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

> Schriftenreihe Heft 11

Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden

von Wolfgang Kröber

München 1988

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik

DISSERTATIONS- UND FOTODRUCK FRANK GmbH 8000 München 2, Gabelsbergerstr. 15, Tel. 288663 Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik Technische Universität München

UNTERSUCHUNG DER DYNAMISCHEN VORGÄNGE BEI DER VIBRATIONSVERDICHTUNG VON BÖDEN

Wolfgang Kröber

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 : O. Prof. Dr.-Ing. J. Eisenmann

- 1. Prüfer : O. Prof. Dr.-Ing. R. Floss
- 2. Prüfer : O. Prof. Dr.-Ing. H. Grundmann

_

3. Prüfer :

Die Dissertation wurde am 15.1.88 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 12.7.88 angenommen.

VORWORT

Oie vorliegende Dissertation behandelt die bodenmechanischen und schwingungstechnischen Zusammenhänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden. Die Bewegungsvorgänge des Verdichtungsgerätes und sein Energieaustausch mit dem Boden werden meßtechnisch untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden die wissenschaftliche Grundlage für ein dynamisches Bodenmodell und ermöglichen zugleich die Nutzung der entwickelten Meßtechnik für die flächendeckende und arbeitsintegrierte dynamische Qualitätskontrolle im Erdbau.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Floss danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit und ihre Förderung, für die bereitwillige Übernahme des Hauptreferates und die Publikation im Rahmen der Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München. Herrn Prof. Dr.-Ing. Grundmann möchte ich für die Übernahme des Koreferates danken. Trotz der räumlichen Distanz zur Hochschule wurde diese Arbeit mit vielen Ratschlägen und Anregungen gefördert bzw. auf aktuelle Fragestellungen abgestimmt.

Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter in der Forschungsabteilung der Firma Bomag in Boppard. Der größte Teil der Versuche wurde in der bodenmechanischen Versuchshalle auf dem Werksgelände durchgeführt. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Vural für die großzügige Förderung dieser Arbeit. Herrn Dipl.-Ing. Blancke danke ich für seine Hilfsbereitschaft und Unterstützung bei allen Problemen der Meßtechnik.

Wolfgang Kröber

Inhaltsverzeichnis

1.	Inhaltsverzeichnis				
2. Einführung					
	2.1. 2.2.	Einleitung und Zielsetzung der Untersuchungen Literaturbesprechung	1 2		
3.	Mess	ungen am Verdichtungswerkzeug	4		
	3.1.	Überblick über Meßmethoden	4		
	3.2.	Beschleunigungsmessungen und Integration zum Schwingweg 3.2.1. Beschleunigung 3.2.2. Schwingweg	7 7 12		
	3.3.	Bodenkontaktkraft 3.3.1. Bewegungsgleichungen 3.3.2. Idealisierung der Bewegungsgleichungen 3.3.3. Bodenkontaktkraftermittlung 3.3.4. Indikatordiagramm 3.3.5. Bodenkontaktkraft und Kontaktzeit	15 15 16 19 26 30		
	3.4.	Eigenfrequenz des Systems Verdichtungswerkzeug und Boden	38		
	3.5.	Dynamische Verdichtungskontrolle	43		
4.	Mess	ungen im Boden	46		
	4.1.	Entwicklung Meßdose 4.1.1. Aufbau und Auslegung der Meßdose 4.1.2. Varianten der Meßdose	46 46 49		
	4.2.	Versuchsbedingungen und Versuchsvorbereitungen 4.2.1. Versuchsaufbau 4.2.2. Meßwerterfassung und Meßwertverarbeitung	51 51 54		
	4.3.	Grundsätzlicher Verlauf der Meßwerte 4.3.1. Messungen auf Rheinkies 4.3.2. Feldmessungen auf Fein- / Mittelsand	57 57 65		
	4.4.	Bewegungsfeld und Spannungsausbreitung 4.4.1. Darstellung des zeitlichen Verlaufes 4.4.2. Verschiebungsfeld in vektorieller Darstellung	67 67 77		
	4.5.	Energiebetrachtungen 4.5.1. Systemgrenzen und Vorüberlegungen 4.5.2. Leistungsbilanz 4.5.3. Einflußgrößen für die Verdichtungsleistung	79 79 82 88		
	4.6.	Verformungsmodul 4.6.1. Indikatordiagramme im Boden 4.6.2. Materialgesetz des Bodens 4.6.3. Einflußtiefe des Plattendruckversuches	90 90 92 96		
	4.7.	Mitschwingende Bodenmasse	97		
	4.8.	Einfluß der horizontal eingeleiteten Schwingungen 4.8.1. Schlupf 4.8.2. Oszillator	102 102 106		
	4.9.	Springen des Verdichtungswerkzeuges 4.9.1. Betriebszustände des Verdichtungswerkzeuges 4.9.2. Messung des Sprungvorganges	110 110 111'		
	4.10	Frequenzspektrum der Meßsignale	115		

	Seite		
5. Fehleranalyse	119		
5.1. Druck- und Schubspannungsmessung	119		
5.2. Beschleunigungsmessung und Wegberechnung	126		
5.3. Bodenkontaktkraftermittlung	129		
5.4. Energiebetrachtungen	129		
5.5. Dynamischer Verformungsmodul	131		
5.6. Trockendichte	132		
6. Zusammenfassung	132		
7. Literaturverzeichnis 13			

Verwendete Symbole und Formelzeichen

à	Amplitude					
av	Verdichtungsamplitude					
a _{th}	theoretische Amplitude					
₫A,dA	Flächenelemente					
Âį	Fourierkoeffizient der Oberwelle i					
А,	Cosinus - Fourierkoeffizient der Oberwelle					
B _i	Sinus - Fourierkoeffizient der Oberwelle i					
Ь	Breite der Bandage					
ĥ	maximale Beschleunigung					
b _i	Beschleunigung an Stützstelle i					
b(t)	Beschleunigung in Abhängigkeit der Zeit					
b _h	Beschleunigung hinten					
b _v	Beschleunigung vorne					
b _x	Beschleunigung vertikal					
ь _у	Beschleunigung horizontal					
ь _б	Beschleunigung in Normalrichtung					
¢τ	Beschleunigung in Tangentialrichtung					
с	Federsteifigkeit					
c _R	Federsteifigkeit Rahmen / Bandage					
С	Integrationskonstante					
D	Durchmesser Meßdose					
EB	Elastizitätsmodul Boden					
E _M	Elastizitätsmodul Meßdose					
E _{kin}	kinetische Energie					
e ^{-j2πft}	komplexer Schwingungsansatz					
EV1, EV2	Verformungsmodul (statisch)					
EV _{dyn}	Verformungsmodul (dynamisch)					
f	Vibrationsfrequenz					

i

fo	Eigenfrequenz
F	Kraft
FB	Bodenkraft
F _{B mox}	maximale Bodenkraft
∆F _B	Änderung Bodenkraft
F _{Bx}	Bodenkraft, vertikal
F _{By}	Bodenkraft, horizontal
F(t)	Störkraft
F _{Stat}	statische Achslast
F _{Stat_R}	statische Auflast
FFlieh	Fliehkraft
F <u>Stat</u>	statische Linienlast
g	Erdbeschleunigung
g•	erhöhte Erdbeschleunigung
h,h _o	Schichtdicke
н	Höhe Meßdose
H(f)	Frequenz - Spektrum
h[t]	zeitlicher Verlauf des Meßsignals
i	Laufindex
J	Massenträgheitsmoment
k	Dämpfungsbeiwert
^k R	Dämpfungsbeiwert Rahmen / Bandage
m	Masse
m _W	Masse Walzenkörper
m _R	Masse Rahmen
m·e	Unwucht
mred	reduzierte Bodenmasse
dm _{red} dz	spezifische,reduzierte Bodenmasse
M _{Reib}	Reibmoment, Schlupfmoment
м _{Ну}	hydraulisches Antriebsmoment
P	Druck

ρ	mittlerer Druck			
Др	Druckdifferenz			
ρ_i	lokaler Druck			
∆P _{dyn}	dynamischer Druckanteil			
Pmess Pm	Registrationskoeffizient			
P	Leistung			
Pzu	zugeführte Leistung			
P _{Reib}	Reibleistung, Verluste			
Peff	ff effektive, abgegebene Verdichtungsleistung			
Q	Verdichtungsleistung (t/h)			
Q	Volumenstrom			
R	Radius der aktiven Meßfläche, Radius Bandage			
∆s _×	Stauchung einer Bodenschicht			
s ₀ ,ds ₀	Verschiebung in Normalrichtung			
s _τ ,ds _τ	s_{T} Verschiebung in Tangentialrichtung			
t	Zeit			
t t ₁	Zeit Kontaktzeit			
t t ₁ t ₂	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit			
t t ₁ t ₂ At _{rel}	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit			
t t ₁ t ₂ Δt _{rei} T	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit Tiefe			
t t ₁ t ₂ Dt _{re1} T v(t)	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit Tiefe Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit			
t t_1 t_2 Δt_{rei} T v(t) v_i	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit Tiefe Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit Schwinggeschwindigkeit an Stützstelle i			
t t ₁ t ₂ Δt _{re1} T v(t) v _i Vred	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit Tiefe Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit Schwinggeschwindigkeit an Stützstelle i Schwinggeschwindigkeit Bandage			
t t ₁ t ₂ Δt _{rei} T v(t) v _i v _{red} v _B	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit Tiefe Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit Schwinggeschwindigkeit an Stützstelle i Schwinggeschwindigkeit Bandage			
t t ₁ t ₂ Δt _{rei} T v(t) v _i v _{red} v _B v ₀	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit Tiefe Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit Schwinggeschwindigkeit an Stützstelle i Schwinggeschwindigkeit Bandage Abrollgeschwindigkeit Bandage Geschwindigkeit in Normalrichtung			
t t ₁ t ₂ Δt _{re1} T v(t) v _i v _{red} v _g v _g	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit Tiefe Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit Schwinggeschwindigkeit an Stützstelle i Schwinggeschwindigkeit Bandage Abrollgeschwindigkeit Bandage Geschwindigkeit in Normalrichtung Geschwindigkeit in Tangentialrichtung			
t t ₁ t ₂ Δt _{re1} T v(t) v _i v _{red} v _g v _g v _t	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit Tiefe Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit Schwinggeschwindigkeit an Stützstelle i Schwinggeschwindigkeit Bandage Abrollgeschwindigkeit Bandage Geschwindigkeit in Normalrichtung Geschwindigkeit in Tangentialrichtung Wassergehalt			
t t ₁ t ₂ Δ1 _{re1} T v(1) v _i v _{red} v _g v _g v _t w	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit Tiefe Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit Schwinggeschwindigkeit an Stützstelle i Schwinggeschwindigkeit Bandage Abrollgeschwindigkeit Bandage Geschwindigkeit in Normalrichtung Geschwindigkeit in Tangentialrichtung Wassergehalt Arbeit			
t t ₁ t ₂ Δt _{rei} T v(t) v _i v _{red} v _g v _g v _t w W	Zeit Kontaktzeit kontaktlose Zeit relative Kontaktzeit Tiefe Schwinggeschwindigkeit in Abhängigkeit der Zeit Schwinggeschwindigkeit an Stützstelle i Schwinggeschwindigkeit Bandage Abrollgeschwindigkeit Bandage Geschwindigkeit in Normalrichtung Geschwindigkeit in Tangentialrichtung Wassergehalt Arbeit effektive Verdichtungsarbeit			

× _R ,× _W	Vertikalschwingweg Rahmen , Walzenkörper
\dot{x}_R , \dot{x}_W	Vertikalschwinggeschwindigkeit Rahmen , Walzenkörper
[;] , x _₩	Vertikalbeschleunigung Rahmen , Walzenkörper
×Stat	statische Einsenkung
У	Schwingweg horizontal
ÿ	Beschleunigung horizontal

Griechische Symbole

ε _i	Phasenverschiebung				
EDMS	gemessene Dehnung mit DMS				
ν	Querkontraktionszahl				
g	Dichte				
9 _d	Trockendichte				
9 ₈	Dichte Boden				
٩ _M	Dichte Meßdose				
Q	Normalspannung				
σ_x	mittlere Normalspannung in einer gestauchten Bodenschicht				
0 _i	Dosendruck in Tiefe i				
0 _{LP}	Druck unter Lastplatte				
0 _h	horizontale Normalspannung				
0 _v	vertikale Normalspannung				
σφ	Normalspannung in Umfangsrichtung				
0 _r	Normalspannung in radialer Richtung				
τ	Tangentialspannung , Periodendauer				
φ	Phasenwinkel				
φ	Schräglage Meßdose				
ω	Kreisfrequenz				
ω₀	Eigenkreisfrequenz				
WSch	Kreisfrequenz Schlupf				

Einführung

2.1. Einleitung und Zielsetzung der Untersuchungen

In dieser Arbeit werden die bodenmechanischen und schwingungstechnischen Zusammenhänge bei der Vibrationsverdichtung im Erdbau untersucht. Dabei wird anhand einer detaillierten Beschreibung und Darstellung der Schwingungsvorgänge am Verdichtungswerkzeug und im zu verdichtenden Boden ein Einblick in die physikalischen Vorgänge gegeben. Aufgrund der Analyse der Meßergebnisse können empirisch bereits bekannte Effekte im Betriebsverhalten des Verdichtungswerkzeuges und in der Verdichtungswirkung verifiziert werden.

In der Vergangenheit wurden meßtechnisch ermittelte Größen in der Regel unmittelbar angezeigt, registriert und ausgewertet. Im heutigen Zeitalter der Mikroelektronik können die Meßsignale gespeichert und unter Anwendung einfacher Modellansätze vielseitig verrechnet werden. Diese Technik stellt die Vorraussetzung für diese Arbeit dar.

Das Zusammenwirken der maschinentechnischen Parameter, die für die Verdichtungswirkung eine entscheidende Rolle spielen, wird aufgezeigt. Dabei wird der Einfluß der einzelnen Parameter diskutiert.

Durch die Darstellung der Bewegungsvorgänge des Verdichtungswerkzeuges in Abhängigkeit der Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens werden die Grundlagen der dynamischen Verdichtungskontrolle erläutert und begründet. Dabei wird besonderer Wert auf die getrennte Erfassung der Meßgrößen an dem Verdichtungsgerät und in dem Boden gelegt. Anhand von Ähnlichkeitsbetrachtungen wird die Kopplung und Rückwirkung zwischen dem Verdichtungswerkzeug einerseits und dem Boden andrerseits hergestellt.

Mit Hilfe von Meßdosen wird der Energieaustausch des Verdichtungswerkzeuges mit dem Boden, sowie der Energieverzehr in verschiedenen Bodenschichten untersucht. Dabei wird der Schubanteil des Energietransports mit berücksichtigt. Durch die Messung von Druckspannungen und Verschiebungen kann der dynamische Verformungsmodul im Boden bestimmt werden und ein Materialgesetz angegeben werden. Unter Anwendung einer schichtenweisen Betrachtung der Schwingungsvorgänge kann eine Aussage über die Tiefenwirkung des Verdichtungsgerätes abgeleitet werden. Die Extrapolation der Meßwerte bis zur Oberfläche des Verdichtungsplanums liefert eine Erklärung für auftretende Oberflächeneffekte.

Durch die Messung des gesamten Bewegungsprofils von Verdichtungswerkzeug und Boden werden die Grundlagen für die Entwicklung eines schwingungstechnischen dynamischen Bodenmodells geschaffen. Die wesentlichen Randbedingungen dieses Modells sind in dieser Arbeit aufgezeigt.

2.2. Literaturbesprechung

Zum Thema der Meßtechnik an Vibrationswalzen beschäftigen sich nahezu alle neuzeitlichen Veröffentlichungen mit der Anwendung der dynamischen Verdichtungskontrolle /8/ , /11/ , /13/ , /26/ , /38/ . Zwei verschiedene am Markt erhältliche Meßsysteme zur dynamischen Verdichtungskontrolle werden in /8/ und /25/ beschrieben. In den genannten Veröffentlichungen wird versucht, einen Zusammenhang zwischen den bekannten bodenmechanischen Kennwerten und den Ausgangsgrößen der dynamischen Verdichtungskontrolle herzustellen. Eine umfassende physikalische Grundlage zur vergleichenden Beurteilung der Meßverfahren ist bisher noch nicht veröffentlicht. Diese Fragestellung wird durch die Betrachtung des Zusammenwirkens von Verdichtungsgerät und Boden in diesem Beitrag behandelt.

Für den baustellenmäßigen Einsatz der dynamischen Verdichtungskontrolle gibt es z.Z. noch keine verbindliche Richtlinie (Merkblatt, Vornorm, Norm) in Form einer rechtskräftigen Vorschrift. In der Praxis wird die dynamische Verdichtungskontrolle gegenwärtig zur Eigenüberwachung der Bauunternehmer und zum Auffinden von Inhomogenitäten im Verdichtungsplanum angewendet.

Unabhängig von der dynamischen Verdichtungskontrolle sind die Messungen am Verdichtungswerkzeug zur Beurteilung des Betriebsverhaltens von Interesse. Im Zeitalter vor der elektronischen Datenverarbeitung haben sich Hertwig, Lorenz /28/, /29/, Ehlers /7/, Reissner /36/ und Novak /33/ mit dem Problem der Schwingungsverdichtung beschäftigt. Es wurde der Einfluß von Frequenz und Unwuchtmasse auf das Betriebsverhalten untersucht. Die Existenz einer Eigenfrequenz des Systems Walze / Boden war bekannt. Ein Aufschluß über die Vorgänge im Boden läßt sich jedoch nur gewinnen, wenn Meßwertaufnehmer in das Verdichtungsplanum eingebaut werden. Keller H. /19/ , /22/ , /23/ hat die dynamischen Bodendrücke bei der Stampfverdichtung und der Rüttelplattenverdichtung und deren Einflußgrößen untersucht. Die Schwinggeschwindigkeit des Bodens wurde mit Geophonen gemessen. Durch Integration ermittelte er den Schwingweg des Bodens und stellte Energiebilanzen in verschiedenen Schichten auf. Der Schubanteil wurde nicht berücksichtigt.

Sonnenberg /39/ untersuchte den Einfluß von Schwingungsüberlagerungen auf die Bodenverdichtung mit Vibrationswalzen. Durch die rasche Abnahme der Schwingintensität mit der Entfernung vom Kontaktpunkt Verdichtungswalze / Boden ist eine für die Verdichtung wirksame Steigerung der Schwingintensität durch Superposition nicht möglich.

Am Centre d'Experimentations Routieres (CER) in Rouen (Frankreich) wurden in den 70er Jahren Vergleichsversuche für verschiedene Verdichtungswalzen durchgeführt /27/ . Ferner sind an einer Versuchswalze die für die Verdichtung wesentlichen Parameter verändert worden, um den Einfluß der Wirkung auf das Betriebsverhalten und den Verdichtungserfolg zu untersuchen /30/ , /31/ , /35/ . Dabei wurde erstmals die Kontaktkraft zwischen Walzenkörper und Boden als zentrale physikalische Größe bei der Beurteilung des Betriebsverhaltens dargestellt. Ferner wurde das Abheben des Verdichtungswerkzeuges vom Boden während der Vibrationsbewegung erkannt und untersucht.

Theoretische Arbeiten auf dem Gebiet der Vibrationsverdichtung, welche über einen Zweimassenschwinger hinausgehen, sind zwar durchgeführt worden /1/, /40/, jedoch sind aufgrund unbekannter Stoffgesetze und Randbedingungen befriedigende Ergebnisse zum heutigen Zeitpunkt noch nicht zu erwarten.

Statische Messungen mit Druckmeßdosen werden in der Literatur häufiger behandelt. Sie sind für diese Arbeit nur bezüglich der Fehlerursachen von Interesse. Da Druckmeßdosen das Verformungsprofil im Boden stören, treten bei der Messung systematische Meßfehler auf /10/ , /37/ . Prange /34/ hat eine grundlegende Theorie für diese Zusammenhänge geschaffen. Hinsichtlich der Eignung der Meßdosen für dynamische Meßzwecke wird gefordert, daß die tiefste Eigenfrequenz des Sensorelementes weit oberhalb des zu erwartenden Frequenzbereiches des Meßsignales liegen muß /20/. Deshalb sind Meßwertaufnehmer auf pneumatischer und hydraulischer Basis /12/ , /32/ für dynamische Messungen ungeeignet. Dynamische Fehlerabschätzungen im Zusammenwirken von Druckmeßdose und dem umgebenden Boden sind bisher unbekannt.

Weitere Hinweise auf Literaturstellen sind im Zusammenhang mit der jeweiligen Problemstellung in den einzelnen Absätzen zu finden.

3. Messungen am Verdichtungswerkzeug

3.1. Überblick über Meßmethoden

Zur Erfassung und Beurteilung des Betriebsverhaltens eines Verdichtungswerkzeuges während des Verdichtungsprozesses sind verschiedene Methoden möglich. Dabei kommt neben den kinematischen und kinetischen Zusammenhängen des Schwingungssystems Bandage / Boden der dynamischen Verdichtungskontrolle besondere Bedeutung zu. Zu diesem Zweck stehen die folgenden Möglichkeiten zur Verfügung.

Beschleunigungsmessung :

Beschleunigungsaufnehmer (induktiv oder Quarz) müssen unterhalb ihrer Eigenfrequenz (100 - 10000 Hz) betrieben werden und besitzen aus physikalischen Gründen eine kleine Baugröße. Aufgrund des Newton'schen Axioms ist das Ausgangssignal stets eine Absolutbeschleunigung und proportional einer Trägheitskraft. Durch 2 fache Integration läßt sich der Absolutschwingweg berechnen.

Seismische Wegmessung :

Seismische Wegaufnehmer besitzen eine große Baugröße und dürfen keinen niederfrequenten Bewegungen (<1 Hz) ausgesetzt sein. Wegen des Anund Auslaufes der Vibration und infolge Unebenheiten im Verdichtungsplanum scheidet diese Möglichkeit zur Meßwerterfassung aus. Differenzwegmessung :

Differenzwegaufnehmer besitzen einen engen Luftspalt und können vor ungünstigen Umweltbedingungen (Staub , Schmutz) nur mit viel Aufwand geschützt werden. Zur Ermittlung der Beschleunigung muß das Signal 2 mal differenziert werden, wodurch ein sehr verrauschtes Signal entsteht.

Leistungsmessung :

Zur Bestimmung der vom Verdichtungswerkzeug an den Boden effektiv abgegebenen Verdichtungsleistung kann eine Energiebilanz am Verdichtungswerkzeug durchgeführt werden.



Bild 1 : Leistungsmessung am Verdichtungswerkzeug zur Bestimmung der effektiv an den Boden abgegebenen Verdichtungsleistung

Die vom Verdichtungswerkzeug aufgenommene Leistung kann durch Messungen der hydraulisch zugeführten Strömungsleistung einfach bestimmt werden /8/, /25/. Die hydraulischen und mechanischen Verluste im Erregersystem sind aufgrund der Viskosität des Hydrauliköls stark temperaturabhängig, wodurch eine genaue Ermittlung der effektiv abgegebenen Verdichtungsleistung auf diesem Wege nicht möglich ist. Die Verdichtungsleistung kann jedoch auch aus der gemessenen Beschleunigung ermittelt werden, wie später noch erläutert wird.

DMS - Methoden :

Die Kontaktkraft zwischen dem Verdichtungswerkzeug und dem zu verdichtenden Boden wird mit Bodenkontaktkraft bezeichnet. Das Verdichtungswerkzeug wird elementweise mit DMS beklebt. Durch Aufsummieren der Elementdrücke kann die Bodenkraft bestimmt werden /19/, /35/.



Bild 2 : Elementweise Druckermittlung durch Segmentierung des Verdichtungswerkzeuges und anschließende Aufsummierung zur Bestimmung der Bodenkontaktkraft bei Plattenrüttlern



Bild 3 : Lokale Ermittlung der Bodenkontaktkraft durch applizierte Dehnungsmeßstreifen am Walzenkörper Das Verfahren ist aufwendig und für den praktischen Einsatz bei Vibrationswalzen wegen der Drehbewegung der Bandage und der komplizierten Meßwertübertragung ungeeignet.

Die Bodenkontaktkraft kann jedoch aus der Beschleunigung ermittelt werden, wie später noch beschrieben wird.

Frequenz :

Die Vibrationsfrequenz kann mit Hilfe einer Meßfahne an der Erregerwelle und eines außen angeordneten Näherungsschalters abgetastet werden. Eine andere Möglichkeit zur Bestimmung der Schwingungsdauer ist die Messung des Zeitabstandes der Nulldurchgänge des Beschleunigungssignales.

Beim Vergleich der verschiedenen Meßmethoden kristallisiert sich die Beschleunigungsmeßtechnik als geeignetste Lösung zur Meßwertaufnahme heraus . Beschleunigungsmessungen bilden daher die Grundlage für die meisten Meßsysteme zur dynamischen Verdichtungskontrolle und sind für die weiteren Betrachtungen von grundlegender Bedeutung.

3.2. Beschleunigungsmessungen und Integration zum Schwingweg

3.2.1. Beschleunigung

Die Beschleunigungsaufnehmer werden am schwingenden Teil des Verdichtungswerkzeuges angebracht, welches sich bei der Fahrtbewegung des Walzenkörpers nicht mitdreht (Seitenschild). Aus Fertigungsgründen wird die Bewegung des Seitenschildes mit einem (Blick in Fahrtrichtung) hinten b_h und vorn b_v angeordneten Beschleunigungsaufnehmer gemessen. Durch Koordinatentransformation wird die Beschleunigung in der vertikalen Hauptverdichtungsrichtung x und der horizontalen Richtung y berechnet. Damit ist die Schwingbewegung des Mittelpunktes der Bandage bestimmt.

Die Drehbewegung der Bandage wird mittels einer Zahnscheibe und eines Näherungsschalters abgetastet. Die Absolutgeschwindigkeit des Gesamtmaschine kann beispielsweise durch ein mitlaufendes Rad ermittelt werden. Die Differenz zwischen der Geschwindigkeit des gesamten Verdichtungsgerätes und der Abrollgeschwindigkeit des Walzenkörpers wird mit Schlupf bezeichnet und muß zur Ermittlung des Absolutbewegungsablaufes des Kontaktpunktes des Walzenkörpers mit dem Boden berücksichtigt werden.



Bild 4 : Anordnung der Beschleunigungsaufnehmer am Seitenschild des Vibrationswerkzeuges zur Messung der Beschleunigung während des Verdichtungsvorganges







Bild 5 : Beschleunigungssignale für zunehmende Bodensteifigkeiten (Teil 2)

Wird das Vibrationswerkzeug vom Boden abgehoben, so ergibt sich für die Beschleunigung im Zeitdiagramm ein sinusförmiger Verlauf mit dem Spitzenwert $\hat{b} = a_{th} \cdot \omega^2$ und in Vektordarstellung ein Kreis mit dem Radius $\hat{b} = a_{th} \cdot \omega^2$ Dieser Fall entspricht dem Grenzfall eines extrem weichen Bodens. Dabei bedeuten : a_{th} : theoretische Amplitude ω : Winkelgeschwindigkeit, Kreisfrequenz \hat{b} : maximale Beschleunigung

Für einen Boden höherer Steifigkeit verformt sich der Kreis näherungsweise in eine Ellipse. Die Hauptachsen sind gegenüber dem Umlaufsinn in entgegengesetzter Richtung gedreht. Die Begründung erfolgt an späterer Stelle. Dieses Meßsignal wiederholt sich nach jeder Umdrehung der Exzenterwelle. Die kleinste Periodendauer in $f(t) = f(t + \tau)$ ist gleich

 $\tau = T = 1/f$

Dabei	bedeuten	:	τ	:	Periodendauer			
			Т	:	Dauer	für	eine	Exzenterwellenumdrehung
		f	:	Vibrat	ions	frequ	ienz	

Mit steigender Steifigkeit des Bodens steigt das Verhältnis bzw. die Differenz der Hauptachsen. Wird der Boden sehr hart, so beginnt die Walze zu "springen". Dabei folgt einer Luftumdrehung eine Bodenumdrehung usw. . Der Betriebszustand des Springens ist ein stabiler Vorgang, der sich bei homogenen Untergrundverhältnissen stets reproduziert.

Die Periodendauer des Meßsignales verdoppelt sich daher auf

Da ein Springen der Verdichtungswerkzeuges infolge einer hohen Steifigkeit des Bodens immer auftreten kann, werden zur Beschleunigungsmessung stets 2 aufeinanderfolgende Exzenterwellenumdrehungen in einem Intervall zusammengefaßt. Dies ist eine Vorraussetzung für die Durchführbarkeit der nachfolgenden Integration des Meßsignales.

3.2.2. Schwingweg

Bei der Erfassung der Beschleunigung mittels Abtastung von n Werten innerhalb einer Periode 7 liegt die Beschleunigung in diskreter Form vor.

Bei der numerischen Integration der Beschleunigung zur Schwinggeschwindigkeit (Trapezregel) ergibt sich formal eine Integrationskonstante.

$$v(t) = \int b(t) dt + C$$

Aufgrund der Periodizität muß diese Integrationskonstante so gewählt werden, daß die Summe der Geschwindigkeiten über eine Periode zu Null wird.

Wird das Beschleunigungssignal in eine Fourierreihe entwickelt, so ergibt sich :

$$b(t) = A_0^* \sum_i A_i \cos(i \omega t) + \sum_i B_i \sin(i \omega t) = A_0^* \sum_i \widehat{A_i} \cos(i \omega t - \varepsilon_i)$$

In diesem Fall ergibt die Integration :

$$v(t) = A_0 t + \sum_i \frac{A_i}{i\omega} \sin(i\omega t) - \sum_i \frac{B_i}{i\omega} \cos(i\omega t) + C = A_0 t + \sum_i \frac{\widehat{A_i}}{i\omega} \sin(i\omega t - C_i) + C$$

Hierbei muß aufgrund der Periodizität $A_{o}=C=0$ sein. Springt die Walze, so sind alle Koeffizienten \hat{A}_{i} ungleich Null. Springt die Walze nicht, so sind alle ungeraden Koeffizienten gleich Null und das Signal erscheint im Intervall $T = 2 \cdot T$ zweimal. Somit behält das Integrationsverfahren für alle Betriebszustände des Verdichtungswerkzeuges seine Gültigkeit.

Durch nochmaliges Integrieren erhält man den Schwingweg. Für die gleichen Meßzyklen aus Bild 5 sind in Bild 6 die Schwingwege dargestellt. Wird das Verdichtungswerkzeug vom Boden abgehoben, so ist der Schwingweg rein sinusförmig . In Vektordarstellung ergibt sich ein Kreis mit dem Radius der theoretischen Amplitude $a_{\rm th}$. Bei der Integration der Fourierreihe

$$b(t) = \sum_{i} \hat{A}_{i} \cos(i\omega t - \varepsilon_{i})$$



Bild 6 : Schwingwege für zunehmende Bodensteifigkeiten (Teil 1)



Bild 6 : Schwingwege für zunehmende Bodensteifigkeiten (Teil 2)

zum Schwingweg $s(t) = -\sum_{i} \frac{\hat{A}_{i}}{(i \omega)^{2}} \cos(i \omega t - \varepsilon_{i})$

werden die Beträge der Koeffizienten der höheren Oberwellen abgemindert (i im Nenner). Da außerdem die Beträge der Oberwellen des Beschleunigungssignales (Ausnahme Springen) mit steigender Ordnung der Harmonischen noch rasch abnehmen, kann der Schwingweg zur Veranschaulichung als quasi sinusförmig und 180 Grad phasenverschoben zum Beschleunigungssignal angesehen werden. Markante Punkte im Beschleunigungsverlauf sind in der Schwingwegdarstellung nicht mehr zu sehen.

Da ein Springen des Walzenkörpers mit allen ungeraden Frequenzanteilen, insbesondere mit i = 1 abläuft, steigen die Schwingwege bei diesem Betriebszustand sofort stark an.

3.3. Bodenkontaktkraft

3.3.1. Bewegungsgleichungen

In Abschnitt 3.2. wurde anhand der Meßergebnisse dargestellt, daß eine Änderung der Steifigkeit des Untergrundes zu einem unterschiedlichen Bewegungsverhalten des Verdichtungswerkzeuges führt. Eine wichtige Kenngröße des Verdichtungsverlaufes ist die Bodenkontaktkraft zwischen dem Verdichtungswerkzeug und dem zu verdichtenden Boden. Zu ihrer meßtechnischen Bestimmung muß für das gesamte Verdichtungswerkzeug ein Ersatzsystem gebildet werden.



Bild 7 : Vertikales Ersatzmodell des Verdichtungswerkzeuges zur Aufstellung der Differentialgleichungen für das Bewegungsverhalten von Ober- und Untermasse In Bild 7 wird nur die vertikale Bewegung der Bandage betrachtet. Es wirken die statischen Gewichtskräfte, Feder- und Dämpferkräfte der Gummipuffer, Fliehkraft, Trägheitskräfte und Bodenkontaktkraft. Die Bodenkontaktkraft beinhaltet alle Reaktionskräfte des Bodens, gleichgültig wodurch diese verursacht werden. In horizontaler Richtung ergibt sich sinngemäß die gleiche Beziehung. Es entfallen jedoch die Gewichtskräfte. Die Momentenbilanz am Walzenkörper und deren Auswirkungen werden in 4.8.1. erläutert.

3.3.2. Idealisierung der Bewegungsgleichungen

Das Bewegungsverhalten des Teilsystems Rahmen kann als fußpunkterregtes Schwingungssystem aufgefaßt werden. Auf die inhomogene Störung y , y reagiert der homogene Anteil der Bewegungsgleichung durch Massenkraft, Dämpfungskraft und Federkraft. Die Größenordnung dieser Kräfte zueinander hängt bei gegebenen Konstanten m, k, c von der Frequenz der ablaufenden Vorgänge ab.





Bild 8 : Relative Größenordnung der Terme im homogenen Teil der Differentialgleichung zur Abschätzung ihrer Bedeutung bei unterschiedlichen Frequenzen

Für das Bewegungsverhalten des Rahmens lassen sich daher einige Folgerungen ableiten. Der Eigenfrequenzbereich des Systems Rahmen / Bandage liegt etwa bei 2 bis 5 Hz. Bei einem Vibrationsbetrieb von beispielsweise 29 Hz ist die Änderung der Federkräfte der Gummipuffer vernachlässigbar klein. Der Einfluß der Dämpfungskraft der Gummipuffer ist theoretisch zwar größer als der Einfluß der Federkraft. Da die Dämpfungskonstante k der Gummipuffer ohnehin niedrig ist, kann der Einfluß ebenfalls vernachlässigt werden. In Zahlen ausgedrückt ergibt sich beispielsweise bei einem marktüblichen 10 t Walzenzug (BW 213 D) für das Kräftegleichgewicht an der Bandage für die Fliehkraft eine Größenordnung von 230 KN (m.e = 7 kgm) und der Term Federkonstante mal Amplitude beträgt 4 KN. Für den Rahmen können die Feder- und Dämpferkräfte vernachlässigt werden (Bild 9). Da in der verbleibenden Gleichung als einzige zeitabhängige Größe \ddot{x}_p auftritt, muß auch diese Größe verschwinden.

Folgerung: $\ddot{x}_R = 0 \implies Rahmen ruhig$

 $F_{Stat_R} = m_R g \Rightarrow statische Auflast = Rahmengewichtskraft$

Bild 9 : Vereinfachung der Differentialgleichung für das Teilsystem des Rahmens (Obermasse)

Aus der Bewegungsgleichung für den Rahmen ergibt sich, daß der Rahmen in Ruhe bleibt und die statische Kraft zwischen Rahmen und Walzenkörper gleich der Gewichtskraft des Rahmens sein muß. Im Sprungbetrieb wird die Rahmenamplitude wegen

- Annäherung an den Eigenfrequenzbereich infolge Halbierung der Frequenz
- erregende "Sprungamplitude" größer als erregende "Auflastamplitude"

zwar größer, jedoch ist der Rahmen relativ zum Walzenkörper auch in diesem Betriebszustand als ruhig anzusehen. Unter den gleichen Vorraussetzungen wie beim Rahmen läßt sich die Bewegungsgleichung des Walzenkörpers ebenfalls vereinfachen und umformen.

$$m_{W}\ddot{x}_{W} = -m_{W}g - F_{Stot_{R}} + F_{B} - meW^{2}cos\Psi - c_{R}(x_{W} - x_{R}) - k_{R}(x_{W} - x_{R})^{0}$$

$$-m_{W}(1 + \frac{m_{R}}{m_{W}})g$$

$$g^{*} - erhöhte Erdbeschleunigung$$

umgestellt noch der Bodenkontoktkraft:

Bild 10 : Vereinfachung der Bewegungsgleichung für das Teilsystem des Walzenkörpers (Untermasse)

In Bild 11 ist ein vereinfachtes Ersatzsystem des Walzenkörpers dargestellt.



Bild 11 : Reduktion des gesamten Verdichtungswerkzeuges mit 2 Freiheitsgraden (Ober- und Untermasse) auf ein Ersatzsystem mit 1 Freiheitsgrad durch Einführung einer erhöhten Erdbeschleunigung g*

Beim Vergleich mit Bild 10 ist zu erkennen, daß die Rahmenmasse auf den Walzenkörper genau so wirkt, als ob der Walzenkörper mit einer erhöhten Erdbeschleunigung beaufschlagt wird. Diese Wirkung der erhöhten Erdbeschleunigung ist von großer Bedeutung für den Betriebszustand des "Springens".

Aufgrund der vorhergehenden Betrachtungen setzt sich die Bodenkraft aus 3 Anteilen zusammen :

- Trägheitskraft : Dazu wird die schwingende Masse und der Bewegungsablauf der Bandage benötigt. Durch Multiplikation der gemessenen Beschleunigung mit der schwingenden Masse erhält man die Trägheitskraft. Das Beschleunigungsmeßsignal ist also der Trägheitskraft direkt proportional.
- Fliehkraft
 : Die Größe der Fliehkraft ist bei Kenntnis von Frequenz, Unwucht (m·e), schwingender Masse und Phasenlage in Bezug auf das Beschleunigungssignal zu ermitteln. Dabei ist für einen gegebenen Walzenkörper nur Frequenz und Phasenlage unbekannt. Dies läßt sich durch eine Meßfahne, deren Zuordnung zur Lage der Unwucht bekannt ist, und einen Näherungsschalter ermitteln.

Die Bestimmung kann graphisch jedoch wesentlich einfacher durchgeführt werden. Dazu ist lediglich wichtig, daß der Fliehkraftverlauf einen exakt sinusförmigen Verlauf aufweist. Maximalwert und Phasenlage werden nach der Methode des "scharfen Hinsehens" superponiert.

- Gravitationskraft: Die hier maßgebende Gravitationskraft ist die Summe der Gewichtskräfte von Walzenkörper und Rahmen.

3.3.3. Bodenkontaktkraftermittlung

In Bild 13 ist die gemessene Vertikalbeschleunigung über dem Exzenterwinkel aufgetragen. In Bild 12 wurde die Vertikalbeschleunigung 2 mal integriert und als Vertikalschwingweg dargestellt.







Bild 13 : Trägheitskraft und Addition der statischen Achslast



Bild 14 : Superposition der Fliehkraft, Bestimmung der Bodenkontaktkraft



Bild 15 : Bodenkontaktkraft in Abhängigkeit des Exzenterdrehwinkels

Der Schwingweg ist für das menschliche Vorstellungsvermögen am leichtesten zugänglich. Mit UT ist der untere Totpunkt der Walzenkörperbewegung gekennzeichnet. In diesem Moment ist die Walze am tiefsten Punkt ihrer Bahnkurve und es ist anzunehmen, daß hier Bodenkontakt besteht und die Bodenkraft in diesem Bereich ihren Maximalwert haben muß. Im oberen Totpunkt OT ist anzunehmen, daß die Bodenkraft gering ist oder sogar gleich Null sein kann. Eine negative Bodenkraft ist nicht möglich, da der Boden nicht in der Lage ist Zugspannungen zu übertragen, weil sich die einzelnen Bodenkörner dann voneinander lösen würden und sich der Boden auflockert.

Bei der Abwärtsbewegung des Walzenkörpers dringt die Walze in den Boden ein (Kompression) und es ist eine höhere Bodenkraft zu erwarten als bei der Aufwärtsbewegung (Expansion). Wenn es zu einem Abheben der Walze vom Boden kommt, so kann es nur im Bereich der Aufwärtsbewegung stattfinden.

Ferner ist beim Vergleich von Bild 12 und Bild 13 zu erkennen, daß im unteren Totpunkt die Beschleunigung positiv ist. Der Boden will die Bandage im Moment seiner größten Zusammendrückung nach oben aus der oberen Bodenschicht herausdrücken.

$$F_{B} = m_{W}(\ddot{x}_{W} \star g^{\intercal}) \star me(\omega^{2}\cos\varphi)$$

$$F_{B} = m_{W}(\ddot{x}_{W} \star g^{\intercal}) - (-me(\omega^{2}\cos\varphi))$$

$$-F_{Elieh}$$

n

wird zur Ermittlung der Bodenkontaktkraft die Trägheitskraft und die Gravitationskraft addiert (Bild 13). Die Addition von Trägheitskraft und Gravitationskraft ist in Bild 14 nochmals eingezeichnet. Von dieser Kraft muß die negative Fliehkraft, die wie oben erläutert rein sinusförmig sein muß, abgezogen werden. Dies ist in Bild 14 ebenfalls eingezeichnet. Die Differenz der beiden Kurven stellt die Bodenkontaktkraft dar. Alle oben besprochenen charakteristischen Merkmale sind am Verlauf der Differenzfläche zu erkennen. Insbesondere ist an dem eingezeichneten Knick genau der Abhebepunkt der Walze vom Boden zu erkennen.

In Bild 15 ist der Bodenkontaktkraftverlauf über dem Exzenterdrehwinkel dargestellt. Dort ist deutlich ein Zeitintervall zu erkennen, in welchem die Walze nicht in Bodenkontakt steht. Bemerkenswert ist, daß ein Abheben des Verdichtungswerkzeuges vom Boden wesentlich früher eintritt, bevor es zum Betriebszustand des "Springens "kommt.







Bild 16 : Verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung der Bodenkontaktkraft für zunehmende Bodensteifigkeiten (Teil 1), (gleiche Meßzyklen wie in den Bildern 5 und 6)

Bahnkurve des WalzenkörpersAnteil der BodenkontaktkraftHüllkurve der resul-mit Eintragung der Boden-
kontaktkraftam gemessenen Beschleuni-
gungssignaltierenden Bodenkon-
taktkraft



Bild 16 : Verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung der Bodenkontaktkraft für zunehmende Bodensteifigkeiten (Teil 2)





Bild 16 : Verschiedene Möglichkeiten zur Darstellung der Bodenkontaktkraft für zunehmende Bodensteifigkeiten (Teil 3)
In Bild 16 (linke Spalte) ist die ermittelte Bodenkontaktkraft an den jeweiligen Bahnpunkt angetragen. Die resultierende Bodenkontaktkraft liegt stets in Richtung der Tangente an die Bahnkurve. Jedoch geht die Neigung der Resultierenden über einen gewissen Neigungswinkel nicht hinaus. Es liegt die Vermutung nahe, daß der Walzenkörper zu diesem Zeitpunkt über den Boden rutscht, ohne daß der Boden dem Walzenkörper folgt. Im rechten Teil von Bild 16 ist die Resultierende der Bodenkontaktkraft als Ortskurve dargestellt. Auch hier ist zu erkennen, daß die Lage der Resultierenden von der Vertikalen um mehr als 30 Grad nicht abweicht. Dies entspricht einem Reibwert von ca. 0,6 .

In der mittleren Spalte von Bild 16 ist die graphische Ermittlung der Bodenkontaktkraft nochmals in vektorieller Form dargestellt. In Bild 17 ist die Aufspaltung der gemessenen Beschleunigung in statischen Anteil, Fliehkraftanteil und Bodenkontaktkraftanteil aufgezeichnet. Im Gegensatz zur Vorzeichenregelung in 3.3.1. treten in diesem Bild die Kräfte im Sinne des Newton'schen Axioms auf ($m_{u}, \dot{x}_{u} = \sum \vec{F}$).



Bild 17 : Vektorielle Superposition der statischen Achslast, Fliehkraft, Bodenkontaktkraft und Trägheitskraft zur Bestimmung der Bodenkontaktkraft aus den gemessenen Beschleunigungen

In Bild 18 ist die Entstehung des Beschleunigungsverlaufes ohne den Einfluß des statischen Anteils erläutert. Durch die Phasenverschiebung von etwa 180 Grad zwischen dem Schwingweg und der Beschleunigung liegt der obere Totpunkt der Bahnkurve in der Beschleunigungsdarstellung unten. Da die Bodenkontaktkraft während der Kompressionsphase des Bodens von OT nach UT aufgrund Reibung und energetischer Überlegungen größer sein muß als bei der Expansion von UT nach OT, erscheint der ellipsenähnliche Verlauf von Beschleunigung und Schwingweg etwas nach rechts gedreht. Wird die Drehrichtung der Erregerwelle umgekehrt, ändert sich auch die Drehrichtung der "Hauptachsen" der Ellipse.



Bild 18 : Neigung der Hauptachsen des umlaufenden Beschleunigungsvektors durch die höhere Kraftwirkung während der Kompressionsphase (OT nach UT) im Gegensatz zur Expansionsphase (UT nach OT).

3.3.4. Indikatordiagramm

Wird die Bodenkraft über dem Schwingweg aufgetragen, so entsteht ein Kraft – Weg – Diagramm, in welchem Energie- und Steifigkeitsbetrachtungen des zu verdichtenden Bodens durchgeführt werden können.

In Bild 19 sind die Phasen der Verdichtung dargestellt. Der sich einstellende maximale Schwingweg ist infolge Resonanzwirkung etwas größer als die theoretische Amplitude. Die maximale Bodenkraft ist etwa 3 mal so



Bild 19 : Darstellung der Bodenkontaktkraft in Abhängigkeit des Schwingweges des Walzenkörpers (Vertikalanteil) im Indikatordiagramm, Aufspaltung des gesamten Vibrationsvorganges in Kompressions- und Expansionsphase



Bild 20 : Darstellung der Bodenkontaktkraft in Abhängigkeit des Schwingweges des Walzenkörpers (Vertikalanteil) im Indikatordiagramm, Energieaustausch zwischen Verdichtungswerkzeug / Boden und dynamische Federsteifigkeit des Bodens.



Bild 21 : Indikatordiagramme in vertikaler (x) und horizontaler (y) Richtung für zunehmende Bodensteifigkeiten (Teil 1)



Bild 21 : Indikatordiagramme in vertikaler (x) und horizontaler (y) Richtung für zunehmende Bodensteifigkeiten (Teil 2)

groß, wie die statische Achslast. Da Kompression und Expansion nicht auf einer Linie liegen, gibt die Bandage Energie an den Boden ab, die in dem Indikatordiagramm als Fläche zwischen Kompression und Expansion dargestellt ist (Bild 20). Ferner kann aufgrund der Steigung der Kompressionskurve auf die dynamische Federsteifigkeit des Untergrundes geschlossen werden.

In Bild 21 ist das Indikatordiagramm für eine zunehmende Verdichtung dargestellt. Im oberen Teil ist zu erkennen, daß die Bodenkraft bis auf eine gewisse Hysterese praktisch gleich der statischen Achslast ist. Der Schwingweg stimmt mit der theoretischen Amplitude nahezu überein. Die dynamische Federsteifigkeit, welche einen Bodenkraftzuwachs verursacht, ist sehr gering.

Mit zunehmender Verdichtung ist eine Amplitudenüberhöhung festzustellen (Resonanzwirkung). Ferner wird an einer Stelle die Bodenkontaktkraft gleich Null (Walze hebt vom Boden ab). In der 3. Zeile ist die Walze kurz vor dem Übergang zum Sprungbetrieb. Die maximale Bodenkraft ist 3 mal so groß, wie die statische Achslast.

Schon lange bevor es zum Springen kommt, gibt es einen Zeitbereich, in dem die Bandage den Kontakt vom Boden verliert. In den unteren 3 Bildern (Teil 2) ist die Walze im Sprungbetrieb. Auf jede Exzenterumdrehung mit Bodenkontakt folgt eine Umdrehung nahezu ohne Bodenkontakt. Der Walzenkörper bewegt sich etwa mit doppelter Nennamplitude und halber Erregerfrequenz.

3.3.5. Bodenkontaktkraft und Kontaktzeit

Zur Untersuchung des Zusammenhanges von maximaler Bodenkraft und Kontaktzeit wird die Gleichung zur Berechnung der Bodenkontaktkraft über eine Periodendauer T integriert.

$$\int_{\tau} F_{B} dt = \int_{m_{w}} \frac{1}{x} dt + \int_{m_{w}} g^{*} dt + \int_{m_{w}} \frac{1}{y} dt + \int_{\tau} \frac{1}{y} dt + \int_{$$

Wegen der Periodizität und der Integration über die ganze Periode werden die Integrale über der Beschleunigung und Fliehkraft gleich Null. Das gleiche Resultat erhält man auch, wenn die nicht vereinfachten Bewegungsgleichungen aus 3.3.1. zur Berechnung herangezogen werden.

Wesentlich am Ergebnis ist, daß der Impuls der Bodenkontaktkraft



Bild 22 : Dimensionslose Darstellung der Bodenkontaktkraft über eine Periodendauer für verschiedene Bodensteifigkeiten, Definition der relativen Kontaktzeit

In der Darstellung von Bild 22 bedeutet dies, daß unabhängig von der Steifigkeit des Bodens die Fläche unter der Kurve immer gleich sein muß. Im linken Teil von Bild 22 ist der Grenzfall dargestellt, wo die minimale Bodenkontaktkraft gerade zu Null wird. Wird näherungsweise Linearität für das Bodenverhalten angenommen, so folgt hieraus, daß für Kontaktverlust des Verdichtungswerkzeuges (siehe auch /35/) während der Verdichtung auftritt. Höhere Bodenkontaktkräfte, welche eine Umlagerung im Boden bewirken sollen, können daher durch den auftretenden Kontaktverlust an der Oberfläche Auflockerungserscheinungen mit sich bringen. Wird der Boden sehr hart, so steigt die Bodenkontaktkraft stark an und der Impuls wird so groß, daß zur Erlangung der Flächengleichheit ein kleinerer Impuls folgen muß (Springen). In Bild 23 (linker Teil) ist der Verlauf der dimensionslosen Bodenkontaktkraft über der Zeit dargestellt. Im rechten Teil ist der Maximalwert der dimensionslosen Bodenkontaktkraft über der Kontaktzeit dargestellt. Für eine zunehmende Verdichtung liegen die Wertepaare auf einer Kurve. Befindet sich die Walze im Sprungbetrieb, liegen die Wertepaare oberhalb der Kurve.

Wird zur Approximation des Kurvenverlaufes der Bodenkontaktkraft in Abhängigkeit der Zeit die positive Halbwelle der Sinuskurve angenommen, so ergibt sich folgender Zusammenhang :



Bild 24 : Herleitung eines formelmäßigen Zusammenhanges zwischen der Bodenkontaktkraft und der relativen Kontaktzeit, Approximation des Bodenkontaktkraftverlaufes durch Sinushalbwelle



Bild 23 : Dimensionslose Darstellung der Bodenkontaktkraft und Kontaktzeit für zunehmende Bodensteifigkeiten

Befindet sich die Walze im Sprungbetrieb, so verdoppelt sich die Fläche unter der Sinushalbwelle, weil kein 2. Auftreffen erfolgt. Es ergibt sich:

$$\frac{F_{B max}}{F_{Stat}} = \frac{\pi}{\Delta t_{rel}}$$

Im folgenden werden die Maschinendaten Frequenz, Amplitude und Rahmengewicht verändert.



Bild 25 : Abhängigkeit der maximalen Bodenkraft von der Kontaktzeit Frequenzvariation, theoretische Amplitude 1,6 mm , statische Achslast 56 KN

In Bild 25 ist der Zusammenhang für verschiedene Vibrationsfrequenzen dargestellt. Bei einer Steigerung der Vibrationsfrequenz von 17 Hz bis 30 Hz sinkt die Sprunggrenze von $F_{Bmax} / F_{Stat} = 3,9$ bis 2,5 ab. Befindet sich das Verdichtungswerkzeug nicht im Sprungbetrieb, fallen alle Kurven zu einer Linie zusammen.



Bild 26 : Abhängigkeit der maximalen Bodenkraft von der Kontaktzeit kleine Unwuchtmasse, theoretische Amplitude 0,9 mm , statische Achslast 56 KN

In Bild 26 ist die dimensionslose Bodenkraft bei einer theoretischen Amplitude von 0,9 mm und verschiedenen Frequenzen dargestellt. Hierbei tritt kein Springen auf, da die dimensionslose Bodenkraft keine kritischen Werte erlangt. Alle Wertepaare liegen jedoch auf der gleichen Kurve wie in Bild 23 .

Bei der kleinen Amplitude sind die maximalen Bodenkräfte geringer und die Kontaktzeiten größer. Dies rechtfertigt den häufig angewendeten praktischen Einsatz von kleinen Amplituden beim letzten Übergang bei der Erdverdichtung. Dadurch wird die (infolge Abheben) lockere obere Schicht wieder verdichtet. Dabei ist entsprechend Bild 26 eine hohe Frequenz vorzuziehen, da die Kontaktzeiten mit steigenden Frequenzen ansteigen.



Bild 27 : Abhängigkeit der maximalen Bodenkraft von der Kontaktzeit erhöhte Rahmenmasse, theoretische Amplitude 2,1 mm, statische Achslast 75 KN

In Bild 27 ist die Rahmenmasse um 1900 kg erhöht und die theoretische Amplitude auf 2,1 mm erhöht worden. Dadurch steigt in der dimensionslosen Bodenkraft F_{Bmax} / F_{Stat} der Nenner an. Die Darstellung zeigt jedoch für beide Frequenzen, daß sich am Verlauf der Kurve von Bild 23 nichts ändert.

In Bild 28 sind alle Meßergebnisse aus den Bildern 25, 26 und 27 zusammengefaßt. Im Bereich "leichtes Springen" findet bei jeder Exzenterumdrehung ein Bodenkontakt statt, jedoch alternierend ein großer und ein kleiner Impuls. Im Bereich "volles Springen" ist das Verdichtungswerkzeug für eine Umdrehung völlig ohne Bodenkontakt. Es zeigt auch, daß ein zeitweiser Kontaktverlust während einer Exzenterumdrehung noch nicht bedeutet, daß die Walze springt. Die klassische Unterscheidung der Verdichtungsgeräte in Auflastrüttler und Sprungrüttler wird durch diesen Sachverhalt in Frage gestellt.





Bild 28 : Abhängigkeit der maximalen Bodenkraft von der Kontaktzeit Zusammenfassung der Einzelmessungen und Einteilung in verschiedene Betriebszustände

Der Zusammenhang zwischen der dimensionslosen Kontaktkraft und Kontaktzeit ist unabhängig von Frequenz, theoretischer Amplitude und Rahmenmasse. Sie stellt eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung des Betriebsverhaltens der Verdichtungswerkzeuges dar. Bei der verwendeten Walze liegt die Eigenfrequenz Walze / Boden je nach Veränderung der Maschinenparameter zwischen 15 und 20 Hz. Da die eingestellten Frequenzen alle überkritisch sind, bedeutet eine Frequenzsteigerung stets ein Absinken der Verdichtungsamplitude und damit ein Absinken der maximalen Bodenkontaktkraft. Eine Annäherung an die Eigenfrequenz des Systems Bandagenkörper / Boden bringt daher stets eine ansteigende Bodenkontaktkraft und absinkende Kontaktzeit mit sich.

3.4. Eigenfrequenz des Systems Verdichtungswerkzeug und Boden

Die Resonanztheorie (Hertwig 1933) besagt, daß sich der optimale Verdichtungserfolg beim Betrieb des Verdichtungsgerätes im Bereich der Resonanzfrequenz ergibt. Die Lage der Resonanzfrequenz und deren Einflußgrößen wurde häufig untersucht /28/. Dabei wurde von der linearen Theorie ausgegangen, wobei folgende Gleichung gilt :

$$\omega_{o}^{2} = \frac{c}{m}$$

$$\omega_{o}^{2} = \frac{c}{m}$$

$$c^{-2} Federsteifigkeit$$

$$m Schwingende Masse$$

Im weiteren wurde festgestellt, daß die Eigenfrequenz des Systems Walze / Boden mit steigender theoretischer Amplitude abnimmt. Für heute übliche Maschinengrößen ist aus /30/ folgende Darstellung entnommen :



Bild 29 : Abhängigkeit des Amplitudenverlaufes des Verdichtungswerkzeuges von der Frequenz und der Unwuchtmasse (nach /30/)



Zur Erklärung des Sachverhaltes führte Lorenz /28/ den Begriff der mitschwingenden Bodenmasse ein.

Bild 30 : Modell zur Einführung der mitschwingenden Bodenmasse (nach /28/)

Die Bodenmasse wird dabei als gekoppelt mit dem Schwingergewicht betrachtet. Eine größere theoretische Amplitude setzt mehr Bodenteile in Bewegung und bewirkt eine ansteigende mitschwingende Bodenmasse und somit ein Absinken der Eigenfrequenz. Als Ergebnis stellte Lorenz fest, daß für ein Schwingergewicht von 1,8 bis 3,4 t die mitschwingende Bodenmasse unabhängig vom Schwingergewicht etwa 12,5 t betrug. Die mitschwingende Bodenmasse war also wesentlich größer als die schwingende Masse des Verdichtungswerkzeuges . Voraussetzung für die Kopplung der beiden Massen war das Prinzip des Auflastrüttlers. In den vorigen Abschnitten wird jedoch deutlich, daß Vibrationswalzen in der Regel keine Auflastrüttler sind, da schon bei geringen Steifigkeiten des Untergrundes (Ev2 etwa 40 MN/m²) die Walze bei jeder Exzenterumdrehung vom Boden abhebt. Ferner zeigen die Untersuchungen in Abschnitt 4.7. , daß die mitschwingende Bodenmasse wesentlich kleiner als die schwingende Masse des Walzenkörpers ist.

Novak /33/ stellte durch Messungen fest, daß die dynamische Bodenpressung mit der theoretischen Amplitude degressiv zunimmt. Daraus folgerte er eine sinkende "scheinbare" Federkonstante mit steigender theoretischer Amplitude und somit ein Absinken der Eigenfrequenz mit steigender Unwucht.





Für das Absinken der Eigenfrequenz mit steigender theoretischer Amplitude wurde hier jedoch ein anderer Grund gefunden. Die Ursache dieses Sachverhaltes ist begründet im Phänomen des Kontaktverlustes des Vibrationswerkzeuges vom verdichteten Boden. Zur Erklärung wird zur Vereinfachung ein Boden mit einer linear elastischen Federkennlinie (ohne Dämpfung) zugrunde gelegt. Durch die statische Achslast wird die Feder um das Maß x_{stat} zusammengedrückt.



Bild 32 : Statische Einsenkung des Bodens infolge statischer Achslast

Beim Vibrationsbetrieb stellt sich eine Verdichtungsamplitude ein und bewirkt ein Ansteigen der Bodenkontaktkraft bis F_{Bmax} . Wird durch Erhöhen der Unwuchtmasse die Amplitude nun verdoppelt, so steigt die maximale Bodenkraft nicht so stark an, weil der Impulssatz

$$\int_{\tau} F_B dt = F_{Stat} \tau$$

erfüllt werden muß. Daher weicht der Walzenkörper nach oben aus. Die scheinbare Federsteifigkeit des Bodens wird daher mit steigender Unwucht kleiner, weil sich das Verdichtungswerkzeug länger in der Luft befindet (Ansteigen von $F_{\rm Bmax}$ bedeutet immer kürzere Kontaktzeiten, Abschnitt 3.3.5.) und eine höhere Schwinghöhe durchläuft.



Bild 33 : Vereinfachte Darstellung der Kraft-Weg-Abhängigkeit vom Verdichtungswerkzeug/Boden bei Steigerung der theoretischen Amplitude



Bild 34 : Absinken der scheinbaren Federsteifigkeit durch Vergrößerung der theoretischen Amplitude

Durch das Ausweichen nach oben wird die scheinbare Federsteifigkeit (β_2 in Bild 34) mit steigender Amplitude kleiner, wodurch die Eigenfrequenz absinkt. Wird die Rahmenmasse (Auflast) erhöht, so findet der Bewegungsablauf wieder bei einem höheren Kräfteniveau statt und die scheinbare Federsteifigkeit steigt an. Versuche haben das Ansteigen der Eigenfrequenz für diesen Fall bestätigt. Die Messungen von Novak /33/ (degressiv ansteigende dynamische Bodenpressung mit steigender Amplitude) finden ihre Erklärung mit der Aussage des Impulssatzes. Die Folgerung eines degressiven Kraft-Deformationsgesetzes ist daraus aus den genannten Gründen jedoch nicht ableitbar.

In Bild 33 wird deutlich, daß die dynamische Ruhelage stets höher liegt als die statische Ruhelage und mit ansteigender Amplitude rasch ansteigt. Die schwingende Masse ist dann aufgrund fehlender Vorbelastung durch die statische Achslast nicht mehr in der Lage, dem Boden eine höhere Schwingintensität zu übertragen. Es existiert daher für jede statische Achslast eine obere Grenze für eine sinnvolle theoretische Amplitude. In Bild 35 sind gemessene Indikatordiagramme bei verschiedenen Amplituden dargestellt.



Bild 35 : Reales Indikatordiagramm für unterschiedliche Amplituden

Sämtliche Überlegungen lassen sich auf den Fall mit realer Dämpfung übertragen. Die maximale Bodenkraft steigt degressiv mit der theoretischen Amplitude an. Durch die konvexe Bauform des Verdichtungswerkzeuges ergibt sich für das Gesamtsystem eine progressive Kennlinie, auch wenn sich der Boden bei Belastung mit einem ebenen Körper (Plattendruckversuch) als näherungsweise linear erweisen sollte. Die Progressivität der Kennlinie verursacht das Springen des Verdichtungswerkzeuges.

3.5. Dynamische Verdichtungskontrolle

Seit mehreren Jahren werden auf Baustellen verschiedene Verfahren der dynamischen Verdichtungskontrolle angewandt. Physikalische Grundlage ist der Zusammenhang zwischen dem Verformungsmodul und der dynamischen Federsteifigkeit des Bodens.



Bild 36 : Physikalischer Zusammenhang zwischen der Druck-Setzungslinie des Plattendruckversuches und dem Indikatordiagramm bei der Vibrationsverdichtung

Eine ansteigende Federsteifigkeit ermöglicht einen erhöhten Energietransport vom vibrierenden Walzenkörper in den zu verdichtenden Boden. Aus diesem Grunde ist die vom Verdichtungswerkzeug in den Boden abgegebene Verdichtungsleistung ein Maß für die Steifigkeit des Untergrundes. Eine ausführliche Erläuterung des Leistungsprinzips findet sich in /25/.



Bild 37 : Grundlage der dynamischen Verdichtungskontrolle

Eine andere Methode der dynamischen Verdichtungskontrolle basiert auf der Grundlage von Oberwellen /8/ . Jedes lineare Übertragungssystem reagiert auf eine rein sinusförmige Eingangsgröße mit einer rein sinusförmigen Ausgangsgröße. Ist das Übertragungsverhalten nichtlinear, so werden Oberwellen generiert und zwar umso mehr, je höher der Grad der Nichtlinearität ansteigt. Beim Verdichtungsprozeß erhöhen Kontaktverlust und Balligkeit des Verdichtungswerkzeuges den nichtlinearen Charakter des Bewegungsablaufes. Aus diesem Grunde sind die erzeugten Oberwellen ebenfalls ein Maß für die Steifigkeit des zu verdichtenden Planums. Beginnt die Walze zu springen, so verändert sich die Intensität der Frequenzanteile zueinander, weil ein ganz anderes Betriebsverhalten des Verdichtungswerkzeuges auftritt.

Für die Darstellungen in den Bildern 5, 6, 16, 21, 23, welche aus den gleichen Meßzyklen gewonnen wurden, ist das Frequenzspektrum des vertikalen Beschleunigungssignales in Bild 38 dargestellt.



Bild 38 : Effektiv abgegebene Vibrationsenergie und Frequenzspektrum des Beschleunigungssignales (Vertikalanteile) mit zunehmender Verdichtung

Befindet sich die Walze nicht im Sprungzustand, so sind die ungeraden Oberwellen gleich Null. Im Sprungzustand sind alle Frequenzanteile vorhanden. Zum Vergleich ist im linken Teil von Bild 38 die effektiv abgegebene Verdichtungsenergie (Vertikalanteil) aufgetragen. Sie entspricht der eingeschlossenen Fläche aus Bild 21 (linker Teil).

4. Messungen im Boden

4.1. Entwicklung Meßdose

4.1.1. Aufbau und Auslegung der Meßdose

Die Meßdose soll als Meßwertaufnehmer für die dynamischen Vorgänge im Boden während der Vibrationsverdichtung eingesetzt werden. Dabei sollen Drücke und Beschleunigungen im Boden gemessen werden. Aufgrund der dynamischen Vorgänge (bis 100 - 200 Hz) scheiden Meßdosen auf pneumatischer Basis /12/ und hydraulischer Basis /32/ aus. Schon 1960 hat Prange /34/ die Grundlagen für die Dimensionierung einer Druckmeßdose für statische Messungen gelegt. Danach soll eine Druckmeßdose möglichst flach ausgebildet sein. In /20/ hat Keller einen Vergleich verschiedener Druckmeßdosen auch für dynamische Untersuchungen durchgeführt. Die aus der Literatur bekannten Meßdosen sind jedoch reine Druckmeßdosen und verfügen nicht gleichzeitig über eingebaute Beschleunigungsaufnehmer. Aus diesem Grunde wurde eine Meßdose entsprechend Bild 39 entwickelt.



Bild 39 : Aufbau der Druck- und Beschleunigungsmeßdose

Als Beschleunigungsaufnehmer wurden HBM B12/200 (induktiv) verwendet, weil mit diesen Beschleunigungsaufnehmern auch statische Beschleunigungen gemessen werden können /16/. Mit Hilfe dessen kann die Schräglage einer Meßdose ohne deren Ausbau aus der Schüttung leicht ermittelt werden. Es wurden zwei senkrecht zueinander angeordnete Beschleunigungsaufnehmer verwendet, um die 2-dimensionale Bewegung der Meßdose infolge der Vibrationserzeugung durch den Kreiserreger erfassen zu können. Durch diese Vorgaben sind die äußeren Abmaße der Dose praktisch festgelegt. Die Meßmembran ist so ausgelegt, daß sie eine hohe Empfindlichkeit (3 mV/V bei 10 bar), aber auch eine hinreichend hohe Eigenfrequenz (1200 Hz) besitzt.



Bild 40 : Auslegung und Spannungsverteilung der Druckmembran der Meßdose

Die Randeinfassung der Membran mit der Verschraubung von Ober- und Unterteil ist möglichst starr ausgebildet, um den Einfluß der Einspannung und eventueller Randeinflüsse zu minimieren. Die Meßkabel werden am Unterteil mit PG – Verschraubungen herausgeführt . Dadurch sind sie nach einer eventuellen Beschädigung beim Ausbau einfach zu ersetzen. Die Meßdose ist mit einem Rundschnurring abgedichtet, damit während des praktischen Einsatzes keine Feuchtigkeit in das Innere eindringen kann. Die Eichung erfolgt in einer Druckkammer mit Druckluft (allseitiger Druck).

Die äußere Kontur der Meßdose ist so ausgebildet, damit das von der Walze erzeugte Verschiebungsfeld im Boden möglichst wenig gestört wird.



Bild 41 : Kriterien zur Anpassung der äußeren Kontur der Meßdose an die Verformungsbedingungen im Boden

Bei der Meßdose ist nur eine Seite der Meßmembran als aktive Aufnehmerfläche ausgebildet, da durch die Dehnungsbehinderung der Meßdose unterhalb der Dose ein geringerer Druck herrscht und das angezeigte Meßsignal bei doppelseitiger aktiver Fläche zu gering wäre. Durch die Mittelwertbildung des Druckes über der aktiven Meßfläche können lokale Druckänderungen z.B. unmittelbar unter der Bandage nicht bestimmt werden. Es lag deshalb nahe,eine kleinere Meßdose zu konzipieren, um diesen Nachteil zu beheben.

4.1.2. Varianten der Meßdose



Bild 42 : Aufbau der kleinen Meßdose (starre Membran)

Bei der Eichung in der Druckkammer zeigte sich bei den kleinen Meßdosen (starre Membran), daß bei einem Druck von etwa 5 - 7 bar in der Fügefläche von Ober- und Unterteil Relativbewegungen auftraten und eine bleibende Nullverschiebung verursachten. Nach Lösen der Schraubverbindung verschwandt die Nullverschiebung.

Ein Absatz zur Zentrierung von Ober- und Unterteil ist aufgrund der engen Verhältnisse nicht möglich. Die Schraubverbindungen können wegen des flachen Schraubenkopfes und des kleinen Stiftansatzes nicht genügend angezogen werden. Aus diesen Gründen wurde eine Lösung gesucht, wobei auf die Meßmembran keine Biegemomente von der Fügefläche Oberteil / Unterteil einwirken konnten.



Bild 43 : Aufbau der kleinen Meßdose (elastische Membran)

Als Abhilfe wurde eine Meßdose mit einer elastisch eingebetteten Membran hergestellt. Die Auflagekante der Membran wurde konisch ausgebildet, damit sich bei der Verformung der Membran keine Empfindlichkeitsänderung einstellt. Diese Meßdose zeigte in der Druckkammer Hystereseverhalten und war für meßtechnische Zwecke unbrauchbar.

Die erste Variante (starre Membran) ist der zweiten Variante (elastische Membran) vorzuziehen. Um Relativbewegungen zu vermeiden, wurden die Fügeflächen der kleinen Meßdosen mit viel Aufwand gereinigt und die Meßdose wieder montiert. Bei Vorversuchen wurden die kleinen Meßdosen zur späteren Schubspannungsermittlung mit 0 Grad, -30 Grad, + 30 Grad eingebaut. Nach dem Ausbau lag eine unter 30 Grad eingebaute Meßdose horizontal. Bei der großen Meßdose liegt die Winkelverlagerung von der unverdichteten Schüttung bis zum Abschluß der Verdichtung bei max. 5 Grad.

Durch den geringeren Durchmesser kann eine kleine Meßdose (Durchmesser 60 cm) infolge bleibender Verschiebungen bei der Verdichtung eine wesentlich größere Winkelverschiebung ausführen als eine große Meßdose (Durchmesser 230 mm). Die tatsächliche Winkellage kann bei den kleinen Meßdose nur nach dem Ausbau festgestellt werden, während bei der großen Meßdose aufgrund der Beschleunigungsaufnehmer die Schräglage in eingebautem Zustand meßbar ist.

Es war ursprünglich geplant, daß bei Messungen mit der kleinen Meßdose die Beschleunigungsaufnehmer seperat in die zu verdichtende Schüttung eingebaut werden.



Bild 44 : Aufbau der gekapselten Beschleunigungsaufnehmer

Auch die seperat eingebauten Beschleunigungsaufnehmer ändern ihre Lage im Raum stärker, als wenn sie in der großen Meßdose integriert sind. Zum -Nachweis von bleibenden Winkelverschiebungen ist diese Eigenschaft zwar nützlich, zur Ermittlung der Bewegungsvorgänge sind diese Effekte jedoch störend.

Abschließend können zum Größeneinfluß der Meßdosen folgende Einflußgrößen angegeben werden :

Große Meßdose	Kleine Meßdose lokale Druckunterschiede stärker aus- geprägt Nullpunktverschiebung durch Setzun- gen an der Fügefläche Zugentlastung der Meßkabel unbefrie- digend große Winkelverlagerung der Meßdose aufgrund kleinen Durchmessers (bis 30°)	
Streuungen der Meßergebnisse gerin- ger		
Klemmkraft größer Zentrierung vorhanden		
Zugentlastung der Kabelverbindungen durch PG – Verschraubungen		
gemessene Winkelverlagerung max. 5 Grad		
Winkelverlagerung sofort meßbar	Verlagerung erst nach Ausbau meßbar	

Aufgrund der aufgezeigten Vor- und Nachteile wurden für die folgenden Versuche nur die großen Meßdosen verwendet.

4.2. Versuchsbedingungen und Versuchsvorbereitungen

4.2.1. Versuchsaufbau

Bei dem verwendeten Boden handelt es sich um einen Rheinkies mit einem optimalen Wassergehalt von 6,0 % und einer Proctordichte von 2,189 t/m³. Die Körnungslinie ist in Bild 46 dargestellt. Der Feinkornanteil beträgt 5 % .



Bild 45 : Proctorkurve des untersuchten Rheinkieses



Bild 46 : Körnungslinie des untersuchten Rheinkieses

Als Verdichtungswerkzeug wurde ein Walzenzug BW 212 mit folgenden für die Verdichtung wichtigen Daten verwendet :

Statische Achslast	5600	kg
Schwingende Masse	3200	kg
Theoretische Amplitude	1,6	mm
Vibrationsfrequenz	29	Hz
Arbeitsbreite	2120	mm
Bandagendurchmesser	1500	mm
Fahrgeschwindigkeit	2,5	km/h



Bild 47 : Einbauverhältnisse und Anordnung der Meßdosen zur Durchführung der Druck- und Beschleunigungsmessungen

In Bild 47 sind die Einbauverhältnisse ersichtlich. Die Schütthöhe (unverdichtet) betrug 100 cm . Die Einbautiefe der Meßdosen war beim ersten Versuch 20 cm (unverdichtet). Dabei wurden die Meßdosen entsprechend der Darstellung in Bild 47 eingebaut. Die Meßdosen wurden schräg eingebaut, weil aus den 3 gemessenen Normalspannungen die Schubspannung bestimmt werden soll. Zur Verdichtung wurden 14 Übergänge gefahren. Nachdem dieser Versuch abgeschlossen war, wurden die 3 Meßdosen ausgebaut und der gleiche Versuch mit einer anderen Einbautiefe der Meßdosen wiederholt. Wenn im folgenden ein Vergleich der Meßergebnisse von verschiedenen Meßtiefen vorgenommen wird, geht der Meßfehler der Reproduzierbarkeit in diese Messung mit ein. Das gesamte Versuchsprogramm wurde 2 mal durchgeführt.

4.2.2. Meßwerterfassung und Meßwertverarbeitung

In Bild 48 ist der Aufbau der Meßkette, Meßwerterfassung und Meßwertverarbeitung dargestellt. Dabei sind 11 Analogkanäle zu messen. Die Meßsignale werden möglichst nahe am Meßobjekt verstärkt und über eine Ringleitung zum Rechner – Interface übertragen. Durch das gemeinsame Taktsignal aller Sample / Hold Bausteine und die nachfolgende Abarbeitung durch den Multiplexer und A / D Wandler ist sichergestellt, daß beispielsweise der Meßwert des ersten Kanals zeitgleich mit dem Meßwert des letzten Kanals erfaßt wird. Die Grundlagen dieser Meßtechnik (Hardware) sind in /4/ zu finden.



Bild 49 : Zeitliches Ablaufdiagramm zur Meßwerterfassung



Bild 48 : Blockschaltbild zur Meßwerterfassung und Auswertung

In Bild 49 ist der zeitliche Ablauf der Meßwerterfassung ersichtlich. Die Zeitbasis zur Steuerung der Messung ist der Drehwinkel der mittig im Walzenkörper angeordneten Erregerwelle. Der Drehwinkel wird mit Exzenterwinkel bezeichnet und überstreicht bei einer Vibrationsfrequenz von beispielsweise 30 Hz je Sekunde einen Winkel von 10800 Grad.

Die zeitlich schnell veränderlichen Meßwerte der Analogkanäle werden alle 10 Grad Exzenterwinkel gemessen. Nach Einlesen der 11 Kanäle hat der Computer noch eine Wartezeit von ca 0,5 msec bis zum nächsten Meßzyklus. Es wird deutlich, daß eine gleichzeitige Messung mit 12 Meßdosen mit der verwendeten Meßmethode (Programmed I / O) nicht möglich ist. Der technische Aufwand an Meßverstärkern und eine Meßwerterfassung im DMA Betrieb würde einen 6 – 8 fachen Kostenaufwand erfordern. Die Grundlagen der Programmiertechnik (Software) sind /15/ zu entnehmen.

Da bei jeder Messung die Meßdose mit verschiedenen Winkeln zur Horizontalen eingebaut werden, muß zur Umrechnung des Beschleunigungsvektors in seine Vertikal- und Horizontalkomponente eine Koordinatentransformation durchgeführt werden.







Bild 50 : Koordinatentransformation der gemessenen Beschleunigungen auf ein vertikal / horizontal liegendes Bezugssystem Aus den 3 gemessenen Drücken mit den entsprechenden Schräglagen der Meßdosen werden mit Hilfe des Mohr'schen Kreises die vertikale Normalspannung (σ_v) und die horizontal wirkende Schubspannung (τ) ermittelt.



Bild 51 : Vorzeichenregelung bei der Darstellung der Druck- und Schubspannungen

4.3. Grundsätzlicher Verlauf der Meßwerte

4.3.1. Messungen auf Rheinkies

Der erste Einblick in die Bewegungs- und Spannungsverhältnisse im Boden wird durch die Darstellung der Meßwerte in Abhängigkeit der Zeit gewonnen. In diesem Beispiel sind nicht die Extremwerte von Interesse, sondern die Form der Kurve. Bild 52 zeigt die Verläufe von den Schwingwegen und Spannungen in einer Meßtiefe. Die Meßdose hat in diesem Fall eine Tiefe von 29 cm unter Planum. Der Vertikalschwingweg zeigt das erwartete Ergebnis. Der Horizontalschwingweg wird unmittelbar unter der Vibrationswalze nahezu Null. Ferner dreht die Phasenlage des Horizontalschwingweges bei diesem Nulldurchgang die Phase um 180 Grad (Marke 1 und 2 in Bild 52).

In Bild 53 ist die Begründung für diesen Sachverhalt dargestellt. Die horizontale Bewegungskomponente der Bodenteilchen ist beispielsweise während der Kompressionsbewegung der Bandage nach vorne gerichtet, wenn sich das Bodenteilchen vor der Bandage befindet und umgekehrt, wenn es sich hinter der Bandage befindet.



Bild 52 : Darstellung der Schwingwege und Spannungen in einer Meßtiefe von 29 cm



Bild 53 : Ursache für die Phasenumkehr des Horizontalschwingweges bei der Überfahrt mit der Vibrationswalze

Unmittelbar unterhalb des Kontaktpunktes des Walzenkörpers mit dem Boden stellt sich keine nennenswerte Horizontalamplitude ein. Dies ist einerseits ein Hinweis darauf, daß die Wirkung des Kreiserregers im Boden nicht wesentlich von der eines gerichteten Schwingers abweichen kann, und andrerseits folgt daraus, daß eingeleitete Schubspannungen nur eine untergeordnete Rolle im Bewegungsverhalten des Bodens spielen können. Dieser Punkt wird später noch eingehend behandelt.

Der Schubspannungsverlauf zeigt ebenfalls das erwartete Ergebnis. Es gilt sinngemäß das gleiche wie für den Horizontalschwingweg. Jedoch ist die Schubspannung betragsmäßig vor dem Walzenkörper größer als hinter dem Walzenkörper. Die Ursache dafür ist die Neigung der Hauptverdichtungsrichtung gegenüber der Vertikalen (siehe Bild 18).



Bild 54 : Darstellung des Vertikaldruckverlaufes in 4 Meßebenen



Bild 55 : Darstellung des Schubspannungsverlaufes in 4 Meßebenen


Bild 56 : Darstellung des Vertikalschwingweges in 4 Meßebenen



Bild 57 : Darstellung des Horizontalschwingweges in 4 Meßebenen

In den Bildern 54 bis 57 sind die Verläufe für Vertikaldruck, Schubspannung, Vertikalschwingweg und Horizontalschwingweg dargestellt. Es ist ersichtlich, daß der grundsätzliche Verlauf des Vertikaldruckes in Bild 54 und der Verlauf des Vertikalschwingweges (Bild 56) ähnlich sind. Die Verläufe sind nahezu symmetrisch in Bezug auf den Bodenkontaktpunkt. Am Verlauf der Druck- und Schubspannung ist zu sehen, daß sich die Fortpflanzung der Bodenkontaktkraft innerhalb eines Druckwinkels von ca. 30 Grad gegenüber der Vertikalen ausbreitet. Die Schubspannungen sind vor der Bandage höher als hinter der Bandage, weil die Hauptverdichtungsrichtung sich infolge den Zusammenhängen in Abschnitt 3.3.3. Bild 18 etwas von der Vertikalen neigt und sich die Horizontalkomponente der Bodenkontaktkraft in der erzeugten Schubspannung abstützt. Für einen gerichteten Schwinger wäre der Schubspannungsverlauf punktsymmetrisch zum Phasenumkehrpunkt.

Die Horizontalschwingung klingt mit Entfernung vom Walzenkontaktpunkt am schwächsten ab. Der Hauptanteil der Horizontalschwingung wird verursacht durch die Querdehnung infolge der vertikalen Stauchung durch den Druckanteil der Bodenkontaktkraft. Da die Hauptverdichtungsrichtung (siehe oben) gegenüber der Vertikalen geneigt ist, ist die Horizontalschwingung vor dem Walzenkörper stärker ausgeprägt als hinter dem Walzenkörper. Schubeffekte unmittelbar unterhalb des Walzenkontaktpunktes sind nur bei der oberen Meßdose im Horizontalschwingweg zu erkennen. In tieferen Bodenschichten (ab 20 cm) verschwindet dieser Effekt.

In Tabelle 1 und 2 sind die Extremwerte der Meßwerte der beiden Versuchsserien dargestellt. Im folgenden sind die gemessenen Vertikaldrücke (Bild 58), Vertikalamplituden (Bild 59) und Schubspannungen (Bild 60) dargestellt.

Einbautiefe Übergang		1	3	5	7	9
20 cm	p (bar)	1.81	2.86	3.38	3.42	3.67
	T max (bar)	0.57	0.93	0.90	0.94	0.94
	a max (mm)	1.25	1.38	1.34	1.33	1.30
40 cm	p (bar)	1.10	1.71	1.75	2.00	2.30
	T max (bar)	0.37	0.69	0.71	0.87	0.65
	a max (mm)	0.80	0.93	0.96	0.96	0.97
60 cm	p (bar)	0.90	1.27	1.37	1.49	1.52
	T max (bar)	0.48	0.74	0.77	0.80	0.84
	a max (mm)	0.47	0.68	0.71	0.71	0.72
80 cm	p (bar)	0.86	1.17	1.34	1.34	1.35
	τ max (bar)	0.33	0.63	0.66	0.64	0.62
	a max (mm)	0.24	0.39	0.42	0.44	0.46

Tabelle 1 : Extremwerte der Meßwerte (Versuchsreihe 1) Vertikaldruck, Schubspannung, Amplitude

Tabelle 2 : Extremwerte der Meßwerte (Versuchsreihe 2) Vertikaldruck, Schubspannung, Amplitude

Einbautiefe	Übergang	1	3	5	7	9
20 cm	p max (bar)	1.74	2.76	3.17	3.94	3.67
	τ max (bar)	0.59	1.47	1.67	1.50	1.67
	a max (mm)	1.26	1.37	1.31	1.32	1.26
40 cm	p (bar)	1.13	1.80	2.28	2.49	2.53
	τ max (bar)	0.46	0.83	0.56	0.65	0.66
	a max (mm)	0.79	0.98	1.00	0.97	0.98
60 cm	p (bar)	1.01	1.45	1.50	1.70	1.57
	T max (bar)	0.27	0.63	0.61	0.58	0.66
	a max (mm)	0.48	0.67	0.67	0.69	0.68
80 cm	p (bar) T max (bar) a max (mm)	0.20	1.18 0.45 0.40	1.27 0.48 0.43	1.34 0.53 0.44	1.35 0.51 0.46



Bild 58 : Vertikaldruckverteilung mit zunehmender Einbautiefe



Bild 59 : Vertikalamplitude mit zunehmender Einbautiefe



Bild 60 : Schubspannungsverteilung mit zunehmender Einbautiefe

4.3.2. Feldmessungen auf Fein / Mittelsand

Bei dem Bauprojekt Speicherbecken Geeste (Raum Emsland) wurde ein Wasserspeicherbecken angelegt. Das Speicherbecken war mit einer Asphaltdichtdecke ausgekleidet. Am Ringdamm sollte eine Aufschüttung von Feinund Mittelsand mit U<5 für ein geplantes Freizeitgelände geschaffen werden. Mit der Meßdose wurden dynamische Drücke und Verschiebungen unmittelbar oberhalb der Asphaltdicke gemessen, um schädliche Einwirkungen der Vibration auf die Unterlage zu vermeiden. Dazu wurde die Schütthöhe variiert (siehe Bild 66).



Bild 61 : Einbaubedingungen der Meßdose im Speicherbecken Geeste

In Tabelle 3 sind die Meßwerte zusammengefaßt. In Bild 62 sind die gemessenen Drücke aufgetragen. Es ist zu erkennen, daß der Druckverlauf beim verwendeten Fein- und Mittelsand und dem in der Testhalle verwendeten Rheinkies nicht stark voneinander abweichen.

Schütthöhe	Vibrati	on	Vertikaldruck	Vertikalschwingweg
(cm)	(mm) (H	lz)	(bar)	(mm)
50	0.9 3 1.6 2	7 9	1.89	0.138
100	0.9 3	7	0.70	0.071
	1.6 2	9	0.79	0.084
150	0.9 3	7	0.35	0.043
	1.6 2	9	0.35	0.059
200	0.9 3	7	0.35	0.035
	1.6 2	9	0.36	0.052

Tabelle 3 : Meßwerte Speicherbecken Geeste



Bild 62 : Vertikaldruckverteilung in unterschiedlicher Tiefe bei unterschiedlichen Schüttmaterialien

4.4. Bewegungsfeld und Spannungsausbreitung

4.4.1. Darstellung des zeitlichen Verlaufes

Bei dieser Darstellungsform sind die Meßwerte so aufgetragen, wie ein mit dem Verdichtungsgerät mitbewegter Beobachter den Vibrationsprozeß wahrnimmt. In Bild 63 ist das Bewegungs- und Spannungsfeld für alle 30 Grad Exzenterdrehwinkel beim 1. Übergang dargestellt. Dabei ist mit UT der untere Totpunkt der Unwuchtstellung und mit OT der obere Totpunkt der Unwuchtstellung bezeichnet. Durch den Betrieb des Verdichtungswerkzeuges oberhalb der Eigenfrequenz des Systems Walze / Boden eilt die Bewegung des Walzenkörpers der Stellung der Unwucht um fast 180 Grad hinterher.

In Bild 63 ist oberhalb jeder Einzelaufnahme die momentane Lage des Walzenkörpers auf der Bahnkurve und die Stellung des Erregergewichtes gezeichnet. Links ist das Verschiebungsfeld (50 fach vergrößert) und dazu im Vergleich die dynamische Ruhelage in 4 Schichten dargestellt. Rechts daneben sind die Schnittkräfte (Normal- und Tangentialanteil) in den 4 Meßebenen dargestellt. Da die Vibrationswalze bei jedem Übergang über das Verdichtungsplanum und die eingebauten Meßdosen hinwegfährt, kann durch eine geeignete Transformation das gesamte Bewegungs- und Spannungsprofil vor und hinter dem Walzenkörper bestimmt werden.

Bei Übergang 1 (Bild 63) finden sich die Merkmale eines linearen Schwingers mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung wieder. Zum Zeitpunkt maximaler Abwärtsgeschwindigkeit (UT + 90 Grad) ist der Bodendruck am größten. Befindet sich der Walzenkörper im unteren Totpunkt, so klingt der Bodendruck bereits wieder ab. Zum Zeitpunkt maximaler Aufwärtsgeschwindigkeit (OT + 90 Grad) erreicht der Bodendruck sein Minimum. Jedoch ist die Druckausbreitung noch bis in die untere Meßebene zu erkennen.

Da zum Zeitpunkt UT die Schwingbewegung des Walzenkörpers nach vorne gerichtet ist, sind die Schubanteile vor dem Walzenkörper etwas größer. In der Stellung OT ist es umgekehrt. Im wesentlichen zeigen die Schnittkräfte jedoch auf den Kontaktpunkt Walze / Boden.



Bild 63 : Bewegungs- und Spannungsausbreitung im Boden mit fortschreitendem Exzenterdrehwinkel, Übergang 1 (Teil 1)



Bild 63 : Bewegungs- und Spannungsausbreitung im Boden mit fortschreitendem Exzenterdrehwinkel, Übergang 1 (Teil 2)



Bild 63 : Bewegungs- und Spannungsausbreitung im Boden mit fortschreitendem Exzenterdrehwinkel, Übergang 1 (Teil 3)



Bild 63 : Bewegungs- und Spannungsausbreitung im Boden mit fortschreitendem Exzenterdrehwinkel, Übergang 1 (Teil 4)

In Bild 64 ist der gleiche Ablauf beim 7. Übergang dargestellt. Hierbei ist der Walzenkörper von OT + 70 Grad bis OT + 140 Grad ohne Bodenkontakt. Der Walzenkörper bewegt sich schneller aufwärts als der Boden folgen kann (Massenträgheit und Dämpfung des Bodens). Da die Kontaktbreite des runden Walzenkörpers durch den ansteigenden Verformungsmodul des Bodens kleiner wird, ist der Druckverlauf besonders in der oberen Meßebene räumlich enger begrenzt. Die Drücke sind aus Gleichgewichtsgründen entsprechend größer.

Nach erfolgter Kompressionsphase folgt der Boden während der Expansion dem nach oben davoneilenden Walzenkörper und bewegt sich nach dem Kontaktverlust ohne die Vorspannung des Walzenkörpers nach oben. Dies kann bei nichtbindigen Böden zu Auflockerungen im oberen Bereich führen.

In der Stellung UT + 90 Grad sowie OT + 90 Grad ist zu erkennen, daß zwischen der Auf- und Abwärtsbewegung der Bodenelemente vor und hinter dem Walzenkörper eine Phasenverschiebung von ca. 40 Grad besteht. Fährt die Walze bei vorwärtsdrehender Erregerwelle ebenfalls vorwärts, so "fällt" der Walzenkörper in das "Loch" der voreilenden Vertikalschwingung. Fährt die Walze rückwärts, so muß der Walzenkörper gegen die nacheilende Vertikalschwingung hinter dem Walzenkörper vordringen. Aus diesem Grunde entsteht bei der dynamischen Verdichtungskontrolle bei Vorwärtsfahrt ein geringerer Anzeigewert als bei der Rückwärtsfahrt. Ändert die Erregerwelle ihre Drehrichtung, so kehrt sich auch diese Erscheinung um.

Bei der Stellung UT des Erregergewichtes befindet sich die Walze und der Boden etwa im oberen Totpunkt. Durch die Querkontraktion des Bodens bewegen sich die Bodenteilchen horizontal alle auf die Symmetrielinie zu. Die Streckung in vertikaler Richtung bedeutet eine Stauchung in horizontaler Richtung. In der Stellung OT ist es genau umgekehrt. Hier wird erneut deutlich, daß die Horizontalschwingung des Bodens primär von der Querdehnung aufgrund des vertikalen Druckkegels geprägt ist. Die Übertragung der horizontalen Vibrationsbewegung des Verdichtungswerkzeuges auf den Boden spielt im Gegensatz zu der üblichen Ansicht in der Fachwelt nur eine untergeordnete Rolle.



Bild 64 : Bewegungs- und Spannungsausbreitung im Boden mit fortschreitendem Exzenterdrehwinkel, Übergang 7 (Teil 1)



Bild 64 : Bewegungs- und Spannungsausbreitung im Boden mit fortschreitendem Exzenterdrehwinkel, Übergang 7 (Teil 2)



Bild 64 : Bewegungs- und Spannungsausbreitung im Boden mit fortschreitendem Exzenterdrehwinkel, Übergang 7 (Teil 3)



Bild 64 : Bewegungs- und Spannungsausbreitung im Boden mit fortschreitendem Exzenterdrehwinkel, Übergang 7 (Teil 4)

- 76 -

4.4.2. Verschiebungsfeld in vektorieller Darstellung

Die Schwingungsverhältnisse im Boden werden auch in der vektoriellen Darstellung des Schwingweges in der jeweiligen Lage in Bezug auf den Walzenkontaktpunkt deutlich. Bei Übergang 1 (Bild 65) sind die Bewegungsverhältnisse bedingt durch den näherungsweise linearen Charakter der Randbedingungen weitgehend symmetrisch.Die Bahnkurve des Walzenkörpers ist aufgrund des Schlupfes bei der losen Schüttlage nicht geschlossen. Dies wird in Abschnitt 4.8.1. weiter behandelt.



Bild 65 : Bahnkurve des Verdichtungswerkzeuges und der Bodenelemente beim Übergang 1

In Bild 66 sind die Bahnkurven der einzelnen Bodenteilchen beim 7. Übergang aufgetragen. Durch den nichtlinearen Charakter der Randbedingung (Abheben des Verdichtungswerkzeuges) ändern sich auch die Bewegungsverhältnisse. Da die maximale Kraftwirkung während der Kompression (Abwärtsbewegung) am größten ist, wird die Veränderung der Bewegungsverhältnisse vom 1. Übergang zum 7. Übergang auch in diesem Zeitraum geprägt. Im ersten Teil der Abwärtsbewegung (in Bild 66 mit Marke 1 an der Bahnkurve der Walze und unten im Boden bezeichnet) zeigt die Tangente an die Bahnkurve in den Bereich vor dem Walzenkörper. Die Wirkung hinter dem Walzenkörper wird im zweiten Teil der Abwärtsbewegung stärker.



Bild 66 : Bahnkurve des Verdichtungswerkzeuges und der Bodenelemente beim Übergang 7

Da die Ausbreitung des Kompressionseffektes hauptsächlich auf Druckübertragung basiert, folgert hieraus das Nacheilen der Schwingung hinter der Bandage bzw. das Vorauseilen der Schwingung vor der Bandage.

Die Neigung der Hauptachsen der Bewegungsellipse des Walzenkörpers (siehe Bild 18) setzt sich in der Orientierung des Bewegungsfeldes im Boden fort.

4.5. Energiebetrachtungen

4.5.1. Systemgrenzen und Vorüberlegungen

Bei der Erstellung einer Energiebilanz müssen an der betrachteten Systemgrenze alle Energieanteile erfaßt werden. An der horizontal liegenden Fläche in der gewählten Tiefe soll die Energie mit den Meßdosen erfaßt werden. Die Intensität der Energie nimmt mit der Entfernung von der erregenden Walze ab, so daß die Energie weit vor, bzw. weit hinter der Walze vernachlässigt werden kann.

Zur Untersuchung des Randeinflusses wurden mehrere Dosen in der Randzone eingebaut. Eine Abschätzung des Einflusses ist in 5.4. beschrieben.



Bild 67 : Systemgrenzen zur Erstellung einer Energiebilanz

Zur Ermittlung der durchgesetzten Energie durch eine bestimmte Systemgrenze wird ein Flächenelement dA betrachtet und durch Integration der gesamte Energiedurchsatz ermittelt. Durch den vektoriellen Charakter ergibt sich automatisch eine Aufteilung in Druck- und Schubenergie. Schubeffekte quer zur Bandage werden vernachlässigt.



Bild 68 : Aufteilung der Leistung in Druck- und Schubleistung

Die Vibrationsbewegung wird aufgeteilt in eine Kompressionsphase und eine Expansionsphase. Steigt die Steifigkeit des Bodens, so folgt auf die Expansionsphase noch eine drucklose Expansion (Kontaktverlust) bis zur nachfolgenden Kompression (vergleiche auch Bild 19).



Bild 69 : Vorzeichenfestlegung zur Ermittlung der Indikatordiagramme im Boden

In Bild 69 sind die wesentlichen Merkmale der Indikatordiagramme dargestellt. Unterhalb des Kontaktpunktes ist sowohl die Schubspannung als auch der Horizontalschwingweg näherungsweise gleich Null. Dies bedeutet, daß unmittelbar unterhalb des Walzenkörpers die Energie ausschließlich durch Druck übertragen wird.

Schubspannung und Horizontalschwingweg wechseln unmittelbar unter dem Walzenkörper das Vorzeichen. Durch den gemeinsamen Vorzeichenwechsel von Schubspannung und Horizontalschwingweg bleibt der Umfahrsinn der einzelnen Indikatordiagramme immer gleich (Uhrzeigersinn). Dies bedeutet, daß in jeder Meßebene die Energie (effektiv) vom Verdichtungswerkzeug in tiefer liegende Schichten transferiert wird.



Bild 70 : Zeitlicher Verlauf der ausgetauschten spezifischen Druckleistung in einer Bodenschicht

Während der Kompressionsphase gibt der Walzenkörper an den Boden Energie ab und erhält einen Teil der Energie während der Expansion wieder von dem Boden zurück. Die Differenz wird effektiv durch die entsprechende Schicht transferiert. Die Zeit ohne Kontakt erscheint im Zeitdiagramm als ein Bereich ohne Energieaustausch.

Die Meßwerte der spezifischen Druckleistung sind in Bild 71 (1. Übergang) und Bild 72 (7. Übergang) dargestellt. Die maximale Leistung während der Kompression ist etwa 3 mal so hoch, als die von dem Boden an die Walze zurückgegebene Leistung. Das zeitliche Mittel der ausgetauschten Leistungen ergibt die effektiv an den Boden abgegebene Verdichtungsleistung.



Bild 71 : Spezifische Druckleistung , Einbautiefe 20 cm , 1. Übergang



Bild 72 : Spezifische Druckleistung , Einbautiefe 20 cm , 7. Übergang

		Übergang 1		Übergang 3		Übergang 5		Übergang 7		Übergang 9	
		Druck	Schub	Druck	Schub	Druck	Schub	Druck	Schub	Druck	Schub
Versuch 1 Versuch 2 Mittel	Hydraulisch zugeführte Strömungsleistung	15 14 14	.0 .7 .9	17 18 17	.8 .0 .9	19 19 19	.0 .0 .0	19 19 19	-3 -4 -4	19 19 19	.5 .5 .5
Versuch 1 Versuch 2 Mittel Summe	Effektiv abgegebene Leistung von Walze an Boden	6.18 6.40 6.29 8	2.66 2.24 2.45 .74	8.70 9.10 8.90 10	1.96 2.05 2.01 .91	9.45 9.20 9.33 11	2.00 2.25 2.13 .46	9.78 9.66 9.72 11	1.77 2.04 1.91 .63	9.97 10.00 9.99 12	2.23 2.38 2.31 .30
Versuch 1 Versuch 2 Mittel Summe	Leístung in Einbautiefe 20 cm	2.20 2.21 2.21 2.21	0.30 0.29 0.30	2.57 2.60 2.59 2	0.27 0.40 0.34 _93	2.63 2.82 2.73 3	0.17 0.47 0.32 .05	2.56 3.36 2.96 3	0.12 0.42 0.27 .23	2.68 2.99 2.84 3	0.17 0.52 0.35 .19
Versuch 1 Versuch 2 Mittel Summe	Leistung in Einbautiefe 40 cm	1.34 0.99 1.17	0.17 0.18 0.18 .35	1.64 1.56 1.60 2	0.42 0.39 0.41 .21	1.81 1.93 1.87 2	0.47 0.31 0.39	1.95 2.02 1.99 2	0.58 0.38 0.48 2.47	2.17 1.94 2.06 2	0.42 0.27 0.69
Versuch 1 Versuch 2 Mittel Summe	Leistung in Einbautiefe 60 cm	0.52 0.55 0.54	0.24 0.12 0.18).72	0.98 0.95 0.97	0.61 0.48 0.55 .52	1.17 1.10 1.14 1	0.69 0.43 0.61 .75	1.20 1.23 1.22	0.72 0.42 0.56 .78	1.23 1.20 1.22 1	0.73 0.36 0.55 .77
Versuch 1 Versuch 2 Mittel Summe	Leistung in Einbautiefe 80 cm	0.27	0.09 0.09 0.36	0.57 0.57 0.57 (0.41 0.37 0.39).96	0.71 0.70 0.71	0.46 0.40 0.43 1.14	0.76 0.79 0.78	0.47 0.41 0.44 1.22	0.80 0.86 0.83	0.44 0.37 0.41

Tabelle 4 : Leistungsbilanz am Verdichtungswerkzeug und in verschiedenen Bodenschichten (KW)

-



Bild 73 : Leistungsbilanz am Verdichtungswerkzeug und in verschiedenen Bodenschichten , Übergang 1



Bild 74 : Leistungsbilanz am Verdichtungswerkzeug und in verschiedenen Bodenschichten , Übergang 7

In Bild 73 ist eine Leistungsbilanz beim 1. Übergang dargestellt. Der größte Energieverlust tritt im Hydraulikmotor und den Lagerstellen des Erregersystems auf (6.16 KW). Da die Horizontalbewegung des Bodens unterhalb des Kontaktpunktes der Walze nahezu Null ist (Bild 57 oder Bild 65), kann davon ausgegangen werden, daß der Hauptanteil der eingeleiteten Schubleistung (2.45 KW) unmittelbar an der Oberfläche in Wärme umgesetzt wird (Schlupf). Ein weiterer großer Energieverlust tritt im oberen Bereich zwischen Verdichtungswerkzeug und der oberen Meßebene auf. Es wird davon ausgegangen, daß diese Energie dafür gebraucht wird, die losgeschlagene obere Schicht bei jeder Kompression erneut zu verdichten. Diese Umlagerung (mit Verfestigung) muß stattfinden, damit bei der folgenden Kompression eine Gegenkraft aufgebaut werden kann. Im Boden wird dann die weiter transferierte Energie schrittweise abgebaut. Dabei werden ca. 20 % der Energie in Form von Schubenergie transportiert.

In Bild 74 ist eine Leistungsbilanz beim 7. Übergang dargestellt. Abgesehen von den Energieverlusten vom Hydrauliksystem bis zur eingeleiteten Energie in den Boden wird im Vergleich zum 1. Übergang deutlich mehr Energie vom Boden aufgenommen. Durch das Ansteigen des Verformungsmoduls wird auch mehr Energie in tiefer liegende Schichten transferiert. Der Anteil der Schubenergie am gesamten Energietransfer beträgt ca. 25 %.



Bild 75 : Absorbierte Leistung in verschiedenen Schichten in Abhängigkeit der Übergangszahl

In Bild 75 ist die absorbierte Leistung zwischen den einzelnen Meßebenen in Abhängigkeit der Übergänge zu sehen. Wesentlich sind dabei die Kurven 20 – 40 cm und 80 – ∞ cm. Bei geringen Übergangszahlen wird der größte Anteil der Leistung in der oberen Schicht absorbiert (geringer Verformungsmodul, hohe Dämpfung). Mit zunehmender Verdichtung steigt der Verformungsmodul. Durch ein Absinken der Dämpfung absorbiert die obere Schicht weniger Leistung und läßt mehr Leistung in tiefer liegende Schichten durch.

Die Streuung der errechneten Werte steigt bei der Differenzbildung an, da 2 nahezu gleichgroße fehlerbehaftete Meßwerte voneinander abgezogen werden. Deshalb besitzt die Aussagekraft von Bild 75 nur tendenziellen Charakter.

4.5.3. Einflußgrößen für die Verdichtungsleistung



In Bild 76 wird das reale Indikatordiagramm aus Bild 19 , 20 durch ein Dreieck ersetzt.

zusammen :

Effektiv abgegebene Verdichtungsarbeit je Exzenterumdrehung :

$$W_{eff} = \frac{P_{eff}}{f} \approx 450 J$$

Bild 76 : Berechnung der vom Verdichtungswerkzeug an den Boden abgegebenen Verdichtungsleistung auf der Basis eines stark vereinfachten Indikatordiagrammes Durch die Einführung der dimensionslosen Bodenkontaktkraft (vgl. Abschnitt 3.3.5.) und des dimensionslosen Schwingweges wird die Gleichung stark vereinfacht und kann zur Abschätzung des Zusammenhanges zwischen der Verdichtungsleistung und der maximalen Bodenkontaktkraft benutzt werden. Im weiteren zeigt diese Gleichung, daß statische Achslast und theoretische Amplitude die beiden wichtigsten Parameter zum Walzenvergleich sind. Dabei ist bei heute ausgeführten Walzenzügen durch die hohe theoretische Amplitude im Vergleich zur statischen Achslast (Sättigung infolge fehlender Vorspannung, siehe Abschnitt 3.4.) der Einfluß der statischen Achslast (bzw. statische Linienlast) höher einzuordnen als der Einfluß der theoretischen Amplitude.

In /27/ wird für verschiedene Materialien und Verdichtungsanforderungen folgende Beziehung für die Verdichtungsleistung angegeben. Hierbei wird der Begriff der Verdichtungsleistung jedoch nicht für die in einer Zeiteinheit geleisteten Arbeit (Kraft mal Weg) verwendet, sondern es handelt sich um die bis zu einem bestimmten Verdichtungsgrad verdichtete Masse pro Zeiteinheit (t/h).

$$\frac{Q}{b} = Konstante \left(\frac{F_{Stat}}{b}\right)^{\alpha} \left(a_{th}\right)^{\beta} \left(\frac{m_{Rahmen}}{m_{Bandage}}\right)^{\beta}$$

$$mit: 0,87 < \alpha < 2,09$$

$$0,22 < \beta < 0,70$$

$$0,05 < |\beta| < 0,44$$

$$\alpha > \beta > 1\delta I$$

Die durch Verdichtungstests gefundenen Zusammenhänge in /27/ stimmen mit den oben dargestellten Energiebetrachtungen überein.

Durch die mittlere abgegebene effektive Verdichtungsleistung (13 KW) werden umgerechnet bei jeder Exzenterumdrehung etwa 450 J (f = 29 Hz) in den Boden transferiert. Die kinetische Schwingenergie des Walzenkörpers, der eine kreis- bzw. ellipsenförmige Bewegung ausführt, beträgt ca. 150 - 200 J ($m_w = 4000$ kg, $a_{th} = 1,7$ mm). Diese angebotene kinetische Energie kann für die Verdichtungswirkung nur eine untergeordnete Rolle spielen, da die Energie kleiner ist, als die abgegebene Verdichtungsenergie. Als Kriterium zum Walzenvergleich spielt sie daher keine Rolle.

Die Rotationsenergie der Erregerwelle liegt zwischen 60000 - 70000 J ($J = 4 \text{ kgm}^2$). Aus dieser Schwungenergie wird die erforderliche Verdichtungsenergie entnommen. Durch den unstetigen Energieentzug durch den Boden läuft die Erregerwelle mit einem Ungleichförmigkeitsgrad von 0,00002 % . Der Ungleichsförmigkeitsgrad aufgrund der endlichen Kolbenzahl des hydraulischen Vibrationsantriebes ist sicherlich höher anzusetzen. Als Kriterium zum Walzenvergleich kann die Rotationsenergie der Erregerwelle daher ebenfalls keine Rolle spielen.

4.6. Verformungsmodul

4.6.1. Indikatordiagramme im Boden

Die Vibrationswalze führt bei jeder Exzenterumdrehung eine Be- und Entlastung des zu verdichtenden Bodens durch. Dieser Effekt ist die physikalische Grundlage der dynamischen Verdichtungskontrolle. Unter der Anwendung der Meßdosen können in verschiedenen Meßebenen im Boden Indikatordiagramme ermittelt werden, die neben energetischen Überlegungen (Abschnitt 4.5.) zur Untersuchung des Stoffgesetzes des zu verdichtenden Bodens genutzt werden können.

In Bild 77 sind in der oberen Zeile die Indikatordiagramme (vertikal) des Walzenkörpers und in den unteren Zeilen die Indikatordiagramme in verschiedenen Meßebenen dargestellt. Es fällt auf, daß die Kurvenformen für die jeweilige Übergangszahl (Spalten) in allen Schichten in erster Näherung ähnlich sind. Das Indikatordiagramm in einer bestimmten Meßebene gibt das Spannungs – Dehnungs Verhalten des Halbraumes unterhalb der entsprechenden Meßebene wieder.



Bild 77 : Gegenüberstellung der Indikatordiagramme am Walzenkörper und in verschiedenen Einbautiefen im Boden

4.6.2. Materialgesetz des Bodens

Für die Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls zwischen 2 Meßebenen muß der mittlere Druck in der Schicht und der Relativweg zwischen den beiden Schichten ermittelt werden.



Bild 78 : Stauchung der Bodenschicht infolge Kompression durch den Walzenkörper und Bestimmung der Spannungs - Dehnungs -Diagramme

Werden Druckspannung und Stauchung übereinander aufgetragen, so entstehen Spannungs – Dehnungs – Diagramme für die betreffenden Bodenschichten (Bild 79). Da unterhalb des Walzenkörpers die Schubspannungen verschwinden, handelt es sich bei der Druckspannung um eine Hauptspannung.

Da bei der Berechnung des Differenzweges zwei nahezu gleichgroße Verschiebungen voneinander subtrahiert werden müssen, ist die Form der Kurve einem größeren relativen Meßfehler unterworfen (siehe Abschnitt 5.5.). Als gute Näherung für das Verformungsverhalten des Bodens kann das Spannungs – Dehnungs – Diagramm in Bild 80 angesehen werden. Kompressions- und Expansionskurve sind vergleichbar mit dem bekannten Druck – Setzungsdiagramm vom Plattendruckversuch. Im zweiten Teil der Expansion wird in oberflächennahen Schichten im Zeitbereich des Kontaktverlustes keine Druckspannung mehr registriert. Die in tiefer



Bild 79 : Spannungs - Dehnungs - Diagramme für verschiedene Bodenschichten



Bild 80 : Idealisierter Verlauf der Spannungs - Dehnungs - Diagramme als Grundlage zur Bestimmung eines idealisierten Stoffgesetzes

liegenden Schichten gemessene Restdruckspannung wird benötigt, um die Bodenmasse zwischen Meßebene und Oberfläche nach oben zu beschleunigen. Der Meßfehler aufgrund der Massenkräfte kann für die Bodenschicht zwischen 13 - 29 cm mit 10% angegeben werden (siehe auch Abschnitt 5.5.).

Die Meßwerte sind in Tabelle 5 (1. Versuchsreihe) und Tabelle 6 (2. Versuchsreihe) wiedergegeben. Der dynamische Verformungsmodul wurde wie folgt berechnet :

$$EV_{dyn} = \frac{O_{xmax}}{A_{xmax} - A_{xmin}} \cdot h_{c}$$

Ferner wurde nach erfolgter Verdichtung (14 Übergänge) genau oberhalb der horizontal eingebauten Meßdose zur Feststellung der Wirktiefe der Lastplatte ein Plattendruckversuch /5/ durchgeführt. Die Ergebnisse des Plattendruckversuches sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tiefe	Übergang Nr.	1	3	5	7	9
20 - 40 cm	Druck (bar)	1.46	2.29	2.57	2.71	2.99
	Dehnung (mm/m)	5.65	5.60	5.09	4.58	4.05
	EV _{dyn} (MN/m ²)	2 5.8	40.9	50.5	59.2	73.8
40 - 60 cm	Druck (bar) Dehnung (mm/m) EV dyn (MN/m ²)	1.00 4.08 24.5	1.49 3.08 48.4	1.56 3.15 49.5	1.75 3.13 55.9	1.91 3.18 60.1
60 - 80 cm	Druck (bar)	0.88	1.22	1.36	1.42	1.44
	Dehnung (mm/m)	2.69	3.41	3.37	3.22	3.07
	EV _{dyn} (MN/m²)	32.7	35.8	40.4	44.1	46.9

Tabelle 5 : Dynamischer Verformungsmodul EV_{dyn} (Versuchsreihe 1)

Tiefe	Übergang Nr.	1	3	5	7	9
20 - 40 cm	Druck (bar) Dehnung (mm/m) EV dyn (MN/m ²)	1.44 5.45 26.4	2.28 4.31 52.9	2.73 3.60 75.8	3.22 4.02 80.1	3.10 3.35 92.5
40 - 60 cm	Druck (bar) Dehnung (mm/m) EV dyn (MN/m ²)	1.07 3.69 29.0	1.63 3.65 44.7	1.89 3.97 47.6	2.10 3.32 63.3	2.05 3.42 59.9
60 - 80 cm	Druck (bar) Dehnung (mm/m) EV _{dyn} (MN/m ²)	0.96 3.65 26.3	1.32 3.48 37.9	1.39 3.01 46.2	1.52 3.09 48.5	1.46 2.78 52.5

Tabelle 6 : Dynamischer Verformungsmodul EV_{dvn} (Versuchsreihe 2)

		Mittelwert		Standar	dabweichung
Verformungsmodul	EV	31.1	MN/m²	3.7	MN/m²
Verformungsmodul	EV2	92.4	MN/m²	11.0	MN/m²
Wassergehalt	w	4.4	%	0.3	%

Tabelle 7 : Plattendruckversuch beim 14. Übergang (8 Einzelwerte)

Die dynamisch ermittelten Verformungsmoduln nehmen mit zunehmender Übergangszahl zu. Der Abfall des dynamischen Verformungsmoduls in tiefer liegenden Schichten ist mit der abnehmenden Verdichtungswirkung mit zunehmender Tiefe zu begründen. Der dynamische Verformungsmodul in der oberen Meßschicht stimmt gut mit dem statisch ermittelten Verformungsmodul (Plattendruckversuch) nach dem 14. Übergang überein.



Bild 81 : Dynamischer Verformungsmodul in Abhängigkeit der Übergangszahl und der Meßtiefe im Vergleich mit dem statischen Verformungsmodul (DIN 18134) nach dem 14. Übergang

4.6.3. Einflußtiefe des Plattendruckversuches

Bei der Durchführung des Plattendruckversuches /5/ wurde für die einzelnen Laststufen der Bodendruck in der entsprechenden Bodenschicht bestimmt (Bild 82).



Bild 82 : Ermittlung der Einflußtiefe beim Plattendruckversuch durch Gegenüberstellung von Stempeldruck (Plattendruckversuch) und dem gemessenen Druck im Boden

Bei der Auftragung des von der Lastplatte eingeleiteten Druckes und des gemessenen Erddruckes verläuft die Entlastungslinie auf einem höheren Bodendruckniveau. Durch die Reibung der einzelnen Bodenkörner erfolgt ein Druckabbau im Boden erst nach erfolgter Entlastung des eingeleiteten Druckes.

Die Steigung der ersten Kompressionskurve ist ein Maß für die Wirktiefe des eingeleiteten Druckes. Der Druck wird bis in einer Tiefe t, welche dem Durchmesser der Lastplatte entspricht, bis auf ca. 34 % abgebaut.


Bild 83 : Gemessener Druck in verschiedenen Meßtiefen in Abhängigkeit des eingeleiteten Stempeldruckes beim Plattendruckversuch und Berechnung der Einflußtiefe (Gradient bei Erstbelastung)

4.7. Nitschwingende Bodenmasse

In der Literatur /28/ führte Lorentz den Begriff der mitschwingenden Bodenmasse ein. Dabei wurde die Masse des mitschwingenden Bodens der Masse des Verdichtungswerkzeuges zugerechnet. In diesem Abschnitt soll die Größenordnung dieser Bodenmasse bestimmt werden.

Die kinetische Energie des schwingenden Bodens kann durch eine Integration der einzelnen kinetischen Energieanteile des gesamten Halbraumes ermittelt werden. Bei dem auftretenden Doppelintegral wird die erste Integration in horizontaler Richtung durchgeführt. Da durch die Beschleunigungsmessungen das Bewegungsfeld in einer Schicht bekannt ist, kann die kinetische Energie, bzw. die reduzierte Bodenmasse in der betreffenden Schicht in spezifischer Form angegeben werden.

- 97 -



Integration ;

$$E_{kin} = \int_{z=0}^{\infty} \left[\int_{x=-\infty}^{\infty} \frac{\frac{1}{2} b \mathcal{G} (v_x^2 + v_z^2)_{max} dx}{\frac{dE_{kin}(z)}{dz}} \right] dz$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m_{red} \cdot v_{red}^2$$

gleichgesetzt :

$$m_{red} = \int_{z=0}^{\infty} \left(\int_{x=-\infty}^{\infty} b \quad Q \quad \frac{(v_x^2 \cdot v_z^2)_{max}}{v_{red}_{max}^2} dx \right) dz$$
$$\frac{dm_{red}(z)}{dz}$$

darin bedeuten : m_{red} : reduzierte mitschwingende Bodenmasse

Vred : Schwinggeschwindigkeit Bandage

Bild 84 : Ermittlung der mitschwingenden Bodenmasse auf der Basis der Energieäquivalenz der kinetischen Energie

Die Integration über z liefert die mitschwingende Bodenmasse (Bild 85). Dabei fällt auf, daß die spezifische mitschwingende Bodenmasse im Übergangsbereich der zu verdichtenden Schüttlage mit dem bereits verdichteten Untergrund zu Null wird.



Bild 85 : Berechnung der mitschwingenden Bodenmasse aus der Verteilung der spezifischen mitschwingenden Bodenmasse durch Integration über die Tiefe

Die mitschwingende Bodenmasse fällt so gering aus, weil die Schwinggeschwindigkeit in die Berechnung quadratisch eingeht und die Geschwindigkeit mit der Entfernung vom Walzenkörper rasch absinkt. Dies wird deutlich, wenn die Gleichung zur Bestimmung der mitschwingenden Bodenmasse auf folgende Form gebracht wird :

$$m_{red} = \int_{m}^{\infty} \left(\int_{x=-\infty}^{\infty} b \ Q \ \frac{v_x^2 + v_z^2}{v_{red}^2} \, dx \right) \, dz$$
$$m_{red} = \int_{m} \left(\frac{v}{v_{red}} \right)^2 \, dm$$

Wesentlich am Ergebnis ist jedoch, daß die mitschwingende Bodenmasse mit 350 kg nur ca. 10 % der schwingenden Masse des Verdichtungsgerätes beträgt. Daher spielen die Massenkräfte des Bodens im Verhältnis zu den Massenkräften der schwingenden Masse des Verdichtungswerkzeuges nur eine untergeordnete Rolle. Dies erklärt auch die gute Übereinstimmung des dynamisch ermittelten Verformungsmoduls mit dem statisch durchgeführten Plattendruckversuch. Im weiteren liegt hierin die Begründung für die gute Korrelation des Verformungsmoduls mit den Meßprinzipien der dynamischen Verdichtungskontrolle. Die Korrelation verschlechtert sich, wenn bindige Böden mit hohem Wassergehalt vorliegen (siehe /26/).

Kein anderes Meßsystem reagiert auf Änderungen der Bewegungsverhältnisse im Boden so sensibel wie der Beschleunigungsaufnehmer. In Bild 86 ist für den gleichen Walzenzug aus 4.2. die theoretische Amplitude von 1.6 mm auf 2.1 mm erhöht worden. In 20 cm Meßtiefe wurden Vertikaldruck, Vertikalbeschleunigung und Vertikalschwingweg gemessen.

In dem Zeitraum, wo das Verdichtungswerkzeug keinen Kontakt mit dem Boden besitzt, werden die Bodenelemente mit der Erdbeschleunigung nach unten beschleunigt. Der zeitliche Verlauf der Bahnkurve des Bodens durchläuft näherungsweise eine Flugparabel. Trifft das Verdichtungswerkzeug erneut auf den Boden auf, so entsteht durch die Massenträgheit der entsprechenden Bodenschicht eine negative Beschleunigungsspitze, wodurch in der Bahnkurve des Bodens eine rasche Kompressionsbewegung folgt. Wirkt diese Beschleunigungsspitze auf eine Schichtdicke von beispielsweise 20 cm, so verursacht dies einen dynamischen Druckanteil von 0.2 bar. Beim Vergleich des dynamischen Druckes mit dem maximal auftretenden Gesamtdruck (2.4 bar) wird deutlich, daß die Massenkräfte und damit die mitschwingende Bodenmasse für das Schwingverhalten des Gesamtsystems Walze / Boden nur eine untergeordnete Rolle spielt.



Bild 86 : Verlauf der Vertikalbeschleunigung während der Abhebezeit des Verdichtungswerkzeuges vom Boden und Abschätzung des dynamischen Druckanteils beim erneuten Auftreffen des Verdichtungswerkzeuges auf den Boden

4.8.1. Schlupf

Beim Abrollen des Walzenkörpers auf dem Boden ist der Kontaktpunkt Bandage / Boden der Momentanpol für die Bewegung des Walzenkörpers. Beim Kreisschwinger wird dem Kontaktpunkt eine kreis- bzw. ellipsenförmige Bewegung überlagert. Die entstehende horizontale Bodenkontaktkraft ist der Schwingbewegung entgegengesetzt. Das zeitliche Mittel dieser Umfangskraft ${\rm F}_{\sf By}$ ist nicht gleich Null. Die Auswirkung dieser Gegebenheit auf das Bewegungsverhalten kann anhand einer Momentenbilanz erläutert werden. Die Momentenbilanz wird über eine Periode ⊂ integriert. Das Reibmoment, welches mit steigendem $\omega_{Schlupf}$ ansteigt, stellt sich so ein, daß das zeitliche Mittel der horizontalen Bodenkontaktkraft ausgeglichen wird. Dadurch dreht sich der Walzenkörper in entgegengesetzter Drehrichtung der Erregerwelle. Zur Vollständigkeit sei noch erwähnt, daß die Änderung der Winkelgeschwindigkeit $\ddot{\Psi} = \dot{\omega}_{Schlunf}$ während einer Periode sehr klein ist, weil das Massenträgheitsmoment der Bandage groß ist (J = 1500 kgm²; R = 0,75 m). Daher kann davon ausgegangen werden, daß der Walzenkörper mit konstanter Winkelgeschwindigkeit abrollt.



Bild 87 : Momentenbilanz, Entstehung der Schlupfbewegung des Walzenkörpers beim Kreiserreger durch die Bodenkontaktkraft

Fährt die Walze vorwärts, so bremst das Drehmoment F_{By} R die Abrollgeschwindigkeit des Walzenkörpers. Bei Rückwärtsfahrt unterstützt es den Antrieb des Fahrmotors. Als Ergebnis ergibt sich bei der Vorwärtsfahrt des Verdichtungsgerätes eine langsamere Abrollgeschwindigkeit des Walzenkörpers. Dadurch ist der Kontaktpunkt Bandage / Boden nicht mehr ein

Momantanpol und die auftretende Differenzgeschwindigkeit (Schlupf) muß für die Kinematik der Walzenbewegung mit berücksichtigt werden. Da die Schwinggeschwindigkeit einer Vibrationswalze im allgemeinen kleiner ist als die Fahrgeschwindigkeit, kann ein geringer Schlupf bereits zu einer starken Veränderung der Bahnkurve der Walzenbewegung und damit der eingeleiteten Vibrationswirkung führen.



Bild 88 : Theoretische Bahnkurve des Kontaktpunktes des Walzenkörpers mit dem Boden durch Überlagerung der Schlupf- und Schwinggeschwindigkeit

In Bild 88 ist die Bahnkurve des tiefsten Punktes des Walzenkörpers bei verschiedenen Schlupfgeschwindigkeiten aufgetragen. Ist die Differenzgeschwindigkeit gleich Null, so verläuft die Bahnkurve im unteren Teil der Kompressionskurve schräg nach hinten. Beträgt die Differenzgeschwindigkeit beispielsweise 0.5 km/h, so verläuft die Bahnkurve in dem Teil maximaler Kraftwirkung nahezu vertikal. In der Praxis stellt sich eine Schlupfgeschwindigkeit von 0.2 bis 0.5 km/h ein. Speziell bei Fein- und Mittelsänden kann als Folge der Schlupfbewegung bei der Vibrationsverdichtung an der Oberfläche eine Schuppenbildung beobachtet werden.

Der Einfluß in größerer Meßtiefe wurde mit Hilfe der Meßdosen untersucht. Dabei wurde der Vibrationswalzenzug derart umgerüstet, daß unterschiedliche Abrollgeschwindigkeiten des Walzenkörpers und der Antriebsräder eingestellt werden können. In Bild 89 sind zwei Meßzyklen mit unterschiedlichem Schlupf dargestellt.



Bild 89 : Einfluß des Schlupfes auf die Bewegungs- und Spannungsverhältnisse im Boden , Teil 1



Bild 89 : Einfluß des Schlupfes auf die Bewegungs- und Spannungsverhältnisse im Boden , Teil 2

Die Richtung der Bahnkurve im unteren Teil der Kompressionskurve ist durch einen Pfeil angedeutet. In der Bahnkurvendarstellung ist der Charakter des Kreisschwingers in dem Bereich des Bodens stärker zu erkennen, in welchen sich der Walzenkörper zum Zeitpunkt größter Bodenkontaktkraft hinbewegt. Die Vertikalspannung ist von dem Schlupf fast unbeeinflußt, während die Schubspannung den Einfluß erwartungsgemäß etwas stärker anzeigt.

Der Einfluß des Schlupfes ist jedoch wesentlich schwächer ausgeprägt, als es bei solchen unterschiedlichen Bewegungsformen des Verdichtungswerkzeuges erwartet worden wäre. Die Begründung hierzu liegt in dem beschränkten Reibungskoeffizienten. Die sich einstellende horizontale Reibkraft kann nur so groß werden, wie es das Produkt Reibungskoeffizient mal Normalkraft zuläßt (siehe hierzu auch 3.3.3., Bild 16). Wird die Horizontalbewegung der Walze größer, so rutscht der Walzenkörper über den Boden hinweg und leitet die Bewegung nicht ein.

4.8.2. Oszillator

Bei diesem Erregersystem wird anstatt der kreisförmigen Bewegungsform des Walzenkörpers eine oszillierende Bewegung des Walzenkörpers erzeugt.



Bild 90 : Theoretische Schwingbewegung der Erregersysteme vom Vibrator und Oszillator

Die Verfechter des Oszillatorprinzips gehen davon aus, daß durch die Hin- und Herbewegung des Walzenkörpers mit Unterstützung der Achslast eine Schubspannung in die Oberfläche eingeleitet wird, welche eine Verdichtung des abgewalzten Bodens bewirken soll. Zur Untersuchung wurde in einen Walzenzug BW 172 D ein Erregersystem basierend auf dem Oszillatorprinzip installiert.

Technische	Daten	:	Statische Achslast		3100		kg
			Schwingende Masse	1	2000		kg
			theoretische Amplitude		1.4	45	m
			Vibrationsfrequenz		32		Hz
			Arbeitsbreite		1680		സ്ഥ
			Bandagendurchmesser		1200		лт

Auf einem Kies mit 15 - 20 % Schluff ($w_{opt} = 6$ %) wurden Vergleichsversuche bei verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt.

Die Dichtemessungen wurden mit einer Doppelsonde durchgeführt /6/ . Dabei handelt es sich um ein radiometrisches Meßverfahren. In den Bildern 91 und 92 sind die Ergebnisse der Dichtemessungen festgehalten. Dabei liegt die erreichte Trockendichte beim Oszillator etwa in der Mitte zwischen Vibrator und einer statisch durchgeführten Verdichtung. Die erforderlichen Übergänge zur Erreichung des gleichen Verdichtungszustandes sind beim Oszillator 2 - 3 mal so hoch, wie beim Vibrator.



Zur Begründung des unterschiedlichen Verdichtungserfolges wurden mit einer Meßdose die Druck- und Beschleunigungsverhältnisse im Boden gemessen. Die Meßtiefe war 15 cm. In den Bildern 93 und 94 ist der Vertikaldruck von Vibrator und Oszillator dargestellt. Es ist zu erkennen, daß beim Oszillator kein Verlust an Bodenkontakt besteht. Ferner ist zu erkennen, daß der Spitzendruck beim Vibrator ca. 5 mal so hoch ist, wie der statische Druck.



- 108 -







Bild 96 : Vertikalbeschleunigung Oszillator

In den Bildern 95 und 96 ist die Vertikalbeschleunigung dargestellt. Da der Oszillator vertikal vom Prinzip her keine Bewegung einleiten kann, ist die Vertikalbeschleunigung entsprechend niedrig.



Bild 97 : Horizontalbeschleunigung Vibrator



Bild 98 : Horizontalbeschleunigung Oszillator

Bild 97 und Bild 98 sind zur Erklärung des schlechten Verdichtungserfolges von wesentlicher Bedeutung. Es zeigt, daß die Horizontalbeschleunigung, die man aufgrund der Schubspannungseinleitung eigentlich in der gleichen Größenordnung wie beim Vibrator erwartet hätte, im Vergleich zum Vibrator sehr klein ausfällt.

Der Vibrator kann als eine Kombination von gerichtetem Schwinger und Oszillator aufgefaßt werden. Da die Druckkraft beim Vibrator höher ist, kann infolge dessen auch mehr Schubkraft übertragen werden. Die in den Boden eingeleiteten Kräfte der beiden Erregersysteme können aufgrund der Messungen wie folgt abgeschätzt werden :

	Druckkraft	Schubkraft		
Vibrator	12.0 - 15.0 to	7.0 - 9.0 to		
Oszillator	3.0 - 4.0 to	1.8 - 2.4 to		

In den vorigen Abschnitten ist beim Vibrator vom Einfluß der horizontalen Bewegungskomponente im Boden keine große Wirkung zu erkennen. Der hauptsächliche Anteil der Horizontalbewegung ist auf die Querdehnung aufgrund der vertikal eingeleiteten Stauchung zurückzuführen. Diese Erkenntnis wird durch die Vergleichsmessungen Vibrator / Oszillator bestätigt.

4.9. Springen des Verdichtungsgerätes

4.9.1. Betriebszustände des Verdichtungswerkzeuges

Wird ein Verdichtungsgerät mit einer hinreichend kleinen theoretischen Amplitude auf einen Boden mit hinreichend geringer Steifigkeit eingesetzt, verliert es keinen Bodenkontakt, wenn die maximale Bodenkontaktkraft nicht größer wird als die 2-fache statische Achslast.

Wird die theoretische Amplitude oder die Steifigkeit der Unterlage vergrößert, kann das Verdichtungswerkzeug die Bewegung nicht voll in den Boden übertragen, da das Integral der Bodenkontaktkraft über der Zeit (siehe 3.3.5.) durch den Impulssatz begrenzt sein muß. Die dynamische Ruhelage des Verdichtungswerkzeuges wandert nach oben und es kommt bei jeder Umdrehung der Exzenterwelle zu einem reproduzierbaren Abheben des Verdichtungswerkzeuges vom Boden.

Wird die theoretische Amplitude oder die Steifigkeit der Unterlage nun weiter vergrößert, so stellt sich der Betriebszustand des Springens ein. Dabei tritt als Frequenzanteil die Hälfte der erregenden Vibrationsfrequenz, sowie alle ganzzahlige Vielfache dieser Frequenz auf (siehe 3.5.). Entgegen anderen Veröffentlichungen /35/ ist dieser Betriebszustand vollkommen stabil und reproduzierbar. Treten beispielsweise über eine längere Fahrstrecke keine größeren Steifigkeitsunterschiede des Bodens auf und durchläuft die Bahnkurve des Verdichtungswerkzeuges bei der n - ten Umdrehung der Exzenterwelle gerade ihre Bodenkontaktphase, so liegt auch bei der n + 1000 sten Umdrehung der Exzenterwelle Bodenkontakt vor. Wird die theoretische Amplitude oder die Steifigkeit der Unterlage noch weiter vergrößert, so stellt sich der Betriebszustand des Taumelns ein. Der Beginn dieses Betriebszustandes ist auch abhängig von der Unsymmetrie des Verdichtungswerkzeuges (rechts/links). Dabei bildet sich eine Schwingbewegung um die Längsachse des Verdichtungsgerätes aus. Die ablaufende Frequenz des Taumelns wird bestimmt durch die Eigenfrequenz des Schwingsystems Rahmen / schwingende Masse . Da die Erregerfrequenz i.a. nicht ein ganzzahliges Vielfaches dieser Eigenfrequenz ist, ist die Bewegungsform beim Betriebszustand des Taumelns nicht periodisch.

4.9.2. Messung des Sprungvorganges

In Bild 99 ist der zeitliche Verlauf des Sprungvorganges über 2 Umdrehungen der Exzenterwelle dargestellt. Bei der eingezeichneten Marke 1 ist das Auftreffen des Verdichtungswerkzeuges mit dem Boden am Beschleunigungsverlauf zu erkennen. Der auf den Boden auftreffende Walzenkörper erzeugt eine rasche Veränderung des Verlaufes der Bahnkurve. Die Kraftspitze ist auch im angezeigten Vertikaldruckverlauf der Meßdose zu sehen. Jedoch sind auch hier die Drücke zum Zeitpunkt der größten Kompression des Bodens höher (Steifigkeitskräfte) als die Drücke infolge des Aufpralls (Massenkräfte).



Bild 99 : Bewegungsablauf des Walzenkörpers und des Bodens beim Betriebszustand des Springens

In Bild 100 sind die Indikatordiagramme des gleichen Meßzyklus wie in Bild 99 dargestellt. Im Indikatordiagramm ist der Aufprall durch ein rasches Ansteigen der Druck / Bewegungskurve (Marke 1) erkennbar. Die Schleife wird verursacht durch Reibungs- und Hystereseeffekte im Verformungsverhalten des Bodens. An der Größenordnung der sich einstellenden Verdichtungsamplituden ist zu erkennen, daß der große Schwingweg des Verdichtungswerkzeuges dem Boden nicht aufgeprägt wird.



Bild 100 : Gegenüberstellung der Indikatordiagramme am Walzenkörper und in verschiedenen Einbautiefen im Boden beim Betriebszustand des Springens



Bild 101 : Bahnkurven des Verdichtungswerkzeuges und der Bodenelemente beim Betriebszustand des Springens

In Bild 101 ist das Bewegungsfeld im Boden dargestellt. Es besitzt eine große Ähnlichkeit mit Bild 66 (kein Springen). In tieferen Schichten ist der Anteil der Sprungamplitude nicht so stark ausgeprägt. Im ersten Teil der Kompressionsbewegung des Verdichtungswerkzeuges ist die Bodenkontaktkraft bei der Bodenumdrehung (Marke 2) wesentlich größer als bei der Luftumdrehung (Marke 1). Aus diesem Grund ist die Sprungamplitude vor dem Walzenkörper im Boden stark ausgeprägt. Im zweiten Teil der Kompressionsbewegung ist die Kraftwirkung nahezu gleich (Marke 3 beim Aufprall und Marke 4 vor dem Abheben). Deshalb ist die Sprungintensität im Boden hinter dem Verdichtungswerkzeug nicht so stark ausgebildet.

4.10. Frequenzspektrum der Meßsignale

Durch die Nichtlinearität der ablaufenden Vorgänge werden trotz der harmonischen Schwingungserregung Oberwellen generiert. Vom Standpunkt der Schwingungstechnik ist das Frequenzspektrum der Meßsignale daher von besonderem Interesse.

In /17/ behandelt Hürtgen die Reaktion des Halbraumes bei der Einleitung zeitabhängiger Kräfte. Dabei ist es nützlich, das Problem vom Zeitraum in den Frequenzraum zu transformieren.

Die Fouriertransformation /3/ überführt das zeitabhängige Problem in ein frequenzabhängiges Problem und wird mit folgender Transformationsvorschrift durchgeführt :



Bei der Fouriertransformation wird das Zeitintegral über dem Produkt des Meßsignales h(t) mit dem komplexen Schwingungsansatz gebildet. Dabei wird der Betrag des Integrals groß, wenn die Frequenz der "Mess"-Schwingung mit der Frequenz der "Test" – Schwingung übereinstimmt. An dem Fourierspektrum der Meßsignale können die Frequenzanteile der zeitlichen Meßsignale dargestellt werden.



Bild 102 : Fourierspektrum der Meßwerte beim 1. Übergang



Bild 103 : Fourierspektrum der Meßwerte beim 7. Übergang



Bild 104 : Fourierspektrum der Meßwerte beim 13. Übergang

In den Bildern 102 bis 104 ist das Frequenzspektrum bei Übergang 1, 7 und 13 dargestellt (Einbautiefe 40 cm). Zur Transformation wurden die Meßwerte von 21 Doppelexzenterumdrehungen herangezogen. Bei Übergang 1 (Bild 102) ist der Anteil der generierten Oberwellen noch gering.

Beim Übergang 7 (Bild 103) ist die Grundschwingung und alle ganzzahligen Vielfache der Grundschwingung zu sehen. Für die Druck- und Bewegungsvorgänge am Verdichtungsgerät und im Boden treten Frequenzanteile bis 100 – 200 Hz auf. Dabei liegen die Frequenzanteile der Beschleunigungen im Boden und am Verdichtungswerkzeug in der gleichen Größenordnung. Lediglich die Grundschwingung ist am Verdichtungswerkzeug stärker ausgeprägt als im Boden, da sich die Fliehkraft am Verdichtungswerkzeug als Beschleunigung der Trägheitskraft ausbildet, während sie im Boden nur sekundär wirkt (über Bodenkontaktkraft). Beim Übergang 13 (Bild 104) befindet sich die Walze im Sprungbetrieb. Dabei sind alle ganzzahligen Vielfache der halben Erregerfrequenz vorhanden. Auch hier verlaufen die Vorgänge im Frequenzbereich unterhalb 100 – 200 Hz ab.

5. Fehleranalyse

5.1. Druck- und Schubspannungsmessung

Erddrucksensoren für die Messung dynamischer Bodendrücke müssen eine hohe Eigenfrequenz haben, damit das Übertragungsverhalten im interessierenden Frequenzbereich unabhängig von der Frequenz ist. Für die hier angefertigte Meßdose ergibt sich für eine obere Grenzfrequenz von 100 Hz (siehe 4.10.) bei einer Eigenfrequenz der Meßmembran von 1200 Hz ein maximaler Meßfehler unter 0.5 %.

Durch die lokale Störung des Verformungsprofils im Bereich der Meßdose wird durch die hohe Steifigkeit der Meßdose im Vergleich zum Boden eine Behinderung der Dehnung verursacht. Der gemessene Druck der gestörten Bodenschicht ist daher stets höher als der Druck in der ungestörten Bodenschicht. Nach Prange /34/ muß daher mit einem Meßfehler von 23 % gerechnet werden.



Bild 105 : Erhöhung des angezeigten Druckes durch Behinderung der Dehnung nach Prange /34/

Eine weitere Methode zur Abschätzung des Meßfehlers infolge Dehnungsbehinderung ist bei Schulz /37/ zu finden. Danach ist mit einem Meßfehler von 18 % zu rechnen.

$$\frac{p_{mess}}{p_{\infty}} = \frac{\frac{H}{2T} + 1}{\frac{H}{2T} \cdot \frac{E_B}{E_M} + 1}$$
 Kompatibilität der Verschiebungen in A-A



Bild 106 : Erhöhung des angezeigten Druckes durch Behinderung der Dehnung nach Schulz /37/

Die beiden genannten Ansätze gehen von einer konstanten Druckverteilung in einer hinreichend großen Entfernung des Druckgebers aus. Die Verteilung des Vertikaldruckes besitzt jedoch durch den Kontaktpunkt des Walzenkörpers mit dem Boden in den jeweiligen Meßebenen einen glockenförmigen Verlauf. Durch die endliche Größe der Meßmembran ist daher der angezeigte mittlere Druck der Druckmeßdose stets kleiner als der tatsächliche Spitzendruck. Für die Approximation der Vertikaldruckverteilung wird der Ansatz der Airy'schen Spannungsfunktionen (Linienlast auf isotropem Halbraum) verwendet /2/ .



Bild 107 : Approximation der Vertikaldruckverteilung für verschiedene Meßtiefen

Wird für die Meßdose eine über die Meßmembran konstante Empfindlichkeit zugrunde gelegt, so kann über eine Kräftebilanz das Verhältnis vom angezeigten mittleren Druck zum tatsächlichen Maximaldruck berechnet werden.

In Bild 109 ist der relative Meßfehler in Abhängigkeit des Schlankheitsgrades der Druckverteilung dargestellt. In der oberen Meßebene (Einbautiefe 20 cm) beträgt der relative Meßfehler 18 %, in der unteren Meßebene 1 % . Eine Reduzierung dieses Meßfehlers ist nur möglich, wenn eine Meßdose mit einem kleineren Durchmesser verwendet wird (siehe 4.1.2.).



Bild 108 : Berechnung des Meßfehlers durch Bestimmung des mittleren Druckes bei konstanter Empfindlichkeit der Meßmenbran



Bild 109 : Relativer Meßfehler des angezeigten Druckes in Abhängigkeit der Meßtiefe und der Größe der Meßmembran

Eine weitere Fehlerquelle ergibt sich bei der Berechnung der Schubspannung aus den gemessenen Drücken bei unterschiedlichen Einbauwinkeln.



 $p(\varphi) = \tau_2 \sin\varphi \cos\varphi + \sigma_h \sin^2\varphi + \sigma_v \cos^2\varphi ; \varphi = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3$

umgestelltes Gleichungssystem :

σ _ν	1	011	⁰ 12	°13	$\left \rho(\varphi=\varphi_{1})\right $
σ _h	÷	a ₂₁	⁰ 22	°23	$\rho(\varphi = \varphi_2)$
(τ/		031	°32	°33	$\left\langle \rho(\varphi = \varphi_3) \right\rangle$

Maximaler Meßfehler:

$$\frac{d\sigma_{V}}{d\rho_{i}} = |a_{11}| + |a_{12}| + |a_{13}| = f_{1}(\varphi)$$

$$\frac{d\sigma_{h}}{d\rho_{i}} = |a_{21}| + |a_{22}| + |a_{23}| = f_{2}(\varphi)$$

$$\frac{d\tau}{d\rho_{i}} = |a_{31}| + |a_{32}| + |a_{33}| = f_{3}(\varphi)$$

Bild 110 : Erhöhung des Meßfehlers bei der Schubspannungsermittlung im Vergleich zur Druckspannungsermittlung durch die Winkeltransformation



Bild 111 : Fehlerfortpflanzungsfaktor in Abhängigkeit des Einbauwinkels der Meßdosen

Da der ebene Spannungszustand durch 3 Spannungen festgelegt ist, müssen mit den Meßdosen 3 Normalspannungen in 3 verschiedenen Richtungen bestimmt werden. Zur Bestimmung der gesuchten Spannungen σ_v , σ_h und τ wird das Gleichungssystem nach den Unbekannten umgestellt. Da die gemessenen Drücke fehlerbehaftet sind, werden die errechneten Spannungen durch die Transformation mit einem größeren Meßfehler behaftet sein. In Bild 111 ist die Abhängigkeit des Meßfehlers vom Einbauwinkel dargestellt.

Zur Ermittlung der Schubspannung würde eine Winkelkombination mit -45 Grad, O Grad und + 45 Grad keine Erhöhung des Meßfehlers durch die Transformation ergeben. Bei der oberen Meßebene liegt jedoch bei einem Einbauwinkel von 45 Grad eine Kante der Meßdose fast an der Oberfläche. Deshalb wurde ein Einbauwinkel von 25 bis 30 Grad gewählt. Dadurch ist der Meßfehler der Schubspannung um 30 % höher als der Meßfehler der Normalspannung. Bei der Berechnung der Horizontalspannung verzehnfacht sich der Meßfehler der Druckmeßwerte. Die Bestimmung der Horizontalspannungen ist mit der aufgeführten Methode daher nicht sinnvoll.

Für den ebenen isotropen Halbraum läßt sich die Spannungsverteilung mit Hilfe der Airy'schen Spannungsfunktionen unterhalb einer Linienlast berechnen. Danach muß die Horizontalspannung unter dem Walzenkörper gleich Null sein. Da sich durch die Transformation der Meßwerte eine Zugspannung ergibt, deutet dies auf einen relativen Meßfehler bei der vertikalen Druckspannung von 10 bis 15 % hin.

Mit den 3 Meßdosen werden die Drücke unter 3 verschiedenen Winkeln gemessen. Der zeitliche Verlauf der Drücke ist in Bild 113 dargestellt. Wird beispielsweise die horizontale Lageposition von Meßdose 1 falsch ermittelt, so entspricht dies einer zeitlichen Verschiebung der jeweiligen Druckverteilung. Für eine Fehlerabschätzung wird wieder die Spannungsverteilung der Linienlast auf isotropem Halbraum verwendet. Dabei ergibt sich bei einer Meßtiefe von 30 cm und einem horizontalen Lagefehler von 1 cm ein relativer Meßfehler der Schubspannung von 5 %. Der Maximalwert des Vertikaldruckes wird dadurch jedoch nicht beeinflußt (Dose 2 liegt horizontal). Durch die Betrachtungen wird ersichtlich, daß der Meßfehler der Schubspannung immer größer als der Meßfehler des Vertikaldruckes sein muß.



Bild 112 : Airy'sche Spannungsfunktion (Schneidenlast , isotroper Halbraum)



Bild 113 : Meßfehler der Schubspannung durch Lageverschiebung der Dose

Aufgrund der Berechnungsmethoden von Prange (23 %) und Schulz (18 %) ist der angezeigte Druck zu hoch. Durch die endliche Größe der Meßdose ist der angezeigte mittlere Druck zu niedrig (1 - 18 %). Unter Berücksichtigung der einzelnen Fehlerquellen kann der systematische Fehler bei der Bestimmung der Vertikaldruckspannung mit 20 % und bei der Schubspannung mit 40 % angegeben werden.

Da die Versuche 2 mal durchgeführt wurden, kann der zufällige Meßfehler (Reproduzierbarkeit) berechnet werden. Er beträgt für die Vertikaldruckmessungen 6 % und für die Schubspannungsmessung 17 %. Der erhöhte Meßfehler bei der Schubspannungsermittlung liegt im Einfluß der Einbaureproduzierbarkeit der Meßdosen und dem Transformationsfehler.

5.2. Beschleunigungsmessung und Wegberechnung

Für die Untersuchung des dynamischen Zusammenwirkens von Meßdose und dem umgebenden Boden wurde das Ersatzmodell in Bild 114 angenommen.



Bild 114 : Dynamisches Ersatzmodell für die Vertikalschwingungen der Meßdose im Boden

Die Berechnung der Eigenfrequenzen und der Schwingformen wurde mit einem Finite-Elemente-Programm durchgeführt. Ist die Höhe der Meßdose klein gegenüber der umgebenden Bodenschicht, so wird die Eigenfrequenz des Gesamtsystems nur wenig beeinflußt (Bild 115).





Die hohe Steifigkeit der Meßdose spielt dann ebenfalls keine Rolle, da die Schwingungsauslenkung in der Mitte des Stabes maximal und die Ableitung und damit die Dehnung gleich Null ist. Für die Eigenfrequenz gilt die Gleichung :

$$f_o = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E_B}{Q_B}}$$

Geht die Höhe der Bodenschicht x gegen Null, so geht die Eigenfrequenz gegen unendlich. In Bild 115 ist zu erkennen, daß sich die Störung der Meßdose (Dichte 3600 kg/dm³) bis zu einer Bodenschicht von x = $2 \cdot h$ bei einer Frequenz von 1000 Hz auswirkt. Da die maximal interessierenden Frequenzen bei 100 - 200 Hz liegen (siehe 4.10.), kann die Meßdose mit guter Näherung als gekoppelt mit dem Boden angesehen werden.

Der maximale Meßfehler der Meßkette von Beschleunigungsaufnehmer und Verstärker beträgt 2 % (Herstellerangaben).

In 3.2.2. wird für das Integrationsintervall für die Integration der Beschleunigung des Walzenkörpers die doppelte Dauer einer Exzenterwellenumdrehung festgelegt. Das gleiche Verfahren wird auch für die Integration der Dosenbeschleunigung zum Dosenschwingweg angewendet. Die Periodizität des Beschleunigungssignales als Voraussetzung zur Integration und zur Bestimmung der Integrationskonstanten wird im ansteigenden und abfallenden Teil des Beschleunigungsverlaufes jedoch nicht ganz erfüllt.



Bild 116 : Integration des Beschleunigungsverlaufes durch Fouriertransformation und stückweiser Integration

Dadurch ergibt sich in diesem Bereich ein Rechenfehler. Auch hierbei wäre eine Fouriertransformation der Beschleunigung vom Zeitraum in den Frequenzraum, eine 2-fache Integration im Frequenzraum und eine anschließende Rücktransformation in den Zeitraum möglich.

Zur Approximation der Beschleunigung wurde der Verlauf in Bild 116 angenommen. Der mittlere Fehler durch die Integration ist im Bereich der ansteigenden und abfallenden Schwingung maximal und beträgt dort 5 %. Bei der Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls ist der vertikale Schwingweg unterhalb des Walzenkörpers von Interesse. Dort beträgt der Fehler maximal 1 % .

Der systematische Fehler für die meßtechnische Bestimmung des Schwingweges beträgt unter dem Walzenkörper 3 % und in der gesamten Meßebene 7 % . Anhand der 2 Meßreihen ergibt sich ein mittlerer Fehler für die Maximalwerte des Schwingweges von 3 % (Reproduzierbarkeit).

5.3. Bodenkontaktkraftermittlung

In Bild 19 ist ein Indikatordiagramm dargestellt, wobei der Walzenkörper zeitweise ohne Bodenkontakt ist. Bei der Berechnung der Bodenkontaktkraft aus den Beschleunigungsmessungen ergibt sich rechnerisch eine negative Bodenkontaktkraft. Dies kann für eine Fehlerabschätzung herangezogen werden. Der Meßfehler beträgt 4 %. Der Meßfehler der horizontalen Bodenkontaktkraft ist höher, da durch das Lagerspiel des Fahrlagers eine Kopplung von Walzenkörper und Seitenschild nicht immer gewährleistet ist. Der Meßfehler für die Horizontalkraft liegt 3 mal so hoch wie bei der Vertikalkraft.

5.4. Energiebetrachtungen

Die vom Walzenkörper an den Boden effektiv abgegebene Verdichtungsleistung (Indikatordiagramm) ist mit einem Fehler von 5 % behaftet. Die Reproduzierbarkeit der ermittelten Verdichtungsleistung wird von der Spurtreue beim Walzenfahren sowie der Welligkeit des Planums bestimmt. Bei den beiden Versuchen betrug die Reproduzierbarkeit 1.2 %. Bei der Bestimmung der Schwingungsleistung durch eine Bodenschicht wird ein konstantes Druck- und Bewegungsprofil über die gesamte Breite des Walzenkörpers angenommen. Zur Untersuchung des Randeinflusses wurde die Druckverteilung in einer Meßtiefe von 40 cm gemessen.



Bild 117 : Vertikaldruckverteilung in der Randzone des Walzenkörpers

Es ist zu erkennen, daß sich der Abfall des Vertikaldruckes unter einem Winkel von ca. +/- 30 Grad gegenüber der Vertikalen ausbildet. Beim Vergleich der Annahme einer konstanten Druckverteilung unter der gesamten Walzenbreite mit der tatsächlichen Druckverteilung ergibt sich eine Abweichung der Gesamtkraft von 3 %.

Der Gesamtfehler bei der Bestimmung der Leistung setzt sich aus dem Fehler der Spannungsverteilung, Schwingwegberechnung und dem Seiteneinfluß zusammen. Der maximale Fehler bei der Bestimmung der transferierten Schwingungsleistung durch eine Meßebene im Boden beträgt 25 %. Die Reproduzierbarkeit ergibt sich zu 8 %.

5.5. Dynamischer Verformungsmodul

Bei der Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls wird davon ausgegangen, daß die Massenkräfte in der betrachteten Bodenschicht klein sind. Dazu ist die Schichtdicke möglichst klein zu wählen, da der dynamische Druckunterschied proportional zur Schichtdicke wächst. Für die Bestimmung des Differenzweges ist jedoch eine möglichst große Schichtdicke zu wählen, da der relative Fehler der Differenzwegmessung dadurch kleiner wird. Dies führt zu einer optimalen Schichtdicke, wobei der relative Fehler minimal wird.



Bild 118 : Zusammensetzung des Meßfehlers bei der Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls aus dem Meßfehler der Differenzwegermittlung und dem Meßfehler der Druckermittlung

In Bild 118 ist die Optimierung graphisch dargestellt. Dabei wird für den Druck der mittlere Meßfehler als statischer Anteil und der dynamische Druck in Abhängigkeit der Schichtdicke angenommen. Der mittlere Meßfehler der Schwingwege wird für die Differenzwegberechnung zugrunde gelegt. Es ist zu erkennen, daß eine Schichtdicke zwischen 15 und 30 cm zu vernünftigen Fehlergrenzen führt. Der Meßfehler bei der Bestimmung des dynamischen Verformungsmoduls liegt bei 30 % . Der mittlere Fehler (Reproduzierbarkeit) ergibt sich aus beiden Versuchsreihen zu 10 % . Nach jedem Verdichtungsversuch wurde nach Abschluß der Verdichtung ein Plattendruckversuch durchgeführt. Der mittlere Fehler des Verformungsmoduls (statisch) beträgt 12 % .

5.6. Trockendichte

Bei den Vergleichsversuchen in Abschnitt 4.8.2. wurde die Trockendichte mit einer Doppelsonde /6/ gemessen. Die Streuung der Meßwerte setzt sich aus der statistischen Streuung der Zählrate, dem Meßfehler bei der Abstandsmessung Strahler / Empfänger und dem tatsächlichen Dichteunterschied zusammen. Bei den Versuchen ergab sich ein mittlerer Meßfehler von 1 %.

6. Zusammenfassung

Die physikalischen Grundlagen der dynamischen Verdichtungskontrolle werden in dieser Arbeit erläutert und begründet. Dabei existiert ein direkter Zusammenhang zwischen der dynamischen Federsteifigkeit des Bodens und dem Anzeigewert der dynamischen Verdichtungskontrolle. Der Zusammenhang zwischen der Dichte und dem dynamischen Meßwert ist nur indirekt möglich.

Für die Beurteilung des Betriebsverhaltens des Verdichtungswerkzeuges erweist sich die Einführung der Bodenkontaktkraft als Kraftwirkung zwischen Walzenkörper und Boden als zweckmäßig. Aus der Darstellung der Bodenkontaktkraft über dem Schwingweg lassen sich Aussagen über das Verformungsverhalten des Bodens ableiten. Die Abhängigkeit der dimensionslosen Bodenkontaktkraft von der Kontaktzeit ist unabhängig von Frequenz, Amplitude und Massenverteilung des Verdichtungsgerätes.

Es wird nachgewiesen, daß die Ursache für das Absinken der Eigenfrequenz des Systems Walze / Boden bei steigender Unwucht im Kontaktverlust des Verdichtungswerkzeuges mit dem Boden zu finden ist.
Zur Messung der Druck- und Bewegungsverhältnisse im Boden wurde eine Druckmeßdose mit eingebauten Beschleunigungsaufnehmern entwickelt. Durch Integration der Beschleunigungssignale werden die Schwingwege des Bodens ermittelt.

Als wesentliche Ergebnisse der Messungen sind zu nennen :

- Der horizontale Anteil der Schwingbewegung des Kreiserregers wird nahezu vollständig durch Schlupf an der Oberfläche abgebaut und damit nicht in den Boden übertragen. Für die Verdichtungswirkung in tieferen Schichten ist der Einfluß von untergeordneter Bedeutung.
- Die Schwingungsrichtung der Bodenelemente ist stets auf den Kontaktpunkt Walze / Boden hingerichtet
- Der größte Anteil der vom Verdichtungswerkzeug an den Boden abgegebenen Energie wird unmittelbar in der oberen Bodenschicht in Wärme umgesetzt. Mit zunehmender Verdichtung steigt der Energietransfer in tiefere Schichten
- Der Anteil der Schubenergie an der gesamten Energie beträgt 20 25 % .
- Die maßgeblichen Einflußgrößen zur Erreichung einer hohen Verdichtungsleistung sind statische Linienlast und theoretische Amplitude
- Das Spannungs Dehnungsverhalten des verwendeten Kieses setzt sich bei der Vibrationsverdichtung aus Kompression (flache Kennlinie), Expansion bis zum Kontaktverlust (steile Kennlinie) und druckloser Expansion bis auf den Anfangszustand zusammen
- Mit den Meßdosen läßt sich der dynamische Verformungsmodul in verschiedenen Schichten bestimmen. Es besteht eine gute Übereinstimmung mit dem statischen Verformungsmodul (Plattendruckversuch).
- Durch die meßtechnische Bestimmung der kinetischen Energie des schwingenden Bodens im Vergleich zur kinetischen Energie des vibrierenden Walzenkörpers wird festgestellt, daß die mitschwingende Bodenmasse wesentlich kleiner ist als die schwingende Masse des Verdichtungswerkzeuges

- Mit zunehmenden Verdichtungsfortschritt treten im Betriebsverhalten des Verdichtungswerkzeuges die folgenden Zustände auf :
 - quasilineares Schwingverhalten, kein Abheben vom Boden
 - Kontaktverlust, Generierung von Oberwellen durch Nichtlinearitäten
 - Springen des Verdichtungswerkzeuges mit halber Erregerfrequenz, periodischer Vorgang
 - Taumeln des Verdichtungswerkzeuges, keine Periodizität

7. Literaturverzeichnis

/1/ N.N. Behaviour of materials during compaction Discussion during International conference on compaction Paris , Volume 3 , 11 - 54 , April 1980 /2/ Betten, J. Beitrag zur Ermittlung Airy'scher Spannungsfunktionen als Grundlage zur Berechnung der Walzenabplattung Archiv für das Eisenhüttenwesen, 42. Jahgang , Heft 1 / 1971 /3/ Brigham, E.O. FFT - Schnelle Fouriertransformation Oldenburg Verlag 1985 /4/ N.N. Burr - Brown , Applikationsseminar 84 /5/ N.N. DIN 18134 : Plattendruckversuch , 1976 /6/ N.N. Doppelsonde, Bedienungsanleitung 171 Ehlers, G. Der Baugrund als Federung in schwingenden Systemen Beton und Eisen, Bd. 41, 1942 /8/ Floß, R. Dynamische Verdichtungskontrolle bei Erdbauten Straße und Autobahn, Heft 2 / 1985 /9/ Floß, R., Gruber, N., Obermayer J. A dynamical test method for continious compaction control Improvement of ground, Helsinki 1983, Volume 1, S. 25 - 30 /10/ Floß, R., Strobl, Th. Fehlerquellen beim Einbau von Meßwertaufnehmern in eine Erdschüttung und deren Korrektur bei der Auswertung

Symposium Meßtechnik im Erd- und Grundbau 1983

/11/ Forssblad, L.

Compaction meter on vibrating rollers for improved control International conference on compaction, Paris 04 / 80 Volume II, S. 541 - 546

/12/ N.N.

Glötzl, Prospektunterlagen über pneumatische Erddruckmesser Rheinstetten, 1984

/13/ Gruber N., Obermayer J., Floß R. Beschleunigungsmessungen an Vibrationswalzen zum Nachweis der Bodenverdichtung Symposium "Meßtechnik im Erd- und Grundbau", München 1983 S. 71 - 77

/14/ Halbedl, S.

Anwendung von Druckmeßdosen verschiedener Systeme unter Baustellen- und labormäßigen Bedingungen und die Auswertung der Ergebnisse

Diplomarbeit TUM , 10 / 1983

/15/ N.N.

Hewlett Packard, Reference Manuals HP 1000

/16/ N.N.

Hottinger Baldwin Meßtechnik, Bedienungsanleitung Beschleunigungsaufnehmer B12

/17/ Hürtgen, H.

Die Reaktion von Straßen bei zeitabhängiger Belastung, Teil 3 Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1969

/18/ Jessberger, H.L., Dörr R. Behaviour of dynamically loaded granular materials

/19/ Keller, H. Die Energieaufnahme rolliger Böden bei dynamischen Vibrationsvorgängen Bundesanstalt für Straßenwesen, D 82 (Diss. TH Aachen)

/20/ Keller, H.

Eine Vergleichsmessung verschiedener Bodendruckmeßdosen für dynamische Druckmessungen Baumaschine und Bautechnik, April 1972

/21/ Keller, H.

Ein Beitrag zur Vibrationsverdichtung rolliger Böden, Teil 1 Straßen- und Tiefbau 9 / 1972

/22/ Keller, H.

Ein Beitrag zur Vibrationsverdichtung rolliger Böden, Teil 2 Straßen- und Tiefbau 11 / 1972

/23/ Keller, H.

Drücke und Bewegungen in Bodenschüttungen bei Vibrationsverdichtungen III, Straßen- und Tiefbau 12 / 1973

/24/ Keller, H.

Zur Druckfortpflanzung der Verkehrslasten durch verschiedene Straßenbefestigungen, Straße und Autobahn 11 / 1977

/25/ Kirschner, R.

Dynamische Kontrolle der Verdichtung im Erdbau Straßen- und Tiefbau, Heft 6 / 1986

/26/ Kröber, W.

Dynamische Verdichtungsprüfung von schwach bindigen Böden Tiefbau Berufsgenossenschaft, TBG Mai 1987

/27/ N.N.

Liste D'Apitude , C.E.R. Rouen, Edition September 1982

/28/ Lorenz, H.

Neue Ergebnisse der dynamischen Baugrunduntersuchung VDI Nachrichten Band 78 Nr. 12 , März 1934

/29/ Lorenz, H.

Grundbau Dynamik, Springer Verlag 1960

/30/ Machet, J.-M.

Compactage des graves-bitume an moyen de rouleaux vibrants Ministere de L'Equipment, Laboratoire central des ponts et chaussees, Decembre 1976 /31/ Machet J.-M. et Sanejouand R.

Modeles mathematiques dans le domaine du compactage par vibration, International conference on compaction, Paris Volume 2 , 651 - 657 April 1980

/32/ N.N.

Maihak, Prospekt Bodendruckaufnehmer, Hamburg, Druckschrift 1690

/33/ Novak, M.

Über die Nichtlinearität der Vertikalschwingungen von starren Körpern auf dem Baugrunde Acta Technica, Rocnik Bd. 2 , 1957

/34/ Prange, B.

Ein Beitrag zum Problem der Spannungsermittlung im Halbraum Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der TH Karlsruhe, Heft 18, 1965

/35/ Quibel, A.

Le comportement vibratoire : trait d'union entre le choix des parameters et l'efficacite d'un rouleau vibrant International conference on compaction, Paris 1980, Volume II 671 - 676 , April 1980

/36/ Reissner, E.

Stationäre axialsymmetrische durch eine schüttelnde Masse erregte Schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes Ing. Arch. VII (1936), S. 381 - 395

- /37/ Schulz, H. Erddruck- und Verformungsmessungen Symposium Meßtechnik im Erd- und Grundbau 1983
- /38/ Schwaab, E.F., Pregl, O., Kieres, W. Compaction Control with the compactometer Improvement of ground, Helsinki 1983, Volume 1, S. 73 - 82
- /39/ Sonnenberg, R.

Der Einfluß von Schwingungsüberlagerungen auf die Bodenverdichtung mit Vibrationswalzen Dissertation TH Aachen, 1972

- /40/ Yong R.N. and Fattah, E.A.
 Prediction of Roller Compaction Efficiency
 Transportation Research Record 897
- /41/ Yoo, T.S. , Selig, E.T. New concepts for vibratory compaction of soil International conference on compaction, Paris, Volume 2, 703 - 707, April 1980
- /42/ Zienkiewicz, O.C. Methode der Finiten Elemente Hanser Verlag, 1975

Schriftenreihe Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Budolf Floss

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik

Heft 1982	1	Tragfähigkeit von Verpreßankern in nichtbindigem Boden – vergriffen –
Heft 1983	2	Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässig- keitstheorie in der Bodenmechanik
Heft 1984	3	In-situ Versuche zur Ermittlung der Unterbausteifigkeit an zwei Pfeilern der Sinntalbrücke Schaippach
Heft 1985	4	Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten silikat- gel-injizierter Sande
Heft 1985	5	Beiträge zum Tragverhalten axial zyklisch belasteter Pfähle
Heft 1986	6	Forschungsbeiträge zum mechanischen Verhalten von Geotextilien
Heft 1986	7	Beschreibung der räumlichen Streuungen von Bodenkenn- werten mit Hilfe der Zeitreihenanalyse
Heft 1986	8	Ein stochastisches Bodenmodell für geotechnische Aufgaben
Heft 1987	9	Testing of bentonite suspensions
Heft 1987	10	Beiträge zur Felsmechanik
Heft 1988	11	Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden