

Lehrstuhl und Prüfamnt  
für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik  
der Technischen Universität München

Schriftenreihe

Herausgeber: N. Vogt, R. Floss

---

Heft 34

**Untersuchung zur Prognose von  
Anforderungswerten an die  
Beschleunigungsmesswerte  
der FDVK – Methode**

**Klaus Alois Hartmann**

---

München 2002



Lehrstuhl und Prüfamnt  
für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik  
der Technischen Universität München

Untersuchung zur Prognose von Anforderungswerten an die  
Beschleunigungsmesswerte der FDVK – Methode

Klaus Alois Hartmann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. G. Leykauf

Prüfer der Dissertation: 1. Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. R. Floss

2. Univ. Prof. Dr.-Ing. H.-J. Bösch

Die Dissertation wurde am 25.01.2002 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 26.06.2002 angenommen.

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Assistententätigkeit am Lehrstuhl für Grundbau, Boden- und Felsmechanik der Technischen Universität München. Die Arbeit stellt Zusammenhänge von Bodenkennwerten dar, mit denen im Erd- und Verkehrswegebau der Verdichtungszustand von Böden überprüft wird. Die betrachteten Kennwerte ergeben sich einerseits aus Beschleunigungsmessungen an Vibrationswalzen und andererseits aus bodenmechanischen in situ Versuchen zur Verdichtungskontrolle.

Für die stete Förderung der Arbeit, für die Übernahme des Hauptreferats sowie für die Veröffentlichung der Arbeit im Rahmen dieser Schriftenreihe möchte ich ganz herzlich meinem Doktorvater Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. R. Floss danken.

Des weiteren möchte ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. H.-J. Bösch für die Übernahme des Koreferats und vor allem für die hilfreichen Ratschläge bedanken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Kröber danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskripts und für die zahlreichen Hinweise.

Besonders danken möchte ich Herrn Univ. Prof. Dr.-Ing. N. Vogt, der mir nach der Emeritierung meines Doktorvaters den nötigen Freiraum zur Fertigstellung meiner Arbeit gab.

Allen Kollegen des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Boden- und Felsmechanik der Technischen Universität München sei an dieser Stelle für die angenehme Arbeitsatmosphäre gedankt. Wobei ein besonderer Dank meinen ehemaligen Kollegen Herrn Dipl.-Ing. W. Kopton, Herrn Dipl.-Ing. K. Müller und Herrn Dipl.-Ing. S. Irgartinger für die gute Zusammenarbeit, die zahlreichen Diskussionen und die tatkräftige Unterstützung gilt.

Meinen Eltern sowie meinen Brüdern Gunter und Andreas sei für den familiären Rückhalt gedankt. Ruth schulde ich Anerkennung für ihre Geduld und Dank für ihre Ermutigungen und den privaten Beistand.

Meinen Eltern  
und  
Ruth

## Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Zusammenhänge zwischen Kennwerten untersucht, die sich einerseits aus Beschleunigungsmessungen an Vibrationswalzen und andererseits aus bodenmechanischen in situ Versuchen ergeben. Mit diesen Kennwerten wird im Erd- und Verkehrswegebau der Verdichtungszustand von Böden überprüft.

In Sprachgebrauch und Literatur hat sich für die Methode der Verdichtungsprüfung mittels Beschleunigungsmessungen an Vibrationswalzen die Bezeichnung Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) durchgesetzt. Die Vorteile der FDVK- Methode gegenüber herkömmlichen bodenmechanischen in situ Versuchen liegen vor allem darin, dass die Verdichtungsprüfung arbeitsintegriert erfolgen kann und wegen einer kontinuierlichen Messwertaufzeichnung eine flächendeckende Aussage über die Verdichtungsqualität der Grundgesamtheit des Prüfloses ermöglicht. Für den FDVK- Messwert liegen bisher noch keine allgemeingültigen Anforderungswerte vor, mit denen ein Qualitätskriterium für eine ausreichende Verdichtung festgelegt werden könnte. Deswegen muss nach dem derzeitigen Entwicklungsstand der FDVK- Messwert für jede Baustelle, jede Bodenart und jedes Verdichtungsgerät an einem herkömmlichen bodenmechanischen Anforderungswert ( $E_{v2}$ ,  $D_{Pr}$ , usw.) kalibriert werden. Eine Kalibrierung ist mit einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden, was für kleinere und mittlere Baumaßnahmen nicht immer rentabel ist.

Die durchgeführten Auswertungen zeigen als Ergebnis Zusammenhänge auf, aus denen Anforderungswerte für den FDVK- Messwert angegeben werden können. Als Grundlage der Auswertungen wurde eine Datenbank erstellt, in welche Walzenkalibrierungen verschiedener Anwendungsfälle eingetragen wurden. Aus dieser können die Kalibrierdaten nach unterschiedlichen Gesichtspunkten abgefragt werden, wobei sich die Auswertungen auf den FDVK- Messwert *Omega* des Messsystems *Terrameter* der Firma *BOMAG* und den Verformungsmodul  $E_{v2}$  sowie den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  bei grob- und gemischtkörnigen Bodenarten beschränkten.

Damit Einflüsse von Maschinenparametern verschiedener Vibrationswalzen auf den *Omega*- Wert in der Auswertung der Kalibrierdaten berücksichtigt werden konnten, wurde ein Simulationsmodell entwickelt. Mit diesem Modell kann das Bewegungsverhalten einer Vibrationswalze im Verdichtungsbetrieb nachgebildet werden. Ausgehend von den Simulationsergebnissen wurden sämtliche in der Datenbank befindlichen *Omega*- Werte auf das Messwertniveau einer Bezugswalze umgerechnet. Da die *Omega*- Werte zudem von der Fahrgeschwindigkeit der Prüfwalze abhängig sind, wurden diese an eine

Bezugsgeschwindigkeit von  $4 \text{ km/h}$  angepasst. Hierdurch konnten die Kalibrierdaten in Bezug auf die Maschinenparameter und die Fahrgeschwindigkeit weitestgehend homogenisiert werden.

Die in der Datenbank enthaltenen Kalibrierdaten wurden mit Methoden der Regressions- und Korrelationsanalyse ausgewertet, wobei die Möglichkeit der Regressionsrechnung mittels Neuronaler Netze erläutert wurde. Zur Konfiguration eines Ausgangsnetzes wurde ein multipler linearer Regressionsansatz gewählt und erste Auswertungen der FDVK-Kalibrierdaten durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Hauptteil der Varianz der *Omega*-Werte durch den Verformungsmodul  $E_{v2}$  erklärt wird. Zudem kann der Messwertzusammenhang *Omega* -  $E_{v2}$  wesentlich durch einen linearen Ansatz beschrieben werden. Da außerdem zusätzliche Variablen im Regressionsansatz (wie Schichtdicke, Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl) kaum einen Einfluss auf die Zusammenhänge nehmen, wurde die Modellierung eines neuronalen Netz nicht weiter verfolgt.

Des Weiteren wurde die Auswertung der Kalibrierdaten über eine Klassifizierung nach den Versuchsrandbedingungen vorgenommen. Danach kann in Abhängigkeit von Bodenart, Schichteneinfluss, Verdichtungsamplitude und vorgegebenen Verformungsmodul  $E_{v2}$  bzw. Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  ein Qualitätskriterium für den *Omega*-Wert abgeleitet werden. Durch die Ergebnisse dieser Arbeit wird eine einfachere Handhabung der FDVK im Baustelleneinsatz unter wirtschaftlichen Aspekten und den daraus folgenden Vorteilen der kontinuierlichen und arbeitsintegrierten Qualitätssicherung ermöglicht.

Weiterhin wurde ein neues FDVK-Messsystem der Herstellerfirma *BOMAG* vorgestellt und untersucht, wobei sich dieses von den bis jetzt auf dem Markt befindlichen Systemen nur durch ein anderes Verfahren zur Generierung der Messwerte aus dem Beschleunigungssignal unterscheidet. Die Messwerte, welche dieses System liefert, werden mit  $E_{vib}$  bezeichnet und stellen eine physikalische Größe mit der Einheit  $[MN/m^2]$  dar. Zur Messwertbildung von  $E_{vib}$  wurden die Grundlagen erklärt und das FDVK-System im Baustelleneinsatz praktisch erprobt. Der  $E_{vib}$ -Wert zeigt Abhängigkeiten zur Fahrgeschwindigkeit der Vibrationswalze und zur eingestellten Verdichtungsamplitude. Bei konstanten Maschinenparametern werden reproduzierbare  $E_{vib}$  Messwerte erhalten.

## Abstract

This paper deals with the exploration of relationships between values generated from acceleration measurements on compaction rollers and values of standard in situ soil tests. With these values the compaction status of soil is tested.

The method of testing soil compaction by acceleration measurements on compaction rollers is known as surface covering dynamic compaction control (SCCC). In comparison to conventional soil-mechanic in situ tests, the advantages of this method are that the compaction control can be done while the roller is in process, and information about the totality of the testing field is received.

Standards representing a specific quality level for sufficient compaction have not yet been developed for the SCCC-measurement. Hence, at the current stage of development, the SCCC-value has to be calibrated against a characteristic soil-mechanic value on each soil, roller and building site. Calibration requires an enormous amount of time and generates costs, so it is not always profitable for small and medium building sites.

The results of the evaluations performed show relationships between the SCCC- values and characteristic soil-mechanic values. These relationships can be used to derive standard SCCC-values. A database containing calibration data from various situations was prepared as a foundation for the evaluations. The evaluations were limited to the SCCC-value *Omega* from BOMAG's measurement system *Terrameter*, and the deformation-module  $E_{v2}$  as well as the compaction-degree  $D_{Pr}$  for coarse and mixed grained soil.

A simulation model was developed to consider the effects coming from different parameters of the compaction rollers on the SCCC-value. With this simulation model it is possible to replicate the interaction of the rollerdrum and the soil during the compaction process. The results of the simulation are used to adjust all calibration data in the database to a standard level. As the quantity of the *Omega*-value is related to the driving speed of the compaction roller, the calibration data were adjusted to a reference speed of 4 km/h. Hereby, all calibration data were homogenized.

All data from the database were evaluated using regression-analysis and correlation-analysis. The possibility of using neuronal networks to analyse the data was discussed. To configure an initial network, a multiple linear regression model was applied. First evaluation results show that a main part of the variance of the *Omega*-values are explained by the deformation module  $E_{v2}$ . Additionally, the relationship between the *Omega*-value and the  $E_{v2}$  module can be described by a linear approach.

As additional variables have no significant influence on the relationship described, modelling of a neuronal network has not been followed further.

Furthermore, the data were evaluated by classification under fringe conditions of the calibration. A specific quality level of SCCC-values can be received in dependence of soil type, influences of different layers, and machine parameters. Owing to these results, the application of the SCCC system becomes easier and more efficient because of the continuous and integrated quality control.

A new SCCC measurement system from the company *BOMAG* was tested. This new measurement system differs from other systems only in the calculation of SCCC-values from the acceleration values of the roller drum. This new value is designated as  $E_{vib}$  with its physical unit  $[MN/m^2]$ . In this paper the new value is described; First in situ test were implemented. The  $E_{vib}$  value is related to the driving speed of the compaction roller and to the compaction amplitude. With constant machine parameters the  $E_{vib}$  value can be reproduced.

# **Untersuchung zur Prognose von Anforderungen an die Beschleunigungsmesswerte der FDVK - Methode**

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Bodenmechanische Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	Verdichtungseigenschaften grobkörniger Böden (Kies und Sand)	6
2.2	Kennwerte zur Beschreibung der Dichte eines Bodens	9
2.3	Kennwerte zur Beschreibung der Verformungseigenschaften und der Scherfestigkeit von Böden	12
2.3.1	Spannungs- Verformungsverhalten, Zusammendrückbarkeit	12
2.3.2	Scherfestigkeit	14
2.4	Zusammenhang zwischen Dichte- und Tragfähigkeitskennwerten	16
<b>3</b>	<b>Beschleunigungsmessungen an Vibrationswalzen</b>	<b>17</b>
3.1	Vibrationswalzen und deren Bewegungsverhalten im Verdichtungsbetrieb	17
3.1.1	Unterscheidung nach Bauart	17
3.1.2	Unterscheidung nach Erregerprinzip	18
3.1.3	Bewegungsverhalten	20
3.2	Messsysteme	21
3.2.1	Terrameter	21
3.2.2	Omegameter	22
3.2.3	Compactometer	23
3.3	Einflussgrößen auf die Messwertbildung und die Korrelation zu Vergleichswerten	24
3.3.1	Messfläche, Messvolumen	24
3.3.2	Bodenart, Wassergehalt	25
3.3.3	Tiefenwirkung, Schichtdicke, Untergrundeinfluss	27
3.3.4	Maschinenparameter	30
<b>4</b>	<b>Datenbank</b>	<b>32</b>
4.1	Datensammlung, Datenbankaufbau	33
4.2	Anforderungen an das Verdichten	34

<b>5</b>	<b>Simulationsmodell</b>	<b>38</b>
5.1	Simulationsmodell Vibrationswalze	39
5.1.1	Walzenmodell	39
5.1.2	Bodenmodell	41
5.1.2.1	Dynamischer Schubmodul (Einschichtsystem)	44
5.1.2.2	Dynamischer Schubmodul (Zweischichtsystem)	49
5.1.2.3	Querdehnzahl	51
5.1.2.4	Geometrie	53
5.1.3	Analytische Formulierung des Schwingungssystems	56
5.1.3.1	Auflastphase	56
5.1.3.2	Flugphase	57
5.1.3.3	Kriechvorgang im Boden	57
5.1.3.4	Gesamtsystem	58
5.2	Simulation	59
5.2.1	Ableitung von Tragfähigkeits- bzw. Verdichtungskennwerten aus dem Schwingungsverhalten einer Vibrationswalze	61
5.2.2	Simulationsergebnisse	62
5.2.3	Vergleich der Simulationsergebnisse mit Ergebnissen aus der Literatur	67
5.3	Korrekturwerte für die Anpassung der FDVK – Messwerte an eine Bezugsgröße	69
5.3.1	Korrekturwerte zur Berücksichtigung der Maschinenparameter	69
5.3.2	Korrekturwerte zur Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit	73
<b>6</b>	<b>Statistik und Neuronale Netze</b>	<b>75</b>
6.1	Verteilungsfunktion	75
6.2	Regressionsanalyse	76
6.2.1	Lineare Einfachregression aus einem bivariaten Datensatz	79
6.2.2	Schätzung von Standardabweichungen	80
6.2.3	Konfidenzintervalle der Regressionsgerade	80
6.2.4	Lineare Transformation	82
6.3	Korrelationsanalyse	83
6.3.1	Der Korrelationskoeffizient	84
6.3.2	Prüfung auf Vorhandensein einer Korrelation und Test des Regressionskoeffizienten gegen Null	85
6.4	Multiple lineare Regression	88
6.5	Ausreißer	90
6.6	Neuronale Netze	91
6.6.1	Netzart und Netzstruktur	93
6.6.2	Netzwerkfunktion	94
6.6.3	Zielfunktion	95

6.6.4	Aktivierungs- und Transformationsfunktionen	96
6.6.5	Modellbildungsprozess	98
6.6.6	Konfiguration des Ausgangsmodells	101
6.6.7	Ergebnisse des Netzwerktrainings	109
<b>7</b>	<b>Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Messwerten der FDVK und bodenmechanischen Vergleichswerten</b>	<b>110</b>
7.1	Klassifikation der Daten aufgrund ihrer Randbedingungen und Vorgehensweise der Auswertung	111
7.2	Grobkörnige Böden (A)	115
7.2.1	Ergebnisse: Boden A, kleine Amplitude	120
7.2.2	Ergebnisse: Boden A, große Amplitude	124
7.2.3	Gesamtdarstellung der Regressionsfunktionen	126
7.3	Gemischtkörnige Böden (B)	127
7.3.1	Ergebnisse: Boden B, kleine Amplitude	131
7.3.2	Ergebnisse: Boden B, große Amplitude	132
7.3.3	Gesamtdarstellung der Regressionsfunktionen	134
7.4	Gesamtdarstellung der Ergebnisse: Boden A und Boden B	135
7.5	Mögliche Anforderungswerte an den Verdichtungsgrad $D_{Pr}$ und an den Verformungsmodul $E_{v2}$	137
<b>8</b>	<b>Neueste Entwicklungen bei den Messsystemen der FDVK</b>	<b>145</b>
8.1	Beschreibung des Messsystems	147
8.2	Praktische Erprobung	149
8.2.1	Geschwindigkeitsvariation	151
8.2.2	Reproduzierbarkeit der Messwerte $E_{vib}$ und korrelative Beziehungen zu bodenmechanischen Standardversuchen	153
8.3	Ergebnisse der Erprobung	163
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>164</b>
<b>10</b>	<b>Anhang: Ergebnisse der Regressions- und Korrelationsanalysen</b>	<b>169</b>
10.1	Grobkörnige Böden (A)	169
10.2	Gemischtkörnige Böden (B)	171
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>174</b>

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen: Allgemeiner Teil und Simulationsmodell:

DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik	
FDVK:	flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle	
TP:	technische Prüfvorschrift	
ZTVE-StB:	zusätzliche technische Vertragsbedingungen für Erdarbeiten im Straßenbau	
B:	Massenverhältnis	[-]
C:	Krümmungszahl	[-]
CMV:	Compaction Meter Value des Compactometer	[-]
D:	Lagerungsdichte, Dämpfungsgrad	[-]
D <sub>s</sub> :	Schichtstärke	[m]
D <sub>Pr</sub> :	Verdichtungsgrad	[-]
E	E - Modul	[MN/m <sup>2</sup> ]
E <sub>s</sub>	Steifemodul	[MN/m <sup>2</sup> ]
E <sub>sd</sub> :	dynamischer Steifemodul	[MN/m <sup>2</sup> ]
E <sub>v</sub> :	Verformungsmodul	[MN/m <sup>2</sup> ]
E <sub>v1</sub> :	Verformungsmodul (Erstbelastung)	[MN/m <sup>2</sup> ]
E <sub>v2</sub> :	Verformungsmodul (Zweitbelastung)	[MN/m <sup>2</sup> ]
F <sub>E</sub> :	Vertikalteil von F <sub>R</sub>	[MN]
F <sub>K</sub> :	Bodenkontaktkraft	[MN]
F <sub>R</sub> :	Fliehkraft der Unwucht = m <sub>u</sub> r <sub>u</sub> Ω <sup>2</sup>	[MN]
F:	Achslast (Rahmen + Bandagemasse)	[MN]
G <sub>dyn</sub>	dynamischer Schubmodul	[MN/m <sup>2</sup> ]
G <sub>dyn0</sub>	Maximaler dynamischer Schubmodul	[MN/m <sup>2</sup> ]
G´	normierter Schubmodul	[MN/m <sup>2</sup> ]
G <sub>e</sub>	äquivalenter Schubmodul	[MN/m <sup>2</sup> ]
I <sub>D</sub> :	bezogenen Lagerungsdichte	[-]
I <sub>F</sub> :	Verdichtungsfähigkeit	[-]
P <sub>eff</sub> :	effektiv abgegebene Leistung	[Nm/s]
P <sub>Sim</sub> :	Messwerte aus Simulationsmodell	[-]
P <sub>Sim,0</sub> :	Messwerte aus Simulationsmodell, Bezugswalze	[-]
P <sub>Sim,W</sub> :	Messwerte aus Simulationsmodell, Ausgangswalze	[-]
S:	Einflusszahl zur Ermittlung von G <sub>e</sub>	[-]
U:	Ungleichförmigkeit	[-]

$V$ :	Bodengesamtvolumen	$[m^3]$
$V_n$ :	Hohlraumvolumen	$[m^3]$
$V_k$ :	Feststoffvolumen	$[m^3]$
$W_{\text{eff}}$ :	effektiv abgegebene Arbeit	$[Nm]$
$a_0$ :	dimensionslose Frequenz	$[-]$
$a$ :	Aufstandlänge der Bandage	$[m]$
$a_{\text{th}}$ :	theoretische Amplitude	$[mm]$
$b$ :	Aufstandbreite der Bandage	$[m]$
$c'$ :	Kohäsion	$[MN/m^2]$
$c$ :	Dämpfungskonstante Bandage – Boden	$[MN/ms^{-1}]$
$c_M$ :	Dämpfungskonstante der Lager: Bandage – Rahmen	$[MN/ms^{-1}]$
$c_p$ :	Kompressionswellengeschwindigkeit	$[m/s]$
$c_s$ :	Scherwellengeschwindigkeit	$[m/s]$
$d_{\text{gl}}$ :	Grundbruchtiefe nach DIN 4017	$[m]$
$e$ :	Porenzahl	$[-]$
$f_u$ :	Anregungsfrequenz	$[m]$
$k$ :	Federkonstante Bandage – Boden	$[MN/m]$
$k_0$ :	Ruhedruckbeiwert	$[-]$
$k_M$ :	Federkonstante der Lager Bandage – Rahmen	$[MN/m]$
$m_{\text{add}}$ :	zusätzliche fiktive Masse	$[kg]$
$m_u$ :	Unwuchtmasse	$[kg]$
$m_R$ :	Rahmenmasse inkl. $m_u$	$[kg]$
$m_B$ :	Bandagenmasse	$[kg]$
$m_G$ :	Gesamtmasse ( $m_R + m_B$ )	$[kg]$
$n$ :	Porenanteil	$[-]$
$r$ :	Ersatzradius für ein Rechteckfundament	$[m]$
$r_u$ :	Exzentrizität der Unwuchtmasse $m_u$	$[m]$
$t$ :	Zeit	$[s]$
$v$ :	Geschwindigkeit	$[m/s]$
$w$ :	Wassergehalt	$[-]$
$w_{\text{Pr}}$ :	Proctorwassergehalt	$[-]$
$z$ :	vertikaler Schwingweg der Bandage	$[m]$
$z_0$ :	vertikale Weggröße des Rahmens	$[m]$
$z'$ :	bezogene Tiefe	$[m]$

$\alpha$ :	Korrekturwert Walze	[-]
$\alpha_{kl.A}$ :	Korrekturwert Walze (kleine Amplitude)	[-]
$\alpha_{gr.A}$ :	Korrekturwert Walze (große Amplitude)	[-]
$\alpha_v$ :	Korrekturwert Geschwindigkeit	[-]
$\gamma$ :	Schubverzerrung	[-]
$\gamma_2$ :	Wichte nach DIN 4017: Grundbruch	[kN/m <sup>3</sup> ]
$v$ :	Querdehnzahl	[-]
$v_b$ :	Formbeiwert (Fundamentform) DIN 4017	[-]
$\mu$ :	Poissonzahl	[-]
$\varphi'$ :	effektiver Reibungswinkel	[Grad]
$\Omega$ :	Winkelgeschwindigkeit d. Unwucht ( $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot f_u$ )	[1/s]
$\omega$ :	Omega: Messwert des Terrameter	[-]
$\omega_0$ :	Omega- Werte einer Bezugswalze	[-]
$\omega_w$ :	Omega- Werte einer Ausgangswalze	[-]
$\tau$ :	Scherspannung	[MN/m <sup>2</sup> ]
$\rho$ :	Dichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_d$ :	Trockendichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_f$ :	Feuchtdichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{Pr}$ :	Proctordichte	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\bar{\sigma}'_0$ :	effektive mittlere allseitige Spannung	[MN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma'$ :	effektive Normalspannungen	[MN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma'_x, \sigma'_y, \sigma'_z$ :	eff. Spannungen im kartesischen Koord. system	[MN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{0f}$ :	Grundbruchspannung DIN4017	[MN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma'_z(z)$ :	eff. Vertikalspannungen aus Auflast	[MN/m <sup>2</sup> ]

## Abkürzungen Statistik:

$C_{vx}$ bzw. $C_{vy}$	Variationskoeffizient
E:	Erwartungswert
$H_0$ :	Nullhypothese
$H_1$ :	Alternativhypothese
T	Anzahl der Eingabeneuronen ins neuronale Netz
t:	Differenzwert zum Nachweis einer Korrelation
P	Anzahl der Regressoren im multiplen linearen Regressionsmodell
X:	Zufallsvariable (Vektor)
Y:	Zufallsvariable (Vektor)
n:	Anzahl der Ausprägungen einer Zufallsvariablen
w:	Regressionsparameter $[b_0, b_1, \dots, b_t]$ bzw. Verbindungsgewichte im neuronalen Netz $[\alpha_t, \beta_n, \gamma_{ht}]$
x:	Zufallsvariable (Skalar)
y:	Zufallsvariable (Skalar)
SSE:	Sum of Squared Errors, Summe der quadrierten Fehler
MSE:	Sum of Squared Errors, Mittlerer quadrierter Fehler
$MSE_u$ :	Mittlerer quadrierter unsystematischer Fehler
$MSE_s$ :	Mittlerer quadrierter systematischer Fehler
$s_{y,x}$ :	Standardfehler der Schätzung
r bzw. $\rho$ :	Korrelationskoeffizient der Stichprobe bzw. der Grundgesamtheit
$r^2$ bzw. $\rho^2$ :	Bestimmtheitsgrad der Stichprobe bzw. der Grundgesamtheit
$r_v$ :	verbesserter Korrelationskoeffizient
$\alpha$ :	Irrtumswahrscheinlichkeit
$\varepsilon$ :	Fehlerterm
v:	Freiheitsgrad

## 1 Einleitung

Eine der Hauptaufgaben im Erdbau besteht in der Verdichtung von Boden, welcher zur Errichtung eines Bauwerkes verwendet wird. Das Ziel der Verdichtung ist es, den mit Luft und Wasser gefüllten Porenraum soweit zu verringern, dass die Tragfähigkeit des Bodens erhöht wird und Setzungen aufgrund von Kornumlagerungen verhindert werden.

Die Verdichtungsprüfung nimmt daher bei der Qualitätssicherung im Erd- und Verkehrswegebau einen hohen Stellenwert ein. In diesem Rahmen ist nunmehr durch Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfung festzustellen, ob die vertraglich festgelegten Anforderungen an die fertige Erdbauleistung erbracht wurden und zudem die aus technischen Erfordernissen notwendige Bodenverdichtung im erforderlichen Umfang durchgeführt wurde. Letztlich soll gewährleistet sein, dass die Hauptforderung an die Qualität von Straßen- und Gleisbauwerken, nämlich der ausreichende Widerstand gegenüber einwirkender Fahrzeugbelastung, dauerhaft erhalten bleibt.

Mit der Einführung der „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen im Erdbau“ (ZTVE - StB 94/97) haben sich im Bereich der Qualitätssicherung einige Veränderungen ergeben. Es wurden die möglichen Vorgehensweisen der Verdichtungsprüfung um flächendeckende und statistische Methoden erweitert und die bisher angewandte Prüfmethodik gemäß ZTVE - StB 94 in ihrer Anwendung flexibilisiert. Die in der ZTVE - StB 94/97 aufgeführten Prüfmethoden M1, M2 und M3 stellen drei verschiedene systematische Vorgehensweisen dar, die dem Nachweis der zu erbringenden Verdichtungsanforderung an das fertige Erdbauwerk dienen. Da die Methoden hinsichtlich ihrer Aussagekraft nicht miteinander vergleichbar sind, muss sowohl für Eigenüberwachungs- als auch bei Kontrollprüfungen die gleiche Prüfmethode sowie das gleiche Prüfverfahren angewendet werden.

Die Methode M1 stellt ein Verfahren dar, welches die Anzahl der Prüfpunkte aufgrund der Größe des Prüfloses und statistischen Erfordernissen vorgibt. Die Lage der Prüfpunkte wird dabei durch ein Zufallsverfahren festgelegt. Die Statistik stellt für diese Prüfmethodik verschiedene Arten von Prüfplänen zur Verfügung, die sich hinsichtlich der Ausnutzung der erhaltenen Informationen und der Organisationsform (Attribut- und Variablenprüfung) der Stichprobennahme unterscheiden.

Mit der Methode M2 ist die Anwendung flächendeckender dynamischer Messverfahren festgelegt. In Sprachgebrauch und Literatur hat sich für diese Prüfmethode mittlerweile die

Bezeichnung Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) durchgesetzt. Mit der FDVK kommen Messverfahren zum Einsatz, bei denen über die Erfassung des Bewegungsverhaltens einer Vibrationswalze beim Verdichtungs Vorgang Rückschlüsse auf die erreichte Verdichtung gezogen werden. Mit der Prüfmethode M2 wird im Gegensatz zu den Prüfmethoden M1 und M3 eine flächendeckende Aussage über den erreichten Verdichtungszustand möglich. Der Einsatz der FDVK ist besonders vorteilhaft bei großen Baumaßnahmen, da die Prüfung arbeitsintegriert vorgenommen werden kann. Hierdurch lassen sich unnötige Stillstandszeiten im Bauablauf vermeiden. Außerdem können durch den arbeitsintegrierten Einsatz mögliche Fehlstellen gezielt nachverdichtet werden.

Die Methode M3 beschreibt die Vorgehensweise zur Überwachung eines Arbeitsverfahren beim Verdichten und Einbau des Bodens, sowie der anschließenden Prüfung des Arbeitsergebnisses. Aufgrund der Ergebnisse von Probeverdichtungen wird ein bestimmtes Arbeitsverfahren festgelegt, welches das geforderte Qualitätsniveau gewährleisten soll. Liegen entsprechende Erfahrungen vor kann eine Probeverdichtung zur Wahl des Arbeitsverfahrens entfallen. Zur Kontrolle werden nach Beendigung des Verdichtungs Vorganges Stichproben zur Überprüfung des Arbeitsergebnisses genommen. Diese werden an kritischen Verdichtungs Bereichen, augenscheinlich erkennbaren Schwachstellen oder an Stellen durchgeführt, bei denen sich Änderungen der Zusammensetzung oder anderer Eigenschaften des Bodens ergeben. Die Anzahl der Einzelversuche richtet sich hierbei nach Art und Größe des Bauwerkes. Obwohl die Prüfmethode M3 für alle Baumaßnahmen angewendet werden kann, empfiehlt sie sich besonders für kleinere Baumaßnahmen oder bei beengten Arbeitsräumen wie Hinterfüllungen, Leitungs- und Kabelgräben.

Die beschriebenen Prüfmethoden der ZTVE - StB 94/97, die in den begleitenden Prüfvorschriften TP BF - StB Teil E1 bis E3 niedergelegt sind, zeigen verschiedene Wege zur Qualitätssicherung auf. Insbesondere die flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) wie sie im Rahmen der Prüfmethode M2 zur Anwendung kommt, stellt ein Verfahren dar, welches in starkem Maße Eingang in die Praxis des Erd- und des Verkehrswegebau fand. Der Vorteil der FDVK gegenüber punktuellen Prüfmethoden auf Stichprobenbasis liegt vor allem darin, dass sie zum einen arbeitsintegriert erfolgen kann und zum anderen eine flächendeckende Aussage über die Verdichtungsqualität der Grundgesamtheit des Prüfloses ermöglicht. Hierdurch lassen sich kürzere Bauzeiten und gleichmäßigere Qualitätsniveaus realisieren.

- **Problemdarstellung**

Bei dem Messverfahren der FDVK ist an einem Verdichtungsgerät (Vibrationswalze) ein Messgerät installiert, welches die Wechselwirkungen zwischen schwingungserregter Walzenbandage und Boden während des Verdichtungsvorganges registriert. Bestandteil des Messgerätes ist ein am nicht beweglichen und ungedämpften Teil der Walzenbandage befestigter Beschleunigungsaufnehmer. Aus den aufgezeichneten Beschleunigungssignalen werden dimensionslose Messwerte errechnet, mit deren Hilfe sich die Steifigkeit bzw. das Verformungsverhalten des Bodens beurteilen lässt und indirekt eine Aussage über die Verdichtung bzw. die Dichte des Bodens getroffen werden kann.

Für den Messwert der FDVK liegen bisher noch keine allgemeingültigen Anforderungswerte vor, die ein Qualitätskriterium für einen bestimmten Anwendungsfall darstellen. Das bedeutet, dass nach dem derzeitigen Entwicklungsstand für jede Baustelle, jede Bodenart und Verdichtungsgerät eine Rückbindung der FDVK-Messwerte an herkömmliche bodenmechanische Anforderungswerte ( $E_{v2}$ ,  $D_{Pr}$ , usw.) hergestellt werden muss. Hierzu wird über eine Reihe von Vergleichsversuchen der FDVK-Messwert auf eine Bezugsgröße (z.B.  $E_{v2}$ ) kalibriert.

Eine Kalibrierung auf die speziellen Baustellenverhältnisse ist aber mit einem erheblichen Aufwand verbunden, was für kleinere und mittlere Baumaßnahmen nicht immer rentabel ist. Vor allem werden durch diese Stillstandszeiten bzw. Verzögerungen im Bauablauf verursacht, wodurch zusätzlich Kosten entstehen.

- **Zieldefinition**

Ausgehend vom oben beschriebenen Sachverhalt, wird in der vorliegenden Arbeit versucht, für Regelanwendungen Anforderungswerte an den Messwert der FDVK abzuleiten. Diese Anforderungswerte oder Grenzwerte sollen insbesondere bei kleineren und mittleren Baumaßnahmen eine Abnahme der Bauleistung erlauben, ohne jeweils eine Kalibrierung der FDV-Messwerte vor Ort durchführen zu müssen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Betrachtung der Zusammenhänge zwischen den FDVK-Messwert *Omega* des Messsystems *Terrameter* der Firma *BOMAG* und den herkömmlichen Bodenkennwerten  $E_{v2}$  und  $D_{Pr}$  bei grob- und gemischtkörnigen Bodenarten.

Weiterhin soll ein neues Verfahren zur Messwertgenerierung aus den Beschleunigungswerten der Vibrationswalze vorgestellt werden, welches sich in der Handhabung und der maßgebenden Einflussparameter auf die Messwertbildung von den bis jetzt auf dem Markt befindlichen Systemen unterscheidet. Das neue Auswerteverfahren könnte die FDVK in der

Anwendung noch weiter vereinfachen und aussagekräftigere Messwerte über die Verdichtungs- bzw. Tragfähigkeitsverhältnisse des Bodens liefern. Hierzu werden erste Versuch im Baustelleneinsatz durchgeführt.

- **Vorgehensweise**

Aufgrund von Erfahrungswerten und zahlreichen Untersuchungen der Verdichtungs- und Verformungseigenschaften von Böden wurden für verschiedene Anwendungsfälle erdbautechnische Anforderungen an den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$ , den Verformungsmodul  $E_{v2}$  und den Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  aufgestellt. Diese Anforderungswerte, die eine ausreichende Verdichtungsqualität sicherstellen sollen, sind in den technischen Regelwerken ZTVE - StB und ZTVT - StB enthalten. Um auf diese Werte bzw. Erfahrungswerte und Kenntnisse zurückgreifen zu können, wird ein Zusammenhang des FDVK- Messwertes (*Omega*) mit den bodenmechanischen Kenngrößen  $E_{v2}$  und  $D_{Pr}$  hergestellt. Der gesuchte Zusammenhang ergibt sich aus einer Kalibrierung vom *Omega*- Wert auf eben diese herkömmlichen Anforderungswerte. Die Kalibrierung unterliegt aber einer Vielzahl von Einflüssen, die auf unterschiedliche Weise zusammenwirken und die Messgrößen beeinflussen.

Um ein möglichst umfassendes Bild an Kalibrierergebnissen zu erhalten, werden bundesweit Daten der verschiedensten Anwendungsfälle bzw. Versuchsrandbedingungen gesammelt. Zudem werden im Rahmen der Arbeit Kalibrierversuche durchgeführt, die zusammen mit den gesammelten Daten in eine eigens dafür aufgestellte Datenbank eingetragen werden. Damit die Einflüsse der verschiedenen Walzenparameter auf den *Omega*- Wert erfasst werden können, wird ein einfaches Simulationsmodell entwickelt, welches das Bewegungsverhalten von Vibrationswalzen im Verdichtungsbetrieb nachbildet. Ausgehend von den Simulationsergebnissen werden Korrekturfaktoren abgeleitet, mit Hilfe derer die *Omega*- Werte auf das Messwertniveau einer Bezugswalze umgerechnet werden. Anschließend werden die vorliegenden Kalibrierergebnisse hinsichtlich der verbleibenden Einflussgrößen (Boden, Messtiefe usw.) klassifiziert und über Korrelations- und Regressionsanalysen ausgewertet.

Durch die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit soll eine einfachere Handhabung der FDVK im Baustelleneinsatz unter wirtschaftlichen Aspekten und die daraus folgenden Vorteile der kontinuierlichen und arbeitsintegrierten Qualitätssicherung ermöglicht werden. Dem Anwender der FDVK sollen Tabellenwerte zur Hand gegeben werden, aus denen ein Qualitätskriterium für eine zu leistende Verdichtungsarbeit abgelesen werden kann. Hierdurch

soll ein zügiger Einsatz der FDVK im Produktions- und Qualitätssicherungsprozess ermöglicht werden.

Weiterhin wird die Anwendbarkeit sowie die Aussagekraft eines neuen Verfahrens zur Auswertung von den an der Vibrationswalze gemessenen Beschleunigungswerten untersucht. Hierzu werden erste Versuch in situ durchgeführt.

## 2 Bodenmechanische Grundlagen

Der Boden, der als Baugrund sowie als Baustoff Verwendung findet, entstand durch Verwitterung, Erosion und Sedimentation aus Festgesteinen. Das so entstandene Lockermaterial setzt sich aus Festmasse und Hohlräumen zusammen, welche ganz oder teilweise mit Luft oder Wasser gefüllt sind. Bedingt durch die unterschiedlichsten Entstehungsgeschichten liegt das Medium Boden in einer Vielfalt wie kein anderes Baumaterial vor. In der Regel müssen aber die bautechnischen Eigenschaften der Böden noch durch geeignete Maßnahmen verbessert werden, um beispielsweise als Unterbau für Straßen, als Baugrund oder für Hinterfüllungen von Hochbauten eingesetzt werden zu können. Die wirtschaftlichste Maßnahme die notwendigen Eigenschaften zu erhalten, ist die Verdichtung. Durch Verdichtung soll die in den Hohlräumen eingeschlossene Luft bzw. das Wasser herausgedrückt werden, um eine höhere Lagerungsdichte also einen geringeren Hohlraumgehalt in der Bodenstruktur zu erhalten. Durch die Verringerung des Hohlraumgehaltes bzw. der Erhöhung der Dichte bekommt der Boden eine größere Scherfestigkeit und Steifigkeit, eine geringere Durchlässigkeit, sowie ein geringeres Schwellvermögen bei Wasserzutritt.

In den folgenden Kapiteln soll auf die Verdichtungseigenschaften von Kiesen und Sanden eingegangen werden. Weiterhin werden Kennwerte zur Beschreibung der Dichte und der Verformungseigenschaften genannt. Darauf aufbauend werden vorliegende Zusammenhänge bezüglich Tragfähigkeit- und Dichtekennwerten aufgezeigt.

### 2.1 Verdichtungseigenschaften grobkörniger Böden (Kies und Sand)

Im Bezug auf ihr mechanisches Verhalten sowie auf ihre Verdichtungseigenschaften können Böden allgemein in bindige und nichtbindige Böden eingeteilt werden. Verantwortlich für diese Unterscheidung sind Kohäsionskräfte, die mehr oder weniger stark zwischen den Körnern des Bodens auftreten. Die Kohäsion beruht auf elektrostatischen Anziehungskräften zwischen dem Haftwasser, welches hygroskopisch an den Bodenteilchen gebunden ist [7]. Bei zunehmender Größe der Körner verringert sich die spezifische Oberfläche des Bodens, wodurch die Wasserbindefähigkeit stark abnimmt und die kohäsive Wirkung im Korngrößenbereich zwischen  $0,06$  und  $0,2$  mm Korndurchmesser immer stärker an Bedeutung verliert. Bei größeren Korndurchmessern verschwindet sie vollends.

Grobkörnige Böden wie Kies und Sand werden als nichtbindige Böden bezeichnet, da zwischen den Körnern weitestgehend keine kohäsiven Anziehungskräfte wirken. In diesen

Böden kann trotzdem eine sogenannte scheinbare Kohäsion auftreten, welche aufgrund der Oberflächenspannung des Restwassers in den Porenräumen an den Berührungsstellen der Einzelkörner entsteht. Diese Kraftwirkung entsteht bei einer gewissen Teilsättigung des Bodens, verschwindet aber bei Austrocknung sowie bei Vollsättigung des Porenraumes und ist somit nicht von konstanter Größe. Die scheinbare Kohäsion verursacht Druckspannungen im Korngerüst [59], welche der Umlagerung der Bodenkörner beim Verdichtungsprozess entgegensteht. Mit zunehmender Verdichtung vermindert sich aber der Anteil der Luft in den Poren, so dass sich der Porenraum zunehmend mit Wasser sättigt und die scheinbare Kohäsion an Wirkung verliert. Im Zusammenwirken mit der Gleitwirkung des Wassers können sich die Bodenteilchen somit leichter in eine dichtere Lagerung einfügen.

Die Verdichtbarkeit der Kiese und Sande hängt mit wachsender Ungleichförmigkeit in zunehmendem Maße vom Wassergehalt ab. Bei gleichförmiger Kornabstufung ( $U < 5$ ) spielt der Wassergehalt dagegen auf den Verdichtungserfolg eine untergeordnete Rolle, da sich die unter konstanter Verdichtungsarbeit erzielbaren Dichten bei verschiedenen Wassergehalten kaum voneinander unterscheiden [59].

Grobkörnige Böden bilden ausgehend von einer nicht vorhandenen kohäsiven Kraftwirkung im Boden ein unzusammenhängendes Haufwerk. Es kann angenommen werden, dass sich die grob- und gemischtkörnigen Böden bis zu einem maximalen Feinkornanteil ( $\varnothing < 0.06 \text{ mm}$ ) von 15 Gew. % im Bezug auf die Verdichtungseigenschaften wie reine Kiese und Sande, also wie grobkörnige Böden verhalten [59]. Das mechanische Verhalten bzw. die Steifigkeit beruht somit rein auf Reibungs- und Verzahnungskräften, welche bei einer Belastung des Bodens an den Berührungsflächen der Körner entstehen. Die Steifigkeit nimmt somit bei steigender Anzahl an Berührungsflächen also bei dichter werdender Lagerung des Bodens zu [59].

Weiterhin ist die Oberflächenbeschaffenheit und die Kornform sowie die Kornrauigkeit im Bezug auf die Steifigkeit und Verdichtbarkeit einer Bodenstruktur von Bedeutung. Um so rauher die Kornoberfläche und um so eckigkantiger bzw. scharfkantiger die Kornform (z.B. Split, Schotter), desto ausgeprägter ist die Verkeilung zwischen den Bodenteilchen und desto steifer verhält sich der Boden bei gleicher Lagerungsdichte. Zudem ist auch mehr mechanische Arbeit erforderlich, um das Korngerüst in eine dichtere Lagerung zu bringen. Umgekehrt gilt, je gedrungener und runder die Kornform, desto größer ist die erreichbare Dichte bei gegebener Verdichtungsarbeit.

Außerdem hängen die Verdichtbarkeit, die zu erreichende Dichte und die Tragfähigkeit eines Bodens von seinem Kornaufbau bzw. vom Anteilsverhältnis der im Boden vorkommenden Korngrößenbereiche ab. Bei einer ungleichförmigen Kornabstufung, passen im Idealfall die jeweils kleineren Körner in die Hohlräume zwischen die größeren Körnern. Hierdurch kann ein Maximum an Lagerungsdichte erzielt werden. Diese optimale Körnungsabstufung kann durch die Fullerparabel angegeben werden:

$$a = 100 \cdot \sqrt{d/d_{\max}}$$

In dieser Gleichung ist  $a$  der Massenanteil des Siebdurchganges für die Korngröße  $d$  (Siebmaschenweite).  $d_{\max}$  ist das im Haufwerk vorkommende Größtkorn.

Eine Kenngröße zur Beschreibung der Körnungsabstufung ist die Ungleichförmigkeitszahl  $U$ :

$$U = d_{60}/d_{10}$$

Über die Zahl  $U$  wird das Verhältnis zwischen den Korndurchmessern ( $d_{60}$ ,  $d_{10}$ ) angegeben, die zu 60 % und zu 10 % Massenprozent am Kornaufbau beteiligt sind. Für eine optimale Kornabstufung im Sinne der Fullerparabel nimmt die Zahl  $U$  den Wert von etwa 36 an. Bis zu einem  $U = 36$  steigt somit die Verdichtbarkeit eines Korngemisches; darüber hinaus fällt sie wieder ab [59].

Ein weiterer Kennwert zur Beurteilung der Verdichtbarkeit ist die Krümmungszahl  $C$ :

$$C = \frac{d_{30}^2}{d_{60} \cdot d_{10}}$$

Hierbei sind  $d_{30}$ ,  $d_{60}$  und  $d_{10}$  die Korndurchmesser die bei 30, 60 und 10 Massenprozent aus der Körnungslinie ermittelt werden können.

Als gut verdichtbar können Lockergesteine mit einer Krümmungszahl  $C$  zwischen 1 und 3 und einer Ungleichförmigkeitszahl  $U > 4$  bei Kies und  $U > 6$  bei Sand bezeichnet werden [18].

## 2.2 Kennwerte zur Beschreibung der Dichte eines Bodens

Kenngrößen zur Beschreibung der Dichte sind: die Trocken- und Feuchtdichte ( $\rho_d, \rho_f$ ), die Porenzahl  $e$  und der Porenanteil  $n$ . Aus diesen Größen abgeleitet, existieren weitere Kennwerte zur Beschreibung des Bodenzustandes.

Zur Beschreibung des Hohlraumgehaltes im Boden wird die Porenzahl  $e$  sowie der Porenanteil  $n$  verwendet. Das Gesamtvolumen  $V$  des Bodens wird hierzu in Feststoffvolumen und Hohlraumvolumen unterteilt. Zudem ist das Hohlraumvolumen mit einem gewissen Anteil an Wasser  $n_w$  und Luft  $n_a$  ( $n = n_w + n_a$ ) gefüllt. Bei der Porenzahl  $e$  wird das Hohlraumvolumen  $V_n$  auf das Feststoffvolumen  $V_k$  bezogen, wogegen beim Porenanteil  $n$  das Verhältnis zwischen Hohlraumgehalt  $V_n$  und Gesamtvolumen  $V$  des Bodens gebildet wird.

$$n = \frac{V_n}{V} = \frac{(V - V_k)}{V} \quad \text{bzw.} \quad e = \frac{V_n}{V_k} = \frac{(V - V_k)}{V_k}$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \leftrightarrow e = \frac{n}{1 - n}$$

Der Porenanteil  $n$  sowie die Porenzahl  $e$  dienen unter anderem dazu, Bodenkennzahlen wie Dichte, Wichte, Zusammendrückbarkeit usw. zu beschreiben. Weiterhin wird der Porenanteil  $n$  (Porenzahl  $e$ ) zur Ableitung der Lagerungsdichte  $D$  sowie der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$  verwendet. Hierzu werden in Laborversuchen der maximale und minimale Porenanteil ( $n_{max}, n_{min}, e_{max}, e_{min}$ ) bestimmt und der natürlichen Lagerung des Bodens vor Ort  $n$  bzw.  $e$  gegenübergestellt.

$$D = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}} \quad \text{bzw.} \quad I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

In folgender Tabelle 2-1 sind die Klassenbereiche der Lagerungsdichte  $D$  angegeben.

D	$I_D$	Zustand
0 – 0,15		sehr locker
0,15 – 0,30	0 – 0,33	locker
0,30 – 0,50	0,33 – 0,67	mitteldicht
0,50 – 1,00	> 0,67	dicht

Tabelle 2-1: Bezeichnung der Lagerungsdichte und bezogenen Lagerungsdichte

Ausgehend von einem Modell (Abbildung 2-1) gleich großer Kugeln, kann die Lagerungsdichte schematisch dargestellt werden. Zu dieser Anordnung ergibt sich für die

lockerste Lagerung ein  $n = 0,47$  ( $e = 0,92$ ) und für die dichteste Lagerung ein  $n = 0,26$  ( $e = 0,35$ ). (Siehe auch [12])

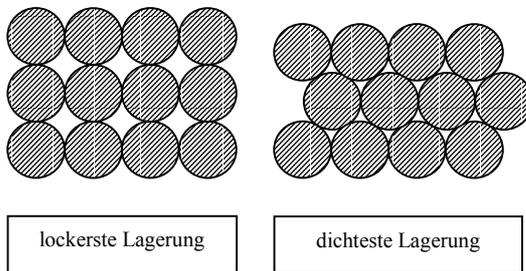


Abbildung 2-1: Lagerungsdichte schematisch an einem Kugelmodell dargestellt

Natürlich vorkommende grobkörnige Lockergesteine können bei lockerster Lagerung Porenanteile  $n = 0,44$  bis  $0,55$  ( $e = 0,80$  bis  $1,20$ ) annehmen, wohingegen bei dichtester Lagerung Porenanteile von  $n = 0,13$  bis  $0,33$  ( $e = 0,15$  bis  $0,50$ ) möglich sind [18].

Ein weiterer Kennwert, der aus  $n$  und  $e$  abgeleitet werden kann, ist die Verdichtungsfähigkeitszahl  $I_F$ . Dieser Kennwert steht in umgekehrter Proportion zur aufzuwendenden Verdichtungsenergie eines Korngemisches. Hohe Werte von  $I_F$  weisen auf einen geringeren Verdichtungsaufwand hin als kleine  $I_F$ -Werte. Beispielsweise ergibt sich für einen enggestuften Sand ein  $I_F$  von  $0,5$  und für ein weitgestuftes Kies – Sand – Gemisch ein  $I_F$  von  $2$ . Je größer  $I_F$ , umso mehr kann der Boden verdichtet werden [59].

$$I_F = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\min}}$$

Bei Verwendung der Dichte zur Beschreibung des Bodenzustandes wird im Straßenbau und allgemein im Erdbau auf die Proctordichte  $\rho_{Pr}$  Bezug genommen. Hierzu wird der Boden in einem Laborversuch bei verschiedenen Wassergehalten  $w_i$  ( $i = 1..5$ ) unter einer definierten Arbeit verdichtet. Die Verdichtungsarbeit beträgt beim Standardversuch  $A = 0,6 \text{ MNm/m}^3$  und beim modifizierten Versuch  $A = 2,7 \text{ MNm/m}^3$ . Die Proctordichte  $\rho_{Pr}$  ist der beim Versuch ermittelte Maximalwert der Trockendichte  $\rho_d$ . Der zugehörige optimale Wassergehalt wird mit  $w_{Pr}$  bezeichnet. Der zur Kennzeichnung eines Verdichtungszustandes bzw. zur Festlegung einer Qualitätsanforderung aufgestellte Kennwert ist der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$ . Der Verdichtungsgrad ist der Quotient aus Trockendichte und Proctordichte:

$$D_{Pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{Pr}}$$

Der Wassergehalt  $w$  einer Bodenprobe ist definiert als das Verhältnis von Wassermasse  $m_w$

zur Trockenmasse  $m_d$ : 
$$w = \frac{m_w}{m_d}$$

In Abbildung 2-2 ist die Verdichtungslinie eines Proctorversuches aufgetragen

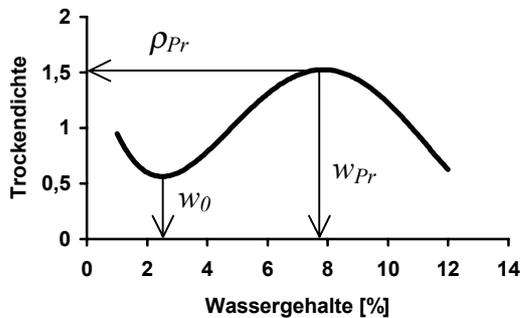


Abbildung 2-2: Verdichtungskennlinie eines Proctorversuches

Nicht unerwähnt sollte in diesem Zusammenhang bleiben, dass es für grobkörnige Böden einen Bereich auf der trockenen Seite des optimalen Proctorwassergehaltes  $w_{Pr}$  gibt, bei dem sich für einen bestimmten Wassergehalt  $w_0$  ( $w_0 < w_{Pr}$ ) ein Minimum an zu erreichender Trockendichte  $\rho_d$  einstellt. Für noch kleiner werdende Wassergehalte  $w < w_0$  nimmt die Trockendichte wieder höhere Werte an. Dieser Effekt kann mit der Kraftwirkung einer scheinbaren Kohäsion erklärt werden. Diese verhindert bei einem bestimmten Wassergehalt  $w_0$ , dass die Bodenteilchen eine dichtere Lagerung einnehmen können. In Abbildung 2-2 ist in der Verdichtungskurve der Punkt  $w_0$  gekennzeichnet.

## 2.3 Kennwerte zur Beschreibung der Verformungseigenschaften und der Scherfestigkeiten von Böden

### 2.3.1 Spannungs-Verformungs-Verhalten; Zusammendrückbarkeit

Das Spannungs- Dehnungsverhalten eines linear elastischen Materials wird nach dem Hook'schen Gesetz mit dem  $E$ - Modul beschrieben. Der  $E$ - Modul und die Querdehnzahl  $\nu$  sind in diesem Fall Materialkonstanten. Es gelten folgende Spannungs-Dehnungs-Beziehungen im kartesischen Koordinatensystem:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_z - \nu \cdot \sigma_x - \nu \cdot \sigma_y)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_x - \nu \cdot \sigma_z - \nu \cdot \sigma_y)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_y - \nu \cdot \sigma_x - \nu \cdot \sigma_z)$$

Um für einen Boden einen Kennwert für seine Steifigkeit bzw. für sein Spannungs-Dehnungsverhalten zu erhalten, kann im Ödometer von Terzaghi ein Kompressionsversuch durchgeführt werden. Bei dieser Versuchsanordnung wird der Boden in einen Stahlring eingebaut und einaxial belastet. Der umschließende Stahlring verhindert eine Querdehnung ( $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ ) des Materials, wodurch ein einaxialer Verformungszustand entsteht. Der durch die behinderte Querdehnung der Bodenprobe verursachte Druck auf den Stahlring wird durch  $\sigma_x = \sigma_y = k_0 \sigma_z$  ausgedrückt. Der Ruhedruckbeiwert  $k_0$  wird über die Querdehnzahl  $\nu$  (bzw. Poissonzahl  $\mu = 1/\nu$ ) berechnet:

$$k_0 = \frac{\nu}{1-\nu} = \frac{1}{\mu-1}$$

Als Ergebnis des Kompressionsversuches wird aus den äußeren Lasten und den gemessenen Verformungen der Steifemodul  $E_s$  ermittelt. Das Versuchsergebnis zeigt, dass  $E_s$  im Gegensatz zum  $E$ - Modul keine Boden- oder Materialkonstante ist, sondern vom Spannungsniveau sowie von der Dichte, der Kornform und Kornrauigkeit, der Korngrößenverteilung usw. des Bodens abhängt. Der Steifemodul  $E_s$  kann aber in Abhängigkeit vom Spannungsniveau bei bekannter Querdehnung  $\nu$  (oder Poissonzahl  $\mu$ ) in den  $E$ - Modul umgerechnet werden.

$$E_s = E \cdot \frac{1-\nu}{1-\nu-2\cdot\nu^2} \Leftrightarrow E = E_s \cdot \frac{1-\nu-2\cdot\nu^2}{1-\nu}$$

$$E_s = E \cdot \frac{\mu \cdot (\mu - 1)}{\mu^2 - \mu - 2} \Leftrightarrow E = E_s \cdot \frac{\mu^2 - \mu - 2}{\mu \cdot (\mu - 1)}$$

Für die Querdehnzahl  $\nu$  und Poissonzahl  $\mu$  gelten folgende Grenzen:

$$\nu = 0 \quad ; \quad \mu = \infty; \text{ querdehnungsfreie Verformung} \quad E_s = E$$

$$\nu = 0,5; \quad \mu = 2; \text{ volumenkonstante Verformung} \quad E_s = \infty; E = 0$$

$$\nu = 0,3; \quad \mu = 10/3; \quad \text{Näherungswert; wird häufig zur Umrechnung vom Steifemodul } E_s \text{ in den } E\text{-Modul bei Setzungsberechnung verwendet} \quad E_s = 1,35 E$$

Ein weiterer Kennwert, mit welchem die Verformungseigenschaften von Boden beschrieben werden können, ist der Verformungsmodul  $E_v$ . Im Gegensatz zum Kompressionsversuch ist während der Belastung die Querdehnung des Bodens nur teilweise behindert. Zur Ermittlung von  $E_v$  wird in situ ein sogenannter Plattendruckversuch durchgeführt. Die Versuchsdurchführung ist in DIN 18134 geregelt. Hierbei wird über eine Stahlplatte mit einem Durchmesser von 30 cm auf die Bodenoberfläche eine stufenweise Belastung aufgebracht. Bei jeder Laststufe werden die aufgebrachte Spannung und die erzeugte Setzung erfasst. Nach zwei Lastzyklen werden aus den gewonnenen Messdaten der Erstbelastungsmodul  $E_{v1}$  und der Zweitbelastungsmodul  $E_{v2}$  errechnet.

Der Verformungsmodul  $E_v$  kann bei Kenntnis der Querdehnzahl  $\nu$  (Poissonzahl  $\mu$ ) ebenfalls in den  $E$ -Modul bzw. Steifemodul  $E_s$  umgerechnet werden.

$$E_v = E_s \cdot \frac{1-\nu-2\cdot\nu^2}{(1-\nu)\cdot(1-\nu^2)} \Leftrightarrow E_s = E_v \cdot \frac{(1-\nu)\cdot(1-\nu^2)}{1-\nu-2\cdot\nu^2}$$

### 2.3.2 Scherfestigkeit

Unter Scherfestigkeit versteht man in der Bodenmechanik den Widerstand, den ein Boden gegen eine zum Bruch führende Verformung leistet. Bei nichtbindigem Lockergestein ( $c' = 0$ ) ist nur dann eine Scherfestigkeit vorhanden, wenn normal zur Scherfläche  $A$  eine Druckkraft  $N$  wirkt. Nach dem Gesetz von Coulomb gilt folgende Beziehung:

$$\frac{T}{A} = \frac{N \cdot \tan \varphi'}{A} \text{ oder in Spannungen ausgedrückt: } \tau = \sigma' \cdot \tan \varphi'$$

Die Scherfestigkeit ist somit proportional zur Normalkraft  $N$  bzw. zur Normalspannung  $\sigma'$ . Durch den Term  $\tan \varphi'$  wird die Reibung erfasst, wobei  $\varphi'$  der Reibungswinkel des Bodens ist. Dem Schergesetz kann noch ein additiver Term  $c'$  angefügt werden. Dieser drückt die Scherfestigkeit infolge einer Kohäsion aus. Es gilt nun:  $\tau = \sigma' \cdot \tan \varphi' + c'$ . Siehe auch [18], [21], [27], [56] u. dgl.

Zur Ermittlung von  $\varphi'$  und  $c'$  werden im Labor Scher-, Biaxial- und Triaxialversuche durchgeführt. Der wesentliche Unterschied zwischen den Versuchen ist, dass beim Scherversuch die Bruchfläche aufgrund der Versuchsanordnung vorgegeben ist. Beim Biaxial- und Triaxialversuch kann sich diese frei ausbilden.

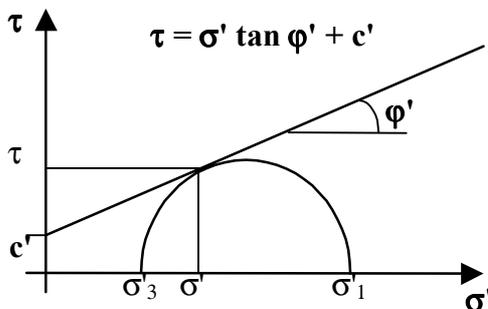


Abbildung 2-3: Der Reibungswinkel  $\varphi'$  dargestellt im Zusammenhang mit dem Mohr'schen Spannungskreis

Weitere Faktoren, welche die Scherfestigkeit zusätzlich zur Normalkraft beeinflussen sind die Kornform und Korngröße, die Lagerungsdichte  $D$  bei nichtbindigen Böden, der Wassergehalt  $w$ , die Konsistenz bindiger Böden und die Zeitdauer der Beanspruchung.

Die Scherfestigkeit von Kies und Sand setzt sich zusammen aus dem Reibungswiderstand auf der Oberfläche der Körner und dem Verzahnungswiderstand der Körner infolge der Bodenstruktur. Der Reibungswiderstand setzt der Gleitung zweier Körner einen Widerstand entgegen, wobei zum Abscheren des Bodens nur eine Verschiebung der Körner notwendig ist.

Hingegen kann sich infolge des Verzahnungswiderstand nur dann eine Bruchfuge ausbilden, wenn sich die Einzelkörner verdrehen und voneinander weg bewegen können. Die Scherfestigkeit aufgrund des Verzahnungswiderstandes wächst mit zunehmender Lagerungsdichte an, weil durch die dichter werdende Lagerung die Bewegungsmöglichkeiten stark behindert werden. Bei dichtgelagerten nicht bindigen Böden kann ein Bruch nur mit einer Volumenzunahme des Bodenkörpers einhergehen. Somit hängt die Scherfestigkeit von grobkörnigen Böden in starkem Maße von der Lagerungsdichte des Bodens ab. Siehe hierzu [12] bzw. [27].

Über die Beziehungen in Abbildung 2-4 lassen sich nach Kézdi [27] Reibungswinkel in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$  für Kies und Sand ablesen.

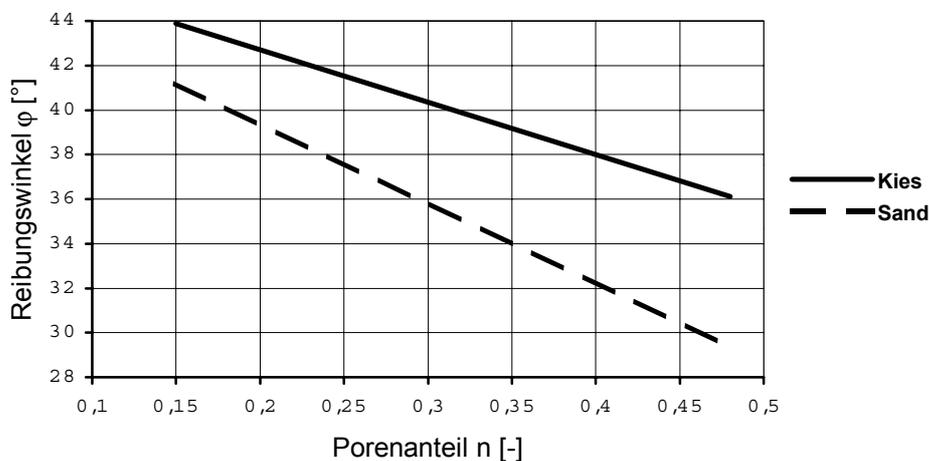


Abbildung 2-4: Der Reibungswinkel  $\varphi$  nach Kézdi in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$  für Sand und Kies

In der Literatur vgl. [27] sind weitere Ansätze aufgeführt, mit deren Hilfe der Reibungswinkel in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte, der Kornform, der Korngröße und der Ungleichförmigkeit ermittelt werden können.

## 2.4 Zusammenhang zwischen den Dichte- und Tragfähigkeitskennwerten

Unter physikalischen Gesichtspunkten besteht zwischen Dichte- ( $D_{Pr}$ ,  $\rho_d$ ,  $n$ ) und Tragfähigkeitskennwerten ( $E_{v2}$ ,  $E_{v1}$ ) ein Zusammenhang. Dieser hängt ab vom belastungs- und spannungsabhängigen elastoplastischen Verformungsverhalten und von bodenspezifischen Einflussfaktoren, welche sich in unterschiedlicher Weise auswirken. Diese Einflussfaktoren sind bei nicht bindigen Böden: die Kornabstufung, die Kornform, die Kornelastizität, die Verspannung des Korngerüsts und die Kornzertrümmerung bei spröden und porösen Materialien und bei bindigen Böden: der Wassergehalt, das Schwell- und Schrumpfvermögen, das Frostverhalten und rheologische Eigenschaften. Soll für die Beziehung des Verformungsmoduls  $E_v$  mit dem Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  ein funktionaler Zusammenhang  $E_v = f(D_{Pr})$  aufgestellt werden, ist dieser streng genommen jeweils nur für ein bestimmtes Bodengemisch gültig [12]. Beispielsweise ergibt sich für ein gut abgestuftes Sand – Kies - Gemisch ein höherer Verformungsmodul  $E_v$  als bei einem gleichkörnigen Sand unter der Voraussetzung jeweils gleicher Verdichtungsgrade  $D_{Pr}$ . Ebenso problematisch ist zur Beschreibung eines funktionalen Zusammenhanges  $E_v = f(\rho_d)$ , wegen der unterschiedlichen Stoffgewichte  $\gamma_s$ , die Trockendichte  $\rho_d$  [12]. Der Zusammenhang des Verformungsmoduls  $E_v$  und den entsprechenden Dichtekennwerten lässt sich zuverlässig nur mit Hilfe der Porenzahl  $n$  für Sand- und Kiessandgemische erfassen [12]. In Abbildung 2-5 sind die Beziehungen des Porenanteils  $n$  zum Verformungsmodul  $E_{v2}$  und  $E_{v1}$  nach Floss [12] aufgeführt.

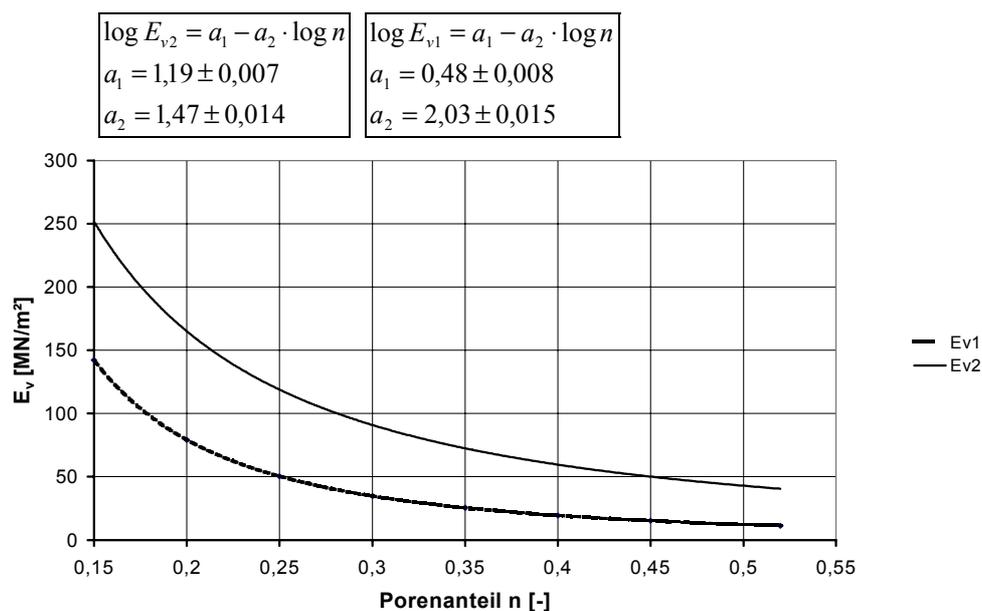


Abbildung 2-5: Beziehung zwischen dem Porenanteil  $n$  und dem Verformungsmodul  $E_{v1}$  und  $E_{v2}$  für Sande und Kiessande

### **3 Beschleunigungsmessungen an Vibrationswalzen**

Durch die Messung der Bandagenbeschleunigung beim Verdichtungsvorgang kann das Bewegungsverhalten der zur Schwingung angeregten Walzenbandage erfasst werden. Aus den ermittelten Beschleunigungswerten werden bei den eingesetzten FDVK- Messsystemen Kenngrößen zur Beschreibung der Bodeneigenschaften abgeleitet. In diesen Kapitel werden diese Systeme vorgestellt und deren Arbeitsweise zur Generierung der Messwerte erläutert. Weiterhin werden die Größen besprochen, welche als Randbedingung bei der Messwertbildung einen entscheidenden Einfluss nehmen. Hier kann generell zwischen Einflussparametern des Bodens und der Walze unterschieden werden. Vorweg werden zur Abgrenzung die verschiedenen Bauarten und Erregerprinzipien bei Vibrationswalzen dargestellt.

#### **3.1 Vibrationswalzen und deren Bewegungsverhalten im Verdichtungsbetrieb**

In dieser Arbeit werden Verdichtungsgeräte betrachtet, deren Walzenbandagen mittels einer oder mehrerer schwingender exzentrischer Massen zur Schwingung (Vibration) angeregt werden.

##### **3.1.1 Unterscheidung nach Bauart**

Prinzipiell können Vibrationswalzen nach Tandemwalzen, Walzenzügen und Anhängewalzen unterschieden werden. Walzenzüge besitzen an Stelle der Vorderradachse eine Bandage, die in einem Rahmen gehalten ist. Der Hauptfahrantrieb wird über die Bereifung der Hinterradachse realisiert. Bei Tandemwalzen sind sowohl in der Vorder- als auch in der Hinterradachse in Rahmen gehaltene Bandagen angeordnet. Der Fahrantrieb wird über die beiden Bandagen ermöglicht. Bei Anhängewalzen befindet sich die Bandage innerhalb eines Rahmens, der als Anhänger von einem geeigneten Baustellenfahrzeug gezogen wird.

### 3.1.2 Unterscheidung nach Erregerprinzip

Bezüglich der im vorigen Kapitel 3.1.1 dargestellten Bauarten von Vibrationswalzen, werden verschiedene Erregerprinzipien zur Erzeugung der Vibration eingesetzt. Einige grundlegende Prinzipien werden im Folgenden kurz vorgestellt:

- Kreisschwinger:

Eine um die Bandagenachse rotierende exzentrische Masse erzeugt eine Unwuchtkraft. Diese regt die Walzenbandage zur Schwingung an. Eine elastisch aufgehängte Bandage führt hierauf eine Kreisbewegung durch.

*Rotierende Wirkrichtung der Rotationskraft*

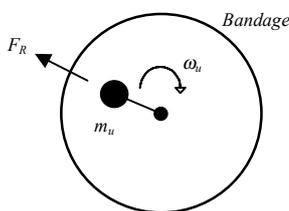


Abbildung 3-1: Kreisschwinger

- Gerichteter Kreisschwinger:

Bei gerichteten Kreisschwingern sind zwei Unwuchtmassen auf der horizontalen Mittelachse der Bandage angeordnet. Durch ihren gegenläufigen Rotationssinn wird eine Kraft in vertikaler Richtung erzeugt. In der Regel wird die Kraftwirkungsrichtung so eingestellt, dass nur geringe horizontale Kräfte auftreten und die Walzenbandage vorwiegend in vertikaler Richtung schwingt.

*Feststehende Wirkungsrichtung der Rotationskraft*

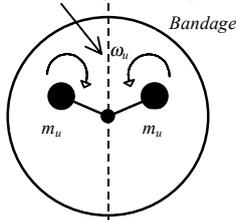


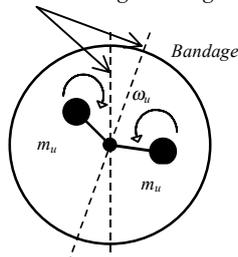
Abbildung 3-2: gerichteter Kreisschwinger

- Selbstregelnder gerichteter Kreisschwinger:

Bei selbstregelnden gerichteten Kreisschwingern wird die Kraftwirkung der Unwuchtkraft automatisch so verdreht, dass in Abhängigkeit der Bodensteifigkeit immer die günstigste Kraftwirkung in den Boden eingeleitet wird. Dementsprechend wird die Kraftwirkung mit zunehmender Bodensteifigkeit von der vertikalen Wirkrichtung in die Horizontale

gedreht. Somit kann die Verdichtungswirkung gezielt dem Verdichtungszustand des Bodens angepasst werden.

*Selbstregelnde Wirkungsrichtung der Rotationskraft*

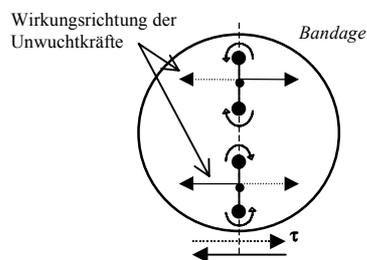


*Abbildung 3-3: selbstregelnder gerichteter Kreisschwinger*

- Oszillationsschwinger:

Bei Oszillationsschwingern sind zwei Unwuchtmassen auf der vertikalen Mittelachse der Bandage angeordnet. Durch ihre gegenläufige Rotation, welche um  $180^\circ$  phasenverschoben ist, wird ein Moment erzeugt. Hierdurch leitet der Oszillationsschwinger neben seinem Eigengewicht hauptsächlich Schubkräfte in den Boden ein. Oszillationsschwinger werden in der folgenden Arbeit nicht weiter betrachtet, da diese auf Grund ihres Erregerprinzip nicht für herkömmliche FDVK- Messsysteme eingesetzt werden können.

*Eintrag von Schubspannungen in den Boden*



*Abbildung 3-4: Oszillationsschwinger*

### 3.1.3 Bewegungsverhalten

Beim Verdichtungsbetrieb kann zwischen verschiedenen Betriebszuständen einer Vibrationswalze unterschieden werden, die in Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit das Bewegungsverhalten charakterisieren. Durch eine rotierende Unwucht in der Bandagenachse wird eine Fliehkraft erzeugt, welche die Walzenbandagen zur Schwingung anregt. Da zwischen Walze und Boden eine einseitige Bindung herrscht – es werden keine Zugkräfte zwischen Walzenbandage und Boden übertragen – können mit zunehmender Bodensteifigkeit die Beschleunigungskräfte derart anwachsen, dass die Bandage zeitweise vom Boden abhebt. Die sich einstellenden Betriebszustände sind nun abhängig davon, über welche Zeitspanne - bezogen auf eine Periode einer Unwuchtumdrehung - die Walze den Kontakt zum Boden verliert.

Allgemein kann zur Charakterisierung des Bewegungsverhaltens zwischen Auflast- und Sprungbetrieb unterschieden werden. Beim reinen Auflastbetrieb behält die Walzenbandage zu jedem Zeitpunkt den Kontakt zum Boden, so dass permanent Druckkräfte vorliegen. Hierbei schwingt das System Walze - Boden mit der Frequenz, welche der Unwuchtkraft zugrunde liegt. Ab einer bestimmten Bodensteifigkeit hebt die Bandage nun zeitweise vom Boden ab. Die Schwingungsperiode des Systems bleibt dennoch die gleiche, wie die der Unwuchtkraft. Dieses Bewegungsverhalten wird, da sich die Schwingungsperiode der Bandage gegenüber der Unwuchtkraftperiode nicht verändert, noch dem Auflastbetrieb zugeordnet. Per Definition spricht man erst dann vom reinen Sprungbetrieb, wenn die Bandage nur noch nach jeder zweiten Unwuchtumdrehung eine wiederkehrende Bewegung ausführt. Dennoch wird auch hier ein periodisches Bewegungsverhalten registriert. Im Extremfall ist die Abhebezeit der Bandage so groß, dass die Unwucht eine ganze Umdrehung durchführt, bis die Bandage wieder den Boden berührt. Ein weiterer Betriebszustand, welcher dem Sprungbetrieb zugeordnet wird, ist das Taumeln. Hierbei führt die Walzenbandage keine waagerechte Schwingbewegung mehr durch. Die Schwingung der Bandagenränder ist um  $180^\circ$  phasenverschoben, so dass sich zum Zeitpunkt des Auftreffens der einen Bandagenseite sich die andere in der Luft befindet. Ab einer bestimmten Bodensteifigkeit werden die periodischen von nicht mehr vorhersagbaren - sprich chaotischen – Schwingungsvorgängen abgelöst.

## 3.2 Messsysteme

Walzen, die heute zur Verdichtung von Böden eingesetzt werden, verfügen über eine rotierende Unwuchtmasse. Diese regt die Walzenbandage zu Schwingungen an und erzeugt die zur Verdichtung eingesetzte Vibration des Walzenkörpers. Bei der Vibration werden die Reibungskräfte zwischen den Bodenteilchen kurzzeitig aufgehoben, wodurch sich diese unter dem Einfluss ihres Eigengewichtes und der Auflast in eine dichtere Lagerung bewegen können. Das Messprinzip der FDVK basiert auf dem sich mit zunehmender Verdichtung verändernden Bewegungsverhalten der Walzenbandage. Zur Erfassung des Bewegungsverhaltens sind an einem sich nicht drehenden Teil der Walzenbandage Beschleunigungsaufnehmer angebracht. Durch die Auswertung der Messsignale lassen sich Rückschlüsse auf die Steifigkeit bzw. auf die erreichte Verdichtung des Bodens ziehen.

Nachfolgend werden FDVK Messprinzipien und die zugehörigen Messsysteme vorgestellt, wie sie heute hauptsächlich in der Verdichtungskontrolle eingesetzt werden.

### 3.2.1 Terrameter

Das Prinzip der Messwertbildung beim *Terrameter* basiert auf einer Bilanzierung der eingesetzten Verdichtungsenergie, welche über die an der Bandage gemessenen Beschleunigungen aufgestellt wird. Der Walzenkörper gibt bei jeder Umdrehung der Unwucht Bewegungsenergie an die Bodenunterlage ab. Ein Teil dieser Energie wird an den Walzenkörper zurückgegeben, der Rest vom Untergrund aufgenommen. Die entsprechenden Anteile sind abhängig von der vorliegenden Bodensteifigkeit.

Ein Indikator- oder Arbeitsdiagramm verdeutlicht, welche Energie bzw. Leistung pro Exzenterumdrehung der Verdichtungsunwucht effektiv an den Boden abgegeben wird. In Abbildung 3-5 ist exemplarisch ein Indikatordiagramm (aus [34]) dargestellt. Auf der vertikalen Achse ist die Bodenkontaktkraft und auf der horizontalen Achse der Schwingweg aufgetragen. Die Bodenkontaktkraft setzt sich hierbei zusammen aus der Trägheitskraft, welche sich aus den gemessenen Beschleunigungen und der Masse der Walzenbandage ergibt und aus der vertikalen Fliehkraft, die über die Erregerfrequenz, Unwuchtmasse, Exzenterabstand und Phasenlage vorgegeben ist. Zusätzlich muss noch die Gravitationskraft aus der Masse des Rahmens und der Bandage addiert werden. Der Schwingweg wird durch zweifache Integration des aufgezeichneten Beschleunigungssignals über die Zeit erhalten.

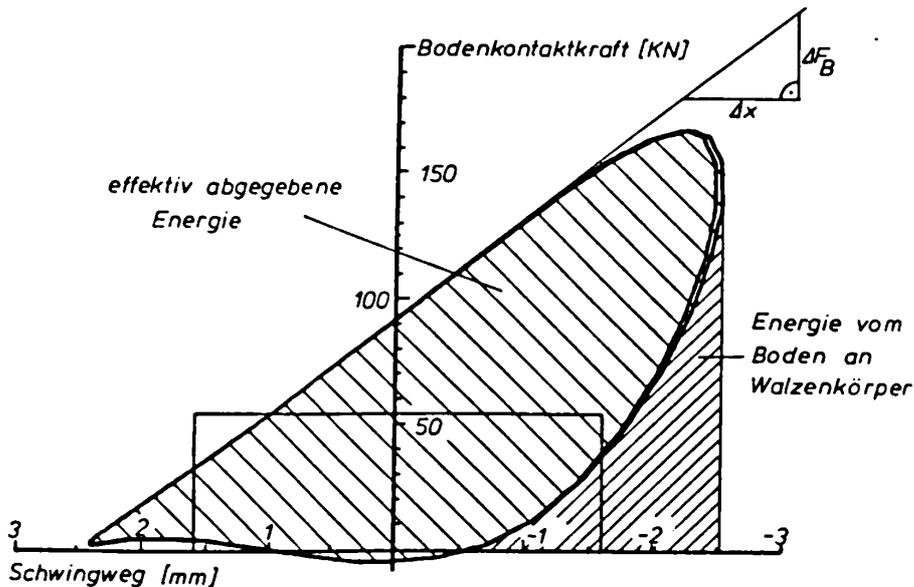


Abbildung 3-5: Arbeits- bzw. Indikatorgramm aus [34]

Über die Bodenkontaktkraft und den Schwingweg kann die von der Bandage in den Boden eingetragene Energie innerhalb eines Schwingungszyklus mit der Periode  $T$  ermittelt werden. Diese Energie wird durch eine festgelegte Referenzenergie dividiert. Der hieraus ermittelte Messwert ist dimensionslos und wird vom Hersteller des Messsystems mit  $\Omega$  ( $\omega$ ) bezeichnet. Während des Messvorganges sollte sich die Walze im Auflastbetrieb befinden, da nur so in Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit ein eindeutiger Messwert erhalten wird. Außerdem sollte im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Messwerte die Bandage längs ihrer gesamten Breite auf dem Boden aufliegen.

$$\omega \approx \int F_K \cdot s \cdot dt \quad \omega : \Omega \quad F_K : \text{Bodenkontaktkraft} \quad s : \text{Weg}$$

### 3.2.2 Omegameter

Das Messsystem „*Omegameter*“ funktioniert nach den gleichen Prinzipien wie der „*Terrameter*“. Nach Angaben der Herstellerfirma *BOMAG* ist der *Omegameter* eine vereinfachte Form des *Terrameter*. An der Bandage sind nicht mehr - wie beim *Terrameter* üblich - zwei sondern nur noch ein Beschleunigungsaufnehmer installiert. Die Auswertung des Beschleunigungssignals und die Weiterverarbeitung zum Messwert erfolgt beim *Omegameter* in analoger Weise zum *Terrameter*.

### 3.2.3 Compactometer

Das Messprinzip des *Compactometers* basiert auf einer Frequenzanalyse des am Beschleunigungsaufnehmers gemessenen Signals. Diese werden bei der Analyse nur für die vertikale Bewegungsrichtung der Bandage betrachtet. Eine auf einer vollelastischen Unterlage aufliegende Walzenbandage, wird durch die rotierende Unwucht zu einer harmonischen Sinusschwingung angeregt. Die Walzenbandage schwingt hierbei mit der Anregungsfrequenz der Unwucht. Durch das nichtlineare Verformungsverhalten des Bodens verbunden mit einem zeitweiligen Kontaktverlust der Bandage, erfährt die harmonische Schwingung eine Verzerrung. Die Grundschiwingung der Bandage wird nun von einem Spektrum von Oberschwingungen überlagert. Diese unterscheiden sich hinsichtlich Schwingungsamplitude und Frequenz von der Grundschiwingung. Untersuchungen ergaben, dass die Amplitude der ersten Oberschwingung signifikant für die Verzerrung der Grundschiwingung und somit für den Verdichtungszustand des Bodens ist. Diese erste Oberschwingung besitzt eine Frequenz die der doppelten Unwuchtfrequenz entspricht. Der Messwert wird nun aus dem Amplitudenverhältnis der ersten Oberschwingung zur Grundschiwingung errechnet. Dieser wird beim *Compactometer* mit *Compaction Meter Value* ( kurz: *CMV*) bezeichnet. Der *CMV* – Wert ist dimensionslos und folgendermaßen definiert:

$$CMV = k \cdot \frac{a(2\Omega)}{a(\Omega)}$$

$a(2\Omega)$  ist die Beschleunigungsamplitude der Bandage in vertikaler Richtung bei doppelter Unwuchtfrequenz

$a(\Omega)$  ist die Beschleunigungsamplitude der Bandage in vertikaler Richtung bei einfacher Unwuchtfrequenz

$k$ : Werkseitig eingestellter Faktor

Zur Verdichtungsprüfung bzw. Messwertaufnahme sollte die Walze im Auflastbetrieb arbeiten und die Bandage längs ihrer gesamten Breite auf dem Boden aufliegen. Erst hierdurch werden eindeutige und reproduzierbare *CMV*- Messwerte erhalten.

### 3.3 Einflussgrößen auf die Messwertbildung und auf die Korrelation zu Vergleichswerten

Die in den vorherigen Abschnitten 3.2.1 bis 3.2.3 beschriebenen FDVK- Messwerte: Omega und CMV sind charakteristische Werte für die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Bodens. Mit diesen kann auch eine indirekte Aussage über die vorliegende Verdichtung getroffen werden. Hieraus ergeben sich für die Messwerte der FDVK verschiedene Einflussgrößen, welche die Randbedingungen bestimmen. Diese Randbedingungen sind: Bodenart, Dichte, Verdichtungsgrad, Steifigkeit, Wassergehalt, Schichtdicke etc.. Außerdem sind maschinentechnische Parameter, wie z.B. Walzengewicht, Vibrationsfrequenz, Unwuchtkraft, Fahrgeschwindigkeit usw. zu berücksichtigen: Diese Größen beeinflussen die Messwertbildung entscheidend und wirken auf unterschiedlich starke Weise zusammen.

Unter bestimmten Voraussetzungen können diese Einflussgrößen eine Zuordnung von Vergleichsversuch (bspw.  $E_{v2}$  oder  $D_{pr}$ ) zum FDVK- Messwert wesentlich erschweren. Um so besser aber die Einflussgrößen bekannt sind und konstant gehalten werden können, desto eindeutiger lässt sich eine Beziehung zwischen FDVK- Messwert und Vergleichswert herstellen.

#### 3.3.1 Messfläche, Messvolumen

Bei einer Zuordnung der FDVK- Messwerte zu bodenmechanischen Vergleichsversuchen muss berücksichtigt werden, dass mit herkömmlichen Messverfahren (Dichtebestimmung, Plattendruckversuch etc.) wesentlich kleinere Bodenvolumina erfasst werden, als mit den Messwerten der FDVK.

Das von der Prüfwalze bei jeder Messung erfasste Bodenvolumen entspricht bei einer Messfläche von  $1 \text{ m}^2$  und einer durchschnittlichen Messtiefe von  $1,5 \text{ m}$  circa  $1,5 \text{ m}^3$ . Dabei werden von einer Prüfwalze bei einer Fahrgeschwindigkeit von  $1 \text{ m/s}$  und einer Bandagenbreite von  $2 \text{ m}$  zwei Messungen pro Sekunde durchgeführt. Demgegenüber steht das Bodenvolumen bei der Dichtebestimmung mittels dem Ballonverfahren von rund  $0,006 \text{ m}^3$ . Das sind gerade mal  $0,4\%$  vom Messvolumen bei der FDVK. Beim statischen Plattendruckversuch kann mit einem untersuchten Bodenvolumen von ca.  $0,035 \text{ m}^3$  gerechnet werden. Die Einflusstiefe wurde hier mit etwa  $0,5 \text{ m}$  angenommen. Mittels Plattendruckversuch werden somit nur ungefähr  $2,3\%$  des Messvolumens der FDVK berücksichtigt.

Das ungünstige Verhältnis der Messvolumen zwischen FDVK- und Vergleichswert sorgt für eine zusätzliche Varianz in den erhaltenen Korrelationen, wodurch auch die Güte des Messwertzusammenhanges deutlich beeinflusst wird.

### 3.3.2 Bodenart, Wassergehalt

Generell nehmen die FDVK- Messwerte mit zunehmenden Wassergehalt bei gleicher Trockendichte ab. Je höher der Feinkorngehalt ( $d < 0,06 \text{ mm}$ ) desto ausgeprägter ist diese Abhängigkeit.

Bei einer Globalbetrachtung kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass bei einem grobkörnigen Boden der Wassergehalt keinen Einfluss auf den FDVK- Messwert ausübt und ein eindeutiger Zusammenhang zum Verdichtungszustand des Bodens ermittelt werden kann. Bei feinkörnigen Böden hingegen, ist der Wassergehalt auf die Bildung des FDVK- Messwertes von ausschlaggebender Bedeutung. Je höher der Wassergehalt desto mehr nimmt die Tragfähigkeit des Bodens bei gleicher Trockendichte ab. Selbst bei hoher Dichte kann durch eine nachfolgende Wassersättigung die Tragfähigkeit wesentlich reduziert werden. Im Gegensatz hierzu wird bei geringer Dichte und geringen Wassergehalt eine relativ hohe Tragfähigkeit festgestellt.

Der Messwert der FDVK ist in erster Linie ein Steifigkeitskennwert, mit dem indirekt ein Verdichtungszustand beurteilt werden kann. Bei fein- und gemischtkörnigen Bodenarten werden die FDVK- Messwerte vom wachsenden Feinkornanteil und dem zunehmenden Einfluss des Wassergehaltes und den plastischen Eigenschaften des Bodens bestimmt. Durch den dynamischen Lasteintrag der Vibrationswalzen wirken sich diese Zusammenhänge auf die FDVK- Messwerte stärker aus, als unter statischer Belastung, wie z.B. beim statischen Verformungsmoduls  $E_v$ .

Im Hinblick auf diese Abhängigkeiten sind bei der Erhebung der Kalibrierdaten vier Klassen gebildet worden. Diese Klassen unterscheiden sich durch den Feinkorngehalt, der bei der Versuchsdurchführung vorliegenden Böden. Diese Klassifizierung berücksichtigt hierbei die Abhängigkeit der FDVK- Messwerte vom Wassergehalt und kennzeichnet die Versuchsdaten im Hinblick auf ihre Sensitivität gegenüber einer Wassergehaltsänderung.

Die getroffenen Klassengrenzen bezüglich des Feinkorngehaltes orientiert sich nach dem "Merkblatt für flächendeckende dynamischen Verfahren zur Prüfung der Verdichtung im Erdbau" der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) [42]. Die Klassen ergeben sich folgendermaßen:

- (A) Klasse A: Feinkorngehalt ( $d < 0,06 \text{ mm}$ ) kleiner gleich 5%
- (B) Klasse B: Feinkorngehalt ( $d < 0,06 \text{ mm}$ ) zwischen 5 und 15%
- (C) Klasse C: Feinkorngehalt ( $d < 0,06 \text{ mm}$ ) zwischen 15 und 40%
- (D) Klasse D: Feinkorngehalt ( $d < 0,06 \text{ mm}$ ) größer 40% bzw. feinkörnige Bodenarten

Bei Böden, die der Klasse *A* zugeordnet werden, kann davon ausgegangen werden, dass kein bedeutender Wassergehaltseinfluss auf die FDVK- Messwerte in Erscheinung tritt. Messwerte von Böden der Klasse *B* werden in zunehmenden Maße vom Wassergehalt beeinflusst, falls dieser über den jeweiligen Proctorwassergehalt  $w_{Pr}$  liegen.

Innerhalb der Klassen *C* und *D* besteht ein zunehmend ausgeprägter Einfluss des Wassergehaltes auf die Messwertbildung. Für eine Interpretation der Messwerte wird eine Wassergehaltsbestimmung immer wichtiger bzw. bei Klasse *D* unumgänglich. In Tabelle 3-1 sind die Bodenklassen noch einmal dargestellt und beschrieben:

Bodenklasse	Feinkornanteile ( $d < 0,063 \text{ mm}$ ) in Massen %	Wassergehaltseinfluss auf FDVK- Messwert	Bodenarten
A	$\leq 5 \%$	kann vernachlässigt werden	Grobkörnige Böden: GE, GW, GI, SE, SW, SI
B	$> 5 \%$ und $\leq 15 \%$	kann vernachlässigt werden, falls: $w$ kleiner $w_{Pr}$	Gemischtkörnige Böden: GU, SU, GT, ST
C	$> 15 \%$	kann vernachlässigt werden, falls: $w$ deutlich kleiner $w_{Pr}$	Gemischtkörnige Böden: GU*, SU*, GT*, ST*
D	$\geq 40 \%$	nicht vernachlässigbar! falls $w$ deutlich kleiner $w_{Pr}$ werden interpretierbare Messwerte erhalten	Feinkörnige Böden

Tabelle 3-1: Kriterien für die Einteilung der bei den Versuchen vorliegenden Böden in die Klassen A, B, C, D

### 3.3.3 Tiefenwirkung, Schichtdicke, Untergrundeinfluss

Bei geschichteten Baugrund können die von Schicht zu Schicht vorliegenden Bodeneigenschaften einen wesentlichen Einfluss auf die Messwertbildung der FDVK haben. Die erhaltenen FDVK- Messwerte geben dann möglicherweise die Bodeneigenschaften der zu prüfenden Schicht nur unzureichend wieder.

Im Erdbau wird der Boden mit Schichtdicken von bis zu *50 cm* eingebaut und verdichtet. In Bezug auf die Messwertbildung geht man bei einem mehrlagigen Aufbau nicht von einem Schichtwechsel aus, wenn sich das Schüttgut in seiner Kornzusammensetzung nicht wesentlich ändert. Ein Schichtwechsel liegt dann vor, wenn die Bodeneigenschaften und zwar speziell die Kornzusammensetzung, die Steifigkeit, die Sensitivität gegenüber Wassergehaltsänderungen, oder der Wassergehalt sich wesentlich ändern. Ob eine Messwertbeeinflussung infolge sich ändernder Bodeneigenschaften zu erwarten ist, hängt zudem von der Messtiefe der Vibrationswalze ab. Liegt der Schichtwechsel innerhalb der Messtiefe der Vibrationswalze wird der FDVK- Messwert durch den unter der zu prüfenden Schicht liegenden Untergrund beeinflusst. Die Auswirkung auf die Größe des Messwertes nimmt mit kleiner werdender Schichtdicke und mit zunehmenden Steifigkeitsverhältnis zwischen den Böden im Vergleich zur Messtiefe der Walze kontinuierlich zu.

Für eine Beurteilung des Untergrundeinflusses auf die Messwertbildung wurden Versuche durchgeführt, bei denen einerseits auf einer weichen und andererseits auf einer harten Unterlage lagenweise Boden eingebaut, verdichtet und mit der FDVK geprüft wurde. Hierbei hat sich gezeigt, dass mit steigender Anzahl von Einbaulagen der Untergrundeinfluss zunehmend an Auswirkung verliert und bei einer Schütthöhe von ca. *1,5 m* ganz verschwindet. In Abbildung 3-6 ist gem. [42] die Abhängigkeit vom FDVK- Wert des Untergrundes und der Einbauschichtdicke am Beispiel einer schweren Vibrationswalze dargestellt.

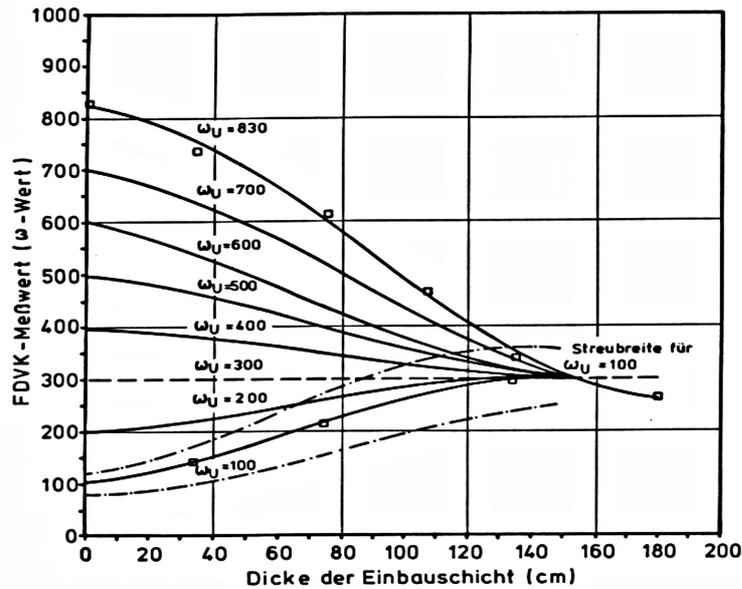


Abbildung 3-6: FDVK-Messwert ( $\omega$ ) in Abhängigkeit vom FDVK-Messwert des Untergrundes ( $\omega_U$ ) und der Einbauschichtdicke am Beispiel einer schweren Vibrationswalze gem. [42]

Aufgrund dieser Versuchsergebnisse wird von einer Messtiefe bzw. Prüftiefe der FDVK von ca. 1,5 m ausgegangen. Dieser Wert wurde auch in der Datenbank als Kriterium herangezogen, um die Kalibrierdaten im Hinblick auf einen Untergrundeinfluss zu bewerten. Der Ansatz einer Messtiefe von 1,5 m dient nur als Richtwert, da der Untergrundeinfluss auf die Messwertbildung kontinuierlich mit steigender Schichtstärke abnimmt. Als weitere wesentliche Einflussparameter auf die Messtiefe ist das Walzengewicht, die verwendete Verdichtungsamplitude und wie schon erwähnt, das Steifigkeitsverhältnis zwischen zu prüfender Schicht und Untergrund zu sehen. Es gilt: Je größer Walzengewicht und Verdichtungsamplitude desto größer ist auch die Messtiefe der Vibrationswalze.

Aufgrund der dargestellten Zusammenhänge sollten zumindest in der Theorie möglichst leichte Walzen zur Verdichtungsprüfung mittels FDVK gefordert werden. Hierdurch könnte die Messtiefe weitestgehend auf den Einbaubereich beschränkt werden. Aus wirtschaftlichen und baupraktischen Gründen werden zur Verdichtung im Erdbau aber in der Regel 10 bis 12 t schwere Walzen eingesetzt, so dass zusätzlich zum eigentlichen Verdichtungsgerät spezielle Prüfwalzen vorzuhalten wären. Dies kann aber im Hinblick auf eine arbeitsintegrierte Vorgehensweise der Verdichtungsprüfung und aus Kosten- und Zeitgründen - es werden zusätzliche Prüffahrten notwendig - nicht akzeptiert werden.

Letztlich bleibt zu empfehlen, bei der Verdichtungsprüfung mittels vorangegangener Kalibrierung des FDVK-Messwertes auf einen bodenmechanischen Vergleichswert die dem jeweiligen Walzentyp entsprechend kleinste Verdichtungsamplitude zu wählen. Nur so kann

ein möglicher Untergrundeinfluss abgeschwächt und zudem die Messvolumina von FDVK-Messwert und Vergleichswert angenähert werden. Sollen hingegen Prüfwalzen zur quantitativen Baugrunderkundung als Vorwegmaßnahme eingesetzt werden, spricht nichts gegen eine große Messtiefe der Prüfwalze bzw. gegen die Verwendung einer „großen Amplitude“ bei der Messfahrt.

Tabelle 3-2 enthält eine generelle Einschätzung über den Einfluss des Untergrundes bzw. der Schichtdicke der zu prüfenden Schicht auf die Versuchsergebnisse der FDVK. Mit den Bezeichnungen N, T, T1 und T2 werden die Kalibrierdaten für eine Auswertung klassifiziert. Ausgangsgröße dieser Einteilung ist die bereits getroffene Annahme, dass der FDVK-Messwert einer schweren Vibrationswalze eine Wirkungstiefe von ca. 1,5 m besitzt. Des Weiteren wurden für den statischen, als auch für den dynamischen Plattendruckversuch eine Einflusstiefe von 50 cm und für die Dichtebestimmung 30 cm Einflusstiefe angenommen. Diese groben Näherungswerte sollen eine erste Bewertung der vorliegenden Wertepaare im Hinblick auf eine gemeinsame Auswertung ermöglichen.

Kennzeichnung	Erläuterungen
N	<u>Kein Untergrundeinfluss!</u> Schichtstärke $D_s \geq 150$ cm
T	<u>Untergrundeinfluss!</u> Schichtstärke $D_s \leq 150$ cm. Prüfung auf (Trag-) Schichten ohne Angabe des Untergrundes auf seine Tragfähigkeit: z.B. FSS auf <i>Planum</i>
T1	<u>Untergrundeinfluss!</u> Schichtstärke $D_s \leq 150$ cm. Prüfung auf (Trag-) Schichten mit Schichtgrenze zum <u>Unterbau bzw. Untergrund</u> . z.B. FSS auf <i>Erdplanum</i> oder <i>Dammschüttung</i> auf <i>Untergrund</i>
T2	<u>Untergrundeinfluss!</u> Schichtstärke $D_s \leq 150$ cm. Prüfung auf (Trag-) Schichten mit Schichtgrenze innerhalb des <u>Oberbaues</u> . z.B. STS auf FSS

Tabelle 3-2: Klassifizierung der Kalibrierdaten anhand der Schichtstärke  $D_s$  und dem Anwendungsbereich der FDVK

### 3.3.4 Maschinenparameter

Die Wechselwirkungen zwischen vibrierender Bandage und Boden werden zusätzlich zu den beschriebenen Bodeneinflussgrößen von Maschinenparametern der Walze bestimmt. Bei den Einflussparametern der Walze wird zwischen konstanten und veränderlichen Maschinenparametern unterschieden.

Zu den konstanten Maschinenparametern zählen das Betriebsgewicht der Walze, die Achslast der Räder, das Gewicht der Bandage und das des Rahmens. Hinzu kommen noch die Masse der Verdichtungsunwucht sowie in der Regel zwei wählbare Amplituden mit entsprechenden Anregungsfrequenzen. Rahmen- und Bandagengewicht sowie die Amplitude und die Anregungsfrequenz nehmen starken Einfluss auf die Messwertbildung, die Messtiefe bzw. auf das vom Messwert erfasste Bodenvolumen.

Durch die rotierende Unwuchtmasse wird die Walzenbandage infolge der Fliehkraft ausgelenkt. In der Verdichtungstechnik wird diese Auslenkung als Verdichtungsamplitude bezeichnet. Je nach Wahl der Exzentrizität oder der Größe der Unwuchtmasse wird zwischen großer und kleiner Amplitude unterschieden. Die Angaben in den Firmenprospekten, bezeichnen einen theoretischen Wert einer Schwingungsamplitude, welcher nur bei unendlich großer Anregungsfrequenz erreicht wird. Die Amplitude errechnet sich zu:

$$a_{th} = \frac{m_u \cdot r_u}{m_B}$$

Hierbei ist  $m_u$  die Masse und  $r_u$  die Exzentrizität des quadratischen Schwingungserreger und  $m_B$  die in Schwingung versetzte Masse bzw. die Bandagenmasse der Vibrationswalze.

Bei den meisten Walzentypen ist es derzeit möglich zwischen zwei verschiedenen Amplituden zu wählen, wobei in der Regel bei einem Wechsel der Amplitude auch eine andere Anregungsfrequenz vorgegeben ist. Bei einigen Fabrikaten kann die Frequenz auch stufenlos innerhalb einer gewissen Spanne eingestellt werden. Beim Einsatz der "großen Amplitude" für die Verdichtungsprüfung wird eine größere Messtiefe erreicht, als bei der "kleinen Amplitude", da durch die höhere Unwuchtkraft der großen Amplitude auch mehr Energie in den Boden eingetragen wird und die mechanischen Eigenschaften des Bodens weiträumiger erfasst werden. Durch die größere Messtiefe steigt außerdem das Verhältnis des erfassten Bodenvolumens von FDVK-Messwert zum Vergleichswert im Vergleich zur "kleinen Amplitude" ungünstig an. Bei einer Kalibrierung der FDVK-Messwerte werden unter Verwendung der "kleinen Amplitude" i.d.R. deutlich bessere korrelative Beziehungen

zum Vergleichswert erhalten, als mit der "großen Amplitude". Erfahrung beim praktischen Einsatz haben diesen Sachverhalt bestätigt.

Die veränderlichen Maschinenparameter, die einen Einfluss auf die Messwertbildung nehmen, sind die Frequenz der Verdichtungsunwucht sowie die Fahrgeschwindigkeit der Walze. Generell nimmt das FDVK-Messwertniveau mit steigender Unwuchtfrequenz zu. Umgekehrt steigt dieses bei einer Abnahme der Frequenz. Zusätzlich erfahren hohe Messwerte ungleich stärker eine Veränderung als niedrige, so dass die Spanne zwischen kleinstem und größtem Messwert mit steigender Frequenz deutlich abnimmt. Die charakteristischen Merkmale des Messwertverlaufes entlang einer gefahrenen Spur bleiben aber erhalten. Bei niedrigeren Anregungsfrequenzen zeigen die Messwerte eine größere Bandbreite, wodurch sich eine bessere Differenzierbarkeit des Messwertverlaufes ergibt.

Ein ähnliches Verhalten zeigt der Messwertverlauf bei Variation der Geschwindigkeit. Eine höhere Geschwindigkeit ruft somit kleine FDVK-Messwerte hervor und umgekehrt. Außerdem lassen sich bei niedrigeren Geschwindigkeiten die Messwerte durch einen markanteren Verlauf und eine größere Bandbreite besser voneinander unterscheiden.

Die Messgeräte: *Terrameter* und *Compactometer* zeigen bei der Messwertbildung im Bezug auf die Variation der Anregungsfrequenz und der Fahrgeschwindigkeit ein ähnliches aber unterschiedlich stark ausgeprägtes Verhalten. Allgemein reagiert der *Compactometer* sensibler auf Änderungen der Parameter Frequenz und Geschwindigkeit als der *Terrameter*. Gerade im Bereich kleiner Schwankungen der Frequenz zur Voreinstellung, ergeben sich beim *Terrameter* kaum Veränderungen im Messwertverlauf [12].

Aufgrund dieser Abhängigkeiten ist bei Messfahrten generell auf eine konstante Anregungsfrequenz der Unwucht und auf eine konstante Fahrgeschwindigkeit der Walze während des Messbetriebes zu achten. Nur so bleibt die Aussagekraft bzw. die Reproduzierbarkeit der FDVK-Messwerte erhalten und eine Kalibrierung der Prüfwalze die in Verbindung mit der Prüffahrt steht, behält ihre Gültigkeit.

Weiterhin bestehen fahrtechnische Einflüsse auf die Bildung der FDVK-Messwerte. Hierbei sind im besonderen die Fahrrichtung (Vorwärts- oder Rückwärtsfahrt), Ebenheit und Neigung der Prüffläche, Fahrten an Böschungen, mögliche Montagefehler der Beschleunigungsaufnehmer und instationäre Betriebszustände (Übergang von Auflast- zu Sprungbetrieb) der Walze zu nennen. Die genau einzuhaltenden Rahmenbedingungen für eine Prüffahrt regelt ein Merkblatt [43] und eine technische Prüfvorschrift (TP BF-StB) [55].

## 4 Datenbank

Wie einführend bereits dargestellt, ist nach dem derzeitigen Entwicklungsstand für jede Baumaßnahme eine Kalibrierung der Prüfwalze auf die speziellen Verhältnisse vor Ort durchzuführen. Deswegen sollen für Regelanwendungen Anforderungswerte an die Messwerte der FDVK abgeleitet werden. Um auf die Erfahrungen und Erkenntnisse zurückgreifen zu können, auf deren Grundlage die herkömmlichen Anforderungswerte ( $E_{v2}$ ,  $D_{Pr}$ ,  $n_a$ ) der technischen Regelwerke gebildet wurden, wird versucht, einen Zusammenhang zwischen diesen und den FDVK-Messwerten ( $\Omega$ ) herzustellen. Zu diesem Zweck ist eine Datenbank erstellt worden, in die Walzenkalibrierungen der verschiedensten Anwendungsfälle eingetragen wurden.

Eine Reihe, der in die Datenbank eingeflossenen Kalibrierdaten stammen aus Versuchen, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Außerdem konnte auf bereits vorliegende Daten aus früheren Forschungsarbeiten zurückgegriffen werden. Weiterhin bestand die Aufgabe darin, bundesweit bereits bestehende FDVK Kalibrierdaten zu sammeln. Hierzu war die Mithilfe von Straßenbauämtern, Ingenieurbüros, Baufirmen usw. notwendig.

Die Kalibrierdaten sind nach folgenden Gesichtspunkten gesammelt worden:

- Anwendungsfall
- Einbaubereich, Anforderung
- Bodenart, Einbaumaterial
- Walzentyp, Walzenparameter
- FDVK-Messsystem

Darüber hinaus waren alle Bereiche des Erdbaus von Interesse, bei denen die FDVK eingesetzt werden konnte, wie Einschnitts-, Auftrags-, und Dammbereiche, Erdplanien und Tragschichten. Bezüglich der Bodenart sollen neben den natürlichen grob-, gemischt- und feinkörnigen Böden auch Recyclingbaustoffe betrachtet werden. Im Hinblick auf die zum Einsatz kommenden Walzen, sollten alle Größen - selbstfahrende und angehängte - erfasst werden.

Auf diese Weise sollte eine breite Datenbasis geschaffen werden, um ein möglichst umfassendes Bild an Kalibrierergebnissen mit verschiedensten Randbedingungen zu erhalten.

#### 4.1 Datensammlung, Datenbankaufbau

Für die Erfassung und Auswertung der gesammelten Daten wurde eine "Paradox@" Datenbank erstellt, in welche die Kalibrierdaten entsprechend ihrer Herkunft und den vorliegenden Randbedingungen eingetragen wurden. Innerhalb der Datenbankstruktur können die Daten nach verschiedenen Kriterien abgefragt werden, was eine gezielte Auswertung nach speziellen Gesichtspunkten ermöglicht.

Das Modell der Datenbank ist in einzelne Tabellen gegliedert. Diese sind hierarchisch miteinander verknüpft. Die Tabellen enthalten für die jeweilige Kalibrierung zugehörigen Teilinformationen. Die Versuchsdaten wurden nach Prüflosen bzw. Kalibrierfeldern getrennt in die Datenbank eingegeben, wobei jedes dieser Prüflose eine Gruppe darstellt. Für jede Gruppe gelten - soweit dies anhand der vorliegenden Informationen beurteilt werden kann - die gleichen Randbedingungen. Folgende Abbildung 4-1 zeigt die einzelnen Tabellen und deren Beziehungen zueinander auf.

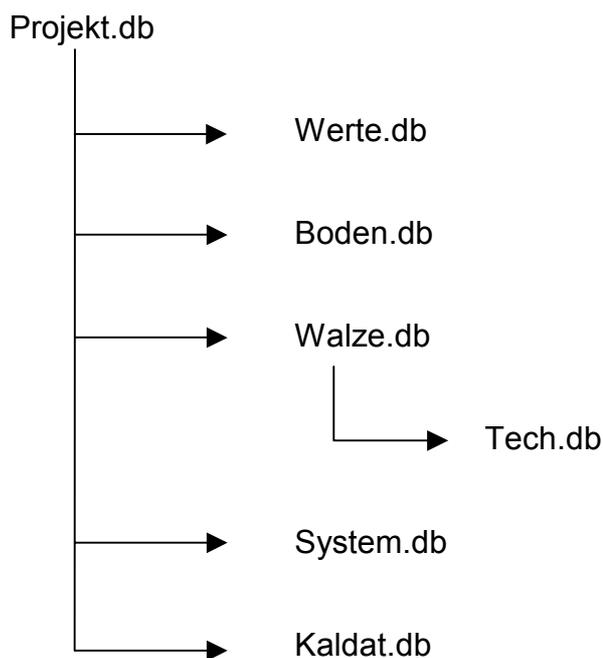


Abbildung 4-1: Darstellung der Datenbank; Verknüpfung der Einzeltabellen

In der Haupttabelle *Projekt.db* erscheinen die Daten, die zur allgemeinen Beschreibung und Kennzeichnung eines Prüfloses notwendig sind. Die Untertabellen: *Werte.db*, *Boden.db*, *Walze.db*, *Tech.db*, *System.db* und *Kaldat.db* enthalten zu den Vergleichsversuchen Angaben über Boden, Walze (Fahrgeschwindigkeit, Amplitude), Walzenparameter (Gewicht, Unwuchtkraft, etc.), Messsystem und Kalibrierergebnisse.

Damit die Daten für die entsprechenden Auswertungen gezielt abgefragt werden können, sind diese in den Tabellen mit bestimmten Klassifizierungsmerkmalen versehen worden. Durch diese Merkmale konnte unter den gesammelten Daten eine Vorauswahl im Hinblick auf deren Randbedingungen getroffen werden. Die so eingegrenzten und zu Messreihen zusammengefassten Daten stehen dann für eine weitere Auswertung zur Verfügung.

## 4.2 Anforderungen an das Verdichten

Aufgrund von Erfahrungswerten und zahlreichen Untersuchungen der Verdichtungs- und Verformungseigenschaften von Böden wurden für verschiedene Anwendungsfälle erdbautechnische Anforderungswerte für den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  sowie für den Verformungsmodul  $E_v$  aufgestellt. Diese Anforderungswerte sind in den technischen Regelwerken ZTVE - StB und ZTVT - StB enthalten. Im folgenden werden diese aufgeführt. Die Darstellung dient als Grundlage für die im weiteren Verlauf der Arbeit durchgeführten Auswertungen.

Die Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2 enthält entsprechend ZTVE – StB die zum Nachweis einer ausreichenden Verdichtung geforderten Verdichtungsgrade  $D_{Pr}$ .

	Bereich	Bodengruppen	$D_{Pr}$ [%]
1	Planum bis 1,0 m Tiefe bei Dämmen und 0,5 m Tiefe bei Einschnitten	GW, GI, GE SW, SI, SE	100
2	1,0 m unter Planum bis Dammsohle		98

Tabelle 4-1: Anforderung an das 10% - Mindestquantil für den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  bei grobkörnigen Böden.

	Bereich	Bodengruppe	$D_{Pr}$ [%]
1	Planum bis 0,5 m Tiefe	GU, GT, SU, ST GU*, GT*, SU*, ST*, U, T, OK, OU, OT	100 97
2	0,5 m unter Planum bis Dammsohle	GU, GT, SU, ST, OH, OK GU*, GT*, SU*, ST*, U, T, OU, OT	97 95

Tabelle 4-2: Anforderung an das 10% - Mindestquantil für den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  bei gemischt- und feinkörnigen Böden

In der Tabelle 4-3 sind die auf dem Planum geforderten Verformungsmoduln  $E_{v2}$  angegeben.

	Bauklasse	Abminderung	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
1	SV und I bis IV		120
2	SV und I bis IV	Falls Anforderung von 120 MN/m <sup>2</sup> nur durch Verdichten der auf dem Planum einzubauenden Tragschicht erreicht werden kann	100
3	V und VI		100
4	V und VI	Falls Anforderung von 120 MN/m <sup>2</sup> nur durch Verdichten der auf dem Planum einzubauenden Tragschicht erreicht werden kann	80
5	Bei frostempfindlichem Untergrund bzw. Unterbau mindestens:		45

Tabelle 4-3: Anforderungen an den Verformungsmoduln  $E_{v2}$  auf dem Planum

Tabelle 4-4, 4-5 und 4-6 enthält Anforderungswerte, welche auf der Frostschuttschicht nachgewiesen werden müssen:

Nr.	Bereiche	Baustoffgemische	Bauklasse: SV, I bis V	Bauklasse: VI
			$D_{Pr}$ [%]	$D_{Pr}$ [%]
1	Oberfläche Frostschuttschicht bis 0,2 m Tiefe	GW, GI sowie Baustoffgemische aus Brechsand, Splitt und Schotter der Lieferkörnung 0/5 bis 0/56	103	100
		GE, SE, SW, SI	100	
4	Unterhalb des Bereiches Nr. 1	Alle Baustoffgemische des Bereiches Nr. 1	100	

Tabelle 4-4: Mindestanforderung für den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  von Baustoffgemischen in der Frostschuttschicht

Wird der Plattendruckversuch ersatzweise zur indirekten Kennzeichnung des Verdichtungszustandes verwendet, muss bei Frostschutzschichten nachgewiesen werden:

	Bauklasse	Anforderung: $D_{Pr}$ [%]	Verhältniswert $E_{v2} / E_{v1}$	
1	SV, I bis V	$\geq 103$	$\leq 2,2$	Überschreitung der Verhältniswerte zulässig falls: $E_{v1} \geq 0,6$ gefordert $E_{v2}$ nach Tabelle 4-6
2	SV, I bis V	$< 103$	$\leq 2,5$	Überschreitung der Verhältniswerte zulässig falls: $E_{v1} \geq 0,6$ gefordert $E_{v2}$ nach Tabelle 4-6

Tabelle 4-5: Anforderungen an den Verhältniswert  $E_{v2} / E_{v1}$  auf der Frostschutzschicht zur indirekten Kennzeichnung des Verdichtungszustandes.

	Bauklasse	Abminderung	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
1	SV und I bis IV		120
2	SV und I bis IV	Falls Anforderung von 120 MN/m <sup>2</sup> nur durch Verdichten der über der Frostschutzschicht einzubauenden Tragschicht erreicht werden kann	100
3	V und VI		100
4	V und VI	Falls Anforderung von 100 MN/m <sup>2</sup> nur durch Verdichten der über der Frostschutzschicht einzubauenden Tragschicht erreicht werden kann	80

Tabelle 4-6: Anforderungswerte an den Verformungsmodul auf der Frostschutzschicht, bei einem Verformungsmodul auf dem Planum von mindestens  $E_{v2} = 45$  MN/m<sup>2</sup>

Für Kiestragschichten und Schottertragschichten werden folgende Anforderungen an den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  und den Verformungsmodul  $E_{v2}$  gestellt, wobei der Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} = 103\%$  für die Tragschicht nicht unterschritten werden darf.

Wird der Plattendruckversuch ersatzweise zur indirekten Kennzeichnung des Verdichtungszustandes verwendet, müssen auf Tragschichten folgende Werte ermittelt werden:

	Bauklasse	Anforderung: $D_{Pr}$ [%]	Verhältniswert $E_{v2} / E_{v1}$	
1		$\geq 103$	$\leq 2,2$	Überschreitung des Verhältniswerte zulässig falls: $E_{v1} \geq 0,6$ gefordert $E_{v2}$
2		$< 103$	$\leq 2,5$	Überschreitung des Verhältniswerte zulässig falls: $E_{v1} \geq 0,6$ gefordert $E_{v2}$

Tabelle 4-7: Anforderungen an den Verhältniswert  $E_{v2}/E_{v1}$  auf Kies und Schottertragschichten zur indirekten Kennzeichnung des Verdichtungszustandes.

Ausgehend von einem Verformungsmodul auf der Frostschuttschicht von  $E_{v2} = 120 \text{ MN/m}^2$ , müssen in Abhängigkeit von der Schichtdicke folgende  $E_{v2}$  - Werte erreicht werden.

	Mindest. $E_{v2}$ - Wert auf der Frostschuttschicht	Schichtdicke [cm]	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]
Kiestragschichten	120	$\geq 20$	150
	120	$\geq 25$	180
	100	$\geq 20$	120
	100	$\geq 25$	150
Schottertragschichten	120	$\geq 15$	150
	120	$\geq 20$	180
	100	$\geq 15$	120
	100	$\geq 20$	150

Tabelle 4-8: Anforderungswerte an den Verformungsmodul  $E_{v2}$  für Kies- und Schottertragschichten.

## 5 Simulationsmodell

Soll das Bewegungsverhalten einer Vibrationswalze einer numerischen Simulation zugänglich gemacht werden, ist das mechanische System des Verdichtungsgerätes durch ein Modell abzubilden und durch einen mathematischen Ansatz zu beschreiben. Das Simulationsmodell muss die Maschine und den Boden mit ihren dynamischen Eigenschaften derart erfassen, dass das wirkliche Bewegungsverhalten mit seinen wesentlichen Charakteristika am Computer nachgebildet werden kann. Hierdurch können Parameterstudien durchgeführt werden.

Die Entwicklung des Simulationsmodells teilt sich in zwei Abschnitte. Der erste Teil behandelt das mechanische System der Vibrationswalze. Der zweite Teil geht auf die Modellbildung des Bodens ein. Für das Modell werden Kennwerte beschrieben, mit denen sich der Baugrund durch ein Feder - Dämpfer - Modell ersetzen lässt. Hierzu werden grundlegende dynamische Eigenschaften des elastisch isotropen Halbraums dargestellt und notwendige Parameter ermittelt. Aus den Betrachtungen zum mechanischen Modell der Vibrationswalze und den Bodenkenngrößen wird abschließend das vollständige Schwingungssystem aufgestellt.

Bei der analytischen Beschreibung des Schwingungsverlaufes wird zwischen den Zuständen Sprung- und Auflastbetrieb unterschieden. Im Gegensatz zum reinen Auflastbetrieb mit permanenten Bodenkontakt, wird in dieser Arbeit für den Sprungbetrieb keine geschlossene Lösung angegeben. Die Auflastphase und Flugphase der Maschine werden abschnittsweise definiert und mittels Übergangsbedingungen gekoppelt. Für den Boden wird zur Flugphase der Maschine eine Kriechphase beschrieben.

Nach der Beschreibung des Simulationsmodells werden Simulationsergebnisse vorgestellt. Aus den berechneten Größen: Schwingweg, -geschwindigkeit, und -beschleunigung wird ein dimensionsloser Steifigkeits- bzw. Verdichtungskennwert abgeleitet. Über diesen Kennwert werden Korrekturfaktoren berechnet, mit Hilfe derer sich FDVK- Messwerte verschiedener Walzen auf das Messwertniveau einer Bezugswalze umrechnen lassen.

## 5.1 Simulationsmodell Vibrationswalze

### 5.1.1 Walzenmodell

Das Modell des Verdichtungsgerätes wird ausgehend von einem Walzenzug hergeleitet. Hierzu wird der Teil der Vibrationswalze betrachtet, welcher die zur Schwingung angeregte Bandage enthält (siehe Abbildung 5-1).

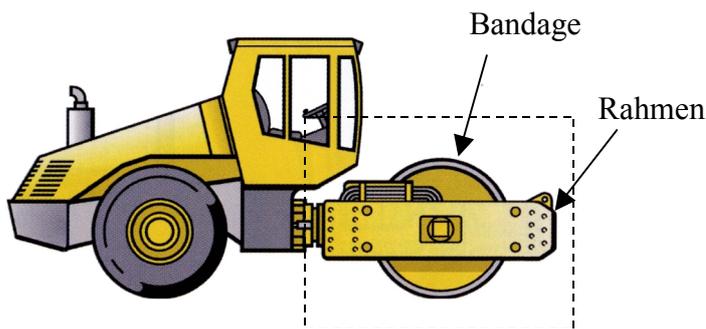


Abbildung 5-1: Prinzipskizze eines Walzenzuges

Der zur Schwingung angeregte Teil des Walzenzuges kann in zwei Teilsysteme, den Rahmen und die Bandage, aufgeteilt werden. Rahmen und Bandage sind über Gummielemente verbunden, wobei die Lagerung mittels eines Dämpfer – Feder - Elementes idealisiert wird. Hieraus ergibt sich folgendes System (Abbildung 5-2):

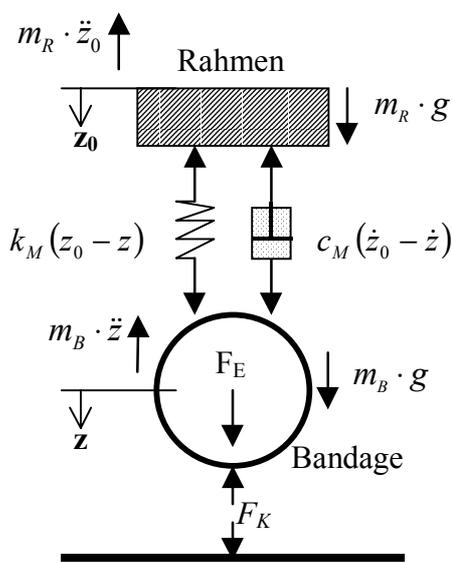


Abbildung 5-2: Idealisierung eines Walzenzuges durch ein Feder – Dämpfer – Modell

Die mit der Frequenz  $f_u$  umlaufende Unwuchtmasse  $m_u$  erzeugt eine Fliehkraft  $F_R = m_u \cdot r_u \cdot \Omega^2$ , wobei ihr zeitabhängiger Vertikalanteil  $F_E = F_R \cdot \cos(\Omega t)$  ist. Bei der Simulation des Bewegungsverhaltens wird nur der Vertikalanteil  $F_E$  der Unwuchtkraft  $F_R$  betrachtet.

Die Bewegungsgleichungen für Rahmen und Bandage lassen sich mit Hilfe der D'Alembert'schen Trägheitskraft aufstellen. Die sich ergebenden Differentialgleichungen lauten wie folgt:

- Rahmen  $m_R \cdot \ddot{z}_0 + c_M \cdot (\dot{z}_0 - \dot{z}) + k_M \cdot (z_0 - z) = m_R \cdot g$
- Bandage  $m_B \cdot \ddot{z} + F_K - c_M \cdot (\dot{z}_0 - \dot{z}) - k_M \cdot (z_0 - z) = m_B \cdot g + F_E$

Die für die Teilsysteme erhaltenen Ausdrücke können weiter vereinfacht werden. Durch die entsprechenden Dämpfungselemente ist der Rahmen bezüglich der Bandage so abgestimmt, dass seine Eigenfrequenz (ca. 2 bis 5 Hz.) weit unterhalb der Erregerfrequenz (25 bis 45 Hz) der Unwucht liegt. Der Rahmen bleibt somit annähernd in Ruhe und wird nicht zur Schwingung angeregt [34]. Seine Trägheitskräfte können deswegen vernachlässigt werden.

$$\rightarrow m_R \cdot \ddot{z}_0 \approx 0$$

Da  $\dot{z}_0 \approx 0$  und  $z_0 \approx 0$  ergeben sich zudem nur relativ kleine Feder- und Dämpfungskräfte aus den Bewegungen des Rahmens. Die Differentialgleichungen des Rahmens und der Bandage vereinfachen sich nun zu:

- Rahmen  $c_M \cdot \dot{z} + k_M \cdot z = -m_R \cdot g$
- Bandage  $m_B \cdot \ddot{z} + F_K + c_M \cdot \dot{z} + k_M \cdot z = m_B \cdot g + F_E$

Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen können die DGL's in folgender Gleichung zusammengefasst werden [34].

$$m_B \cdot \ddot{z} + F_K = (m_B + m_R) \cdot g + F_E$$

Hierbei wirkt die Masse des Rahmens  $m_R$  als statische Auflast, die nicht zur Schwingung angeregt wird.

### 5.1.2 Bodenmodell

Zur Erfassung der mechanischen Eigenschaften des Bodens im Simulationsmodell werden folgende Vereinfachungen getroffen. Die Bodeneigenschaften werden mit zeitlich konstanten Kenngrößen beschrieben, wodurch das mechanische Verhalten des Bodens unter dynamischer Last nicht von der Anzahl der Belastungszyklen abhängt und dieses im wesentlichen unverändert bleibt. Hierzu wird ein linear elastisches Material mit einem zusätzlichen Dämpfungsanteil eingeführt. Als Materialkenngrößen zur Beschreibung der Bodeneigenschaften wird der dynamische Schubmodul  $G_{dyn}$  [MN/m<sup>2</sup>], die Dichte des Bodens  $\rho$  [t/m<sup>3</sup>] und die Querdehnzahl  $\nu$  [-] verwendet. Diese Kenngrößen werden entweder aus entsprechenden Tabellen oder aus Formeln abgeleitet, welche die Literatur zur Verfügung stellt. Die Verwendung von Tabellenwerken ist jedoch problematisch, da die angegebenen Werte in einem recht großen Bereich streuen und Informationen über die Art und Bedingungen ihrer Ermittlung fehlen. Außerdem können keine äußeren Parameter wie Spannungs- und Verzerrungszustände berücksichtigt werden. Werden hingegen Formeln verwendet, können die benötigten Kennwerte empirisch abgeschätzt werden, was zu differenzierteren Ergebnissen führt [8].

Für die Berechnungen des Schwingungsverhaltens von dynamisch erregten Fundamenten kann das in Abbildung 5-3 dargestellte Feder – Dämpfer – Modell verwendet werden.

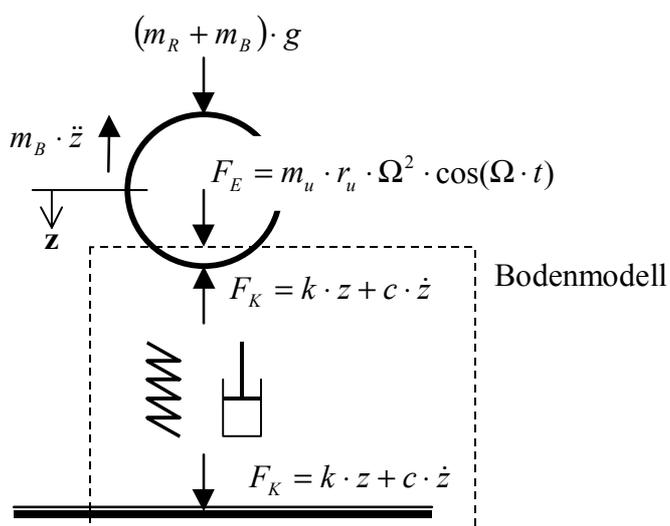


Abbildung 5-3: Feder - Dämpfer - Modell für das Einmassenschwinger – Analogon

Die im Modell angesetzten Steifigkeits- und Dämpfungskennwerte ( $k$  und  $c$ ) wurden von Lysmer (in [24], [54]) als Näherungslösung für starre Kreisfundamente abgeleitet. Mit diesen

Kennwerten kann das dynamische Verhalten eines vertikal schwingenden Fundamentes im niedrigen bis mittleren Frequenzbereich approximiert werden.

Federsteifigkeit: 
$$k = \frac{4 \cdot G_{dyn} \cdot r}{1 - \nu}$$

Dämpfung: 
$$c = \frac{3,4 \cdot r^2}{1 - \nu} \sqrt{\rho \cdot G_{dyn}}$$

Massenverhältnis: 
$$B = \frac{1 - \nu}{4} \cdot \frac{m}{\rho \cdot r^3}$$

Dämpfungsgrad: 
$$D = \frac{0,425}{\sqrt{B}}$$

Durch die Federsteifigkeit  $k$  wird der elastische Anteil des Bodenverhalten unter statischer Last beschrieben. Wohingegen durch die Dämpfung  $c$  nur der Energieentzug aus Abstrahlung der Schwingungsenergie in den Baugrund berücksichtigt wird. Die Materialdämpfung bleibt dabei unberücksichtigt [8].

Da nach [54] die statische Steifigkeit  $k$  mit zunehmender Frequenz abnimmt, wird zur effektiv schwingende Masse (hier:  $m_B$ ) eine zusätzliche fiktive Masse  $m_{add}$  addiert.

Zusätzliche fiktive Masse: 
$$m_{add} = \frac{0,27 \cdot m}{B}$$

Die dargestellten Gleichungen ergeben frequenzunabhängige Größen, wobei die Federsteifigkeiten aus einer statischen Analyse und die Dämpfungswerte aus einer dynamischen Analyse im Resonanzbereich abgeleitet wurden [8]. Da die angegebenen Gleichungen nur für starre Kreisfundamente gelten, sind Rechteckfundamente in flächengleiche Kreisfundamente umzurechnen.

Der Radius  $r$  des Kreisfundamentes ergibt sich aus den Abmessungen des

Rechteckfundamentes zu: 
$$r = \sqrt{\frac{a \cdot b}{\pi}}$$
 [Siehe Abbildung 5-14].

Das dargestellte Modell eines Einmassenschwingers stimmt im Bereich einer dimensionslosen Frequenz von  $0,3 < a_0 < 0,8$  (nach [19]) sehr gut mit der exakten Halbraumlösung überein, wobei nach [54] bis zu einer Frequenz von  $a_0 < 2$  von einer guten Übereinstimmung gesprochen werden kann. Bei höheren Frequenzen kommen im zunehmenden Maße die Trägheit und die Wellenabstrahlung des Baugrundes zum tragen, so dass mit frequenzabhängigen Kennwerten gerechnet werden muss. Betrachtet man das Diagramm in

Abbildung 5-4 liegen die berechneten dimensionslosen Frequenzen für eine Walze (Achslast 70 kN) mit einer Anregungsfrequenz von  $f_u = 36 \text{ Hz}$  ausreichend im beschriebenen Frequenzband, so dass die frequenzunabhängigen Kennwerte  $k$  und  $c$  zur Simulation des Bewegungsverhaltens einer Vibrationswalze verwendet werden können.

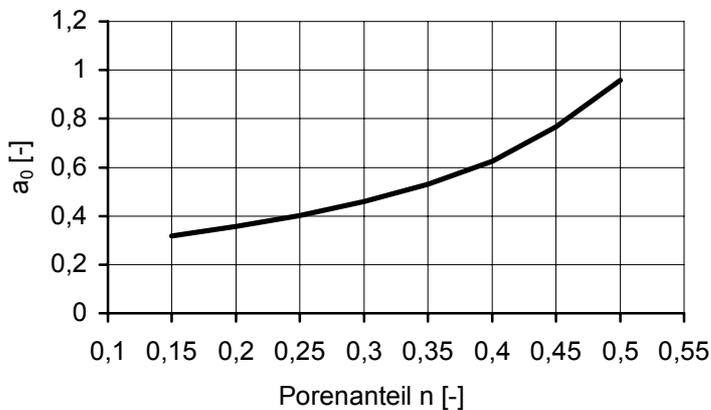


Abbildung 5-4: Dimensionslose Frequenz  $a_0$  in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$  für eine Anregungsfrequenz  $f_u = 36 \text{ Hz}$ ; Dargestellt für eine Walze mit einer Achslast von 70 kN

Die dimensionslose Frequenz errechnet sich zu: 
$$a_0 = \frac{f_u \cdot r}{c_s}$$

Sämtliche Größen zur Beschreibung der dynamischen Bodeneigenschaften werden aus Beziehungen zum Porenanteil  $n$  - als alleinige Unbekannte - abgeleitet. Der Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit - ausgedrückt durch den Reibungswinkel  $\varphi$  - und dem Porenanteil  $n$  wird nach Kézdi [27] (siehe Kapitel 2.3.2 Abbildung 2-4) hergestellt.

### 5.1.2.1 Dynamischer Schubmodul (Einschichtsystem)

Statische Berechnungen insbesondere Setzungsberechnungen werden in der Bodenmechanik üblicherweise mit dem  $E$ -Modul bzw. dem Steifemodul  $E_s$  durchgeführt. In der Bodendynamik wird im Gegensatz zur Bodenmechanik bei der Betrachtung von Spannungs-Verformungsbeziehungen meist der Schubmodul  $G$  verwendet. Der Schubmodul  $G$  und der Steifemodul  $E_s$  können über die Querdehnzahl  $\nu$  zueinander umgerechnet werden:

$$G = \frac{E_s}{2} \cdot \frac{1 - 2 \cdot \nu}{1 - \nu}$$

Die oben angegebene Beziehung zwischen Steifemodul  $E_s$  und Schubmodul  $G$  gilt auch für die dynamischen Moduli:

$$G_{dyn} = \frac{E_{sd}}{2} \cdot \frac{1 - 2 \cdot \nu}{1 - \nu}$$

Häufig liegen aber für eine Aufgabenstellung in der Bodendynamik nur Kennwerte aus statischen Untersuchungen vor. Der Schubmodul bzw. der Steifemodul eines Materials unter dynamischer Belastung unterscheidet sich aber entscheidend von dem unter statischer Belastung. Dieser Unterschied wird umso deutlicher, je ausgeprägter der betrachtete Boden bindige Eigenschaften aufweist. Für eine Umrechnung des Steifemoduls  $E_s$  in den dynamischen Wert  $E_{sd}$  sind in der Literatur Tabellenwerke und Diagramme veröffentlicht. Folgende Abbildung 5-5 aus [21] zeigt ein Diagramm aus dem Verhältniswerte zur Umrechnung vom Steifemodul  $E_s$  in den dynamischen  $E$ -Modul abgelesen werden können.

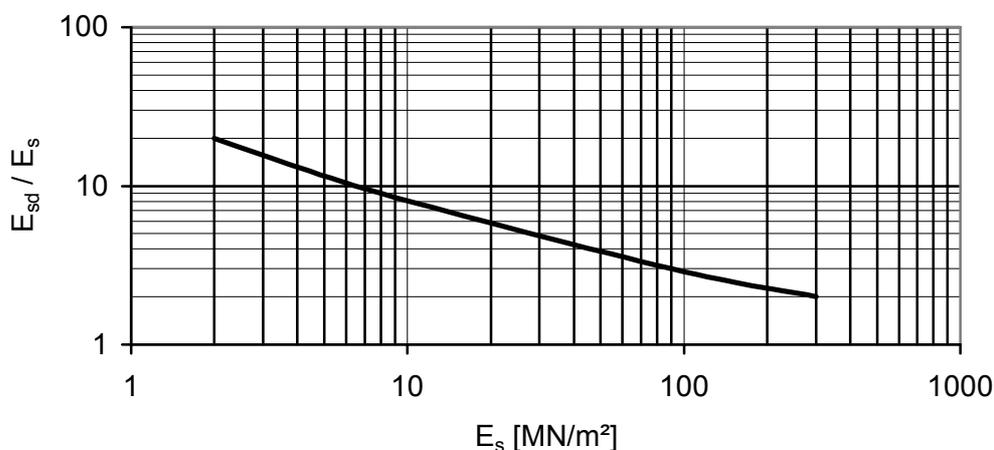


Abbildung 5-5: Verhältnis des dynamischen  $E$ -Moduls zum Steifemodul  $E_s$  (aus [21])

Weiterhin existieren Tabellenwerke aus denen direkt dynamische Kennwerte für verschiedene Böden ablesbar sind (siehe [21]).

Die Größe des dynamischen Schubmoduls  $G_{dyn}$  hängt zudem wesentlich von der Größe der Schubverzerrung  $\gamma$  bei dynamischen Belastung und des statischen Spannungszustandes ab. In Abbildung 5-6 ist der Zusammenhang zwischen Schubverzerrung und normiertem Schubmodul  $G' = G_{dyn}/G_{dyn0}$  aufgezeigt. Hierbei stellt  $G_{dyn0}$  den Maximalwert des dynamischen Schubmoduls  $G_{dyn}$  dar. Im dargestellten Streuband liegen Kiese und Sande im oberen Bereich, wohingegen sich bindige Böden eher im unteren Bereich befinden.

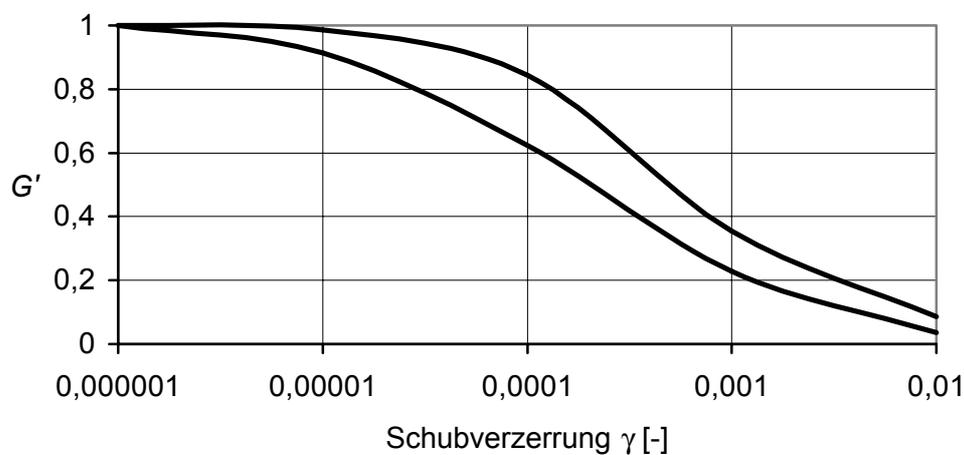


Abbildung 5-6: Normierter Schubmodul  $G'$  in Abhängigkeit von der Schubverzerrung  $\gamma$  (aus [21])

Mit wachsender Lagerungsdichte nimmt die Größe des dynamischen Schubmoduls  $G_{dyn}$  zu. Außerdem werden bei eckiger bzw. gebrochener Kornform generell auch größere Schubmoduli erhalten, als bei runder oder gedrungener Kornform. Unter Berücksichtigung des statischen Spannungszustandes  $\bar{\sigma}'_0$  und der Lagerungsdichte - ausgedrückt durch die Porenzahl  $e$  - sowie der Kornform kann der Maximalwert des dynamischen Schubmoduls  $G_{dyn0}$  nach folgenden empirischen Gleichungen (aus [24]) abgeschätzt werden.

- Sand, runde Kornform;  $\bar{\sigma}'_0 \geq 96 \text{ kN/m}^2$  :  $G_{dyn0} = 6900 \cdot \frac{(2,17 - e)^2}{1 + e} \cdot (\bar{\sigma}'_0)^{0,5}$  [kN/m<sup>2</sup>]
- Sand, runde Kornform;  $\bar{\sigma}'_0 < 96 \text{ kN/m}^2$  :  $G_{dyn0} = 4800 \cdot \frac{(2,12 - e)^2}{1 + e} \cdot (\bar{\sigma}'_0)^{0,6}$  [kN/m<sup>2</sup>]
- Sand, eckige Kornform :  $G_{dyn0} = 3230 \cdot \frac{(2,97 - e)^2}{1 + e} \cdot (\bar{\sigma}'_0)^{0,5}$  [kN/m<sup>2</sup>]

In den o.g. Gleichungen sind:

$e$  Porenzahl [-]

$\bar{\sigma}'_0$  mittlere allseitige effektive Spannung [ $kN/m^2$ ], bestehend aus den effektiven Spannungen in den drei Achsrichtungen:  $\sigma'_x$ ,  $\sigma'_y$ ,  $\sigma'_z$

$G_{dyn0}$  Maximaler Schubmodul von  $G_{dyn}$  in [ $kN/m^2$ ]

Aus den oben angegebenen Gleichungen wird deutlich, dass der Maximalwert des dynamischen Schubmoduls  $G_{dyn0}$  mit Zunahme der allseitigen effektiven Spannungen  $\bar{\sigma}'_0$  und mit Verringerung der Porenzahl  $e$  zunimmt. Da aber im Boden der Spannungszustand über die Tiefe nicht konstant ist, ergibt sich für den Schubmodul  $G_{dyn0}$  auch keine konstante Größe. Vereinfachend kann dieser aber konstant angesetzt werden. In der Literatur werden eine Reihe von Vorschlägen gemacht, wie  $G_{dyn0}$  ermittelt werden kann:

- Stokoe (zitiert in [20]) setzt für die Ermittlung des Schubmodul  $G_{dyn0}$  die Spannung in einer Tiefe an, bei welcher die Summe der Überlagerungsspannungen aus Bodeneigengewicht und den Spannungen aus der Auflast ein Minimum ergibt.
- Richart et al (zitiert in [20]) schlagen vor, den Schubmodul  $G_{dyn0}$  in der Tiefe anzunehmen, die der Frequenz zugeordneten halben Rayleighwellenlänge entspricht
- Vrettos (zitiert in [20]) verwendet den Schubmodul  $G_{dyn0}$ , welcher sich in einer Tiefe ergibt, bei der die Scherwellengeschwindigkeit der Geschwindigkeit der Rayleighwelle entspricht.

In dieser Arbeit wird zur Ableitung des Schubmoduls  $G_{dyn0}$  die Vorgehensweise nach Stokoe gewählt. Hierzu werden die Spannungen aus der Auflast der Bandage bzw. des Walzenkörpers mit den Spannungen aus Bodeneigengewicht über die Tiefe summiert. Anschließend wird die Stelle  $z_0$  bestimmt, bei welcher die erhaltenen Spannungen ein Minimum ergeben. Zur Ermittlung des maßgebenden Schubmoduls  $G_{dyn0}$  wird nun die Spannung  $\bar{\sigma}'_0$  angesetzt, welche sich aus Bodeneigengewicht und Auflast in der Tiefe  $z_0$  ergibt.

Die Formel zur Berechnung der Spannungen unter dem Eckpunkt einer rechteckförmigen Lastfläche mit den Seitenlängen  $a$  und  $b$  lautet:

$$\sigma'_{zEcke}(z) = \frac{\sigma_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \arctan \frac{a \cdot b}{R \cdot z} + \frac{a \cdot b \cdot z}{R} \cdot \frac{R_1^2 + R_2^2}{R_1^2 \cdot R_2^2} \right) \quad \text{Es gilt: } a > b$$

$$\sigma'_{yEcke}(z) = \frac{\sigma_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \arctan \frac{a \cdot b}{R \cdot z} - \frac{a \cdot b \cdot z}{R_1^2 \cdot R} \right)$$

$$\sigma'_{xEcke}(z) = \frac{\sigma_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \arctan \frac{a \cdot b}{R \cdot z} - \frac{a \cdot b \cdot z}{R_2^2 \cdot R} \right)$$

$$R^2 = a^2 + b^2 + z^2 \quad R_1^2 = b^2 + z^2 \quad R_2^2 = a^2 + z^2$$

Die maßgebenden Spannungen  $\sigma'_z(z)$  aus Wirkung der Auflast ergeben sich unter der Mitte der Lastfläche und nicht unter dem Eckpunkt  $\sigma'_{zEcke}(z)$ . Werden aber in o.g. Gleichung nur die halben Fundamentabmessungen eingesetzt, so können die Lastflächen derart überlagert werden, dass man die Spannungen unter dem Mittelpunkt der Fläche bekommt:

$$\sigma'_{x,y,z}(z) = 4 \cdot \sigma'_{x,y,zEcke}(z)$$

Die Spannungen aus Bodeneigengewicht wird erhalten aus:

$$\sigma'_{zBoden}(z) = \gamma \cdot z \quad (\gamma \text{ Wichte des Bodens [kN/m}^3])$$

Die Summe der Spannungen aus Auflast und Bodeneigengewicht ergibt sich demnach:

$$\sigma'_{gz}(z) = \sigma'_z(z) + \sigma'_{zBoden}(z) \quad \text{wobei } \sigma'_{xBoden}(z_0) = \sigma'_{yBoden}(z_0) = k_0 \cdot \sigma'_{zBoden}(z_0)$$

Die mittlere allseitige effektive Spannung  $\bar{\sigma}'_0$  in der Tiefe  $z_0$  errechnet sich nun zu:

$$\bar{\sigma}'_0 = \frac{1}{3} (\sigma'_{gz}(z_0) + \sigma'_{gy}(z_0) + \sigma'_{gx}(z_0))$$

$k_0$  ist der Ruhedruckbeiwert für nicht vorbelastete Böden nach der Elastizitätstheorie. Er errechnet sich aus der Querdehnzahl  $\nu$ . Werte für die Querdehnzahl  $\nu$  und weitere Angaben zu seiner Ermittlung sind im Kapitel 5.1.2.3 angegeben:

$$k_0 = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

Die Tiefe  $z_0$ , bei der sich die kleinsten Spannungen aus Auflast und Bodeneigengewicht ergeben, wird aus der Variation von  $\sigma'_{gz}(z) = \sigma'_z(z) + \sigma'_{zBoden}(z)$  nach  $z$  und Bestimmen der Nullstelle  $z_0$  gewonnen. Als weitere Bedingung muss die zweite Ableitung von  $\sigma'_{gz}(z) = \sigma'_z(z) + \sigma'_{zBoden}(z)$  positiv in  $z_0$  sein. Für diese Arbeit ist im Zuge der Programmierung des Simulationsmodells ein Programmmodul erstellt worden, dass durch direktes Ermitteln der Funktionswerte von  $\sigma'_{gz}(z) = \sigma'_z(z) + \sigma'_{zBoden}(z)$  iterativ den kleinsten Spannungswert in der Tiefe  $z_0$  berechnet. Die Abbildung 5-7 enthält für verschiedene Porenanteile  $n$  des Bodens, die aus dem Spannungsverlauf ermittelten Tiefen  $z_0$  zur Ableitung des dynamischen Schubmoduls  $G_{dyn0}$ . Die Werte wurden für eine Vibrationswalze mit einer Achslast von 70 kN abgeleitet.

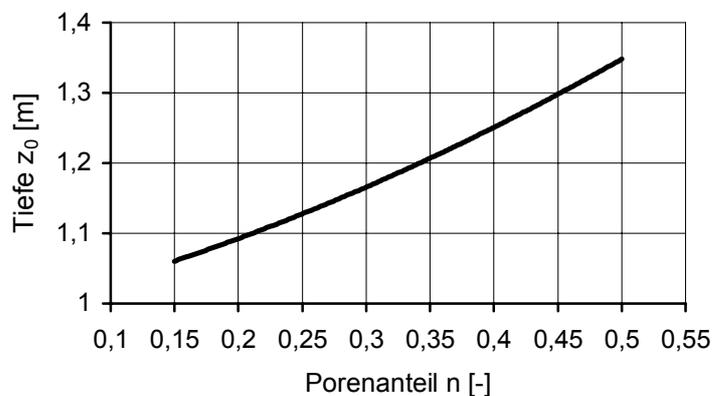


Abbildung 5-7: Maßgebende Tiefe  $z_0$  zur Bestimmung des dynamischen Schubmoduls  $G_{dyn}$  in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$ : Gültig für eine Walze mit einer Achslast von 70 kN

Die zugehörigen Schubmodule können in Abbildung 5-8 in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$  abgelesen werden.

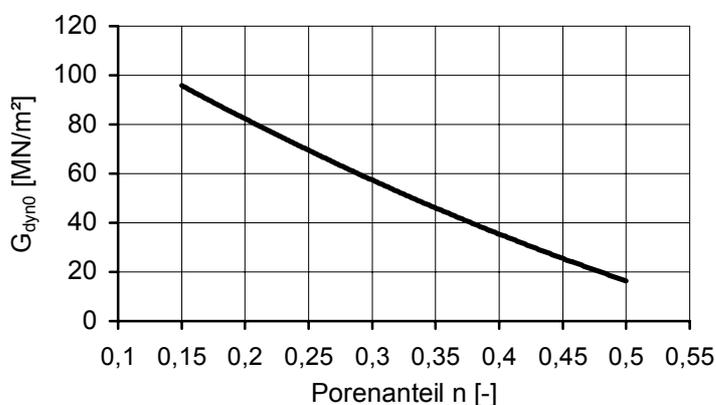


Abbildung 5-8:  $G_{dyn0} = f(n)$ . Gültig für eine Walze mit einer Achslast von 70 kN

### 5.1.2.2 Dynamischer Schubmodul (Zweischichtsystem)

Im vorangegangenen Kapitel 5.1.2.1 (dynamischen Schubmodul: Einschichtsystem) wurde davon ausgegangen, dass auftretende Schubverzerrungen  $\gamma$  im Boden so klein sind, dass der Maximalwert des Schubmoduls  $G_{dyn0}$  als Kennwert angesetzt werden kann. In der Tat treten aber beim Verdichtungsvorgang im oberflächennahen Bereich unter der Walzenbandage so große Verformungen auf, dass dieser Ansatz nicht aufrechterhalten werden kann. Näherungsweise nimmt der Schubmodul  $G_{dyn}$  auf ca. 20% seines Maximalwertes  $G_{dyn0}$  ab (siehe Abbildung 5-6). Aufgrund dessen wird für die Ermittlung des Schubmodul ein Zweischichtsystem betrachtet. Die erste Schicht wird direkt unter der Walzenbandage modelliert und stellt die von der Walzenbandage verformte Bodenzone dar. Die Mächtigkeit dieser Schicht wird entsprechend der Grundbruchtiefe eines Einzelfundamentes mit den Lastflächenabmessungen  $(a, b)$  nach *DIN 4017* berechnet. Der für die Berechnung der Grundbruchtiefe notwendige Reibungswinkel  $\varphi'$  des Bodens wird nach Kézdi [27] in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$  ermittelt (siehe Kapitel 2.3.2 Abbildung 2-4). Innerhalb dieser ersten Bodenschicht wird der dynamischen Schubmodul mit 20% seines Maximalwertes  $G_{dyn0}$  angesetzt. Über folgende Formel kann die Grundbruchtiefe nach *DIN 4017* abgeschätzt werden:

$$d_{gl} = r_0 \cdot e^{(\omega \cdot \tan \varphi)} \quad \text{wobei} \quad r_0 = \frac{b}{\sin(90^\circ - \varphi)} \cdot \sin\left(45 + \frac{\varphi}{2}\right) \quad \text{und} \quad \omega = 90^\circ$$

Für den Bodenbereich unter der ersten Schicht wird weiterhin der für das Einschichtsystem nach Kapitel 5.1.2.1 ermittelte Schubmodul angesetzt. In Abbildung 5-9 sind in Abhängigkeit vom Porenanteils  $n$  Grundbruchtiefen für eine Walze mit einer Achslast von 70 kN aufgetragen.

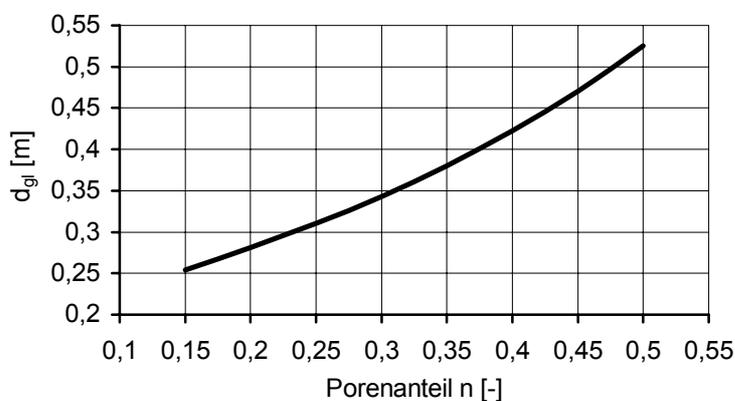


Abbildung 5-9: Grundbruchtiefe bzw. Schichtenmächtigkeit der ersten Bodenschicht. Abgeleitet für eine Walze mit einer Achslast von 70 kN

Nach Holzlöhner (in [24]) kann zur Berücksichtigung der Schubmoduli  $G_i$  eines Mehrschichtsystems das Diagramm in Abbildung 5-10 verwendet werden. Die hier gezeigte Einflusslinie ist für die Querdehnzahl  $\nu = 0,25$  gültig, wobei sich die Einflusslinien für andere Querdehnzahlen nicht wesentlich von der gezeigten unterscheiden.

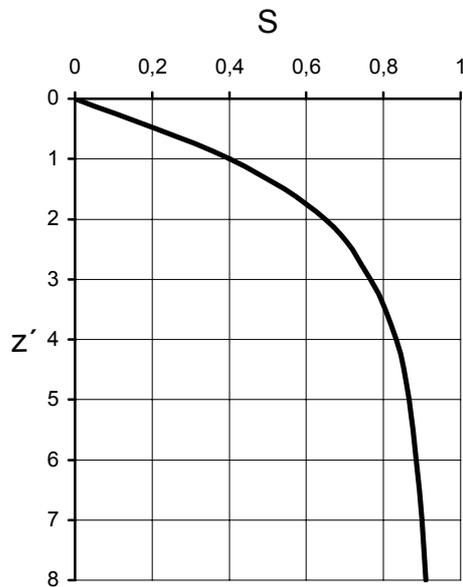


Abbildung 5-10: Einflusslinie zur Berücksichtigung eines veränderlichen Schubmoduls in einem geschichteten Halbraum für eine Querdehnzahlen  $\nu = 0,25$  (in [24]).

Aus diesem Diagramm werden die Einflusszahlen  $S_i$  betreffend der bezogenen Tiefe  $z'$  für jede Schicht  $i = 1, \dots, n$  abgelesen. Die bezogene Tiefe  $z'$  berechnet sich zu:

$$z' = \frac{z}{r}$$

Hier ist  $z$  der Abstand der Fundamentsohle zur entsprechenden Schichtgrenze und  $r$  der Radius eines Kreisfundamentes. Werden Rechteckfundamente betrachtet, brauchen diese nur in flächengleiche Kreisfundamente mit dem Radius  $r$  umgerechnet werden.

Die Ermittlung eines äquivalenten Schubmoduls  $G_e$  für das Mehrschichtsystem erfolgt über nachfolgende Beziehung aus den Werten  $\Delta S_i$  und  $G_{dyni}$ . Der Schubmodul  $G_e$  wird dann zur Berechnung der Dämpfungs- und Steifigkeitskenngrößen für das Einmassen Feder – Dämpfer - Modell herangezogen.

$$\frac{1}{G_e} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{G_{dyni}} \cdot \Delta S_i$$

### 5.1.2.3 Querdehnzahl

Die Querdehnzahl  $\nu$  wird bei Verformungsberechnungen zur Berücksichtigung eines räumlichen Spannungszustandes benötigt. Mit  $\nu$  wird ausgedrückt, ob sich Boden unter Belastung zusammendrücken oder volumenkonstant verhält. Außerdem werden mit der Querdehnzahl  $\nu$  der  $E$ -Modul und der Schubmodul  $G$  ineinander umgerechnet. In dieser Arbeit geht die Querdehnzahl  $\nu$  in die Berechnung der Federsteifigkeit  $k$  und Dämpfung  $c$  des Schwingungssystems ein.

In den Empfehlungen des Arbeitskreises 9 „Bodendynamik“ der DGGT [8] werden für verschiedene Bodenarten folgende Querdehnzahlen  $\nu$  als Anhaltswert vorgeschlagen:

Sand und Kies	0,25 – 0,35
Schluff je nach Sand- und Tongehalt	0,35 – 0,45
Ton je nach Wassergehalt	0,45 – 0,49

Für Lockergesteine unter Grundwasser kann nach dieser Empfehlung ein  $\nu = 0,45$  angegeben werden.

Sind Kompressions- und die Scherwellengeschwindigkeit ( $c_P$ ,  $c_S$ ) des Bodens bekannt, kann die Querdehnzahl  $\nu$  auch aus diesen berechnet werden:

$$\nu = \frac{c_P^2 - 2 \cdot c_S^2}{2 \cdot (c_P^2 - c_S^2)}$$

Die Wellengeschwindigkeit der Scher- und Kompressionswelle kann am treffendsten aus Laufzeitmessungen bei Feldversuchen ermittelt werden. Diese können aber auch bei Kenntnis des Schubmoduls  $G$ , des Steifemoduls  $E_S$  und der Dichte  $\rho$  des Bodens über folgende Beziehung abgeschätzt werden:

$$c_P = \sqrt{\frac{E_S}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}} \quad \text{Kompressionswellengeschwindigkeit}$$

$$c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{Scherwellengeschwindigkeit}$$

Eine weitere Möglichkeit die Querdehnzahl  $\nu$  näherungsweise zu bestimmen, besteht darin, den Ruhedruckbeiwert aus der Elastizitätstheorie mit der Formel von Jaky gleichzusetzen und die Gleichung nach  $\nu$  aufzulösen.

$$k_0 = \frac{\nu}{1-\nu} = \frac{1}{\mu-1} \quad \text{Nach Jaky:} \quad k_0 = \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \sin \varphi'\right) \cdot \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi'}{2}\right) \approx 1 - \sin \varphi'$$

Für die Berechnung von  $\nu$  wird vereinfachend die Näherung  $k_0=1-\sin\varphi'$  verwendet. Die Bestimmung von  $\nu$  wird über die „Hilfsgröße“  $\mu$  (Poissonzahl  $\mu = 1/\nu$ ) durchgeführt.

$$\frac{1}{\mu-1} = 1 - \sin \varphi' \quad \text{wobei} \quad \mu = \frac{1}{1 - \sin \varphi'} + 1 \rightarrow \frac{1}{\mu} = \nu = \frac{1 - \sin \varphi'}{2 - \sin \varphi'}$$

In der Abbildung 5-11 sind Querdehnzahlen  $\nu$  in Abhängigkeit vom Reibungswinkel  $\varphi'$  angegeben.

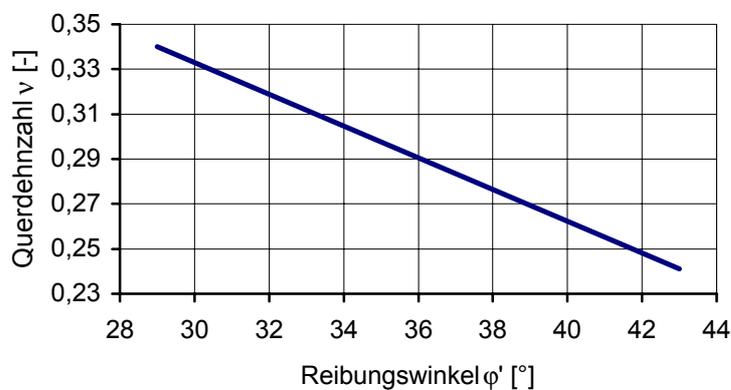


Abbildung 5-11: Die Querdehnzahl  $\nu$  abhängig vom Reibungswinkel  $\varphi'$

In Abbildung 5-12 sind nun in Abhängigkeit des Porenanteils  $n$  die Querdehnzahlen  $\nu$  für Kies- und Sandböden dargestellt. Die Beziehung zwischen Querdehnzahl  $\nu$  und Porenanteil  $n$  wird nach Kézdi [27] (siehe Kapitel 2.3.2, Abbildung 2-4) hergestellt.

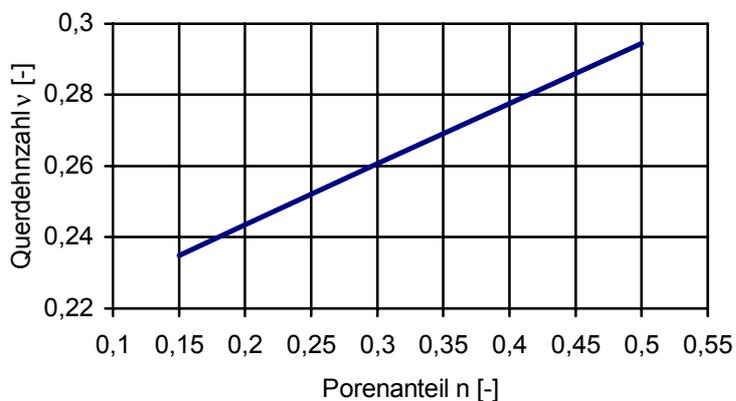


Abbildung 5-12: Die Querdehnzahl  $\nu$  abhängig vom Porenanteil  $n$

#### 5.1.2.4 Geometrie

Das Bodenverhalten unter dynamischer Anregung wird wie eingangs erwähnt, mit Hilfe eines Feder - Dämpfer - Modells beschrieben. Soll die Federsteifigkeit  $k$  und die Dämpfung  $c$  bestimmt werden, sind als Eingangswerte zu den entsprechenden Formeln noch die Abmessungen der Aufstandsfläche der Walzenbandage zu bestimmen.

Im folgenden wird auf die Herleitung der Abmessung und auf die Ermittlung eines äquivalenten Kreisfundamentes eingegangen. Der Radius des sich ergebenden Kreisfundamentes geht als Parameter in die Berechnung ein. Die Aufstandsfläche - und somit auch der Fundamentradius - hängt insbesondere davon ab, wie tief der Walzenkörper in den Boden einsinkt. Das Maß der Einsenkung ist wiederum von den Festigkeitseigenschaften bzw. der Dichte und dem Reibungswinkel des Bodens abhängig. Die Aufstandsbreite  $b$  der Bandage wird nun aus der Grundbruchberechnung für Flächengründungen nach DIN 4017 hergeleitet. Dies geschieht indem die Grundbruchspannung  $\sigma_{0f}$  nach DIN 4017 mit der Spannung unter der Aufstandsfläche des Walzenkörpers gleichgesetzt wird. Hierbei wird vereinfachend von einer konstanten Spannungsverteilung unter der Aufstandsfläche ausgegangen. Bei diesem Ansatz wird die gekrümmte Walzenbandage im Bereich ihrer Aufstandsfläche als ebene Fläche betrachtet (siehe Abbildung 5-13).

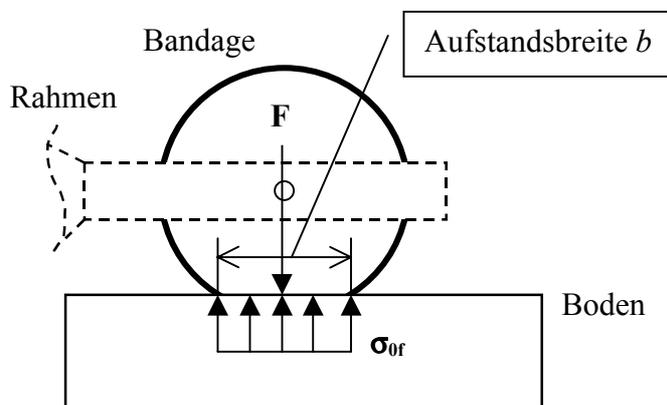


Abbildung 5-13: Systemskizze der Auflage des Walzenkörpers auf dem Boden

Die Grundbruchspannung  $\sigma_{0f}$  ergibt sich nach DIN 4017 wie folgt, wobei der Term für den Anteil aus Kohäsion und der Einbindetiefe vernachlässigt wird:

$$\sigma_{0f} = \gamma_2 \cdot b \cdot N_b \cdot v_b$$

Die Spannungen aus dem Walzenkörper ergeben sich zu:

$$\sigma_{0f} = \frac{F}{a \cdot b}$$

Durch Gleichsetzen obiger Ausdrücke ergibt sich somit eine Aufstandsweite  $b$ :

$$\frac{F}{a \cdot b} = \gamma_2 \cdot b \cdot N_b \cdot v_b \Rightarrow b = \sqrt{\frac{F}{a \cdot N_b \cdot \gamma_2 \cdot v_b}}$$

Aus den jetzt bekannten Abmessungen  $a$  und  $b$  wird ein flächengleiches Kreisfundament mit Radius  $r$  gebildet:

$$r = \sqrt{\frac{a \cdot b}{\pi}}$$

In den verwendeten Formeln bedeuten:

$F$ : Gewicht des Walzenkörpers bzw. Achslast ermittelt aus der Bandagenmasse  $m_B$  und der Rahmenmasse  $m_R$  der Vibrationswalze

$a$ : Bandagenbreite (Fundamentlänge)

$b$ : Aufstandsweite (Fundamentbreite)

$r$ : Ersatzradius für ein Fundament mit den Abmessungen ( $a$ ,  $b$ )

$\gamma_2$ : Wichte des Bodens

$v_b$ : Formbeiwert zur Berücksichtigung der Fundamentform.

$v_b = 1$  (Streifenfundament) wird als Näherung genommen.

$N_b$ : Tragfähigkeitsbeiwert. Dieser ermittelt sich entsprechend den Auswertung der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo), Berlin nach folgender Gleichung aus dem Reibungswinkel  $\varphi'$  des Bodens:

$$N_b = (N_d - 1) \cdot \tan \varphi' \quad N_d = \tan^2 \left( 45 + \frac{\varphi'}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi'}$$

$$\text{somit wird } N_b \text{ zu: } N_b = \left[ \tan^2 \left( 45 + \frac{\varphi'}{2} \right) \cdot e^{\pi \cdot \tan \varphi'} - 1 \right] \cdot \tan \varphi'$$

Auf Grundlage des Diagrammes von Kézdi [27] (Abbildung 2-4) kann die Aufstandsbreite  $b$  und der äquivalente Kreisradius  $r$  in Abhängigkeit des Porenanteiles  $n$  des Bodens folgendermaßen dargestellt werden (Abbildung 5-14):

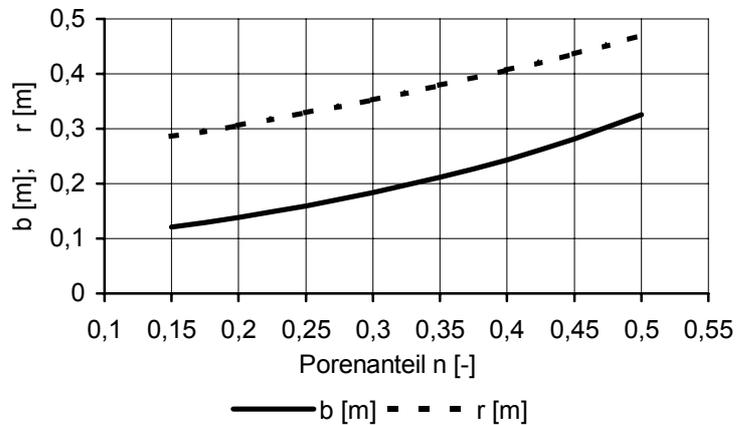


Abbildung 5-14: Aufstandsbreite  $b$  [m] und äquivalenter Kreisradius  $r_0$  [m] in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$  [-]. Gültig für eine Walze mit einer Achslast von 70 kN.

Die sich aus der Aufstandsbreite  $b$  der Walzenbandage ergebenden Sohlnormalspannungen bzw. Grundbruchspannungen  $\sigma_{0f}$  sind in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$  des Bodens in Abbildung 5-15 dargestellt.

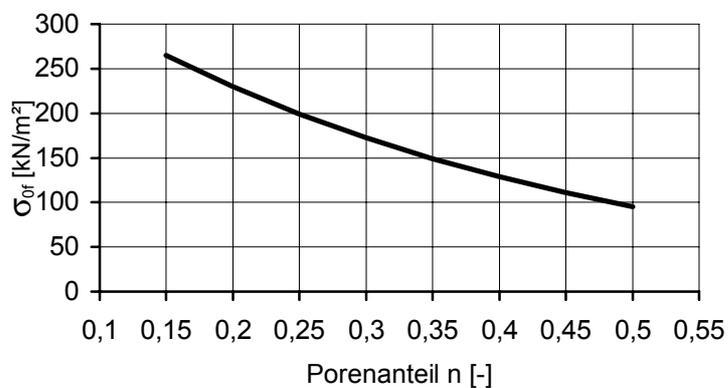


Abbildung 5-15: Sohlnormalspannungen  $\sigma_{0f}$  in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$  für Sand und Kies. Gültig für eine Walze mit einer Achslast von 70 kN

### 5.1.3 Analytische Formulierung des Schwingungssystems

#### 5.1.3.1 Auflastphase

Über die in Kapitel 5.1.1 hergeleitete Differentialgleichung (DGL) wird das Bewegungsverhalten der Walzenbandage unter permanentem Kontakt zum Boden beschrieben. In der Auflastphase wird die Weggröße  $z$  mit dem Index  $a$  gekennzeichnet.

$$m_B \cdot \ddot{z}_a + F_K = (m_{Badd} + m_R) \cdot g + F_E$$

$$\text{mit } F_K = k \cdot z_a + c \cdot \dot{z}_a \quad \text{und} \quad m_{Badd} = m_B + m_{add}$$

ergibt sich die Differentialgleichung (DGL) für die Auflastphase zu:

$$m_B \cdot \ddot{z}_a + k \cdot z_a + c \cdot \dot{z}_a = (m_{Badd} + m_R) \cdot g + F_E$$

Innerhalb der Auflastphase muss noch zwischen der Belastungs- und Entlastungsphase unterschieden werden. In der Belastungsphase  $\dot{z}_a \geq 0$  wird die Bodensteifigkeit  $k$  aus dem Schubmodul  $G_e$  des Zweischichtsystem nach Kapitel 5.1.2.2 ermittelt, da in dieser Phase plastischen Verformungen bzw. sehr große Schubverzerrungen im Boden auftreten. Im Gegensatz zur Belastungsphase treten in der Entlastungsphase  $\dot{z}_a \leq 0$  im Boden hauptsächlich elastischen Verformungen mit kleinen Schubverzerrungen auf. Der maßgebenden Schubmoduls  $G_{dyn0}$  wird nun anhand des Einschichtsystems nach Kapitel 5.1.2.1 bestimmt. Zur gemeinsamen Betrachtung der Belastungs- und Entlastungsphase wird aus den Schubmoduln  $G_e$  und  $G_{dyn0}$  ein mittlerer Schubmodul  $G_m = 0,5 (G_e + G_{dyn0})$  gebildet. Hierdurch kann die einfache Formulierung der DGL für die Auflastphase beibehalten werden. Ansonsten wäre für jede Phase eine DGL mit entsprechenden Übergangsbedingungen nötig.

Werden  $k$  und  $c$  durch ihre Bestimmungsgleichungen substituiert, ergibt sich schließlich unter Berücksichtigung der zusätzlichen fiktiven Masse  $m_{add}$  und dem mittleren Schubmodul  $G_m$  folgende DGL:

$$(m_B + m_{add}) \cdot \ddot{z}_a + \frac{4 \cdot G_m \cdot r}{1 - \nu} \cdot z_a + \frac{3,4 \cdot r^2}{1 - \nu} \sqrt{\rho \cdot G_m} \cdot \dot{z}_a = (m_B + m_{add} + m_R) \cdot g + (m_u \cdot r_u \cdot \Omega^2) \cdot \cos(\Omega \cdot t)$$

$$\text{mit } m_{add} = \frac{0,27 \cdot m_B}{1 - \nu} \cdot \frac{m_B}{\rho \cdot r^3}$$

Für die Anfangsbedingung bei  $t = 0$  zu Beginn der Simulation wurde die Geschwindigkeit  $\dot{z}_{a0} = 0$  und der Anfangsweg  $z_{a0} = z_{stat} = \frac{(m_B + m_{add} + m_R) \cdot g}{k}$  gesetzt.

Treten Bodenkontaktkräfte  $F_K$  kleiner oder gleich null auf, wechselt das Schwingungssystem von der Auflast- in die Flugphase. Bei  $F_K = k \cdot z_a + c \cdot \dot{z}_a \approx 0$  ergeben sich die Übergangsbedingungen mit  $z_{aE}$  und  $\dot{z}_{aE}$  ( $E$ : Übergangsbedingung). In Bezug auf die Abhebebedingung liegt hier ein kraftgesteuertes System vor.

Nach Beendigung der Flugphase werden die Übergangsbedingungen  $z_{fE}$  und  $\dot{z}_{fE}$  als Anfangsbedingung der Auflastphase übergeben. Der Übergang von der Flug- zur Auflastphase wird weggesteuert realisiert, indem die Differenzbewegung zwischen dem Flugweg der Walze und dem Kriechvorgang des Bodens betrachtet wird. Wird der Differenzweg null  $\Delta z = z_f - z_k = 0$ , ( $f$ : Flugphase;  $k$ : Kriechphase des Bodens) wird das Bewegungsverhalten weiter mit der Auflastphase beschrieben.

### 5.1.3.2 Flugphase

Für die Phase in der die Bandage keinen Kontakt zum Boden besitzt (Flugphase), wird folgende DGL angesetzt. Der Index  $f$  kennzeichnet die Weggröße  $z$  für die Flugphase.

$$m_B \cdot \ddot{z}_f = (m_B + m_R) \cdot g + (m_u \cdot r_u \cdot \Omega^2) \cdot \cos(\Omega \cdot t)$$

Die Anfangsbedingung für die DGL der Flugphase ergeben sich aus den kraftgesteuerten Übergangsbedingungen der Auflastphase  $z_{aE}$  und  $\dot{z}_{aE}$  (siehe 5.1.3.1).

### 5.1.3.3 Kriechvorgang im Boden

Während der Flugphase bewegt sich der Boden in seine Ruhelage zurück. Der Index  $k$  kennzeichnet die Weggröße  $z$  für die sogenannte Kriechphase des Bodens.

$$k \cdot z_k + c \cdot \dot{z}_k = 0 \text{ ergibt mit } k \text{ und } c \text{ direkt eingesetzt: } \frac{4 \cdot G_{dyn} \cdot r}{1 - \nu} \cdot z_k + \frac{3,4 \cdot r^2}{1 - \nu} \sqrt{\rho \cdot G_{dyn}} \cdot \dot{z}_k = 0$$

#### 5.1.3.4 Gesamtsystem

Das gesamte Schwingungssystem wurde in MATLAB® / Simulink® programmiert und ausgewertet.

MATLAB® (der Name kommt von Matrix Laboratory) ist ein Programmpaket für interaktive numerische Mathematik.

Simulink® ist ein zu MATLAB® gehöriges Werkzeug zur Modellierung, Simulation und Analyse von dynamischen Systemen. Mit Simulink® ist es möglich graphisch Blockdiagramme zu erstellen und dynamische Systeme zu simulieren. Simulink® fügt sich nahtlos in MATLAB® ein, wobei es einen unmittelbaren Zugriff auf eine umfangreiche Sammlung von Analyse- und Entwicklungswerkzeugen gestattet.

## 5.2 Simulation

In den folgenden Abbildungen wird als Simulationsergebnis ein typischer Weg-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverlauf einer Vibrationswalze dargestellt.

In den Abbildungen sind die Phasen gekennzeichnet, bei denen sich die Walzenbandage in der Bodenkontakt- bzw. in der Flugphase befindet.

- Weg:

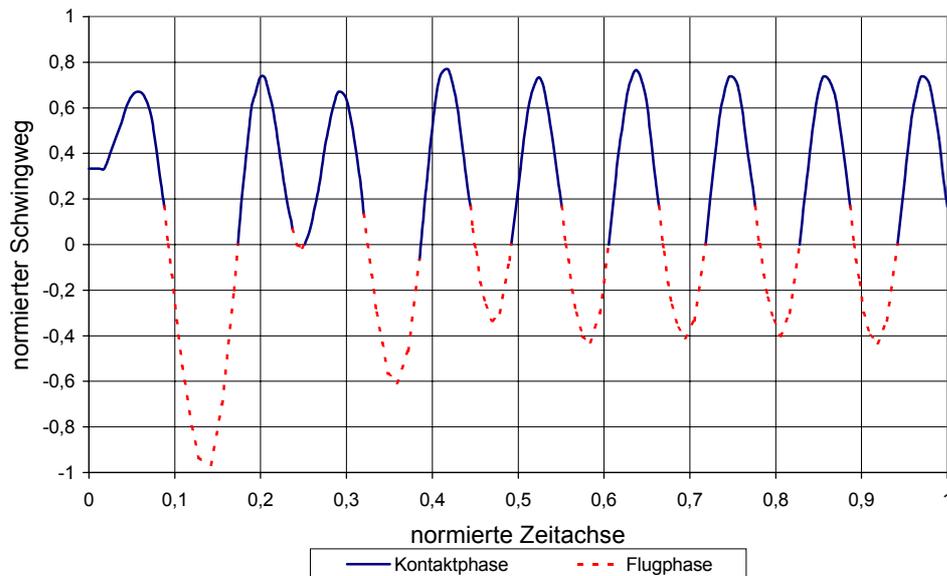


Abbildung 5-16: Schwingweg

- Geschwindigkeit:

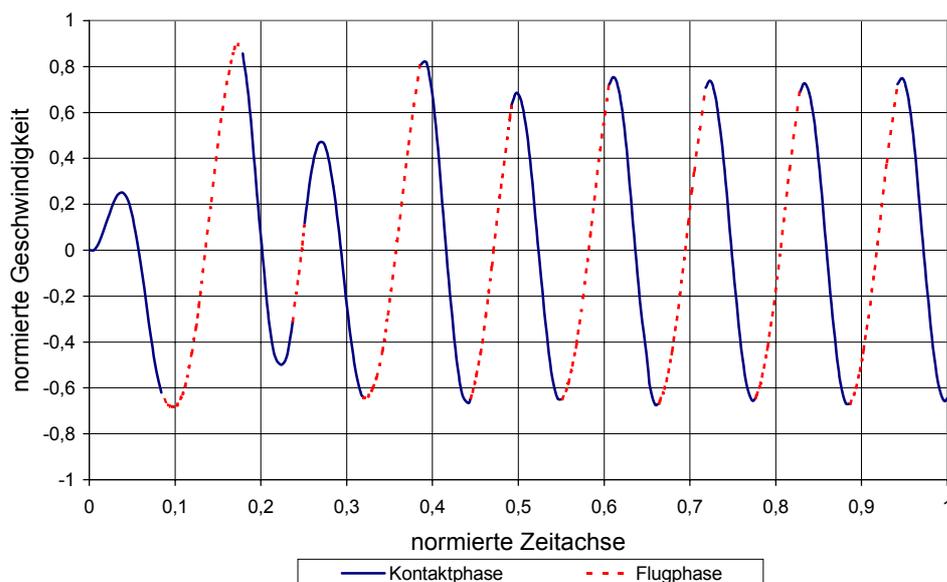


Abbildung 5-17: Schwinggeschwindigkeit

- Beschleunigung:

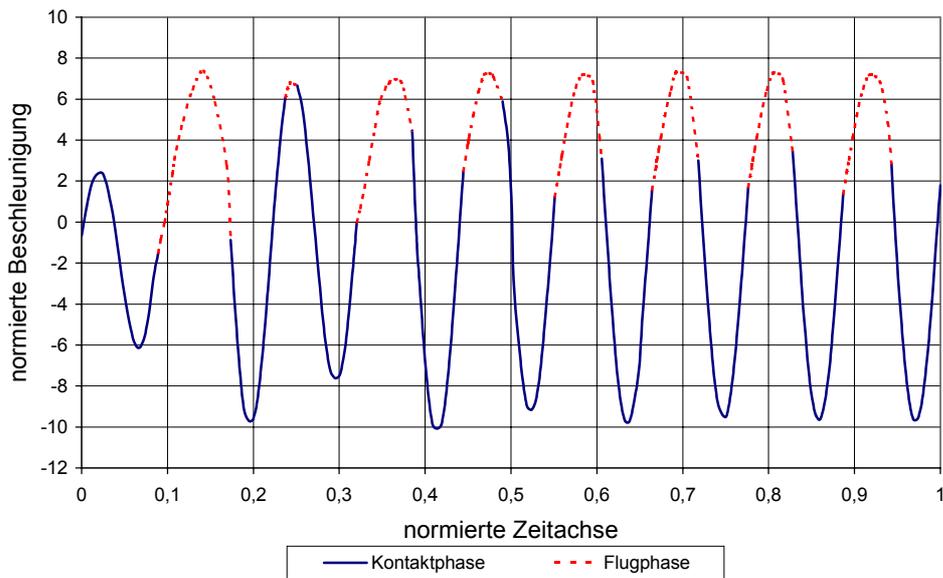


Abbildung 5-18: Schwingbeschleunigung

In Abbildung 5-19 ist noch einmal ein typischer Beschleunigungsverlauf dargestellt. Im Verlauf sind deutlich Knicke zu erkennen, die den Übergang von der Kontakt- zur Flugphase und der Flug- zur Kontaktphase kennzeichnen.

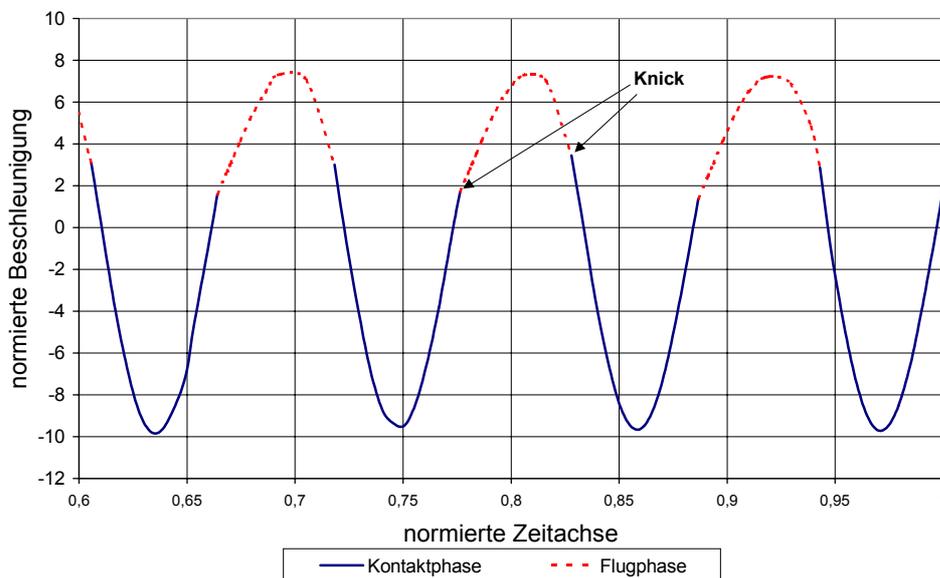


Abbildung 5-19: Charakteristischer Beschleunigungsverlauf

Abbildung 5-20 zeigt ein sogenanntes Indikatorgramm. In diesem ist die Bodenkraft  $F_K$  über dem Schwingweg  $s$  aufgetragen. Die Fläche innerhalb des Bodenkraft - Schwingweg - Verlaufes entspricht der von der Walze in den Boden

übertragenen Energie, aus welcher sich die Messwerte  $\Omega$  des *Bomag - Terrameters* sowie  $P_{Sim}$  ableiten.

- Effektiv abgegebene Energie der Bandage an den Boden

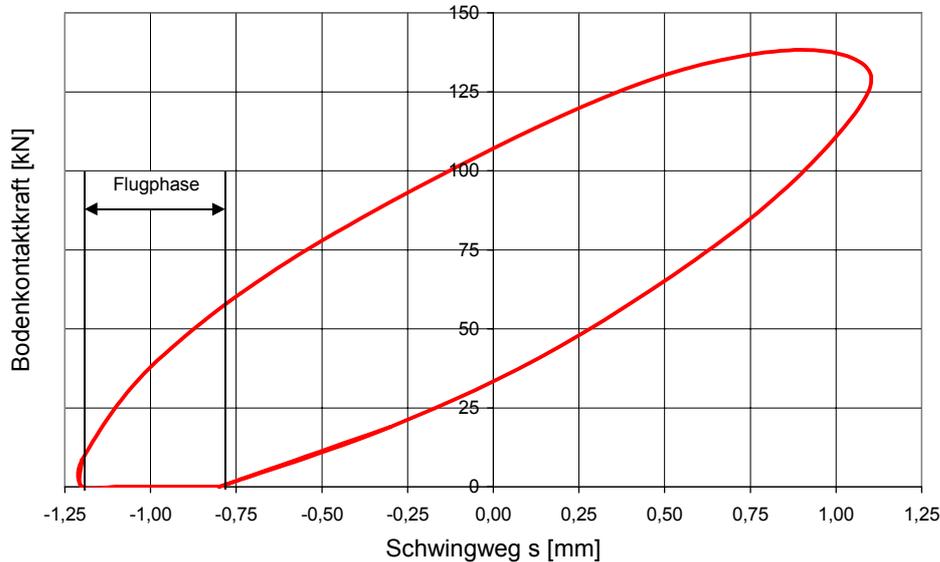


Abbildung 5-20: Indikatorgramm zur Darstellung des Bodenkontaktkraftverlaufes über den Schwingweg.

### 5.2.1 Ableitung von Tragfähigkeits- bzw. Verdichtungskennwerten aus dem Schwingungsverhalten einer Vibrationswalze

Aus der effektiv abgegebenen Leistung der Walzenbandage an den Boden wird in Analogie zum  $\Omega$  - Wert ( $\omega$ ) des *BOMAG - Terrameters* ein Messwert generiert, der mit  $P_{Sim}$  bezeichnet wird.

$$P_{Sim} \approx P_{eff} = f_u \cdot \int_0^{2T} F_k \cdot \dot{z} \cdot dt; \quad F_k: \text{Bodenkontaktkraft};$$

$f_u$ : Frequenz der Unwucht

Der Messwert  $P_{Sim}$  wird als dimensionslose Größe eingeführt, wobei zu seiner Berechnung über zwei Anregungsperioden ( $2T$ ) integriert wird. Er dient zur Analogiebetrachtung des Terrametermesswertes  $\Omega$ .  $P_{Sim}$  stellt hierbei keine absolute Messgröße dar, sondern dient rein zur Beurteilung, in welchem Maße sich  $\Omega$ - Werte verschiedener Walzentypen voneinander unterscheiden. Ausgehend von den Simulationsergebnissen werden für eine Bezugswalze Umrechnungsfaktoren  $\alpha$  abgeleitet. Durch die Umrechnungsfaktoren  $\alpha$  werden die  $\Omega$  - Werte der Kalibrierdatensammlung an eine Bezugswalze angepasst:

$$\alpha = \frac{P_{Sim,W}}{P_{Sim0}}$$

$P_{Sim0}$  ist hier der Simulationswert der Bezugswalze, wohingegen  $P_{Sim,W}$  den Simulationswert der umzurechnenden Walzen darstellt. Die umgerechneten oder korrigierten *Omega*-Werte  $\omega_0$  auf die Bezugswalze ergeben sich nun zu:

$$\omega_0 = \frac{1}{\alpha} \cdot \omega_W$$

$\omega_W$  sind die original Messwerte der entsprechenden Walzentypen unter Auflastbetrieb. In Kapitel 5.3.1 werden für zukünftige Anwendungen die Umrechnungsfaktoren  $\alpha$  in einem Regressionsmodell abgebildet. So können diese zur Ermittlung eines Anforderungswertes für eine beliebige Walze herangezogen werden.

### 5.2.2 Simulationsergebnisse

In Abbildung 5-21 ist ein typischer Verlauf von  $P_{Sim}$  in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$  dargestellt. Bei zunehmender Steifigkeit des Bodens zeigt der Verlauf der  $P_{Sim}$ -Werte einen deutlichen Übergangsbereich zwischen Auflast- und Sprungbetrieb. Diese „Unstetigkeitsstelle“ ist in Abbildung 5-21 durch die Punkte *A* und *B* eingegrenzt.

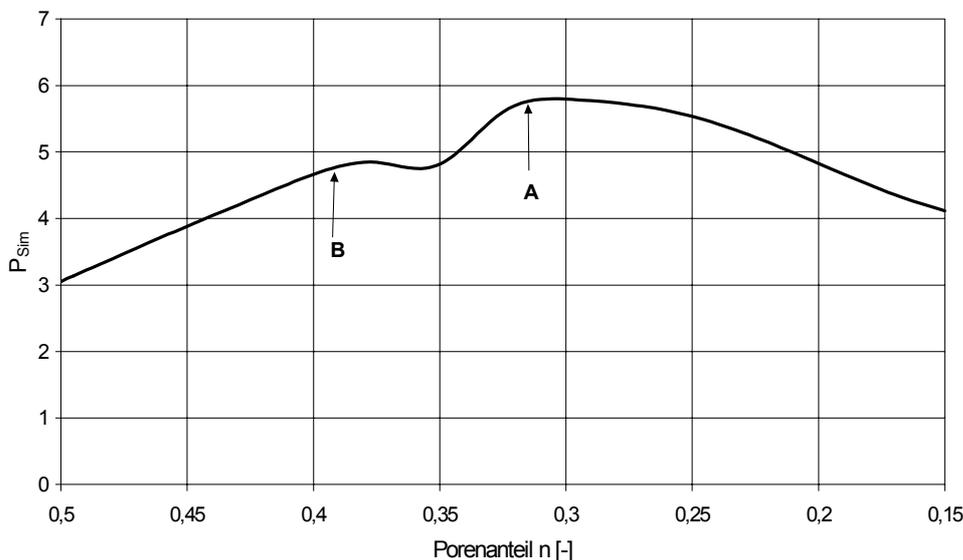


Abbildung 5-21: Messwertverlauf  $P_{Sim}$  in Abhängigkeit von der Porenzahl  $n$

Im Sprungbetrieb (Punkt *A*) wird der Bewegungsverlauf der Bandage über die Zeit im wesentlichen von der halben Anregungsfrequenz  $\Omega$  bestimmt (siehe Abbildung 5-22).

Während im Auflastbetrieb (Punkt *B*) hingegen Schwingfrequenz und Anregungsfrequenz der Maschine – wie in Abbildung 5-23 dargestellt – übereinstimmen.

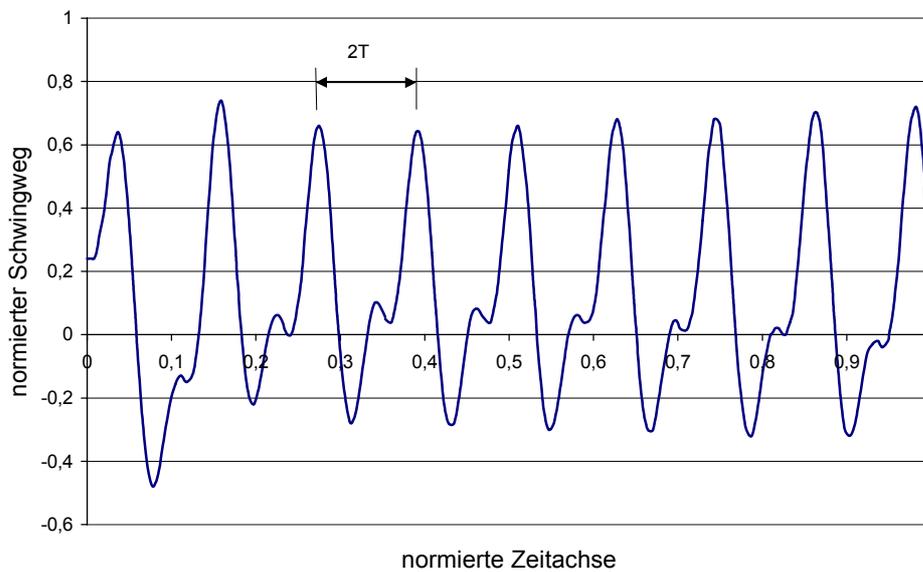


Abbildung 5-22: Typischer Schwingungsweg der Walzenbandage im Sprungbetrieb (Punkt: *A*)

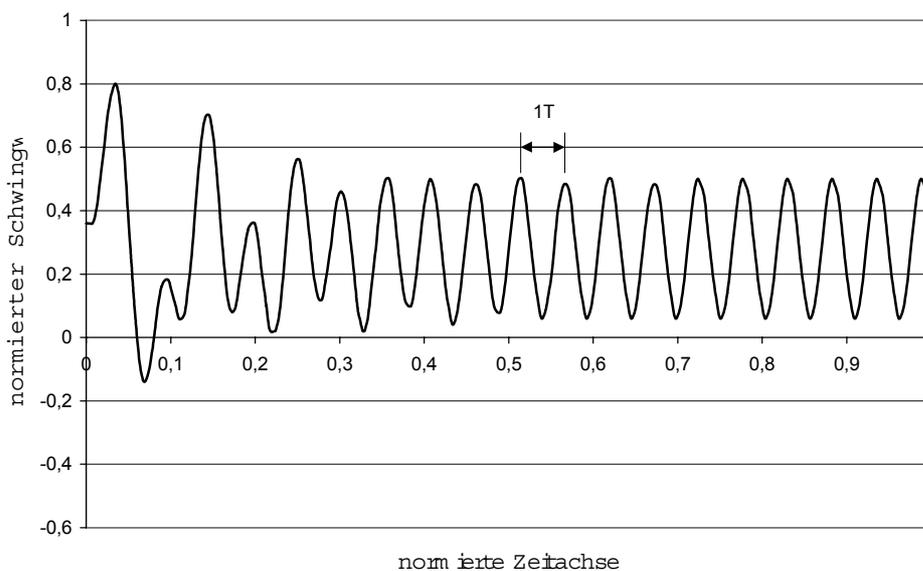


Abbildung 5-23: Typischer Schwingungsweg der Walzenbandage im Auflastbetrieb (Punkt: *B*)

Für einen typischen Walzenzug (Achslast ca.  $70 \text{ kN}$ ) sind in Abbildung 5-24 verschiedene Messwertverläufe dargestellt. Zur Simulation wurden jeweils bei sonst konstanten Maschinenparametern unterschiedliche Anregungsfrequenzen gewählt.

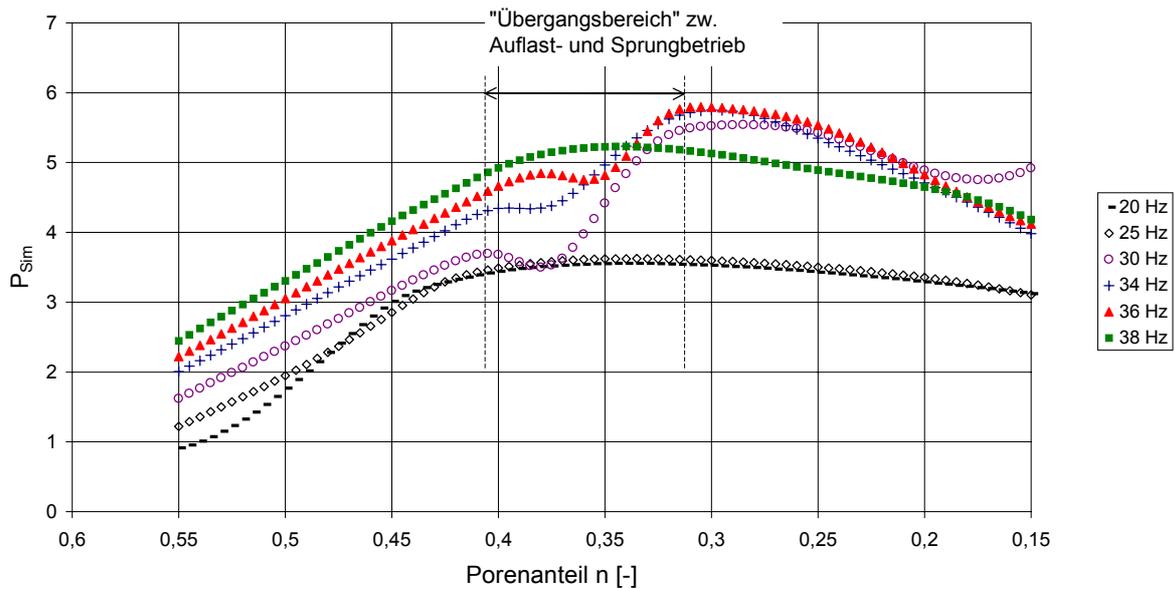


Abbildung 5-24: Messwertverlauf für Anregungsfrequenzen von 20, 25, 30, 34, 36, 38 Hz

Für Anregungsfrequenzen  $f_u$  von 30, 34 und 36 Hz ist der Messwertverlauf deutlich von einem Übergangsbereich zwischen Auflast- und Sprungbetrieb geprägt. Für größere und kleinere Anregungsfrequenzen (hier bei 38 Hz, 25 Hz und 20 Hz) verschwindet der Übergangsbereich und es stellt sich ein gleichmäßiger Messwertverlauf ein. Bei den Anregungsfrequenzen von 30, 34 und 36 Hz wird das Bewegungsverhalten bei zunehmender Steifigkeit (abnehmenden Porenanteil  $n$ ) immer ausgeprägter von der halben Anregungsfrequenz charakterisiert (siehe auch Abbildung 5-23). Wohingegen bei den Anregungsfrequenzen von 38, 25 und 20 Hz die Schwingungsantwort die Erregerfrequenz über den gesamten Steifigkeitsbereich widerspiegelt. Aus diesen Grund tritt bei diesen Frequenzen kein Übergangsbereich zwischen Auflastbetrieb zum Sprungbetrieb im Messwertverlauf von  $P_{sim}$  auf.

In den nächsten drei Abbildungen sind zur Verdeutlichung die Amplitudenspektren der Beschleunigung für Anregungsfrequenzen  $f_u$  von 20, 30 und 38 Hz bei einem Porenanteil von  $n = 0,3$  dargestellt. Bei diesem Porenanteil befindet sich die Maschinen jeweils im Bereich des Sprungbetriebs.

Wie in Abbildung 5-25 dargestellt, ergeben sich die größten Beschleunigungsamplituden bei der Anregungsfrequenz von  $f_u = 20$  Hz. Nebenresonante Beschleunigungsanteile treten außer bei 40 Hz ( $2\Omega$ ) kaum auf. Diese betragen höchstens 30% der Hauptbeschleunigungsamplitude.

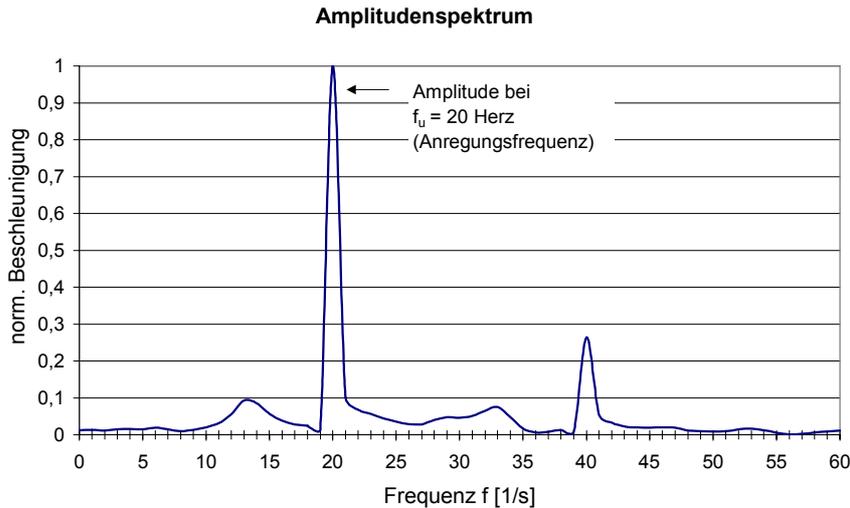


Abbildung 5-25: Amplitudenspektrum der Beschleunigung bei einer Anregungsfrequenz von  $f_u = 20$  Hz und einem Porenanteil von  $n = 0,3$

In Abbildung 5-26 ist das Spektrum der Beschleunigungsamplituden bei einer Anregungsfrequenz von 30 Hz dargestellt. Zusätzlich zur Frequenz bei 30 Hz treten wesentliche Beschleunigungsamplituden bei der 0,5 sowie bei der 1,5-fachen Anregungsfrequenz auf. Die Beschleunigungsamplituden bei der 0,5-fachen Anregungsfrequenz erreichen 70% der Hauptbeschleunigungsamplitude. Hierdurch wird deutlich, dass das Bewegungsverhalten der Bandage zu einem großen Teil von der halben Anregungsfrequenz bestimmt wird und sich die Walze im Sprungbetrieb befindet.

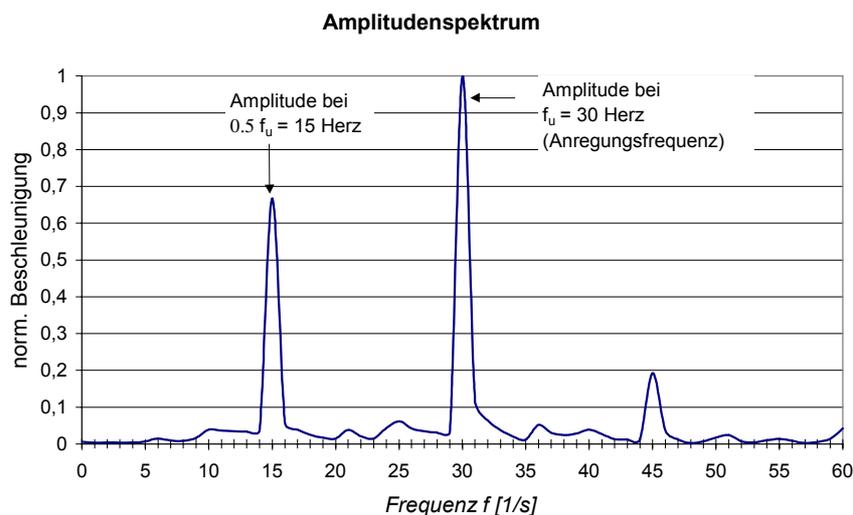


Abbildung 5-26: Amplitudenspektrum der Beschleunigung bei einer Anregungsfrequenz von  $f_u = 30$  Hz und einem Porenanteil von  $n = 0,3$

Das in Abbildung 5-27 dargestellte Amplitudenspektrum zeigt die größten Amplituden bei der Anregungsfrequenz von 38 Hz. Geringe zusätzliche Anteile sind bei der halben sowie bei der

1,5-fachen Anregungsfrequenz zu beobachten. Der durch sie verursachte Einfluss bei der Ermittlung von  $P_{Sim}$  wird aber im Messwertverlauf (Abbildung 5-24) nicht deutlich.

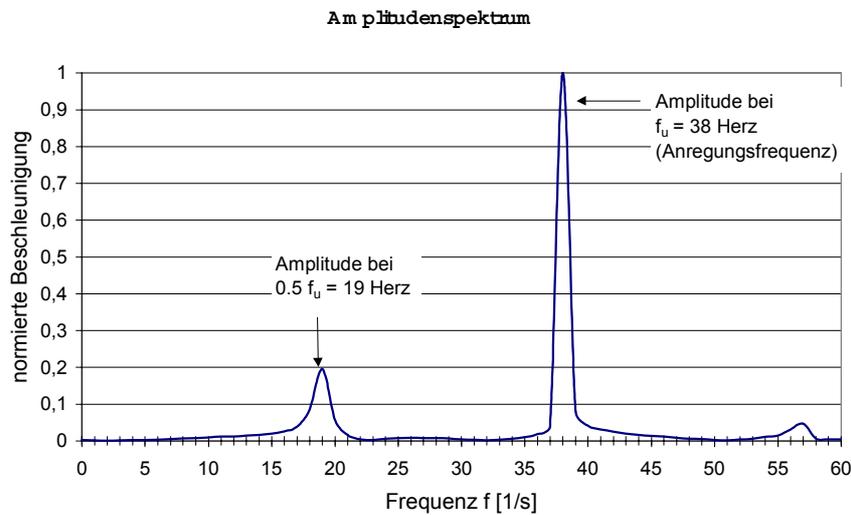


Abbildung 5-27: Amplitudenspektrum der Beschleunigung bei einer Anregungsfrequenz von  $f_u = 38$  Hz und einem Porenanteil von  $n = 0,3$

In der Abbildung 5-28 sind für fünf verschiedene Maschinen eines Herstellers die Messwertverläufe von  $P_{Sim}$  in räumlicher Darstellung abgebildet. Die Walzen unterscheiden sich im wesentlichen durch ihre Achslast ( $m_R + m_B$ ). Bezüglich der Achslast weisen sie ein proportionales Bandagen- und Rahmengewicht ( $m_R$  und  $m_B$ ) sowie eine entsprechende Unwuchtkraft und Frequenz auf. Der Unterschied zwischen den Walzen im Messwertverlauf ist zum einem dadurch gekennzeichnet, dass mit zunehmender Achslast ( $m_R + m_B$ ) und oder zunehmenden Rahmengewicht  $m_B$  der Übergangsbereich vom Auflast- zum Sprungbetrieb erst bei höheren Bodensteifigkeiten - bzw. bei kleiner werdenden Porenanteilen  $n$  - auftritt. Weiterhin ergeben sich bei zunehmender Achslast insgesamt auch höhere Messwerte. Diese Sachverhalte werden durch Erfahrungen bestätigt, welche bei der Erprobung und Anwendung der FDVK mit verschiedenen Vibrationswalzen in der Baupraxis gemacht wurden.

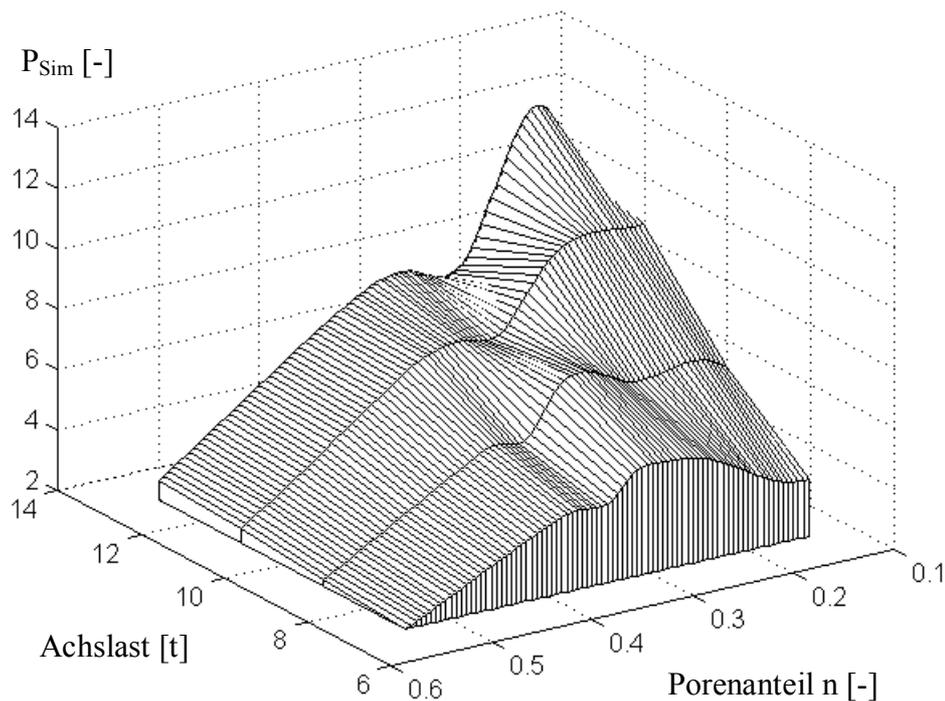


Abbildung 5-28: Räumliche Darstellung der Messwertverläufe von  $P_{Sim}$  verschieden schwerer Walzen

### 5.2.3 Vergleich der Simulationsergebnisse mit Ergebnissen aus der Literatur

Kröber [34] hatte in seiner Dissertation Beschleunigungsmessungen an einer Serienwalze *BW212* der Firma *BOMAG* durchgeführt. Hierbei hat er für jeden Verdichtungsübergang die aus den Beschleunigungswerten in den Boden übertragenen effektiven Arbeiten ( $W_{eff}$ ) errechnet. Die Verdichtungsversuche sind auf einem Kies - Sand Gemisch durchgeführt worden. Die Vibrationswalze wies folgende Maschinenparameter auf:

- Statische Achslast:  $5600 \text{ kg}$
- Schwingende Bandagenmasse:  $3200 \text{ kg}$
- Amplitude:  $1,6 \text{ mm}$
- Unwuchtfrequenz:  $29 \text{ Hz}$
- Bandagenbreite:  $2,12 \text{ m}$
- Bandagendurchmesser:  $1,50 \text{ m}$
- Fahrgeschwindigkeit:  $2,5 \text{ km/h}$

Vergleichend werden den Ergebnissen von Kröber [34] die aus der entsprechenden Simulationsrechnung ermittelten  $P_{Sim}$ -Werte gegenübergestellt. Die Vergleichbarkeit der Werte  $W_{eff}$  und  $P_{Sim}$  ergibt sich aus:

$$P_{Sim} \approx W_{eff} = \int F_k \cdot \dot{z} \cdot dt \quad F_k: \text{Bodenkontaktkraft}$$

Wie in folgender Abbildung 5-29 zu sehen ist, stimmen die Simulationswerte ( $P_{Sim}$ ) mit den Messwerten ( $W_{eff}$ ) von Kröber [34] qualitativ gut überein, woraus sich ableiten lässt, dass mit den Simulationswerten  $P_{Sim}$  analog zu  $W_{eff}$  bzw.  $\Omega$ , eine Zunahme der Verdichtung bzw. der Steifigkeit erfasst werden kann.

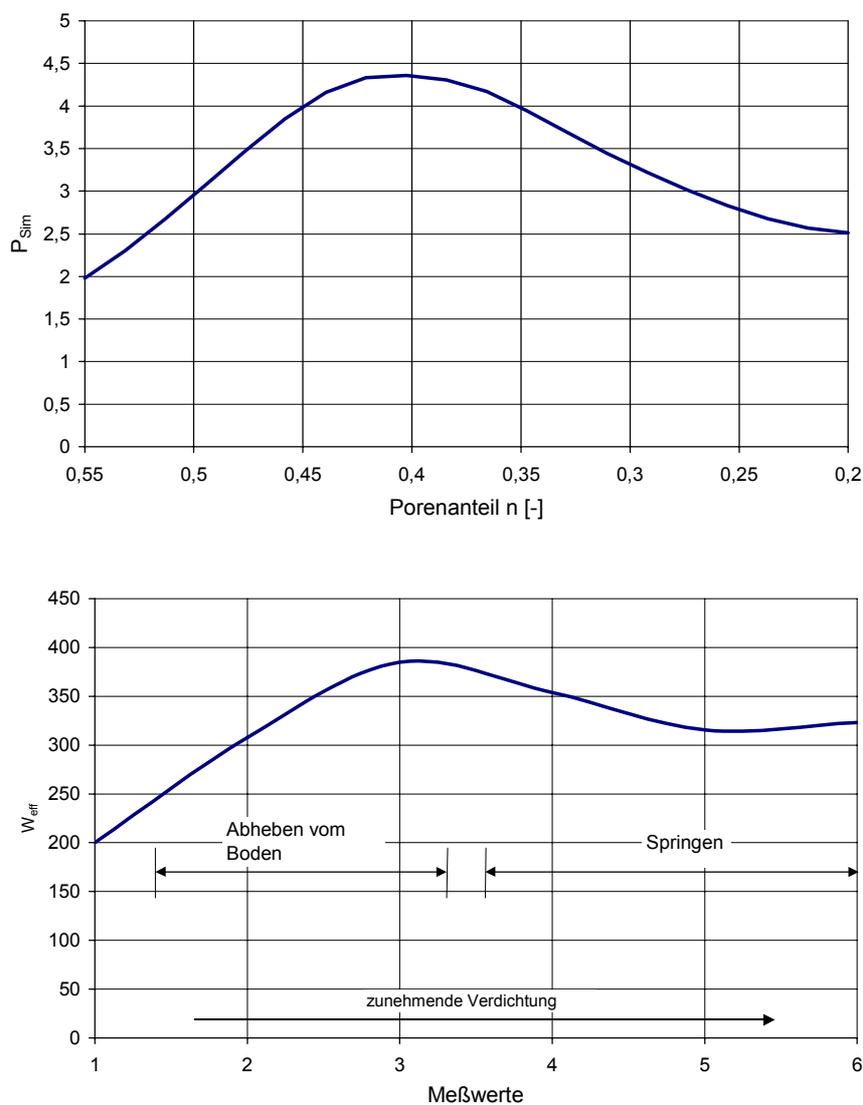


Abbildung 5-29: Vergleich zwischen Messwerten ( $W_{eff}$ ) von Kröber [34] und Simulationsmesswerten ( $P_{Sim}$ )

### 5.3 Korrekturwerte für die Anpassung der FDVK- Messwerte an eine Bezugsgröße

Die Größe des dynamischen Messwertes *Omega* wird von verschiedenen Randbedingungen beeinflusst. Diese Randbedingungen werden sowohl vom Boden als auch von der eingesetzten Vibrationswalze vorgegeben. Die Ergebnisse der Simulationsrechnung werden dazu verwendet, den Einfluss verschiedener Walzenparameter wie z.B. Gesamtgewicht oder Amplitude auf die Messwertbildung der *Omega*- Werte beurteilen und anschließend in der Auswertung berücksichtigen zu können. Über das Simulationsmodell, in welches die Walzenparameter: Rahmen- und Bandagengewicht, Amplitude, Unwuchtkraft sowie die Unwuchtfrequenz eingehen, werden Korrekturwerte  $\alpha$  abgeleitet. Durch diese werden einerseits die Kalibrierdaten der Datenbank auf das Messwertniveau einer Bezugswalze umgerechnet, andererseits lassen sich die aus der Auswertung im Kapitel 7f. gewonnen Anforderungswerte an eine spezielle Prüfwalze anpassen.

Die Größe des *Omega*- Wertes wird außerdem von der Fahrgeschwindigkeit der Prüfwalze beeinflusst. Ausgehend von Forschungsergebnissen [14] wird eine Korrekturformel angegeben, mit der näherungsweise der Fahrgeschwindigkeitseinfluss auf die Messwertbildung berücksichtigt werden kann.

#### 5.3.1 Korrekturwerte zur Berücksichtigung der Maschinenparameter

Die Korrekturwerte  $\alpha$  werden aus den bei der Simulationsrechnung bestimmten  $P_{sim}$ - Werten berechnet. Eine Kalibrierung eines FDVK- Messsystems setzt voraus, dass sich die Vibrationswalze während der Messwertaufzeichnung im Auflastbetrieb befindet. Dementsprechend werden die  $P_{sim}$ - Werte in Abhängigkeit vom Porenanteil  $n$  nur im Bereich des Auflastbetriebs bis zum Übergangsbereich des Sprungbetriebs berücksichtigt. Unter dieser Vorgabe können die  $P_{sim}$ - Werte gut mit einer linearen Beziehung ( $P_{sim} = a \cdot n + b$ ) darstellen werden (siehe Abbildung 5-30).

In Abbildung 5-30 sind repräsentative Messwertverläufe fünf verschiedener Vibrationswalzen dargestellt.

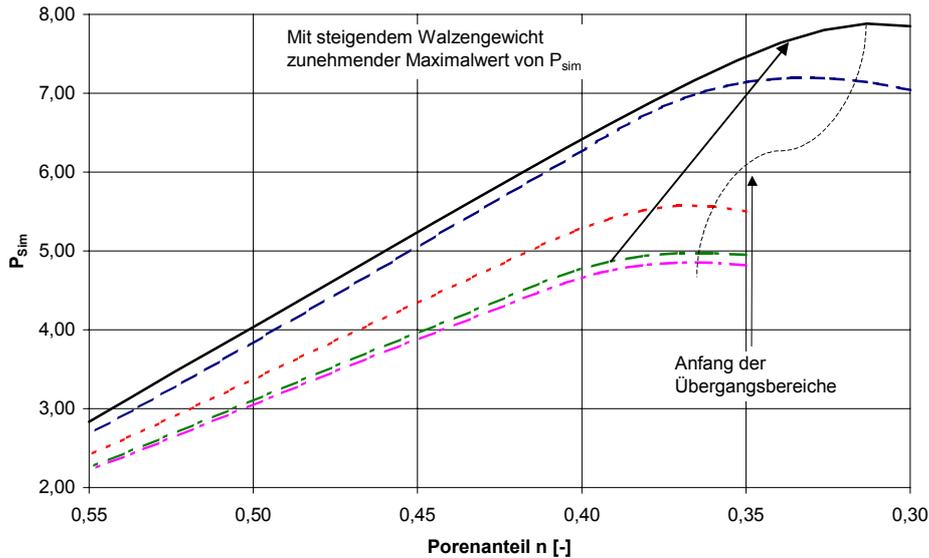


Abbildung 5-30 Ableitung der Korrekturwerte  $\alpha$  aus dem Vergleich der Simulationsergebnissen  $P_{Sim,W}$  mit den  $P_{Sim,0}$  – Werten der Bezugswalze. Hierzu sind Messwertverläufe für verschieden schwere Maschinen dargestellt, welche sich im Bereich zwischen Auflast- und Sprungbetrieb befinden.

Der Korrekturwert  $\alpha$  errechnet sich nun zu:

$$\alpha = \frac{P_{Sim,W}}{P_{Sim,0}} = \frac{a_w \cdot (n - n_0)}{a_0 \cdot (n - n_0)} = \frac{a_w}{a_0} \quad \text{wobei } (-a_0 \cdot n_0 = b_0) \text{ und } (-a \cdot n_0 = b)$$

$P_{Sim,0} = a_0 \cdot n + b_0$  sind die Simulationsergebnisse der Bezugswalze.

Die ermittelten Korrekturwerte  $\alpha$  werden zur Umrechnung der *Omega*- Werte des *BOMAG - Terrameters* auf ein Bezugsniveau verwendet:

$$\omega_0 = \frac{1}{\alpha} \cdot \omega_W \quad \text{analog zu: } P_{Sim,0} = \frac{1}{\alpha} \cdot P_{Sim,W}$$

$\omega_W$  sind die Messwerte der entsprechenden Walzentypen unter Auflastbetrieb und  $\omega_0$  die auf die Bezugswalze umgerechneten Werte.

Die für ca. 25 verschiedene Walzen errechneten Korrekturfaktoren  $\alpha$  sind mit den Eingangsdaten des Simulationsmodells auf ein multilineares Regressionsmodell abgebildet worden. Hierüber kann der Korrekturwert  $\alpha$  für beliebige Walzenmodelle errechnet werden. Folgender Regressionsansatz wurde gewählt:

$$\alpha = a_0 + a_1 \cdot m_B + a_2 \cdot m_R + a_3 \cdot m_u \cdot r_u + a_4 \cdot f_u + a_5 \cdot b$$

Die Eingangsdaten des Simulationsmodells ( $m_B, m_R, m_u r_u, f_u, b$ ) stellen die unabhängigen Variablen des Regressionsansatzes dar. Die Eingangswerte Rahmen- und Bandagenmasse ( $m_R, m_B$ ) müssen vorweg noch aus den Walzenkennwerten berechnet werden, welche die Hersteller in den Datenblättern für das entsprechende Verdichtungsgerät bereitstellen.

Aus den Datenblättern können Achslast (Bandage), statische Linienlast, Bandagenbreite und entsprechend zu den verschiedenen Amplituden: Frequenz, theoretische Amplitude und Unwuchtkraft abgelesen werden. Mit diesen Angaben werden die erforderlichen Werte der Rahmen- und Bandagenmasse ermittelt.

Achslast (Bandage):	$m_G$	[kg]
Frequenz:	$f_u$	[Hz]
Unwuchtkraft:	$F_R = m_u \cdot r_u \cdot \Omega^2 = m_u \cdot r_u \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_u)^2$	[N]
Statisches Moment :	$m_u \cdot r_u$	[kgm]
Theoretische Amplitude:	$a_{th} = \frac{m_u \cdot r_u}{m_B}$	[m]

Wird das statische Moment  $m_u \cdot r_u$  aus der Unwuchtkraft  $F_R$ , der Frequenz  $f_u$  und der theoretischen Amplitude  $a_{th}$  berechnet, ergibt sich die Bandagenmasse  $m_B$  zu:

$$\frac{F_R}{(2 \cdot \pi \cdot f_u)^2} = m_u \cdot r_u = m_B \cdot a_{th} \qquad m_B = \frac{F_u}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_u^2 \cdot a_{th}}$$

Die Rahmenmasse  $m_R$  kann nun aus dem Gewicht der Achslast  $m_g$  und der berechneten Bandagenmasse  $m_B$  bestimmt werden:

$$m_R = m_G - m_B$$

Folgende Gleichungen stellen das Ergebnis der Regressionsrechnung dar. Über diese können die *Omega*-Werte des *BOMAG - Terrameters* auf das Messwertniveau einer Bezugswalze getrennt nach "kleiner" und "großer" Amplitude umgerechnet werden.

$$\alpha_{kl.A} = -2,0209 - 0,0005 \cdot m_B + 0,0001 \cdot m_R + 0,5409 \cdot m_u \cdot r_u + 0,0290 \cdot f_u + 0,8153 \cdot b$$

$$\alpha_{gr.A} = -1,0800 - 0,0004 \cdot m_B + 0,0001 \cdot m_R + 0,2408 \cdot m_u \cdot r_u + 0,0116 \cdot f_u + 0,6951 \cdot b$$

In die Gleichungen sind die Bandagen- und die Rahmenmasse in [kg], die Frequenz in [Hz], das statische Moment in [kgm], und die Bandagenbreite in [m] einzusetzen.

- **Überprüfung auf Anwendbarkeit der Korrekturformeln**

Folgende Tabellen enthalten in Abhängigkeit von der Bandagenmasse  $m_B$  Grenzwerte, innerhalb derer die Gleichungen zur Umrechnung der *Omega*- Werte auf eine spezielle Walze verwendet werden können. Die Grenzwerte beziehen sich in Abhängigkeit der Bandagenmasse auf die Rahmenmasse und Bandagenbreite, sowie auf das statische Moment und die Frequenz der Unwucht - jeweils walzenspezifisch getrennt nach großer und kleiner Amplitude.

Zulässige Rahmengewichte und Bandagenbreiten				
Bandagengewicht	Rahmengewicht		Bandagenbreite	
$m_B$ [kg]	min $m_R$ [kg]	max $m_R$ [kg]	min $b$ [m]	max $b$ [m]
2000	0	3630	1,67	2,08
3000	0	4760	1,75	2,19
4000	820	5980	1,82	2,31
5000	1980	7310	1,89	2,42
6000	3060	8730	1,95	2,54

Tabelle 5-1: Anwendungsgrenzen: Rahmengewichte ( $m_R$ ) und Walzenbreiten ( $b$ ) in Abhängigkeit vom Bandagengewicht ( $m_B$ ); Zwischenwerte sind zu interpolieren.  
Abgeleitet aus dem 95% Vertrauensbereich der Einzelwerte

Zulässige statische Momente und Frequenzen für kleine Amplituden				
Bandagengewicht	statisches Moment (kleine Amplitude)		Frequenz (kleine Amplitude)	
$m_B$ [kg]	min $m_u r_u$ [kgm]	max $m_u r_u$ [kgm]	min $f_u$ [Hz]	max $f_u$ [Hz]
2000	0,635	1,699	35	42
3000	1,682	2,834		
4000	2,717	3,981		
5000	3,742	5,137		
6000	4,760	6,301		

Tabelle 5-2: Anwendungsgrenzen: statische Momente ( $m_u r_u$ ) und Anregungsfrequenzen ( $f_u$ ) in Abhängigkeit vom Bandagengewicht ( $m_B$ ) für **kleine Amplituden**; Zwischenwerte sind zu interpolieren.  
Abgeleitet aus dem 95% Vertrauensbereich der Einzelwerte

Zulässige statische Momente und Frequenzen für große Amplituden				
Bandagengewicht	statisches Moment (große Amplitude)		Frequenz (große Amplitude)	
$m_B$ [kg]	min $m_u r_u$ [kgm]	max $m_u r_u$ [kgm]	min $f_u$ [Hz]	max $f_u$ [Hz]
2000	2,043	3,979	28	31
3000	3,888	5,933		
4000	5,710	8,010		
5000	7,515	10,055		
6000	9,308	12,112		

Tabelle 5-3: Anwendungsgrenzen: statische Momente ( $m_u r_u$ ) und Anregungsfrequenzen ( $f_u$ ) in Abhängigkeit vom Bandagengewicht ( $m_B$ ) für **große Amplituden**; Zwischenwerte sind zu interpolieren. Abgeleitet aus dem 95% Vertrauensbereich der Einzelwerte

### 5.3.2 Korrekturwerte zur Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit

Die Fahrgeschwindigkeit einer Prüfwalze beeinflusst die Größe des FVDK- Messwertes (siehe auch Kapitel 3.3.4). Als Grund für die Abnahme der gemessenen Kontaktsteifigkeit zwischen Walzenbandage und Boden gibt Anderegg [3] die sich im Fahrbetrieb gegenüber den Standbetrieb verkleinernde Kontaktfläche an. Weiterhin resultiert eine Messwertabnahme bei steigender Geschwindigkeit daher, dass die Bandage auf immer neue weniger verdichtete Bodenbereiche trifft und in Abhängigkeit vom Belastungszyklus der Unwuchtkraft die selben Bodenbereiche weniger oft zyklisch belastet werden. Der Zustand der Widerbelastung je Bodenbereich nimmt somit bei zunehmender Geschwindigkeit ab. Im Grenzfall liegt der Boden im Erstbelastungszustand vor.

Ausgehend von den Untersuchungen [14] die am Prüfamts für Grundbau, Boden und Felsmechanik der Technischen Universität München durchgeführt wurden, wird eine Korrekturformel angeleitet, mit der näherungsweise der Fahrgeschwindigkeitseinfluss auf die Messwertbildung berücksichtigt werden kann. Die Bezugsgeschwindigkeit, auf welche die *Omega*- Werte umgerechnet werden können, beträgt 4 km/h. Die Korrekturgleichung lautet:

$$\alpha_v = 1,696 - 0,231 \cdot v + 0,014 \cdot v^2; \quad v [km/h]$$

Mit  $\alpha_v$  ergeben sich die umgerechneten *Omega*- Werte zu:

$$\omega_0 = \frac{1}{\alpha_v} \cdot \omega_w$$

$\omega_W$  sind die Messwerte entsprechend den in der Datenbank eingetragenen Kalibrierdaten. Abbildung 5-31 zeigt den Verlauf der Korrekturwerte  $a_v$  in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.

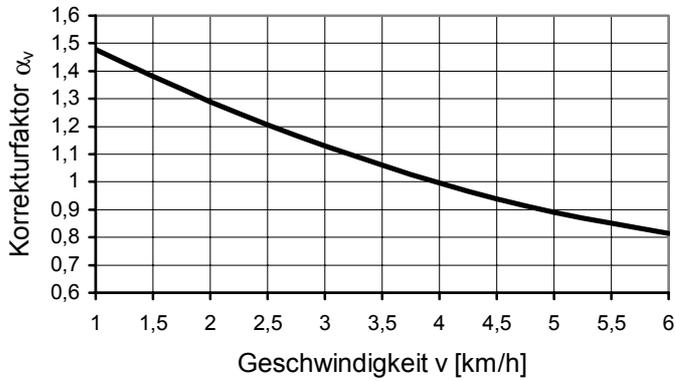


Abbildung 5-31: Korrekturfaktor  $a_v$  in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v [km/h]

## 6 Statistik und Neuronale Netze

Die gesammelten Versuchsdaten werden mit Methoden der Statistik ausgewertet. Zur Anwendung kommt die Regressions- und Korrelationsanalyse:

- Mit der Korrelationsanalyse werden zwischen Zufallsvariablen stochastische Zusammenhänge untersucht. Hierbei werden Abhängigkeitsmaße geschätzt und Hypothesen geprüft.
- Die Regressionsanalyse hat zum Ziel, einer "Punktwolke" eine funktionale Beziehung (Regressionsgleichung) anzupassen, die es gestattet, aus vorgegebenen unabhängigen Werten einer Einflussgröße auf die jeweils davon abhängige Größe zu schließen.

### 6.1 Verteilungsfunktion

Zunächst wird eine Annahme über die Verteilung des Prüfmerkmals bzw. der Prüfmerkmale innerhalb der Grundgesamtheit getroffen. Die Verteilungsfunktion der drei- bzw. zweiparametrischen logarithmischen Normalverteilung kann an viele Verteilungen von empirisch ermittelten physikalischen Größen angepasst werden. Für die hier betrachteten physikalischen Größen gilt, dass diese immer positiv sind und mit steigenden Werten immer weniger häufig auftreten. Aufgrund dessen liegt es nahe, für die zu behandelnden bodenmechanischen Kenngrößen in der Auswertung die Log- Normalverteilung zugrunde zu legen. In einer Reihe von Veröffentlichungen wurden Stichproben auf ihre Normal-, Log- Normalverteilung und Betaverteilung hin untersucht. Vielfach wurde empfohlen, gerade auch wegen ihrer Einfachheit, die Normalverteilung anzuwenden [5]. Zudem unterscheidet sich die Normalverteilung bei Variationskoeffizienten unter 30% nur unwesentlich von der Log- Normalverteilung. Außerdem lässt sich durch Logarithmieren ein log. normalverteiltes Prüfmerkmal in ein normalverteiltes überführen. In dieser Arbeit wurde aus diesen Gründen primär auf den Ansatz einer Log- Normalverteilung verzichtet. Vielmehr sind die Daten sowie deren Störterme als normalverteilt angenommen worden.

## 6.2 Regressionsanalyse

In der Regressionsanalyse soll eine funktionale Beziehung zwischen einer Anzahl von  $n$  Stichprobenwerten der Zufallsvariablen  $(X, Y)$  ermittelt werden. Im einfachsten Fall wird untersucht, welcher Zusammenhang zwischen einer gegebenen Variablen  $Y = y$  und anderen Variablen  $X = [x_1, x_2, \dots, x_T]$  besteht und wie dieser beschrieben werden kann. Die Variable  $X$  weist hierbei  $t = 1 \dots T$  Merkmale auf, wohingegen  $Y$  nur ein Merkmal (z.B. den *Omega*-Wert der FDVK) besitzt.

Ein bestehender funktionaler Zusammenhang zwischen den Variablen  $(X, Y)$  wird durch die sogenannte „wahre“ Funktion  $F(X)$  ausgedrückt. Da aber die „beobachteten“ Variablen von Störeinflüssen und Beobachtungs- bzw. Messfehlern überlagert sind, kann die Funktion  $F(X)$  oftmals nur schwer ermittelt werden. Zudem ist in vielen Fällen ihre Struktur bzw. Form unbekannt. Die Abhängigkeit zwischen den Variablen lässt sich nun folgendermaßen darstellen:

$$y = F(X) + \varepsilon$$

Mit dem Fehlerterm  $\varepsilon$  werden die Störeinflüsse erfasst. Für  $\varepsilon$  werden noch folgende Annahmen getroffen:  $\varepsilon$  ist eine Zufallsvariable, welche einer gewissen Verteilung gehorcht. Bei Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate zur Parameterschätzung wird die Normalverteilung vorausgesetzt. Weiterhin soll  $\varepsilon$  unabhängig von  $X$  sein und einen bedingten Erwartungswert von  $E[\varepsilon|X] = 0$  aufweisen.

In der Regressionsanalyse wird versucht, der „Wahren“ aber unbekannten Funktion  $F(X)$  eine Funktion  $f(X)$  anzunähern. Hierzu können parametrische Verfahren, zu denen die lineare Regression als einfachster Vertreter zählt, als auch nicht parametrische Verfahren angewendet werden. Bei den parametrischen Verfahren der Regressionsanalyse unterstellt man den zu modellierenden Zusammenhang eine bestimmte funktionale Form  $f(X)$ . Für diesen Funktionsansatz sind lediglich die unbekannt Parameter  $w = [w_0, w_1, \dots, w_T]$  zu bestimmen. Anders ist dies bei den nicht parametrischen Verfahren. Hier wird die Annäherung an die „wahre“ Funktion  $F(X)$  nur mit Hilfe der Daten erreicht, ohne eine Annahme über die den Daten zugrundeliegenden funktionalen Zusammenhang treffen zu müssen [4].

Bei den parametrischen Verfahren werden die Parameter  $w = [w_0, w_1, \dots, w_T]$  der Funktion  $f(X)$  am häufigsten mit der „Methode der kleinsten Fehlerquadrate“ bestimmt. Hierzu wird die Summe der quadrierten Abstände zwischen den tatsächlichen Werten der Variablen  $y$  und den geschätzten Funktionswerten  $f(X)$  minimiert. Es wird somit eine Approximation der Funktion

$f(X)$  an die Werte  $y$  mittels eines Optimierungsverfahrens durchgeführt. Die beschriebene Methode lässt sich folgendermaßen formulieren:

$$SSE(w) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(X_i, w))^2 \rightarrow \min! \quad (SSE: \text{Sum of Squared Errors})$$

bei  $i = 1 \dots n$  (Datensätzen)

Über den Durchschnitt der  $SSE$  erhält man den erwarteten Vorhersagefehler  $MSE$  (Mean Squared Error) des Modells  $f(X)$ .

$$MSE = \frac{1}{n} \cdot SSE$$

Es gilt:  $MSE = E[(y - f(X))^2]$

Über  $MSE = E[(y - F(X) + F(X) - f(X))^2]$  ergibt sich:

$$MSE = E[(y - F(X))^2] + E[(F(X) - f(X))^2] \quad \text{aus [4]}$$

Der erwartete Vorhersagefehler  $MSE$  lässt sich nun in zwei Komponenten zerlegen:

den systematischen Fehler  $MSE_s = E[(F(X) - f(X))^2]$  und den unsystematischen Fehler  $MSE_u = E[(y - F(X))^2]$ .

$$MSE = MSE_u + MSE_s$$

$MSE_u$  ist rein zufälliger Natur und lässt sich durch kein Modell annähern, wobei der systematische Fehler  $MSE_s$  angibt, wie hoch die erwartete Abweichung zwischen der approximierten Funktion  $f(X)$  und der wahren Funktion  $F(X)$  ist.

Der erwartete Vorhersagefehler  $MSE_s$  kann analog einer Parameterschätzung zudem in Bias und Varianz einer Funktionsschätzung  $f(X)$  an einem beliebigen Punkt  $X_i$  unterteilt werden:

$$MSE_s = \text{Varianz}[f(X_i)] + \text{Bias}[f(X_i)]^2 = E[(f(X_i) - E(f(X_i)))]^2 + [E(f(X_i)) - F(X_i)]^2 \quad [4]$$

Der Bias gibt die Abweichung zwischen dem Erwartungswert des Schätzers von seinem wahren Wert an. Wohingegen die Varianz die mittlere quadrierte Abweichung des Schätzers von seinem Erwartungswert darstellt. Die Abweichungen der Funktion  $F(X)$  von ihrer Approximation  $f(X)$  wird somit entweder durch eine Verzerrung im Erwartungswert oder durch die Varianz des Funktionsverlaufes oder durch eine Kombination von Verzerrung (Bias) und Varianz erzeugt [4]. Eine optimale Funktionsschätzung wäre unverzerrt im Erwartungswert und hätte keine Varianz. Da gilt:  $MSE_s = 0$  und  $MSE = MSE_u$

Das Diagramm in der folgenden Abbildung 6-1 stellt den Zusammenhang zwischen Varianz und Bias dar. In das Diagramm ist die Datenbasis in Form von Punkten eingetragen. Die Funktion  $f1(x)$  stellt hier die wahre Funktion  $F(x)$  dar.  $f1(x)$  hat aufgrund dessen keinen Bias. Die Funktion  $f2(x)$  ist hingegen den Daten optimal angepasst, so dass der Bias ebenso verschwindet aber die Varianz des Erwartungswertes sehr groß wird. Die Funktion  $f3(x)$  stellt einen möglichen Kompromiss zwischen Varianz und Bias dar.

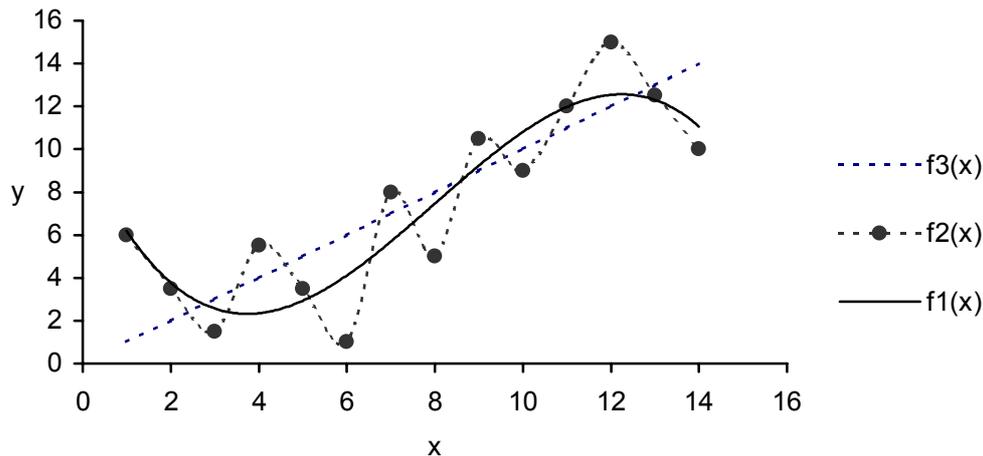


Abbildung 6-1: Varianz und Bias bei der Beschreibung eines Messwertzusammenhanges

Erwartet man bei einem anzunähernden Messwertzusammenhang, dass die Varianz der Störterme  $\varepsilon$  sehr groß ist, wird ein einfacher Funktionsansatz zur Approximation von  $F(X)$  nach [4] empfohlen. Aufgrund der bisher gemachten Erfahrungen mit dem Messsystem und der vielen möglichen Einflussparameter auf die Messwerte der FDVK, wird für eine erste Betrachtung in dieser Arbeit ein linearer Funktionsansatz gewählt.

### 6.2.1 Lineare Einfachregression aus einem bivariaten Datensatz

Die Größen  $X = x$  und  $Y = y$  sind beobachtete Zufallsvariable einer Stichprobe. Der funktionale Zusammenhang dieser Messgrößen soll durch einen linearen Funktionsansatz angenähert werden. Dieser Funktionsansatz stellt sich folgendermaßen dar:

$$f(x) = a + b \cdot x$$

In dieser Gleichung sind  $a$  und  $b$  die Parameter  $w$  der Regressionsfunktion  $f(x)$ . Der Achsenabschnitt  $a$  und die Steigung  $b$  der Regressionsgeraden lassen sich nach folgenden Beziehungen für  $f(x) \Rightarrow \hat{y} = a + b \cdot x$  schätzen:

$$b = \frac{Q_{xy}}{Q_x} \quad \text{und} \quad a = \bar{y} - b \cdot \bar{x}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{und} \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad \text{sind Mittelwerte der Stichprobe } (x, y)$$

$i = 1 \dots n$ ;  $n$  ist die Anzahl der Wertepaare in der Stichprobe

$$Q_x = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad Q_y = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad Q_{xy} = \sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]$$

Die Standardabweichung ergibt sich für  $x$  zu:  $s_x = \sqrt{\frac{Q_x}{n-1}}$  und für  $y$  zu:  $s_y = \sqrt{\frac{Q_y}{n-1}}$

Die beschriebene Vorgehensweise zur Ermittlung der Parameter  $a$  und  $b$  der Regressionsfunktion stellt eine Alternative zur Darstellung über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate dar.

Die aufgestellte Regressionsfunktion  $f(x)$  dient zur Vorhersage von  $y$  für gegebene Werte von  $x$ . Die Vorhersage ist optimal in dem Sinne, dass sie den kleinsten quadratischen Prognosefehler für den gewählten Regressionsansatz besitzt.

### 6.2.2 Schätzung von Standardabweichungen

Der Standardfehler des Regressionsmodells wird geschätzt durch:

$$s_{y.x} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \left( Q_y - \frac{Q_{xy}^2}{Q_x} \right)} \text{ bzw. } s_{y.x}^2 = \frac{1}{n-2} \cdot \left( Q_y - \frac{Q_{xy}^2}{Q_x} \right) = \frac{1}{n-2} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - a + b \cdot x_i)^2$$

Das Quadrat dieses Standardschätzfehlers  $s_{y.x}$  wird auch als Restvarianz  $\hat{\sigma}$  bezeichnet. Die Restvarianz - die Streuung der Wertepaare um die Regressionsgerade in  $y$ -Richtung - ist die Varianz von  $y$ , nachdem der Einfluss der Streuung von  $x$  ausgeschaltet worden ist.

Die Standardabweichung des Achsenabschnitts  $a$  errechnet sich aus:

$$s_{ay.x} = s_{y.x} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{\bar{x}^2}{Q_x}}$$

und die Standardabweichung für den Regressionskoeffizienten  $b$  aus:

$$s_{by.x} = \frac{s_{y.x}}{\sqrt{Q_x}}$$

### 6.2.3 Konfidenzintervalle der Regressionsgerade

Für eine Regressionsgerade können drei verschiedene Konfidenzintervalle (bzw. Vertrauensbereiche) angegeben werden. Diese bilden sich für:

- die gesamte Regressionsgerade  $\hat{y} \pm s_{ym} \cdot \sqrt{2 \cdot F_{(v)}}$  mit  $\hat{y} = a + b \cdot x$
- den Erwartungswert von  $\hat{y}$  an der Stelle  $x$ .  $\hat{y} \pm s_{ym} \cdot t_{(v)}$
- den Prognosebereich (prediction interval) für eine zukünftige Beobachtung  $y$  an der Stelle  $x$ :  $\hat{y} \pm s_{y.} \cdot t_{(v)}$

Für die Konfidenzintervalle müssen zwei verschiedene Standardabweichungen ( $s_{ym}$ ,  $s_{y.}$ ) ermittelt werden, welche sich über die Restvarianz  $\hat{\sigma}$  bzw.  $s_{y.x}$  berechnen:

Die Standardabweichung für einen geschätzten Mittelwert  $\hat{y}$  an der Stelle  $x$

$$s_{ym} = s_{y.x} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{Q_x}}$$

Die Standardabweichung für einen vorausgesagten Einzelwert  $y$  an der Stelle  $x$

$$s_{y.} = s_{y.x} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{Q_x}}$$

Zur Berechnung der Vertrauensbereiche, sowie des Prognosebereiches müssen noch die Werte  $t$  und  $F$  angegeben werden. Diese stammt aus der Student- (Wert  $t$ ) und aus der  $F$ -Verteilung (Wert  $F$ ) und werden über die Berechnung der Vertrauensbereiche hinaus, für statistische Test's und zu Analysen wie der Kovarianzanalyse (Vergleich mehrerer Regressionsfunktionen) benötigt. Die Werte sind für bestimmte Signifikanzschranken tabelliert, wobei ihre Größe vom Freiheitsgrad  $\nu$  abhängt. Der Freiheitsgrad ergibt sich aus der Anzahl der Datenpaare  $n$  in der Stichprobe für den  $F$ - Wert durch:  $\nu = (2, n-2)$  und für den  $t$ - Wert durch  $\nu = n-2$ .

Die Konfidenzintervalle für Erwartungswert bzw. Regressionsgerade und Einzelwert unterscheiden sich formal nur durch den Term  $\sqrt{1+\dots}$ . Dies ist folgendermaßen zu interpretieren:

- Erwartungswert: Würde man das Zufallsexperiment, welches dem linearen Modell zugrunde liegt, 100 mal mit jeweils einer genügend großen Anzahl von Datenpaaren durchführen, so lägen - bei einem Konfidenzniveau von  $1-\alpha = 95\%$  - 95 der berechneten Funktionswertewerte  $\hat{y}$  bzw. Regressionsgeraden  $f(X)$  innerhalb des entsprechenden Vertrauensbereiches.
- Prognosebereich: Für ein Konfidenzniveau von 95% liegen an vorgegebener Stelle  $x$  95 von 100 neuen - also zukünftigen - Einzelwerten  $y$  in diesem Prognoseintervall.

Der Unterschied zwischen dem Konfidenzintervall für den Erwartungswert und für den Einzelwertes liegt darin, dass einerseits ein Parameter geschätzt wird, der eine gewisse Stichprobe charakterisiert. Andererseits wird eine Prognose über den Wert einer Größe gemacht, den dieser unter bestimmten Voraussetzungen in Zukunft annehmen wird.

Für unendlich viele Datenpaare schrumpfen die Vertrauensbereiche für die Regressionsgerade und für den Erwartungswert gegen Null. Der Voraussagebereich für den Einzelwert behält einen Streifen mit der Breite  $z \cdot \sigma_{y.x}$ . Der Faktor  $z$  spiegelt hier wieder, mit welcher Wahrscheinlichkeit (z.B. 95%) die Einzelwerte im betreffenden Prognosebereich zu liegen kommen.  $\sigma_{y.x}$  ist die Standardabweichung der Grundgesamtheit der Messdaten.

### 6.2.4 Linearisierende Transformation

An den direkt beobachtbaren Merkmalen wurde untersucht, ob sich durch Logarithmierung der Daten die Anpassungsgüte des linearen Regressionsansatzes, gemessen durch den Korrelationskoeffizienten  $r$ , verbessern läßt.

In bestimmten Fällen weisen die Variationskoeffizienten ( $C_{vx} = \frac{S_x}{\bar{x}}$  bzw.  $C_{vy} = \frac{S_y}{\bar{y}}$ ) der Stichproben Werte größer 30% auf. Diese Tatsache und die Annahme einer Normalverteilung für beide betrachteten Prüfmerkmale  $x$  und  $y$  (z.B.  $x = E_{v2}$  und  $y = Omega$ ) passen aus diesen Grund nicht zusammen.

Sind jedoch die beiden Prüfmerkmalswerte  $x$  bzw.  $y$  verträglich mit der Annahme „Logarithmische Normalverteilung“, dann sind die transformierten Werte  $x' = \log x$  und  $y' = \log y$  normalverteilt. Lässt sich zwischen den transformierten Werten  $x'$  und  $y'$  ein linearer Zusammenhang  $y' = a' + b' \cdot x'$  unterstellen, dann folgt hieraus der nichtlineare Zusammenhang  $y = a \cdot x^b$  zwischen  $x$  und  $y$ .

Neben dem bereits dargestellten linearen Regressionsansatz ist somit folgender nicht lineare Ansatz gewählt worden:

$$y = a \cdot x^b$$

Dieser ergibt sich durch Logarithmieren der dynamischen Messwerte und der zugehörigen Vergleichsversuche und anschließender linearer Regressionsanalyse mit dem Ansatz  $y' = a' + b' \cdot x'$ . Durch Rücktransformation von  $a' = \ln a$  und  $b' = b$  erhält man die Konstanten der Gleichung  $y = a \cdot x^b$

### 6.3 Korrelationsanalyse

Mit der Korrelationsanalyse werden stochastische Zusammenhänge zwischen Zufallsvariablen einer Stichprobe untersucht. Wichtigstes Abhängigkeitsmaß bei der Untersuchung ist der Korrelationskoeffizient  $\rho$  der Grundgesamtheit oder das Bestimmtheitsmaß  $\rho^2$ . Diese Werte kennzeichnen das Maß für den Zusammenhang zwischen  $x$  und  $y$ .

Für den Korrelationskoeffizienten  $\rho$  der Grundgesamtheit gilt:

- $1 \geq \rho \geq -1$
- Für  $\rho = \pm 1$  besteht zwischen den Zufallsvariablen  $x$  und  $y$  ein funktionaler linearer Zusammenhang, d.h. alle Punkte  $(x, y)$  liegen exakt auf einer Geraden.
- Für  $\rho = 0$  besteht kein funktionaler linearer Zusammenhang. Die Zufallsvariablen heißen dann „unkorreliert“. Speziell bei zweidimensional normalverteilten Zufallsvariablen besteht dann auch eine stochastische Unabhängigkeit zwischen  $x$  und  $y$ .

Das Bestimmtheitsmaß  $\rho^2$  stellt in gleicher Weise wie der Korrelationskoeffizient ein Gütemaß für eine Regression dar. Sein Wertebereich erstreckt sich von 0 bis 1.

Der Korrelationskoeffizient  $\rho$  bzw.  $\rho^2$  der Grundgesamtheit wird durch den Stichprobenkorrelationskoeffizient  $r$  bzw.  $r^2$  geschätzt.  $r$  sowie  $r^2$  sind empirische Maße für die Stärke eines stochastischen Zusammenhanges zweier Zufallsvariablen.

Die Rechenregel für die Schätzung von  $r$  und  $r^2$  wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

### 6.3.1 Der Korrelationskoeffizient (Die Schätzung und die verbesserte Schätzung)

Das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  als Gütemaß einer Regression von  $y$  auf  $x$  berechnet sich aus dem

Quotienten von  $s_{\hat{y}}^2$  und  $s_y^2$ .

$$r^2 = \frac{s_{\hat{y}}^2}{s_y^2} = \frac{s_{xy}^2}{s_y^2 \cdot s_x^2}$$

Hier ist  $s_{\hat{y}}^2$  die durch die Regression erklärte Varianz und  $s_y^2$  die Gesamtvarianz von  $y$ . Wobei gilt:

Gesamtvarianz = erklärte Varianz + nicht erklärte Varianz

$$s_y^2 = s_{\hat{y}}^2 + s_{y-\hat{y}}^2$$

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \text{ mit dem Mittelwert } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

$$s_{\hat{y}}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \text{ mit der Schätzung } \hat{y}_i = a + b \cdot x_i$$

$$s_{y-\hat{y}}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Der Korrelationskoeffizient ergibt sich nun aus der Wurzel des Bestimmtheitsmaßes

$$r = \sqrt{r^2} = \sqrt{\frac{s_{\hat{y}}^2}{s_y^2}}$$

$r$  kann aber auch direkt berechnet werden:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Bei kleinen Stichprobenumfängen  $n$  ( $n = 10$  bis  $20$ ) unterschätzt der Stichprobenkorrelationskoeffizient  $r$  den Parameter  $\rho$  der Grundgesamtheit. Eine verbesserte Schätzung  $r_v$  für  $\rho$  erhält man mit folgender Gleichung [51]:

$$r_v = r \cdot \left[ 1 + \frac{1 - r^2}{2 \cdot (n - 3)} \right]$$

### 6.3.2 Prüfung auf Vorhandensein einer Korrelation und Test des Regressionskoeffizienten gegen Null

Ob bei dem aus einer Stichprobe ermittelten Korrelationskoeffizienten  $r$  eine Zufallsabweichung vom Wert  $\rho = 0$  vorliegt, kann nach R. A. Fisher in [51] anhand der  $t$ -Verteilung auf einem vorher festgelegten Signifikanzniveau getestet werden. Das Vorliegen einer Zufallsabweichung vom Wert  $\rho = 0$  bedeutet, dass im Grunde kein linearer Zusammenhang zwischen den Zufallsvariablen  $x$  und  $y$  besteht und der ermittelte Korrelationskoeffizient  $r$  zufällig von Null abweicht. Bei den in den Auswertungen durchgeführten Tests zum Vorliegen einer Korrelation wurde ein Signifikanzniveau von 95% zugrunde gelegt.

- Die Nullhypothese  $H_0$  zwischen dem Wert  $\rho = 0$  (unkorrelierte Messwerte) und dem gefundenen Korrelationskoeffizient  $r$  lautet: Es gibt keinen Unterschied zwischen dem gefundenen  $r$  und  $\rho = 0$ . Die Abweichungen voneinander sind auf dem gewählten Signifikanzniveau rein zufälliger Natur.
- Die zur Nullhypothese  $H_0$  gegenüberstehende Alternativhypothese  $H_1$  lautet: Die Abweichungen zwischen den Korrelationskoeffizienten  $\rho = 0$  und dem beobachteten Wert  $r$  sind nicht zufälliger Natur. Somit liegt auf dem vorher festgelegten Signifikanzniveau ein Unterschied zwischen beiden vor, und der Korrelationskoeffizient  $r$  zeigt jetzt einen stochastischen Zusammenhang zwischen den beiden Zufallsvariablen  $x$  und  $y$  auf.

Die für den Test notwendige Testgröße ist:  $\hat{t} = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$  [51]

Aus der  $t$ -Verteilung wird die Prüfgröße:  $t_{n-2,\alpha}$  ( $\alpha$ : Signifikanzniveau;  $n-2$ : Freiheitsgrade,  $n$ : Anzahl der Messwerte) ermittelt.

Bei  $\hat{t} > t_{n-2,\alpha}$  ist die Abweichung der Korrelationskoeffizienten  $r$  von  $\rho = 0$  nicht zufälliger Natur und die Hypothese der Gleichheit  $H_0$  kann verworfen werden. Die Alternativhypothese  $H_1$  wird auf dem gewählten Signifikanzniveau angenommen. Für die graphische Darstellung der Ergebnisse aus Kapitel 7 (Auswertung) wurde zwischen der Prüf- und Testgröße ein Differenzwert  $t$  gebildet. Ist dieser positiv, liegt  $\hat{t} > t_{n-2,\alpha}$  vor und die Alternativhypothese (Vorliegen einer Korrelation auf den gewählten Signifikanzniveau) kann angenommen werden. Ob der ermittelte Korrelationskoeffizient einen stochastischen Zusammenhang aufzeigt, hängt über den Freiheitsgrad  $\nu$  vom Prüfungsumfang  $n$  der Stichprobe ab. Die Bilder in

Abbildung 6-1 sollen diesen Sachverhalt darstellen. Für die Grafiken gelten unterschiedliche Signifikanzniveaus bzw. Irrtumswahrscheinlichkeiten  $\alpha$ .

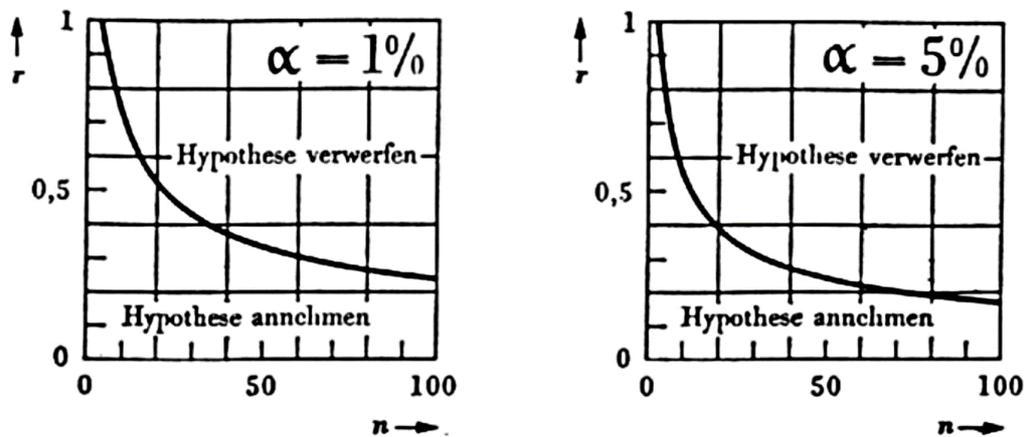


Abbildung 6-2: Abhängigkeit des notwendigen Korrelationskoeffizienten von der Messwertanzahl  $n$  und der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$

Für eine vereinfachte Beurteilung der Regressionsgüte kann nach [11] der ermittelte Korrelationskoeffizient angenähert mit folgenden Werten verglichen werden.

- $r = 0$  ist perfekt unkorreliert
- $r < 0,20$  ist nicht signifikant oder sehr schwach korreliert
- $0,40 < r < 0,6$  ergibt eine mittlere Korrelation
- $r > 0,80$  ist signifikant oder sehr stark korreliert
- $r = 1$  ist perfekt korreliert

"Besser ist es allemal, den Nachweis mit einem statistischen Test durchzuführen" [11].

In der technischen Prüfvorschrift TP BF-StB Teil E2 „Flächendeckende dynamische Prüfung der Verdichtung“ [55] wird als mindestens zu erzielender Korrelationskoeffizient  $r = 0,7$  festgelegt. Der genaue Textabschnitt in dieser Prüfvorschrift lautet: „Ist der Korrelationskoeffizient  $r < 0,7$  so kann die Kalibrierung zur Festlegung eines Mindestwertes für die FDVK nicht herangezogen werden. Die Kalibrierung ist durch weitere Vergleichsmessungen zu verbessern oder zu wiederholen“.

In analoger Weise kann auch beim Test der Regressionskoeffizienten gegen Null vorgegangen werden. Bei diesem Test wird überprüft, ob sich der Regressionskoeffizient  $b$  (Steigung der Regressionsgeraden  $b$ ) von Null unterscheidet. Es wird der Frage nachgegangen: Liefert die unabhängige Variable  $x$  im Regressionsansatz  $y = f(x)$  einen erklärenden Beitrag zur Streuung der abhängigen Variablen? Wird entsprechend der Nullhypothese  $H_0$  nachgewiesen, dass der

Regressionskoeffizient  $b$  rein zufällig von Null abweicht, leistet die Zufallsvariablen  $x$  keinen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Varianz von  $y$ . Im folgenden werden die Teststatistiken für den Regressionskoeffizienten  $b$  und den Achsenabschnitt  $a$  dargestellt.

Unter der Normalverteilungsannahme gilt:

$$\text{Regressionskoeffizient: } \frac{b - b_0}{s_{by.x}} \sim t(n-2)$$

$$\text{und Achsenabschnitt: } \frac{a - a_0}{s_{ay.x}} \sim t(n-2)$$

$$\text{mit } s_{ay.x} = s_{y.x} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}} \text{ und } s_{by.x} = \frac{s_{y.x}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}} \text{ (siehe auch Kapitel 6.2.2)}$$

Die Teststatistik und der Ablehnungsbereich für  $H_0 (b = 0, a = 0)$  ergeben sich nun zu:

$$\hat{t}_b = \frac{b - b_0}{s_{by.x}} \text{ und } \hat{t}_a = \frac{a - a_0}{s_{ay.x}} \text{ wobei für die Nullhypothese in den Formel } b_0 = 0 \text{ und } a_0 = 0$$

gesetzt werden muss. Für die Testgröße  $|\hat{t}_{a,b}| > t_{(n-2),\alpha}$  wird die Nullhypothese  $H_0$  abgelehnt.

## 6.4 Multiple lineare Regression

Im folgenden Kapitel soll der Fall der linearen Einfachregression für bivariate bzw. univariate Datensätze auf multivariate Datensätze erweitert werden.

Der multiple lineare Regressionsansatz für die beobachteten Daten  $y, x_0, x_1, \dots, x_p$  mit  $p = 0 \dots P$  Regressoren lautet:  $y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + \dots + b_p \cdot x_p + \varepsilon$  wobei  $x_0 = 1$  ist

Zur Vereinfachung werden die Zusammenhänge in Matrixnotation dargestellt.

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{11} & \cdot & x_{p1} \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & \cdot \\ x_{0n} & x_{1n} & \cdot & x_{pn} \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} b_0 \\ \cdot \\ b_1 \\ \cdot \\ b_p \end{bmatrix}$$

$p = 0 \dots P$  (Regressoren);  $i = 1 \dots n$  (Datensätzen)

Über  $(Y - Xb)'(Y - Xb) \rightarrow \min_b$  und Nullsetzen der ersten Ableitung

$X'(Y - Xb) = 0 \Leftrightarrow X'Xb = X'Y$  ergeben sich die Regressionskoeffizienten  $b$  zu:

$$b = (X'X)^{-1} X'Y$$

Die Restvarianz bzw. der Standardfehler der Schätzung im multiplen Regressionsmodell errechnet sich aus:

$$s_{y.x}^2 = \frac{1}{n - P - 1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - a + b \cdot x_i)^2$$

Hieraus ergibt sich die Standardabweichungen der Regressionsparameter:

$$s_{b_{y.x_p}} = s_{y.x} \cdot \sqrt{v_p} \quad v_p \text{ sind die Diagonalelemente von } (X'X)^{-1}$$

Analog zum Test der Regressionskoeffizienten gegen Null beim einfachen linearen Regressionsmodell kann die Teststatistik für die Regressionskoeffizienten  $b_p$  aufgestellt werden:

Unter der Normalverteilungsannahme gilt:

$$\frac{b_p - b_0}{s_{b_{y.x_p}}} \sim t(n - P - 1)$$

Die Teststatistik und der Ablehnungsbereich für  $H_0$  ( $b_p = 0$  für  $p = 0, \dots, P$ ) werden für die einzelnen Regressionsparameter  $b_p$  aus  $T_p = \frac{b_p - b_0}{s_{by.x_p}}$  berechnet, wobei für die Nullhypothese

in der Formel  $b_0 = 0$  und  $a_0 = 0$  gesetzt werden muss.

Für  $|T_p| > t_{(n-p-1),\alpha}$  wird die Nullhypothese  $H_0$  abgelehnt und die Regressionsparameter liefern auf dem gewählten Signifikanzniveau einen Beitrag zur Erklärung der Varianz von  $y$ . Das Signifikanzniveau wurde in dieser Arbeit mit 95% festgelegt.

## 6.5 Ausreißer

Weicht ein Datenpaar deutlich vom anderen Datenpaaren einer Messreihe ab (Ausreißer), so kann dies zwei Ursachen haben:

- die extreme Abweichung kann rein zufallsbedingt sein.
- falsche Anwendung des vorgeschriebenen Messverfahrens oder infolge von Mess-, Schreib- oder Rechenfehlern.

Im ersten Fall ist das entsprechende Datenpaar nicht aus der Messreihe zu entfernen, wohingegen im zweiten Fall der Fehler zu korrigieren ist. Sollte das nicht möglich sein, ist das Datenpaar aus der Messreihe zu entfernen.

Die Entscheidung, ob es sich bei dem abweichenden Datenpaar um einen Ausdruck einer hohen Zufallsstreuung der Messreihe handelt oder ob das Datenpaar einer anderen Grundgesamtheit angehört, oftmals schwer bzw. gar nicht zu treffen ist, wird mit einer Über- und Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 1% getestet.

Für eine erste Beurteilung der Variabilität der Messreihe wird das 98% (bzw. 1% Überschreitungswahrscheinlichkeit) Vertrauensband herangezogen. In einer guten Näherung (bei  $n = 50$ ) kann von zwei Parallelen zur Regressionsgerade im Abstand von  $2.403 s_{y,x}$  ausgegangen werden, die 98% aller Beobachtungen enthält. Wobei die Standardabweichung der Schätzung ( $s_{y,x}$ ), ohne das als Ausreißer verdächtigtes Datenpaar, zu bestimmen ist.

## 6.6 Neuronale Netze

Die Grundidee zur Entwicklung künstlicher neuronaler Netze stammt aus der Neurophysiologie. Vorbild war das menschliche Nervensystem, welches sich aus ca. 100 Milliarden verschiedener Nervenzellen, den sogenannten Neuronen zusammensetzt. Die Neuronen sind miteinander über Synapsen verbunden. Über diese tauschen die Neuronen Informationen in Form von elektrochemischen Reizen aus. Durch eine hochgradige Vernetzung der Neuronen untereinander, besteht ein parallel arbeitendes biologisches Informationsverarbeitungssystem, dessen Leistungsfähigkeit bisher von keinem Computer erreicht wird. Künstliche neuronale Netze sind diesen biologischen Nervensystemen nachempfunden, um deren Leistungsfähigkeit und Möglichkeiten in der Informationsverarbeitung nachbilden zu können. Die künstlichen Netze werden über Knoten und Verbindungen entsprechend dem biologischen Vorbild aufgebaut. Die Knoten werden ebenfalls mit Neuronen bezeichnet.

Eine der wichtigsten Anforderungen an die Fähigkeiten neuronaler Netze ist die Übertragung gelerntes Wissen auf eine neue Situation. Zur Zeit werden neuronale Netze in den verschiedensten Anwendungsgebieten wie z.B. als Simulationsmodell für die Informationsverarbeitung in biologischen Systemen, als Echtzeitsystem oder Steuereinheit für Maschinen oder als Methode zur Clusteranalyse [4] eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Fähigkeit von neuronalen Netzen genutzt werden, funktionale Zusammenhänge approximieren zu können. Hierzu wird gem. [4] ein geeigneter Netzwerktyp ausgewählt und die generelle Vorgehensweise des "Trainingsprozesses" vorgestellt.

In der Statistik wird bei der Regressionsanalyse allgemein zwischen parametrischen und nicht parametrischen Regressionsverfahren unterschieden (siehe Kapitel 6.2). Neuronale Netze können hierbei den parametrischen Regressionsverfahren zugeordnet werden, da sie einerseits dem zu modellierenden Zusammenhang eine Struktur unterstellen, dessen Parameter nur noch bestimmt werden müssen. Sie erlauben aber andererseits die Nutzung der Vorteile nicht parametrischer Verfahren, die dort eingesetzt werden, wo keine gesicherten Erkenntnisse über die Modellstruktur vorliegen oder gewonnen werden können. Demnach können Neuronale Netze nun entsprechend der Anzahl an verdeckten Neuronen der Zwischenschicht entweder den parametrischen oder den nichtparametrischen Verfahren zugeordnet werden. Hierbei kann generell ein Netz ohne verdeckte Neuronen als rein parametrisches Verfahren und ein Netz mit theoretisch unendlich vielen verdeckten Neuronen als nichtparametrisches Verfahren bezeichnet werden [4].

Die Signalverarbeitung im künstlichen neuronalen Netz wird über den Aktivierungsgrad der Neuronen und der Gewichtung der Verbindungen zwischen den Neuronen gesteuert. Jedes der von Neuron zu Neuron weitergeleiteten Signale wird entsprechend der benutzten Verbindung mit einem Faktor multipliziert. In der Regel werden dann alle in ein Neuron eingehenden Signale addiert und auf die erhaltene Summe eine sogenannte Aktivierungsfunktion angewendet. Je nach dem welche Eigenschaften das Netzwerk aufweisen soll, werden verschiedene Aktivierungsfunktionen bzw. feste Aktivierungsgrade dem Netz vorgegeben. Das Ergebnis der Signalverarbeitung innerhalb eines Neurons kann unmittelbar als eigenes Signal weitergegeben werden. Dieses Signal wiederum ergibt mit einer Anzahl von Signalen anderer Neuronen einen weiteren Eingangswert für ein Folgeuron. Die Faktoren der Verbindungen bzw. die Verbindungsgewichte des neuronalen Netzes sind hierbei der Informationsspeicher und bestimmen die Reaktionen auf eine Eingabe. Die Werte der jeweiligen Verbindungsgewichte werden im sogenannten Trainings- bzw. Schätzprozess des Netzwerkes bestimmt. Abbildung 6-3 zeigt ein Neuron mit möglichen Verbindungen.

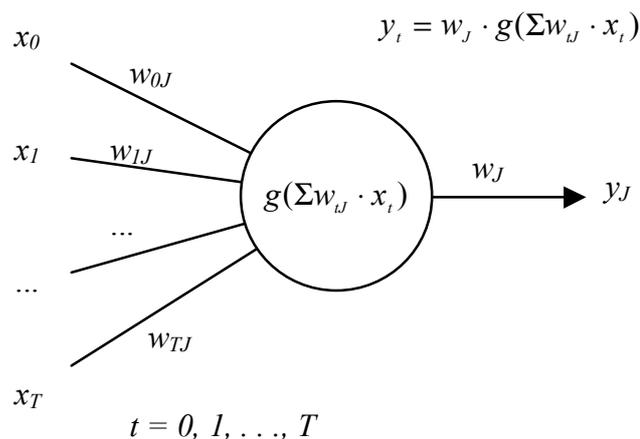


Abbildung 6-3: Modell eines Neurons  $J$  mit den Verbindungen und den Verbindungsgewichten  $w_{tJ}$

### 6.6.1 Netzart und Netzstruktur

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Netz mit vorwärtsgerichteter Verbindungsstruktur und einer verdeckten Neuronenschicht betrachtet. Die Neuronen sind in dieser Netzstruktur in eine Eingangs-, eine Ausgabe- und in eine Zwischenschicht bzw. verdeckte Schicht aufgeteilt. In der Eingabeschicht werden über die Eingabeneuronen dem Netzwerk Informationen zu Verfügung gestellt. Über die Ausgabeneuronen werden die berechneten Werte des neuronalen Netzes ausgegeben. Auf die Aus- und Eingangsdaten der verdeckten Neuronen der Zwischenschicht kann vom Netzanwender nicht zugegriffen werden.

Innerhalb dieser Struktur sind nur Verbindungen von Neuronen einer Schicht zu Neuronen in einer nachfolgenden Schicht möglich, wobei Abkürzungen sogenannte short cut's zugelassen werden können. Short cut's sind Verbindungen, die eine oder mehrere Netzwerkschichten überspringen. Weiterhin wird im betrachteten Netzwerk lediglich ein Ausgabeneuron angeordnet. In Abbildung 6-4 ist beispielhaft ein Netzwerk angegeben, wie es zur Beschreibung der Zusammenhänge in dieser Arbeit verwendet wird.

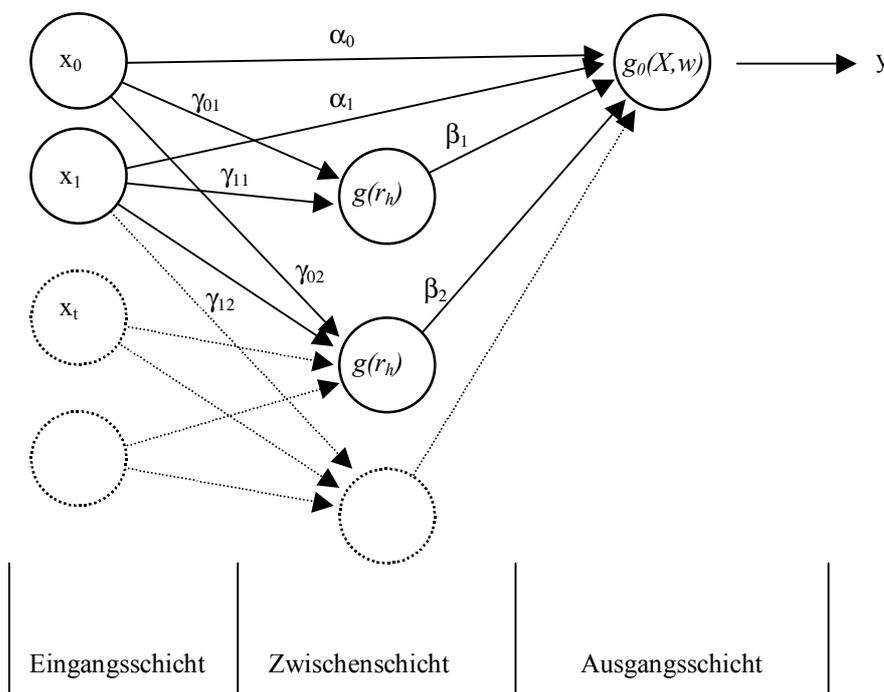


Abbildung 6-4: Struktur eines vorwärtsgerichteten neuronalen Netzwerkes mit drei Schichten zur Abbildung eines nichtlinearen Regressionsmodells

Obwohl zwar aufwendigere Verbindungsstrukturen möglich sind (z.B. rückwärtsgekoppelte Verbindungen), werden neuronale Netze in der dargestellten Form in der Praxis am weitest

häufigsten eingesetzt. Der Grund hierfür liegt mitunter darin, dass rückwärtsgekoppelte Verbindungsstrukturen vielfach zu unkontrollierbarem Netzverhalten führen und die zusätzliche Komplexität somit häufig unerwünscht ist [4]. Ein wesentliches Merkmal des verwendeten Netzwerktyps besteht darin, dass dieses auf eine im voraus bekannte Zielvariable (Zielgröße) hin trainiert wird. Man bezeichnet diese Vorgehensweise mit überwachtem Lernen.

Im Fall der Approximation einer Regressionsfunktion stellen die Eingabeneuronen die unabhängigen Variablen und die Ausgabeneuron die abhängigen Variablen dar. Mittels der Zwischenschicht können über einen linearen Regressionsansatz zusätzlich Nichtlinearitäten berücksichtigt werden. Der lineare Regressionsansatz wird hierbei über die sog. Short cut's von den Eingangsneuronen zu den Ausgangsneuronen realisiert. Die Neuronen der verdeckten Zwischenschicht werden nur zur Approximation nichtlinearer Anteile in den Trainingsdaten verwendet.

### 6.6.2 Netzwerkfunktion

Die Netzwerkfunktion  $f(X,w)$  ist die mathematische Beschreibung der Struktur des neuronalen Netzes. Zu den in Abbildung 6-4 dargestellten Netzwerk kann folgende Netzwerkfunktion  $f(X,w)$  aufgestellt werden.

$$f(X_i, w) = g_0 \left( \sum_{t=0}^T \alpha_t \cdot x_{it} + \sum_{h=1}^H s_h \right) \quad \text{Mit } s_h = \beta_h \cdot g_h(r_h) \quad \text{und} \quad r_h = \sum_{t=1}^T \gamma_{ht} \cdot x_t$$

$$f(X, w) = g_0 \left( \sum_{t=0}^T \alpha_t \cdot x_t + \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot g_h \left( \sum_{t=0}^T \gamma_{ht} \cdot x_t \right) \right); \quad w = (\alpha_0, \dots, \alpha_T, \beta_1, \dots, \beta_H, \gamma_{10}, \dots, \gamma_{HT})$$

$g_0$  und  $g_h$  stellen hier die Aktivierungsfunktionen dar.

$h = 1, 2, 3, \dots, H$        $H$  gibt die Anzahl der verdeckten Neuronen an.

$X = [x_0, x_1, \dots, x_T]$ ;       $t = 0, 1, 2, \dots, T$ ;  $T$  Eingangsneuronen

$X$  ist die Menge der unabhängigen Variablen oder Eingangswerte.  $x_0$  ist konstant und für alle Beobachtungen identisch 1 definiert.

$Y = [y_0, y_1, \dots, y_k]$ ;  $k = 0, 1, 2, \dots, K$

$Y$  ist die Menge der abhängigen bzw. der zu erklärenden Variablen oder Ausgangswerte. Im zu entwickelnden Netzwerk ist nur ein Ausgangswert vorgesehen  $\rightarrow K = 0$  (Es gilt  $y_0 = y$ ).

### 6.6.3 Zielfunktion

Die üblicherweise schnellste Art des Netzwerktrainings ist die des überwachten Lernens. Hierbei wird während des Trainingsprozesses jeder Eingabe in das Netzwerk die korrekte Ausgabe gegenübergestellt. Für Eingabe und korrekte Ausgabe dient eine Reihe von  $n$  Datenpaaren  $(X_i, Y_i)$  für  $i = 1, \dots, n$ . Das Netzwerk erzeugt aufgrund der Eingabe des Wertes  $X$  einen Ausgabewert der vom korrekten Ausgabewert des Datenpaares  $(X, Y)$  abweicht. Über ein Minimierungskriterium - bezüglich der Differenz zwischen Netzwerkausgabe und korrektem Messwert aus der Versuchsreihe - werden die Parameter der Netzwerkfunktion  $f(X, w)$  so bestimmt (trainiert), dass sich die Ausgaben des Netzwerkes den Messwerten möglichst gut annähern. Die aus dem Minimierungskriterium abgeleitete Anpassungsfunktion stellt die Zielfunktion dar.

Analog zur Regressionsanalyse wird das Netzwerkmodell über die Netzwerkfunktion  $f(X, w)$  folgendermaßen dargestellt:

$$y = f(X, w) + \varepsilon$$

Die Zielfunktion stellt sich nun für des Netzwerk aus Abbildung 6-4 wie folgt dar:

Aus der Netzwerkfunktion

$$f(X, w) = g_0 \left( \sum_{t=0}^T \alpha_t \cdot x_t + \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot g_h \left( \sum_{t=0}^T \gamma_{ht} \cdot x_t \right) \right)$$

wird über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate

$$0.5 \cdot SSE(w) = 0.5 \cdot \sum_{i=1}^n [y_i - f(X_i, w)]^2 \rightarrow Min!$$

die

Zielfunktion

erhalten:

$$0.5 \cdot SSE(w) = 0.5 \sum_{i=1}^n \left[ y_i - g_0 \left( \sum_{t=0}^T \alpha_t \cdot x_{it} + \sum_{h=1}^H \beta_h \cdot g_h \left( \sum_{t=0}^T \gamma_{ht} \cdot x_{it} \right) \right) \right]^2 \rightarrow Min!$$

$t = 0, 1, \dots, T$

Anzahl Eingangsvariable

$i = 1, \dots, n$

Anzahl der Beobachtungen bzw. Datenpaare (X,Y)

$h = 1, \dots, H$

Anzahl verdeckte Neuronen

#### 6.6.4 Aktivierungs- und Transformationsfunktionen

Wie Eingangs bereits dargestellt, werden die gewichteten Eingangssignale eines Neurons addiert und auf das Ergebnis eine Aktivierungsfunktion angewendet. Der Ausgabewert der Funktion gibt den Grad der Aktivierung des Neurons an. Dieser Aktivierungsgrad wird in kontinuierlichen oder diskreten Wertebereichen ausgegeben. Im Falle von kontinuierlichen Wertebereichen, sind die Ausgabewerte auf ein Intervall von  $[0, 1]$  oder  $[-1, 1]$  beschränkt. Hierzu kommen als Aktivierungsfunktion meist lineare Schwellwertfunktionen und sigmoide Funktionen in Betracht. Bei Netzen deren Neuronen bzw. die Aktivierungsfunktionen die Ausgabewerte auf diskrete Wertebereiche abbilden, kommen Stufenfunktionen zum Einsatz.

Sigmoide Aktivierungsfunktionen ermöglichen einem Netzwerk auf Eingangswerte mit sehr großen als auch mit sehr kleinen Ausprägungen zu reagieren, wobei sie sich bei kleinen Werten wesentlich sensibler verhalten. Daher weisen sigmoide Aktivierungsfunktionen im Bereich um ihren Nullpunkt die größte Steigung bzw. Sensitivität auf. Als Aktivierungsfunktion für das Ausgabeneuron wird in dieser Arbeit die Identität  $g_o(x) = x$  gewählt. Zur Berücksichtigung von Nichtlinearitäten im Netzwerk wird als Aktivierungsfunktion  $g_h(x)$  für die Neuronen der Zwischenschicht gem. [4] der tangens hyperbolicus verwendet.

Die tangens hyperbolicus Funktion ergibt sich zu:  $\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ , siehe Abbildung 6-5.

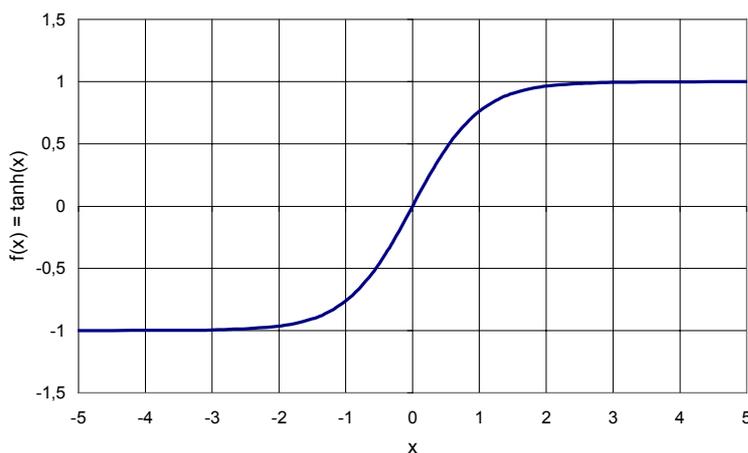


Abbildung 6-5: tangens hyperbolicus Funktion:  $f(x) = \tanh(x)$

Die Ausgabe  $s_h$  eines Neurons  $h$  mit einer tangens hyperbolicus Aktivierungsfunktion lässt sich mit  $t$  Eingangsparameter folgendermaßen angeben:

$$s_h = \beta_h \cdot \tanh(r_h) = \beta_h \cdot \tanh\left(\sum_{t=1}^T \gamma_{ht} \cdot x_t\right)$$

Innerhalb dieses Neurons sind zwei verschiedene Parameter ( $\beta_h, \gamma_{ht}$ ) eingeführt. Die Parameter  $\gamma_{ht}$  gewichten die Eingangssignale in das Neuron, bevor diese miteinander addiert werden. Die Summe der gewichteten Eingangswerte  $r_h$  ergibt sich zu:

$$r_h = \sum_{t=1}^T \gamma_{ht} \cdot x_t$$

Mit  $\beta_h$  werden die Ausgangssignale der Aktivierungsfunktion multipliziert. Das Neuron weist nun je nach der Größe der Parameter ein unterschiedliches Verhalten seiner Ausgangsgrößen auf. Wie in Abbildung 6-5 dargestellt, liegen die  $\tanh(r_h)$ - Funktionswerte in einem Intervall von  $]-1, 1[$ . Die Intervallgrenzen werden bereits bei Eingangsgrößen von  $-3$  und  $3$  nahezu erreicht. Liegen die Eingangsgrößen außerhalb des Intervalls von  $[-3, 3]$  nennt man die  $\tanh(r_h)$ - Funktion saturiert.

Werden die Eingangsparameter  $X$  um ihren Mittelwert und ihre Standardabweichung bereinigt, kann aufgrund der Parameterwerte  $\gamma_{ht}$  die Signifikanz des Neurons im Netzwerk besser beurteilt werden. Die Parameter  $\gamma_{ht}$  geben die Steigung der  $\tanh(r)$ - Funktion an. Mit steigender Größe des Parameters  $\gamma_{ht}$  nähert sich die  $\tanh(r_h)$ - Funktion einer Treppenfunktion mit dem Funktionswert  $1$  an. Sind die Parameterwerte von  $\gamma_{ht}$  hingegen klein, wird eine lineare Funktion angenähert. In beiden Fällen wird dann das Neuron im Gesamtnetzwerk hinfällig, da mehrere hintereinander geschaltete lineare Transformationen durch eine einzige lineare Transformation dargestellt werden können. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die Initialisierung eines Netzwerkes schrittweise vorgegangen wird. Dies bedeutet, dass ein möglichst einfaches Netz solange um ein zusätzliches verdecktes Neuron erweitert wird, bis die nichtlinearen Anteile in den Eingangsdaten ausreichend genau erfasst werden. Für jede Netzerweiterung ist somit ein eigener Trainingsvorgang notwendig.

### 6.6.5 Modellbildungsprozess

Wie bereits dargestellt, können neuronale Netzwerke im Kontext zur Regressionsanalyse einerseits den parametrischen und andererseits den nicht parametrischen Verfahren zugeordnet werden. Ausschlaggebend für eine Zuordnung zu den einem oder anderem Verfahren ist die Anzahl der freien Netzwerkparameter. Für die zu lösende Aufgabe ist nun ein Netzwerk zu erstellen, bei dem die Anzahl an verdeckten Neuronen und die Verbindungen zwischen den Neuronen optimal gewählt ist. Hierbei bewegt man sich im Spannungsfeld zwischen Bias und Varianz der durch das Netzwerk errechneten Prognosen und den tatsächlichen Realisierungen der Zielvariablen. Tendenziell weisen „kleine“ Netzwerke einen hohen Bias und große Netzwerke eine hohe Varianz in ihren Prognosewerten auf. Unter diesen Gegebenheiten gilt es nun ein Netzwerkmodell bzw. Netzwerkkonfiguration zu finden, welches eine optimale Lösung zwischen den gegenläufigen Randbedingung Bias und Varianz liefert.

Der Modellbildungsprozess gliedert sich grob in vier Schritte. Diese sind im Folgenden kurz beschrieben. Die Bearbeitung dieser Schritte stellt einen rekursiven Prozess dar und wird solange fortgeführt, bis die Netzwerkarchitektur die zu lösende Aufgabe in geeigneter Weise erfüllt.

#### 1. Vorbereitung der Daten

Der erste Schritt im Modellbildungsprozess kann mit „Vorbereitung der Daten“ bezeichnet werden. Dies beinhaltet die Auswahl der vorhandenen Daten unter dem Gesichtspunkt, daß diese einen erklärenden Beitrag zur Zielvariablen liefern. Weiterhin können die ausgewählten Daten durch eine geeignete Transformation einer numerischen Auswertung zugänglicher gemacht werden. In der Regel werden bei einer Transformation die Daten um ihren Mittelwert und ihre Standardabweichung bereinigt. Durch diese Standardisierung (Mittelwert: Null; Standardabweichung: Eins) bleibt die Korrelationsstruktur in den Daten erhalten. Das Verhalten von numerische Schätzverfahren wird hierdurch im allgemeinen besser und der Parameter zur Schätzung des Mittelwertes der Zielvariablen braucht nicht berechnet zu werden (der Mittelwert ist Null). Die Anzahl der zu berechnenden Regressionsparameter erniedrigt sich somit um eins.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{bzw.} \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad i = 1 \dots n; \quad n: \text{Anzahl der Wertepaare}$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{und} \quad s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

$$\tilde{x} = \frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \quad \text{und} \quad \tilde{y} = \frac{y_i - \bar{y}}{s_y}$$

Da neuronale Netze wegen ihrer großen Flexibilität besonders anfällig gegenüber Ausreißern in den Daten sind, sollten diese möglichst - falls identifizierbar - entfernt werden. (siehe auch Kapitel 6.5). Ein weiterer Punkt der Schwierigkeiten bei der Vorbereitung der Daten besteht darin, sind Multikollinearitäten. In diesen Fällen liegen gegenseitige Abhängigkeiten unter den erklärenden Variablen vor. Da Multikollinearitäten eine hohe Varianz der Parameterschätzung verursacht, sollte die Datenbasis um redundante Daten bereinigt werden.

## 2. Spezifikation der Netzwerkarchitektur

Bei der Spezifikation der Netzwerkarchitektur wird die Anzahl an notwendigen verdeckten Neuronen festgelegt und die Neuronen bestimmt, welche untereinander verbunden werden. Hierbei kann in einem ersten Schritt von einem linearen Regressionsmodell - als Sonderfall eines Neuronalen Netzes ohne verdeckte Neuronen - ausgegangen werden. Durch die Residuen des linearen Regressionsmodells können erste Hinweise auf eine vernachlässigte Nichtlinearität in den Daten erhalten werden, was letztlich die Anwendung eines neuronalen Netzwerkes rechtfertigt. In den nächsten Schritten wird das vorhergehende Netzwerk um ein weiteres verdecktes Neuron erweitert. Die geschätzten Parameter des Vorgängermodells werden als Startwerte für das numerische Schätzverfahren des um ein Neuron erweiterten Ausgangsmodells verwendet.

## 3. Schätzung der Netzwerkparameter

Da sich in der Regel die Netzwerkgewichte bzw. die Parameter der Netzwerkfunktion nicht mehr analytisch bestimmen lassen, werden zu ihrer Bestimmung Verfahren der numerischen Mathematik angewendet. Ausgangspunkt der Parameterschätzung ist die Zielfunktion, welche wie bereits beschrieben über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate bestimmt werden kann. Die Netzwerkparameter sind nun so zu bestimmen, dass der Zielfunktionswert ein globales Minimum annimmt. Zur Lösung dieser Aufgabe, wird die erste und zweite Ableitung

der Zielfunktion bestimmt. Die Parameter für ein globales Minimum der Zielfunktion sind dann gefunden, wenn die erste Ableitung Null und die zweite Ableitung positiv definit ist.

Die wichtigsten Verfahren zur Nullstellenbestimmung, welche die numerische Mathematik bereitstellt, sind Gradientenabstiegsverfahren. Ausgehend von einer Initialschätzung versuchen diese entlang einer „Abstiegsrichtung“ ein globales Minimum der Funktionswerte zu finden. Der fundamentalste Vertreter der Gradientenabstiegsverfahren ist das Newton - Verfahren. Hierauf aufbauend ist das Quasi - Newton - Verfahren zu nennen. Zur Optimierung dieser Verfahren kann der Levenberg - Marquardt - Algorithmus angewendet werden. Außerdem können sogenannte Line - Search - Verfahren verwendet werden, um die Gradientenabstiegsverfahren weiter zu optimieren. Das bekannteste Näherungsverfahren zur Bestimmung der Parameter in bezug auf neuronale Netze ist das Backpropagation - Verfahren.

#### 4. Diagnose des Netzwerkes

Abschließend wird die Anpassungsqualität des untersuchten Netzwerkes an die vorliegende Aufgabenstellung und die Signifikanz der einzelnen Parameter untersucht. Die Anpassungsqualität des Netzwerkes wird hier über den Standardfehler  $s_{x,y}$  der Regression beurteilt. Hierzu wird ein bestehendes Netzwerk solange um ein weiteres verdecktes Neuron erweitert, bis der gewonnene Standardfehler  $s_{x,y}$  (Kapitel 6.2.2) ein Minimum erreicht hat. Dasjenige Netzwerk mit dem geringsten Standardfehler wird somit als das maßgebende ausgewählt. In der Literatur werden hierzu auch eine Reihe von statistischen Testverfahren (siehe [4]) genannt.

### 6.6.6 Konfiguration des Ausgangsmodells

Als Ausgangsmodell für das aufzustellende Netzwerk wird ein multiples lineares Regressionsmodell gewählt (siehe Kapitel 6.4).

$$\omega = b_0 + b_1 \cdot E_{v2} + b_2 \cdot D_s + b_3 \cdot T1 + b_4 \cdot T2 + b_5 \cdot U + b_6 \cdot C + b_7 \cdot d + \varepsilon$$

Die Werte der Zielgröße: *Omega* ( $\omega$ ) sind eingangs mittels der Korrekturfaktoren  $a$  und  $a_v$  aus der Walzensimulation auf das Messwertniveau einer Bezugswalze bei "kleiner Amplitude" umgerechnet worden.

Die unabhängigen Variablen im Regressionsmodell sind:

- $E_{v2}$ : Verformungsmodul in  $[MN/m^2]$
- $D_s$ : Schichtdicke in  $[m]$
- $T1$  und  $T2$ : Klassifizierungsmerkmale zur Berücksichtigung einer Schichtung im Baugrund (siehe Kapitel 3.3.3, Tabelle 3-2)
- $U$ : Ungleichförmigkeitszahl  $[-]$
- $C$ : die Krümmungszahl  $[-]$
- $d$ : Feinkornanteil in Massen - % für Korndurchmesser  $d < 0,06 \text{ mm}$  (bis max. 15%)

Mit den Variablen  $T1$  und  $T2$  wird ein Schichtwechsel auf die Bildung der FDVK- Messwerte berücksichtigt.  $T1$  und  $T2$  können nur die Werte 1 oder 0 annehmen und werden in [10] als "Dummy" Variablen bezeichnet. Nimmt eine der beiden Variablen den Wert 1 an, zeigt dies das Vorliegen der entsprechenden Randbedingung auf. Ist der Wert für  $T1$  und  $T2$  gleich 0 so liegen Daten der Kategorie  $N$  vor. Zur Wiederholung soll noch einmal erwähnt werden, dass mit dem Klassifizierungsmerkmal  $T1$  Versuchsdaten gekennzeichnet sind, die auf Frostschutzschichten und Dammschüttungen gewonnen wurden. Bei diesen lag innerhalb einer angenommenen Messtiefen der FDVK Walzen von 1,5 m ein Schichtwechsel zum Untergrund vor. Dies gilt auch für die Daten der Kategorie  $T2$  mit der Ausnahme, dass diese von Versuchen auf Tragschichten stammen. Bei den Versuchsdaten der Kategorie  $N$  ist der Boden über die Messtiefe von 1,5 m homogen aufgebaut. Bei den Datensätzen der Kategorie  $N$ , zu den keine Schichtdickenangaben vorlagen, wurde  $D_s = 1,5 \text{ m}$  gesetzt (siehe hierzu auch Kapitel 3.3.3).

Im ersten Schritt wurden in der Regressionsfunktion alle zuvor beschriebenen Variablen berücksichtigt. Es wird folgendes Ergebnis erhalten:

$$\hat{\omega} = 26,89 + 1,78 \cdot E_{v2} + 28,16 \cdot D_s + 37,98 \cdot T1 + 31,89 \cdot T2 + 1,04 \cdot U - 5,71 \cdot C - 6,91 \cdot d$$

In Tabelle 6-1 sind die Regressionsparameter  $b_p$  und die zugehörigen Testgrößen  $T_p$  (siehe Kapitel 6.4) angegeben. Ist die Testgröße  $T_p$  größer als die in der Tabelle vorgegebene Prüfgröße  $t_{(n-p,\alpha)} \sim 1,97$ , unterscheidet sich der entsprechende Regressionsparameter  $b_p$  auf einem Signifikanzniveau von 95% deutlich von Null. Somit leistet dieser einen signifikanten Beitrag zur Erklärung der Varianz von  $\Omega$  ( $\omega$ ). Die  $T_p$ -Werte der Regressionsparameter  $b_0, b_2, b_3, b_4, b_6$ , und  $b_7$  zeigen, dass sich diese nicht signifikant von Null unterscheiden. Somit können die Konstante  $b_0$  und die Variablen  $D_s, T1, T2, C$ , und  $d$  im Regressionsansatz vernachlässigt werden.

Variable	Regressionsparameter $b_p$		Testgröße $T_p$	
$I$	$b_0$	26,89	$T_0$	0,51
$E_{v2}$	$b_1$	1,78	$T_1$	<b>10,17</b>
$D_s$	$b_2$	28,16	$T_2$	0,74
$T1$	$b_3$	37,98	$T_3$	1,13
$T2$	$b_4$	31,89	$T_4$	0,74
$U$	$b_5$	1,04	$T_5$	<b>3,14</b>
$C$	$b_6$	5,71	$T_6$	1,07
$d$	$b_7$	6,91	$T_7$	0,83
Prüfgröße $t_{(n-p,\alpha)}$		~ 1,97		
Standardfehler $s_{x,y}$		91,74		
$r^2$		0,4132		

Tabelle 6-1: Regressionsergebnisse und Testgrößen  $T_p$  der Regressionsparameter  $T_p$

Unter Berücksichtigung der errechneten  $T_p$ -Werte werden schrittweise die nicht signifikanten Terme im Regressionsansatz vernachlässigt. Hierbei wurde aber berücksichtigt, dass die Schichtdicke  $D_s$  ähnliche Informationen repräsentiert, wie die Variablen  $T1$  und  $T2$ . Deswegen wurden die nachfolgenden Regressionsansätze getrennt für  $D_s$  und  $T1$  bzw.  $T2$  aufgestellt. In Tabelle 6-2 sind die Regressionsergebnisse dieser Vorgehensweise dargestellt.

Variable	Regressor	Auswertungsnummer (AN)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
$I$	$b_0$	26,89	-	-	-	-	-	-	-
$E_{v2}$	$b_1$	1,78	1,81	1,78	<b>1,69</b>	1,68	2,00	1,93	1,88
$D_s$	$b_2$	28,16	-13,41	-	-	-	-42,75	-37,54	-51,48
$TI$	$b_3$	37,98	52,81	54,27	<b>43,63</b>	59,55	-	-	-
$T2$	$b_4$	31,89	49,77	58,13	<b>54,08</b>	59,57	-	-	-
$U$	$b_5$	1,04	1,04	0,974	<b>0,69</b>	-	1,16	0,95	0,95
$C$	$b_6$	5,71	-6,01	-8,09	<b>-7,02</b>	-	-4,90	-4,78	-
$d$	$b_7$	6,91	-6,19	-5,76	-	-	-3,329	-	-
		Testgrößen							
$I$	$T_0$	0,51	-	-	-	-	-	-	-
$E_{v2}$	$T_1$	10,17	10,99	11,76	<b>11,80</b>	27,82	13,75	15,06	16,06
$D_s$	$T_2$	0,74	0,54				2,12	1,94	4,08
$TI$	$T_3$	1,13	3,08	3,21	<b>2,76</b>	4,03			
$T2$	$T_4$	0,74	1,98	2,95	<b>2,75</b>	3,12			
$U$	$T_5$	3,14	3,13	3,15	<b>2,64</b>	-	3,45	3,59	3,57
$C$	$T_6$	1,07	1,4	2,26	<b>1,98</b>	-	0,97	0,95	-
$d$	$T_7$	0,83	1,77	1,69	-	-	0,99	-	-
$s_{x,y}$		91,74	91,5	91,36	<b>91,84</b>	93,39	93,74	93,73	93,71
$r^2$		0,4132	0,4123	0,4114	<b>0,4020</b>	0,3748	0,3794	0,3754	0,3723
Prüfgröße		$t_{(n-p,\alpha)} \approx 1,97$ für $T_p > t_{(n-p,\alpha)}$ ist $b_p$ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$ von 5% von Null verschieden							

Tabelle 6-2: Regressionsergebnisse und Testgrößen  $T_p$  der Regressionsparameter  $b_p$ 

Wird die Konstante  $b_0$  und die Schichtdicke  $D_s$  aus dem Regressionsansatz entfernt, erhält man zusätzlich zur Variablen  $TI$  die Variable  $T2$  Signifikanz (vergleiche Auswertungsnummer AN: 2 und 3). Hierbei besteht aber kaum eine Relevanz ob  $TI$  oder  $T2$  zu eingesetzt wird, da sich die entsprechenden Regressionsparameter kaum voneinander unterscheiden (siehe AN: 3 und 4).

Bei Wahl des Regressionsansatzes entsprechend AN: 4 sind für jeden Term ausreichend große  $T_p$ -Werte erhalten worden. Die Größen, welche den Messwertzusammenhang zwischen dem  $\Omega$ -Wert und  $E_{v2}$  am deutlichsten beeinflussen, ist die Krümmungszahl  $C$ , die Ungleichförmigkeitszahl  $U$  und die Dummy-Variablen  $TI$  und  $T2$ . Werden aber die Variable  $TI$  und  $T2$  vernachlässigt und die Schichtdicke  $D_s$  im Regressionsansatz belassen, erhält man zusätzlich zu  $E_{v2}$  und  $D_s$  nur  $U$  einen ausreichend großen  $T_p$ -Wert (AN: 7 bzw. 8).

Nicht desto trotz wird deutlich, dass die Standardfehler  $s_{x,y}$  und die Bestimmtheitsmaße  $r^2$  der verschiedenen Regressionsansätze sich nur unwesentlich voneinander unterscheiden ( $s_{x,y} = 91,39$  bis  $93,74$  und  $r^2 = 0,3723$  bis  $0,4132$ ) und die Erklärungsbeiträge der einzelnen Variablen zusätzlich zum  $E_{v2}$ -Wert eher gering sind.

Die Schichtdicke  $D_s$  beeinflusst, sowie im Grunde auch alle anderen Variablen, den  $\Omega$ -Wert als auch den Verformungsmodul  $E_{v2}$ . Somit liegen im Regressionsansatz Kolinearitäten vor, die es eigentlich zu vermeiden gilt. Abbildung 6-6 zeigt die  $E_{v2}$ -Werte in Abhängigkeit von der Schichtdicke  $D_s$ .

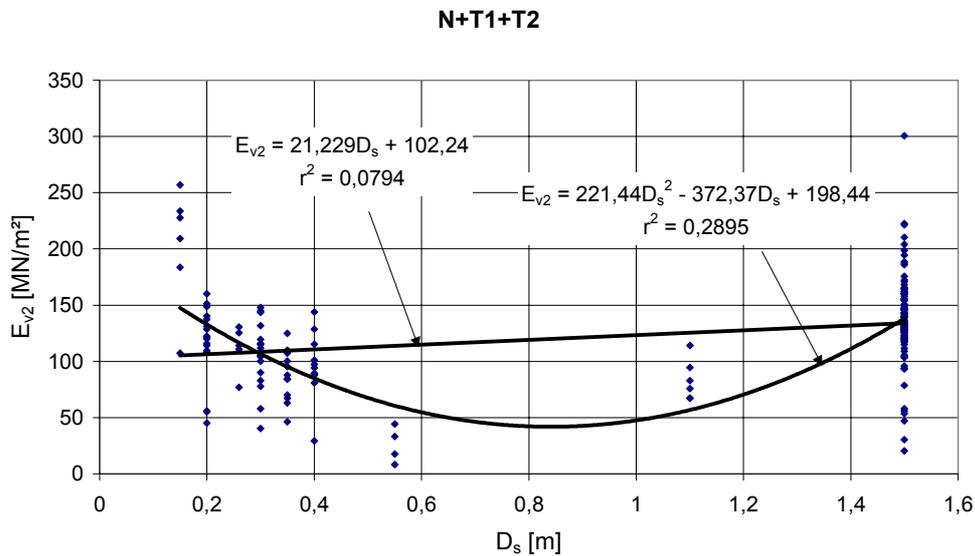
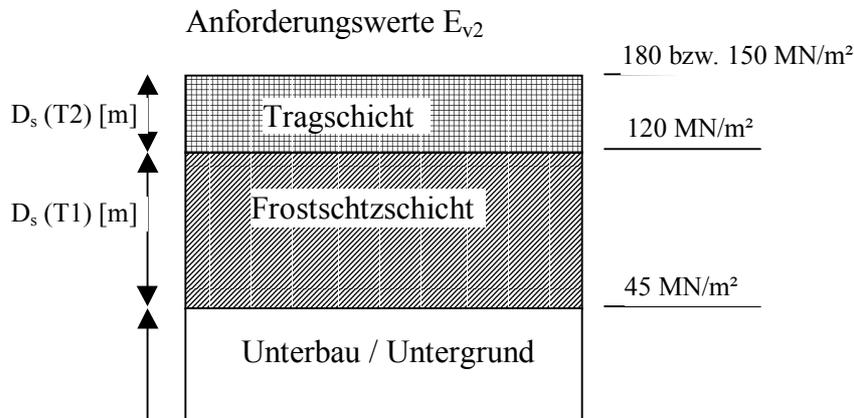


Abbildung 6-6: Einfluss der Schichtdicke  $D_s$  auf dem  $E_{v2}$ -Wert

Der Zusammenhang zwischen  $E_{v2}$  und  $D_s$  ergibt, dass für Schichtdicken von ca. einem halben Meter die  $E_{v2}$ -Werte ein Minimum annehmen. Die Zunahme der  $E_{v2}$ -Werte bei Schichtdicken kleiner einem halben Meter kann dadurch erklärt werden, dass die zugehörigen  $E_{v2}$ -Werte vorwiegend aus Versuchen auf Tragschichten stammen. Diese wurden mit  $T2$  klassifiziert. Die zur Klasse  $T2$  gehörigen Schichtdicken  $D_s$  beschreiben aber nur die entsprechenden Tragschichtdicken. Hierbei wird vernachlässigt, dass bei der Klasse  $T2$  das Gesamtsystems Tragschicht - Frostschutzschicht - Unterbau sehr viel steifer ausfällt, als bei den Messwerten der Klasse  $T1$ . Da der Steifigkeitsunterschied zwischen Trag- und Frostschutzschicht geringer ist als zwischen Frostschutzschicht und Unterbau, werden die  $E_{v2}$ -Werte der Klasse  $T2$  durch den Schichtwechsel wesentlich weniger beeinflusst, als die  $E_{v2}$ -Werte der Klasse  $T1$  beim Übergang von der Frostschutzschicht zum Unterbau. Für die  $E_{v2}$ -Werte der Tragschicht liegt der maßgebende Schichtwechsel im Bezug auf eine Messwertbeeinflussung zwischen Unterbau und Frostschutzschicht. Um dies zu berücksichtigen müssten zu den Schichtdicken der Klasse  $T2$  noch die der jeweiligen Frostschutzschicht hinzugezählt werden. Da diese Informationen aber nicht vorliegen und für eine Berücksichtigung in der Auswertung geschätzt werden müssten, werden die Daten der

Klasse  $T2$  für weitere Betrachtungen aus dem Gesamtdatensatz entfernt. Folgende Schemazeichnung soll den Zusammenhang verdeutlichen.



Die  $\Omega$ -Werte hingegen zeigen eine ähnliche aber weniger starke Abhängigkeit zur Schichtdicke  $D_s$  auf (siehe Abbildung 6-7)

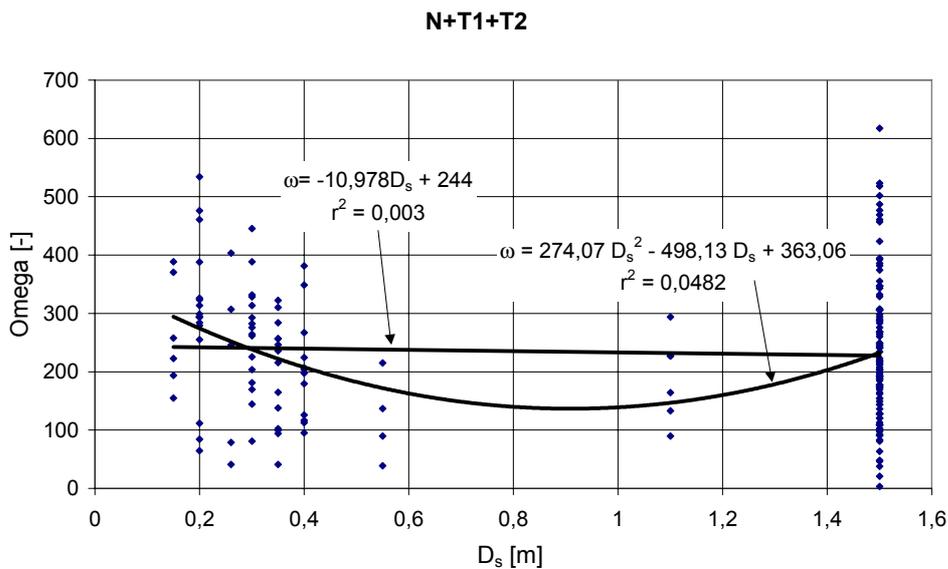


Abbildung 6-7: Einfluss der Schichtdicke  $D_s$  auf dem  $\Omega$ -Wert

Nachdem aus dem Gesamtdatensatz die Werte der Kategorie  $T2$  – also alle Kalibrierdaten von Tragschichten – entfernt worden sind, wurde folgende Regressionsfunktion an die Daten angepasst:

$$\omega = b_0 + b_1 \cdot E_{v2} + b_2 \cdot D_s + b_3 \cdot T1 + b_5 \cdot U + b_6 \cdot C + b_7 \cdot d + \varepsilon$$

In Tabelle 6-3 sind die Ergebnisse der Regressionsparameter  $b_p$  und der Testgrößen  $T_p$  dargestellt (AN: 1). Weiterhin sind wiederum schrittweise die Terme im Regressionsansatz vernachlässigt worden, für welche die Testgröße  $T_p$  keine Signifikanz angezeigt hat. Diese

Vorgehensweise ist unter Berücksichtigung einerseits der Variablen  $TI$  und andererseits der Schichtdicke  $D_s$  durchgeführt worden.

Verbleibt die Variable  $TI$  im Regressionsansatz zeigt zusätzlich zu  $E_{v2}$  die Variable  $U$  und die Konstante  $b_0$  ausreichend große  $T_p$ - Werte auf (AN: 3). Wird zum  $E_{v2}$ - Wert die Variable  $D_s$  im Regressionsansatz berücksichtigt, zeigt die Konstante  $b_0$  keine Signifikanz, wohingegen die Variable  $U$  einen ausreichend großen  $T_p$ - Wert besitzt.

Variable	Regressor	Auswertungsnummer (AN)				
		1	2	3	4	5
$I$	$b_0$	-124,17	-157,80	<b>-145,04</b>	-12,43	-
$E_{v2}$	$b_1$	2,45	2,45	<b>2,45</b>	2,325	<b>2,29</b>
$D_s$	$b_2$	-32,33			-94,47	<b>-80,89</b>
$TI$	$b_3$	76,87	96,36	<b>100,88</b>		
$U$	$b_5$	0,76	0,69	<b>0,8736</b>	0,8308	<b>0,83</b>
$C$	$b_6$	3,59	1,00	-	4,39	-
$d$	$b_7$	3,16	4,65	-	0,80	-
		Testgrößen				
$I$	$T_0$	2,42	4,31	<b>4,97</b>	0,45	-
$E_{v2}$	$T_1$	19,92	12,95	<b>12,96</b>	12,45	<b>15,944</b>
$D_s$	$T_2$	0,93	-	-	3,74	<b>5,76</b>
$TI$	$T_3$	2,58	4,51	<b>6,09</b>	-	-
$U$	$T_5$	2,63	2,477	<b>3,61</b>	2,84	<b>3,62</b>
$C$	$T_6$	0,74	0,25	-	0,8937	-
$d$	$T_7$	0,85	1,39	-	0,22	-
$s_{x,y}$		78,77	78,74	78,73	80,27	79,73
$r^2$		0,5642	0,5616	0,5557	0,5444	0,5413
Prüfgröße t		$t_{(n-p,\alpha)} \approx 1,97$ für $T_p > t_{(n-p,\alpha)}$ ist $b_p$ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha$ von 5% von Null verschieden				

Tabelle 6-3: Regressionsergebnisse und Testgrößen der Regressionsparameter  $b_i$  nach Ausschluss der Daten der Kategorie T2

Für den um die Werte der Klasse T2 bereinigten Datensatz ist zwischen  $\Omega$  ( $\omega$ ) und  $E_{v2}$  eine lineare Regressionsfunktion berechnet worden. Diese ist in Abbildung 6-8 mit den entsprechenden Daten dargestellt. In Abbildung 6-9 sind die hierzu berechneten Residuen von  $\Omega$  in Abhängigkeit von  $E_{v2}$  angegeben. Wie aus Abbildung 6-8 deutlich wird, können die  $\Omega$ - Werte in Abhängigkeit vom  $E_{v2}$ - Wert gut durch einen linearen Regressionsansatz beschrieben werden, da in den Daten keine vernachlässigten Nichtlinearitäten erkennbar sind. Zudem zeigen auch die entsprechenden Residuen keine zusätzlichen Tendenzen in Abhängigkeit von  $E_{v2}$  auf. Die Residuen sind unabhängig von  $E_{v2}$  und weisen einen Mittelwert von Null auf. Dies wird aus der geringen Steigung  $b = 0,0001$  und des sehr kleinen Bestimmtheitsmaßes von  $r^2 = 4 \cdot 10^{-9}$  der Regressionsfunktion in Abbildung 6-9 deutlich.

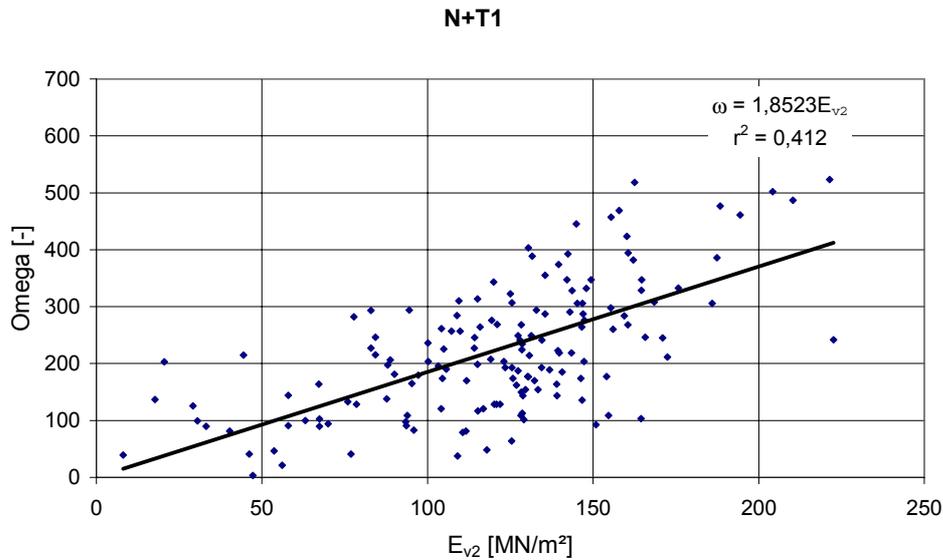


Abbildung 6-8: Messwertzusammenhang zwischen Omega und  $E_{v2}$  für die Daten der Klasse N und T1

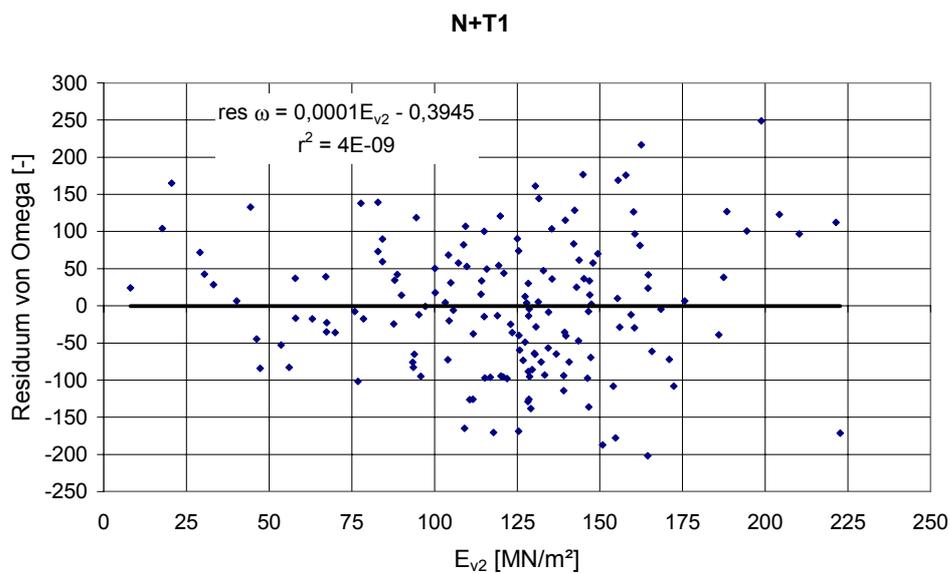


Abbildung 6-9: Residuen von Omega in Abhängigkeit von  $E_{v2}$

Abbildung 6-10 zeigt ein Streudiagramm, bei dem die Schätzwerte von *Omega* aus Abbildung 6-8 gegen ihre Residuen aufgetragen sind. Auch hier werden keine Auffälligkeiten gegenüber einer vernachlässigten Nichtlinearität sichtbar.

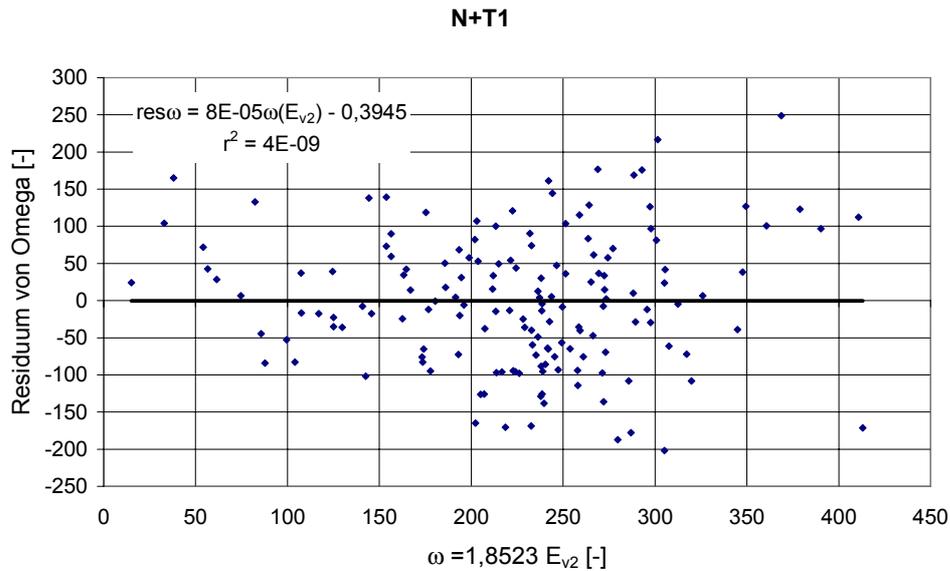


Abbildung 6-10: Residuen von Omega in Abhängigkeit der Schätzwerte von Omega:  $\Omega = f(E_{v2})$

Durch das multiple Regressionsmodell haben sich zur Abhängigkeit der *Omega*-Werte vom  $E_{v2}$ -Wert noch die Parameter  $D_s$  und  $U$  herauskristallisiert, mit Hilfe derer die Varianz von *Omega* erklärt werden kann. In den folgenden Abbildungen werden diese Parameter den Residuen von  $\Omega(E_{v2})$  gegenübergestellt.

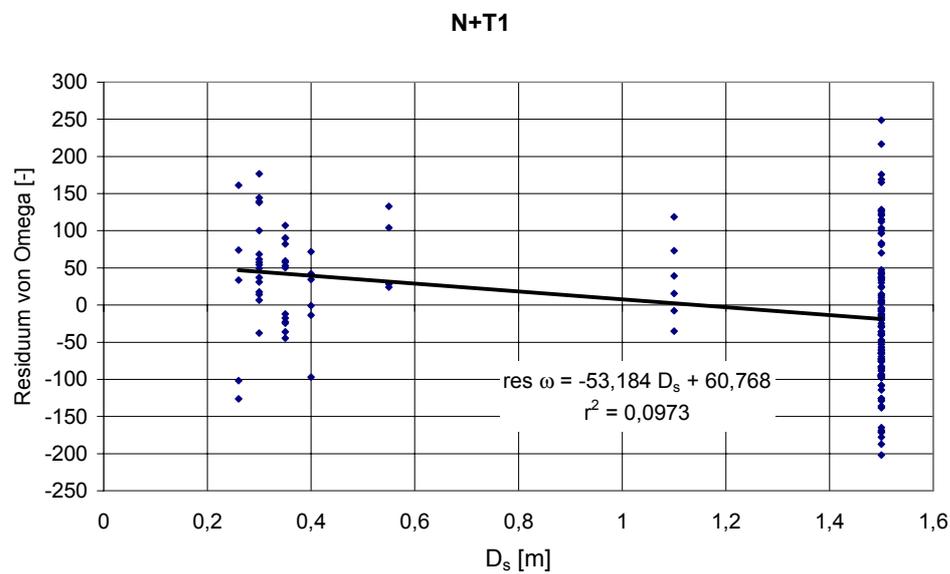


Abbildung 6-11: Residuen von Omega in Abhängigkeit der Schichtdicke  $D_s$

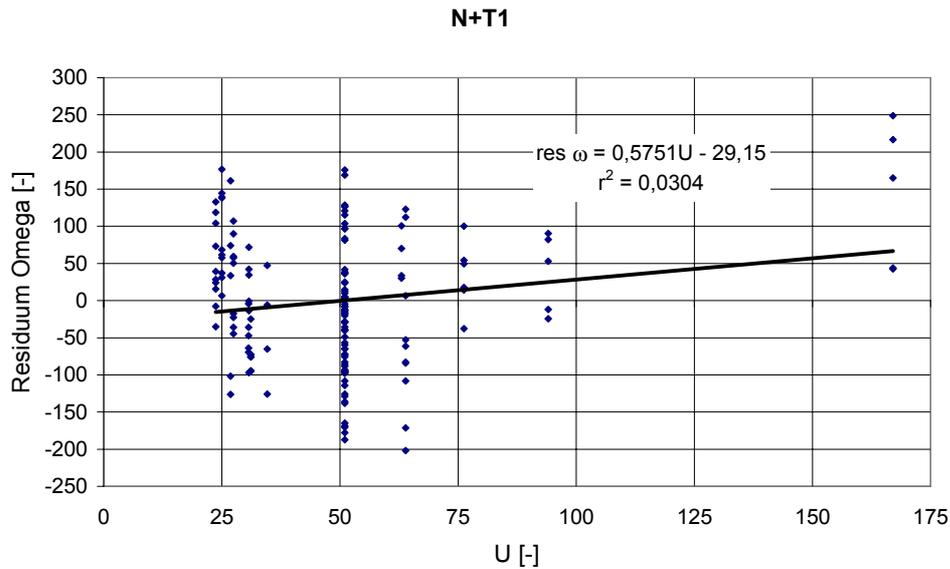


Abbildung 6-12: Residuen von Omega in Abhängigkeit von der Ungleichförmigkeitszahl  $U$

Wie sich schon durch die  $T_p$ -Werten des multiplen Regressionsmodell herausstellte, zeigen die Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12, dass die  $\Omega$ -Wertes von den Parametern  $D_s$  und  $U$  nur wenig abhängig sind.

### 6.6.7 Ergebnisse des Netzwerktraining

Aufgrund der Ergebnisse der multiplen linearen Regression kann festgestellt werden, dass ein Hauptteil der Varianz der  $\Omega$ -Werte durch den Verformungsmodul  $E_{v2}$  erklärt wird. Weniger bedeutsam waren zusätzliche Variablen wie die Schichtdicke  $D_s$  und die Ungleichförmigkeitszahl  $U$  des Bodens. Da einerseits der Messwertzusammenhang  $\Omega - E_{v2}$  im wesentlichen durch einen linearen Ansatz beschrieben werden kann und andererseits zusätzliche Variablen kaum einen Einfluss auf die Zusammenhänge in den vorliegenden Daten nehmen, erscheint der Aufwand zur Modellierung für ein neuronales Netz als nicht gerechtfertigt.

Da die kategorialen "Dummy- Variablen"  $T1$  und  $T2$  eine relativ großen Einfluss auf die Regressionsergebnisse genommen haben, wird im folgenden die Auswertung der Kalibrierdaten über die Klassifizierung nach  $N$ ,  $T1$ ,  $T2$  und der Bodenart ( $A$ ,  $B$ ) vorgenommen.

## **7 Betrachtung der Zusammenhänge zwischen den FDVK Messwerten und bodenmechanischen Vergleichswerten**

In der vorliegenden Arbeit werden Zusammenhänge zwischen den Messwerten der FDVK (*Omega*) und Vergleichswerten ( $E_{v2}$ ,  $D_{Pr}$ ) herausgearbeitet, wobei die hierzu durchgeführten Auswertungen auf grob- und gemischtkörnige Böden beschränkt bleiben. Zu diesem Zweck wurden eine Reihe von Versuchen durchgeführt und bundesweit Kalibrierdaten der verschiedensten Anwendungs- und Einbaubereiche gesammelt. Um die vorliegenden FDVK- Daten handhaben und auswerten zu können, ist die im Kapitel 4 beschriebene Datenbank erstellt worden. Wie aufgrund der Ergebnisse des Kapitels 6.7.6 und 6.7.7 beschrieben, werden die Daten über eine Klassifizierung nach den Versuchsrandbedingungen (wie Bodenart, Schichtdicke, Prüfwalze, Prüfgerät für die Vergleichsuntersuchungen, Versuchsdurchführung usw.) ausgewertet.

Es werden Kalibrierdaten zusammengefasst, bei denen gleiche oder zumindest ähnliche Versuchsrandbedingungen bestehen. Generell gehen nur solche Kalibrierdaten in die Auswertung ein, bei denen möglichst homogene Verhältnisse vorliegen und deren Messverfahren auf einer einheitlichen Prüfvorschrift beruhen.

## 7.1 Klassifikation der Daten aufgrund ihrer Randbedingungen und Vorgehensweise der Auswertung

Die Auswahlkriterien für eine Zuordnung der verschiedenen Kalibrierdaten zu einer Auswerteklasse wird recht allgemein gehalten. Unter differenzierteren Kriterien, wäre die Auswertungen nicht in diesem Umfang möglich gewesen. Die Kalibrierdaten der FDVK werden hinsichtlich der Beziehung zwischen Messwert der FDVK ( $\Omega$ ) und statischen Verformungsmodul ( $E_{v2}$ ) sowie Verdichtungsgrad ( $D_{Pr}$ ) untersucht.

Sämtliche in der Datenbank befindlichen  $\Omega$  - Werte sind mit den Korrekturfaktoren  $\alpha$  aus dem Simulationsmodell auf das Messwertniveau einer Bezugswalze getrennt nach "kleiner" und "großer" Amplitude umgerechnet worden. Da die  $\Omega$ - Werte zudem von der Fahrgeschwindigkeit der Prüfwalze abhängig sind, wurden diese an eine Bezugsgeschwindigkeit von  $4 \text{ km/h}$  angepasst. (siehe hierzu Kapitel 5.3). Hierdurch konnten die Kalibrierdaten im Bezug auf die Maschinenparameter und die Fahrgeschwindigkeit weitestgehend homogenisiert und sämtliche zur Verfügung stehende Daten in der Auswertung berücksichtigt werden. Die aus den Ergebnissen der Auswertungen ableitbaren Anforderungswerte können mit Hilfe der Korrekturwerte bzw. der Korrekturformeln wiederum an eine spezielle Walze umgerechnet werden.

Bei der Auswertung wird grundsätzlich zwischen grobkörnigen und gemischtkörnigen Böden ( $A$  und  $B$ ) bis zu einen Feinkornanteil (Korndurchmesser  $d < 0,06 \text{ mm}$ ) von  $15\%$  nach Kapitel 3.3.2 sowie zwischen der Randbedingung: "mit Untergrundeinfluss" ( $T$ ) und "ohne Untergrundeinfluss" ( $N$ ) nach Kapitel 3.3.3 unterschieden. Ausgangsgröße für diese Unterscheidung ist die Annahme, dass die  $\Omega$ - Werte von den mechanischen Eigenschaften des Bodens bis zu einer Tiefe von  $1,5 \text{ m}$  unterhalb der Geländeoberfläche abhängen. Die Versuchsdaten, bei welchen ein Untergrundeinfluss ( $T$ ) auf die Messwertbildung erwartet wurde, werden hinsichtlich des jeweiligen Anwendungsfalles weiter aufgeteilt. Zur Klasse  $T$  werden hierzu die Unterklassen  $T1$  und  $T2$  gebildet (Siehe hierzu auch Tabelle 3-2, Kapitel 3.3.3). Bei Betrachtung von Mehrschichtsystemen nach  $T$ ,  $T1$  und  $T2$  wird die Schicht unterhalb des mit der FDVK zu prüfenden Bodens allgemein mit Untergrund bezeichnet.

Die zur Klasse  $T1$  zugeordneten Kalibrierdaten stammen aus Versuchen, welche auf (Trag-) Schichten mit Schichtgrenzen zum Unterbau bzw. Untergrund durchgeführt wurden. Die Klasse  $T1$  beinhaltet beispielsweise Kalibrierdaten von Frostschutzschichten ( $FSS$ ) oder von Dammschüttungen ( $DA$ ) mit Schichtwechselln innerhalb von  $1,5 \text{ m}$  zum Untergrund. Tendenziell kann bei den ausgewählten Daten davon ausgegangen werden, dass ein hohes

Steifigkeitsverhältnis zwischen zu prüfender Schicht und Untergrund vorlag. Soll der Anforderungswert an den  $E_{v,2}$ - Wert auf der *FSS* bspw.  $120 \text{ MN/m}^2$  betragen, wohingegen auf den Planum nur  $45 \text{ MN/m}^2$  gefordert wird, ergibt das Verhältnis  $120/45 \approx 2,7$ . Aufgrund der überwiegend geringen Schichtenmächtigkeit wird sowohl der *Omega*- Wert als auch der Verformungsmodul  $E_v$  durch die Böden des Planums bzw. des Unterbaues beeinflusst.

In der Klasse *T2* werden die Kalibrierdaten von Versuchen auf Tragschichten z.B. Schotter- oder Kiestragschichten (*STS*, *KTS*) berücksichtigt. Die Steifigkeitsverhältnisse zwischen Trag- und Frostschutzschicht ( $180/120 \approx 1,5$  bzw.  $150/120 \approx 1,25$ ) sind zur Klasse *T1* ( $\approx 2,66$ ) vergleichsweise gering. Daher wird der gesamte Aufbau *TS* und *FSS* als eine Einheit betrachtet. Näherungsweise wird nun angenommen, dass bei den Versuchen auf Tragschichten (*T2*) der maßgebende Schichtwechsel beim Übergang von der *FSS* zum Unterbau liegt. Wegen der Gesamtmächtigkeit des Aufbaues (*TS* und *FSS*) von ungefähr  $0,5$  bis  $1,0 \text{ m}$  wird eine Beeinflussung des Verformungsmodul  $E_v$  durch den Untergrund weitestgehend ausgeschlossen, wohingegen der *Omega*- Wert durchaus vom Schichtwechsel betroffen ist.

Die klassifizierten Versuchsdaten werden über Korrelations- und einer Regressionsanalysen ausgewertet. Entsprechend der durchgeführten Korrelationsanalysen werden in den Diagrammen die ermittelten Korrelationskoeffizienten  $r$  und die Differenzwerte  $t$  aus dem Test auf Vorliegen einer Korrelation von R.A Fisher (in [51]) dargestellt. (Siehe auch Kapitel 6.3.2). Der Differenzwert  $t$  ermittelt sich aus der Differenz zwischen der kritischen Grenze (Testgröße  $\hat{t}$ ) zur Prüfgröße ( $t_{n-2,\alpha}$ ). Wird bei der Differenzbildung ein positives Vorzeichen erhalten, zeigt der Korrelationskoeffizient  $r$  einen linear funktionalen Zusammenhang auf. Ist dieses Vorzeichen negativ, wird unter der Voraussetzung eines 95% Vertrauensbereiches keine ausreichende Korrelation erhalten. Da die Signifikanz einer Korrelation auch von der Messwertanzahl  $n$  abhängt, können über diese Vorgehensweise die errechneten Korrelationskoeffizienten der verschiedenen Auswertungsklassen besser miteinander verglichen werden.

Zusätzlich wird untersucht, ob durch logarithmierte Daten bessere korrelative Zusammenhänge hergestellt werden können, als mit nicht logarithmierten Daten. Ausgangspunkt dieses Ansatzes ist die Annahme, dass die Versuchsdaten, dynamischer Mess- und Vergleichswert, jeweils einer Normalverteilung folgen. Aus diesem Grund sollten die vorliegenden Daten keine Variationskoeffizienten  $C_v$  größer  $0,3$  aufweisen, um dem Ansatz einer Normalverteilung zu rechtfertigen. In einigen Fällen wiesen die Variationskoeffizienten  $C_v$  aber größere Werte auf. Somit wird durch Logarithmieren der Versuchsdaten versucht, diese in eine Normalverteilung zu transformieren. Anschließend wird mit diesen Daten eine

Korrelationsanalyse und eine Regressionsrechnung mit linearem Ansatz durchgeführt (siehe hierzu Kapitel 6.2.4). Bei der Präsentation der Ergebnisse wird in diesem Zusammenhang von "logarithmierten" und "nicht logarithmierten" Daten gesprochen. Im doppeltlogarithmischen Maßstab der Diagrammachsen stellt sich die Regressionsfunktion der logarithmierten Daten durch eine Gerade dar. Im nicht logarithmischen Maßstab folgt die Regressionsfunktion der Gleichung  $y = a \cdot x^b$ . Die Regressionsfunktionen der logarithmierten Daten werden in exponentieller Form dargestellt.

Bei den ermittelten Regressionsfunktionen der Form:  $y = a + b \cdot x$  bzw.  $y = a \cdot x^b$  wird der Verformungsmodul  $E_{v2}$  bzw. der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  als unabhängige Variable ( $X$ ) gewählt. Die Regressionsgerade erlaubt damit den Schluss auf die abhängige Zielgröße  $\Omega$  ( $Y$ ). Weiterhin sind zu den aufgestellten Regressionsfunktionen die 95% Vertrauensbereiche für den Mittelwert und die 95% Prognosebereiche für den Einzelwert dargestellt. Die Ergebnisse der Regressions- und Korrelationsanalysen sind im Anhang enthalten. Im ersten Schritt werden alle in der Datenbank gespeicherten Kalibrierdaten zusammengefasst. Die Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 soll den in der Datenbank vorliegenden Umfang an Kalibrierdaten verdeutlichen. Für die Messwertbeziehung  $\Omega - E_{v2}$  lagen zur Zeit der Auswertung ca. 500 und für die Beziehung  $\Omega - D_{Pr}$  ca. 300 Wertepaare vor.

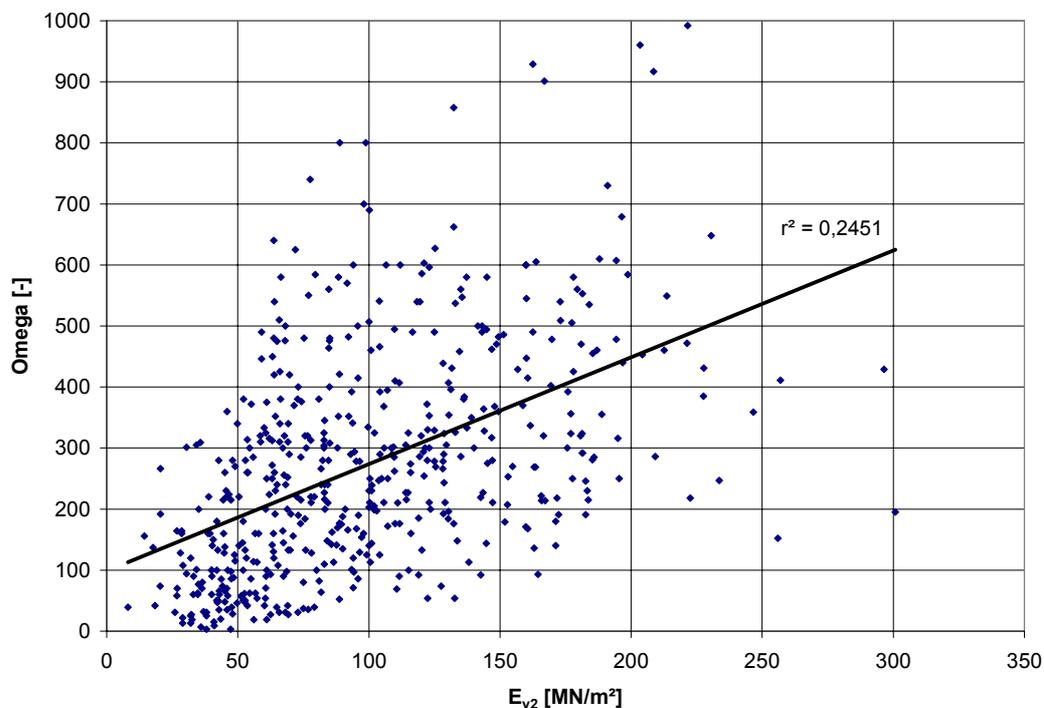


Abbildung 7-1:  $\Omega - E_{v2}$

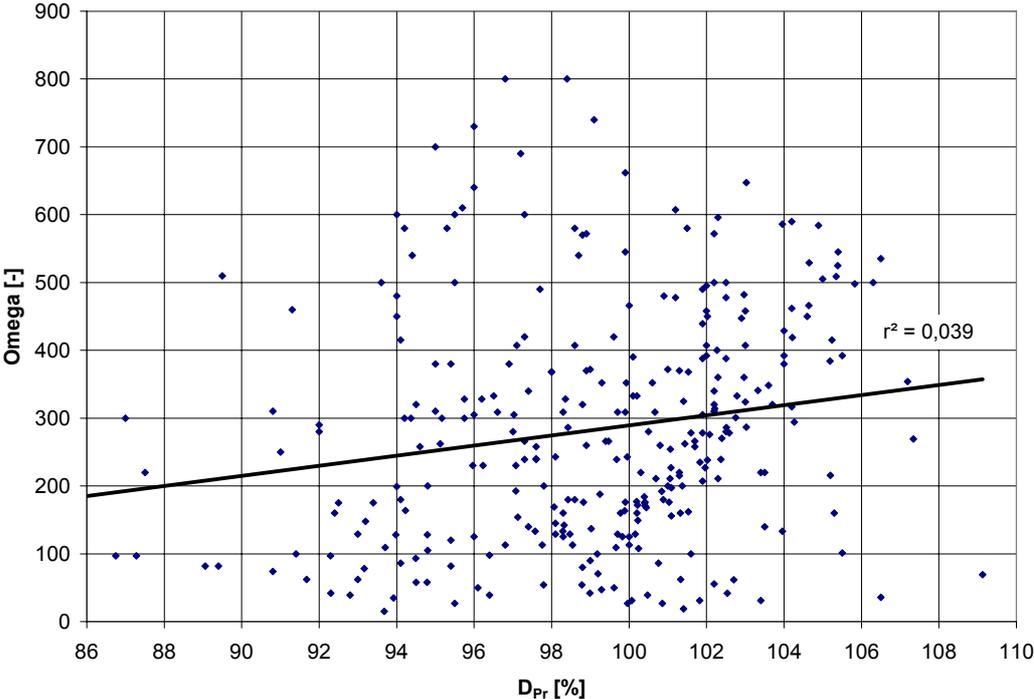


Abbildung 7-2:  $\Omega - D_{Pr}$

## 7.2 Grobkörnige Böden (A)

Den durchgeführten Auswertungen lagen folgende Randbedingungen zugrunde.

1. **A, N, kl.A:** Grobkörnige Böden (*A*), ohne Untergrundeinfluss (*N*), kleine Amplitude (*kl.A*)
2. **A, N, gr.A:** Grobkörnige Böden (*A*), ohne Untergrundeinfluss (*N*), große Amplitude (*gr.A*)
3. **A, T, kl.A:** Grobkörnige Böden (*A*), mit Untergrundeinfluss (*T*), kleine Amplitude (*kl.A*)
4. **A, T1, kl.A:** Kalibrierergebnisse von Versuchen auf *FSS* und Dammschüttungen mit Schichtwechselln innerhalb einer Messtiefe von *1,5 m*  
kleine Amplitude (*kl.A*)
5. **A, T2, kl.A:** Kalibrierergebnisse von Versuchen auf *TS* (*STS* und *KTS*) mit Schichtwechselln innerhalb einer Messtiefe von *0,5 bis 1,5 m*  
kleine Amplitude (*kl.A*)
6. **A, T, gr.A:** Grobkörnige Böden (*A*), mit Untergrundeinfluss (*T*), große Amplitude (*gr.A*)
7. **A, T1, gr.A:** Kalibrierergebnisse von Versuchen auf *FSS* und Dammschüttungen mit Schichtwechselln innerhalb einer Messtiefe von *1,5 m*  
große Amplitude (*gr.A*)
8. **A, T2, gr.A:** Kalibrierergebnisse von Versuchen auf *TS* (*STS* und *KTS*) mit Schichtwechselln innerhalb einer Messtiefe von *0,5 bis 1,5 m*  
große Amplitude (*gr.A*)

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Korrelationsanalyse für die untersuchten Messwertbeziehungen  $\Omega - E_{v2}$  und  $\Omega - D_{Pr}$  angegeben.

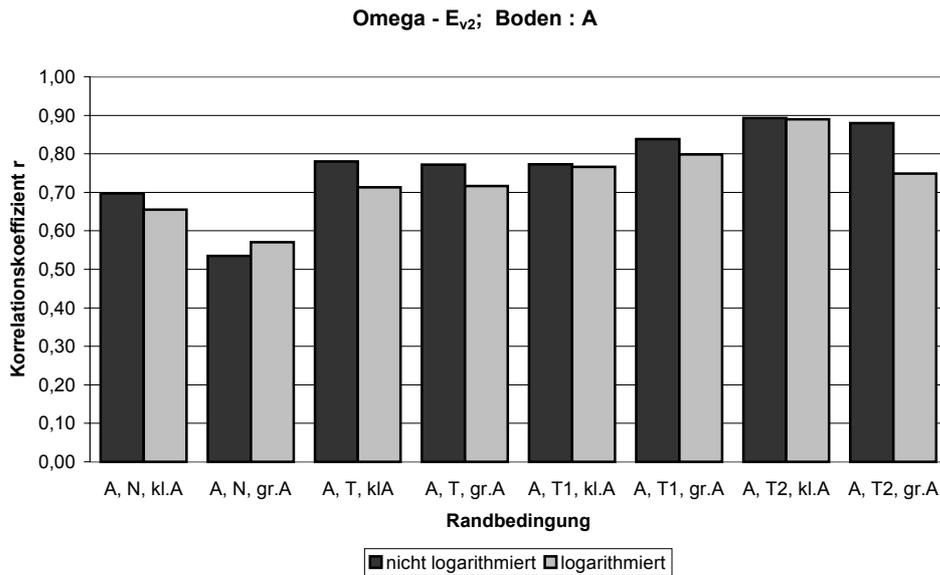


Abbildung 7-3: Korrelationskoeffizient  $r$  für die Auswertung nach grobkörnigen Böden der Messwertbeziehung: **Omega -  $E_{v2}$**

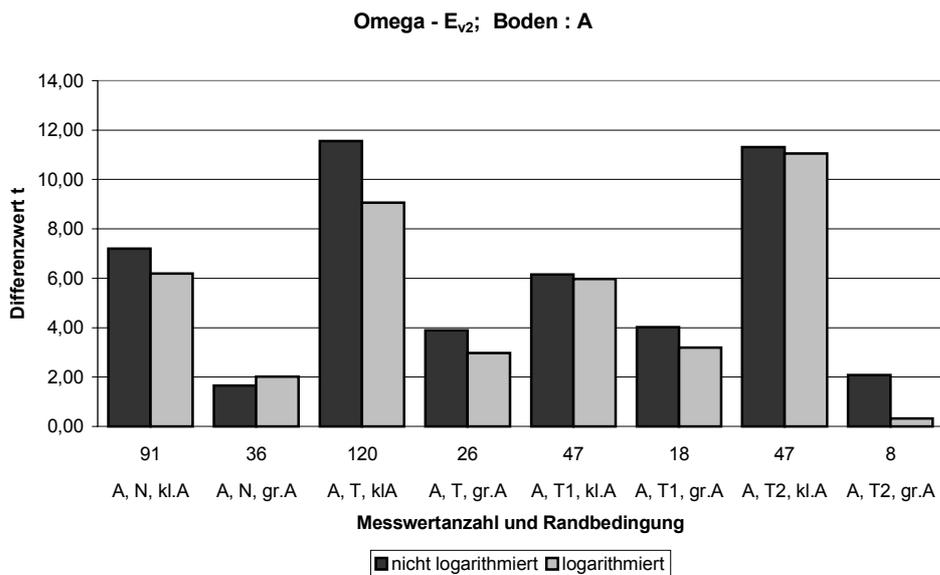


Abbildung 7-4: Test auf Vorliegen einer Korrelation: Differenzwerte  $t$  für die Messwertbeziehung: **Omega -  $E_{v2}$**

Für die Beziehung  $Omega - E_{v2}$  zeigen die erhaltenen Differenzwerte  $t$  (Abbildung 7-4) ausreichende Korrelationen auf. Die Korrelationskoeffizienten (Abbildung 7-3) liegen alle auf einem recht hohen Niveau (0,6 bis 0,85). Mit den Daten bei "kleiner Amplitude" wurden die signifikantesten Messwertzusammenhänge ermittelt. Mit Ausnahme des Falles: *A, N, gr.A* werden bei allen Auswertungen zum  $E_{v2}$ -Wert mit nicht logarithmierten Daten die größeren Korrelationskoeffizienten  $r$  erhalten.

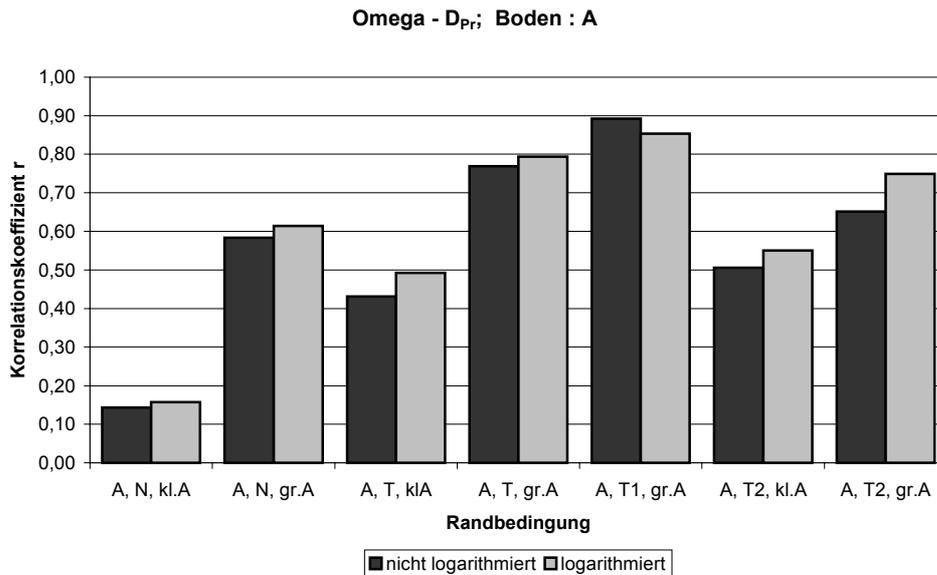


Abbildung 7-5: Korrelationskoeffizient  $r$  für die Auswertung nach grobkörnigen Böden der Messwertbeziehung: **Omega -  $D_{Pr}$**

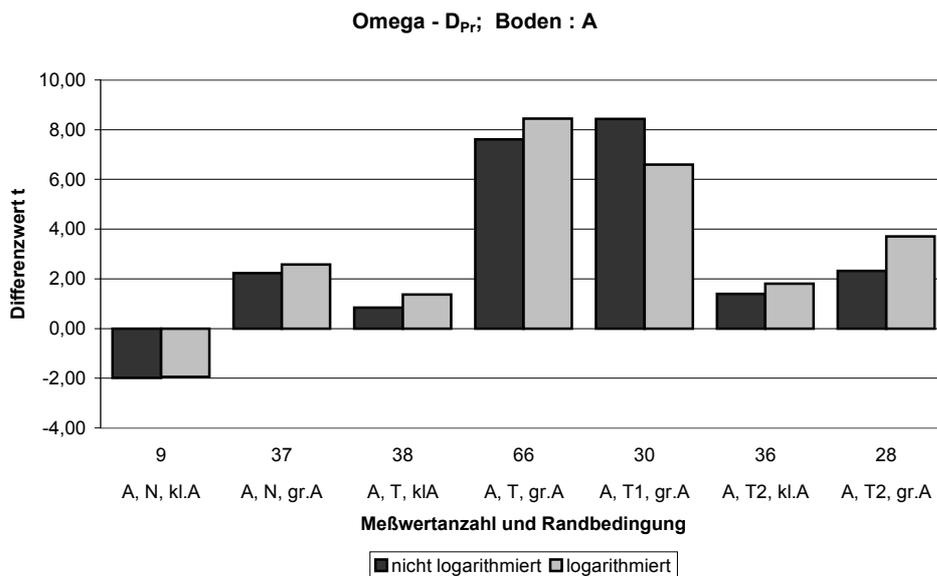


Abbildung 7-6: Test auf vorliegen einer Korrelation: Differenzwerte  $t$  für die Messwertbeziehung: **Omega -  $D_{Pr}$**

Auch bei den Auswertungen der Beziehung *Omega -  $D_{Pr}$*  konnten - außer beim Fall *A, N, kl.A* - ausreichende Korrelationen ermittelt werden. Diese sind aber im Vergleich zu den  $E_{v2}$ -Werten weniger stark ausgeprägt. Außerdem konnten mit den Messwerten bei "großer" Amplitude die größeren Differenzwerte  $t$  und somit bessere korrelative Messwertzusammenhänge ermittelt werden, als bei "kleiner" Amplitude. Dies ist bei der Auswertung für gemischtkörnige Böden (*B*) noch deutlicher erkennbar. Zudem wurden bei den  $D_{Pr}$ -Werten

fast ausschließlich mit den logarithmierten Messwerten höhere Korrelationskoeffizienten  $r$  erhalten. Ausgenommen ist hier der Fall:  $A, Tl, gr.A$ .

Die folgenden Abbildungen enthalten die ermittelten Regressionsgeraden, für die bei der Auswertung eine ausreichende Korrelation erhalten wurde.

• **Omega –  $E_{v2}$**

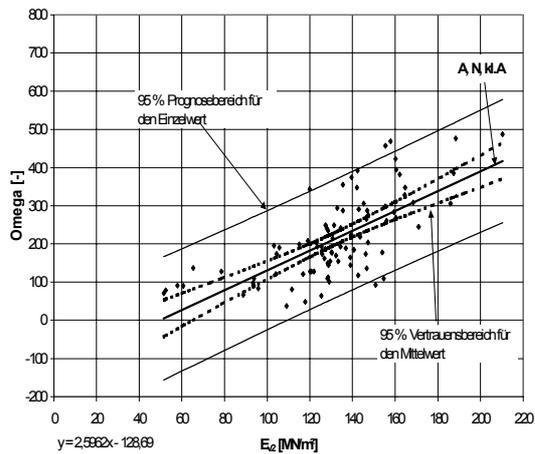


Abbildung 7-7:  $A, N, kl.A$

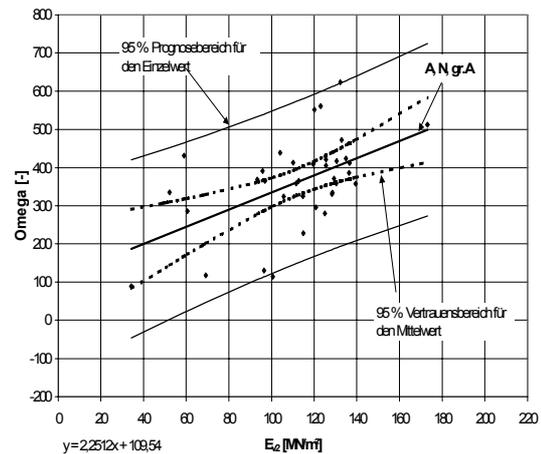


Abbildung 7-9:  $A, N, gr.A$

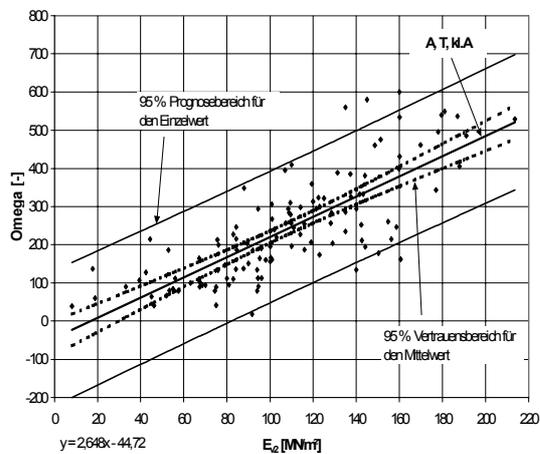


Abbildung 7-8:  $A, T, kl.A$

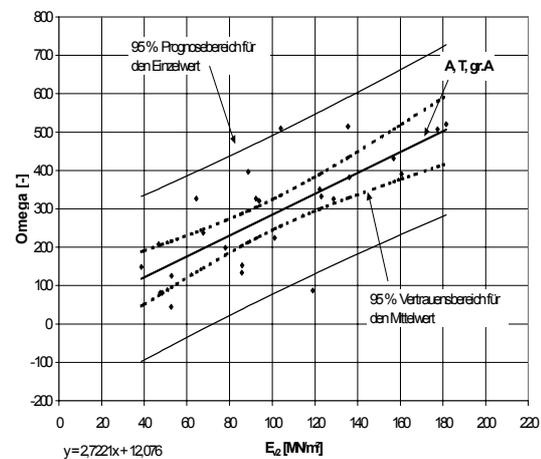


Abbildung 7-10:  $A, T, gr.A$

• **Omega -  $D_{Pr}$**

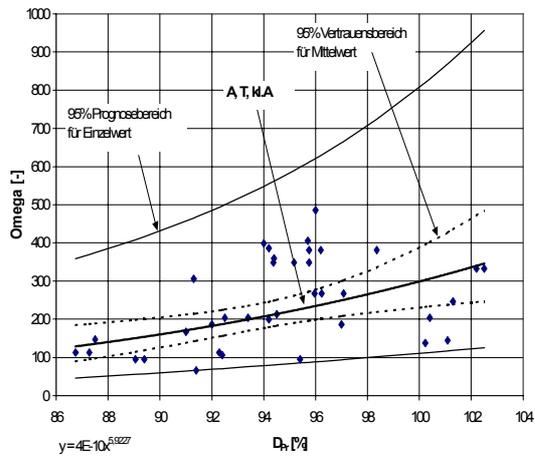


Abbildung 7-11: **A, T, kl.A**

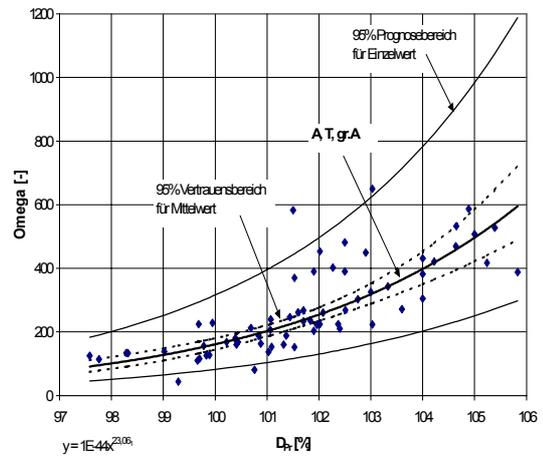


Abbildung 7-13: **A, T, gr.A**

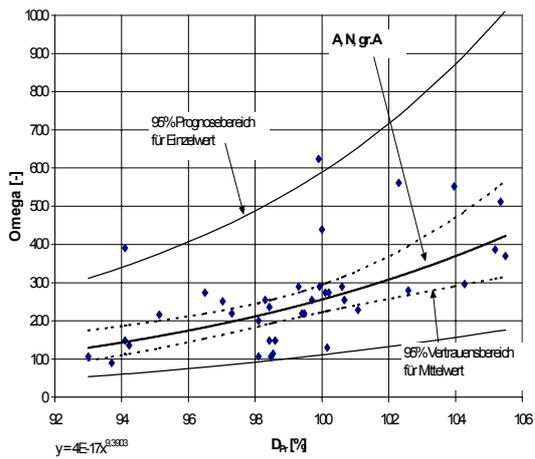


Abbildung 7-12: **A, N, gr.A**

## 7.2.1 Ergebnisse: Boden A, kleine Amplitude

- **Omega – Verformungsmodul  $E_{v2}$**

Abbildung 7-14 zeigt die Regressionsgeraden für die Auswertung der Daten mit den Randbedingungen: "mit" und "ohne Untergrundeinfluss" ( $N, T, T1$  und  $T2$ ), grobkörnige Böden ( $A$ ) und "kleine" Amplitude.

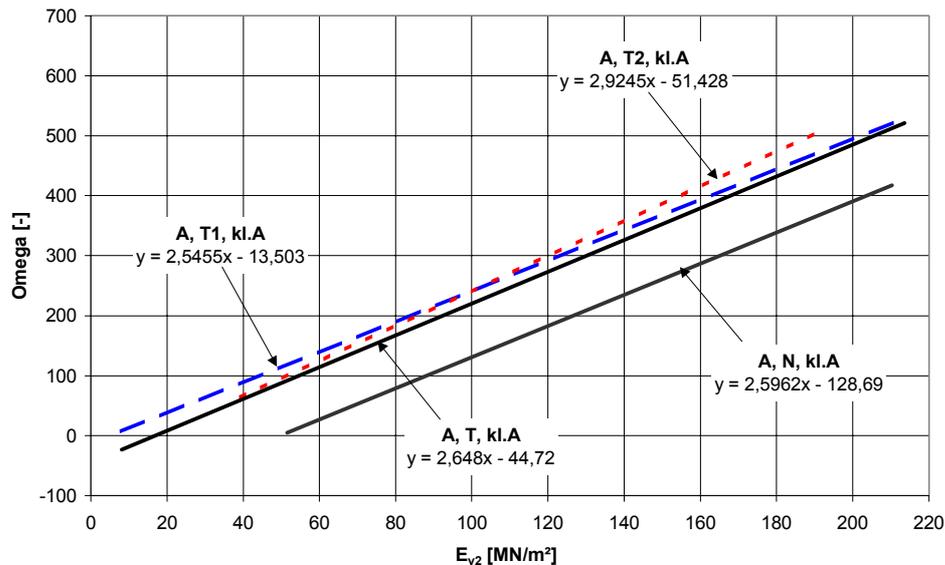


Abbildung 7-14: Regressionsgeraden für  $\Omega - E_{v2}$ :

$A, N, kl.A$      $A, T, kl.A$      $A, T1, kl.A$      $A, T2, kl.A$

Die ermittelten Geraden liegen annähernd parallel zueinander. Hieraus könnte abgeleitet werden, dass sich hierin eine allgemeine Tendenz der Beziehung zwischen  $\Omega$  und  $E_{v2}$  widerspiegelt. Außerdem besteht zwischen den Geraden für den Fall  $T1$  und dem Fall  $T2$  kaum ein Unterschied. Die zu prüfenden Trag- und Frostschuttschichten, der einzelnen Baumaßnahmen, weisen im Mittel Stärken von 30 bis 40 cm auf. Die eingebauten Bodenmaterialien bestanden durchwegs aus gebrochenen Material. Direkt unterhalb der Tragschichten ( $T2$ ) lag die Frostschuttschicht mit einer Mächtigkeit von rund 40 cm.

Im Fall der FDVK Prüffahrt auf den Frostschuttschichten ( $T1$ ) stand als direkter Untergrund ein verbesserter Geschiebelehm (Dicke: 30 cm), eine Grobsteinschüttung und ähnliches im allgemeinen gut tragfähiges Material an. Aufgrund der Schichtaufbauten der einzelnen Baumaßnahmen, lagen vergleichbare mechanische Eigenschaften der Schichtsysteme vor. Das erklärt auch die gute Übereinstimmung der Auswertungsergebnisse mit der Randbedingung "mit Untergrundeinfluss" für die Fälle  $T1$  und  $T2$ .

Aufgrund der weniger steifen Böden im Untergrund der zu prüfenden Bodenschicht wurde erwartet, dass die Funktionswerte der Regressionsgerade „mit Untergrundeinfluss“ ( $T$ ) ein geringeres Niveau aufweisen sollten, als die „ohne Untergrundeinfluss“ ( $N$ ). Diese Einschätzung wird durch die Ergebnisse nicht bestätigt.

Generell kann gesagt werden, dass Böden aus gebrochenem Material ein wesentlich steiferes Verhalten bei Belastung aufweisen, als Böden aus rundem Korn. Sämtliche zu prüfenden Bodenschichten „mit Untergrundeinfluss“ ( $T$ ) bestanden im Gegensatz zum Fall „ohne Untergrundeinfluss“ ( $N$ ) aus gebrochenen Material. Das sich hieraus ergebende höhere Niveau der  $\Omega$ -Werte könnte eine mögliche Erklärung für das Auswertungsergebnis sein.

Eine weitere Erklärungsmöglichkeit wäre, dass die Größe des Messwertes  $\Omega$  und  $E_{v2}$  durch den Untergrund gleichermaßen beeinflusst wird. Die Wertenniveaus der beiden Messgrößen nehmen hierdurch geringere Werte ein, als im Vergleich zum Fall „ohne Untergrundeinfluss“ ( $N$ ). Dies führt letztlich dazu, dass der  $\Omega$ -Wert eine Verschiebung der ursprünglichen Geraden ( $N$ ) nach unten und der  $E_{v2}$ -Wert eine Verschiebung nach links verursacht. Die jeweiligen Beeinflussungen sind derart, dass sich die in der Abbildung 7-14 gezeigte Anordnung der Geraden zueinander ergibt. Somit können sich aus vorgegebenen  $E_{v2}$ -Werten beim Fall  $T1$  (bzw.  $T2$ ) höhere Schätzwerte als beim Fall ( $N$ ) ergeben.

In Abbildung 7-15 sind diese Überlegungen graphisch dargestellt. Die Abnahme des  $\Omega$ -Wertes aufgrund der Untergrundbeeinflussung wird durch Pfeil eins dargestellt - die Gerade verschiebt sich nach unten. Pfeil zwei drückt die Abnahme des  $E_{v2}$ - Wertes aus. Die Gerade verschiebt sich nach links. Somit liegt der aus der resultierenden Regressionsgerade „mit Untergrundeinfluss“ ( $T1$ ) geschätzte  $\Omega$ -Wert über dem des Ausgangszustandes „ohne Untergrundeinfluss“ ( $N$ ).

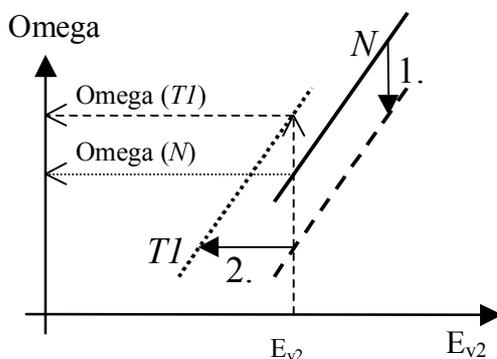


Abbildung 7-15: Überlegungen zu den Auswirkungen des Untergrundeinflusses auf die Messwertbildung

Um einen Eindruck zu erhalten, wie sich die einzelnen Kalibrierungen der verschiedenen Baustellen zu der abgeleiteten Regressionsgerade zuordnen lassen, sind diese in den nächsten Abbildungen dargestellt. Im allgemeinen passen diese sehr gut zueinander. Die Abweichungen zwischen den ableitbaren Anforderungswerten und den tatsächlich auf den Baustellen ermittelten Grenzwerten kann näherungsweise mit dem jeweiligen 95% Vertrauensbereich abgeschätzt werden. Die Spannweite des 95% Vertrauensbereiches entspricht einem *Omega*-Wert von  $\pm 25$ .

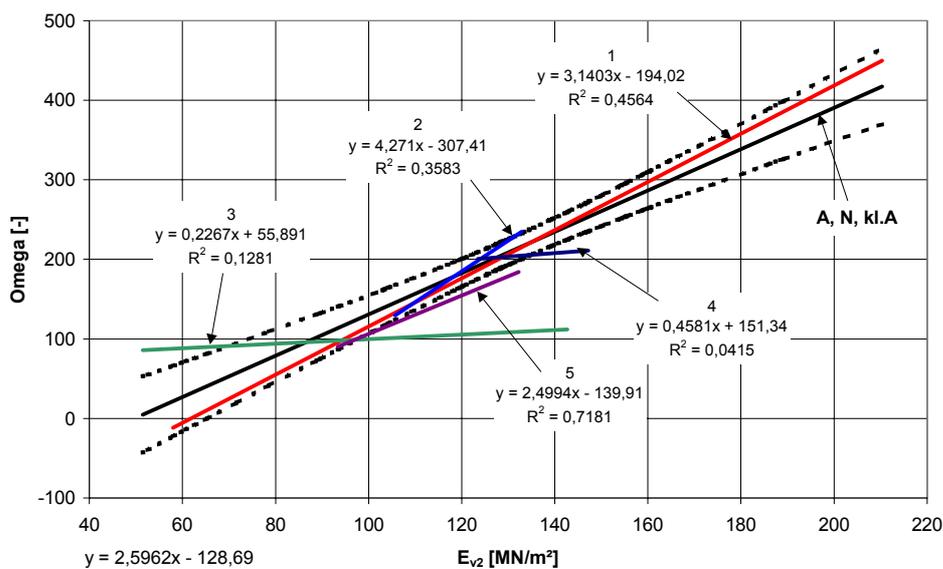


Abbildung 7-16:  $\Omega - E_{v2}$ : A, N, kl.A

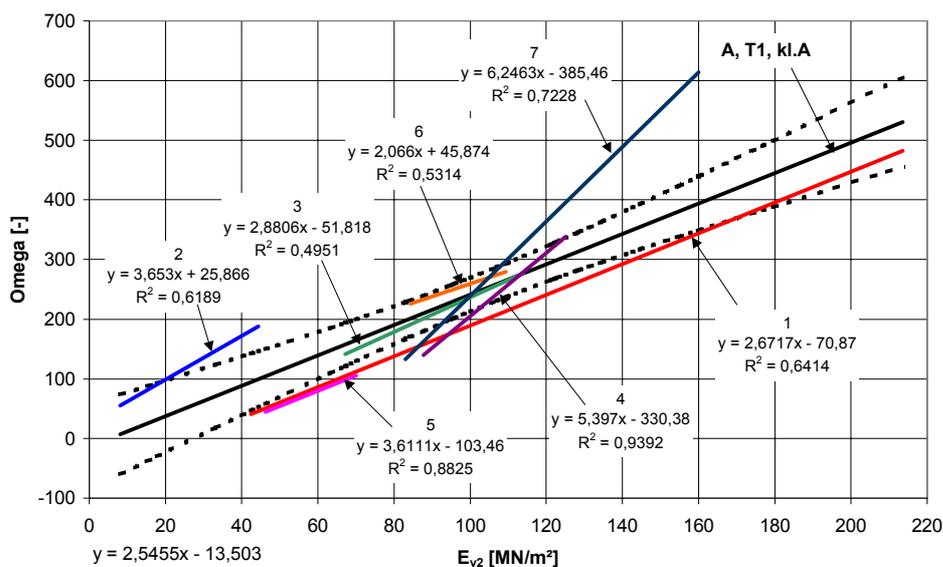


Abbildung 7-17:  $\Omega - E_{v2}$ : A, T1, kl.A

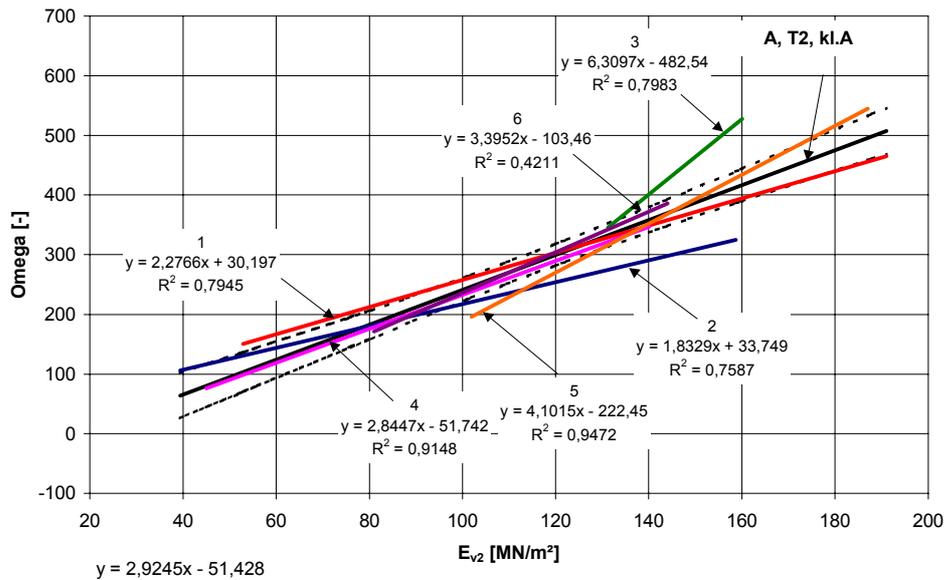


Abbildung 7-18:  $\Omega - E_{v2}$ : A, T2, kl.A

- **Omega – Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$**

Für die Randbedingungen *A, T, kl.A* und *A, T2, kl.A* wurde ausreichende Korrelationskoeffizienten ermittelt. Da Fall *T2* eine Teilmenge von *T* ist, und sich die Anzahl der Messwerte (*T*: 38 und *T2*: 36) nur geringfügig unterscheidet, kann aus *A, T2, kl.A* die maßgebende Regressionsgerade angegeben werden. Für *A, T1, kl.A* lagen nur zwei Messwerte vor, so dass hierzu keine Auswertung durchgeführt wurde. In Abbildung 7-19 ist für *A, T2, kl.A* die Regressionsfunktion mit einem 95% Vertrauensbereich für den Mittelwert dargestellt. Die Daten stammen von Kalibrierungen auf Trag- und Frostschutzschichten, mit einer Schichtdicke größer 0,5 m. Der eingebaute Boden bestand aus nicht gebrochenen Kies.

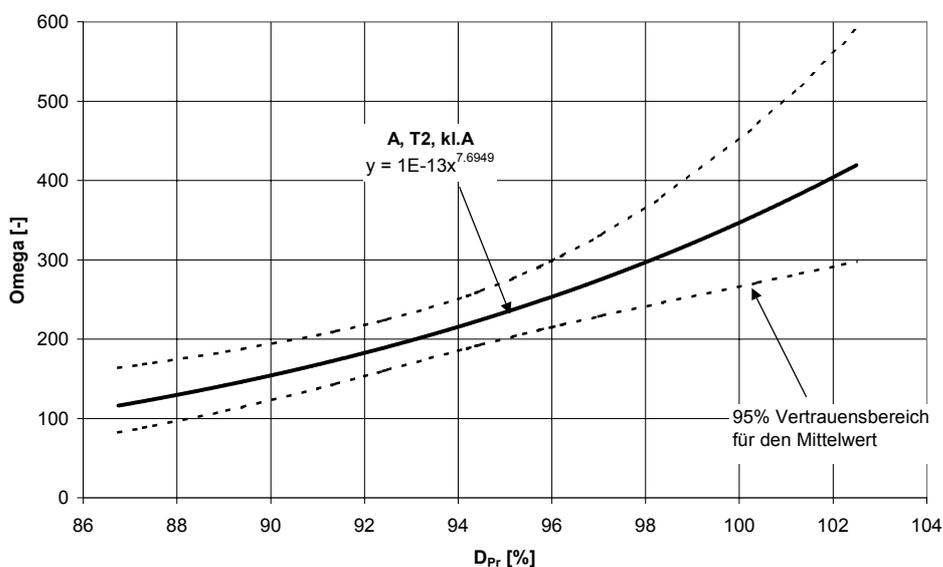


Abbildung 7-19:  $\Omega - D_{Pr}$ : A, T2, kl.A

## 7.2.2 Ergebnisse: Boden A, große Amplitude

- **Omega – Verformungsmodul  $E_{v2}$**

In Abbildung 7-20 sind die Regressionsgeraden der Auswertungen: "mit" und "ohne Untergrundeinfluss" ( $N$ ,  $T$ ,  $T1$  und  $T2$ ), grobkörnige Böden ( $A$ ) und "große" Amplitude dargestellt. Das geprüfte Bodenmaterial im Fall ( $N$ ) bestand aus kiesigem rundkörnigen Boden. Bei der Auswertung "mit Untergrundeinfluss" ( $T$ ,  $T1$ ,  $T2$ ) stand zu gleichen Teilen gebrochenes und rundkörniges Bodenmaterial an.

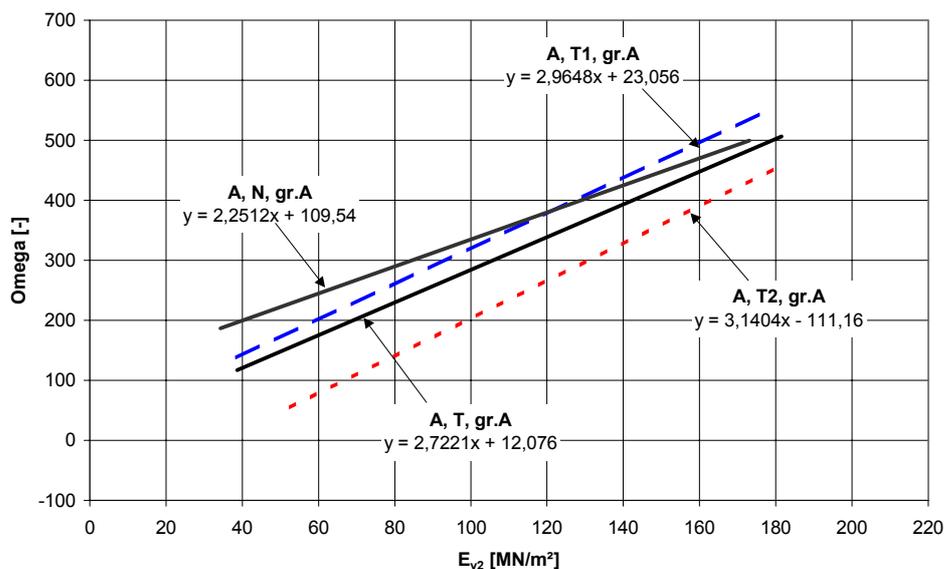


Abbildung 7-20: Regressionsgeraden für Omega –  $E_{v2}$ :

$A, N, gr.A$      $A, T, gr.A$      $A, T1, gr.A$      $A, T2, gr.A$

Wie in Abbildung 7-20 zu sehen ist, sind die Funktionswerte der Regressionsgeraden für den Fall  $T$ ,  $T1$  und  $T2$  niedriger als im Fall ( $N$ ). Aufgrund der relativ geringen Schichtdicken bei  $T1$  (ca. 0,2 bis 0,5 cm) beeinflusst der Untergrund das Messwertniveau sowohl vom  $Omega$ - als auch vom  $E_{v2}$ - Wert. Vergleicht man Abbildung 7-20 mit Abbildung 7-14 sieht man, dass sich die größere Messtiefe der "großen" Amplitude gegenüber der „kleinen“ Amplitude deutlich bemerkbar macht. Die Böden des Untergrundes haben hier einen stärkeren Einfluss auf die Messwertbildung und verringern somit das Niveau der  $Omega$ - Werte wesentlich stärker, als dies bei der Auswertung nach der "kleinen" Amplitude der Fall war. Besonders deutlich wird dies bei  $T2$ : Hier wird aufgrund des relativ mächtigen Schichtpaketes von 60 bis 80 cm über dem Untergrund (Planum bzw. Unterbau) hauptsächlich der  $Omega$ - Wert und nicht der  $E_{v2}$ - Wert in seinem Messwertniveau beeinflusst. Im Gegensatz zur Auswertung bei „kleiner“ Amplitude liegt jetzt das Niveau der  $Omega$ - Werte bei  $T2$  niedriger als bei  $T1$ .

- **Omega – Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$**

In Abbildung 7-21 sind die Regressionsergebnisse für die Auswertungen nach den Randbedingungen: grobkörnige Böden (A), "mit" (T, T1, T2) und "ohne Untergrundeinfluss" (N) und "großer" Amplitude dargestellt. Zu den Auswertungen A, N, gr.A und A, T, gr.A sind außerdem die 95% Vertrauensbereiche für den Mittelwert angegeben. Die Böden der Auswertungen "mit" (T, T1, T2) und "ohne Untergrundeinfluss" (N) bestehen hauptsächlich aus nicht gebrochenen enggestuften Sanden, wobei im Fall T2 vereinzelt Kiese eingebaut wurden.

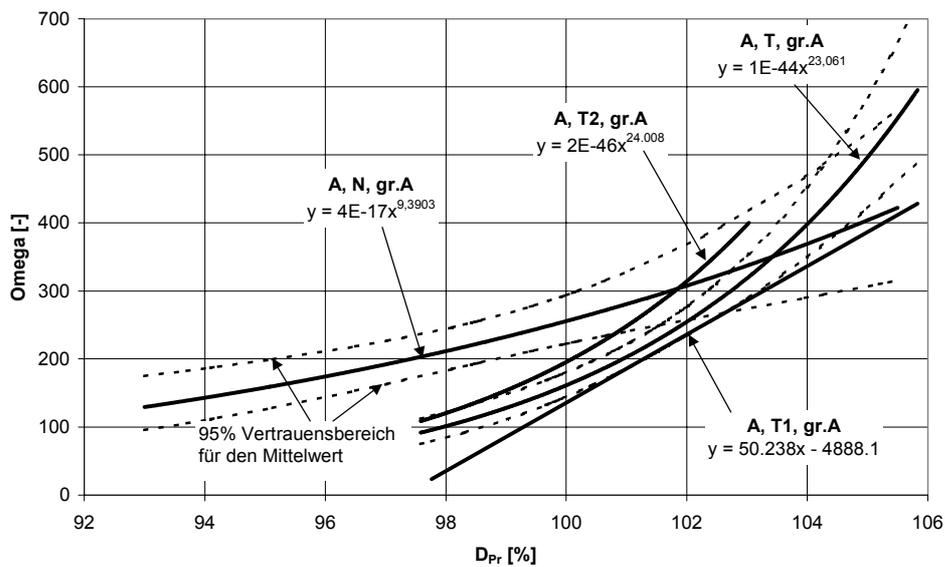


Abbildung 7-21: Regressionsgeraden für Omega –  $D_{Pr}$ :

A, N, gr.A    A, T, gr.A    A, T1, gr.A    A, T2, gr.A

Im Gegensatz zum Verformungsmodul  $E_{v2}$  wird die Messgröße des Verdichtungsgrades  $D_{Pr}$  nicht von den Eigenschaften des Bodens unterhalb der zu prüfenden Schicht beeinflusst. Dies zeigen die Regressionsverläufe für die Auswertungen der Fälle T2 und T1. Da bei T2 der Schichtwechsel tiefer liegt als im Fall T1, hat der weniger tragfähige Boden des Untergrundes einen geringeren Einfluss auf die Größe des Omega-Werte als bei T1. Im Vergleich zur Betrachtung der Zusammenhänge  $Omega - E_{v2}$ , hat der Schichtwechsel auch den Verformungsmodul beeinflusst und somit die Regressionsfunktion bzw. das Funktionsniveau zusätzlich verzerrt. Für die Betrachtung der Zusammenhänge  $Omega - D_{Pr}$  „ohne Untergrundeinfluss“ (N) konnte weitestgehend eine Beeinflussung der Messwerte aus dem Untergrund ausgeschlossen werden. Somit ergibt sich für Regressionsgerade mit den Randbedingungen A, N, gr.A bis zu einem Verdichtungsgrad von 102 bis 103% ein höheres Niveau der Funktionswerte als im Fall „mit Untergrundeinfluss“ (T, T1, T2).

### 7.2.3 Gesamtdarstellung der Regressionsfunktionen: grobkörnige Böden (A)

In den folgenden zwei Abbildungen (Abbildung 7-22 und Abbildung 7-23) sind noch einmal die Ergebnisse der Regressionsanalyse dargestellt. Ausgewertet wurden in diesem Kapitel die Messwertbeziehungen  $\Omega - E_{v2}$  sowie  $\Omega - D_{Pr}$  von Walzenkalibrierungen auf grobkörnigen Böden (A). Als weitere Klassifizierungsgröße ist zwischen "großer" und "kleiner" Verdichtungsamplitude unterschieden worden. Weiterhin wurde zwischen Messwerten unterschieden, die aufgrund ihrer Messtiefe von Schichtwechsel beeinflusst wurden.

- **$\Omega$  – Verformungsmodul  $E_{v2}$**

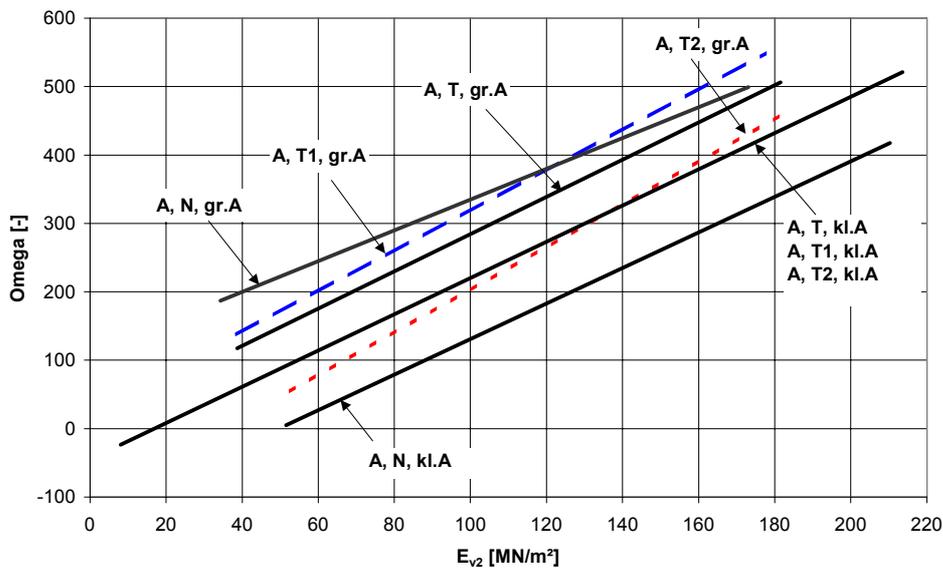


Abbildung 7-22: Zusammenfassung der Ergebnisse für  $\Omega - E_{v2}$  bei grobkörnigen Böden

- **$\Omega$  – Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$**

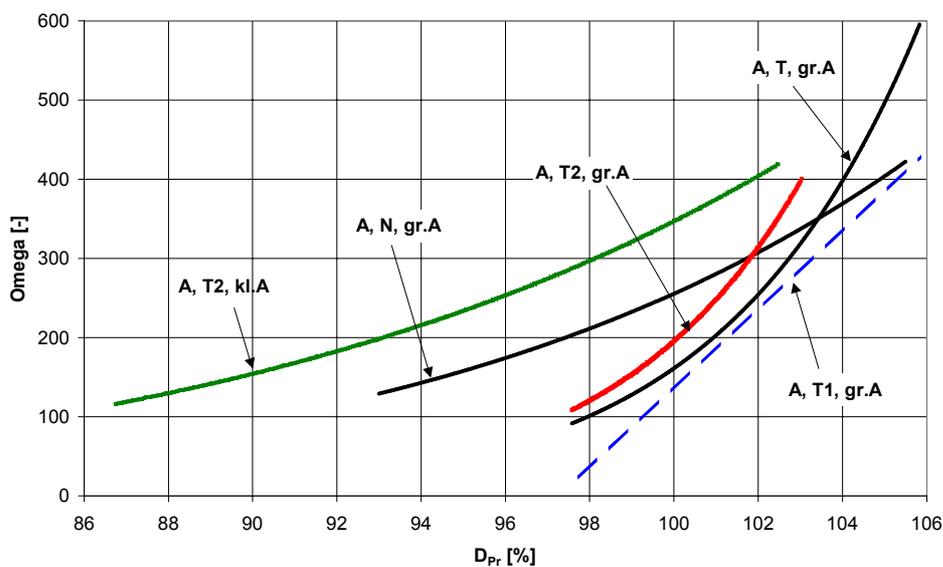


Abbildung 7-23: Zusammenfassung der Ergebnisse für  $\Omega - D_{Pr}$  bei grobkörnigen Böden

### 7.3 Gemischtkörnige Böden (B)

Den durchgeführten Auswertungen lagen folgende Randbedingungen zugrunde:

1. **B, N, kl.A:** Gemischtkörnige Böden (B), ohne Untergrundeinfluss (N), kleine Amp. (kl.A)
2. **B, N, gr.A:** Gemischtkörnige Böden (B), ohne Untergrundeinfluss (N), große Amp. (gr.A)
3. **B, T, kl.A:** Gemischtkörnige Böden (B), mit Untergrundeinfluss (T), kleine Amp. (kl.A)
4. **B, T1, kl.A:** Kalibrierergebnisse von Versuchen auf FSS und Dammschüttungen mit Schichtwechselln innerhalb einer Messtiefe von 1,5 m  
kleine Amplitude (kl.A)
5. **B, T2, kl.A:** Kalibrierergebnisse von Versuchen auf TS (STS und KTS) mit Schichtwechselln innerhalb einer Messtiefe von 0,5 bis 1,5 m  
kleine Amplitude (kl.A)
6. **B, T, gr.A:** Gemischtkörnige Böden (B), mit Untergrundeinfluss (T), große Amp. (gr.A)
7. **B, T1, gr.A:** Kalibrierergebnisse von Versuchen auf FSS und Dammschüttungen mit Schichtwechselln innerhalb einer Messtiefe von 1,5 m  
große Amplitude (gr.A)
8. **B, T2, gr.A:** Kalibrierergebnisse von Versuchen auf TS (STS und KTS) mit Schichtwechselln innerhalb einer Messtiefe von 0,5 bis 1,5m  
große Amplitude (gr.A)

Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse für die Messwertbeziehung  $\Omega$  -  $E_{v2}$  sind in der Abbildung 7-24 und Abbildung 7-25 angegeben. Die Auswertung nach der Randbedingung B, T2, gr.A konnte aufgrund fehlender Messwerte nicht durchgeführt werden. Da unter der Randbedingung „mit Untergrundeinfluss (T)“ nur Messwerte der Kategorie T1 vorlagen, wurde die Auswertung unter B, T+T1, gr.A zusammengefasst. Die Differenzwerte  $t$  zeigen durchgehend eine ausreichende Korrelation auf. Die Korrelationskoeffizienten liegen alle auf einem Niveau von  $r = 0,5$  bis  $0,80$ . Die Auswertungen: B, N, kl.A; B, T, kl.A und B, T2, kl.A ergeben mit den logarithmierten Daten höhere Korrelationskoeffizienten  $r$  als mit nicht logarithmierten Daten.

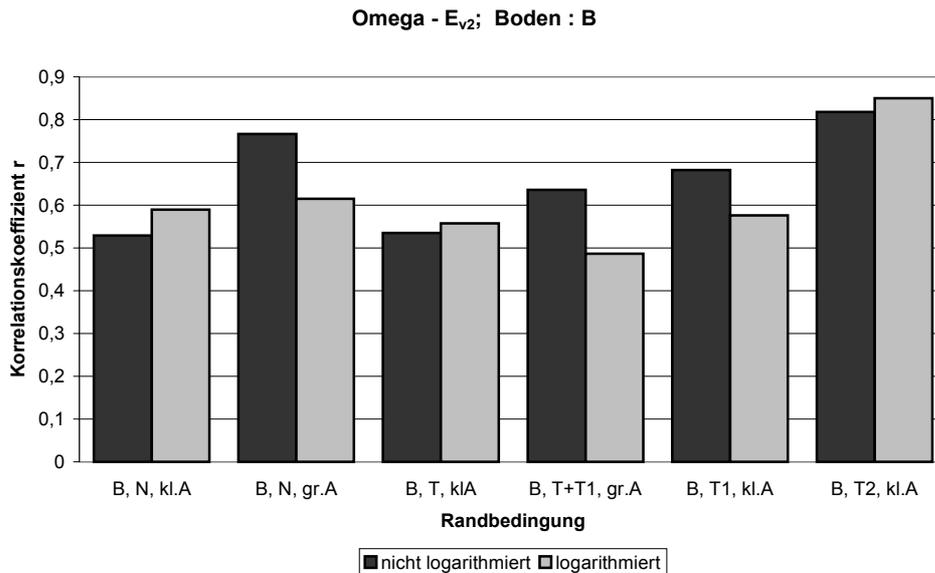


Abbildung 7-24: Korrelationskoeffizient  $r$  für die Auswertung nach gemischtkörnigen Böden der Messwertbeziehung:  $\Omega - E_{v2}$

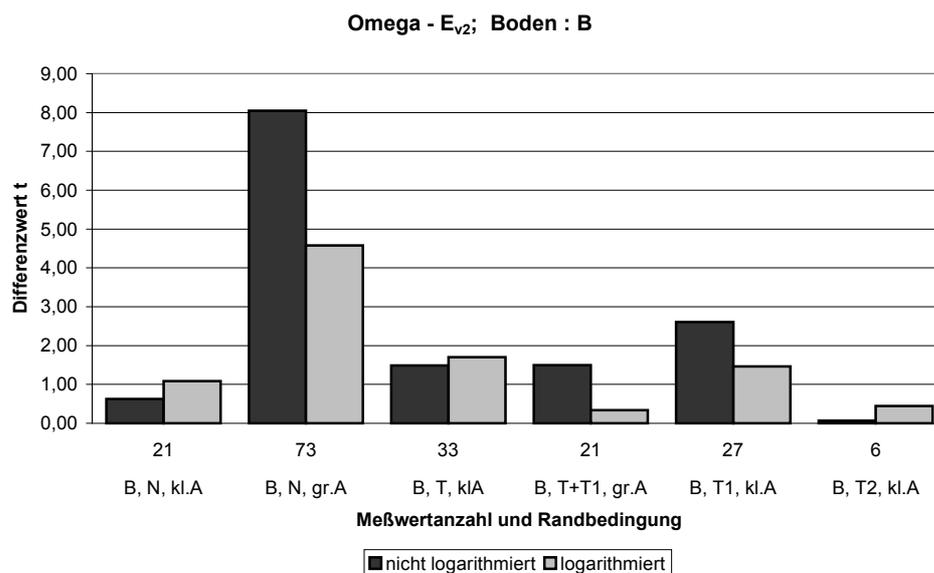


Abbildung 7-25: Test auf Vorliegen einer Korrelation: Differenzwerte  $t$  für die Messwertbeziehung:  $\Omega - E_{v2}$

Die Auswertung der Kalibrierdaten  $\Omega - D_{Pr}$  ist nur für die Randbedingung:  $N$ ,  $T$  und  $T1$  durchgeführt worden. Zu  $T2$  lagen keine Kalibrierdaten vor. Siehe hierzu Abbildung 7-26 und Abbildung 7-27. Bei den Auswertungen der Daten mit "großer" Amplitude ( $gr.A$ ) wurden ausreichende Korrelationen ermittelt. Dies traf für die Kalibrierdaten mit "kleiner" Amplitude nicht zu. Überdies sind mit nicht logarithmierten Daten höhere Korrelationskoeffizienten ermittelt worden, als mit logarithmierten Daten

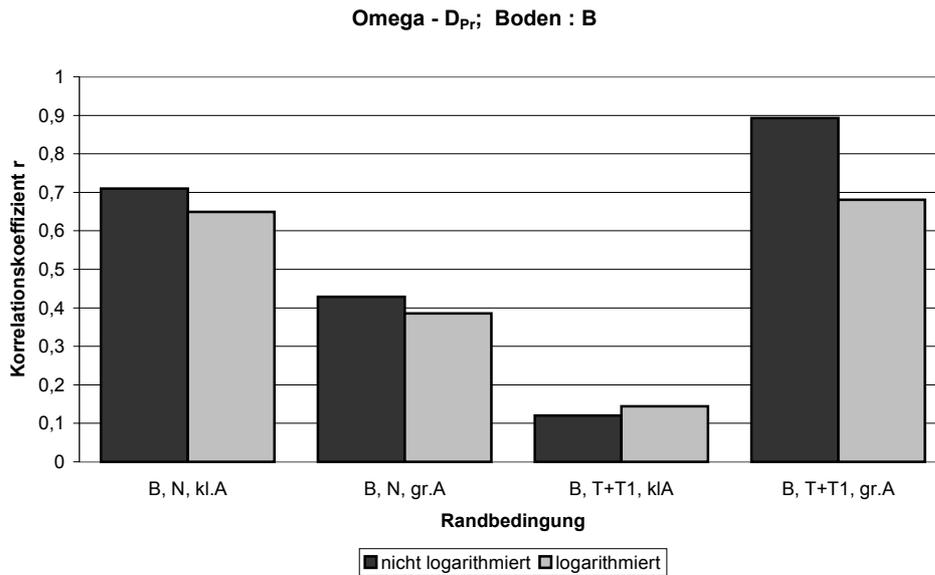


Abbildung 7-26: Korrelationskoeffizient  $r$  für die Auswertung nach gemischtkörnigen Böden der Messwertbeziehung: **Omega -  $D_{Pr}$**

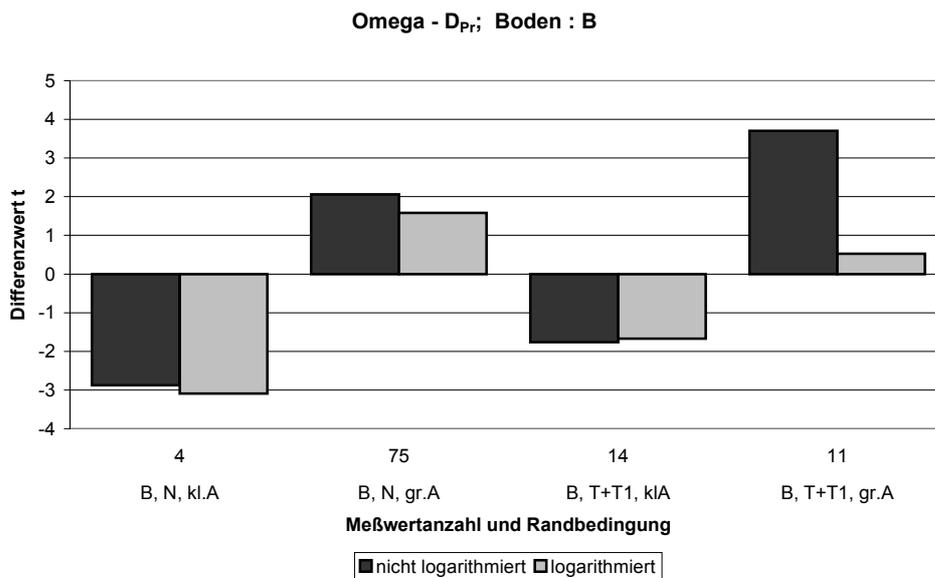


Abbildung 7-27: Test auf Vorliegen einer Korrelation: Differenzwerte  $t$  für die Messwertbeziehung: **Omega -  $D_{Pr}$**

In den folgenden Abbildungen sind die ermittelten Regressionsgeraden dargestellt, für die eine ausreichende Korrelation ermittelt werden konnte.

• **Omega - E<sub>v2</sub>**

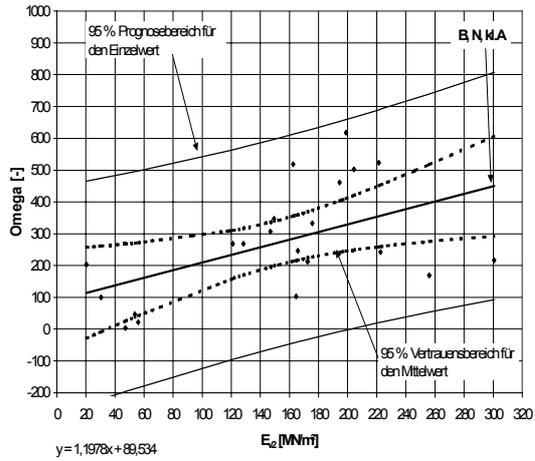


Abbildung 7-28: **B, N, kl.A**

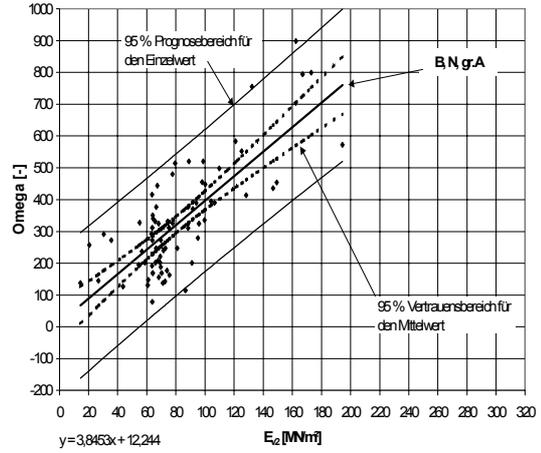


Abbildung 7-30: **B, N, gr.A**

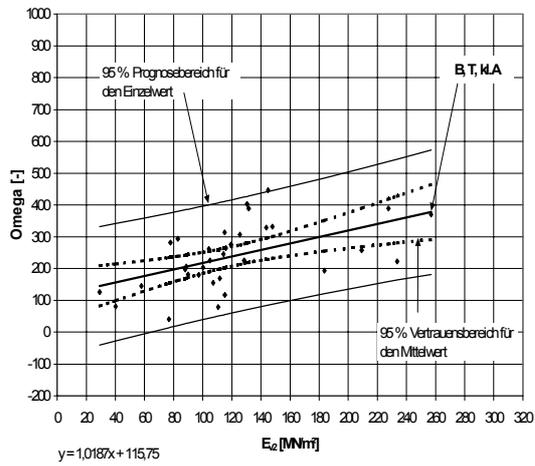


Abbildung 7-29: **B, T, kl.A**

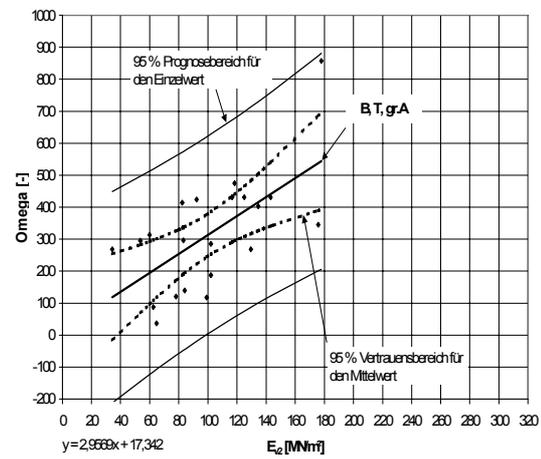


Abbildung 7-31: **B, T, gr.A**

• **Omega - D<sub>Pr</sub>**

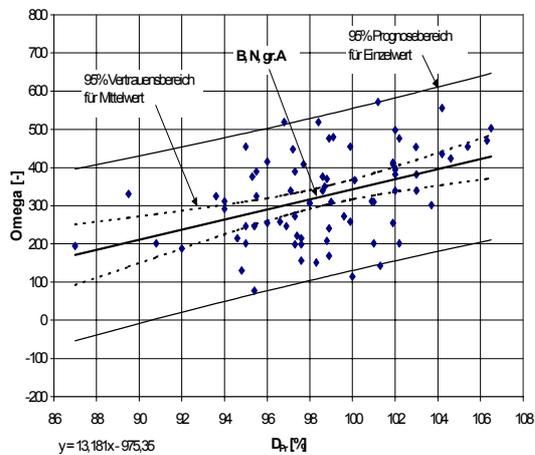


Abbildung 7-32: **B, N, gr.A**

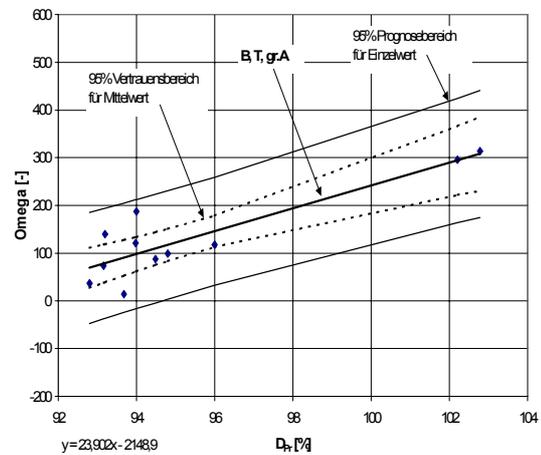


Abbildung 7-33: **B, T+T1, gr.A**

## 7.3.1 Ergebnisse: Boden B, kleine Amplitude

- **Omega – Verformungsmodul  $E_{v2}$**

In Abbildung 7-34 sind für die Auswertungen: "mit" und "ohne" Untergrundeinfluss" ( $NT$ ,  $T1$  und  $T2$ ), gemischtkörnige Böden ( $B$ ) und "kleine" Amplitude, die Regressionsfunktionen dargestellt.

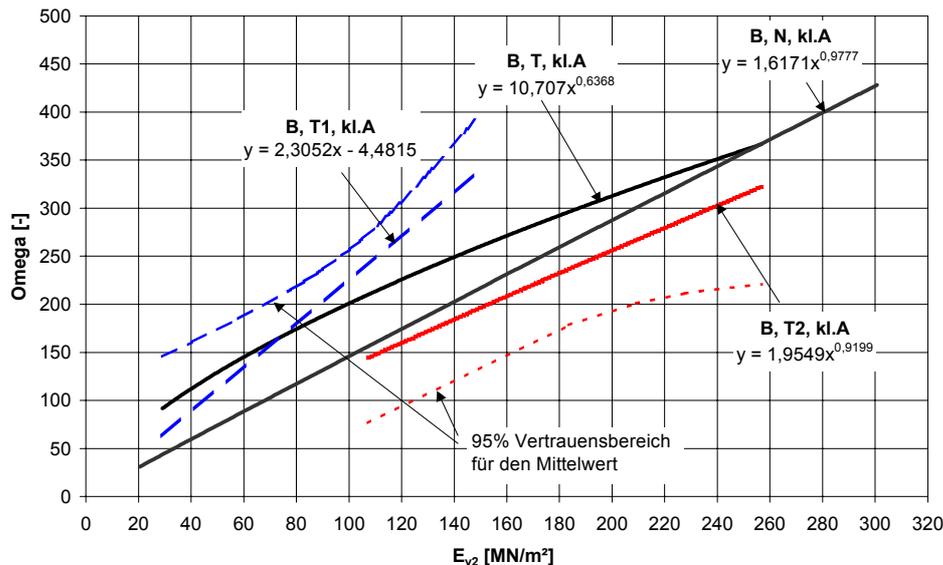


Abbildung 7-34: Regressionsgeraden für  $\Omega$  –  $E_{v2}$ :

$B, N, kl.A$      $B, T, kl.A$      $B, T1, kl.A$      $B, T2, kl.A$

Wie in Abbildung 7-34 zu sehen ist – und dies geht tendenziell konform mit den Ergebnissen, bei grobkörnigen Böden ( $A$ ) (Siehe Kapitel 7.2.1) – liegt das Niveau der Funktionswerte beim Fall  $T1$  über dem bei Fall  $N$ . In Kapitel 7.2.1 wurde als mögliche Erklärung angeführt, dass gebrochenen Einbaumaterialien der Fälle  $T1$  und  $T2$  unter Belastung ein steiferes Verhalten zeigen als rundkörnigen Böden im Fall  $N$ . Diese Annahme führte zu dem Schluss, dass das Niveau der Schätzwerte  $\Omega$  des Falle  $T1$  über dem des Falles  $N$  liegen. Die Daten, welche Eingang in die Auswertung  $B, T1, kl.A$  fanden, stammen aus Kalibrierversuchen auf Frostschutzschichten mit Schichtstärken von 30 bis 40 cm. In die Frostschutzschichten wurden rundkörnige leicht schluffige Kiese eingebaut. Da keine gebrochenen Materialien zum Einsatz kamen, kann davon ausgegangen werden, dass der beobachtete Sachverhalt nicht ausschließlich auf dem Einfluss der Kornform beruht. Möglicherweise sind zu einem wesentlichen Anteil die Bodeneigenschaften des Untergrundes auf die gleichzeitige Beeinflussung des  $\Omega$ - Wertes und des Verformungsmoduls  $E_{v2}$  verantwortlich. Dies ist bereits im Kapitel 7.2.1 diskutiert worden.

- **Omega – Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$**

Für die Messwertbeziehung  $Omega - D_{Pr}$  wurden bei gemischtkörnigen Böden (B) und "kleiner" Amplitude (*kl.A*) keine ausreichenden Korrelationskoeffizienten erhalten.

### 7.3.2 Ergebnisse: Boden B, große Amplitude

- **Omega – Verformungsmodul  $E_{v2}$**

In Abbildung 7-35 sind für die Auswertungen mit den Randbedingungen "mit" und "ohne Untergrundeinfluss" (*NT, T1*), gemischtkörnige Böden (B) und "große" Amplitude die errechneten Regressionsgeraden dargestellt. Zu den Auswertungen sind außerdem die 95% Vertrauensbereich für den Mittelwert angegeben, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die beiden äußersten Begrenzungslinien dargestellt sind. Die Böden der Auswertung *B, N, gr.A* und *B, T+T1, gr.A* bestehen zu gleichen Teil aus schluffigen Kiesen und schluffigen Sanden mit Feinkornanteilen von 6 bis 10%. Die Schichtdicken im Fall "mit Untergrundeinfluss" (*T+T1*) reichen von 30 bis 80 cm.

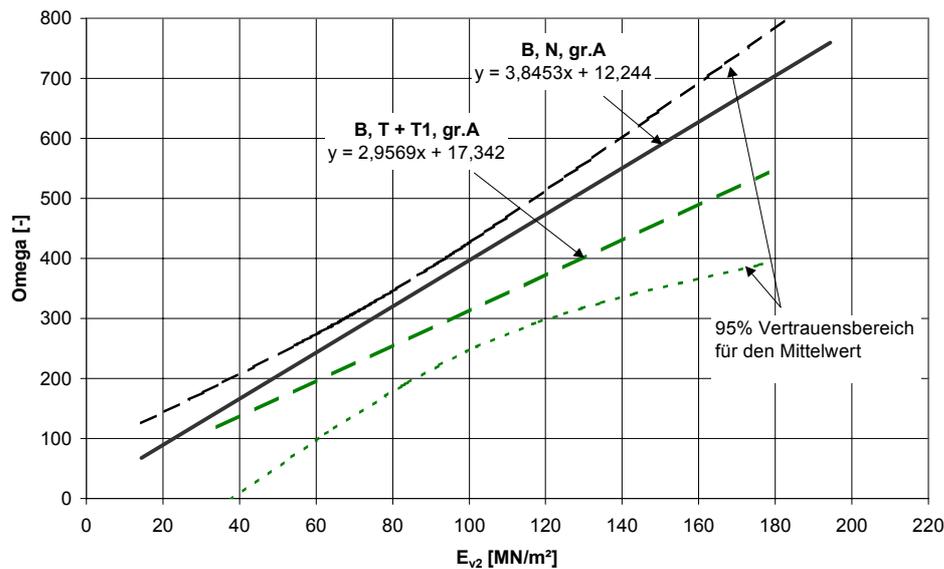


Abbildung 7-35: Regressionsgeraden für  $Omega - E_{v2}$ :

*B, N, kl.A*    *B, T+T1, gr.A*

- **Omega – Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$**

Abbildung 7-36 stellt die Regressionsergebnisse der Auswertungen für die Randbedingungen gemischtkörnige Böden (B), "mit" (T+TI) und "ohne Untergrundeinfluss" (N) und "großer" Amplitude dar. Das Bodenmaterial der Auswertung "ohne Untergrundeinfluss" (N) besteht aus schluffigen Kiesen mit einem Feinkornanteil von 6 bis 8% und schluffigen Sanden mit bis zu 15% Feinteilen. Bei der Auswertung "mit Untergrundeinfluss" (T+TI) stand ein schluffiger Sand bzw. Kies mit Feinteilen von 6 bis 9% an. Die Schichtstärken betragen zwischen 50 und 80 cm. Zu den Regressionsgeraden sind die 95% Vertrauensbereiche für den Mittelwert angegeben.

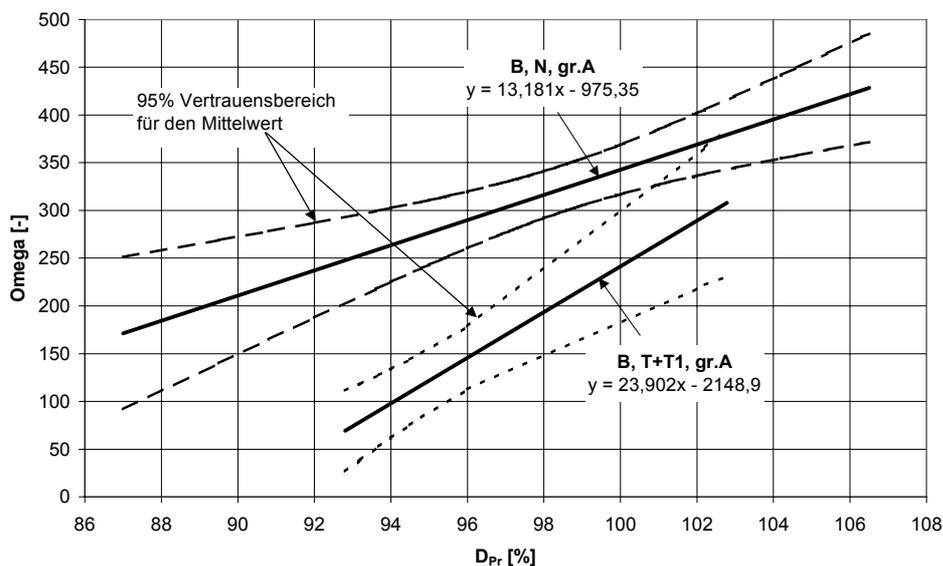


Abbildung 7-36: Regressionsgeraden für Omega –  $D_{Pr}$ :

$B, N, gr.A$      $B, T+T1, gr.A$

Für die Betrachtung der Zusammenhänge  $\Omega$  -  $D_{Pr}$  ohne Untergrundeinfluss (N) konnte eine Messwertbeeinflussung aus dem Untergrund weitestgehend ausgeschlossen werden. Somit ergibt sich für Regressionsgerade mit der Randbedingung  $B, N, gr.A$  ein höheres Niveau der Funktionswerte als bei den Funktionsverläufen "mit Untergrundeinfluss" ( $T+T1$ ).

### 7.3.3 Gesamtdarstellung der Regressionsfunktionen: gemischtkörnige Böden (B)

Im folgenden sind die Auswertungsergebnisse der Daten für gemischtkörnige Böden (B) aufgeführt. Es wurde analog zu der Auswertung für grobkörnige Böden (A) die Messwertbeziehung zwischen  $\Omega$  und  $E_{v2}$  sowie  $\Omega$  und  $D_{Pr}$  betrachtet und im Bezug auf die Maschinenparameter zwischen "großer" und "kleiner" Verdichtungsamplitude unterschieden. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse dargestellt.

- **$\Omega$  – Verformungsmodul  $E_{v2}$**

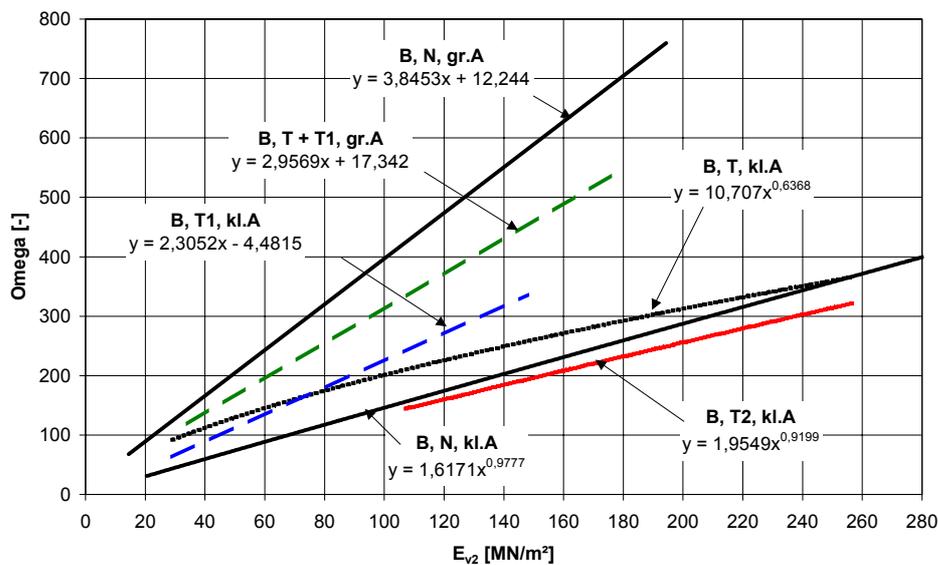


Abbildung 7-37: Zusammenfassung der Ergebnisse für  $\Omega$  –  $E_{v2}$  bei gemischtkörnigen Böden (B)

- **$\Omega$  – Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$**

Ergebnisse siehe Kapitel 7.3.2:

## 7.4 Gesamtdarstellung der Ergebnisse: Boden A und B

- **Omega – Verformungsmodul  $E_{v2}$**

In Abbildung 7-38 sind die ermittelten Regressionsgeraden der Randbedingung „mit Untergrundeinfluss“ ( $T, T1, T2$ ) und in Abbildung 7-39 die „ohne Untergrundeinfluss“ ( $N$ ) dargestellt.

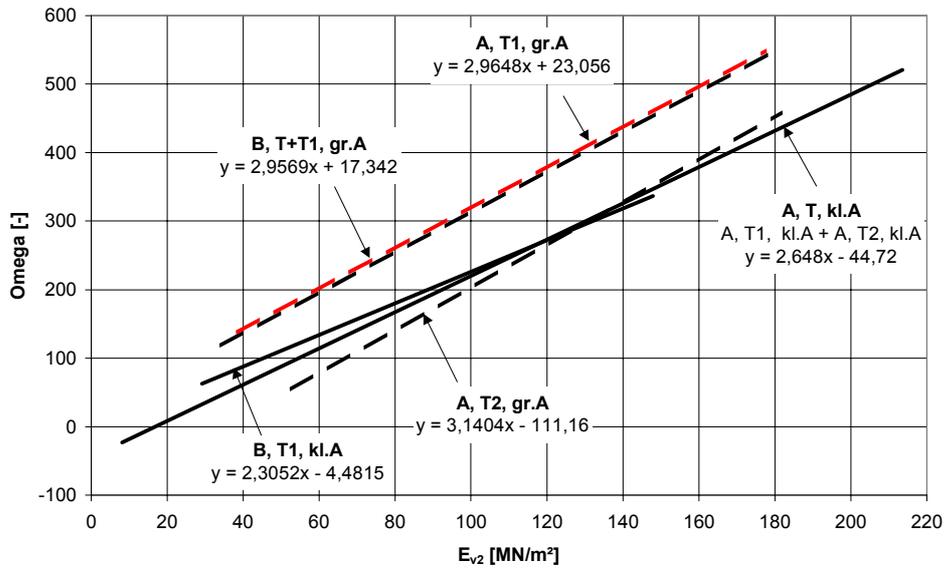


Abbildung 7-38: *Omega –  $E_{v2}$ : Regressionsgeraden für grob- (A) und gemischkörnige (B) Böden: "mit Untergrundeinfluss" (T, T1, T2) unterschieden nach "großer" und "kleiner" Amplitude*

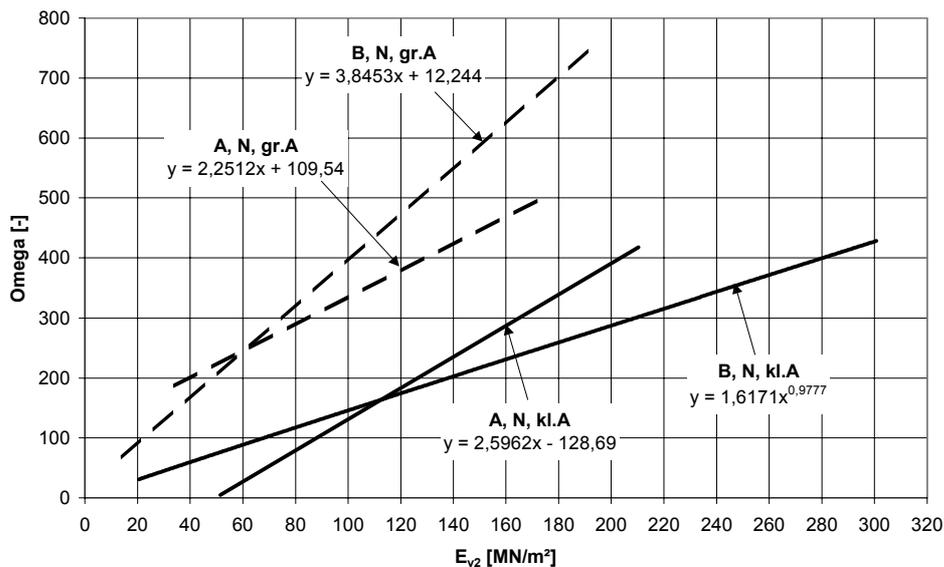


Abbildung 7-39: *Omega –  $E_{v2}$ : Regressionsgeraden für grob- (A) und gemischkörnige (B) Böden: "ohne Untergrundeinfluss" (N) unterschieden nach "großer" und "kleiner" Amplitude*

- **Omega – Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$**

Abbildung 7-40 zeigt für die Beziehung  $\Omega$  –  $D_{Pr}$  die ermittelten Regressionsgeraden bei grob- (A) und gemischtkörnigen Böden (B), "große" und "kleine" Amplitude sowie "mit" (T, T1, T2) und "ohne Untergrundeinfluss" (N).

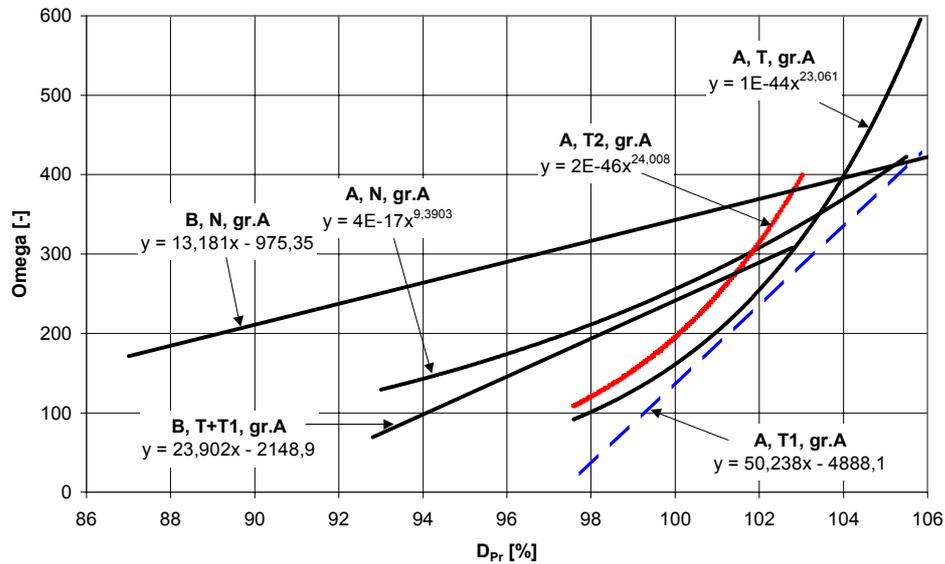


Abbildung 7-40:  $\Omega$  –  $E_{v,2}$ : Regressionsgeraden für grob- (A) und gemischtkörnige (B) Böden, "großer" und "kleiner" Amplitude sowie "mit" (T, T1, T2) und "ohne Untergrundeinfluss" (N)

## 7.5 Mögliche Anforderungswerte an den Verdichtungsgrad $D_{Pr}$ und den Verformungsmodul $E_{v2}$

In den vorangegangenen Abschnitten der Arbeit wurden Zusammenhänge zwischen Messwerten der FDVK (*Omega*) und Vergleichswerten ( $E_{v2}$ ,  $D_{Pr}$ ) herausgearbeitet, wobei die hierzu durchgeführten Auswertungen auf grob- und gemischtkörnige Böden beschränkt blieben. Für die Auswertung wurden die vorliegenden Kalibrierdaten anhand ihrer Versuchsrandbedingungen – wie Bodenart, Verdichtungsgerät, Schichtenfolge usw. – klassifiziert. Es wurden Kalibrierdaten zusammengefasst, bei denen gleiche oder zumindest ähnliche Versuchsrandbedingungen vorlagen. Generell wurde darauf geachtet, dass nur Kalibrierdaten in die Auswertung eingingen, deren Messverfahren auf einer einheitlichen Prüfvorschrift beruhen und die Daten möglichst homogenen Verhältnissen entstammten.

Aus folgenden Tabellen kann in Abhängigkeit eines geforderten Verformungsmoduls  $E_{v2}$  oder Verdichtungsgrades  $D_{Pr}$  z.B. nach der ZTVE - StB oder ZTVT - StB ein *Omega*- Wert abgelesen werden, welcher als möglicher Anforderungswert ein bestimmtes Qualitätsniveau sicherstellt.

Grundlage der Tabellen sind die Auswertungsergebnisse der Kapitel 7.2 und 7.3. Die Wahl des maßgebenden Anforderungswertes richtet sich nach den im Baufeld vorliegenden Randbedingungen ( $A$ ,  $B$ ,  $N$ ,  $T$ ,  $T1$ ,  $T2$ ) und nach der verwendeten Prüfamplitude ("kleine" oder "große" Amplitude). Zu den entsprechenden Randbedingungen kann über die Tabellen 7-1, 7-2 und 7-3 für eine Anwendung die zugehörige Auswertungsklasse gefunden werden. Mit dieser kann aus Tabelle 7-5, 7-6, 7-7 oder 7-8 ein Anforderungswert für *Omega* abgelesen werden.

<b>Omega – Verformungsmodul E<sub>v2</sub>: Anwendungsbereich</b>			
kleine Amplitude: (kl.A)	Bodenklasse	Schichteneinfluss	Anwendungsbereich
	A	N	Kies, sandig; runde Kornform
			D <sub>s</sub> > 1,50 m
		T1	Kies, sandig; vorwiegend gebrochene Kornform
			FSS o. ähnlich: D <sub>s</sub> ~ 30 bis 40 cm; Untergrund tragfähig
		T2	Kies, sandig; vorwiegend gebrochene Kornform
			Tragschichten TS: D <sub>s</sub> ~ 20 bis 40 cm; Untergrund: FSS ca. 40cm Gesamtstärke D <sub>sg</sub> ~ 60 bis 80 cm
	B	N	Kies, sandig, leicht schluffig; runde Kornform
			D <sub>s</sub> > 1,50 m
		T1	Kies, sandig, leicht schluffig; runde Kornform
FSS, PSS: D <sub>s</sub> ~ 30 bis 40 cm; Untergrund tragfähig			

Tabelle 7-1: Anwendungsbereich: Omega – Verformungsmodul E<sub>v2</sub> bei kleiner Amplitude

<b>Omega – Verformungsmodul E<sub>v2</sub>: Anwendungsbereich</b>			
große Amplitude (gr.A)	Bodenklasse	Schichteneinfluss	Anwendungsbereich
	A	N	Kies, sandig; runde Kornform
			D <sub>s</sub> > 1,50 m
		T1	Kies, sandig; runde Kornform
			FSS o. ähnlich: D <sub>s</sub> ~ 20 bis 50 cm
		T2	Kies, sandig und Sand kiesig: gebrochene u, runde Kornform
			Tragschichten TS: D <sub>s</sub> ~ 20 bis 40 cm; Untergrund: FSS ca. ~ 40cm Gesamtstärke D <sub>sg</sub> ~ 60 bis 100 cm
	B	N	Kies, sandig, leicht schluffig Sand, leicht schluffig; runde Kornform
			D <sub>s</sub> > 1,50 m
		T1	Kies, sandig, leicht schluffig Sand, leicht schluffig; runde Kornform
FSS: D <sub>s</sub> ~ 30 bis 80 cm			

Tabelle 7-2: Anwendungsbereich: Omega – Verformungsmodul E<sub>v2</sub> bei großer Amplitude

Omega – Verdichtungsgrad $D_{Pr}$ : Anwendungsbereich			
	Bodenklasse	Schichteneinfluss	Anwendungsbereich
große Amplitude (gr.A)	A	N	Kies, sandig; runde Kornform
			$D_s > 1,50 \text{ m}$
		T1	Sand, kiesig; runde Kornform
			FSS, DA o. ähnlich: $D_s \sim 50$ bis 120 cm
		T2	Kies, sandig; gebrochene Kornform
			Tragschichten TS: $D_s \sim 30$ cm; Untergrund: FSS ca. $\sim 40$ cm Gesamtstärke $D_{sg} \sim 70$ cm
kleine Amplitude	A	T2	Kies, sandig; vorwiegend gebrochene Kornform
			Tragschichten TS: $D_s \sim 30$ bis 50 cm; Untergrund: FSS ca. $\sim 40$ cm Gesamtstärke $D_{sg} \sim 70$ bis 90 cm
große Amplitude	B	N	Kies, sandig, leicht schluffig Sand, leicht schluffig; runde Kornform
			$D_s > 1,50 \text{ m}$

Tabelle 7-3: Anwendungsbereich: Omega – Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$ 

Damit die Versuchsrandbedingung im Bezug auf das Verdichtungsgerät homogenisiert werden konnten, wurde ein Simulationsmodell aufgestellt, welches das Bewegungsverhalten einer Vibrationswalze im Verdichtungsbetrieb bei unterschiedlich steifen Böden nachbildet. Aus den Simulationsergebnissen wurde analog zum *Omega*-Wert ein dimensionsloser Messwert  $P_{Sim}$  abgeleitet. Mit diesen  $P_{Sim}$ -Werten wurden Korrekturfaktoren berechnet, mit Hilfe derer alle *Omega*-Werte auf das Messwertniveau einer Bezugswalze umgerechnet wurden. Um die Tabellenwerke nutzen zu können, müssen die benötigten *Omega*-Werte ( $\omega$ ) mit den Korrekturfaktoren  $\alpha$  noch an die zum Einsatz kommende Walze umgerechnet werden. Die benötigten Korrekturfaktoren sind aus den Gleichungen:

$$\alpha_{kl.A} = -2,0209 - 0,0005 \cdot m_B + 0,0001 \cdot m_R + 0,5409 \cdot m_u \cdot r_u + 0,0290 \cdot f_u + 0,8153 \cdot b$$

$$\alpha_{gr.A} = -1,0800 - 0,0004 \cdot m_B + 0,0001 \cdot m_R + 0,2408 \cdot m_u \cdot r_u + 0,0116 \cdot f_u + 0,6951 \cdot b$$

zu berechnen, wobei die Anwendbarkeit der Formeln nach Tabelle 5-1, 5-2 bzw. 5-3 zu überprüfen sind. Der anzusetzende Anforderungswert  $\omega$  (*Omega*) ergibt sich nun zu:

$$\omega = \alpha(m_B, m_R, m_u \cdot r_u, f_u, b) \cdot \omega([A, B], [N, T, T1, T2], [kl.A, gr.A], [E_{v2}, D_{Pr}])_{Tabellewert}$$

Die erforderlichen Maschinenparameter zur Berechnung des Korrekturfaktors  $\alpha$  müssen aus den Datenblättern der Hersteller abgelesen werden. Für evtl. fehlende Angaben sind in Kapitel 5.3.1 die notwendigen Berechnungsschritte aufgeführt. Für die Prüfwalze ist eine Fahrgeschwindigkeit von 4 km/h einzuhalten.

- **Omega – Verformungsmodul  $E_{v2}$**

Die folgenden Tabellen enthalten *Omega* – Werte, welche sich zum Verformungsmodul  $E_{v2}$  angeben lassen. Zu diesen *Omega* - Werten sind aus den 95% Vertrauensbereiches des Mittelwertes obere und untere Grenzwerte angegeben, innerhalb derer ein möglicher Anforderungswert festgelegt werden kann.

Omega – Verformungsmodul $E_v$ Grobkörnige Böden (A) und gemischtkörnige Böden (B)												
Ohne Untergrundeinfluss (N)												
Randb.	Kleine Amplitude (kl.A)						Große Amplitude (gr.A)					
	A, N, kl.A			B, N, kl.A			A, N, gr.A			B, N, gr.A		
Fkt.:	$y = a + b x$			$y = a x^b$			$y = a x^b$			$y = a + b x$		
$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze
180	339	370	307	259	439	153	515	607	422	704	784	625
150	261	280	241	217	352	133	447	507	388	589	647	531
120	183	200	165	174	280	109	380	416	343	474	513	435
100	131	155	107	146	239	89	335	373	297	397	426	367
80	79	112	46	117	205	67	290	343	237	320	346	294
70	53	91	15	103	189	56	267	330	204	281	309	254
60	27	71	0	89	175	45	245	319	171	243	274	212
45	-	-	-	67	153	29	211	302	120	185	224	147
30	-	-	-	45	130	16	177	286	68	128	175	80
20	-	-	-	30	111	8	<i>155*</i>	<i>275*</i>	<i>34*</i>	89	143	35

Tabelle 7-4: Mögliche Anforderungswerte an den dynamischen Messwert der FDVK (Omega) ableitbar aus den Anforderungen an den Verformungsmodul  $E_{v2}$ . \*Tabellenwerte in Kursiv sind extrapoliert.

Omega – Verformungsmodul E <sub>v</sub> Grobkörnige Böden (A) und gemischtkörnige Böden (B)												
Mit Untergrundeinfluss (T1)												
Randb.	Kleine Amplitude (kl.A)						Große Amplitude (gr.A)					
	A, T1, kl.A			B, T1, kl.A			A, T1, gr.A			B, T1, gr.A		
Fkt.:	y = a + b x			y = a + b x			y = a + b x			y = a + b x		
E <sub>v2</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze
180	445	500	389	<i>410*</i>	<i>496*</i>	<i>325*</i>	557	658	455	550	704	395
150	368	409	328	341	398	284	468	542	394	461	570	352
120	292	322	262	272	307	237	379	430	327	372	446	298
100	241	269	213	226	257	196	320	363	276	313	379	247
80	190	222	158	180	219	141	260	305	215	254	330	178
70	165	200	130	157	203	111	231	280	181	224	310	139
60	139	179	100	134	188	79	201	256	145	195	293	97
45	101	148	54	99	167	31	156	223	90	150	269	31
30	63	117	8	65	147	0	<i>112*</i>	<i>192*</i>	<i>32*</i>	<i>106*</i>	<i>248*</i>	<i>0*</i>
20	<i>37*</i>	<i>97*</i>	<i>0*</i>	42	134	0	<i>82*</i>	<i>171*</i>	<i>0*</i>	<i>76*</i>	<i>234*</i>	<i>0*</i>

Tabelle 7-5: Mögliche Anforderungswerte an den dynamischen Messwert der FDVK (Omega) ableitbar aus den Anforderungen an den Verformungsmodul E<sub>v2</sub>. \*Tabellenwerte in Kursiv sind extrapoliert.

Omega – Verformungsmodul $E_v$ Grobkörnige Böden (A)						
Mit Untergrundeinfluss (T2)						
Randb.	Kleine Amplitude (kl.A)			große Amplitude (gr.A)		
	A, T2, kl.A			A, T2, gr.A		
Bem.:	y = a + b x			y = a + b x		
$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze
180	475	509	441	454	600	309
150	387	411	363	360	461	259
120	300	318	281	266	341	191
100	241	260	222	203	281	124
80	183	206	159	140	238	42
70	153	180	126	109	220	0
60	124	154	94	77	203	0
45	80	116	44	30	179	0
30	36*	78*	0*	-	-	-
20	7*	53*	0*	-	-	-

Tabelle 7-6: Mögliche Anforderungswerte an den dynamischen Messwert der FDVK (Omega) ableitbar aus den Anforderungen an den Verformungsmodul  $E_{v2}$ . \*Tabellenwerte in Kursiv sind extrapoliert.

- **Omega – Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$**

Die folgenden Tabellen enthalten *Omega*-Werte, welche sich zum Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  angeben lassen. Zu diesen *Omega*-Werten sind aus den 95% Vertrauensbereiches des Mittelwertes obere und untere Grenzwerte aufgeführt, innerhalb derer ein möglicher Anforderungswert festgelegt werden kann.

Omega – Verdichtungsgrad $D_{Pr}$ Grobkörnige Böden (A) und gemischtkörnige Böden (B)												
Große Amplitude (gr.A)												
Randb.	Mit Untergrundeinfluss (T1)						Ohne Untergrundeinfluss (N)					
	A, T1, gr.A			B, T1, gr.A			A, N, gr.A			B, N, gr.A		
Bem.:	$y = a + b x$			$y = a + b x$			$y = a x^b$			$y = a + b x$		
$D_{Pr}$ [%]	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze
103	286	311	262	313	392	234	337	415	274	382	420	345
100	136	159	112	241	295	187	255	294	222	343	369	317
98	35	74	-4	193	234	153	211	244	183	316	341	292
97	-	-	-	170	205	134	192	226	163	303	330	277
95	-	-	-	122	155	89	158	198	126	277	311	243
92	-	-	-	<i>50*</i>	<i>98*</i>	<i>3*</i>	<i>117*</i>	<i>165*</i>	<i>83*</i>	237	287	188

Tabelle 7-7: Mögliche Anforderungswerte an den dynamischen Messwert der FDVK (Omega) ableitbar aus den Anforderungen an den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$ . \*Tabellenwerte in Kursiv sind extrapoliert.

Omega – Verdichtungsgrad D <sub>Pr</sub> Grobkörnige Böden (A)						
Mit Untergrundeinfluss (T2)						
Randb.	Kleine Amplitude (kl.A)			Große Amplitude (gr.A)		
	A, T2, kl.A			A, T2, gr.A		
Bem.:	y = a x <sup>b</sup>			y = a x <sup>b</sup>		
D <sub>Pr</sub> [%]	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze	Omega [-]	obere Grenze	untere Grenze
103	309	399	240	397	481	328
100	278	343	225	195	230	166
98	258	311	214	120	164	88
97	249	297	208	94	139	63
95	230	272	195	<i>57*</i>	<i>101*</i>	<i>32*</i>
92	205	241	174	<i>26*</i>	<i>61*</i>	<i>11*</i>

Tabelle 7-8: Mögliche Anforderungswerte an den dynamischen Messwert der FDVK (Omega) ableitbar aus den Anforderungen an den Verdichtungsgrad D<sub>Pr</sub>. \*Tabellenwerte in Kursiv sind extrapoliert.

## 8 Neueste Entwicklungen bei den Messsystemen der FDVK

Zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle werden Tandemwalzen oder Walzenzüge bzw. Verdichtungsgeräte mit einer bzw. mit zwei vibrierenden Bandagen eingesetzt. Die eingesetzten Walzen weisen konstante Maschinenparameter in Bezug auf die Schwingungserregung der Bandage auf. Es besteht lediglich die Möglichkeit im Rahmen von vorgegebenen Amplituden zwischen i. d. R. zwei verschiedenen Einstellungen zu wählen. Mit einem Wechsel der Amplitude geht normalerweise auch ein Wechsel der Erregerfrequenz einher. Somit bleibt innerhalb einer gewählten Verdichtungsamplitude, die Frequenz und somit auch die Unwuchtkraftwirkung der Bandage auf den Boden konstant. Eben diese konstanten Maschinenparameter sind notwendig, um bei den herkömmlichen FDVK Messsystemen vergleichbare und aussagekräftige Messwerte zu erhalten, da die Messwertbildung wesentlich auf den Parametern: Amplitude und Frequenz, sowie darüber hinaus auf der Bandagen- und Rahmenmasse beruht.

Neuere Maschinenentwicklungen gehen im Bezug auf die Verdichtungstechnik einen anderen Weg. Ähnlich wie bei der Bildung der FDVK – Messwerte werden die Beschleunigungen bzw. die Schwingbewegung der Walzenbandage infolge der Vibrationsanregung registriert. Entsprechend den permanent aufgenommenen Beschleunigungswerten und den hieraus ableitbaren Messgrößen wird automatisch die Wirkungsrichtung der Unwuchtkraft individuell nach der momentanen Bodenbeschaffenheit eingestellt. Als Anregungsprinzip wird bei diesen Maschinen ein Richtschwinger verwendet, bei dem durch zwei gegenläufig rotierende Massen eine definierte Kraftwirkungsrichtung vorgegeben wird. Die Maschinenparameter Frequenz und Gesamtamplitude bleiben bei diesen sogenannten selbstregelnden Verdichtungsgeräten konstant und können durch den Bediener nicht verändert werden. Durch die Verdrehung des Richtschwingers wird nun bei geringer Bodensteifigkeit die vertikale Amplitudenkomponente so verstellt, dass eine maximale vertikale Kraftwirkung außerhalb des Sprungbetriebes erzeugt wird. Bei zunehmender Bodensteifigkeit wird die Krafrichtung des Richtschwingers immer weiter in die Horizontale gedreht, so daß ein immer kleiner werdender Vertikalkraftanteil in den Boden eingeleitet wird. Im Extremfall wirkt die Unwuchtkraft in horizontaler Richtung. Das Prinzip der automatisch und kontinuierlich eingeregelter Kraftwirkungsrichtung entsprechend der Bodensteifigkeit steht natürlich entgegen der Forderung konstanter Maschinenparameter. Aufgrund dessen können bei „selbstregelnden“ Verdichtungsgeräten herkömmliche Verfahren der FDVK Messtechnik nicht mehr eingesetzt werden. Außerdem liefern die bisher verwendeten Messsysteme nur indirekte Messwerte, welche durch eine

Kalibrierung auf klassische Messgrößen wie den Verformungsmodul  $E_v$  zurückgeführt werden müssen.

Mit einem neu entwickelten Auswerteverfahren der an der Walzenbandage gemessenen Beschleunigungen, kann bei jeder Schwingbewegung aus dem Zusammenhang zwischen Kraft und Verschiebung ein Messwert ermittelt werden. Dieser Messwert, welcher mit  $E_{vib}$  bezeichnet wird, steht in direktem Zusammenhang zum Verformungsmodul  $E_v$  des Bodens. Eine Kalibrierung der gewonnen Messwerte auf herkömmliche bodenmechanische Kenngrößen (z.B.  $E_v$ ) kann laut Herstellerangaben somit entfallen. Außerdem wird angeführt, daß der ermittelte  $E_{vib}$ - Wert unabhängig von den vorliegenden Maschinenparametern ist. Dieses neue Messverfahren bietet nun die Möglichkeit die FDVK auch mit „selbstregelnden“ Vibrationswalzen - wie oben beschrieben - einzusetzen.

In den folgenden Kapiteln soll kurz die grundlegende Theorie zur Ableitung des neuen Messwertes  $E_{vib}$  dargestellt werden. Weiterhin werden erste Ergebnisse aus der praktischen Erprobung des neuen Meßverfahrens vorgestellt. Leider konnten hier nur Versuche auf einer Baustelle durchgeführt werden. Deswegen sind die dargestellten Ergebnisse nur als exemplarisches Beispiel zu sehen, zumal angeführt werden muß, daß die Randbedingungen im Hinblick auf den anstehenden Boden nicht optimal waren.

## 8.1 Beschreibung des Messsystems

Wie schon bei den herkömmlichen Messverfahren beschrieben, wird das Bewegungsverhalten der Walzenbandage über Beschleunigungsaufnehmer erfaßt. Diese sind an einem sich nicht drehenden Teil der Walzenbandage befestigt. Zur Generierung des Messwertes  $E_{vib}$  wird die vertikale Beschleunigungskomponente erfaßt und ausgewertet. Für die Vertikalbewegung wird von Lundberg [38] eine geschlossene Lösung angegeben, mit der aus der Kraft – Weg Beziehung auf den Verformungsmodul  $E_v$  des Bodens geschlossen werden kann. Die Theorie der Maschine – Boden – Wechselwirkung basiert auf dem Kontakt zweier zylinderförmiger Körper, welche ein linear elastisches Verhalten aufweisen. Durch den einen Zylinder wird die Bandage der Walze mit einem unendlich großem Elastizitätsmodul und dem Radius  $R_W$  modelliert. Über den anderen Zylinder wird der Boden beschrieben. Wobei der Boden mit einem endlich großen  $E$ - Modul (dieser stellt die eigentliche Unbekannte dar), einer Querdehnzahl  $\nu$  und einem unendlich großen Radius  $R_B$  dargestellt wird.

Die Spannungsverteilung  $p(x)$  an der Kontaktfläche der sich berührenden Zylinder ergibt sich aus den oben getroffenen Annahmen zu:

$$p(x) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{F_K}{l \cdot b} \cdot \sqrt{1 - \frac{4 \cdot x^2}{b^2}}$$

Die hierzu maßgebende Kontaktbreite  $b$  ist:  $b = \sqrt{\frac{16}{\pi} \cdot \frac{R \cdot (1 - \nu^2)}{E} \cdot \frac{F_K}{l}}$

Unter Berücksichtigung eines großen Seitenverhältnis von Kontaktbreite zu Zylinderlänge ( $l/b \gg 10$ ) kann nach [3] eine Vereinfachung gemacht werden, indem der Zylindermittelpunkt zu einem oberflächenfernen Punkt angenähert wird. Danach ermittelt sich die Einsenkung bzw. Verschiebung  $s$  der Bandage zu:

$$s = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot F_K}{\pi \cdot E \cdot l} \left( 1.8864 + \ln\left(\frac{l}{b}\right) \right)$$

Letztlich lassen sich die obigen Gleichungen zu einem Funktional der Einsenkung  $s = f(F_K, E)$  zusammenfassen. In den Gleichungen wird näherungsweise die Querdehnung zu  $\nu = 0,25$  angesetzt.

Die gesuchte Bodenkontaktkraft wird nun aus den gemessenen Beschleunigungswerten an der Walzenbandage ermittelt. Hierzu ist ein Modell der auftretenden Kräfte an der Walzenbandage notwendig. Da dieses grundlegende Modell bereits in Kapitel 5.2.1 vorgestellt worden ist, werden hier nur mehr die wesentlichen Größen genannt:

- die gemessene Trägheitskraft  $F_B$  der Bandage:

$$F_B = m_B \cdot \ddot{z}$$

- der Vertikalanteil der Unwuchtkraft bzw. der Fliehkraft des Erregersystem  $F_E$ :

$$F_E = m_U \cdot r_U \cdot \Omega^2 \cdot \cos(\Omega t)$$

- die Statische Achslast  $F_{stat}$  ermittelt aus Bandagenmasse  $m_B$  und Rahmenmasse  $m_R$ :

$$F_{stat} = (m_B + m_R) \cdot g$$

- die unbekannte Bodenkontaktkraft  $F_K$ :

$$F_K = -F_B + F_U + F_{stat}$$

Aus den gemessenen Beschleunigungswerten kann einerseits die unbekannte Bodenkontaktkraft  $F_K$  und andererseits durch zweimaliges Integrieren der Schwingweg  $s$  ermittelt werden. Trägt man nun in Analogie zum Plattendruckversuch die in der Kompressionsphase ermittelten Bodenkontaktkräfte über den Schwingweg (Einsenkung  $s$ ) auf, kann aus den Kraft – Einsenkungsverlauf der zugehörige  $E$ - Modul bestimmt werden. Hierzu wird der Funktionsansatz  $s = f(F_K, E)$  nach Lundberg [38] an die Messwerte  $F_K$  und  $s$  angepaßt. Der über die Methode der Gauß'schen Fehlerquadrate zu bestimmende Parameter ist der  $E$ -Modul. Da der so bestimmte  $E$ - Modul nicht aus einer statischen sondern aus einer dynamischen Belastung abgeleitet wurde, wird dieser mit  $E_{vib}$  bezeichnet

## 8.2 Praktische Erprobung

Im Rahmen einer Vorfeldsanierung am Flughafen Leipzig konnten mit dem neuen Messverfahren der FDVK erste Versuche durchgeführt werden.

- *Das Verdichtungsgerät:*

Zur Verfügung stand eine Vibrationswalze (BW213 DH-3 Variocontrol) der Firma *Bomag* samt Messsystem zur Erfassung des  $E_{vib}$ - Messwertes. Das Verdichtungsgerät kann in zwei verschiedenen Betriebsarten gefahren werden. Im Automatik - Betrieb wird die Wirkrichtung der Verdichtungsunwucht entsprechend der Bodensteifigkeit automatisch den Bodenverhältnissen angepasst. Die vertikale Amplitude wird hierbei kontinuierlich zwischen 0,0 und 2,5 mm eingestellt. Im Arbeitsmodus Hand – Betrieb kann die Wirkrichtung der Verdichtungsunwucht in 6 Stufen vorgegeben werden, wobei in Stufe 1 die Wirkrichtung horizontal steht und keine Messwertaufzeichnung möglich ist. Die vertikal fest einstellbaren Amplituden sind:

Stufe 1 -> horizontal -> Amplitude = 0 mm

Stufe 2 -> Amplitude = 0,6 mm

Stufe 3.-> Amplitude = 1,1 mm

Stufe 4 -> Amplitude = 1,6 mm

Stufe 5 -> Amplitude = 2,0 mm

Stufe 6 -> maximale vertikale Amplitude = 2,5 mm

- *Das Probefeld:*

Bei den Arbeiten am Vorfeld wurde die bestehende Betontragschicht entfernt und der anstehende Boden bis auf eine Tiefe von ca. 1 Meter ausgehoben. Anschließend wurde das Planum hergestellt, wobei der Boden über eine Tiefe von 30 cm mit Zement verfestigt worden ist. Aufbauend folgten weitere drei Schichten verfestigtes Bodenmaterial, worauf abschließend die ursprüngliche Tragschicht wieder hergestellt werden sollte.

Das Versuchsfeld ist auf dem nicht verfestigten Planum angelegt worden. Es bestand aus vier Spuren je 50 m Länge. Abbildung 8-1 zeigt des Probefeld mit den einzelnen Spuren und der Fahrtrichtung der Prüfwalze.

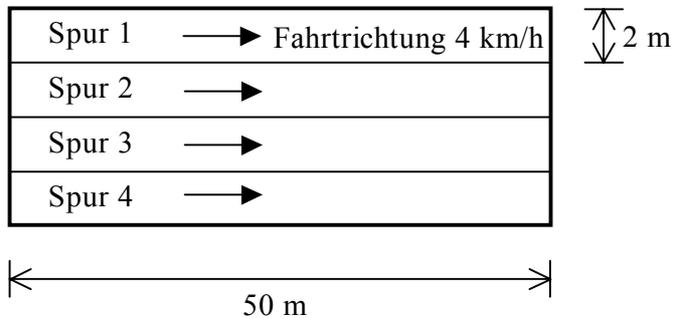


Abbildung 8-1: Versuchsfeld

Mit einer Handbohrsonde wurde an verschiedenen Stellen der Bodenaufbau bis zu einer Tiefe von ca. 1 Meter festgestellt. Das Versuchsfeld kann aufgrund der vorgefundenen Böden in zwei Bereiche eingeteilt werden. Der Bodenbereich I besteht aus Geschiebemergel ( $SU^*/ST^*$  nach DIN 18296, fS, mS, u nach DIN 4022); der Feinkornanteil ( $\varnothing < 0.063\text{mm}$ ) beträgt ca. 28%. Der Boden im Bereich II kann nach DIN 18196 als  $SU^*/ST^*$  (DIN 4022: fS, mS, gS) beschrieben werden, wobei der Feinkornanteil ( $\varnothing < 0.063\text{mm}$ ) nur ca. 18% beträgt. Abbildung 8-2 enthält die Körnungslinie der im Versuchsfeld anstehenden Böden. Der Übergang zwischen Bereich I und II konnte flächendeckend mit Hilfe der FDVK direkt nachvollzogen werden. (siehe Kapitel 8.2.2).

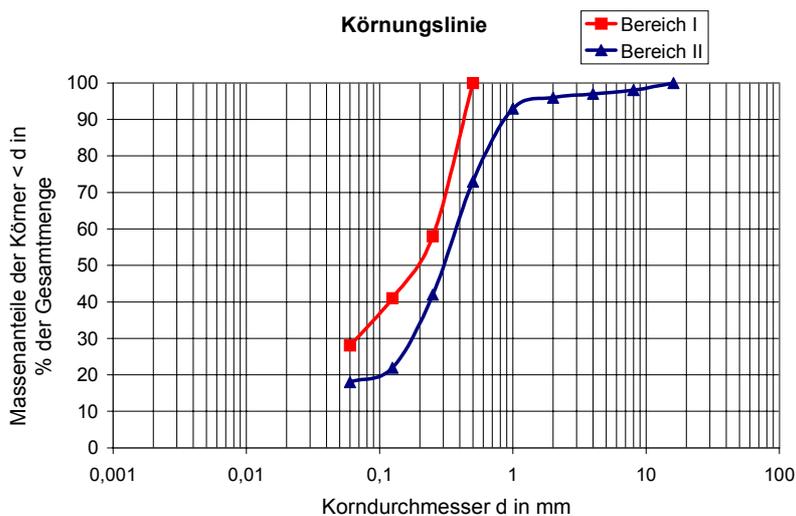


Abbildung 8-2: Korngrößenverteilung der Böden im Versuchsfeld

### 8.2.1 Geschwindigkeitsvariation

Um einen Eindruck darüber zu erhalten, inwieweit der Messwert  $E_{vib}$  von der Fahrgeschwindigkeit der Walze beeinflusst wird, sind auf einer separaten Spur mehrere Überfahrten mit verschiedenen Geschwindigkeiten (3, 4 und 5 km/h) durchgeführt worden. Ausgehend von den Ergebnissen der Versuchsfahrten wurde die Prüfgeschwindigkeit festgelegt. Hierbei können zwei Gesichtspunkte berücksichtigt werden: Zum einen versucht man, durch höhere Geschwindigkeiten ein Zeitersparnis bei der Prüfung gerade größerer Flächen zu erreichen. Zum anderen wird aber ausgehend von Erfahrungen mit herkömmlichen FDVK- Messsystemen das Niveau der Messwerte von der Fahrgeschwindigkeit derart beeinflusst, dass bei höheren Geschwindigkeiten tendenziell niedrige und weniger gut differenzierbare Messwertverläufe erhalten werden. Wohingegen bei langsameren Geschwindigkeiten die Messwerte besser voneinander unterschieden werden können und ihr Messwertniveau im allgemeinen höher ist. In Abbildung 8-3 ist das Ergebnis der Geschwindigkeitsvariation dargestellt. Wie die Messwertverläufe deutlich zeigen, liegt eine Abhängigkeit der Messwerte von der Geschwindigkeit vor. Mit steigender Fahrgeschwindigkeit sinkt das Messwertniveau ab und der Messwertverlauf vergleichmäßigt sich zunehmend. Der Messwertverlauf mit dem größten Niveau und den größten Schwankungen wird bei kleinen Geschwindigkeiten erhalten. In Abbildung 8-4 sind die jeweiligen Spurmittelwerte, Standardabweichungen sowie die Variationskoeffizienten der  $E_{vib}$ - Werte für die entsprechenden Prüfgeschwindigkeiten dargestellt. Der sich hier abzeichnende Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf den Messwert und seiner Streuung wurde in sehr ähnlicher Weise schon bei den herkömmlichen FDVK- Messwerten (*Omega* und *CMV*) erhalten.

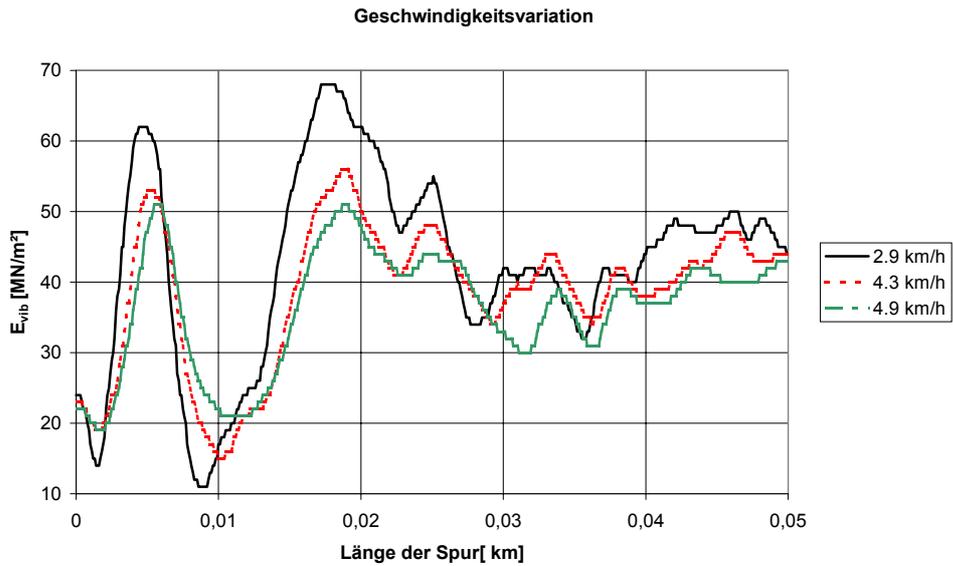


Abbildung 8-3: Messwertverläufe für verschiedene Geschwindigkeiten 2.9, 4.3, und 4.9 km/h

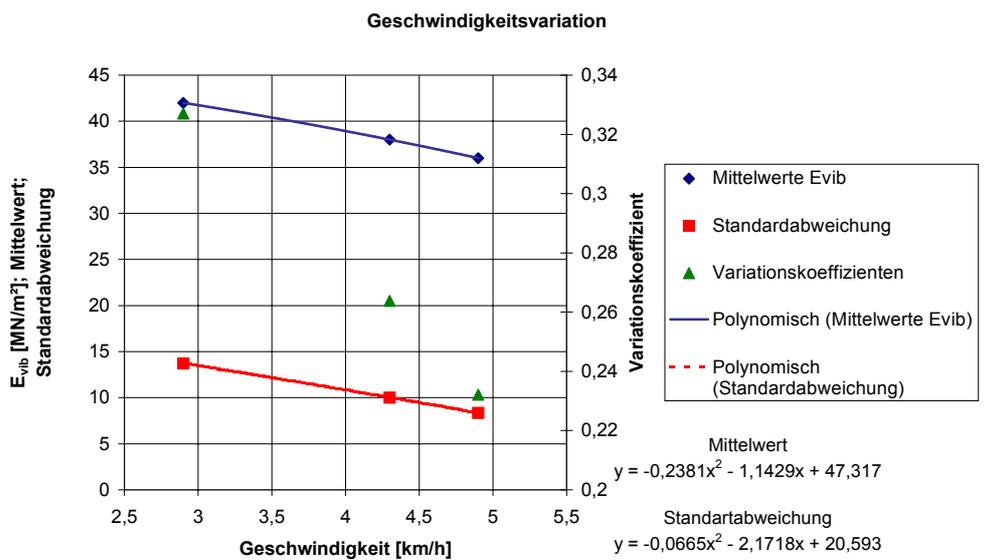


Abbildung 8-4: Mittelwert, Standardabweichung und Variationskoeffizient der Messwerte  $E_{vib}$

### 8.2.2 Reproduzierbarkeit der Messwerte $E_{vib}$ und korrelative Beziehungen zu bodenmechanischen Standardversuchen

Aufgrund von Messfahrten, die am Vortag durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass das Versuchsfeld bereits im fertig verdichteten Zustand vorlag. Deswegen wurden bereits nach der ersten Prüffahrt statische und dynamische Plattendruckversuche als Vergleichsversuche zum  $E_{vib}$ -Wert durchgeführt. Die Stellen, an denen Vergleichsversuche durchgeführt wurden, sind anhand der Messwertaufzeichnung des  $E_{vib}$ - Wertes ausgewählt worden.

Die erste Prüffahrt wurde im „Handbetrieb“ mit einer Amplitude von  $0.6\text{ mm}$  (Stufe 1) durchgeführt. Diese Einstellung wurde gewählt, da zum einen befürchtet wurde, dass mit einer größeren Amplitude Porenwasserüberdrücke entstehen könnten. Diese hätte einen verstärkten Wassertransport aus den Untergrund in das Planum zur Folge gehabt und infolgedessen einen Festigkeitsverlust des Bodens verursacht. Der Wassergehalt hätte als weitere nicht kalkulierbare Größe auf die entsprechenden Messwerte und deren Beziehung zueinander Einfluss genommen. Zum anderen hängt die Messtiefe bzw. das Bodenvolumen, welches durch seine mechanischen Eigenschaften die FDVK- Messwerte (*Omega*- und *CMV*- Wert) beeinflusst, mit der gewählten Amplitude zusammen. Das bedeutet, je größer die Amplitude desto höher ist die Messtiefe des Systems. Dieser Zusammenhang wird auch für den neuen Messwert  $E_{vib}$  erwartet. Versuche, welche diesen Sachverhalt bestätigen, stehen aber noch aus.

Die Messtiefe herkömmlicher FDVK- Systeme ist rund drei mal größer, als beim statischen und beim dynamischen Plattendruckversuch. Um nun die Messtiefe des FDVK- Messsystems mit der des statischen bzw. dynamischen Lastplattenversuches anzunähern, wurde die kleinste mögliche Amplitude im Handbetrieb der Vibrationswalze eingestellt. Hierbei wurde erwartet, dass sich ein guter korrelativer Zusammenhang zwischen den  $E_{vib}$ - Werten und den Verformungsmoduln  $E_{v2}$  und  $E_{vd}$  einstellen würde.

Aufgrund der Versuche zur Wahl der Fahrgeschwindigkeit, ist eine Prüfgeschwindigkeit von  $4\text{ km/h}$  festgelegt worden.

Wie bereits beschrieben, wurden nach der ersten Prüffahrt Vergleichsversuche durchgeführt. Hier sollte der korrelative Zusammenhang zwischen den  $E_{vib}$ - Werten mit den  $E_{v2}$ - und  $E_{vd}$ - Werten untersucht werden. Im Anschluß an die Vergleichsversuche sind weitere Prüffahrten (2, 3, 4 und 5) mit allen möglichen Amplitudeneinstellung auf dem Probefeld gefahren worden. Die zweite Prüffahrt wurde direkt nach den Vergleichsversuchen durchgeführt, wobei der Automatikbetrieb für die Einstellung der Verdichtungskrafttrichtung gewählt wurde.

Da der Untergrund eine verhältnismäßig geringe Steifigkeit aufwies, wurde von der Automatik permanent die maximal mögliche Amplitude von 2,5 mm eingestellt. Diese Amplitude entspricht der 6. Stufe im Handbetrieb der Walze. Für die anschließenden Überfahrten 3, 4 und 5 wurden die Verdichtungsstufen 3 (1,1mm), 4 (1,6mm) und 5 (2,0mm) gewählt. In der Tabelle 8-1 sind die Ergebnisse der Vergleichsversuche und die zugehörigen  $E_{vib}$ -Messwerte der FDVK in der Reihenfolge ihrer Ermittlung dargestellt.

Ergebnisse – Probefeld Flughafen Leipzig											
Reihenfolge			1	2	3			4	5	6	7
Pkt. Nr.:	Spur	Position [m]	$E_{vib}$ [MN/m <sup>2</sup> ] Überfahrt 1	$E_{vd}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v1}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$E_{v2}/E_{v1}$	$E_{vib}$ [MN/m <sup>2</sup> ] Überfahrt 2	$E_{vib}$ [MN/m <sup>2</sup> ] Überfahrt 3	$E_{vib}$ [MN/m <sup>2</sup> ] Überfahrt 4	$E_{vib}$ [MN/m <sup>2</sup> ] Überfahrt 5
			$a_{th} =$ 0,6 mm					$a_{th} =$ 2,5 mm	$a_{th} =$ 1,1 mm	$a_{th} =$ 1,6 mm	$a_{th} =$ 2,0 mm
1	2	28,5	25	10	29,33	8,7	3,73	49	18	26	31
2	2	18,1	10	16,2	39,82	14,33	2,78	46	19	30	40
3	1	21	23	16,8	36,06	12,22	2,95	56	37	42	52
4	1	34,9	11	17,3	38,85	8,67	4,48	48	22	33	37
5	1	48	24	40,6	94,14	36,09	2,61	64	56	71	70
6	4	15	7	17,6	18,86	7,83	2,41	7	6	5	12

Tabelle 8-1: Ergebnisse der Vergleichsversuche und der  $E_{vib}$  – Werte entsprechend der Reihenfolge der Versuchsdurchführung

### 8.2.2.1 Reproduzierbarkeit der Messwerte $E_{vib}$

In den folgenden Abbildungen sind die Messwertverläufe der Überfahrten 1, 2, 3, 4 und 5 für jede der vier Prüfspuren dargestellt. Außerdem sind die Ergebnisse der statischen Plattendruckversuche ( $E_{v2}$ ) mit in die Messwertverläufe eingezeichnet. In den Verläufen der Messwerte ist deutlich der Übergang von Bodenbereich I zu Bodenbereich II zu erkennen. Der Bereich, mit dem feinkornreicheren Boden im Untergrund, erstreckt sich von Bahnbeginn bei 0 m über eine Länge von ca. 15 m in Spur 1 und in Spur 4 über ca. 20m. Je größer die Amplitude bei der Prüffahrt gewählt wurde, desto deutlicher können die Bodenbereiche voneinander unterschieden werden.

Die Verläufe der  $E_{vib}$ -Werte der verschiedenen Überfahrten (1, 2, 3, 4 und 5) im Bodenbereich I unterscheiden sich im wesentlichen kaum voneinander und haben ein ähnlich niedriges Niveau. Ausgenommen hiervon sind teilweise die Messwerte  $E_{vib}$  der ersten

Überfahrt. Obwohl diese Prüffahrt mit der kleinsten Amplitude ( $0,6\text{ mm}$ ) durchgeführt wurde, sind die  $E_{vib}$ -Werte bereichsweise deutlich höher als die der anderen Überfahrten mit größeren Amplituden. Anscheinend wurden bereits nach der ersten Überfahrt durch die Verdichtung der feinkornreichen Sande Porenwasserüberdrücke erzeugt. Der resultierende Festigkeitsverlust des Bodens wurde bei den nachfolgenden Überfahrten einerseits durch die Messwerte  $E_{vib}$  registriert und zudem durch die Verdichtungskraftwirkung der Walze weiter verstärkt.

Im Bodenbereich II stellen sich die Messwertverläufe von  $E_{vib}$  in Abhängigkeit von der gewählten Verdichtungsamplitude dar. Das heißt, je größer die Amplitude desto höher des Messwertniveau. Der Unterschied der Messwertverläufe beruht somit im vorliegenden Fall vorwiegend auf der Wirkung der Verdichtungskraft, und nicht auf einer Zunahme der Verdichtung infolge einer steigenden Anzahl an Überfahrten sowie nicht auf einer übermäßigen Beeinflussung durch den Wassergehalt. Dies wird aus der Reihenfolge der gewählten Amplituden bei jeder Überfahrt deutlich. In der Legende zu jeder Abbildung sind von oben nach unten die verwendeten Amplituden der Überfahrten in der zeitlich richtigen Reihenfolge angegeben. Hier ist zu sehen, daß bei der ersten Überfahrt mit der kleinsten Amplituden ( $0,6\text{ mm}$ ) auch das niedrigste Messwertniveau erhalten wurde. Demgegenüber steht das höchste ermittelte Messwertniveau bei der zweiten Überfahrt mit der größten Amplitude von  $2,5\text{ mm}$ . Die Niveaus der Messwerte der Überfahrten 3, 4 und 5 reihen sich in aufsteigender Folge entsprechend der gewählten Amplituden ( $1,1\text{ mm}$ ;  $1,6\text{ mm}$ ;  $2,0\text{ mm}$ ) zwischen den Extremwerten der ersten ( $0,6\text{ mm}$ ) und zweiten ( $2,5\text{ mm}$ ) Überfahrt ein. Aufgrund der Messwertverläufe im Bodenbereich II kann gefolgert werden, daß die Größe der Messwerte  $E_{vib}$  von der gewählten Amplitude abhängen. Ob sich dieser Sachverhalt auch bei Anwendungen auf grobkörnigen Böden in gleicher Weise zeigt, muß noch untersucht werden.

Darüber hinaus zeigen die Verläufe von  $E_{vib}$ , dass sich diese zwar in ihrem Wertniveau unterscheiden, ansonsten aber von Überfahrt zu Überfahrt reproduziert werden. Das bedeutet, daß Bodenbereiche mit unterschiedlicher Steifigkeit durch Folgeüberfahrten mit anderen Amplituden und Geschwindigkeiten auch wieder voneinander unterschieden werden können.

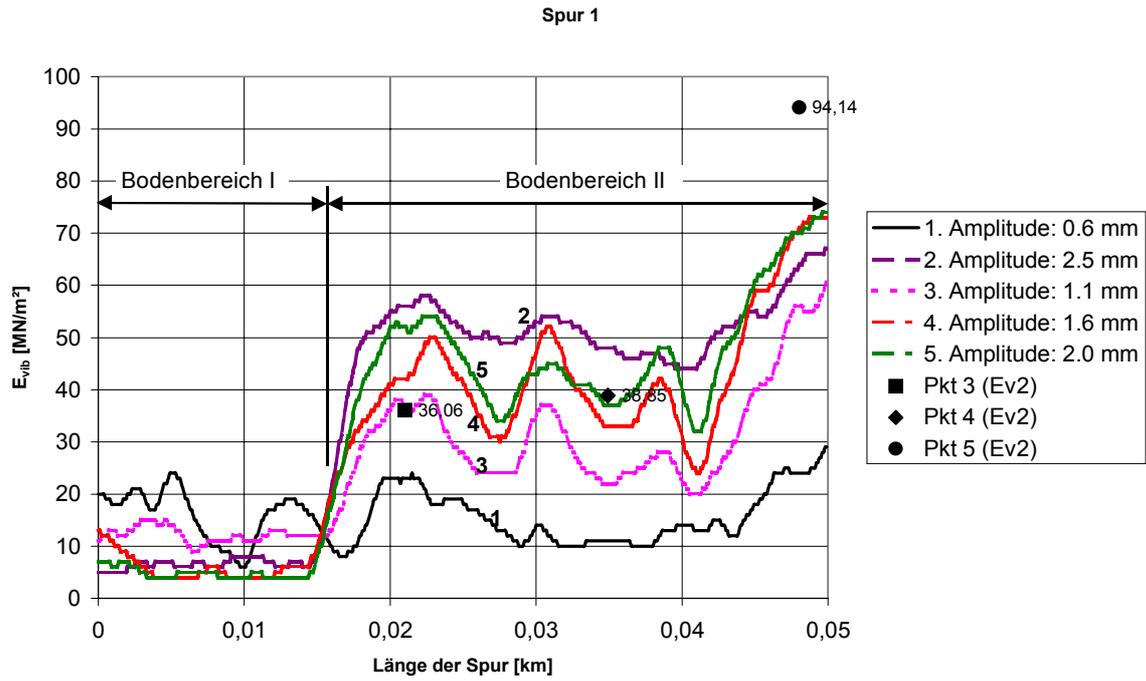


Abbildung 8-5: Spur 1

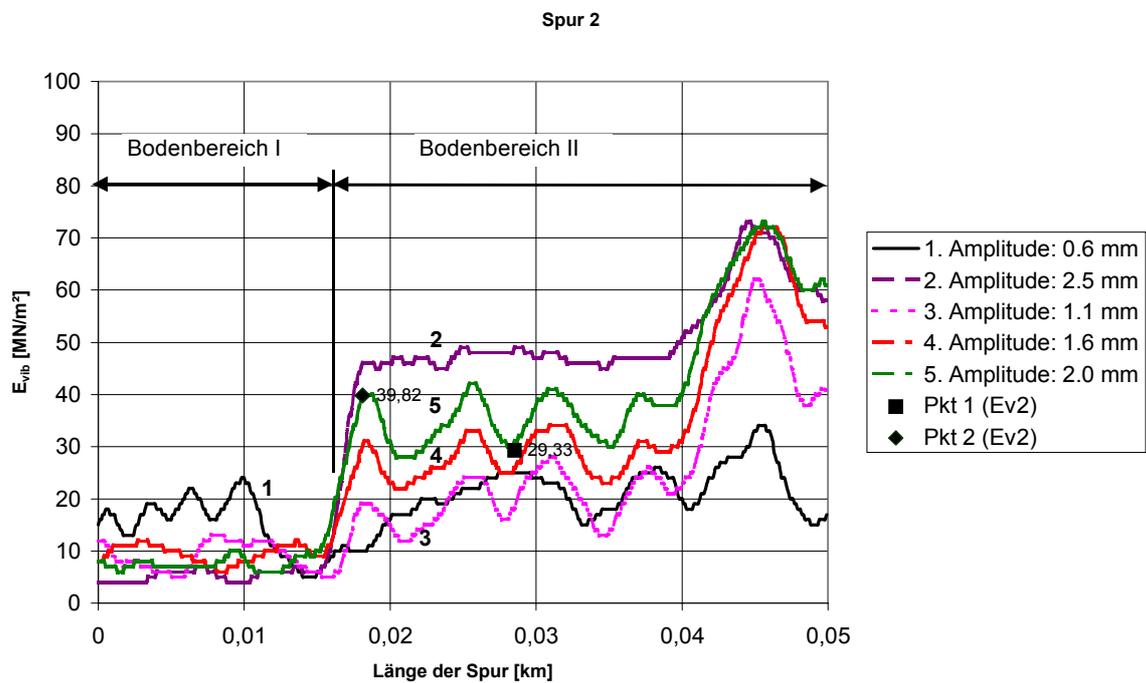


Abbildung 8-6: Spur 2

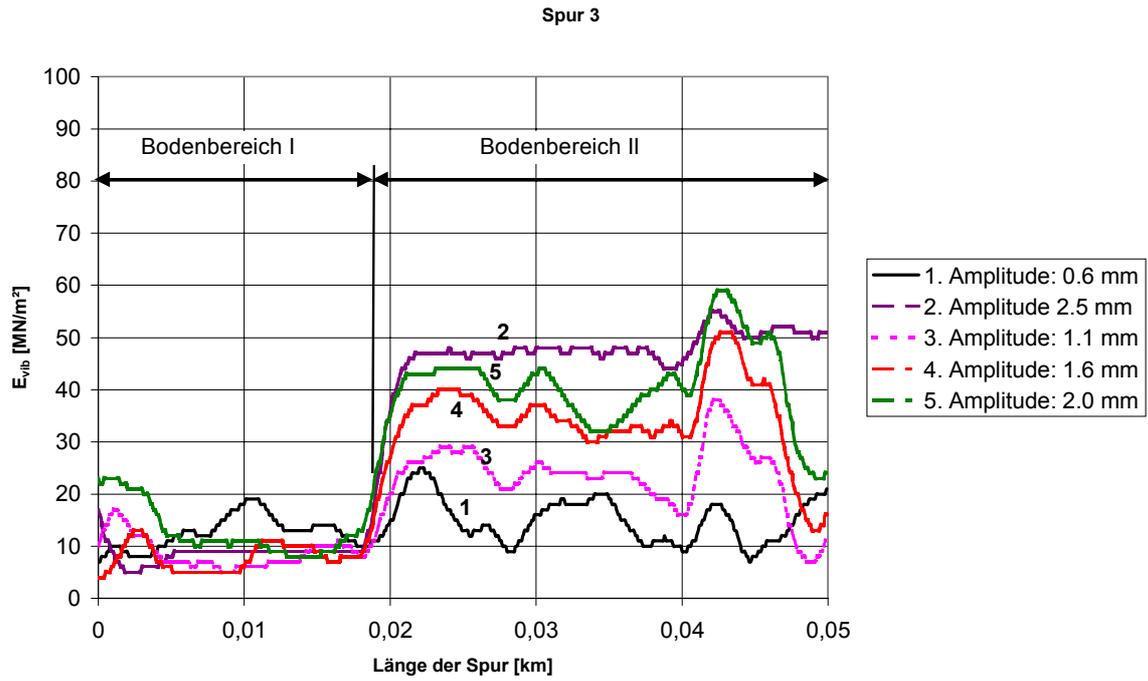


Abbildung 8-7: Spur 3

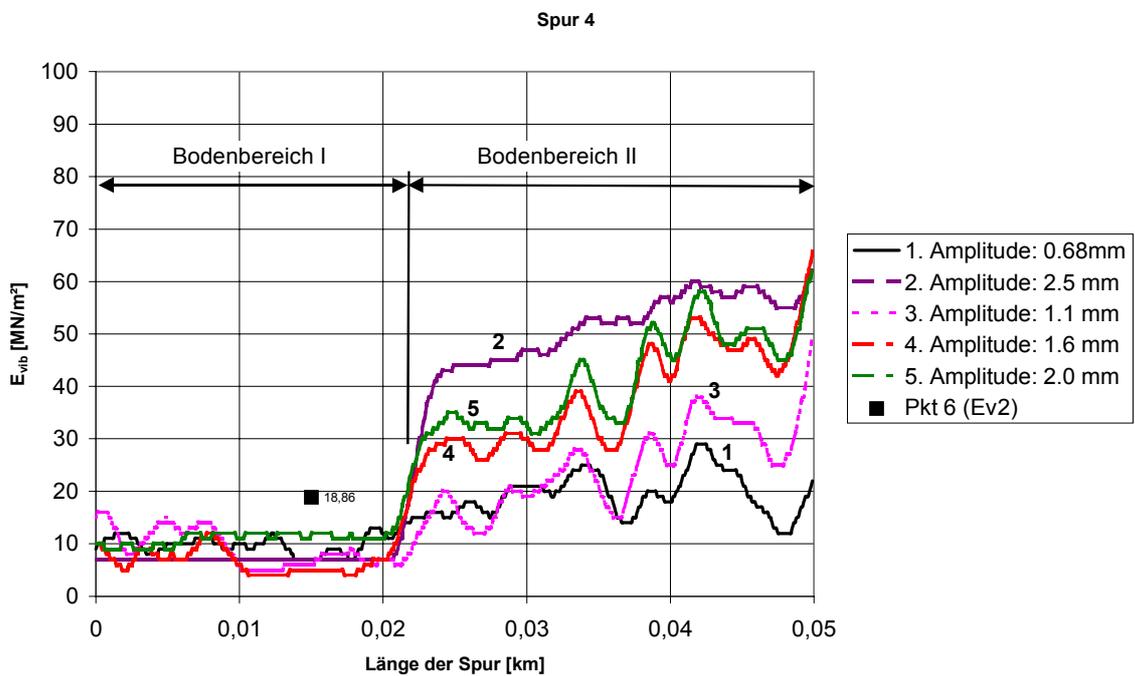


Abbildung 8-8: Spur 4

### 8.2.2.2 Korrelative Beziehungen zu bodenmechanischen Standardversuchen

Im folgenden wird der Messwertzusammenhang zwischen dem  $E_{vib}$ - Wert der FDVK und dem Verformungsmodul  $E_{v2}$  und  $E_{v1}$  des statischen Plattendruckversuches untersucht. Die  $E_{vib}$ -Werte, zu denen in den einzelnen Abbildungen Regressionsgeraden angegeben sind, unterscheiden sich hinsichtlich der bei der Prüffahrt verwendeten Amplitude. In den Abbildungen sind unter Berücksichtigung der entsprechend vorliegenden Datenpaare ( $E_{vib}$ ,  $E_{v2}$  bzw.  $E_{v1}$ ) Regressionsgeraden berechnet und mit durchgezogenen Linien eingezeichnet worden. Darüber hinaus wurden mögliche Ausreißer in den Daten berücksichtigt. Dies geschah nur für die Messwertbeziehung  $E_{vib}$  zu  $E_{v2}$ . Die hierbei ermittelten Regressionsfunktionen sind mit gestrichelten Linien dargestellt. Außerdem sind die im jeweiligen Fall als Ausreißer bezeichneten Datenpaare mit ihrer Punktnummer gekennzeichnet. Zur genaueren Identifikation der Daten, sind diese in Tabelle 8-1 enthalten. In Abbildung 8-9 sind die Regressionsgeraden zu den  $E_{vib}$ - Werten dargestellt, welche bei der Prüffahrt mit einer Amplitude von  $0,6\text{ mm}$  (Stufe 2) erhalten wurden. Wie bereits beschrieben, repräsentieren die durchgezogenen Linien die Regressionsgeraden bei der alle sechs Datenpaare in die Berechnung eingegangen sind. Hierbei wird ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,2126$  ( $E_{vib} - E_{v2}$ ) und  $R^2 = 0,1939$  bei ( $E_{vib} - E_{v1}$ ) erhalten. Unter Vernachlässigung der Punkte 1 und 3 errechnet sich für  $E_{vib}$  zu  $E_{v2}$  eine Regressionsgerade mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,9889$ .

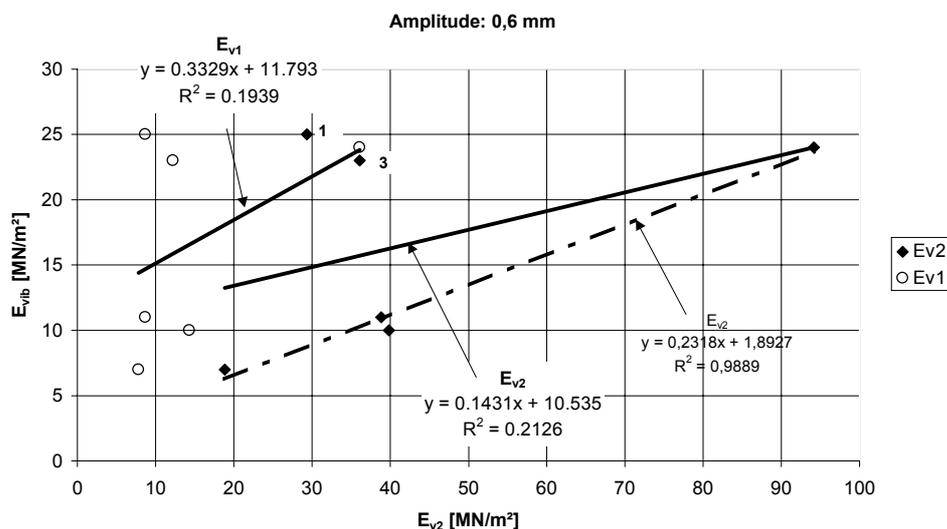


Abbildung 8-9: Regression:  $E_{vib} - E_{v2}$ : Amplitude 0,6mm

Zu den in Abbildung 8-10 dargestellten Regressionsgeraden, wurden die  $E_{vib}$ - Werte mit einer Amplitude von  $1,1\text{ mm}$  (Stufe 3) aufgezeichnet. Zum Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,8141$

kann unter der Vernachlässigung des Datenpunktes 3 eine Regressionsgerade mit einem  $R^2$  von 0,9843 für die Beziehung  $E_{vib} - E_{v2}$  errechnet werden.

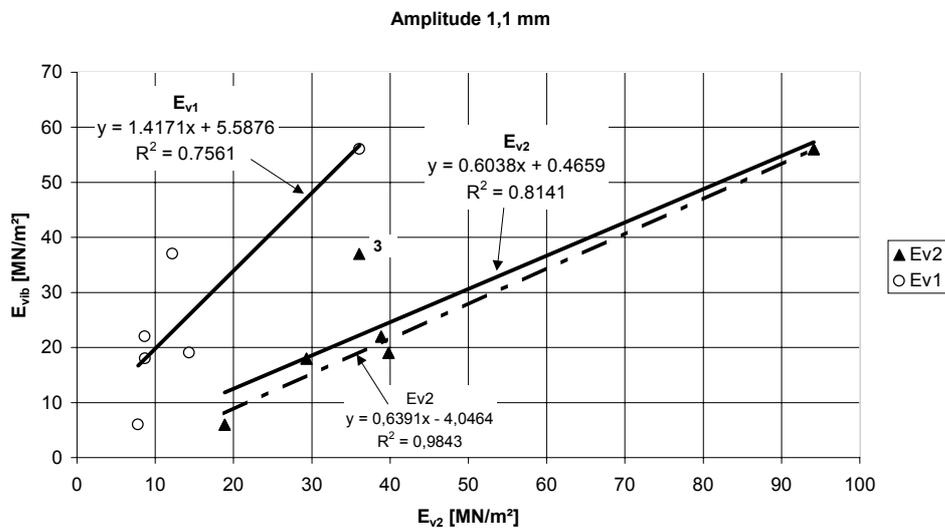


Abbildung 8-10: Regression:  $E_{vib} - E_{v2}$ : Amplitude 1,1 mm

In Abbildung 8-11 sind die Regressionsgeraden dargestellt, welche sich aus  $E_{vib}$ - Werten mit einer Verdichtungsamplitude von 1,6 mm errechnen lassen. In weiteren wurde einerseits der Punkt 6 ( $R^2 = 0,9078$ ) und andererseits der Punkt 5 ( $R^2 = 0,7599$ ) als Ausreißer der Messwertbeziehung  $E_{vib} - E_{v2}$  betrachtet und aus den Datensatz entfernt.

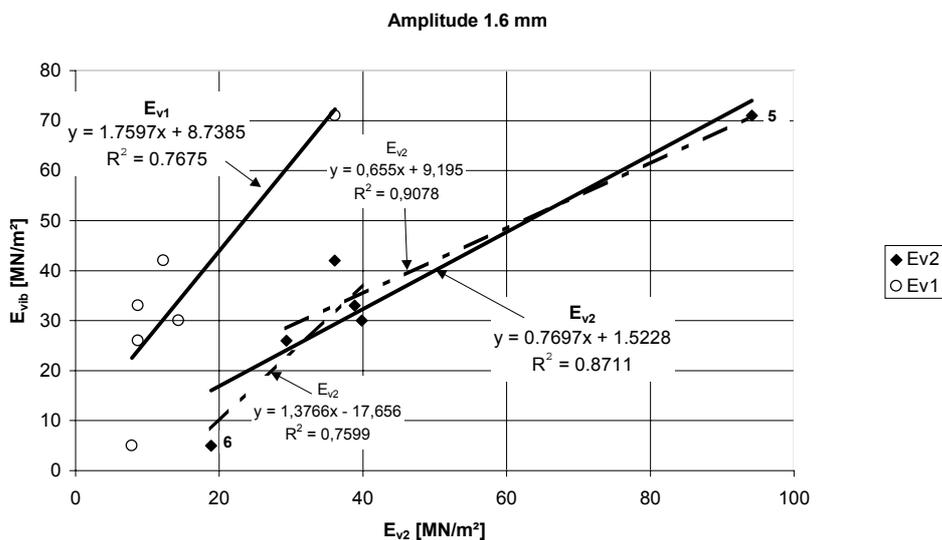


Abbildung 8-11: Regression:  $E_{vib} - E_{v2}$ : Amplitude 1,6 mm

Erst ab einer Amplitude von 1,6 mm konnten die zwei verschiedenen Bodenbereiche (I und II) im Versuchsfeld anhand des Messwertverlaufes von  $E_{vib}$  deutlich voneinander unterschieden werden. Der Messwert des Punktes 6 liegt in Bodenbereich I. Aufgrund dessen ist gerade der

Punkt 6 als möglicher Ausreißer betrachtet worden. Der Punkt 5 wurde aufgrund seines hohen  $E_{v2}$ - Wertes gegenüber dem  $E_{vib}$ - Wert ebenso als möglicher Ausreißer behandelt.

Durch die Messwertaufzeichnung mit einer Amplitude von  $2,0\text{ mm}$  ergeben sich die Abbildung 8-12 eingetragenen Regressionsgeraden. Im folgenden sind wieder die Datenpunkte 5 bzw. 6 aus dem Datensatz entfernt worden. Die Bestimmtheitsmaße  $R^2$  sind der Abbildung zu entnehmen

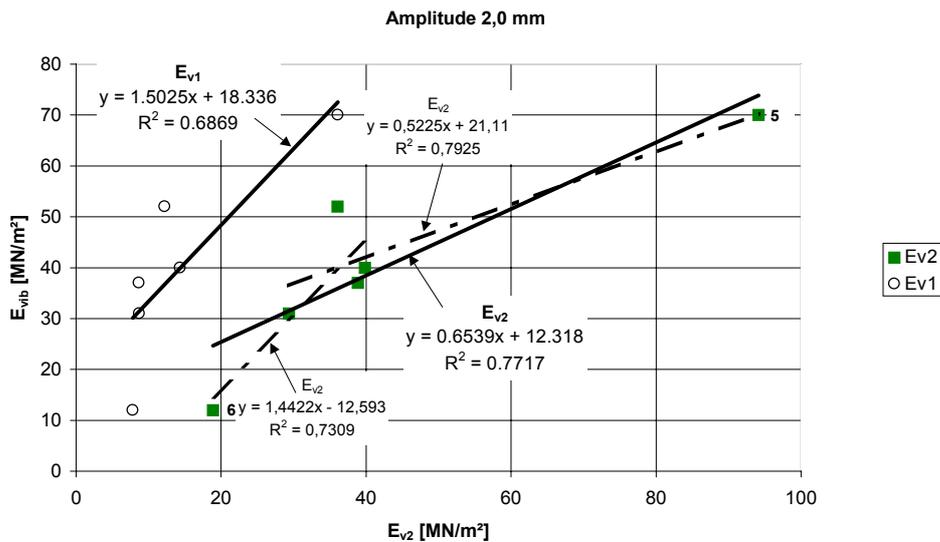


Abbildung 8-12: Regression:  $E_{vib}$  -  $E_{v2}$ : Amplitude 2,0 mm

In der Abbildung 8-13 sind die Messdaten ausgewertet worden, welche mit einer Verdichtungsamplitude von  $2,5\text{ mm}$  aufgezeichnet wurden. Wiederum wurden die Regressionsgeraden ohne Punkt 5 bzw. Punkt 6 berechnet.

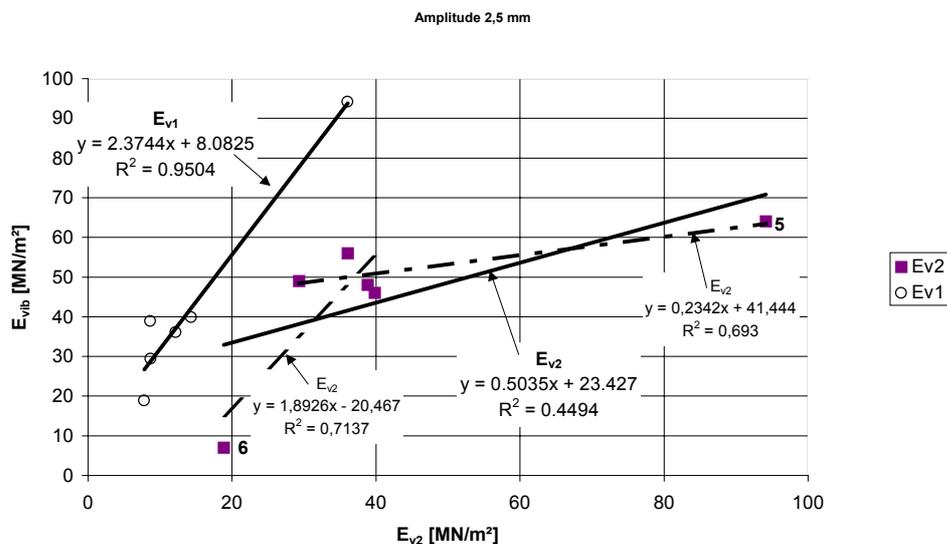


Abbildung 8-13: Regression:  $E_{vib}$  -  $E_{v2}$ : Amplitude 2,5 mm

In Abbildung 8-14 sind die Korrelationskoeffizienten für die Beziehung  $E_{vib} - E_{v2}$  entsprechend der verwendeten Verdichtungsamplitude dargestellt. Zum Vergleich sind die Korrelationskoeffizienten angegeben, bei denen einerseits alle Datenpaare und andererseits mögliche Ausreißer berücksichtigt wurden. Gehen alle Datenpaare in die Korrelationsanalyse ein, wird bei einer Amplitude von  $1,6\text{ mm}$  der signifikanteste Messwertzusammenhang erhalten. Die schlechteste Korrelation ergibt sich bei einer Amplitude von  $0,6\text{ mm}$ . Dies steht im Gegensatz zu der zu Beginn gemachten Annahme, daß sich aufgrund einer möglichst kleinen Verdichtungsamplitude die Messtiefen des statischen Plattendruckversuches und der FDVK Prüfung weit möglichst annähern. Dadurch wurde entgegen dem erhaltenen Ergebnis eine optimale korrelative Beziehung zwischen den Messwerten  $E_{vib}$  und  $E_{v2}$  gerade im Vergleich mit den anderen einstellbaren Amplituden erwartet. Durch Vernachlässigen von möglichen Ausreißern lassen sich bei der Auswertung höhere Korrelationskoeffizienten ermitteln, wobei die ausgeschlossenen Datenpaare einerseits aufgrund ihrer Messwertgröße als auch hinsichtlich ihrer Lage im Versuchsfeld ausgewählt wurden.

Folgende Datenpaare wurden aus den Datensätzen  $E_{vib} - E_{v2}$  entfernt. Die sich ergebenden Korrelationskoeffizienten sind in Abbildung 8-14 dargestellt.

- Amplitude  $0,6\text{ mm}$ : Datenpunkt 1 und 3
- Amplitude  $1,1\text{ mm}$ : Datenpunkt 3
- Amplitude  $1,6\text{ mm}$ : Datenpunkt 6
- Amplitude  $2,0\text{ mm}$ : Datenpunkt 6
- Amplitude  $2,5\text{ mm}$ : Datenpunkt 6

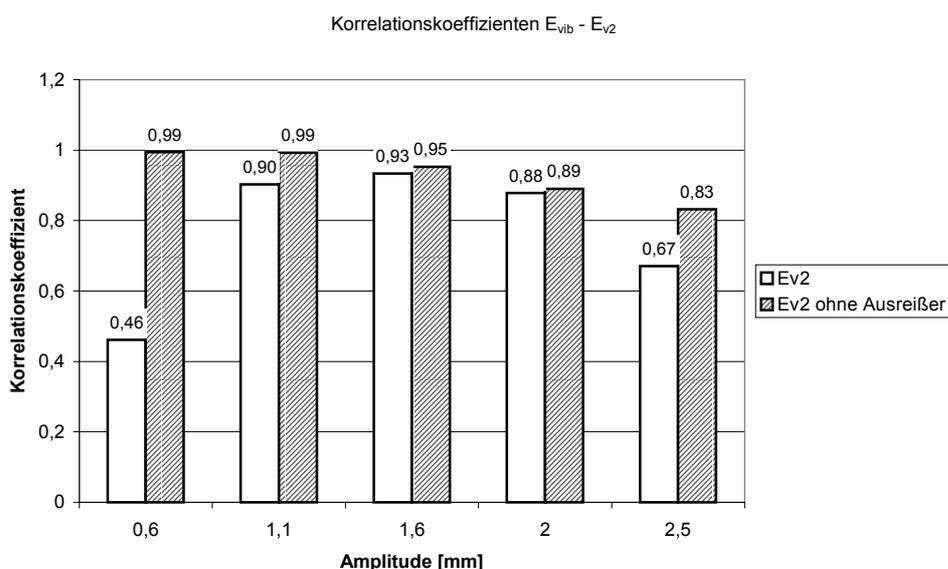


Abbildung 8-14: Regressionskoeffizienten  $r$  der Betrachtung für die Amplituden  $0,6\text{ mm}$  /  $1,1\text{ mm}$  /  $1,6\text{ mm}$  /  $2,0\text{ mm}$  und  $2,5\text{ mm}$

Die sich aus den bereinigten Datensätzen ermittelten Regressionsgeraden sind in Abbildung 8-15 dargestellt. Hier wird noch einmal deutlich, daß sich in Abhängigkeit der Verdichtungsamplitude das Messwertniveau der  $E_{vib}$ -Werte verändert und dadurch vollkommen unterschiedliche Messwertzusammenhänge ermittelt werden.

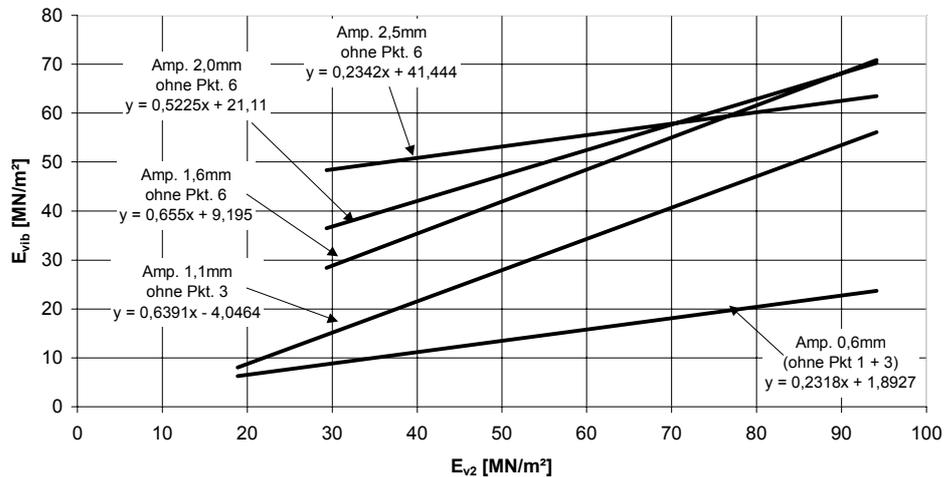


Abbildung 8-15: Vergleich der Regressionsgeraden für die der Betrachtung für die Amplituden 0,6mm / 1,1mm / 1,6mm / 2,0mm und 2,5mm

### 8.3 Ergebnisse der Erprobung

In diesem Kapitel wurde ein neues Auswerteverfahren der an der Walzenbandage gemessenen Beschleunigungen vorgestellt. Diese ist erst seit kurzer Zeit in Verbindung mit dem FDVK-Messsystem der Firma *BOMAG* auf dem Markt. Die Messwerte, welche dieses System liefert, werden mit  $E_{vib}$  bezeichnet und stellen eine physikalische Größe mit der Einheit  $[MN/m^2]$  dar. Zur Messwertbildung wurden die Grundlagen erklärt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das FDVK- Messverfahren auf einem schluffigen Sand praktisch erprobt. Hierzu wurden  $E_{vib}$ - Werte bei unterschiedlichen Amplitudeneinstellungen aufgenommen, sowie die Fahrgeschwindigkeit der Prüfwalze variiert. Hierbei zeigte sich, dass der  $E_{vib}$ - Wert sowohl von der Fahrgeschwindigkeit als auch von der eingestellten Amplitude der Verdichtungsunwucht abhängig ist. Bei kleinen Amplituden werden kleinere  $E_{vib}$ - Werte als bei großen Amplituden erhalten. Anders verhält es sich bei der Fahrgeschwindigkeit. Mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt das Messwertniveau ab und der Verlauf vergleichmäßigt sich, wohingegen bei abnehmender Geschwindigkeit das Messwertniveau steigt und die Messwerte einen "markanteren" Verlauf entlang der Prüfspur erhalten. Hierdurch können Bodenbereiche mit verschiedenen Steifigkeiten weniger gut voneinander unterschieden werden. Obwohl sich die Messwertniveaus bei veränderten Maschinenparametern (Amplitude und Geschwindigkeit) voneinander unterscheiden, wurden Bodenbereiche mit niedrigen als auch mit hohen Steifigkeiten bei Folgeüberfahrten, auch wiedererkannt. Das System liefert somit bei konstanten Maschinenparametern reproduzierbare Messwerte.

Bei der Betrachtung der korrelativen Zusammenhänge zwischen den  $E_{vib}$ - und den  $E_{v2}$ - Werten konnten Regressionsgeraden aufgestellt werden. Diese unterscheiden sich aber hinsichtlich der verwendeten Amplituden bei der Messwertaufzeichnung stark voneinander. Die Unterschiede lagen zum einem im Messwertniveau der Regressionsgeraden und zum anderen in den erhaltenen Korrelationskoeffizienten. Welche Vorteil dieses neue Auswerteverfahren der Beschleunigungsmesswerte der FDVK gegenüber herkömmlichen letztlich bietet, muss noch durch weitere Versuche mit veränderten Randbedingungen untersucht werden. Die hier durchgeführte Untersuchung sollte nur als Betrachtung für diesen speziellen Fall verwendet werden.

## 9 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden Zusammenhänge zwischen Kennwerten untersucht, die sich einerseits aus Beschleunigungsmessungen an Vibrationswalzen und andererseits aus bodenmechanischen in situ Versuchen ergeben. Mit diesen Kennwerten wird im Erd- und Verkehrswegebau der Verdichtungszustand von Böden überprüft.

In Sprachgebrauch und Literatur hat sich für die Methode der Verdichtungsprüfung mittels Beschleunigungsmessungen an Vibrationswalzen die Bezeichnung Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) durchgesetzt. Die Vorteile der FDVK- Methode gegenüber herkömmlichen bodenmechanischen in situ Versuchen liegen vor allem darin, dass die Verdichtungsprüfung arbeitsintegriert erfolgen kann und wegen einer kontinuierlichen Messwertaufzeichnung eine flächendeckende Aussage über die Verdichtungsqualität der Grundgesamtheit des Prüfloses ermöglicht. Für den FDVK- Messwert liegen bisher noch keine allgemeingültigen Anforderungswerte vor, mit denen ein Qualitätskriterium für eine ausreichende Verdichtung festgelegt werden könnte. Deswegen muss nach dem derzeitigen Entwicklungsstand der FDVK- Messwert für jede Baustelle, jede Bodenart und jedes Verdichtungsgerät an einem herkömmlichen bodenmechanischen Anforderungswert ( $E_{v2}$ ,  $D_{Pr}$ , usw.) kalibriert werden. Eine Kalibrierung ist mit einem erheblichen Zeit- und Kostenaufwand verbunden, was für kleinere und mittlere Baumaßnahmen nicht immer rentabel ist.

Die durchgeführten Auswertungen zeigen als Ergebnis Zusammenhänge auf, aus denen Anforderungswerte für den *FDVK- Messwert* angegeben werden können. Als Grundlage der Auswertungen wurde eine Datenbank erstellt, in welche Walzenkalibrierungen verschiedener Anwendungsfälle eingetragen wurden. Aus dieser können die Kalibrierdaten nach unterschiedlichen Gesichtspunkten abgefragt werden, wobei sich die Auswertungen auf den FDVK- Messwert *Omega* des Messsystems *Terrameter* der Firma *BOMAG* und den Verformungsmodul  $E_{v2}$  sowie den Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  bei grob- und gemischtkörnigen Bodenarten beschränkte.

Ein Großteil der Datensammlung stammt aus Versuchen, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Zusätzlich wurden vorliegende Daten aus früheren Forschungsarbeiten in die Datenbank eingearbeitet und bundesweit bereits bestehende FDVK- Kalibrierdaten gesammelt. Folgende Gesichtspunkte wurden dabei berücksichtigt: Anwendungsfall, Einbaubereich, Anforderung, Bodenart, Einbaumaterial, Walzentyp, Walzenparameter,

Messsystem. Darüber hinaus waren alle Bereiche des Erdbaues von Interesse, bei denen die FDVK eingesetzt werden konnte, wie Einschnitts-, Auftrags- und Dammbereiche, Erdplanien und Tragschichten. Unter Mithilfe von Straßenbauämtern, Ingenieurbüros, Baufirmen usw. konnte eine breite Datenbasis geschaffen werden.

Der FDVK-Messwert *Omega* ist von verschiedenen Randbedingungen (z.B.: Bodenart, Wassergehalt, Schichtdicke, Walzengewicht, Vibrationsfrequenz, Unwuchtkraft, Fahrgeschwindigkeit) abhängig. Diese wirken auf unterschiedlich starke Weise zusammen und nehmen überdies Einfluss auf die korrelative Beziehung zwischen *Omega*- und Vergleichswert ( $E_{v2}$ ,  $D_{Pr}$ , etc). Damit die Einflüsse aus den Maschinenparametern verschiedener Vibrationswalzen auf den *Omega*-Wert beurteilt werden können, wurde ein Simulationsmodell entwickelt, mit welchem das Bewegungsverhalten von Vibrationswalzen im Verdichtungsbetrieb nachbildet werden kann. Das Simulationsmodell teilt sich in zwei Abschnitte: der erste Teil behandelt das mechanische System der Vibrationswalze, während der zweite Teil auf die Modellbildung des Bodens eingeht. Für das Modell werden Kennwerte verwendet, mit denen der Baugrund durch ein Feder - Dämpfer - Modell ersetzt werden kann. Hierzu sind grundlegende dynamische Eigenschaften des elastisch isotropen Halbraumes dargestellt und notwendige Parameter ermittelt worden. Aus dem mechanischen Modell der Vibrationswalze und den Bodenkenngrößen wird anschließend das vollständige Schwingungssystem aufgestellt. Bei der analytischen Beschreibung des Schwingungsverlaufes wird zwischen den Zuständen Sprung- und Auflastbetrieb unterschieden. Im Gegensatz zum reinen Auflastbetrieb mit permanentem Bodenkontakt der Walzenbandage, wird für den Sprungbetrieb keine geschlossene Lösung angegeben. Die Auflastphase und Flugphase der Maschine werden abschnittsweise definiert und mittels Übergangsbedingungen gekoppelt. Für den Boden liegt zur Flugphase der Walzenbandage eine Kriechphase vor. Das gesamte Simulationsmodell wurde in MATLAB® / Simulink® programmiert und ausgewertet.

Aus den Rechenergebnissen der Walzensimulation wurde ein neuer Messwert ( $P_{Sim}$ ) abgeleitet, welcher analog zum Messprinzip des *BOMAG Terrameters* (Messwert: *Omega*) aus der in den Boden abgegebenen effektiven Verdichtungsenergie berechnet wird. Der mit  $P_{Sim}$  bezeichnete neue Messwert dient zur Beurteilung in welchem Maß sich die *Omega*-Werte verschiedener Vibrationswalzen voneinander unterscheiden. Für exemplarisch ausgewählte Vibrationswalzen werden in Abhängigkeit vom Porenanteils  $n$  des Bodens Messwertverläufe von  $P_{Sim}$  berechnet und dargestellt. Durch einen Vergleich entsprechender  $P_{Sim}$ -

Werte mit Messgrößen (abgeleitet aus Beschleunigungsmessungen an Walzenbandagen) aus der Literatur, konnte das Simulationsmodell verifiziert werden.

Mittels der eingeführten  $P_{Sim}$ -Werte wurden Korrekturfaktoren bestimmt, die es erlauben, *Omega*-Werte unterschiedlicher Walzen auf ein Bezugsniveau umzurechnen. Zudem ist das Messwertniveau der *Omega*-Werte von der Fahrgeschwindigkeit der Walze abhängig, weshalb eine Korrekturformel abgeleitet wurde, mit welcher der Fahrgeschwindigkeitseinfluss auf den *Omega*-Wert berücksichtigt werden kann. Sämtliche in der Datenbank befindlichen *Omega*-Werte sind mit den Korrekturfaktoren aus dem Simulationsmodell auf das Messwertniveau einer Bezugswalze umgerechnet und an eine Bezugsgeschwindigkeit von 4 km/h angepasst worden. Dadurch konnten die Kalibrierdaten in Bezug auf die Maschinenparameter und die Fahrgeschwindigkeit weitestgehend homogenisiert werden.

In der Arbeit ist die Möglichkeit einer Regressionsrechnung mittels neuronaler Netze betrachtet worden. Zur Konfiguration eines Ausgangsnetzes wurde ein multipler linearer Regressionsansatz gewählt und es wurden erste Auswertungen zwischen *Omega* und  $E_{v2}$  sowie weiterer Variablen durchgeführt. Die Regressionsergebnisse zeigen, daß sich ein Hauptteil der Varianz der *Omega*-Werte durch den Verformungsmodul  $E_{v2}$  erklärt lässt. Da einerseits der Messwertzusammenhang *Omega* -  $E_{v2}$  wesentlich durch einen linearen Ansatz beschrieben werden kann und andererseits zusätzliche Variablen (wie Schichtdicke, Ungleichförmigkeits- und Krümmungszahl usw.) kaum einen Einfluss auf die Zusammenhänge in den vorliegenden Daten nehmen, wurde die Modellierung eines neuronalen Netzes nicht weiter verfolgt.

Im weiteren Vorgehen wurden die Kalibrierdaten nach ihren Randbedingungen klassifiziert, und mit Methoden der Regressions- und Korrelationsanalyse ausgewertet. Zum gewählten bilinearen Regressionsansatz wurde eine Testprozedur zur Überprüfung ausreichender Korrelations- und Regressionskoeffizienten vorgestellt. Einführend sind für die Daten und die zugehörigen Störgrößen die Normalverteilung angenommen worden.

Bei der Auswertung wurde grundsätzlich zwischen grobkörnigen und gemischtkörnigen Böden bis zu einem Feinkornanteil (Korndurchmesser  $d < 0,06 \text{ mm}$ ) von 15% sowie zwischen der Randbedingung: "mit Untergrundeinfluss" und "ohne Untergrundeinfluss" unterschieden. Zusätzlich wurde untersucht, ob durch Logarithmieren der Daten bessere korrelative Zusammenhänge hergestellt werden können, als mit nicht logarithmierten Daten. Ausgangspunkt dieses Ansatzes war die Annahme, dass die Daten, *Omega*- und Vergleichswert, jeweils einer Normalverteilung folgen. Aus diesem Grund sollten die vorliegenden Daten keine

Variationskoeffizienten  $C_v$  größer 0,3 aufweisen, um dem Ansatz einer Normalverteilung zu rechtfertigen. In einigen Fällen wiesen die Variationskoeffizienten  $C_v$  jedoch größere Werte auf, so dass die Versuchsdaten durch Logarithmieren in eine Normalverteilung transformiert wurden.

Bei den verwendeten Regressionsansätzen der Form:  $y = a + b \cdot x$  bzw.  $y = a \cdot x^b$  wurde der Verformungsmodul  $E_{v2}$  bzw. der Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  als unabhängige Variable ( $X$ ) gewählt. Die Regressionsgerade erlaubt damit den Schluss auf die abhängige Zielgröße *Omega* ( $Y$ ). Zu den ermittelten Regressionsfunktionen sind die 95% Vertrauensbereiche für den Mittelwert und die 95% Prognosebereiche für den Einzelwert dargestellt.

Die Ergebnisse der Kalibrierdatenauswertung wurden in Tabellen zusammengefasst, aus denen in Abhängigkeit von Bodenart, Schichteneinfluss, Verdichtungsamplitude und vorgegebenen Verformungsmodul  $E_{v2}$  bzw. Verdichtungsgrad  $D_{Pr}$  ein Anforderungswert für den *Omega*-Wert festgelegt werden kann. Die angegebenen Tabellenwerte sind Mittelwerte, welche mehr oder weniger stark von den erforderlichen Werten abweichen können. Zur Anpassung des entsprechenden Tabellenwertes an bestimmte Baustellenverhältnisse kann im Rahmen der in den Tabellen angegebene obere bzw. untere Grenzwert verwendet werden. Da die Tabellenwerte überdies für ein Bezugsniveau abgeleitet wurden, müssen diese mit den Korrekturfaktoren aus der Walzensimulation auf die vor Ort zum Einsatz kommende Vibrationswalze umgerechnet werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen eine Möglichkeit auf, bei Fehlen einer gültigen Kalibrierung einen Anforderungswert für den *Omega*-Wert zu erhalten. Dadurch kann für kleinere bis mittlere Baumaßnahmen eine Kalibrierung vor Ort entfallen. Sollten besondere Anforderungen an die Verdichtungsleistung gestellt sein, sind zusätzlich Vergleichsversuche zur Anpassung der Tabellenwerte (*Omega*) an die tatsächlichen Verhältnisse anzuraten. Bei entsprechender Größe der Baumaßnahme sollte auf jeden Fall eine Kalibrierung vorgenommen werden. Die Auswertungsergebnisse können hierbei einen Anhaltswert bieten, damit der Baubeginn ohne Zeitverlust durch eine Kalibrierung begonnen werden kann. Hierdurch wird eine einfachere Handhabung der FDVK im Baustelleneinsatz unter wirtschaftlichen Aspekten und den daraus folgenden Vorteilen der kontinuierlichen und arbeitsintegrierten Qualitätssicherung ermöglicht.

Weiterhin wurde ein neues FDVK Messsystem der Herstellerfirma *BOMAG* vorgestellt und untersucht, wobei sich dieses von den bis jetzt auf dem Markt befindlichen Systemen nur durch ein anderes Verfahren zur Generierung der Messwerte aus dem Beschleunigungssignal

unterscheidet. Die Messwerte, welche dieses System liefert, werden mit  $E_{vib}$  bezeichnet und stellen eine physikalische Größe mit der Einheit  $[MN/m^2]$  dar.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zur Messwertbildung von  $E_{vib}$  die Grundlagen erklärt und das FDVK- Messsystem im Baustelleneinsatz praktisch erprobt. Dabei wurden  $E_{vib}$ - Werte sowohl bei unterschiedlichen Amplitudeneinstellungen als auch bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten der Prüfwalze aufgenommen. Es zeigt sich, dass der  $E_{vib}$ - Wert sowohl von der Fahrgeschwindigkeit als auch von der eingestellten Amplitude der Verdichtungsunwucht abhängig ist. Bei kleinen Amplituden werden kleinere  $E_{vib}$ - Werte als bei großen Amplituden erhalten. Anders verhält es sich bei der Fahrgeschwindigkeit: mit zunehmender Geschwindigkeit nimmt das Messwertniveau und die Schwankungsbreite der Einzelwerte ab, wohingegen bei abnehmender Geschwindigkeit das Messwertniveau steigt und die Messwerte in einem größeren Bereich schwanken. Obwohl sich die Messwertverläufe bei veränderten Maschinenparametern (Amplitude und Geschwindigkeit) voneinander unterscheiden, werden Bodenbereiche mit niedriger als auch mit hoher Steifigkeit bei Folgeüberfahrten wiedererkannt. Das System liefert somit bei konstanten Maschinenparametern reproduzierbare Messwerte.

Bei der Betrachtung der korrelativen Zusammenhänge zwischen den  $E_{vib}$ - und den  $E_{v2}$ - Werten wurden Regressionsgeraden aufgestellt, die sich hinsichtlich der verwendeten Amplituden bei der Messwertaufzeichnung stark voneinander unterscheiden. Die Unterschiede lagen zum einem im Niveau der Funktionswerte  $E_{vib}$  und zum anderen in den erhaltenen Korrelationskoeffizienten. Welche Vorteile dieses neue Messsystem der FDVK gegenüber herkömmlichen Systemen bietet, muss noch durch weitere Versuche mit veränderten Randbedingungen untersucht werden.

## 10 Anhang: Ergebnisse der Regressions- und Korrelationsanalysen

### 10.1 Grobkörnige Böden (A)

- Regressionsanalyse

Omega – E <sub>v2</sub>	Omega = a + b × E <sub>v2</sub>		E <sub>v2</sub> = a' + b' × Omega		Omega = c × E <sub>v2</sub> <sup>d</sup>		E <sub>v2</sub> = c' × Omega <sup>d'</sup>	
	a	b	a'	b'	c	d	c'	d'
A, N, kl.A	-128,69	2,60	91,81	0,19	0,23	1,38	25,54	0,31
A, N, gr.A	109,54	2,25	66,91	0,12	8,78	0,78	9,91	0,41
A, T, kl.A	-44,72	2,65	52,62	0,23	2,58	0,95	5,80	0,53
A, T, gr.A	12,08	2,72	38,68	0,22	1,96	1,06	6,84	0,47
A, T1, kl.A	-13,50	2,55	45,55	0,23	5,25	0,82	2,04	0,71
A, T1, gr.A	23,06	2,96	23,76	0,23	1,28	1,19	4,71	0,52
A, T2, kl.A	-51,43	2,92	37,59	0,27	0,69	1,26	3,41	0,62
A, T2, gr.A	-111,16	3,14	56,21	0,23	0,97	1,15	10,03	0,47

Omega [-], E<sub>v2</sub> [MN/m<sup>2</sup>]

Omega – D <sub>Pr</sub>	Omega = a + b × D <sub>Pr</sub>		D <sub>Pr</sub> = a' + b' × Omega		Omega = c × D <sub>Pr</sub> <sup>d</sup>		D <sub>Pr</sub> = c' × Omega <sup>d'</sup>	
	a	b	a'	b'	c	d	c'	d'
A, N, kl.A	-67,05	1,81	99,97	0,01	0,07	1,58	94,90	0,01
A, N, gr.A	-2120,80	24,06	95,53	0,01	0,00	9,39	79,95	0,04
A, T, kl.A	-448,45	7,34	87,88	0,02	0,00	3,24	63,21	0,07
A, T, gr.A	-5592,69	57,66	98,95	0,01	0,00	23,06	87,66	0,03
A, T1, gr.A	-4888,13	50,24	98,17	0,02	0,00	23,33	86,35	0,03
A, T2, kl.A	-566,41	8,69	86,38	0,03	0,00	3,65	60,22	0,08
A, T2, gr.A	-6135,96	63,47	99,35	0,01	0,00	24,01	89,10	0,47

Omega [-], D<sub>Pr</sub> [%]

- Korrelationsanalyse

Omega – Werte E <sub>v2</sub>		Nicht Logarithmiert		Logarithmiert	
Randbedingung	Anzahl n	Korrelation R	Differenzwert t	Korrelation R	Differenzwert t
A, N, kl.A	91	0,70	7,20	0,66	6,19
A, N, gr.A	36	0,53	1,66	0,57	2,02
A, T, kl.A	120	0,78	11,56	0,71	9,07
A, T, gr.A	26	0,77	3,89	0,72	2,97
A, T1, kl.A	47	0,77	6,15	0,77	5,98
A, T1, gr.A	18	0,84	4,02	0,80	3,19
A, T2, kl.A	47	0,89	11,31	0,89	11,05
A, T2, gr.A	8	0,88	2,08	0,75	0,32

Omega – Werte $D_{Pr}$		Nicht Logarithmiert		Logarithmiert	
Rand-bedingung	Anzahl n	Korrelation R	Differenzwert t	Korrelation R	Differenzwert t
A, N, kl.A	9	0,14	-1,98	0,16	-1,94
A, N, gr.A	37	0,58	2,22	0,61	2,58
A, T, kl.A	38	0,43	0,84	0,49	1,37
A, T, gr.A	66	0,77	7,61	0,79	8,44
A, T1, gr.A	30	0,89	8,43	0,85	6,60
A, T2, kl.A	36	0,51	1,39	0,55	1,81
A, T2, gr.A	28	0,65	2,32	0,75	3,70

- Statistische Kenngrößen

$E_{v2}$	Statistische Kennwerte					
Rand-bedingung	Min	Max	Mittel	$C_{vx}$	S ( $E_{v2}$ )	$S_{y,x}$ ( $E_{v2}$ )
A, N, kl.A	51,50	210,33	131,41	0,22	28,79	20,80
A, N, gr.A	34,30	173,10	111,80	0,25	28,11	24,21
A, T, kl.A	8,10	213,60	107,62	0,38	40,45	25,49
A, T, gr.A	38,67	181,50	99,58	0,42	42,07	27,64
A, T1, kl.A	8,10	213,60	103,88	0,43	44,30	28,62
A, T1, gr.A	38,67	177,40	93,30	0,45	41,73	24,03
A, T2, kl.A	39,40	191,00	114,71	0,35	40,65	18,65
A, T2, gr.A	52,80	181,50	113,70	0,37	41,98	23,37
<b>Omega</b>						
Rand-bedingung	Min	Max	Mittel	$C_{vx}$	S (Omega)	$S_{y,x}$ (Omega)
A, N, kl.A	37,6	487,11	212,49	0,51	107,45	77,63
A, N, gr.A	88,92	623,41	361,22	0,33	119,65	103,02
A, T, kl.A	18,326	600,00	240,27	0,57	137,57	86,69
A, T, gr.A	44,58	520,76	283,14	0,53	149,66	98,34
A, T1, kl.A	39	600,00	250,91	0,58	146,60	94,71
A, T1, gr.A	44,57	515,11	299,69	0,50	149,16	85,88
A, T2, kl.A	64,6	548,94	284,03	0,47	133,40	61,21
A, T2, gr.A	86,6	520,76	245,90	0,63	153,85	85,66

$D_{Pr}$	Statistische Kennwerte					
	Min	Max	Mittel	$C_{vx}$	$S(D_{Pr})$	$S_{y,x}(D_{Pr})$
A, N, kl.A	94,10	105,50	101,10	0,03	3,51	3,32
A, N, gr.A	93,00	105,50	99,24	0,03	3,24	2,68
A, T, kl.A	61,20	102,50	93,83	0,07	6,75	6,19
A, T, gr.A	97,58	105,83	101,72	0,02	1,88	1,22
A, T1, gr.A	97,76	105,83	101,45	0,02	1,91	0,89
A, T2, kl.A	61,20	102,50	93,45	0,07	6,73	5,92
A, T2, gr.A	97,58	103,03	101,25	0,01	1,40	1,09
<b>Omega</b>						
Rand-bedingung	Min	Max	Mittel	$C_{vx}$	$S(\Omega)$	$S_{y,x}(\Omega)$
A, N, kl.A	70,4	203,53	115,69	0,39	47,89	45,19
A, N, gr.A	89,6	623,41	266,96	0,51	134,96	111,68
A, T, kl.A	66,54	485,76	239,84	0,48	116,10	106,46
A, T, gr.A	44,25	650,83	272,41	0,52	141,60	91,72
A, T1, gr.A	44,25	507,99	208,25	0,52	107,97	50,28
A, T2, kl.A	66,54	485,76	245,31	0,48	116,89	102,68
A, T2, gr.A	125,24	650,83	290,37	0,47	137,82	107,44

## 10.2 Gemischtkörnige Böden (B)

- Regressionsanalyse

Omega – $E_{v2}$	Omega = a + b × $E_{v2}$		$E_{v2} = a' + b' \times \Omega$		Omega = c × $E_{v2}^d$		$E_{v2} = c' \times \Omega^{d'}$	
	a	b	a'	b'	c	d	c'	d'
B, N, kl.A	89,53	1,20	91,06	0,22	1,62	0,98	21,10	0,34
B, N, gr.A	12,24	3,85	32,27	0,15	13,29	0,71	9,91	0,41
B, T, kl.A	115,75	1,02	55,82	0,27	10,71	0,64	8,56	0,48
B, T+T1, gr.A	17,34	2,96	59,16	0,13	5,99	0,83	20,48	0,27
B, T1, kl.A	-4,48	2,31	57,29	0,20	4,57	0,83	12,38	0,39
B, T2, kl.A	-14,46	1,38	90,40	0,43	1,95	0,92	4,11	0,70

Omega [-],  $E_{v2}$  [MN/m<sup>2</sup>]

Omega – $D_{Pr}$	Omega = a + b × $D_{Pr}$		$D_{Pr} = a' + b' \times \Omega$		Omega = c × $D_{Pr}^d$		$D_{Pr} = c' \times \Omega^{d'}$	
	a	b	a'	b'	c	d	c'	d'
B, N, kl.A	3747,35	-33,17	105,38	-0,01	3,78 10 <sup>19</sup>	-8,48	119,13	-0,03
B, N, gr.A	-975,35	13,18	94,15	0,01	0,00	4,07	9,91	0,41
B, T+T1, kl.A	-69,43	2,64	100,91	0,01	1792835,02	-2,00	106,97	-0,01
B, T+T1, gr.A	-2148,92	23,90	91,17	0,03	0,00	16,23	84,44	0,03
B, T1, kl.A	-69,43	2,64	100,91	0,01	1792835,02	-2,00	106,97	-0,01
B, T1, gr.A	-2148,92	23,90	91,17	0,03	0,00	16,23	84,44	0,03

Omega [-],  $D_{Pr}$  [%]

- Korrelationsanalyse

Omega – Werte $E_{v2}$		Nicht Logarithmiert		Logarithmiert	
Rand-bedingung	Anzahl n	Korrelation R	Differenzwert t	Korrelation R	Differenzwert t
B, N, kl.A	21	0,53	0,62	0,59	1,09
B, N, gr.A	73	0,77	8,05	0,62	4,58
B, T, kl.A	33	0,53	1,49	0,56	1,70
B, T+T1, gr.A	21	0,64	1,50	0,49	0,34
B, T1, kl.A	27	0,68	2,60	0,58	1,46
B, T2, kl.A	6	0,82	0,07	0,85	0,45

Omega – Werte $D_{Pr}$		Nicht Logarithmiert		Logarithmiert	
Rand-bedingung	Anzahl n	Korrelation R	Differenzwert t	Korrelation R	Differenzwert t
B, N, kl.A	4	0,71	-2,88	0,65	-3,10
B, N, gr.A	75	0,43	2,06	0,39	1,58
B, T+T1, kl.A	14	0,12	-1,76	0,14	-1,67
B, T+T1, gr.A	11	0,89	3,70	0,68	0,53
B, T1, kl.A	14	0,12	-1,76	0,14	-1,67
B, T1, gr.A	11	0,89	3,70	0,68	0,53

- Statistische Kenngrößen

$E_{v2}$	Statistische Kennwerte					
Randbedingung	Min	Max	Mittel	$C_{vx}$	S ( $E_{v2}$ )	$S_{y,x}$ ( $E_{v2}$ )
B, N, kl.A	20,50	300,72	152,02	0,50	75,61	66,34
B, N, gr.A	14,40	194,39	81,92	0,41	33,97	22,08
B, T, kl.A	29,14	256,90	121,54	0,43	51,74	44,63
B, T+T1, gr.A	34,30	178,00	100,94	0,38	38,15	30,54
B, T1, kl.A	29,14	147,90	103,43	0,29	29,70	22,37
B, T2, kl.A	107,20	256,90	203,03	0,26	53,00	38,17
<b>Omega</b>						
Randbedingung	Min	Max	Mittel	$C_{vx}$	S (Omega)	$S_{y,x}$ (Omega)
B, N, kl.A	3,36	617,51	271,62	0,64	174,68	153,25
B, N, gr.A	77,89	898,41	327,24	0,52	171,01	111,15
B, T, kl.A	40,8	445,47	239,57	0,42	99,71	85,99
B, T+T1, gr.A	36,7	857,99	315,81	0,57	180,36	144,38
B, T1, kl.A	40,8	445,47	233,96	0,43	101,54	76,47
B, T2, kl.A	155	388,66	264,82	0,36	95,31	68,64

<b>D<sub>Pr</sub></b>	Statistische Kenngrößen					
Randbedingung	Min	Max	Mittel	C <sub>vx</sub>	S (D <sub>Pr</sub> )	S <sub>y,x</sub> (D <sub>Pr</sub> )
B, N, kl.A	101,20	104,20	102,57	0,01	1,37	1,31
B, N, gr.A	87,00	106,50	98,62	0,04	3,76	3,42
B, T+T1, kl.A	97,08	109,13	101,91	0,04	4,37	4,32
B, T+T1, gr.A	92,80	102,79	95,56	0,04	3,55	1,77
B, T1, kl.A	97,08	109,13	101,91	0,04	4,23	4,37
B, T1, gr.A	92,80	102,79	95,56	0,04	3,55	1,77
<b>Omega</b>						
Randbedingung	Min	Max	Mittel	C <sub>vx</sub>	S (Omega)	S <sub>y,x</sub> (Omega)
B, N, kl.A	21,54	461,07	345,56	0,24	87,36	83,51
B, N, gr.A	77,69	571,61	324,55	0,36	116,13	105,77
B, T+T1, kl.A	40,8	403,41	199,37	0,49	100,38	97,08
B, T+T1, gr.A	14,13	313,59	135,01	0,71	96,23	47,98
B, T1, kl.A	40,8	403,41	199,37	0,49	100,38	97,08
B, T1, gr.A	14,13	313,59	135,01	0,71	96,23	47,98

## 11 Literatur

- [1] Adam, D.; (Diss.): Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen,  
Technische Universität Wien, 1996
- [2] Adam, D.; Kopf, F.: Sophisticated compaction technologies and continuous compaction control, ISSMGE/ETC 11Committee " Geotechnical aspects in design and construction of pavements and rail track":  
Compaction Workshop Paris, Paris 2000
- [3] Anderegg, R.; (Diss.): Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern,  
Fortschrittberichte VDI, Reihe 4: Bauingenieurwesen Nr. 146, Zürich, 1997
- [4] Anders, U.: Statistische neuronale Netze,  
Verlag Vahlen, 1997
- [5] Alber, D.; (Diss.): Ein stochastisches Bodenmodell für geotechnische Aufgaben,  
Heft 8 Schriftenreihe: Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Boden und Felsmechanik der Technischen Universität München, 1987
- [6] Becker, J.; Dreyer, H.-J.; Haacke, W.; Nabert, R.: Numerische Mathematik für Ingenieure,  
Teubner 1985
- [7] Dörken, W.; Dehne, E.: Grundbau in Beispielen Teil1 und 2,  
Werner Verlag, 1993
- [8] Empfehlungen des AK 1.4 „Baugrunddynamik“ des DGGT
- [9] Fahrmeir, L.; Hamerle, A.: Multivariate statistische Verfahren, de Gruyter, 1983
- [10] Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: Statistik, der Weg zur Datenanalyse,  
Springer-Verlag 1997
- [11] Fischer, L.: Sicherheitskonzept für neue Normen (Teil 5),  
Bautechnik, Heft 6, Ernst & Sohn, 1999
- [12] Floss, R.: Vergleich der Verdichtungs- und Verformungseigenschaften unstetiger und stetiger Kiessande hinsichtlich ihrer Eignung als ungebundenes Schüttmaterial im Straßenbau, Bundesanstalt für Straßenbau,  
Wissenschaftliche Berichte Heft 9, Ernst & Sohn, 1970
- [13] Floss, R.; Reuther, A.: Vergleichsuntersuchung über die Wirkung von vibrierend und oszillierend arbeitender Verdichtungsgeräte,  
Heft 17 Schriftenreihe: Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Boden und Felsmechanik der Technischen Universität München, 1990
- [14] Floss, R.; Bräu, G.; Gahbauer, M.; Gruber, N.; Obermayer, J.: Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erd- und Straßenbauten,  
Bundesministerium für Verkehr, Heft 612, Bonn – Bad Godesberg, 1991
- [15] Floss, R.: ZTVE Kommentar mit Kompendium Erd- und Felsbau,  
Kirschbaum, 1997

- [16] Floss, R.; Kloubert, H.-J.: Newest Innovations into Soil and Asphalt compaction Technology, International Workshop on Compaction of Soil, Granulates and Powders, Innsbruck, A.A. Balkema-Verlag 2000
- [17] Floss, R.: Verdichtungstechnik im Erdbau und Verkehrswegebau, Band 1, BOMAG, 2001
- [18] Förster, W.: Mechanische Eigenschaften der Lockergesteine, Teubner-Verlag, 1996
- [19] Gaul, L.; (Diss.): Zur Berechnung der Vertikal- und Kippschwingung eines starren Fundamentes auf viskoelastischem Halbraum, Technische Universität Hannover, 1976
- [20] Grabe, J.; (Diss.): Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1992
- [21] Grundbautaschenbuch, Teil 1 bis 3, Ernst & Sohn, 2001
- [22] Grundsätze zur Berücksichtigung technischer und statistischer Gegebenheiten bei der Festlegung von Anforderungen und bei deren Überprüfung auf Erfüllung in Technischen Regelwerken, FSGV, 1994
- [23] Hartmann, K.: Anpassung der FDVK an baustellenspezifische Bedingungen, unveröffentlicht, 1999
- [24] Haupt, W. (Hrsg.): Bodendynamik, Grundlagen und Anwendungen, Vieweg 1986
- [25] Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper, Gesammelte Werke, Bd. 1, Leipzig 1895
- [26] Huber, H.; (Diss.): Untersuchungen zur Materialdämpfung in der Bodendynamik, Heft 23 Schriftenreihe: Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Boden und Felsmechanik der Technischen Universität München, 1988
- [27] Kézdi, Á.: Handbuch der Bodenmechanik, Teil I, II, III und IV, Verlag für Bauwesen Berlin + Verlag der Ungarischen Akademie der Wissenschaften Budapest, 1976
- [28] Kloubert, H.J.: Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle als Beitrag zur Qualitätssicherung im Straßenbau, BOMAG, 1993
- [29] Kloubert, H.J.: Anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung löst Verdichtungsprobleme im Erd- und Asphaltbau, Tiefbau, amtliches Mitteilungsblatt der Tiefbau - Berufsgenossenschaft, Erich Schmidt Verlag 1999
- [30] Kopf, F.; (Diss.): Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle bei der Verdichtung von Böden durch dynamische Walzen mit unterschiedlichen Anregungsarten. Technische Universität Wien, 1999

- [31] Kredler, C.; Ritter, K.: Einführung in die Statistik,  
Nr.4 Institut für Angewandte Mathematik und Statistik der Technischen Universität  
München, 1995
- [32] Kreyszig, E.: Statistische Methoden und ihre Anwendung,  
7. Auflage, Vandenhoeck & Ruprecht, 1979
- [33] Kres, H.: Statistische Tafeln zur multivarianten Analysis,  
Springer, 1975
- [34] Kröber, W.; (Diss.): Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsver-  
dichtung von Böden,  
Heft 11 Schriftenreihe: Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Boden und  
Felsmechanik der Technischen Universität München, 1988
- [35] Kröber, W.: Numerische Simulation der Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung,  
Beiträge aus der Geotechnik,  
Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Prof. Dr.- Ing. Dr.- Ing. E.h. R.  
Floss, Heft 21 Schriftenreihe: Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Boden und  
Felsmechanik der Technischen Universität München, 1995
- [36] Kröber, W.; Floss, R.; Wallrath, W.: Dynamische Bodensteifigkeit als Qualitäts-  
kriterium für die Bodenverdichtung,  
Internationales Symposium im Rahmen der BAUMA München,  
Hrsg.: Messe München International, Verlag Glückauf, 2001
- [37] Lorenz, H.: Grundbau-Dynamik,  
Springer-Verlag, 1960
- [38] Lundberg, G.: Elastische Berührung zweier Halbräume,  
Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens, Band 10, Göteborg 1939
- [39] Matlab: Handbuch für Matlab®, Release 11
- [40] Matlab: Handbuch für Simulink®, Release 11
- [41] Matlab: Handbuch zur Optimization und Neuronal Network Toolbox, Version 2
- [42] Merkblatt über flächendeckende dynamische Verfahren zur Prüfung der Verdichtung im  
Erdbau,  
FGSV, 1993
- [43] Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen Teil 1: Grundlagen,  
FSGV, 1978
- [44] Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen Teil 2: Behandlung von  
abweichenden Messwerten,  
FGSV, 1978
- [45] Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen Teil 3: Planung und  
Durchführung von Ringversuchen,  
FGSV, 1979
- [46] Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen Teil 4: Auswertung von  
Ringversuchen und Errechnung von Prüffehlern,  
FGSV, 1982
- [47] Messsystem für die flächendeckende Verdichtungskontrolle mit  $E_{VIB}$  [MN/m<sup>2</sup>],  
Firmenprospekt, BOMAG, 2001

- [48] Papageorgiu, M.: Optimierung, Statistische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung, Oldenburg, 1996
- [49] Pietzsch, D.; (Diss.): Untersuchungen zum Schwingungsverhalten und zur Verdichtungswirkung von Vibrationswalzen. Fortschrittberichte VDI, Reihe 4: Bauingenieurwesen Nr. 108, Düsseldorf, 1991
- [50] Plate, E.J.: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure, Ernst & Sohn, 1993
- [51] Sachs, L.: Angewandte Statistik, 4.Auflage, Springer-Verlag, 1974
- [52] Siedek, R.; Floss, R.: Handbuch des Straßenbaues, Boden als Baustoff, Springer-Verlag, 1977
- [53] Stoyan, D.: Stochastik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Akademie, 1993
- [54] Studer, J.A.; Koller M.G.: Bodendynamik, Grundlagen, Kennziffern, Probleme, Springer-Verlag, 1997
- [55] Technische Prüfvorschrift für Boden und Fels im Straßenbau TP BF – StB Teil E2, Flächendeckende dynamische Prüfung der Verdichtung, FGSV, 1994
- [56] Terzaghi, K.; Jelinek, R.: Bodenmechanik, Springer-Verlag, 1954
- [57] ZTVE-StB 94 Ausgabe 1994 / Fassung 1997, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, FGSV, 1997
- [58] ZTVT-StB 95 Ausgabe 1995, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Tragschichten im Straßenbau, FGSV, 1978
- [59] Voß, R.; Floss, R.; Brüggemann, K.: Die Bodenverdichtung im Verkehrswege-, Grund und Dammbau, Werner-Verlag, 1986
- [60] Wachsmann, S.; Poppy, W.: Effektives Verdichten von Erdstoffen mit Vibrationswalzen, Tiefbau, amtliches Mitteilungsblatt der Tiefbau-Berufsgenossenschaft, Erich Schmidt Verlag 1999
- [61] Zell, A.: Simulation neuronaler Netze, Addison-Wesley, 1994