

VERÖFFENTLICHUNGEN

des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik
am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Herausgeber: P. Kudella

Heft 190

Untersuchungen zur Verdichtungsprognose von Sand bei der Rütteldruckverdichtung

von

Ivo Matthias Kimmig

Karlsruhe 2021

ISSN 0453-3267

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Vibrationsverdichtung mit Tiefenrüttler	2
1.1.1 Anwendungsbereich	2
1.1.2 Tiefenrüttler	4
1.1.3 Verfahrensablauf	7
1.1.4 Verdichtungsraster und Probeverdichtung	8
1.2 Problemstellung	9
1.3 Ziele der Arbeit	11
1.4 Gliederung	12
2 Theoretische Grundlagen und Wirkungsmechanismen	15
2.1 Zustandsbeschreibung granularer Böden	15
2.2 Bodenverhalten unter dynamischer und zyklischer Beanspruchung	22
2.2.1 Einfluss der Partikelbeschleunigung	23
2.2.2 Spannungs- und Dehnungsakkumulation	24
2.3 Beschreibung des Materialverhaltens	25
2.3.1 Numerische Berechnungsstrategie	25
2.3.2 Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung	27
2.3.3 Hochzyklisches Akkumulationsmodell (HCA)	32
2.4 Wirkungsmechanismen der Tiefenrüttelung	35
2.4.1 Bewegung des Tiefenrüttlers	35
2.4.2 Interaktion Tiefenrüttler-Boden	41
3 Experimentelle Untersuchungen	45
3.1 Versuchsmaterial	45
3.2 Auswahl bodenmechanischer Laborversuche	47
3.2.1 Ödometerversuche	47
3.2.2 Dränierte monotone Triaxialversuche (CD-Versuche)	49
3.2.3 Bender-Element-Versuche	52
3.3 Dränierte zyklische Triaxialversuche	59
3.3.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	59

3.3.2	Ergebnisse	60
3.4	Dränierete zyklische Hohlzylindertriaxialversuche	70
3.4.1	Versuchsaufbau	70
3.4.2	Versuchsdurchführung	73
3.4.3	Ergebnisse	79
3.5	Kalibration von Stoffmodellparametern	82
3.5.1	Hypoplastisches Stoffmodell	83
3.5.2	Erweiterung um die intergranulare Dehnung	88
3.5.3	Hochzyklisches Akkumulationsmodell	91
3.5.4	Zusammenstellung der Materialparameter	96
4	Modellierung des Verdichtungsvorgangs	97
4.1	Vereinfachter Modellierungsansatz	97
4.1.1	Analytisches Modell nach Triantafyllidis und Kimmig	97
4.2	Literaturüberblick - Numerische Simulationen	101
4.2.1	Implizit vs. explizit	101
4.2.2	3-D-FE-Simulationen nach Kefler et al.	103
4.2.3	3-D-FE-Simulationen nach Arnold und Herle	108
4.2.4	3-D-FE-Simulationen nach Heins et al.	110
4.3	Modellbildung	112
4.3.1	Geometrien und räumliche Diskretisierung	113
4.3.2	Anfangs-, Rand- und Kontaktbedingungen	116
4.3.3	Bewegung des Tiefenrüttlers	119
4.3.4	Ablauf der dynamischen Finite Elemente-Simulationen	120
4.4	Fortgeschrittene Modellierung mit Lagrange-FEM	121
4.4.1	Wellenausbreitung im 3-D-Scheibenmodell	123
4.4.2	Einfluss der Schwingwegamplitude	127
4.4.3	Einfluss der Drainagebedingungen	128
4.5	Fortgeschrittene Modellierung mit der CEL-Methode	131
4.5.1	Wellenausbreitung im 3-D-Modell	135
4.5.2	Einfluss der Schwingwegamplitude	136
4.5.3	Einfluss der Frequenz	138
4.5.4	Einfluss der Drainagebedingungen	139
4.5.5	Einfluss der relativen Anfangslagerungsdichte	142
4.5.6	Einfluss von Form und Oberflächenbeschaffenheit des Tiefenrüttlers	143
4.5.7	Einsatz mehrerer Tiefenrüttler	146

5 Abschätzung der Verdichtungswirkung	149
5.1 Vereinfachtes Modell zur Prognose der Porenzahl	149
5.2 Verformungsprognose mit einem 3-D-Modell	152
5.2.1 Modellbildung und Anfangszustand	152
5.2.2 Simulation unter vollständig dränierten Bedingungen	154
5.3 Grenzen der numerischen Modellierung	157
6 Vergleich mit in situ Verdichtungsversuchen	161
6.1 Beschreibung der Feldversuche	161
6.2 Ergebnisse numerischer Berechnungen	170
6.2.1 Wellenausbreitung	171
6.2.2 Verformungsakkumulation	174
7 Zusammenfassung und Ausblick	177
7.1 Zusammenfassung	177
7.2 Ausblick	183
Literaturverzeichnis	187
A Anhang	199
A.1 Labor- und Feldversuche	199
A.1.1 Ergebnisse von dränierten zyklischen Hohlzylindertriaxialversuchen	199
A.1.2 Anpassung von Stoffmodellparametern des HCA-Modells für Karlsruhe Sand	201
A.1.3 Messergebnisse von in situ Verdichtungsversuchen	202
A.2 Quellcode	203