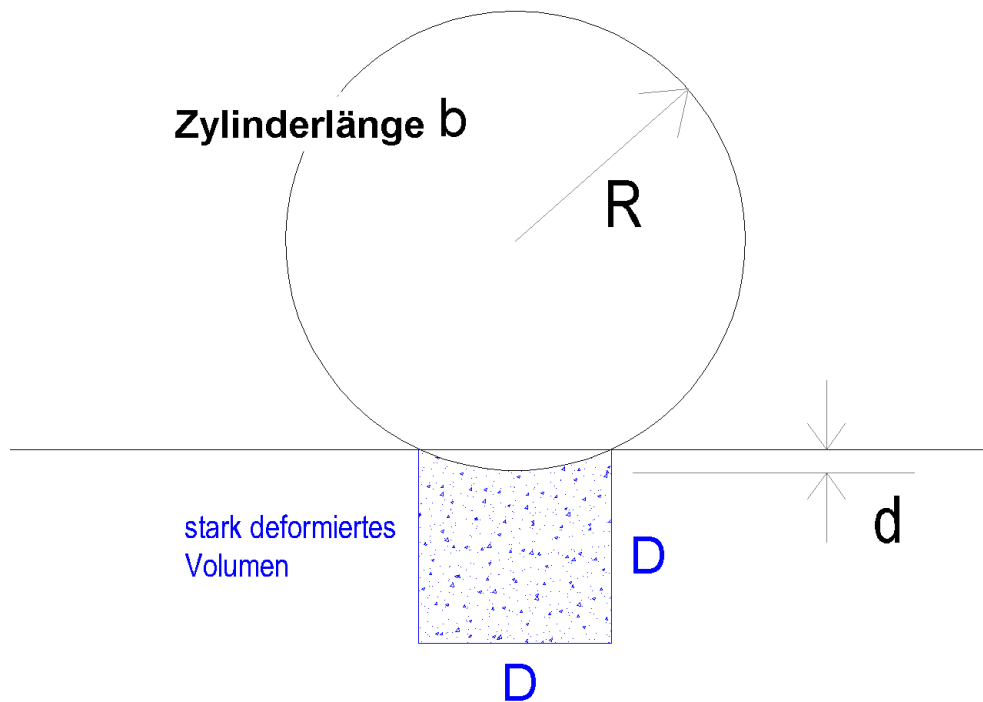


Abbildung 5-11: Querschnitt des Zylinders

Der Zylinder besitzt den Radius  $R$  und die Länge  $b$ . Der Kontaktdurchmesser wird mit  $D \approx 2\sqrt{2Rd}$  abgeschätzt. Da die Abmessungen  $D$  des Deformationsvolumens gleich groß sind wie die Kontaktlänge des Zylinders, die sinngemäß in Kapitel 4.1 mit  $2l$  bezeichnet wurde, wird auch hier in weiterer Folge statt  $D$  die Bezeichnung  $2l$  eingeführt. Somit gilt  $2l \approx 2\sqrt{2Rd}$ .

Das Volumen welches in alle Richtungen stark deformiert wird, ergibt sich somit aus einem quadratischen Querschnitt mit den Abmessungen  $2l$ , welcher über die Länge  $b$  des Zylinders konstant ist (Abbildung 5-11).

Die Deformation  $\varepsilon$  wird abgeschätzt mit [16]:

$$\varepsilon \approx \frac{d}{2l} \quad (35)$$

Somit erhält man für die Spannung:

$$\sigma \approx E \cdot \varepsilon \approx \frac{E \cdot d}{2l} \quad (36)$$

Mit der Kontaktfläche  $b^2$  oder  $(2l)^2$  erhält man für die Kraft:

$$F \approx \frac{E \cdot d}{2l} \cdot b \cdot 2l = E \cdot d \cdot b \quad (37)$$

Mit Hilfe der Kreissegmentformeln lässt sich ein Zusammenhang zwischen der Eindringtiefe  $d$  und der wahren Kontaktlänge zwischen Bandage und Boden  $2l$  herstellen:

$$d = R \cdot \left[ 1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right] \quad (38)$$

$$2l = R \cdot \alpha \quad (39)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (37) in (38) ergibt sich für Gleichung (39) folgender Zusammenhang für die Kontaktlänge  $2l$ :

$$2l = 2 \cdot \cos^{-1} \left( 1 - \frac{F}{E \cdot b \cdot R} \right) \cdot R \quad (40)$$

### 5.6.2 Ermittlung des $f$ -Faktors

Nach jeder Versuchsfahrt wurde mit dem Leichten Fallgewichtsgerät der dynamische Verformungsmodul  $E_{vd}$  bestimmt, weshalb für jede Fahrt nach Kapitel 3.4 ein zugehöriger E-Modul nach Gleichung (9) berechnet werden kann. Mit diesem können für alle Fahrten die mit Formel (40) berechneten Werte der Kontaktlänge ermittelt werden ( $= 2l_{berechnet}$ ). Gleichzeitig liegen auch die gemessenen Werte, also die Sollwerte, vor ( $= 2l_{gemessen}$ ). Der Faktor berechnet sich somit durch folgende Formel:

$$f = \frac{2l_{gemessen}}{2l_{berechnet}} \quad (41)$$

Die Berechnung des  $f$ -Faktors wurde nur mit den Werten der Rückwärtsfahrten ermittelt, da diese alle statisch durchgeführt wurden. Außerdem wurde einerseits mit der normalen, gemessenen Kontaktlänge gerechnet, andererseits mit dem doppelten „Anteil Heck“. Die Kontaktlänge wird grundsätzlich in einen „Anteil Heck“ und einen „Anteil Bug“ unterteilt (siehe Abbildung 5-6 in Kapitel 5.2). Die, aus der Schiebewirkung während der Rollbewegung der Bandage entstehende, Bugwelle befindet sich sinngemäß im „Anteil Bug“. Um Rückschlüsse auf die Kontaktlänge der stehenden Walze schließen zu können, wird bei Betrachtung des doppelten „Anteil Heck“ die Schiebewirkung vernachlässigt.

Folgende Werte wurden in die Formel zur Berechnung von  $2l_{berechnet}$  eingesetzt:

$$R = 60 \text{ cm}$$

$$b = 168 \text{ cm}$$

$$F = 46,8 \text{ kN}$$

$E =$  jeweiliger Messwert des vor jeder Messfahrt durchgeführten dynamischen Lastplattenversuches

Die nachfolgend angeführten Werte sind die Mittelwerte aller Fahrten. Die exakte Berechnung dieser Werte ist in Tabelle 5-5 angeführt.

Der Faktor, berechnet aus der Kontaktlänge und somit für die fahrende Walze gültig, beträgt:

$$f_{Fahrt} = 2,77$$

bei einer Standardabweichung von 0,64 und einem Median von 2,86.

Der Faktor, berechnet aus dem doppelten „Anteil Heck“ und somit für die stehende Walze gültig, beträgt:

$$f_{Stand} = 2,70$$

bei einer Standardabweichung von 0,95 und einem Median von 2,74.

## 5 - Versuchsauswertung

Wie erwartet ist der Wert des Faktors  $f_{Stand}$  geringer, da hier die Schiebewirkung bei Fahrt nicht erfasst wurde.

Will man die Kontaktlänge  $2l$  abschätzen, so erhält man aus (40) und (41) für die fahrende Walze folgende Gleichung:

$$2l_{Fahrt} = f_{Fahrt} \cdot \left[ 2 \cdot \cos^{-1} \left( 1 - \frac{F}{E \cdot b \cdot R} \right) \cdot R \right] \quad (42)$$

Für die stehende Walze gilt:

$$2l_{Stand} = f_{Stand} \cdot \left[ 2 \cdot \cos^{-1} \left( 1 - \frac{F}{E \cdot b \cdot R} \right) \cdot R \right] \quad (43)$$

Die angegebenen Werte für  $f_{Fahrt} = 2,77$  und  $f_{Stand} = 2,70$  gelten lediglich für genau den Walzentyp, der bei den Versuchsfahrten verwendet wurde. Für andere Walzenmodelle müssten die Faktoren jeweils durch Versuche neu ermittelt werden.

5 - Versuchsauswertung

Tabelle 5-5: Berechnung des qualitativen Zusammenhangs zwischen E-Modul des Bodens und Kontaktlänge

Messfahrt	Kanal	Spur	Geschw	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT						
						"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Anteil Heck	2 * Anteil Heck	"qualitativ" berechnete Berührungslänge	f-Faktor mit Bodenberührung	f-Faktor mit 2 * Anteil Heck
						[km/h]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
001	l	4	4	38,3	30,4	3	15,2	6,5	12,9	6,6	2,30	1,95
	r	4	4	38,3	30,4	2	9,6	1,2	2,3	6,6	1,44	0,35
002	l	4	4	31,5	25,0	5	16,9	9,1	18,2	7,3	2,30	2,49
	r	4	4	31,5	25,0	3	8,5	1,6	3,1	7,3	1,16	0,43
003	l	4	4	31,9	25,3	4	16,2	8,6	17,2	7,3	2,23	2,36
	r	4	4	31,9	25,3	2	15,0	8,3	16,5	7,3	2,07	2,27
004	l	4	4	35,1	27,9	4	14,6	6,0	12,1	6,9	2,10	1,74
	r	4	4	35,1	27,9	3	12,6	5,0	10,0	6,9	1,82	1,45
005	l	4	4	34,9	27,7	5	16,8	9,2	18,4	6,9	2,42	2,64
	r	4	4	34,9	27,7	3	15,5	6,6	13,1	6,9	2,23	1,89
006	l	4	4	34,4	27,3	5	17,6	9,7	19,5	7,0	2,51	2,79
	r	4	4	34,4	27,3	3	14,2	5,4	10,7	7,0	2,04	1,54
007	l	4	4	35,3	28,0	2	17,0	7,6	15,3	6,9	2,46	2,21
	r	4	4	35,3	28,0	4	14,9	5,7	11,4	6,9	2,16	1,64
008	l	2	4	30,3	24,1	1	25,6	10,4	20,7	7,5	3,43	2,78
	r	2	4	30,3	24,1	1	17,7	5,4	10,9	7,5	2,37	1,46
009	l	2	4	28,7	22,8	2	21,4	8,8	17,6	7,7	2,80	2,30
	r	2	4	28,7	22,8	2	19,5	11,6	23,2	7,7	2,54	3,03
010	l	2	4	29,3	23,3	2	18,3	7,3	14,6	7,6	2,41	1,92
	r	2	4	29,3	23,3	2	17,0	6,6	13,3	7,6	2,24	1,75
011	l	2	4	34,7	27,6	2	21,0	10,1	20,2	7,0	3,02	2,90
	r	2	4	34,7	27,6	3	20,2	7,5	15,1	7,0	2,90	2,16
012	l	2	4	29,7	23,6	3	17,0	9,0	17,9	7,5	2,26	2,38
	r	2	4	29,7	23,6	2	21,0	6,4	12,8	7,5	2,78	1,70
013	l	2	4	34,5	27,4	2	18,7	9,5	19,1	7,0	2,68	2,73
	r	2	4	34,5	27,4	4	17,2	5,5	10,9	7,0	2,46	1,56
014	l	2	4	32,8	26,0	2	20,0	7,7	15,4	7,2	2,79	2,15
	r	2	4	32,8	26,0	5	17,3	8,7	17,3	7,2	2,41	2,42
015	l	2	4	32,7	26,0	2	18,7	10,0	20,1	7,2	2,61	2,80
	r	2	4	32,7	26,0	4	17,7	7,7	15,5	7,2	2,47	2,16
016	l	2	4	36,5	29,0	3	18,6	12,3	24,7	6,8	2,74	3,63
	r	2	4	36,5	29,0	2	17,0	5,8	11,6	6,8	2,51	1,70
017	l	2	4	33,8	26,8	2	18,7	-4,2	-8,4	7,1	2,64	-1,19
	r	2	4	33,8	26,8	2	18,0	6,7	13,4	7,1	2,56	1,90
018	l	2	4	32,9	26,1	4	19,2	8,9	17,9	7,2	2,68	2,50
	r	2	4	32,9	26,1	2	18,5	10,9	21,9	7,2	2,58	3,06
019	l	2	2	37,2	29,5	2	15,8	6,6	13,2	6,7	2,35	1,96
	r	2	2	37,2	29,5	6	16,2	5,0	10,0	6,7	2,41	1,48
020	l	2	2	34,6	27,5	3	17,5	10,5	20,9	7,0	2,51	3,00
	r	2	2	34,6	27,5	3	14,8	6,1	12,2	7,0	2,12	1,74
021	l	2	6	36,5	29,0	3	21,5	10,2	20,5	6,8	3,17	3,01
	r	2	6	36,5	29,0	3	20,5	9,3	18,6	6,8	3,01	2,73
022	l	2	6	41,7	33,1							
	r	2	6	41,7	33,1							
023	l	2	2-6	40,8								
	r	2	2-6	40,8								
024	l	2	2-6	39,6								
	r	2	2-6	39,6								
025	l	2	4	42,3	33,6	2	22,2	9,2	18,3	6,3	3,52	2,90
	r	2	4	42,3	33,6	3	18,5	8,9	17,8	6,3	2,92	2,81
026	l	2	4	38,0	30,2	3	23,5	12,4	24,8	6,7	3,53	3,72
	r	2	4	38,0	30,2	3	22,6	9,9	19,7	6,7	3,39	2,96
027	l	2	4	50,0	39,7	4	19,0	9,8	19,5	5,8	3,28	3,36
	r	2	4	50,0	39,7	1	18,1	5,7	11,4	5,8	3,12	1,96
028	l	2	4	41,5	33,0	2	21,2	12,6	25,3	6,4	3,33	3,97
	r	2	4	41,5	33,0	3	20,4	9,9	19,8	6,4	3,21	3,11
029	l	2	4	42,4	33,7	2	18,3	6,3	12,6	6,3	2,90	2,00
	r	2	4	42,4	33,7	2	20,3	7,7	15,4	6,3	3,21	2,44
030	l	2	4	42,5	33,8	6	20,1	10,0	20,0	6,3	3,20	3,18
	r	2	4	42,5	33,8	1	12,5	2,3	4,7	6,3	1,99	0,74
031	l	2	4	38,1	30,3	3	22,0	9,0	17,9	6,6	3,30	2,69
	r	2	4	38,1	30,3	4	20,3	10,4	20,7	6,6	3,06	3,12
032	l	2	4	44,6	35,4	5	20,7	11,9	23,7	6,1	3,36	3,86
	r	2	4	44,6	35,4	3	19,9	9,6	19,1	6,1	3,24	3,11
033	l	2	2	46,2	36,7	5	15,5	2,6	5,2	6,0	2,57	0,86
	r	2	2	46,2	36,7	5	16,0	7,7	15,4	6,0	2,64	2,55
034	l	2	2	45,6	36,2	5	16,2	5,7	11,4	6,1	2,66	1,87
	r	2	2	45,6	36,2	4	11,7	3,3	6,6	6,1	1,93	1,08
035	l	2	6	48,7	38,7							
	r	2	6	48,7	38,7							

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-5: Berechnung des qualitativen Zusammenhangs zwischen E-Modul des Bodens und Kontaktlänge

Messfahrt	Kanal	Spur	Geschw	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT							
						"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Anteil Heck	2*AnteilHeck	"qualitativ" berechnete Berührungslänge	f-Faktor mit Bodenberührung	f-Faktor mit 2*Anteil Heck	
						[km/h]	[MN/m2]	[MN/m2]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[-]
036	l	2	6	43,3	34,4								
	r	2	6	43,3	34,4								
037	l	2	2-6	44,8									
	r	2	2-6	44,8									
038	l	2	2-6	49,5									
	r	2	2-6	49,5									
039	l	2	4	48,8	38,8	3	21,5	9,0	18,1	5,9	3,66	3,08	
	r	2	4	48,8	38,8	3	20,1	8,0	16,1	5,9	3,42	2,73	
040	l	2	4	52,4	41,6	5	21,6	9,9	19,8	5,7	3,81	3,50	
	r	2	4	52,4	41,6	3	21,1	9,2	18,4	5,7	3,72	3,25	
041	l	2	4	52,2	41,5	4	20,8	9,0	18,0	5,7	3,66	3,17	
	r	2	4	52,2	41,5	0	20,0			5,7	3,52		
042	l	2	4	39,8	31,6	5	20,7	9,7	19,5	6,5	3,18	3,00	
	r	2	4	39,8	31,6	3	20,4	7,6	15,2	6,5	3,13	2,33	
043	l	2	4	39,8	31,6	5	20,2	8,9	17,7	6,5	3,10	2,73	
	r	2	4	39,8	31,6	2	20,1	7,7	15,4	6,5	3,09	2,37	
044	l	2	4	48,7	38,7	4	19,8	4,5	9,1	5,9	3,37	1,55	
	r	2	4	48,7	38,7	4	19,0	10,3	20,7	5,9	3,23	3,52	
045	l	2	4	50,2	39,9	4	19,3	10,2	20,5	5,8	3,33	3,53	
	r	2	4	50,2	39,9	4	20,0	6,8	13,7	5,8	3,45	2,36	
046	l	2	4	47,5	37,7	4	17,8	7,0	14,0	6,0	2,99	2,35	
	r	2	4	47,5	37,7	3	19,7	9,6	19,1	6,0	3,31	3,22	
047	l	2	4	43,3	34,4	3	19,6	11,9	23,9	6,2	3,14	3,83	
	r	2	4	43,3	34,4	3	17,8	9,2	18,5	6,2	2,86	2,96	
048	l	2	4	37,4	29,7	2	18,5	16,1	32,1	6,7	2,76	4,79	
	r	2	4	37,4	29,7	4	19,8	6,8	13,7	6,7	2,95	2,04	
049	l	2	4	58,9									
	r	2	4	58,9	46,8	3	21,1	9,6	19,1	5,3	3,95	3,58	
050	l	2	4	57,3									
	r	2	4	57,3	45,5	1	20,8	11,5	23,0	5,4	3,84	4,25	
051	l	2	4	53,3									
	r	2	4	53,3	42,3	5	20,4	10,9	21,8	5,6	3,63	3,88	
052	l	2	4	53,6									
	r	2	4	53,6	42,6	0	26,3			5,6	4,70		
053	l	2	2	52,2									
	r	2	2	52,2	41,5	2	17,4	4,2	8,4	5,7	3,07	1,48	
054	l	2	2	57,0									
	r	2	2	57,0	45,3	6	18,7	5,8	11,6	5,4	3,44	2,14	
055	l	2	6	51,0									
	r	2	6	51,0	40,5								
056	l	2	6	51,0									
	r	2	6	51,0	40,5								
057	l	2	4	54,2									
	r	2	4	54,2									
058	l	2	4	52,8									
	r	2	4	52,8									
059	l	2	4	50,0									
	r	2	4	50,0									
060	l	2	4	51,5									
	r	2	4	51,5									
061	l	2	4	50,8									
	r	2	4	50,8	40,3	5	19,8	9,2	18,5	5,8	3,43	3,21	
062	l	2	4	49,1									
	r	2	4	49,1	39,0	3	18,7	6,8	13,6	5,9	3,18	2,33	
063	l	3	4	40,0									
	r	3	4	40,0	31,8	4	22,2	8,3	16,5	6,5	3,42	2,55	
064	l	3	4	40,8									
	r	3	4	40,8	32,4	5	20,6	9,2	18,4	6,4	3,20	2,86	
065	l	3	4	46,2									
	r	3	4	46,2	36,7	4	19,6	7,8	15,5	6,0	3,25	2,57	
066	l	3	4	44,5									
	r	3	4	44,5	35,3	3	19,2	12,3	24,5	6,2	3,11	3,99	
067	l	3	2	42,5									
	r	3	2	42,5	33,8	4	17,5	10,2	20,3	6,3	2,78	3,23	
068	l	3	2	51,6									
	r	3	2	51,6	41,0	5	18,4	6,8	13,5	5,7	3,22	2,37	
069	l	3	6	44,2									
	r	3	6	44,2	35,1								
070	l	3	6	43,9									
	r	3	6	43,9	34,9								

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-5: Berechnung des qualitativen Zusammenhangs zwischen E-Modul des Bodens und Kontaktlänge

Messfahrt	Kanal	Spur	Geschw	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT							
						"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Anteil Heck	2 * Anteil Heck	"qualitativ" berechnete Berührungslänge	f-Faktor mit Bodenberührung	f-Faktor mit 2 * Anteil Heck	
						[km/h]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[-]
071	r	3	4	51,4									
	r	3	4	51,4	40,8	5	18,4	7,9	15,7	5,7	3,22	2,75	
072	l	3	4	47,7	37,9	4	23,8	15,1	30,2	5,9	4,00	5,08	
	r	3	4	47,7	37,9	4	20,0	9,0	18,0	5,9	3,36	3,02	
073	r	3	4	46,0									
	r	3	4	46,0	36,5	5	18,8	10,2	20,4	6,1	3,10	3,38	
074	r	3	4	49,6									
	r	3	4	49,6	39,4	5	18,3	7,9	15,8	5,8	3,14	2,71	
075	l	3	4	48,1	38,2	3	21,1	8,5	17,1	5,9	3,56	2,88	
	r	3	4	48,1	38,2	5	19,0	8,6	17,2	5,9	3,22	2,91	
076	l	3	4	51,0	40,5	4	19,1	10,4	20,7	5,7	3,33	3,61	
	r	3	4	51,0	40,5	4	19,1	10,4	20,7	5,7	3,33	3,61	
077	r	3	4	49,9									
	r	3	4	49,9	39,6	3	17,5	9,9	19,8	5,8	3,01	3,41	
078	r	3	4	47,7									
	r	3	4	47,7	37,9	4	19,6	11,3	22,7	5,9	3,30	3,82	
079	r	3	4	54,3	43,1	3	18,9	11,7	23,4	5,6	3,40	4,20	
080	r	3	4	49,3									
	r	3	4	49,3	39,2	5	19,1	8,9	17,8	5,8	3,27	3,05	
081	l	3	4	52,7	41,9	3	18,5	8,7	17,4	5,7	3,28	3,08	
	r	3	4	52,7	41,9	5	18,3	7,3	14,5	5,7	3,25	2,57	
082	r	3	4	54,7									
	r	3	4	54,7	43,4	1	18,9	10,3	20,7	5,5	3,40	3,72	
083	r	3	4	57,7									
	r	3	4	57,7	45,8	4	18,0	9,3	18,6	5,4	3,33	3,45	
084	r	3	4	48,9									
	r	3	4	48,9	38,8	3	17,5	9,6	19,1	5,9	2,98	3,26	
085	r	1	4	32,7									
	r	1	4	32,7	26,0	3	18,7	9,7	19,5	7,2	2,60	2,71	
086	r	1	4	34,6									
	r	1	4	34,6	27,5	3	19,6	5,9	11,8	7,0	2,81	1,69	
087	r	1	4	27,7									
	r	1	4	27,7	22,0	3	19,7	6,9	13,7	7,8	2,53	1,76	
088	r	1	4	27,7									
	r	1	4	27,7	22,0	5	20,0	7,5	14,9	7,8	2,56	1,92	
089	r	1	4	39,3									
	r	1	4	39,3	31,2	4	19,5	8,8	17,6	6,5	2,98	2,69	
090	r	1	4	32,0									
	r	1	4	32,0	25,4	1	25,2	10,9	21,8	7,3	3,47	3,00	
091	r	1	4	36,5									
	r	1	4	36,5	29,0	2	20,6	8,0	16,0	6,8	3,03	2,36	
092	r	4	4	34,5									
	r	4	4	34,5	27,4	2	23,0	13,3	26,6	7,0	3,29	3,81	
093	r	4	4	40,0									
	r	4	4	40,0	31,8	3	20,6	10,3	20,6	6,5	3,18	3,18	
094	r	4	4	38,7									
	r	4	4	38,7	30,7	3	16,8	6,7	13,5	6,6	2,54	2,04	
095	r	4	4	40,3									
	r	4	4	40,3	32,0	2	17,7	4,6	9,3	6,5	2,74	1,44	
096	r	4	4	50,2									
	r	4	4	50,2	39,9	3	17,0	5,6	11,1	5,8	2,93	1,92	
097	r	4	4	46,2									
	r	4	4	46,2	36,7	4	16,9	8,0	16,1	6,0	2,80	2,66	
098	l	4	4	48,3	38,4	1	20,1	8,1	16,2	5,9	3,40	2,75	
	r	4	4	48,3	38,4	1	15,0	4,1	8,2	5,9	2,54	1,39	
099	l	4	4	40,5	32,2	2	27,5	11,9	23,8	6,4	4,27	3,68	
	r	4	4	40,5	32,2	3	20,8	8,6	17,1	6,4	3,22	2,66	
100	l	4	4	45,9	36,5	2	24,4	13,1	26,3	6,1	4,02	4,33	
	r	4	4	45,9	36,5	4	15,3	6,7	13,5	6,1	2,52	2,23	
101	l	4	4	38,8	30,8	3	18,8	13,0	25,9	6,6	2,86	3,94	
	r	4	4	38,8	30,8	5	17,8	9,7	19,5	6,6	2,70	2,96	
102	l	4	4	39,4									
	r	4	4	39,4	31,3	1	19,6	9,8	19,7	6,5	3,00	3,01	
103	l	4	4	51,0	40,5	4	25,5	15,4	30,9	5,7	4,44	5,38	
	r	4	4	51,0	40,5	3	17,5	5,9	11,8	5,7	3,05	2,05	
104	l	4	4	44,5	35,3	2	26,3	15,5	30,9	6,2	4,27	5,03	
	r	4	4	44,5	35,3	1	18,1	5,4	10,7	6,2	2,94	1,75	
105	r	4	4	43,7									
	r	4	4	43,7	34,7	4	14,9	5,7	11,5	6,2	2,40	1,85	



5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-5: Berechnung des qualitativen Zusammenhangs zwischen E-Modul des Bodens und Kontaktlänge

Messfahrt	Kanal	Spur	Geschw	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT						
						"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Anteil Heck	2* Anteil Heck	"qualitativ" berechnete Berührungslänge	f-Faktor mit Bodenberührung	f-Faktor mit 2* Anteil Heck
						[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[-]	[cm]
106	l	4	4	43,5	34,5	4	25,6	15,3	30,5	6,2	4,11	4,90
	r	4	4	43,5	34,5	3	16,8	4,2	8,4	6,2	2,70	1,35
107	l	5	4	93,0	73,9	4	9,4	4,8	9,6	4,3	2,21	2,25
	r	5	4	93,0	73,9	1	7,3	4,8	9,5	4,3	1,72	2,24
108	l	5	4	93,0	73,9	2	9,6	5,6	11,2	4,3	2,26	2,63
	r	5	4	93,0	73,9	5	9,4	5,8	11,7	4,3	2,21	2,75
109	l	5	4	93,0	73,9	4	10,9	6,6	13,3	4,3	2,55	3,12
	r	5	4	93,0	73,9	2	11,3	6,3	12,6	4,3	2,65	2,95
110	l	5	4	93,0	73,9	7	12,6	7,2	14,4	4,3	2,96	3,38
	r	5	4	93,0	73,9	4	11,7	6,5	13,1	4,3	2,75	3,07
111	l	5	2	93,0	73,9	5	7,9	3,9	7,8	4,3	1,86	1,83
	r	5	2	93,0	73,9	6	7,9	5,0	10,1	4,3	1,85	2,36
112	l	5	2	93,0	73,9	5	10,7	4,8	9,6	4,3	2,52	2,25
	r	5	2	93,0	73,9	7	7,8	4,0	8,0	4,3	1,83	1,88
113	l	5	6	93,0	73,9							
	r	5	6	93,0	73,9							
114	l	5	6	93,0	73,9							
	r	5	6	93,0	73,9							
115	l	5	4	93,0	73,9	9	12,5	6,1	12,3	4,3	2,93	2,89
	r	5	4	93,0	73,9	5	9,8	5,1	10,2	4,3	2,31	2,39
116	l	5	4	93,0	73,9	6	11,7	5,4	10,9	4,3	2,75	2,56
	r	5	4	93,0	73,9	9	11,9	7,6	15,1	4,3	2,80	3,55
117	l	5	4	93,0	73,9	7	11,8	7,7	15,4	4,3	2,77	3,62
	r	5	4	93,0	73,9	7	13,5	7,1	14,3	4,3	3,17	3,35
118	l	5	4	93,0	73,9	5	11,9	6,3	12,7	4,3	2,81	2,98
	r	5	4	93,0	73,9	7	13,5	8,7	17,4	4,3	3,18	4,09
119	l	5	4	93,0	73,9	7	12,8	8,5	17,1	4,3	3,00	4,02
	r	5	4	93,0	73,9	5	12,4	6,6	13,1	4,3	2,92	3,09
120	l	5	4	93,0	73,9	6	13,4	7,1	14,2	4,3	3,14	3,35
	r	5	4	93,0	73,9	7	13,6	9,4	18,8	4,3	3,19	4,41
121	l	5	4	93,0	73,9	9	13,5	7,5	15,0	4,3	3,18	3,53
	r	5	4	93,0	73,9	6	13,8	7,6	15,3	4,3	3,23	3,60
122	l	5	4	93,0	73,9	5	13,1	7,7	15,3	4,3	3,08	3,60
	r	5	4	93,0	73,9	8	14,2	8,8	17,6	4,3	3,34	4,14
123	l	5	4	91,9	73,0	5	13,1	7,7	15,3	4,3	3,06	3,58
	r	5	4	91,9	73,0	8	12,8	7,8	15,6	4,3	2,98	3,65
124	l	5	4	91,9	73,0	6	11,6	7,1	14,3	4,3	2,72	3,33
	r	5	4	91,9	73,0	7	13,3	7,1	14,3	4,3	3,10	3,33
125	l	5	2	91,9	73,0	7	9,9	5,7	11,3	4,3	2,31	2,64
	r	5	2	91,9	73,0	6	10,7	4,9	9,7	4,3	2,49	2,27
126	l	5	2	91,9	73,0	7	9,2	5,0	10,1	4,3	2,14	2,36
	r	5	2	91,9	73,0	8	10,6	7,7	15,4	4,3	2,48	3,60
127	l	5	6	91,9	73,0							
	r	5	6	91,9	73,0							
128	l	5	6	91,9	73,0							
	r	5	6	91,9	73,0							
129	l	5	4	91,9	73,0	7	12,2	7,3	14,5	4,3	2,85	3,39
	r	5	4	91,9	73,0	6	13,2	8,5	16,9	4,3	3,08	3,96
130	l	5	4	91,9	73,0	7	11,7	6,7	13,5	4,3	2,72	3,15
	r	5	4	91,9	73,0	7	13,2	8,4	16,8	4,3	3,09	3,93
131	l	5	4	91,9	73,0	8	11,0	7,1	14,1	4,3	2,58	3,30
	r	5	4	91,9	73,0	7	14,3	8,8	17,5	4,3	3,33	4,10
132	l	5	4	91,9	73,0	8	11,8	7,3	14,6	4,3	2,75	3,40
	r	5	4	91,9	73,0	8	14,1	8,3	16,6	4,3	3,29	3,87
133	l	5	4	91,9	73,0	7	12,4	6,9	13,8	4,3	2,89	3,23
	r	5	4	91,9	73,0	7	14,3	7,5	15,0	4,3	3,34	3,51
134	l	5	4	91,9	73,0	6	11,5	6,5	12,9	4,3	2,69	3,02
	r	5	4	91,9	73,0	8	13,8	8,3	16,7	4,3	3,22	3,90
135	l	5	4	91,9	73,0	7	11,9	7,4	14,8	4,3	2,77	3,45
	r	5	4	91,9	73,0	7	13,9	7,5	15,0	4,3	3,25	3,50
136	l	5	4	91,9	73,0	8	11,0	7,3	14,7	4,3	2,58	3,43
	r	5	4	91,9	73,0	8	13,9	8,6	17,1	4,3	3,24	4,00
137	l	5	2	91,9	73,0	8	7,8	4,5	8,9	4,3	1,82	2,09
	r	5	2	91,9	73,0							
138	l	5	2	91,9	73,0	9	8,8	4,0	8,1	4,3	2,05	1,89
	r	5	2	91,9	73,0	7	11,5	5,4	10,8	4,3	2,68	2,53
139	l	5	6	91,9	73,0							
	r	5	6	91,9	73,0							
140	l	5	6	91,9	73,0							
	r	5	6	91,9	73,0							

5 - Versuchsauswertung

Fortsetzung Tabelle 5-5: Berechnung des qualitativen Zusammenhangs zwischen E-Modul des Bodens und Kontaktlänge

Messfahrt	Kanal	Spur	Geschw	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT						
						"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Anteil Heck	2*AnteilHeck	"qualitativ" berechnete Berührungslänge	f-Faktor mit Bodenberührung	f-Faktor mit 2*Anteil Heck
						[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[-]	[cm]
141	l	5	4	91,9	73,0	6	12,9	7,8	15,6	4,3	3,02	3,65
	r	5	4	91,9	73,0	9	13,1	7,5	15,1	4,3	3,05	3,52
142	l	5	4	91,9	73,0	8	11,2	6,7	13,3	4,3	2,62	3,11
	r	5	4	91,9	73,0	9	12,8	7,3	14,6	4,3	2,98	3,41
143	l	5	4	91,9	73,0	9	11,0	5,8	11,7	4,3	2,58	2,73
	r	5	4	91,9	73,0	5	13,7	8,3	16,6	4,3	3,21	3,88
144	l	5	4	91,9	73,0	7	11,5	7,0	13,9	4,3	2,69	3,25
	r	5	4	91,9	73,0	8	13,6	8,2	16,5	4,3	3,17	3,85
145	l	5	4	92,0	73,1	9	12,4	8,5	17,1	4,3	2,90	3,99
	r	5	4	92,0	73,1	7	13,6	7,9	15,7	4,3	3,18	3,68
146	l	5	4	92,0								
	r	5	4	92,0	73,1	6	14,1	6,9	13,8	4,3	3,30	3,23
147	l	5	4	92,0	73,1	2	15,5	8,7	17,4	4,3	3,62	4,08
	r	5	4	92,0	73,1	9	14,6	9,0	18,0	4,3	3,42	4,20
148	l	5	4	92,0	73,1	6	12,4	7,3	14,6	4,3	2,89	3,41
	r	5	4	92,0	73,1	4	13,6	7,2	14,4	4,3	3,17	3,37
149	l	5	4	92,0	73,1	9	12,1	6,7	13,4	4,3	2,84	3,13
	r	5	4	92,0	73,1							
150	l	5	4	92,0	73,1	8	12,2	6,7	13,4	4,3	2,85	3,13
	r	5	4	92,0	73,1							
151	l	5	4	92,0	73,1	1	9,2	4,2	8,4	4,3	2,15	1,95
	r	5	4	92,0	73,1	7	12,6	5,7	11,5	4,3	2,95	2,68
152	l	5	4	92,0								
	r	5	4	92,0	73,1	6	10,4	4,8	9,5	4,3	2,43	2,22
153	l	5	4	92,0	73,1	3	9,2	5,7	11,4	4,3	2,14	2,68
	r	5	4	92,0	73,1	2	10,1	4,6	9,2	4,3	2,35	2,16
154	l	5	4	92,0	73,1	2	12,3	8,4	16,8	4,3	2,87	3,92
	r	5	4	92,0	73,1	4	11,9	4,0	8,1	4,3	2,78	1,89
155	l	5	2	92,0	73,1	6	9,9	3,9	7,9	4,3	2,32	1,84
	r	5	2	92,0	73,1	5	10,5	6,8	13,5	4,3	2,45	3,16
156	l	5	2	92,0								
	r	5	2	92,0	73,1							
157	l	5	6	92,0	73,1							
	r	5	6	92,0	73,1							
158	l	5	6	92,0								
	r	5	6	92,0	73,1							
159	l	6	4	15,2								
	r	6	4	15,2	12,1	1	25,0	8,0	16,1	10,5	2,37	1,52
160	l	6	4	11,0	8,7		26,2	12,9	25,8	12,4	2,12	2,08
	r	6	4	11,0	8,7		24,7	10,7	21,5	12,4	1,99	1,73
161	l	6	4	5,0	4,0		27,5	13,1	26,3	18,4	1,49	1,43
	r	6	4	5,0	4,0		23,2	10,0	20,0	18,4	1,26	1,09
162	l	6	4	4,9	3,9	10	28,4	13,6	27,3	18,6	1,53	1,47
	r	6	4	4,9	3,9	13	25,2	11,0	22,1	18,6	1,36	1,19
163	l	6	2	5,7	4,5	10	28,5	14,6	29,3	17,3	1,65	1,69
	r	6	2	5,7	4,5	11	24,5	10,9	21,7	17,3	1,42	1,26
164	l	6	2	6,4								
	r	6	2	6,4	5,1	13	24,6	10,5	20,9	16,2	1,51	1,29
165	l	6	6	5,2								
	r	6	6	5,2								
166	l	6	6	4,0	3,2							
	r	6	6	4,0	3,2							
167	l	6	4	4,5								
	r	6	4	4,5								
168	l	6	4	4,9	3,9	13	30,0	13,0	26,1	18,6	1,62	1,41
	r	6	4	4,9	3,9	12	28,6	13,2	26,3	18,6	1,54	1,42
169	l	6	4	4,5	3,6	11	30,1	14,1	28,3	19,4	1,55	1,46
	r	6	4	4,5	3,6	14	27,3	11,7	23,4	19,4	1,41	1,21
170	l	6	4	4,5	3,6	11	31,2	14,0	28,0	19,4	1,61	1,45
	r	6	4	4,5	3,6	14	28,4	13,6	27,3	19,4	1,47	1,41

Fortsetzung Tabelle 5-5: Berechnung des qualitativen Zusammenhangs zwischen E-Modul des Bodens und Kontaktlänge

Messfahrt	Kanal	Spur	Geschw	Evd	E	RÜCKWÄRTSFAHRT						
						"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Anteil Heck	2*AnteilHeck	"qualitativ" berechnete Berührungslänge	f-Faktor mit Bodenberührung	f-Faktor mit 2*Anteil Heck
			[km/h]	[MN/m <sup>2</sup> ]	[MN/m <sup>2</sup> ]		[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[-]	[cm]
171		6	4	4,5	3,6	8	31,8	14,2	28,3	19,4	1,64	1,46
	r	6	4	4,5								
172		6	4	4,5								
	r	6	4	4,5	3,6	9	33,2	16,9	33,8	19,4	1,72	1,74
173		6	4	4,5								
	r	6	4	4,5	3,6	12	31,6	15,5	31,1	19,4	1,63	1,60
174		6	4	3,6								
	r	6	4	3,6								
175		7	4	5,2								
	r	7	4	5,2								
176		7	4	4,5								
	r	7	4	4,5								
177		7	4	4,5								
	r	7	4	4,5								
178		7	4	4,5								
	r	7	4	4,5								
179		7	4	4,5								
	r	7	4	4,5								
180		7	4	4,5								
	r	7	4	4,5	3,6	1	25,5	14,9	29,8	19,4	1,32	1,54
181		7	4	4,5								
	r	7	4	4,5	3,6	8	29,3	15,2	30,3	19,4	1,51	1,57
182		7	4	4,5								
	r	7	4	4,5	3,6	10	30,0	15,7	31,4	19,4	1,55	1,62
183		7	4	4,5								
	r	7	4	4,5	3,6	8	30,2	15,2	30,4	19,4	1,56	1,57
184		7	4	4,0								
	r	7	4	4,0	3,2	8	27,2	14,1	28,2	20,5	1,32	1,37
185		7	4	3,6								
	r	7	4	3,6	2,9	10	31,2	15,6	31,3	21,7	1,44	1,44
<b>Mittelwert Faktor</b>											2,77	2,70

### 5.7 Gegenüberstellung der Kontaktlängen des FE-Modells mit den Kontaktlängen nach der Theorie der Hertz'schen Pressung

In der folgenden Gegenüberstellung wurde bei einer Variation der Bodensteifigkeit die Kontaktlänge mittels FE-Berechnung des ABAQUS-Modells unter Annahme eines linear-elastischen Bodenmodells beziehungsweise eines elasto-plastischen Modells ermittelt. Zum Vergleich wurde die Kontaktlänge zusätzlich mit Hilfe der Hertz'schen Pressung berechnet (siehe Formel (28) in Kapitel 4.1).

Die Variation der Bodensteifigkeit erfolgte zwischen 10 und 50 MN/m<sup>2</sup> in 10er Schritten. Zusätzlich wurden die Werte bei 1 MN/m<sup>2</sup> und 100 MN/m<sup>2</sup> berechnet. Beim elasto-plastischen Modell war die Berechnung für E = 1 MN/m<sup>2</sup> nicht möglich. Stattdessen wurde das Ergebnis für E = 5 MN/m<sup>2</sup> angeführt.

Da sich die Setzungsmulde inklusive Bugwelle erst im elasto-plastischen Modell ausbilden kann, sind die höheren Werte gegenüber den Ergebnissen der rein linear-elastischen Berechnung beziehungsweise der Hertz'schen Pressung zu erklären. Dies ändert allerdings trotzdem nichts an der Tatsache, dass die Kontaktlänge auch mit der Berechnung im elasto-plastischen Modell gegenüber den Ergebnissen der Messfahrten unterschätzt wird. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Untergrund in allen zugrunde gelegten Modellen als Kontinuum angenommen wird und nicht wie in der Realität als granulares Medium. Der Unterschied in absoluten Werten zwischen den Modellen (in

Abbildung 5-12 als „Fehler“ bezeichnet) ist bei geringen E-Moduln größer als bei steiferen Untergrundverhältnissen. Bei allen drei Berechnungen besteht als funktionaler Zusammenhang zwischen dem E-Modul und der Kontaktlänge eine Wurzelfunktion.

Tabelle 5-6: Gegenüberstellung FE-Modell (linear-elastisch und elasto-plastisch) mit Hertz'scher Pressung

<i>E</i> [MN/m <sup>2</sup> ]	<i>Kontaktlänge</i>		
	linear elastisch [cm]	elasto-plastisch [cm]	Hertz'sche Pressung [cm]
1	35,5	-	27,8
5	-	17,9	12,4
10	11,0	13,9	8,8
20	8,0	9,9	6,2
30	6,5	7,7	5,1
40	5,2	6,5	4,4
50	4,7	5,7	3,9
100	3,5	3,9	2,8

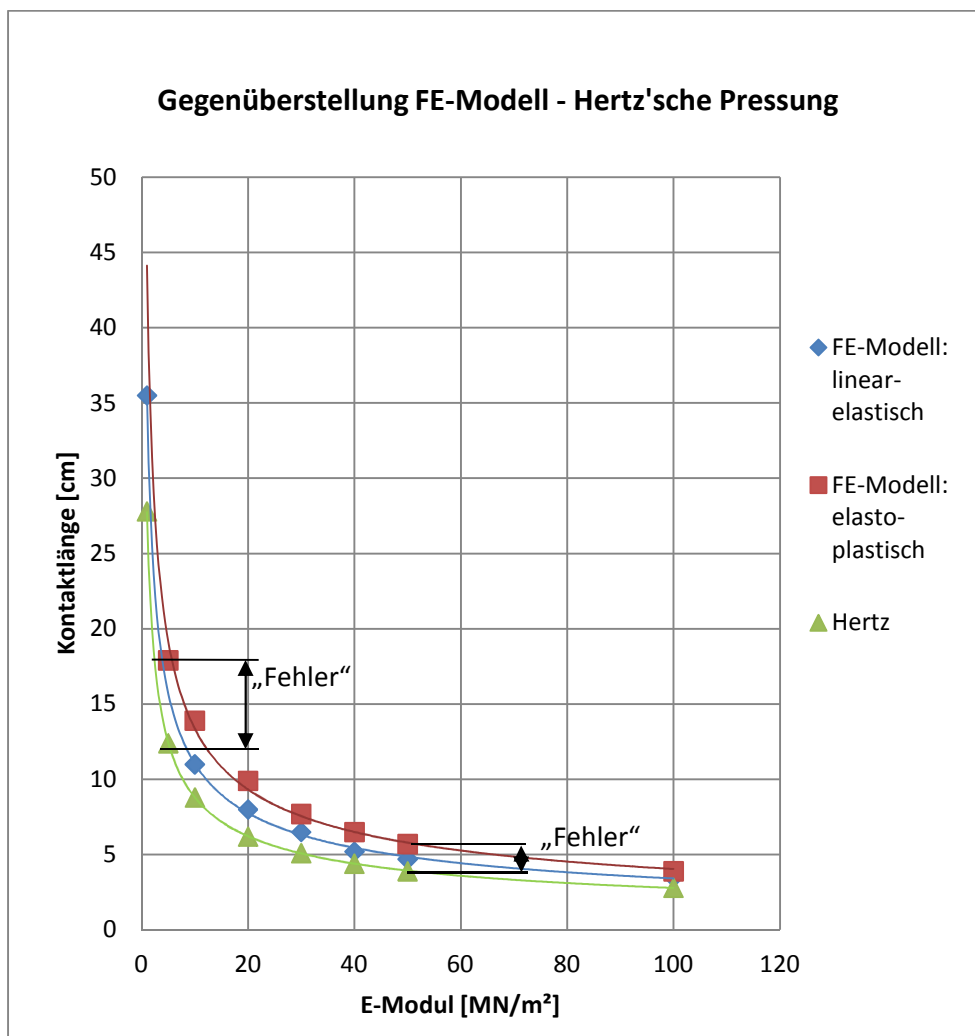


Abbildung 5-12: Gegenüberstellung FE-Modell – Hertz'sche Pressung

## 6 Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

Nach Auswertung und Durchsicht der Messergebnisse kann die Funktionstüchtigkeit des Pfeifensystems als gegeben betrachtet werden. Der Zusammenhang zwischen gemessener Kontaktlänge und der Verdichtung des Bodens ist trotz teilweise großer Streuung der Messergebnisse eindeutig zu erkennen, jedoch bedarf es einiger Messfahrten, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Dies ist auch der Grund, warum die Änderungen der Kontaktlänge bei verschiedenen Einstellungen, wie zum Beispiel der Geschwindigkeit oder der Oszillationsfrequenz, nicht genauer herausgearbeitet werden konnten, da zu wenig Messfahrten durchgeführt wurden, bei denen diese Parameter variiert wurden. Die erhaltenen Ergebnisse werden trotzdem in diesem Kapitel angeführt, da trotz großer Streuung oftmals eine Tendenz zu erkennen ist.

### 6.1 Zunahme des E-Moduls

Wie erwartet, konnte durch die kontinuierlichen Messungen mit der dynamischen Lastplatte nach jeder Messfahrt die Zunahme der Steifigkeit des Bodens gemessen werden, wie man in Abbildung 6-1 gut sehen kann. In dieser Abbildung wurde der E-Modul, welcher aus dem dynamischen Verformungsmodul berechnet wurde (siehe Gleichung (9) in Kapitel 3.4), für alle Fahrten auf Spur 2 (insgesamt 55 Fahrten) dargestellt. Natürlich sind auch hier größere Streuungen zu erkennen, die Tendenz einer zunehmenden Verdichtung (hier dargestellt durch eine polynomische Trendlinie 2. Ordnung) ist allerdings eindeutig erkennbar.

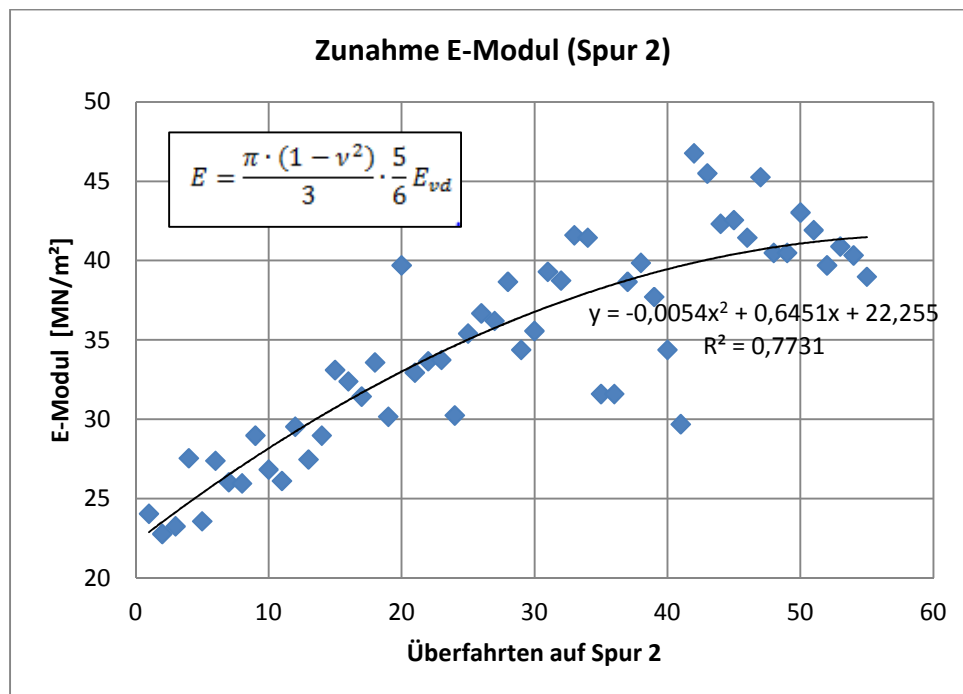


Abbildung 6-1: Zunahme E-Modul (Spur 2) berechnet aus dem  $E_{vd}$  des dynamischen Lastplattenversuches

## 6.2 Zusammenhang E-Modul – Kontaktlänge

Ein zentraler Punkt der Auswertung war es, den Zusammenhang zwischen der Steifigkeit des Bodens und der Kontaktlänge zwischen Bandage und Boden herauszuarbeiten.

Abbildung 6-2 zeigt die zunehmende Verdichtung mit Zunahme der Anzahl an Fahrten auf Spur 2, auf der insgesamt 55 Fahrten durchgeführt wurden. Der E-Modul, ermittelt nach jeder Messfahrt mit Hilfe der dynamischen Lastplatte, steigt sukzessive an, wie bereits in Abschnitt 6.1 gezeigt wurde. Die gemessene Kontaktlänge hingegen wird mit der steigenden Anzahl an Überfahrten und somit zunehmender Verdichtung immer kleiner. Die Streuungen sind ebenfalls gut zu erkennen und werden auch durch das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  angegeben. Um die Tendenz besser darzustellen, wurde zu den Messungen des E-Moduls eine polynomische Trendlinie 2. Ordnung hinzugefügt, bei der zugehörigen Trendlinie für die Kontaktlänge handelt es sich um eine logarithmische Funktion.

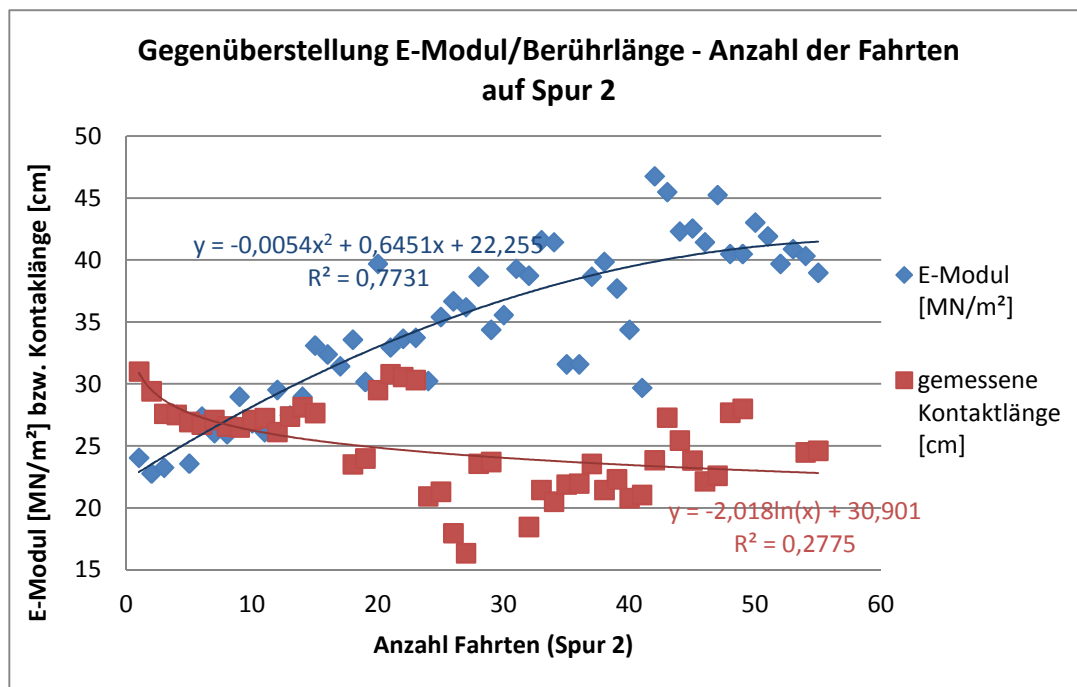


Abbildung 6-2: Gegenüberstellung von E-Modul (aus  $E_{vd}$  von dynamischer Lastplatte) und Kontaktlänge (gemessen)

Abbildung 6-3 zeigt den Zusammenhang zwischen E-Modul (ermittelt aus dem  $E_{vd}$  der dynamischen Lastplattenversuche gemäß Gleichung (9) in Kapitel 3.4) und gemessener Kontaktlänge für alle durchgeführten Fahrten, also auf drei verschiedenen Untergrundverhältnissen. Wenngleich man eine hohe Streuung registriert, erkennt man deutlich die drei verschiedenen Bodenarten (links die Spuren 6-7 auf weichem Untergrund, in der Mitte die Spuren 1-4 auf sandigem Kies und die Spur 5 auf steifem Untergrund ganz rechts). Die meisten Fahrten wurden auf den Spuren 1-4 durchgeführt. Hier kann man eine größere Streuung der Ergebnisse feststellen, da es auch zu einer Verdichtung und somit zu einer Änderung des E-Moduls und der Kontaktlänge kam. Bei den weichen Spuren 6-7 kann man keine Verdichtung feststellen, da die dynamische Anregung der Walze und die Lastplattenversuche aufgrund des Porenwasserdrucks ein Hochpumpen des Wassers im Boden zur Folge hatten und somit der Boden scheinbar weicher wurde. Das steife Planum auf Spur 5 war so stark verdichtet, dass eine 10 t Walze keine weitere Verdichtung mehr erzielen konnte, weshalb es

## 6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

auch hier zu keiner Änderung des E-Moduls mehr kam. Wie schon in Abbildung 6-2 für Spur 2 gezeigt, kam es bei zunehmender Verdichtung (also bei Zunahme des E-Moduls) zu einer Reduzierung der Kontaktlänge. Dies wird durch eine Trendlinie als Potenzfunktion in der Abbildung verdeutlicht.

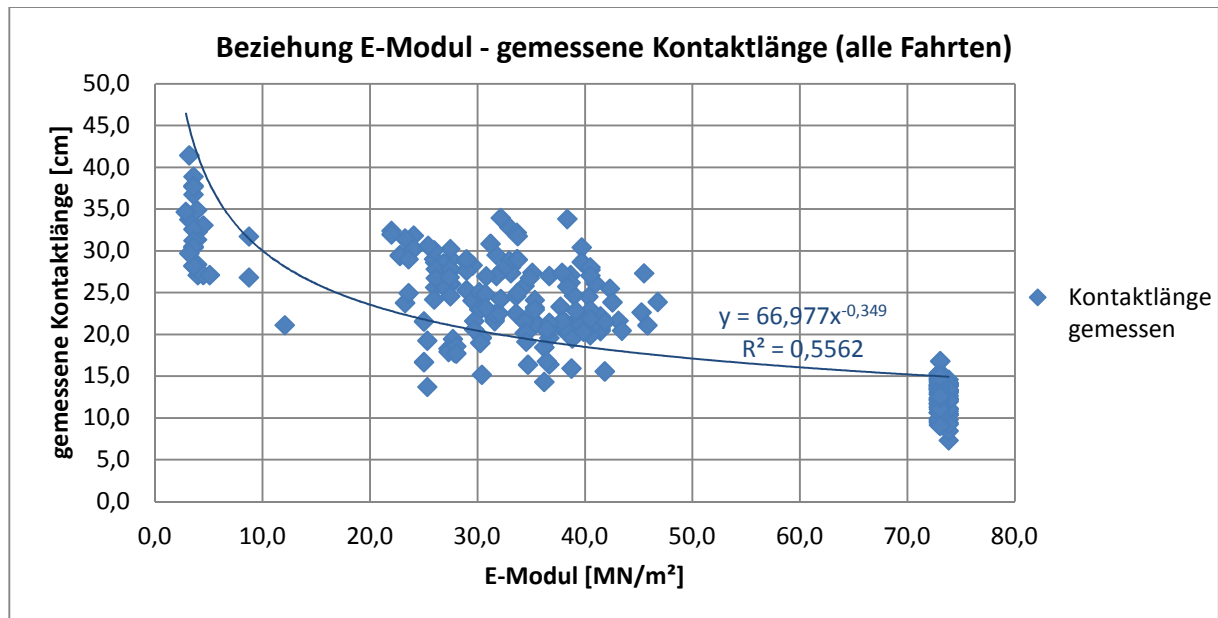


Abbildung 6-3: Beziehung E-Modul (ermittelt aus dem  $E_{vd}$  der dynamische Lastplatte) – gemessene Kontaktlänge (alle Fahrten)

### 6.3 Variationen der Einstellungen bei den Messfahrten und Zusammenhang mit der Kontaktlänge

Bei den Messfahrten wurden einige Parameter der Oszillationsanregung variiert. Die Standardeinstellung war 39 Hz mit einer Fahrgeschwindigkeit von 4 km/h. Die Variationen wurden jeweils bei 2-4 Messfahrten durchgeführt. Da die Ergebnisse aber doch markant streuen, müssten mehr Messfahrten durchgeführt werden, um wirklich aussagekräftige Rückschlüsse ziehen zu können. Eine Tendenz kann man dennoch meistens erkennen.

Wie man in Tabelle 6-1 erkennen kann, wurde die Frequenz der Oszillation mit 20, 50 und 70 Hz variiert und die Geschwindigkeit mit 2 und 6 km/h. Jedoch wurde bei den Fahrten mit 6 km/h bei der Rückwärtsfahrt mit 4 km/h zurückgeschoben, weshalb man hier zu keinen Ergebnissen kommt. Außerdem wurden die Rückwärtsfahrten immer statisch durchgeführt, das heißt bei Betrachtung der Variation der Oszillationsfrequenz sind die Rückwärtsfahrten nicht relevant. Des Weiteren gibt es eine Spalte für die Anzahl der Fahrten mit jeweils einer bestimmten Einstellung. Bei den Werten, die hier in der jeweiligen Zeile angegeben sind, handelt es sich um Mittelwerte aus dieser Anzahl an Fahrten mit eben der, in der Zeile beschriebenen, Einstellung. Außerdem kann man in der Spalte „Umdrehungen“ sehen, wie viele „korrekte“ Umdrehungen der Bandage jeweils ausgewertet werden konnten (siehe auch Kapitel 5.2). Hier wird auch deutlich, dass bei einigen Fahrten durch etwaige Störfaktoren ausgewertete Umdrehungen wegfielen und somit das Ergebnis kritisch zu betrachten ist. Zum Beispiel konnten bei der Fahrt auf Spur 2 mit 2 km/h 29 Umdrehungen ausgewertet werden, jedoch lediglich 18 Umdrehungen mit 6 km/h.

6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

Tabelle 6-1: Mittelwerte der Auswertungen bei Vorwärtsfahrt

Anregung	Spur	Geschwindigkeit	Frequenz	Anzahl Fahrten	VORWÄRTSFAHRT						
					Um-	Kontaktlänge	Asymmetrie	Asymmetrie (bereinigt)	Anteil Bug	Anteil Heck	Anteil Bug
					drehungen						
		[km/h]	[Hz]		[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[%]
Oszi	2	4	20	4	16	23,8	-1,9	-0,6	11,3	12,5	47,6
Oszi	2	4	39	15	120	27,2	-0,6	0,8	14,4	12,9	52,8
Oszi	2	4	50	4	18	30,2	-2,1	-0,8	14,3	15,8	47,5
Oszi	2	4	70	4	26	28,5	-7,3	-5,9	8,3	20,2	29,2
Oszi	2	2	39	4	29	25,3	0,5	1,8	14,5	10,9	57,1
Oszi	2	6	39	4	18	27,9	-1,6	-0,2	13,7	14,2	49,1
Oszi	5	4	20	4	58	13,1	-2,6	-1,3	5,3	7,8	40,4
Oszi	5	4	39	10	114	12,0	-2,2	-0,9	5,1	6,9	42,3
Oszi	5	4	50	4	52	13,3	-1,4	-0,1	6,6	6,8	49,2
Oszi	5	4	70	4	52	12,5	-2,7	-1,3	4,9	7,6	39,4
Oszi	5	2	39	4	39	10,3	-0,7	0,6	5,7	4,5	55,9
Oszi	5	6	39	4	30	13,1	-3,0	-1,6	4,9	8,2	37,5
Oszi	6	4	20	2	49	32,0	-0,3	1,0	17,0	15,0	53,2
Oszi	6	4	39	4	55	31,1	-0,3	1,0	16,5	14,5	53,2
Oszi	6	4	50	2	20	38,3	-1,4	0,0	19,1	19,2	49,9
Oszi	6	4	70	2	12	37,6	-1,2	0,1	18,9	18,7	50,3
Oszi	6	2	39	2	34	29,1	-0,1	1,3	15,8	13,3	54,4
Oszi	6	6	39	2	13	37,6	-0,8	0,6	19,4	18,2	51,5

Tabelle 6-2: Mittelwerte der Auswertungen bei Rückwärtsfahrt

Anregung	Spur	Geschwindigkeit	Frequenz	Anzahl Fahrten	RÜCKWÄRTSFAHRT (Bug in Fahrrichtung)						
					Um-	Kontaktlänge	Asymmetrie	Asymmetrie (bereinigt)	Anteil Bug	Anteil Heck	Anteil Bug
					drehungen						
		[km/h]	[Hz]		[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[%]
Oszi	2	4	20	4	11	21,7	2,1	0,8	11,6	10,1	53,6
Oszi	2	4	39	15	63	19,5	2,7	1,4	11,0	8,2	56,6
Oszi	2	4	50	4	10	19,7	1,7	0,3	10,2	9,5	51,7
Oszi	2	4	70	4	19	18,3	3,4	2,1	11,2	7,1	61,4
Oszi	2	2	39	4	22	16,8	3,3	2,0	10,4	6,4	62,1
Oszi	2	6	39	4	6	21,0	2,1	0,7	11,2	9,8	53,5
Oszi	5	4	20	4	43	12,5	0,4	-1,0	5,3	7,2	42,4
Oszi	5	4	39	10	101	11,8	0,5	-0,8	5,1	6,7	43,2
Oszi	5	4	50	4	39	12,0	0,7	-0,6	5,4	6,6	45,1
Oszi	5	4	70	4	39	12,3	0,6	-0,7	5,5	6,8	44,5
Oszi	5	2	39	4	34	9,1	1,1	-0,2	4,4	4,7	48,0
Oszi	5	6	39	4	Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						
Oszi	6	4	20	2	50	29,3	2,6	1,3	15,9	13,4	54,3
Oszi	6	4	39	4	48	27,1	2,6	1,2	14,8	12,3	54,6
Oszi	6	4	50	2	17	32,5	2,0	0,7	17,0	15,5	52,2
Oszi	6	4	70	2	12	31,6	1,6	0,3	16,0	15,5	50,8
Oszi	6	2	39	2	34	25,9	2,3	0,9	13,9	12,0	53,6
Oszi	6	6	39	2	Rückwärtsfahrt mit 4 km/h						



### 6.3.1 Variation der Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeit wurde mit 2 km/h, 4 km/h (Standardeinstellung) und 6 km/h variiert. Darüber hinaus wurden Messfahrten mit einer Beschleunigung über die gesamte Messstrecke von 2 km/h auf 6 km/h durchgeführt, bei denen aber die Kontaktlänge aus auswertungstechnischen Gründen (eine konstante Geschwindigkeit wird benötigt) nicht evaluiert werden konnte. Bei den Fahrten mit 6 km/h wurde diese Geschwindigkeit lediglich bei der Vorwärtsfahrt eingehalten und danach mit 4 km/h zurückgeschoben.

Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 zeigen jeweils für Spur 2 (mittlere Spur), Spur 5 (steife Spur) und Spur 6 (weiche Spur) bei Vorwärts- beziehungsweise Rückwärtsfahrt, dass bei Zunahme der Geschwindigkeit auch die Kontaktlänge größer wird. Bei den Werten der Kontaktlänge handelt es sich um den Mittelwert der Messfahrten, die mit der zutreffenden Einstellung auf der jeweiligen Spur durchgeführt wurden.

Auf allen drei Spuren wurde die Kontaktlänge mit einer Zunahme der Geschwindigkeit größer. Zur Überprüfung dieses Ergebnisses wurden auch nur zusammengehörige Fahrten, das heißt direkt hintereinander stattfindende Fahrten und nicht wie in Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 alle durchgeführten Fahrten, verglichen. Mit dieser Betrachtungsweise kann man davon ausgehen, dass bei den verglichenen Fahrten die Steifigkeit des Untergrundes annähernd die gleiche ist und nicht durch mehrmaliges Überrollen zugenommen hat und somit das Ergebnis verfälscht. Doch auch bei dieser Betrachtung ergibt sich ein nahezu identes Ergebnis.

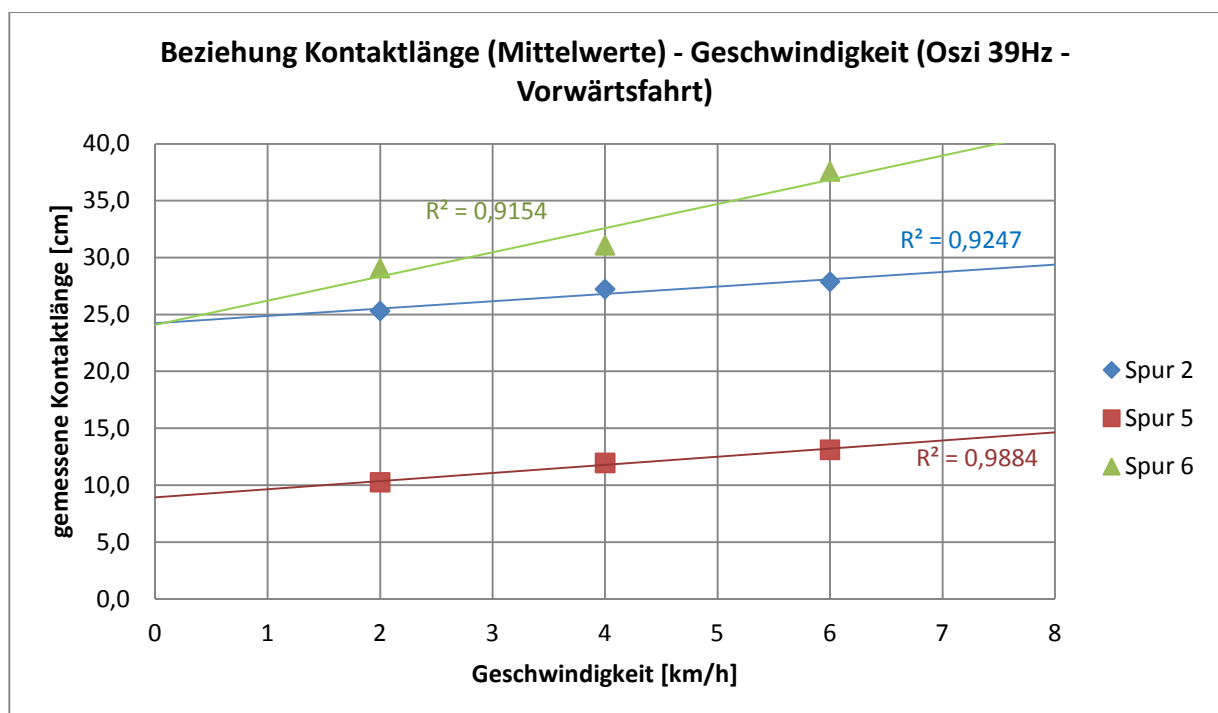


Abbildung 6-4: Beziehung Kontaktlänge (Mittelwerte) – Geschwindigkeit bei Oszillation mit 39 Hz und Vorwärtsfahrt

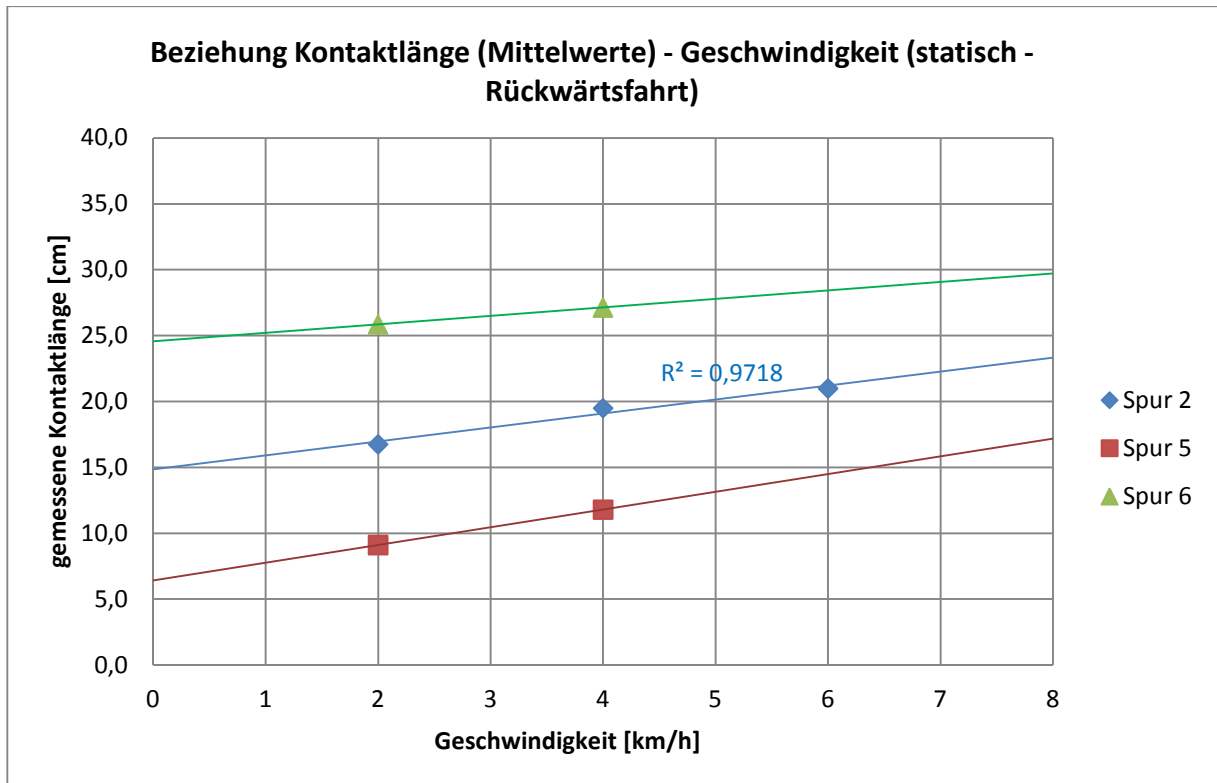


Abbildung 6-5: Beziehung Kontaktlänge (Mittelwerte) – Geschwindigkeit bei statischer Rückwärtsfahrt

### 6.3.2 Variation der Frequenz der Oszillation

In Abbildung 6-6 wird die Frequenz der Oszillationsanregung mit 20 Hz, 39 Hz (StandardEinstellung), 50 Hz und 70 Hz variiert. Auch hier handelt es sich um gemittelte Werte aus allen relevanten Messfahrten. Es ist tendenziell zu erkennen, dass bei Zunahme der Frequenz auch die Kontaktlänge größer wird. Bei den weicheren Spuren 2 und 6 beträgt die Zunahme der Kontaktlänge bei Steigerung der Oszillationsfrequenz von 20 Hz auf 70 Hz ungefähr 5 cm. Lediglich bei der härtesten Spur (Spur 5) tritt dieser Zusammenhang nicht auf, hier bleibt die Kontaktlänge ungeachtet der Frequenz konstant. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass das Gewicht der verwendeten Walze zu gering ist, um auf einem schon im Vorfeld stark verdichteten Untergrund Resultate zu erzielen.

Die Erhöhung der Frequenz der Oszillation führt also zu einem Eingraben der Walze und somit einer größeren Kontaktlänge. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da dieser Effekt auch bei einer stehenden Walze bei Einschaltung der Oszillation und den dadurch hervorgerufenen Rüttelbewegungen der Bandage gut zu beobachten ist.

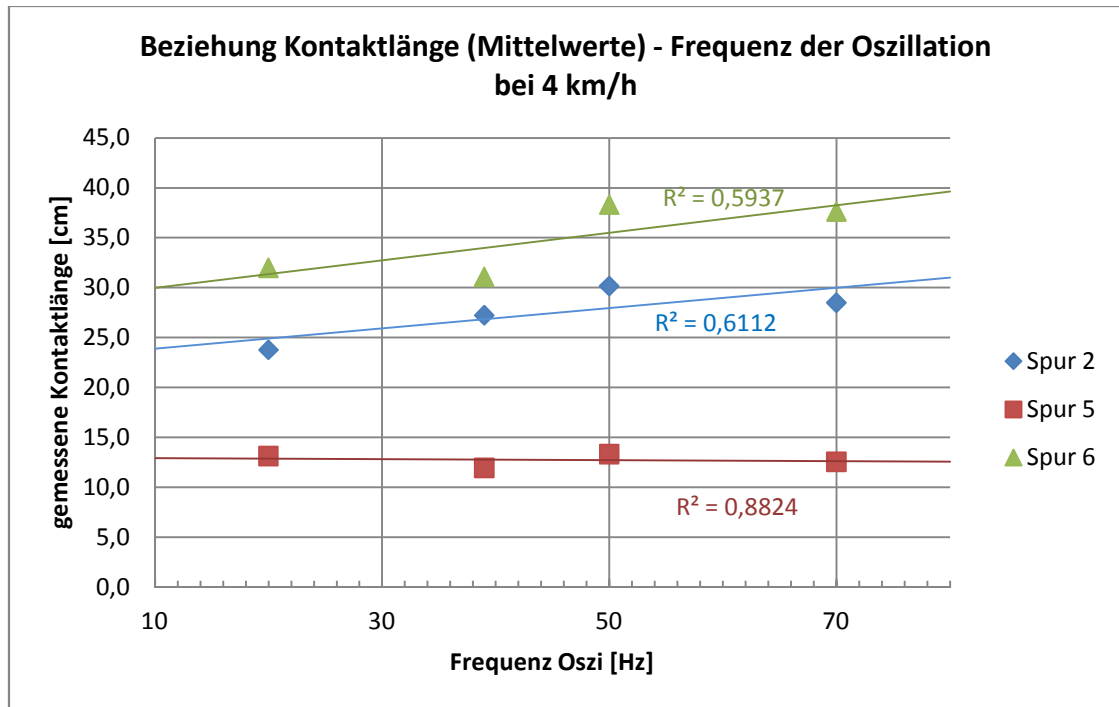


Abbildung 6-6: Beziehung Kontaktlänge (Mittelwerte) – Frequenz der Oszillation bei 4 km/h

#### 6.4 Verhalten der Bugwelle

In Kapitel 5.3 wurde näher auf die Messung der Bugwelle und der damit im Zusammenhang stehenden Asymmetrie eingegangen und die verwendeten Begriffe genauer erklärt. In den folgenden Diagrammen wird die, um den ebenfalls in Kapitel 5.3 erläuterten Messfehler bereinigte, Asymmetrie verwendet.

Ein großer Störfaktor bei der Messung der Asymmetrie ist, dass die schwingungstechnische Entkoppelung von Bandage und Rahmen über Gummipuffer Einfluss auf die Lage des Positionsrades hat. Nachdem sehr viele Messfahrten auf denselben Spuren durchgeführt wurden, wurden die Spuren mit der Zeit sehr unruhig und es entstanden große Unebenheiten (siehe Abbildung 6-7). Dies hat große Wege in den Gummipuffern der Walze zur Folge, was sich wiederum durch Änderungen der Lage des Positionsrades äußert und somit die Ergebnisse der Asymmetriearwertung verfälscht.

Aufgrund dieser Fehlerursache wurde auf manchen Spuren ein negativer Wert für die Asymmetrie gemessen. Eine negative Asymmetrie würde bedeuten, dass die Heckwelle größer ist, als die Bugwelle.



Abbildung 6-7: Unruhiger Untergrund als Grund für Fehler bei der Asymmetrierauswertung

### 6.4.1 Verhalten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

In Abbildung 6-8 und Abbildung 6-9 wird das Verhalten der Asymmetrie gegenüber einer Änderung der Geschwindigkeit (die wieder mit 2 km/h, 4 km/h und 6 km/h variiert wurde) dargestellt. Bei den Fahrten mit 6 km/h wurde allerdings bei der Rückwärtsfahrt nur mit 4 km/h zurückgeschoben. Je höher die Geschwindigkeit gewählt wurde, umso kleiner wurde auch die Asymmetrie und somit die Bugwelle, was sich durchaus mit den Erwartungen deckt, da sich die Bugwelle beim schnelleren Überrollen nicht so deutlich ausbilden kann.

Das Ansteigen der Asymmetrie mit Zunahme der Geschwindigkeit bei der Rückwärtsfahrt auf Spur 6 ist mit der oben genannten Wellenbildung im Untergrund bei oftmaligem Überfahren zu erklären, da es sich bei dieser Spur zusätzlich um den weichen Untergrund handelt, wo dieser Effekt sehr schnell auftritt.

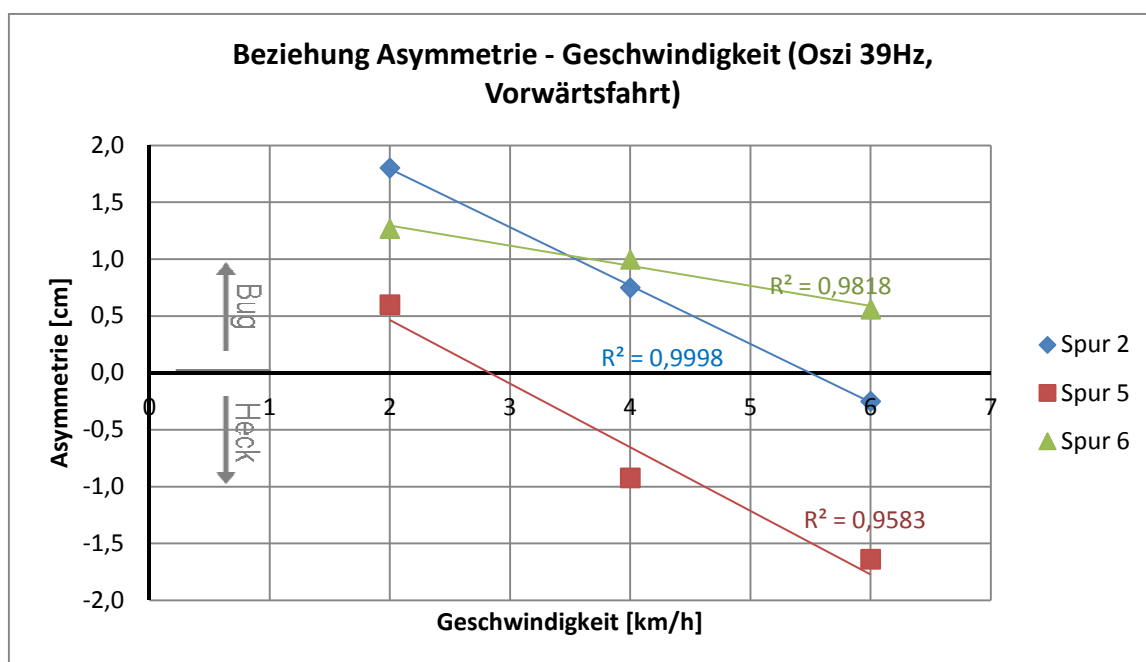


Abbildung 6-8: Beziehung Asymmetrie – Geschwindigkeit bei Vorwärtsfahrt und Oszillation mit 39 Hz

6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

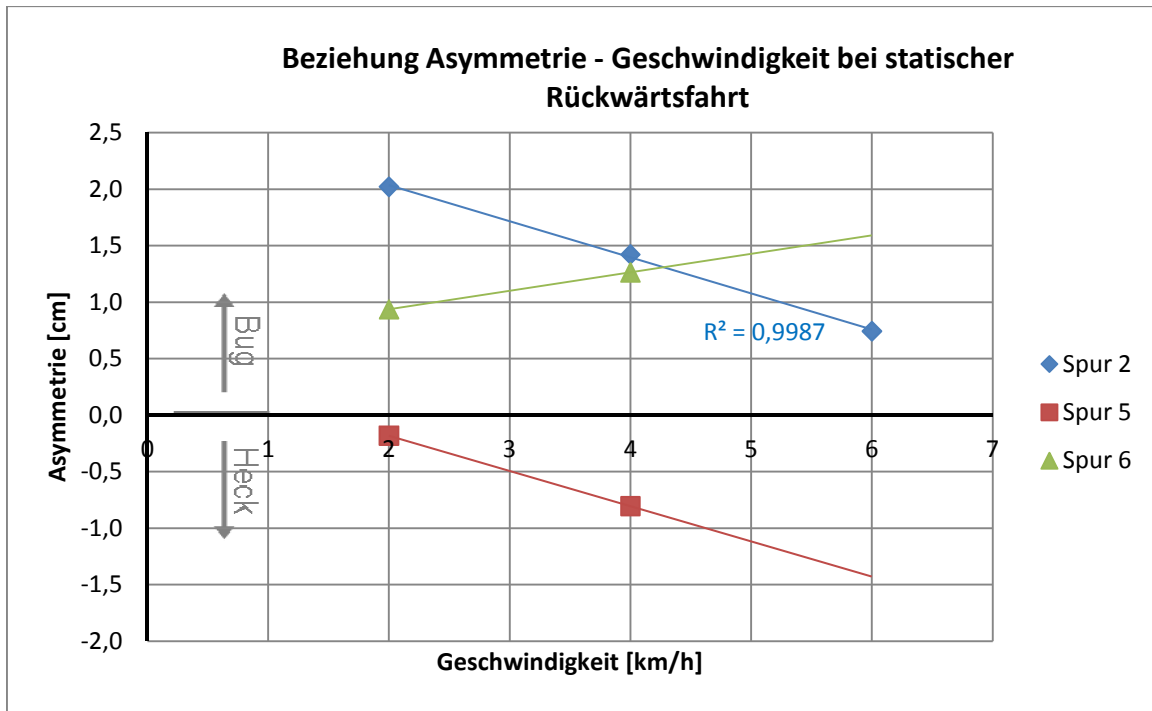


Abbildung 6-9: Beziehung Asymmetrie – Geschwindigkeit auf Spur 2 bei statischer Rückwärtsfahrt

Um auch Aussagen über die Größe der Bugwelle treffen zu können, wurde in Abbildung 6-10 und in Abbildung 6-11 die prozentuelle Größe des „Anteil Bug“ in Bezug auf die gesamte Kontaktlänge verglichen (siehe Abbildung 5-6). Auch hier zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den vorherigen Diagrammen, was die Ausbildung der Bugwelle mit zunehmender der Geschwindigkeit betrifft.

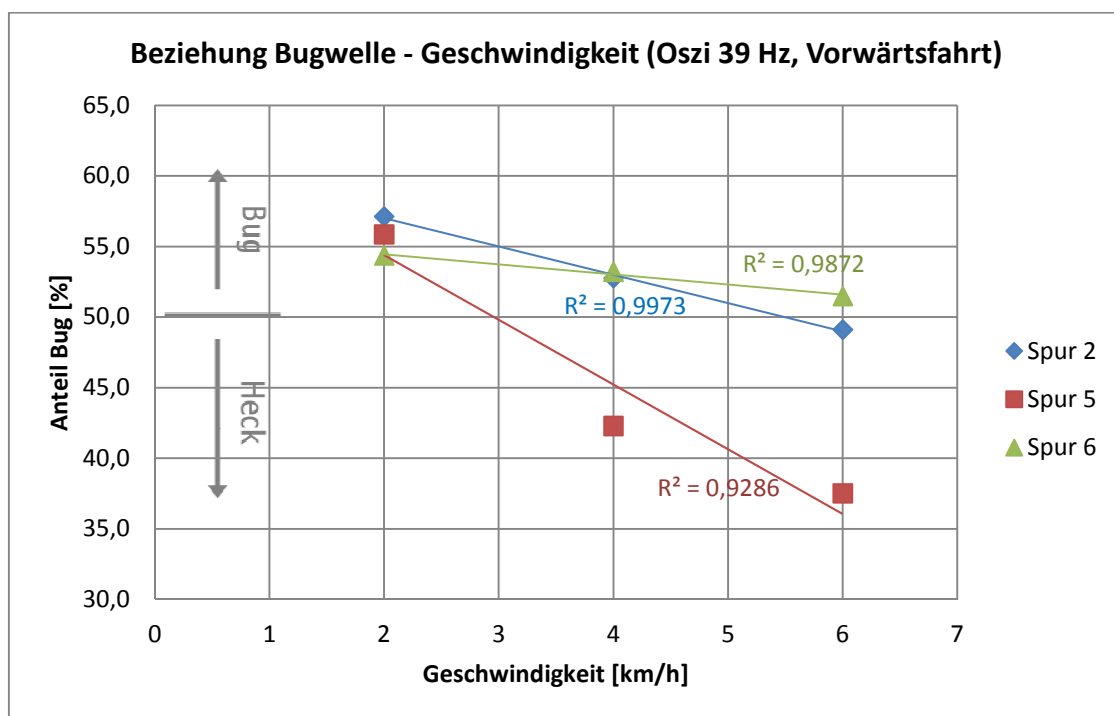


Abbildung 6-10: Beziehung Bugwelle – Geschwindigkeit bei Vorwärtsfahrt und Oszillation mit 39 Hz

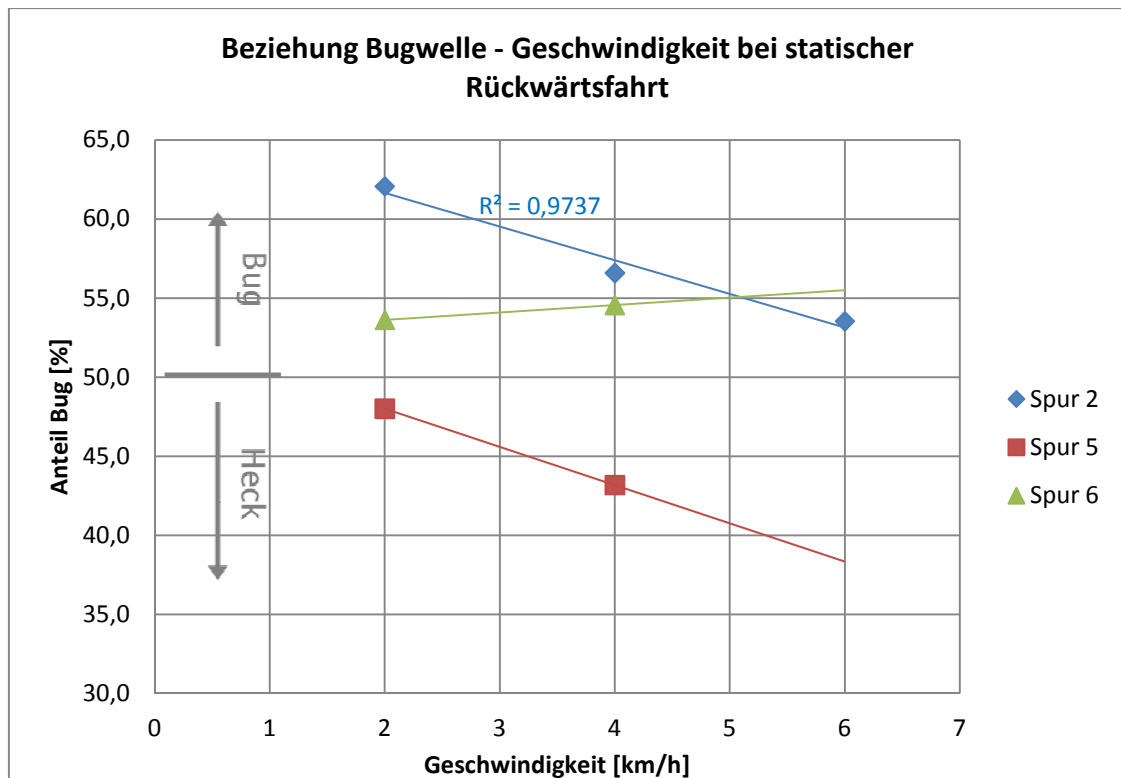


Abbildung 6-11: Beziehung Bugwelle – Geschwindigkeit bei statischer Rückwärtsfahrt

Wie man in Abbildung 6-10 und Abbildung 6-11 erkennt, beträgt der prozentuelle Buganteil teilweise weniger als 50%. Das würde bedeuten, dass der Heckanteil größer ist als der Buganteil und anstatt der erwarteten Bugwelle, welche die Walze vor sich her schiebt, eine Heckwelle nachgezogen werden würde. Diese Ergebnisse sind jedoch zu hinterfragen und ebenfalls auf die Fehleranfälligkeit dieser Messmethode zurückzuführen. Besonders fehlerhaft dürften hier die Messungen auf Spur 5 sein, da hier scheinbar bei allen Fahrten Heckwellen auftreten. Es handelt sich hierbei um den Untergrund mit der größten Steifigkeit, welcher natürlich kleine Unebenheiten aufweist. Aufgrund der großen Steifigkeit des Bodens dringt die Bandage der Walze hier nicht so weit in den Untergrund ein, dass diese Unebenheiten vollkommen ausgeglichen werden und ein sattes Aufliegen der Bandage gewährleistet wäre. Somit ist auch die Pfeifenbohrung in der Bandage teilweise nicht durch den Boden zugedeckt, obwohl dies theoretisch (also bei vollkommen ebenem Untergrund) der Fall sein sollte. Hier könnte eine Ursache des offensichtlich falschen Messergebnisses liegen. Dies äußert sich auch durch die Anzahl an „korrekten Umdrehungen“ die bei ungefähr doppelter Länge der Spur 5 gegenüber Spur 2 dennoch nur leicht größer ist.

#### 6.4.2 Verhalten in Abhängigkeit von der Oszillationsfrequenz

In Abbildung 6-12 und Abbildung 6-13 ist die Asymmetrie, beziehungsweise um genauere Rückschlüsse auf die Geometrie der Kontaktfläche zuzulassen der „Anteil Bug“ in Prozent der gesamten Kontaktlänge, in Abhängigkeit von der eingestellten Frequenz der Oszillation aufgetragen.

Bei den ermittelten Punkten fällt auf, dass die Bugwelle bei 40 bis 50 Hz den größten Wert annimmt und bei geringerer beziehungsweise höherer Frequenz abnimmt. Zur Illustration wurden deshalb polynomische Trendlinien 2. Ordnung in die Diagramme eingefügt.

## 6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

Grundsätzlich sind hier zwei Effekte zu beobachten. Einerseits erhöht sich, wie schon in Kapitel 6.3.2 gezeigt, mit Erhöhung der Frequenz der Oszillation auch die Kontaktlänge. Die Walze „rüttelt“ sich tiefer in den Boden, weshalb aus diesem Grund bei Zunahme der Frequenz auch die Bugwelle größer wird. Andererseits gleitet durch die Zunahme der oszillierenden Bewegungen bei Erhöhung der Frequenz die Bandage zunehmend über den Boden, weswegen die Bugwelle bei Erhöhung der Frequenz leichter überwunden werden kann und somit kleiner wird. Überlagert man diese beiden Effekte, so erhält man ansatzweise die hier dargestellten Kurven. Natürlich sind diese Kurven aufgrund der weiter oben beschriebenen Messungenauigkeiten mit Vorsicht und nur als Tendenz des Verhaltens der Bugwelle in Abhängigkeit von der Frequenz der Oszillation zu betrachten.

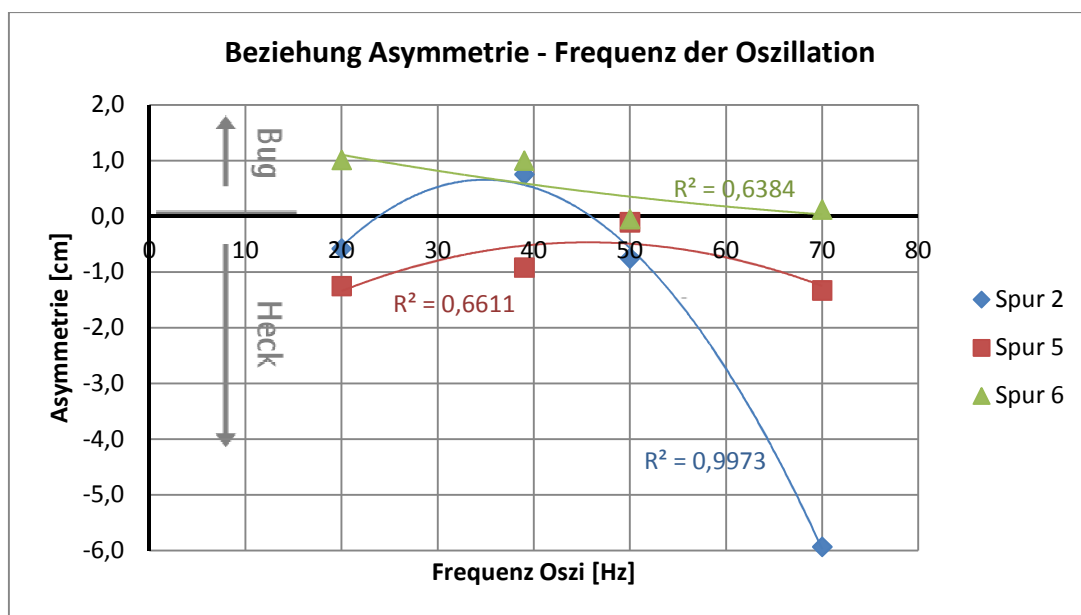


Abbildung 6-12: Beziehung Asymmetrie – Frequenz der Oszillation

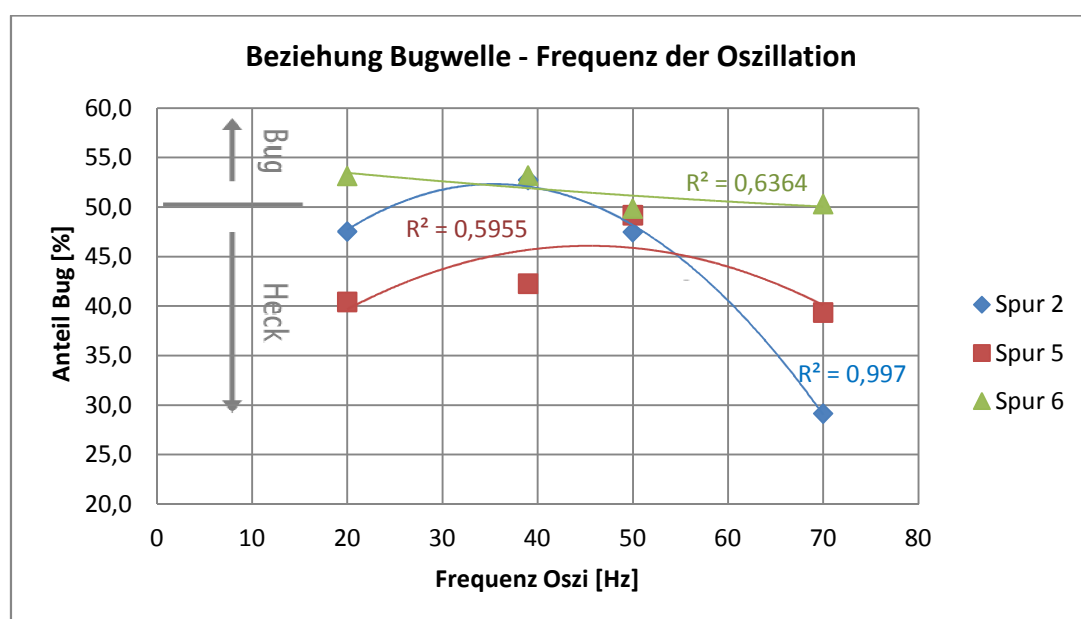


Abbildung 6-13: Beziehung Bugwelle – Frequenz der Oszillation



## 6.5 Vergleich der Messwerte der Kontaktlänge mit den berechneten Werten nach der Theorie der Hertz'schen Pressung

Wie in Kapitel 4.1 nachzulesen ist, behandelt der Sonderfall der Hertz'schen Pressung den einfachen Normalkontakt. Das heißt, es treten nur Normalspannungen auf. Schubspannungen, Rolleffekte etc werden nicht berücksichtigt. Es wird im Prinzip die Kontaktlänge der stehenden Walze ermittelt. Der Parameter der sich von Messfahrt zu Messfahrt ändert, ist der E-Modul des Bodens. Es wird angenommen, dass die Walze auf einem homogenen Kontinuum (also nicht auf einem granularen Medium, wie der reale Boden eines repräsentiert) steht.

Ebenso wenig wird bei den ermittelten Messwerten der Kontaktlänge differenziert, mit welcher Geschwindigkeit, beziehungsweise Oszillations- oder Vibrationseinstellungen gefahren wurde, welche die Kontaktlänge beeinflussen würden. Es wurden zu wenige Variationsmessfahrten durchgeführt, um hier sinnvolle Rückschlüsse aus den Messdaten ziehen zu können, da die Streuung zu groß ist. Somit werden beim Vergleich mit der Hertz'schen Pressung alle Messfahrten „gleich“ behandelt und nur durch den E-Modul des Untergrundes differenziert.

Die Formel für die Kontaktlänge aus der Hertz'schen Pressung lautet wie folgt (siehe auch Gleichung (28)):

$$2l = 2 \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot F \cdot R \cdot (1 - \nu^2)}{\pi \cdot E_{Ers} \cdot b}} \quad (44)$$

Mit:

$$E_{Ers} = 2 \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2}$$

$E_1$  = E-Modul des Bodens

$E_2$  = 21 000 kN/cm<sup>2</sup> (E-Modul von Stahl)

$R$  = 60 cm (Radius der Bandage)

$F$  = 46,8 kN (Achslast)

$b$  = 168 cm (Breite der Bandage)

$\nu$  = 0,3

Abbildung 6-14 zeigt die Gegenüberstellung der gemessenen Werte der Kontaktlänge mit den berechneten Werten der Kontaktlänge mit Hilfe der Hertz'schen Pressung. Nach jeder Fahrt wurde der E-Modul aus dem dynamischen Verformungsmodul, welcher mit der dynamischen Lastplatte ermittelt wurde, berechnet und eben dieser Messfahrt zugeschrieben, nach der er ermittelt wurde. Mit diesem E-Modul wurde nun die Kontaktlänge mittels Berechnung mit der Hertz'schen Pressung (rot) sowie die gemessene Kontaktlänge (blau) aufgetragen. Da sich die reale Schüttung an ihrer Oberfläche weicher verhält als die Hertz'sche Pressung anhand des E-Moduls postuliert, ergibt sich der deutliche Unterschied der Werte. Man erkennt jedoch, dass die Kurve der Hertz'schen Pressung, würde man sie verschieben und den E-Modul sozusagen reduzieren, brauchbare Übereinstimmungen liefert.

## 6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

Um die optimale Verschiebung der Hertz-Kurve zu ermitteln, wurde zunächst für jede Messfahrt ein Faktor  $k$  ermittelt, der die Kontaktlänge der Hertz'schen Pressungs-Berechnung mit der gemessenen Kontaktlänge vergleicht:

$$k = \frac{\text{Kontaktlänge berechnet mit Hertz'scher Pressung}}{\text{Kontaktlänge ermittelt durch Messung}} \quad (45)$$

Der Mittelwert dieses Faktors über alle durchgeführten Messfahrten beträgt laut Tabelle 6-3 für die Vorwärtsfahrten:

$$k_{\text{mittel,vorw}} = 0,25$$

mit einer Standardabweichung von 0,081 und einem Median von 0,23.

Für die Rückwärtsfahrten beträgt der Faktor:

$$k_{\text{mittel,rückw}} = 0,29$$

mit einer Standardabweichung von 0,088 und einem Median von 0,27.

Da in beiden Fällen eine geringe Standardabweichung vorliegt und der Median nahe dem Mittelwert liegt, wird in der weiteren Betrachtung der Mittelwert verwendet.

Ziel dieser modifizierten Berechnung mit Hilfe des Mittelwertes des Faktors  $k$  ist es, die Vereinfachungen, die bei der Berechnung mit der Hertz'schen Pressung angenommen wurden, zu kompensieren und somit praxisnahe Aussagen über die tatsächliche Kontaktlänge treffen zu können.

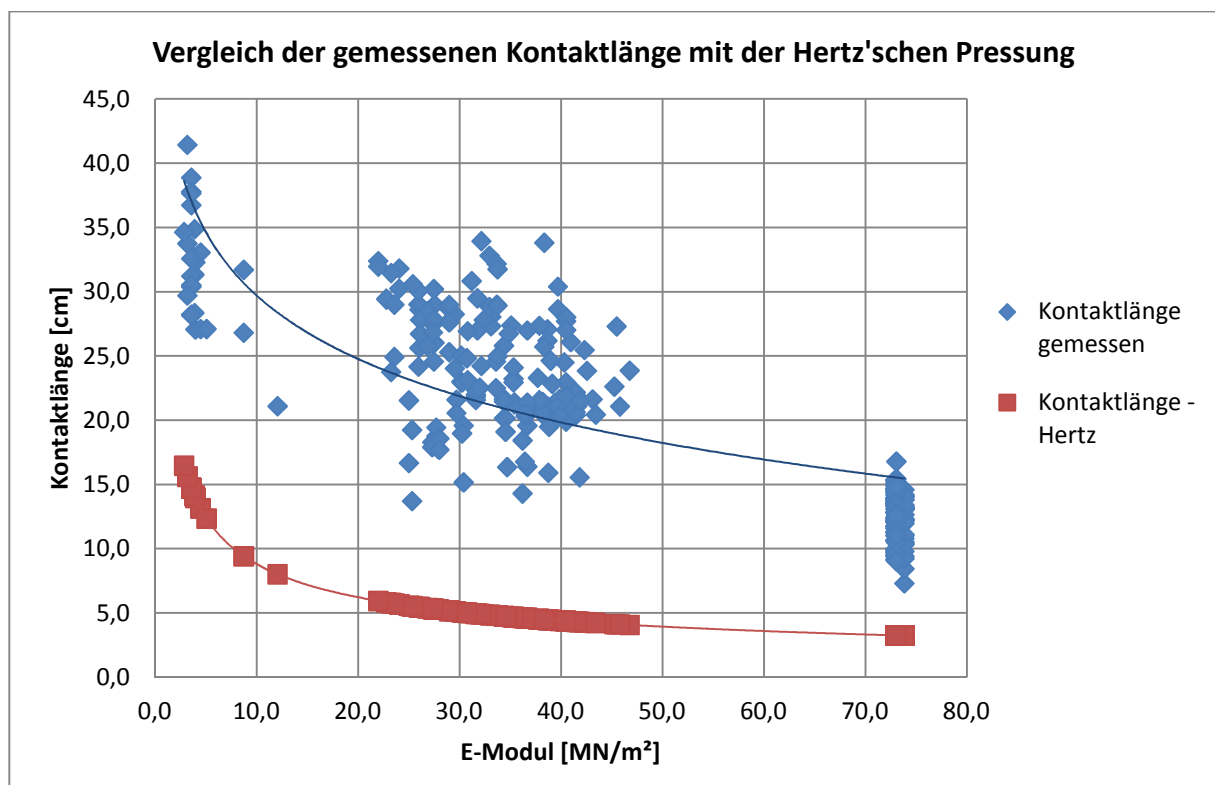


Abbildung 6-14: Vergleich der gemessenen Kontaktlänge mit der Kontaktlänge gemäß Hertz'scher Pressung

## 6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

In Abbildung 6-15 ist dieser Faktor für jede Messfahrt in Bezug auf den E-Modul aufgetragen. Man kann erkennen, dass der Faktor bei den Messfahrten auf den Spuren 1-4 am kleinsten ist und bei den Messfahrten auf der steifen Spur 5 beziehungsweise auf den weicheren Spuren 6-7 ansteigt. Die polynomische schwarze Trendlinie ist zur Veranschaulichung der Tendenz aufgetragen worden. Die Abweichungen vom Mittelwert, der als rote Linie dargestellt wird, sind teilweise groß. Hier erkennt man, dass es eigentlich eines vom E-Modul abhängigen Faktors bedarf, um die Kurve der Ergebnisse der Hertz'schen Pressung an die Messergebnisse anzupassen.

Die gleiche Erkenntnis zieht man aus Abbildung 6-16, in der die gemessenen Werte den berechneten Werten der Kontaktlänge, die sich auf den E-Modul aus den Versuchen mit der dynamischen Lastplatte beziehen, gegenübergestellt werden (blaue Punkte). Zusätzlich wurde der Mittelwert des  $k$ -Faktors ( $=0,25$ ), der in (45) definiert ist, als rote Linie aufgetragen, wodurch man erkennt, dass ein skalarer Faktor zur genaueren Fehlerkorrektur nicht ausreicht.

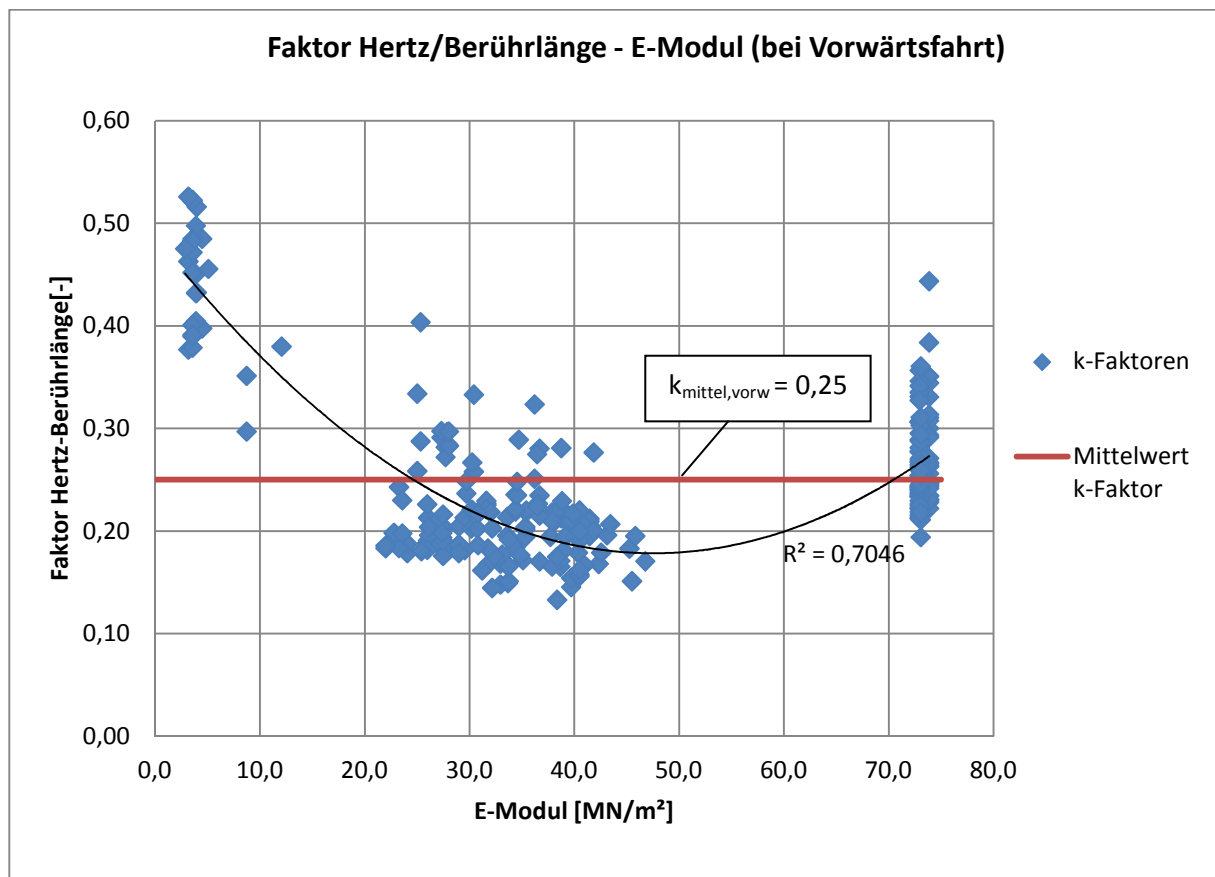


Abbildung 6-15: Faktor Hertz/Kontaktlänge – E-Modul bei Vorwärtsfahrt

6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

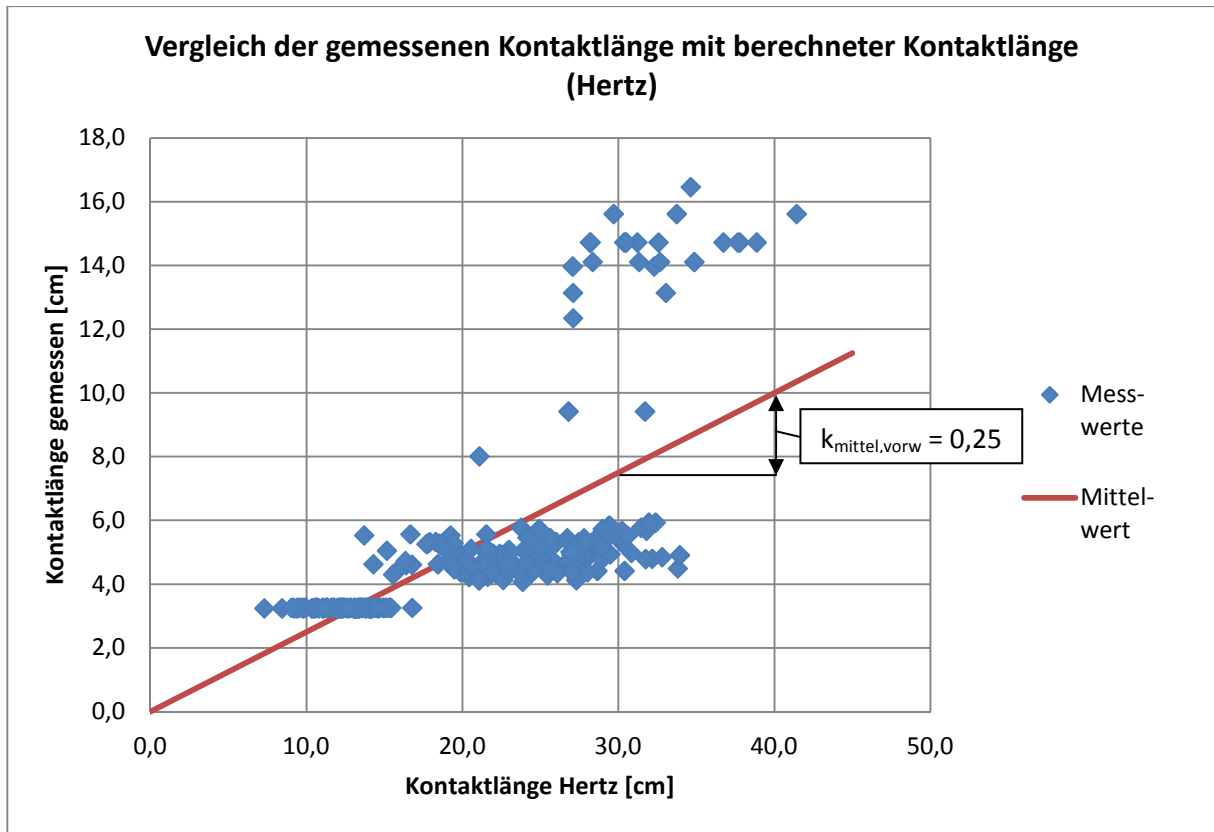


Abbildung 6-16: Vergleich der gemessenen Kontaktlänge mit der nach Hertz berechneten Kontaktlänge mit Hilfe der E-Modul Werte (berechnet aus dem  $E_{vd}$  der dynamischen Lastplattenversuche)

Tabelle 6-3 zeigt nochmals die ermittelten Werte der Kontaktlänge, sowie in den grauen Spalten für jede Messfahrt einzeln, die berechneten Werte der Kontaktlänge mittels Hertz'scher Pressung, den oben beschriebenen Faktor  $k$ , sowie auch den mittels Hertz'scher Pressung ermittelten Wert dividiert durch den Mittelwert dieses Faktors  $k$  über alle Messfahrten (=0,25 bei Vorwärtsfahrt).

6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

Tabelle 6-3: Vergleich der gemessenen Kontaktlänge mit der Kontaktlänge gemäß Hertz'scher Pressung

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	Anregung	Frequenz	E <sub>vd</sub>	E	VORWÄRTSFAHRT				RÜCKWÄRTSFAHRT					
								"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Berührungslänge Hertz	Faktor Hertz - Berührungslänge	Berührl. Hertz / MW-Faktor	"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Berührungslänge Hertz	Faktor Hertz - Berührungslänge	Berührungslänge Hertz* MW-Faktor
001	l	4	4	statisch		38,3	30,4	2	15,2	5,0	0,33	19,98	3	15,2	5,0	0,33	17,18
									38,3	30,4	3	19,6		5,0	0,26	19,98	2
002	l	4	4	statisch		31,5	25,0	3	21,5	5,6	0,26	22,03	5	16,9	5,6	0,33	18,95
									31,5	25,0	5	16,7		5,6	0,33	22,03	3
003	l	4	4	statisch		31,9	25,3	5	19,2	5,5	0,29	21,89	4	16,2	5,5	0,34	18,83
									31,9	25,3	3	13,7		5,5	0,40	21,89	2
004	l	4	4	statisch		35,1	27,9	3	18,5	5,3	0,29	20,87	4	14,6	5,3	0,36	17,95
									35,1	27,9	5	17,8		5,3	0,30	20,87	3
005	l	4	4	statisch		34,9	27,7	5	18,8	5,3	0,28	20,93	5	16,8	5,3	0,31	18,00
									34,9	27,7	3	19,4		5,3	0,27	20,93	3
006	l	4	4	statisch		34,4	27,3	4	18,3	5,3	0,29	21,08	5	17,6	5,3	0,30	18,13
									34,4	27,3	3	17,9		5,3	0,30	21,08	3
007	l	4	4	statisch		35,3	28,0	5	18,6	5,3	0,28	20,81	2	17,0	5,3	0,31	17,90
									35,3	28,0	1	17,7		5,3	0,30	20,81	4
008	l	2	4	Oszi	39	30,3	24,1	5	31,8	5,7	0,18	22,47	1	25,6	5,7	0,22	19,32
									30,3	24,1	1	30,2		5,7	0,19	22,47	1
009	l	2	4	Oszi	39	28,7	22,8	5	29,5	5,8	0,20	23,08	2	21,4	5,8	0,27	19,85
									28,7	22,8	5	29,4		5,8	0,20	23,08	2
010	l	2	4	Oszi	39	29,3	23,3	5	31,5	5,8	0,18	22,85	2	18,3	5,8	0,32	19,65
									29,3	23,3	3	23,8		5,8	0,24	22,85	2
011	l	2	4	Oszi	39	34,7	27,6	5	29,0	5,3	0,18	20,99	2	21,0	5,3	0,25	18,05
									34,7	27,6	3	26,0		5,3	0,20	20,99	3
012	l	2	4	Oszi	39	29,7	23,6	5	29,0	5,7	0,20	22,69	3	17,0	5,7	0,34	19,51
									29,7	23,6	2	24,9		5,7	0,23	22,69	2
013	l	2	4	Oszi	39	34,5	27,4	4	27,5	5,3	0,19	21,05	2	18,7	5,3	0,28	18,10
									34,5	27,4	4	26,0		5,3	0,20	21,05	4
014	l	2	4	Oszi	39	32,8	26,0	5	28,6	5,5	0,19	21,59	2	20,0	5,5	0,27	18,57
									32,8	26,0	4	25,6		5,5	0,21	21,59	5
015	l	2	4	Oszi	39	32,7	26,0	5	29,0	5,5	0,19	21,63	2	18,7	5,5	0,29	18,60
									32,7	26,0	4	24,2		5,5	0,23	21,63	4
016	l	2	4	Oszi	39	36,5	29,0	6	27,7	5,2	0,19	20,47	3	18,6	5,2	0,28	17,60
									36,5	29,0	6	25,3		5,2	0,20	20,47	2
017	l	2	4	Oszi	39	33,8	26,8	5	28,5	5,4	0,19	21,27	2	18,7	5,4	0,29	18,29
									33,8	26,8	3	25,8		5,4	0,21	21,27	2
018	l	2	4	Oszi	39	32,9	26,1	6	27,8	5,4	0,20	21,56	4	19,2	5,4	0,28	18,54
									32,9	26,1	5	26,7		5,4	0,20	21,56	2
019	l	2	2	Oszi	39	37,2	29,5	6	28,3	5,1	0,18	20,28	2	15,8	5,1	0,32	17,44
									37,2	29,5	5	24,0		5,1	0,21	20,28	6
020	l	2	2	Oszi	39	34,6	27,5	6	30,2	5,3	0,18	21,02	3	17,5	5,3	0,30	18,08
									34,6	27,5	2	24,6		5,3	0,22	21,02	3
021	l	2	6	Oszi	39	36,5	29,0	5	28,7	5,2	0,18	20,47	3	21,5	5,2	0,24	17,60
									36,5	29,0	3	27,6		5,2	0,19	20,47	3
022	l	2	6	Oszi	39	41,7	33,1	2	28,0	4,8	0,17	19,15					
									41,7	33,1	2	27,3		4,8	0,18	19,15	
023	l	2	2-6	Oszi	39	40,8	30,8										
024	l	2	2-6	Oszi	39	39,6	30,8										
025	l	2	4	Oszi	20	42,3	33,6	5	24,6	4,8	0,20	19,01	2	22,2	4,8	0,22	16,35
									42,3	33,6	3	22,5		4,8	0,21	19,01	3
026	l	2	4	Oszi	20	38,0	30,2	5	25,0	5,1	0,20	20,06	3	23,5	5,1	0,22	17,25
									38,0	30,2	3	23,0		5,1	0,22	20,06	3
027	l	2	4	Oszi	50	50,0	39,7	5	30,4	4,4	0,15	17,49	4	19,0	4,4	0,23	15,04
									50,0	39,7	3	28,7		4,4	0,15	17,49	1
028	l	2	4	Oszi	50	41,5	33,0	6	32,8	4,8	0,15	19,20	2	21,2	4,8	0,23	16,51
									41,5	33,0	4	28,8		4,8	0,17	19,20	3
029	l	2	4	Oszi	70	42,4	33,7	6	32,2	4,8	0,15	18,99	2	18,3	4,8	0,26	16,33
									42,4	33,7	2	29,0		4,8	0,17	18,99	2
030	l	2	4	Oszi	70	42,5	33,8	6	31,7	4,8	0,15	18,97	6	20,1	4,8	0,24	16,31
									42,5	33,8	1	28,9		4,8	0,17	18,97	1
031	l	2	4	Vibro	50	38,1	30,3	4	22,9	5,1	0,22	20,03	3	22,0	5,1	0,23	17,23
									38,1	30,3	4	19,0		5,1	0,27	20,03	4
032	l	2	4	Vibro	50	44,6	35,4	6	21,4	4,7	0,22	18,52	5	20,7	4,7	0,23	15,92
									44,6	35,4	5	21,2		4,7	0,22	18,52	3
033	l	2	2	Vibro	50	46,2	36,7	5	19,6	4,6	0,23	18,19	5	15,5	4,6	0,30	15,65
									46,2	36,7	4	16,4		4,6	0,28	18,19	5
034	l	2	2	Vibro	50	45,6	36,2	5	18,4	4,6	0,25	18,31	5	16,2	4,6	0,29	15,75
									45,6	36,2	6	14,3		4,6	0,32	18,31	4
035	l	2	6	Vibro	50	48,7	38,7	3	20,1	4,5	0,22	17,72					
									48,7	38,7	4	27,1		4,5	0,17	17,72	
036	l	2	6	Vibro	50	43,3	34,4	3	21,7	4,7	0,22	18,79					
									43,3	34,4	3	25,8		4,7	0,18	18,79	
037	l	2	2-6	Vibro	50	44,8	34,4										
038	l	2	2-6	Vibro	50	49,5	34,4										
039	l	2	4	Vibro	20	48,8	38,8	5	21,0	4,5	0,21	17,70	3	21,5	4,5	0,21	15,22
									48,8	38,8	3	15,9		4,5	0,28	17,70	3

6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

Fortsetzung Tabelle 6-3: Vergleich der gemessenen Kontaktlänge mit der Kontaktlänge gemäß Hertz'scher Pressung

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	Anregung	Frequenz	Evd	E	VORWÄRTSFAHRT				RÜCKWÄRTSFAHRT					
								"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Berührungslänge Hertz	Faktor Hertz - Berührungslänge	Berührt. Hertz / MW-Faktor	"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Berührungslänge Hertz	Faktor Hertz - Berührungslänge	Berührungslänge Hertz * MW-Faktor
041	l	2	4	Vibro	40	52,2	41,5	4	20,4	4,3	0,21	17,12	4	20,8	4,3	0,21	14,72
	r	2	4	Vibro	40	52,2	41,5	1	20,6	4,3	0,21	17,12	0	20,0	4,3	0,22	14,72
042	l	2	4	Vibro	40	39,8	31,6	4	21,8	5,0	0,23	19,60	5	20,7	5,0	0,24	16,86
	r	2	4	Vibro	40	39,8	31,6	2	22,0	5,0	0,23	19,60	3	20,4	5,0	0,24	16,86
043	l	2	4	Vibro	60	39,8	31,6	4	21,6	5,0	0,23	19,60	5	20,2	5,0	0,25	16,86
	r	2	4	Vibro	60	39,8	31,6	1	22,4	5,0	0,22	19,60	2	20,1	5,0	0,25	16,86
044	l	2	4	Vibro	60	48,7	38,7	4	21,0	4,5	0,21	17,72	4	19,8	4,5	0,23	15,24
	r	2	4	Vibro	60	48,7	38,7	1	26,2	4,5	0,17	17,72	4	19,0	4,5	0,24	15,24
045	l	2	4	Vibro	30	50,2	39,9	5	21,7	4,4	0,20	17,45	4	19,3	4,4	0,23	15,01
	r	2	4	Vibro	30	50,2	39,9	1	21,3	4,4	0,21	17,45	4	20,0	4,4	0,22	15,01
046	l	2	4	Vibro	30	47,5	37,7	5	23,3	4,5	0,19	17,94	4	17,8	4,5	0,25	15,43
	r	2	4	Vibro	30	47,5	37,7	1	21,3	4,5	0,21	17,94	3	19,7	4,5	0,23	15,43
047	l	2	4	Vibro	40	43,3	34,4	5	21,5	4,7	0,22	18,79	3	19,6	4,7	0,24	16,16
	r	2	4	Vibro	40	43,3	34,4	1	20,2	4,7	0,24	18,79	3	17,8	4,7	0,27	16,16
048	l	2	4	Vibro	40	37,4	29,7	5	21,6	5,1	0,24	20,22	2	18,5	5,1	0,28	17,39
	r	2	4	Vibro	40	37,4	29,7	2	20,6	5,1	0,25	20,22	4	19,8	5,1	0,26	17,39
049	l	2	4	Oszl	39	58,9											
	r	2	4	Oszl	39	58,9	46,8	4	23,9	4,1	0,17	16,11	3	21,1	4,1	0,19	13,86
050	l	2	4	Oszl	39	57,3											
	r	2	4	Oszl	39	57,3	45,5	3	27,3	4,1	0,15	16,34	1	20,8	4,1	0,20	14,05
051	l	2	4	Oszl	39	53,3											
	r	2	4	Oszl	39	53,3	42,3	5	25,5	4,3	0,17	16,94	5	20,4	4,3	0,21	14,57
052	l	2	4	Oszl	39	53,6											
	r	2	4	Oszl	39	53,6	42,6	4	23,8	4,3	0,18	16,89	0	26,3	4,3	0,16	14,53
053	l	2	2	Oszl	39	52,2											
	r	2	2	Oszl	39	52,2	41,5	5	22,2	4,3	0,20	17,12	2	17,4	4,3	0,25	14,72
054	l	2	2	Oszl	39	57,0											
	r	2	2	Oszl	39	57,0	45,3	5	22,6	4,1	0,18	16,38	6	18,7	4,1	0,22	14,09
055	l	2	6	Oszl	39	51,0											
	r	2	6	Oszl	39	51,0	40,5	1	27,7	4,4	0,16	17,32					
056	l	2	6	Oszl	39	51,0											
	r	2	6	Oszl	39	51,0	40,5	5	28,0	4,4	0,16	17,32					
057	l	2	4	Oszl	20	54,2											
	r	2	4	Oszl	20	54,2											
058	l	2	4	Oszl	20	52,8											
	r	2	4	Oszl	20	52,8											
059	l	2	4	Oszl	50	50,0											
	r	2	4	Oszl	50	50,0											
060	l	2	4	Oszl	50	51,5											
	r	2	4	Oszl	50	51,5											
061	l	2	4	Oszl	70	50,8											
	r	2	4	Oszl	70	50,8	40,3	6	24,5	4,4	0,18	17,35	5	19,8	4,4	0,22	14,92
062	l	2	4	Oszl	70	49,1											
	r	2	4	Oszl	70	49,1	39,0	5	24,6	4,5	0,18	17,65	3	18,7	4,5	0,24	15,18
063	l	3	4	Oszl	39	40,0											
	r	3	4	Oszl	39	40,0	31,8	4	29,5	4,9	0,17	19,55	4	22,2	4,9	0,22	16,81
064	l	3	4	Oszl	39	40,8											
	r	3	4	Oszl	39	40,8	32,4	6	27,8	4,9	0,18	19,36	5	20,6	4,9	0,24	16,65
065	l	3	4	Oszl	39	46,2											
	r	3	4	Oszl	39	46,2	36,7	5	27,0	4,6	0,17	18,19	4	19,6	4,6	0,23	15,65
066	l	3	4	Oszl	39	44,5											
	r	3	4	Oszl	39	44,5	35,3	4	23,2	4,7	0,20	18,54	3	19,2	4,7	0,24	15,94
067	l	3	2	Oszl	39	42,5											
	r	3	2	Oszl	39	42,5	33,8	6	25,0	4,8	0,19	18,97	4	17,5	4,8	0,27	16,31
068	l	3	2	Oszl	39	51,6											
	r	3	2	Oszl	39	51,6	41,0	6	26,1	4,3	0,17	17,22	5	18,4	4,3	0,24	14,80
069	l	3	6	Oszl	39	44,2											
	r	3	6	Oszl	39	44,2	35,1	5	27,4	4,7	0,17	18,60					
070	l	3	6	Oszl	39	43,9											
	r	3	6	Oszl	39	43,9	34,9	4	26,7	4,7	0,18	18,66					
071	l	3	4	Vibro	50	51,4											
	r	3	4	Vibro	50	51,4	40,8	5	21,1	4,4	0,21	17,25	5	18,4	4,4	0,24	14,83
072	l	3	4	Vibro	50	47,7	37,9	2	27,4	4,5	0,17	17,91	4	23,8	4,5	0,19	15,40
	r	3	4	Vibro	50	47,7	37,9	5	20,7	4,5	0,22	17,91	4	20,0	4,5	0,23	15,40
073	l	3	4	Vibro	50	46,0											
	r	3	4	Vibro	50	46,0	36,5	5	20,3	4,6	0,23	18,23	5	18,8	4,6	0,25	15,68
074	l	3	4	Vibro	50	49,6											
	r	3	4	Vibro	50	49,6	39,4	5	21,3	4,4	0,21	17,56	5	18,3	4,4	0,24	15,10
075	l	3	4	Vibro	50	48,1	38,2	3	21,4	4,5	0,21	17,83	3	21,1	4,5	0,21	15,33
	r	3	4	Vibro	50	48,1	38,2	4	20,7	4,5	0,22	17,83	5	19,0	4,5	0,24	15,33
076	l	3	4	Vibro	50	51,0	40,5	2	22,9	4,4	0,19	17,32	0	19,4	4,4	0,23	14,89
	r	3	4	Vibro	50	51,0	40,5	4	19,9	4,4	0,22	17,32	4	19,1	4,4	0,23	14,89
077	l	3	4	Vibro	50	49,9											
	r	3	4	Vibro	50	49,9	39,6	4	21,0	4,4	0,21	17,51	3	17,5	4,4	0,25	15,05
078	l	3	4	Vibro	40	47,7											
	r	3	4	Vibro	40	47,7	37,9	5	21,6	4,5	0,21	17,91	4	19,6	4,5	0,23	15,40
079	l	3	4	Vibro	40	54,3											
	r	3	4	Vibro	40	54,3	43,1	4	21,6	4,2	0,20	16,78	3	18,9	4,2	0,22	14,43
080	l	3	4	Vibro	40	49,3											
	r	3	4	Vibro	40	49,3	39,2	5	22,8	4,4	0,19	17,61	5	19,1	4,4	0,23	15,15

6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

Fortsetzung Tabelle 6-3: Vergleich der gemessenen Kontaktlänge mit der Kontaktlänge gemäß Hertz'scher Pressung

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	Anregung	Frequenz	Evd	E	VORWÄRTSFAHRT					RÜCKWÄRTSFAHRT				
								"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Berührlänge Hertz	Faktor Hertz - Berührlänge	Berührl. Hertz / MW-Faktor	"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Berührlänge Hertz	Faktor Hertz - Berührlänge	Berührlänge Hertz* MW-Faktor
[km/h]	[Hz]	[MN/m2]	[MN/m2]	[cm]	[cm]	[-]	[cm]	[cm]	[-]	[cm]							
081	l	3	4	Vibro	40	52,7	41,9	1	15,6	4,3	0,28	17,04	3	18,5	4,3	0,23	14,65
081	r	3	4	Vibro	40	52,7	41,9	3	21,5	4,3	0,20	17,04	5	18,3	4,3	0,23	14,65
082	l	3	4	Vibro	40	54,7	43,4	4	20,4	4,2	0,21	16,72	1	18,9	4,2	0,22	14,38
083	l	3	4	Vibro	40	57,7	45,8	4	21,1	4,1	0,20	16,28	4	18,0	4,1	0,23	14,00
084	l	3	4	Vibro	40	48,9	38,8	4	19,5	4,5	0,23	17,68	3	17,5	4,5	0,26	15,21
085	l	1	4	Vibro+Oszi	40/39	32,7	26,0	5	30,1	5,5	0,18	21,63	3	18,7	5,5	0,29	18,60
086	l	1	4	Vibro+Oszi	40/39	34,6	27,5	4	27,9	5,3	0,19	21,02	3	19,6	5,3	0,27	18,08
087	l	1	4	Vibro+Oszi	40/39	27,7	22,0	5	32,4	5,9	0,18	23,50	3	19,7	5,9	0,30	20,21
088	l	1	4	Vibro+Oszi	40/39	27,7	22,0	3	32,0	5,9	0,19	23,50	5	20,0	5,9	0,30	20,21
089	l	1	4	Vibro+Oszi	40/39	39,3	31,2	4	30,8	5,0	0,16	19,73	4	19,5	5,0	0,26	16,96
090	l	1	4	Vibro+Oszi	40/39	32,0	25,4	2	30,6	5,5	0,18	21,86	1	25,2	5,5	0,22	18,80
091	l	1	4	Vibro+Oszi	40/39	36,5	29,0	2	29,0	5,2	0,18	20,47	2	20,6	5,2	0,25	17,60
092	l	4	4	Oszi	39	34,5	27,4	1	26,8	5,3	0,20	21,05	2	23,0	5,3	0,23	18,10
093	l	4	4	Vibro	50	40,0	31,8	3	27,0	4,9	0,18	19,55	3	20,6	4,9	0,24	16,81
094	l	4	4	Oszi	39	38,7	30,7	5	24,8	5,0	0,20	19,88	3	16,8	5,0	0,30	17,09
095	l	4	4	Oszi	39	40,3	32,0	3	22,5	4,9	0,22	19,48	2	17,7	4,9	0,28	16,75
096	l	4	4	Vibro	50	50,2	39,9	5	20,3	4,4	0,22	17,45	3	17,0	4,4	0,26	15,01
097	l	4	4	Vibro	50	46,2	36,7	3	21,4	4,6	0,21	18,19	4	16,9	4,6	0,27	15,65
098	l	4	4	Oszi	39	48,3	38,4	5	33,8	4,5	0,13	17,79	1	20,1	4,5	0,22	15,30
098	r	4	4	Oszi	39	48,3	38,4	3	25,7	4,5	0,17	17,79	1	15,0	4,5	0,30	15,30
099	l	4	4	Oszi	39	40,5	32,2	5	33,9	4,9	0,14	19,43	2	27,5	4,9	0,18	16,71
099	r	4	4	Oszi	39	40,5	32,2	5	24,2	4,9	0,20	19,43	3	20,8	4,9	0,24	16,71
100	l	4	4	Oszi	39	45,9	36,5	1	20,6	4,6	0,22	18,25	2	24,4	4,6	0,19	15,70
100	r	4	4	Oszi	39	45,9	36,5	3	16,8	4,6	0,27	18,25	4	15,3	4,6	0,30	15,70
101	l	4	4	Oszi	39	38,8	30,8	3	26,9	5,0	0,19	19,85	3	18,8	5,0	0,27	17,07
101	r	4	4	Oszi	39	38,8	30,8	6	23,1	5,0	0,22	19,85	5	17,8	5,0	0,28	17,07
102	l	4	4	Oszi	39	39,4	31,3	2	23,0	5,0	0,22	19,70	1	19,6	5,0	0,25	16,94
103	l	4	4	Oszi	39	51,0	40,5	3	27,0	4,4	0,16	17,32	4	25,5	4,4	0,17	14,89
103	r	4	4	Oszi	39	51,0	40,5	4	21,9	4,4	0,20	17,32	3	17,5	4,4	0,25	14,89
104	l	4	4	Oszi	39	44,5	35,3	4	24,1	4,7	0,19	18,54	2	26,3	4,7	0,18	15,94
104	r	4	4	Oszi	39	44,5	35,3	3	23,0	4,7	0,20	18,54	1	18,1	4,7	0,26	15,94
105	l	4	4	Vibro	50	43,7	34,7	4	16,3	4,7	0,29	18,71	4	14,9	4,7	0,32	16,09
106	l	4	4	Vibro	50	43,5	34,5	4	20,2	4,7	0,23	18,75	4	25,6	4,7	0,19	16,12
106	r	4	4	Vibro	50	43,5	34,5	2	19,1	4,7	0,25	18,75	3	16,8	4,7	0,28	16,12
107	l	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	6	10,4	3,2	0,31	12,82	4	9,4	3,2	0,34	11,03
107	r	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	2	10,8	3,2	0,30	12,82	1	7,3	3,2	0,44	11,03
108	l	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	1	7,3	3,2	0,44	12,82	2	9,6	3,2	0,34	11,03
108	r	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	2	10,5	3,2	0,31	12,82	5	9,4	3,2	0,34	11,03
109	l	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	2	12,3	3,2	0,26	12,82	4	10,9	3,2	0,30	11,03
109	r	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	3	12,0	3,2	0,27	12,82	2	11,3	3,2	0,29	11,03
110	l	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	9	14,0	3,2	0,23	12,82	7	12,6	3,2	0,26	11,03
110	r	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	4	9,4	3,2	0,34	12,82	4	11,7	3,2	0,28	11,03
111	l	5	2	Oszi	39	93,0	73,9	5	10,3	3,2	0,31	12,82	5	7,9	3,2	0,41	11,03
111	r	5	2	Oszi	39	93,0	73,9	3	8,4	3,2	0,38	12,82	6	7,9	3,2	0,41	11,03
112	l	5	2	Oszi	39	93,0	73,9	8	12,6	3,2	0,26	12,82	5	10,7	3,2	0,30	11,03
112	r	5	2	Oszi	39	93,0	73,9	5	9,8	3,2	0,33	12,82	7	7,8	3,2	0,42	11,03
113	l	5	6	Oszi	39	93,0	73,9	3	14,1	3,2	0,23	12,82					
113	r	5	6	Oszi	39	93,0	73,9	8	13,1	3,2	0,25	12,82					
114	l	5	6	Oszi	39	93,0	73,9	5	13,8	3,2	0,23	12,82					
114	r	5	6	Oszi	39	93,0	73,9	5	13,2	3,2	0,25	12,82					
115	l	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	9	12,2	3,2	0,27	12,82	9	12,5	3,2	0,26	11,03
115	r	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	9	12,3	3,2	0,26	12,82	5	9,8	3,2	0,33	11,03
116	l	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	9	14,6	3,2	0,22	12,82	6	11,7	3,2	0,28	11,03
116	r	5	4	Oszi	39	93,0	73,9	5	9,2	3,2	0,35	12,82	9	11,9	3,2	0,27	11,03
117	l	5	4	Oszi	20	93,0	73,9	8	11,0	3,2	0,29	12,82	7	11,8	3,2	0,27	11,03
117	r	5	4	Oszi	20	93,0	73,9	10	13,0	3,2	0,25	12,82	7	13,5	3,2	0,24	11,03
118	l	5	4	Oszi	20	93,0	73,9	6	11,1	3,2	0,29	12,82	5	11,9	3,2	0,27	11,03
118	r	5	4	Oszi	20	93,0	73,9	9	13,3	3,2	0,24	12,82	7	13,5	3,2	0,24	11,03
119	l	5	4	Oszi	50	93,0	73,9	7	13,3	3,2	0,24	12,82	7	12,8	3,2	0,25	11,03
119	r	5	4	Oszi	50	93,0	73,9	8	13,1	3,2	0,25	12,82	5	12,4	3,2	0,26	11,03
120	l	5	4	Oszi	50	93,0	73,9	9	13,8	3,2	0,23	12,82	6	13,4	3,2	0,24	11,03
120	r	5	4	Oszi	50	93,0	73,9	6	14,2	3,2	0,23	12,82	7	13,6	3,2	0,24	11,03

6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

Fortsetzung Tabelle 6-3: Vergleich der gemessenen Kontaktlänge mit der Kontaktlänge gemäß Hertz'scher Pressung

Mess-fahrt	Kanal	Spur	Geschw	Anregung	Frequenz	Evd	E	VORWÄRTSFAHRT				RÜCKWÄRTSFAHRT					
								"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Berührungslänge Hertz	Faktor Hertz - Berührungslänge	Berührt. Hertz / MW-Faktor	"korrekte" Umdrehungen	Boden-berührung	Berührungslänge Hertz	Faktor Hertz - Berührungslänge	Berührungslänge Hertz * MW-Faktor
121	l	5	4	Oszi	70	93,0	73,9	8	14,0	3,2	0,23	12,82	9	13,5	3,2	0,24	11,03
						93,0	73,9	6	13,1	3,2	0,25	12,82	6	13,8	3,2	0,24	11,03
122	l	5	4	Oszi	70	93,0	73,9	7	13,4	3,2	0,24	12,82	5	13,1	3,2	0,25	11,03
						93,0	73,9	5	12,1	3,2	0,27	12,82	8	14,2	3,2	0,23	11,03
123	l	5	4	Vibro	50	91,9	73,0	7	13,4	3,3	0,24	12,90	5	13,1	3,3	0,25	11,10
						91,9	73,0	6	11,3	3,3	0,29	12,90	8	12,8	3,3	0,26	11,10
124	l	5	4	Vibro	50	91,9	73,0	8	10,6	3,3	0,31	12,90	6	11,6	3,3	0,28	11,10
						91,9	73,0	8	13,3	3,3	0,24	12,90	7	13,3	3,3	0,25	11,10
125	l	5	2	Vibro	50	91,9	73,0	8	9,1	3,3	0,36	12,90	7	9,9	3,3	0,33	11,10
						91,9	73,0	7	11,3	3,3	0,29	12,90	6	10,7	3,3	0,31	11,10
126	l	5	2	Vibro	50	91,9	73,0	9	9,8	3,3	0,33	12,90	7	9,2	3,3	0,36	11,10
						91,9	73,0	7	12,3	3,3	0,26	12,90	8	10,6	3,3	0,31	11,10
127	l	5	6	Vibro	50	91,9	73,0	7	11,7	3,3	0,28	12,90					
						91,9	73,0	6	13,6	3,3	0,24	12,90					
128	l	5	6	Vibro	50	91,9	73,0	9	10,6	3,3	0,31	12,90					
						91,9	73,0	8	14,0	3,3	0,23	12,90					
129	l	5	4	Vibro	20	91,9	73,0	10	9,4	3,3	0,35	12,90	7	12,2	3,3	0,27	11,10
						91,9	73,0	8	13,8	3,3	0,24	12,90	6	13,2	3,3	0,25	11,10
130	l	5	4	Vibro	20	91,9	73,0	8	9,7	3,3	0,34	12,90	7	11,7	3,3	0,28	11,10
						91,9	73,0	8	12,8	3,3	0,25	12,90	7	13,2	3,3	0,25	11,10
131	l	5	4	Vibro	40	91,9	73,0	8	9,5	3,3	0,34	12,90	8	11,0	3,3	0,30	11,10
						91,9	73,0	7	14,2	3,3	0,23	12,90	7	14,3	3,3	0,23	11,10
132	l	5	4	Vibro	40	91,9	73,0	8	10,6	3,3	0,31	12,90	8	11,8	3,3	0,28	11,10
						91,9	73,0	8	13,9	3,3	0,23	12,90	8	14,1	3,3	0,23	11,10
133	l	5	4	Vibro	60	91,9	73,0	9	12,2	3,3	0,27	12,90	7	12,4	3,3	0,26	11,10
						91,9	73,0	7	13,9	3,3	0,23	12,90	7	14,3	3,3	0,23	11,10
134	l	5	4	Vibro	60	91,9	73,0	9	11,8	3,3	0,28	12,90	6	11,5	3,3	0,28	11,10
						91,9	73,0	8	13,7	3,3	0,24	12,90	8	13,8	3,3	0,24	11,10
135	l	5	4	Vibro	40	91,9	73,0	8	12,4	3,3	0,26	12,90	7	11,9	3,3	0,27	11,10
						91,9	73,0	6	14,7	3,3	0,22	12,90	7	13,9	3,3	0,23	11,10
136	l	5	4	Vibro	40	91,9	73,0	6	13,4	3,3	0,24	12,90	8	11,0	3,3	0,30	11,10
						91,9	73,0	8	14,7	3,3	0,22	12,90	8	13,9	3,3	0,23	11,10
137	l	5	2	Vibro	40	91,9	73,0	1	11,0	3,3	0,30	12,90	8	7,8	3,3	0,42	11,10
						91,9											
138	l	5	2	Vibro	40	91,9	73,0	1	12,1	3,3	0,27	12,90	9	8,8	3,3	0,37	11,10
						91,9	73,0	1	11,6	3,3	0,28	12,90	7	11,5	3,3	0,28	11,10
139	l	5	6	Vibro	40	91,9	73,0	7	14,4	3,3	0,23	12,90					
						91,9	73,0	5	14,9	3,3	0,22	12,90					
140	l	5	6	Vibro	40	91,9	73,0	6	15,4	3,3	0,21	12,90					
						91,9	73,0	5	14,5	3,3	0,22	12,90					
141	l	5	4	Vibro	30	91,9	73,0	7	10,0	3,3	0,33	12,90	6	12,9	3,3	0,25	11,10
						91,9	73,0	5	12,8	3,3	0,25	12,90	9	13,1	3,3	0,25	11,10
142	l	5	4	Vibro	30	91,9	73,0	8	12,2	3,3	0,27	12,90	8	11,2	3,3	0,29	11,10
						91,9	73,0	8	13,1	3,3	0,25	12,90	9	12,8	3,3	0,26	11,10
143	l	5	4	Vibro	45	91,9	73,0	8	13,6	3,3	0,24	12,90	9	11,0	3,3	0,30	11,10
						91,9	73,0	8	15,3	3,3	0,21	12,90	5	13,7	3,3	0,24	11,10
144	l	5	4	Vibro	45	91,9	73,0	7	13,5	3,3	0,24	12,90	7	11,5	3,3	0,28	11,10
						91,9	73,0	6	15,1	3,3	0,22	12,90	8	13,6	3,3	0,24	11,10
145	l	5	4	Oszi	39	92,0	73,1	8	13,1	3,3	0,25	12,89	9	12,4	3,3	0,26	11,09
						92,0	73,1	6	13,4	3,3	0,24	12,89	7	13,6	3,3	0,24	11,09
146	l	5	4	Oszi	39	92,0											
						92,0	73,1	6	13,2	3,3	0,25	12,89	6	14,1	3,3	0,23	11,09
147	l	5	4	Oszi	39	92,0	73,1	9	12,4	3,3	0,26	12,89	2	15,5	3,3	0,21	11,09
						92,0	73,1	9	15,4	3,3	0,21	12,89	9	14,6	3,3	0,22	11,09
148	l	5	4	Oszi	39	92,0	73,1	7	12,2	3,3	0,27	12,89	6	12,4	3,3	0,26	11,09
						92,0	73,1	8	12,3	3,3	0,27	12,89	4	13,6	3,3	0,24	11,09
149	l	5	4	Oszi	20	92,0	73,1	7	12,8	3,3	0,26	12,89	9	12,1	3,3	0,27	11,09
						92,0	73,1	6	16,8	3,3	0,19	12,89					
150	l	5	4	Oszi	20	92,0	73,1	7	12,0	3,3	0,27	12,89	8	12,2	3,3	0,27	11,09
						92,0	73,1	5	15,0	3,3	0,22	12,89					
151	l	5	4	Oszi	50	92,0	73,1	8	11,3	3,3	0,29	12,89	1	9,2	3,3	0,35	11,09
						92,0	73,1	7	12,6	3,3	0,26	12,89	7	12,6	3,3	0,26	11,09
152	l	5	4	Oszi	50	92,0											
						92,0	73,1	7	14,9	3,3	0,22	12,89	6	10,4	3,3	0,31	11,09
153	l	5	4	Oszi	70	92,0	73,1	10	10,7	3,3	0,30	12,89	3	9,2	3,3	0,36	11,09
						92,0	73,1	5	12,3	3,3	0,26	12,89	2	10,1	3,3	0,32	11,09
154	l	5	4	Oszi	70	92,0	73,1	5	12,2	3,3	0,27	12,89	2	12,3	3,3	0,26	11,09
						92,0	73,1	6	12,4	3,3	0,26	12,89	4	11,9	3,3	0,27	11,09
155	l	5	2	Oszi	39	92,0	73,1	7	10,5	3,3	0,31	12,89	6	9,9	3,3	0,33	11,09
						92,0	73,1	6	11,1	3,3	0,29	12,89	5	10,5	3,3	0,31	11,09
156	l	5	2	Oszi	39	92,0											
						92,0	73,1	5	9,0	3,3	0,36	12,89					
157	l	5	6	Oszi	39	92,0	73,1	3	12,6	3,3	0,26	12,89					
						92,0	73,1	4	12,4	3,3	0,26	12,89					
158	l	5	6	Oszi	39	92,0											
						92,0	73,1	2	12,6	3,3	0,26	12,89					
159	l	6	4	Oszi+Vibro	39	15,2											
						15,2	12,1	8	21,1	8,0	0,38	31,72	1	25,0	8,0	0,32	27,28
160	l	6	4	Oszi+Vibro	39	11,0	8,7		31,7	9,4	0,30	37,28		26,2	9,4	0,36	32,06
						11,0	8,7		26,8	9,4	0,35	37,28		24,7	9,4	0,38	32,06





## 6 - Interpretation der Ergebnisse der Kontaktlängenmessungen

Frequenz der dynamischen Verdichtung müsste man, um möglichst genaue Ergebnisse zu erhalten, für jede Einstellung eine eigene Kurve für den  $k$ -Faktor ermitteln.

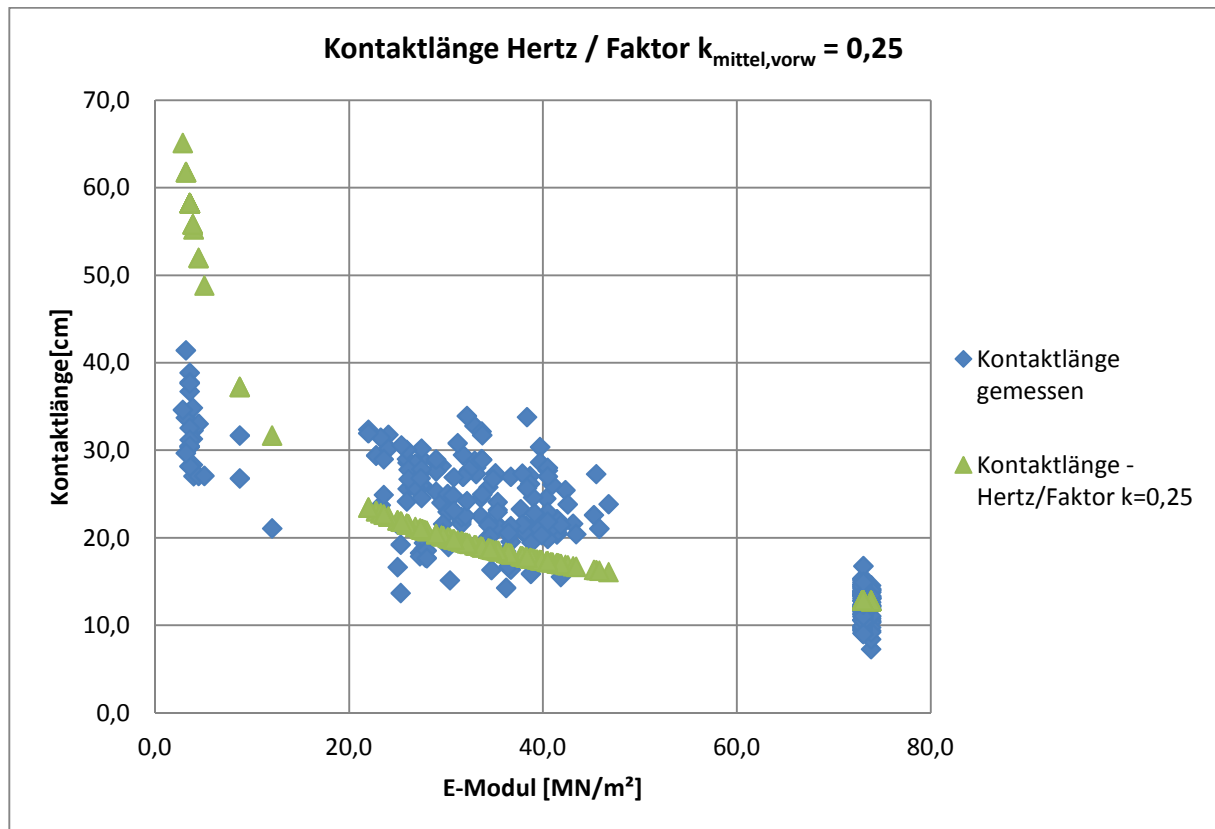


Abbildung 6-17: Vergleich gemessene Kontaktlänge mit Kontaktlänge berechnet und mit Faktor ( $k_{\text{mittel,vorw}} = 0,25$ ) berichtigt

### 6.6 Probleme bei der Messung an der Vibrationsbandage

Wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben, wurde die Oszillationsbandage mit 2 Pfeifen und die Vibrationsbandage mit 4 Pfeifen ausgestattet. Die Auswertung erfolgte jedoch lediglich für die Oszillationsbandage, da sich herausgestellt hat, dass eine akustische Messung an der Vibrationsbandage nicht zielführend war.

Bei den Fahrten mit aktivierter Vibration wird auch die Luftsäule im Pfeifinneren durch die vertikalen Bewegungen der Bandage, welche durch die Vibrationen hervorgerufen werden, in Schwingung versetzt, wodurch sich kein konstanter Ton ausbilden kann und somit die Messungen nicht auswertbar sind. Diese Schwingungen sind direkt in der Vibrationsbandage logischerweise am stärksten. Doch auch bei den Pfeifen in der Oszillationsbandage war bei Fahrten mit eingeschalteter Vibration ein Qualitätsverlust der Messungen merkbar, der sich jedoch nicht so weit ausgebildet hat, dass die gesamten Fahrten unbrauchbar wären.

Leider war die Qualität der Messungen an der Vibrationsbandage auch bei den Fahrten mit nicht eingeschalteter Vibration (also bei statischen Fahrten beziehungsweise bei Fahrten mit Oszillation) sehr schlecht. Die Gründe hierfür konnten leider nicht näher beleuchtet werden, da die Auswertung erst nach der Durchführung der Messfahrten erfolgte und somit dieser Misstand noch nicht bekannt

war. Mögliche Gründe sind Störgeräusche beziehungsweise störende Vibrationen durch die Maschine und den Fahrtrieb.

Es ist davon auszugehen, dass ein Experte auf dem Gebiet der Tonbearbeitung durchaus in der Lage wäre, aus den vorhandenen Messdaten brauchbare Ergebnisse zu gewinnen. Da allerdings die Daten für die Oszillationsbandage in brauchbarer Form ausgewertet werden konnten, wurde auf die Zuhilfenahme eines Experten bei der Auswertung für die Vibrationsbandage verzichtet und somit lediglich die Oszillationsbandage ausgewertet.

### 6.7 Alternativen zur akustischen Methode

Die Vor- und Nachteile der akustischen Messung der Kontaktfläche wurden ausführlich in dieser Arbeit behandelt. Ebenso wurden die Nachteile des Ultraschallsensors in Kapitel 3.3.1 erläutert. Weitere mögliche Alternativen zur akustischen Methode, die im Rahmen einer zweiten Versuchskampagne im Jahr 2014 auch umgesetzt worden sind [19], werden nun im Folgenden angeführt:

#### Wegsensor:

Der gefederte Tauchanker eines Wegaufnehmers steht etwas aus dem Walzenmantel heraus und erkennt den Kontakt, indem er hineingedrückt wird. Gut geeignet für gebundene Materialien, jedoch reagiert der Sensor sehr sensibel auf Verschmutzung und mechanische Überlastung, die beispielsweise häufig beim Durchrutschen der Walze auftritt.

#### Drucksensor:

Wenn das zu verdichtende Material eine glatte Oberfläche bietet, werden Öffnungen im Walzenmantel, aus denen Luft geblasen wird, beim Kontakt geschlossen und der Druckanstieg kann gemessen werden. Diese Methode hat die Vorteile einer Selbstreinigung und ist außerdem ein durchaus robustes Messsystem. Nachteilig wirkt sich die Trägheit der Messung aus.

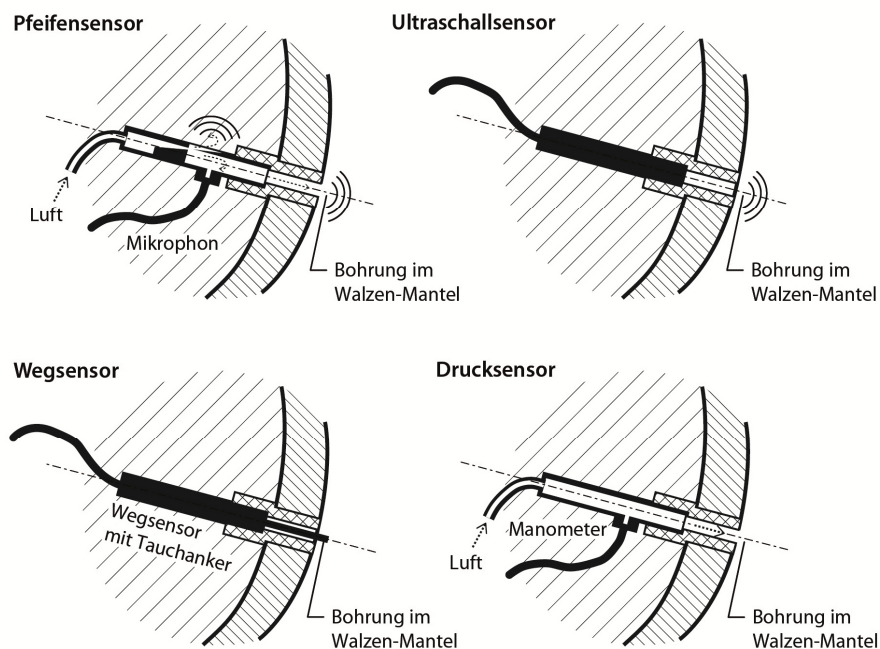


Abbildung 6-18: Verschiedene Messsensoren zur Bestimmung der Kontaktlänge

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Beim durchgeführten Grundsatzversuch von 18. April bis 3. Mai 2012 lag das Augenmerk darauf, möglichst viele Messsysteme zu testen und daraus erste Erkenntnisse zu gewinnen, welche später in den weiteren geplanten Versuchen präzisiert werden sollen.

Die akustische Messung der Kontaktlänge war nur eines von mehreren Messsystemen und somit waren auch die Anzahl und Anordnung der einzelnen Messfahrten nicht direkt auf diese Messung abgestimmt. Rückblickend kann man sagen, dass das Messsystem funktioniert, jedoch auch einigen in dieser Arbeit beschriebenen Störfaktoren unterliegt, die es notwendig machen, eine große Anzahl an Messfahrten durchzuführen, um wirklich repräsentative Ergebnisse zu erhalten.

Dies ist der Grund, warum auf die Änderung der Kontaktlänge bei den Variationen der dynamischen Anregung der Bandage in dieser Arbeit nur wenig eingegangen wurde. Zwei Fahrten pro Einstellung sind eindeutig zu wenig, um genaue Rückschlüsse auf die Auswirkungen auf die Kontaktlänge zu ziehen.

Die theoretischen Grundlagen und die Nachrechnung der Kontaktlänge über die Hertz'sche Pressung unterliegen jeweils der Annahme, dass es sich beim Untergrund um ein Kontinuum handelt. Daher unterscheiden sich die Ergebnisse auch deutlich von den Messwerten, da die Versuchsfahrten auf ungebundenem, also granularem, Untergrund durchgeführt wurden. Zur Behebung dieses „Fehlers“ wurde ein  $k$ -Faktor ermittelt, mit dessen Hilfe eine gute Prognose der Kontaktlänge getroffen werden kann. Außerdem geht man in der Nachrechnung der Kontaktlänge davon aus, dass die Walzenbandage keine Rollbewegungen durchführt, sondern ortsfest auf den Untergrund aufgesetzt wird. Durch den Mangel an durchgeführten Messfahrten mit variiertem Geschwindigkeit kann man aus den Ergebnissen nicht eindeutig sagen, welchen Einfluss die Geschwindigkeit der Rollbewegung auf die Kontaktlänge hat, zumal mit dem akustischen Messsystem auch keine Bestimmung der Kontaktlänge im stehenden Zustand möglich ist. Somit macht es auch wenig Sinn, die Rollbewegung über komplexe Formeln in die Nachrechnung mit aufzunehmen.

Eine praktische Anwendung des akustischen Messsystems im Baualltag würde eine sofortige Auswertung des akustischen Signals erfordern um Echtzeitergebnisse liefern zu können. Da die in den durchgeführten Messfahrten verwendete Sequenz eine hohe Rechenleistung voraussetzt, würde man hier schnell auf Kapazitätsgrenzen stoßen, welche logistisch nur schwer zu lösen wären. Für eine spätere Auswertung, wie sie bei den Versuchsfahrten ausreichend war, hat sich das System als zuverlässig erwiesen und die Erwartungen größtenteils erfüllt.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] *RVS 08.03.02: Erdarbeiten - Kontinuierlicher walzenintegrierter Verdichtungsnachweis*, 1999.
- [2] F. Kopf und D. Adam, „Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) Kalibrierung und Anwendung gemäß RVS 8S.02.6,“ *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, pp. 162-173, 2005.
- [3] F. Kopf, *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bei der Verdichtung von Böden durch dynamische Walzen mit unterschiedlichen Anregungsarten*, Wien : Dissertation, 1999.
- [4] HAMM-AG, *Broschüren, Prospekte und Produktdatenblätter*, Tirschenreuth, Deutschland.
- [5] BOMAG-AG, *Broschüren, Prospekte und Produktdatenblätter*, Boppard, Deutschland.
- [6] D. Adam, *Skriptum - Grundbau und Bodenmechanik I.*, Wien: TU Wien - Institut für Geotechnik, 2010.
- [7] *RVS 08.03.01: Erdarbeiten - Technische Vorschriften und Anleitungen für Erdarbeiten*, 2010.
- [8] *ÖNORM B 4418: Geotechnik - Durchführung von Proctorversuchen im Erdbau*, 2007.
- [9] H. Brandl, *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*, Wien: TU Wien - Institut für Geotechnik, 2006.
- [10] *ÖNORM B 4414-2: Erd- und Grundbau - Untersuchungen von Bodenproben - Bestimmungen der Dichte - Feldverfahren*, 1979.
- [11] *ÖNORM B 4417: Erd- und Grundbau - Untersuchungen von Böden - Lastplattenversuch*, 1979.
- [12] *RVS 08.03.04: Erdarbeiten - Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches*, 2008.
- [13] *ÖNORM EN ISO 22476-2: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 2: Rammsondierungen*, 2005.
- [14] *ÖNORM B 4419: Geotechnik - Besondere Rammsondiervverfahren*, 2006.
- [15] H. Hertz, „Über die Berührung fester elastischer Körper,“ *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92, pp. 156-171, 1881.
- [16] V. L. Popov, *Kontaktmechanik und Reibung*, Berlin [u.a.]: Springer, 2009.

- [17] J. Pistor, D. Adam, F. Falkner und C. Adam, Numerische Simulation zur Wirkungsweise verschiedener Bandagetypen bei der Verdichtung mit Walzen im Erdbau, Wien: TU Wien - Institut für Geotechnik, 2012.
- [18] J. Lysmer und R. L. Kuhlemeyer, „Finite dynamic model for infinite media,“ *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, pp. 859-877, 1969.
- [19] N. C. Sonderegger, *Ermittlung der Verformungsmoduln von Böden durch Auswertung der Kontaktlänge zwischen der Bandage einer Walze und dem Boden*, Wien: TU Wien - Institut für Geotechnik, 2014.
- [20] F. Carter, „The electric locomotive,“ *Proc. Inst. Civil Engn.*, 1916, pp. 201: 221-252.
- [21] O. Reynolds, „On rolling friction,“ *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 1876, pp. 166(I): 155-174.