

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung.....	1
1.2	Motivation, Zielsetzung und Gliederung der Arbeit .....	2
<b>2</b>	<b>Verdichtung von Böden mit dynamisch angeregten Walzen</b>	<b>7</b>
2.1	Verdichtung von Boden- und Schüttmaterialien .....	8
2.1.1	Unterschiedliche Verdichtungsverfahren.....	9
2.1.1.1	Oberflächenverdichtung .....	9
2.1.1.2	Impulsverdichtung (IV) .....	11
2.1.1.3	Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV).....	12
2.1.1.4	Tiefenverdichtung.....	14
2.1.2	Oberflächennahe Verdichtung mit Walzen.....	15
2.1.3	Einflüsse auf die Verdichtungsleistung und den Verdichtungserfolg.....	21
2.1.3.1	Bodeneigenschaften.....	21
2.1.3.2	Auswahl des Maschinentyps .....	25
2.1.3.3	Maschinenparameter.....	27
2.1.3.4	Einbaubedingungen .....	29
2.2	Funktionsweise dynamisch arbeitender Walzen .....	29
2.2.1	Vibrationswalzen.....	30
2.2.2	Oszillationswalzen .....	34
2.2.3	Walzen mit Richtschwinger .....	37
2.2.4	Selbstregelnde Walzen .....	38
2.2.5	Sonderformen und neue Erregerkonzepte .....	42
2.3	FDVK-Systeme für dynamisch angeregte Walzen.....	45
2.3.1	Allgemeines.....	46
2.3.2	Grundlegende Aspekte für FDVK-Systeme.....	47
2.3.2.1	Komponenten von FDVK-Systemen.....	47
2.3.2.2	Einflussfaktoren auf FDVK-Werte.....	49
2.3.2.3	Vor- und Nachteile von FDVK-Systemen.....	51
2.3.3	Existierende FDVK-Systeme .....	52
2.3.3.1	Compactometer ( <i>CMV</i> -Wert) .....	52
2.3.3.2	BTM/BCM ( <i>Omega</i> -Wert, $E_{vib}$ -Wert) .....	54
2.3.3.3	ACE-Walzen ( $k_B$ -Wert) .....	58
2.3.3.4	Vergleich der bestehenden FDVK-Systeme für Vibrationswalzen .....	60
2.3.3.5	Verdichtungsmesswerte für Oszillation.....	62

<b>3</b>	<b>Grundlagen der numerischen Simulation von dynamischen Interaktionssystemen</b>	<b>67</b>
3.1	Literaturübersicht .....	67
3.2	Allgemeine Aspekte zur Methode der Finiten Elemente (FEM).....	73
3.3	Kontaktmodellierung.....	75
3.4	Diskretisierung des Berechnungsmodells.....	83
3.4.1	Elementtypen.....	84
3.4.1.1	Elementtyp für die Modellierung der Bandage und des Bodenausschnitts.....	84
3.4.1.2	Halbunendliche Elemente zur Modellierung der Systemgrenzen .....	85
3.4.2	Elementgrößen im Modell.....	87
3.5	Berücksichtigung der Dämpfung des Untergrundes.....	89
3.6	Randbedingungen .....	95
3.7	Ablauf der Simulation .....	98
<b>4</b>	<b>Elastische Modellierung des Walze-Boden-Systems mit FEM</b>	<b>101</b>
4.1	Beschreibung des FEM-Modells .....	101
4.1.1	Maschine für die Untersuchungen mit FEM.....	101
4.1.2	Aufbau des FEM-Berechnungsmodells in MSC.MARC .....	102
4.1.2.1	Modellierung des Bodens .....	103
4.1.2.2	Modellierung der Bandage .....	105
4.1.2.3	Randbedingungen und Lastfälle .....	107
4.2	Beschreibung des Bewegungsverhaltens der Bandagen mit FEM.....	108
4.3	Beschreibung der Vorgänge im Boden mit FEM.....	118
4.3.1	Druckspannungsverläufe im Boden bei einer Bandagenüberfahrt.....	118
4.3.2	Verschiebungen und Beschleunigungen im Boden.....	126
4.4	FDVK-Auswertung .....	129
4.5	3D-Modell für die Verdichtungssimulation .....	133
<b>5</b>	<b>Ableich des Rechenmodells anhand verschiedener Untersuchungen</b>	<b>145</b>
5.1	Referenzuntersuchungen .....	145
5.2	Dynamisches Verhalten der Bandage.....	146
5.2.1	Vergleich mit Versuchsergebnissen für einen 9t-Walzenzug .....	146
5.2.2	Vergleich mit Simulationsergebnissen für einen 11t-Walzenzug.....	155
5.3	Dynamische Effekte im Untergrund.....	159
5.3.1	Analytische Überprüfung der Ergebnisse für eine 9,5t-Tandemwalze .....	159
5.3.2	Vergleich mit Versuchsergebnissen für eine 9,5t-Tandemwalze.....	164
5.3.3	Vergleich mit Versuchsergebnissen für einen 9t-Walzenzug .....	168
5.3.4	Vergleich mit Versuchsergebnissen für einen 12t-Walzenzug .....	170
5.3.5	Vergleich mit Versuchsergebnissen für einen 11t-Walzenzug .....	172
5.3.6	Vergleich mit Berechnungsergebnissen für einen 11,5t-Walzenzug .....	176
5.4	FDVK-Auswertung .....	178
5.5	Fazit zum Ableich des 2D-Rechenmodells .....	183

<b>6</b>	<b>Stoffmodelle zur Beschreibung von Böden unter dynamischer Beanspruchung</b>	<b>185</b>
6.1	Allgemeines .....	185
6.2	Hypoplastizität.....	191
6.2.1	Einfaches hypoplastisches Gesetz.....	191
6.2.2	Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung.....	197
6.3	Implementierung der Hypoplastizität in MSC.MARC.....	204
6.4	Validierung der Implementierung anhand von Elementversuchen .....	205
6.4.1	Beschreibung der Elementversuche .....	206
6.4.1.1	Der Ödometerversuch .....	206
6.4.1.2	Der Triaxialtest .....	207
6.4.2	Nachrechnungen der Elementversuche mit MSC.MARC .....	208
6.4.2.1	FEM-Simulation des Ödometerversuchs .....	209
6.4.2.2	FEM-Simulation des Triaxialversuchs .....	212
6.5	Stabilität der Simulationen .....	216
6.6	Fazit.....	219
<b>7</b>	<b>2D-Verdichtungssimulation mit hypoplastischem Materialansatz</b>	<b>221</b>
7.1	Untersuchung der Verdichtungswirkung beim Einsatz von dynamisch angeregten Walzen.....	221
7.1.1	Nachrechnungen von Verdichtungsfahrten mit Kreiserregerwalzen .....	222
7.1.1.1	Dynamisches Verhalten der Bandage und FDVK .....	223
7.1.1.2	Betrachtung der Effekte im Boden .....	228
7.1.1.3	Vergleich mit Ergebnissen aus Simulationen mit elastischem Untergrund und Messdaten.....	231
7.1.1.4	Fazit zur hypoplastischen Simulation der Verdichtung mit einer Kreiserregerbandage .....	234
7.1.2	Nachrechnungen von Verdichtungsfahrten mit Walzen mit Richtschwingern.....	235
7.1.3	Variation der Fahrgeschwindigkeit.....	242
7.2	Variation von Walzenparametern.....	245
7.2.1	Variation der schwingenden Masse bei konstanter statischer Auflast.....	245
7.2.2	Variation der statischen Auflast bei konstanter schwingender Masse.....	249
7.2.3	Variation der Erregerunwucht bzw. Erregerkraft.....	252
7.3	Verdichtung mit mehreren Walzenüberfahrten .....	256
7.4	Wirk- und Messtiefe von dynamisch angeregten Walzen.....	259
7.4.1	Verdichtungswirkung im Untergrund .....	260
7.4.2	Dynamisches Verhalten der Bandage und Verlauf der FDVK-Messwerte .....	269
7.4.3	Abgleich mit Ergebnissen aus anderen Untersuchungen .....	271
7.5	Fazit zur 2D-Verdichtungssimulation mit der Hypoplastizität .....	275
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>279</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>287</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>299</b>

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>301</b>
<b>Liste häufig verwendeter Symbole</b>	<b>319</b>
<b>A. Anhang A</b>	<b>325</b>
<b>B. Anhang B</b>	<b>339</b>