

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Überblick und Motivation	1
1.2	Ziele der Arbeit	3
1.3	Gliederung der Arbeit	4
2	Literaturüberblick: Untersuchungs- und Berechnungsmethoden	6
2.1	Standortbedingungen	7
2.2	Belastung	8
2.3	Experimentelle Untersuchungen	9
2.3.1	Feldversuche	10
2.3.2	Kleinmaßstäbliche Modell- und Zentrifugen-Versuche	11
2.4	Berechnungsmethoden	13
2.4.1	Bemessungsvorschriften für die Monopile-Gründungen	14
2.4.2	Bettungsmodulverfahren	14
2.4.3	$p - y$ -Verfahren	15
2.4.4	Strain Wedge Modell	18
2.4.5	Zyklische Lasten	18
2.4.6	Numerische Verfahren	19

3	Verwendete Stoffgesetze	23
3.1	Hypoplastisches Stoffgesetz	23
3.1.1	Grundgleichung	24
3.1.2	Hypoplastische Materialkonstanten	27
3.1.3	Validierung des hypoplastischen Modells	29
3.2	Hypoplastisches Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung	33
3.2.1	Parameter der intergranularen Dehnung	34
3.2.2	Bestimmung der Parameter der intergranularen Dehnung	39
3.2.3	Anfangswert der intergranularen Dehnung	43
3.2.4	Einfluss einer zyklischen Vorbelastung auf das anschließende monotone Verhalten	45
3.3	Akkumulationsmodell	47
3.3.1	Grundgleichung	47
3.3.2	Materialkonstanten des Akkumulationsmodells	52
3.4	Asymptotisches Verhalten	56
3.4.1	Undrainierter Triaxialversuch mit Dehnungssteuerung	57
3.4.2	Drainierter Triaxialversuch mit Spannungssteuerung	58
3.4.3	Undrainierter Triaxialversuch mit Spannungssteuerung	59
3.5	Diskussion von Modellprognosen	60
3.5.1	Einfluss der Dehnungsamplitude auf die Akkumulationsprognose	61
3.5.2	Validierung des Modells	64
3.5.3	Akkumulationsprognosen für Versuche mit kleinen Drücken	65
3.6	Numerische Probleme bei der Anwendung des HCA-Modells	69
3.7	Fazit zum Einsatz der beschriebenen Stoffgesetze	74

4	Feldversuch Oosterschelde	76
4.1	Einleitung	77
4.2	Versuchsbeschreibung	79
4.2.1	Geologische Situation	79
4.2.2	Interpretation von Drucksondierungen	81
4.2.3	Belastungsprogramm	85
4.2.4	Messergebnisse	87
4.3	Numerische Simulationen	100
4.3.1	Bestimmung von Materialkonstanten	100
4.3.2	Numerisches Modell	112
4.3.3	Ergebnisse der FE-Simulationen	116
5	Experimentelle Untersuchungen	131
5.1	Idee der partiellen Selbstheilung bei Monopile-Gründungen	131
5.2	Ziele der Modellversuche	132
5.3	Konzept der Modellversuche mit Monopiles	132
5.3.1	Versuche mit monotoner Extrembeanspruchung (Prozedur A)	133
5.3.2	Versuche ohne monotone Extrembeanspruchung (Prozedur B)	133
5.4	Modellgesetze	134
5.4.1	Prototyp Pfahl	134
5.4.2	Modellmaßstab	134
5.4.3	Belastung	135
5.4.4	Geometrische Einflußgrößen	135
5.4.5	Modellboden	136
5.4.6	Sandeinbau	138
5.4.7	Einfluss des Wassers	139
5.5	Modellversuchsstand	139
5.5.1	Vorversuche im kleinen Versuchsbehälter	139

5.5.2	Modellversuche im großen Versuchsbehälter	141
5.6	Durchführung und Auswertung der Modellversuche	143
5.6.1	Programm der Vorversuche	144
5.6.2	Programm der Modellversuche	145
5.7	Ergebnisse der Vorversuche	146
5.7.1	Variation der Amplitude der zyklischen Beanspruchung, ohne Ex- trembeanspruchung	147
5.7.2	Variation der Amplitude der zyklischen Beanspruchung, mit Ex- trembeanspruchung	148
5.7.3	Variation der Intensität der Extrembeanspruchung, mit Extrem- beanspruchung	150
5.7.4	Variation der mittleren Beanspruchung, mit Extrembeanspruchung	151
5.7.5	Variation der Anfangsdichte, mit Extrembeanspruchung	152
5.7.6	$MV - A0$ und $MV - B0$	154
5.8	Ergebnisse der Modellversuche	156
5.8.1	Referenzversuch	156
5.8.2	Variation der Amplitude der zyklischen Beanspruchung	169
5.8.3	Variation der Intensität der monotonen Beanspruchung	174
5.8.4	Variation der Einbindelänge	177
5.8.5	Variation des Pfahldurchmessers	180
5.8.6	Variation der mittleren Beanspruchung, der Richtung der zyklischen Beanspruchung und der mehrmaligen Extrembeanspruchung	182
5.8.7	Versuch ohne monotone Extrembeanspruchung	187
5.9	Fazit der Modellversuche	189
6	Numerische Simulationen der Modellversuche	191
6.1	Modellierung	191
6.1.1	Berechnungsablauf	192
6.1.2	Netzdiskretisierung und Wahl des Elementtyps	193

6.1.3	Materialkonstanten	200
6.1.4	Anfangszustand des Bodens	202
6.2	Numerisch ermittelte Mechanismen	202
6.2.1	Veränderung von Zustandsgrößen im Boden während einer monotonen Extrembeanspruchung	203
6.2.2	Veränderung von Zustandsgrößen im Boden während einer zyklischen Belastung	205
6.2.3	Veränderung von Zustandsgrößen in Bodenelementen	208
6.2.4	Veränderung der Bettungseigenschaften	211
6.3	Einfluss des Pfahldurchmessers	212
6.3.1	Extremereignisse	212
6.3.2	Zyklische Beanspruchung	216
6.3.3	Wiederholung der Extremereignisse	222
6.4	Einfluss der Amplitude der zyklischen Beanspruchung	224
6.4.1	Zyklische Beanspruchung	225
6.5	Einfluss der Intensität der monotonen Beanspruchung	227
6.5.1	Extremereignisse	228
6.5.2	Zyklische Beanspruchung	229
6.5.3	Wiederholung der Extremereignisse	230
6.6	Einfluss der mittleren Beanspruchung	232
6.6.1	Zyklische Beanspruchung	232
6.6.2	Wiederholung der Extremereignisse	235
6.7	Einfluss einer mehrmaligen Wiederholung der Extrembeanspruchung	235
6.8	Einfluss der anfänglichen Spannungen im Boden	236
6.9	Simulation des Mehrstufen-Modellversuchs	238

7 Simulationen der Vorversuche	243
7.1 Modellierung	244
7.2 Vorversuche ohne Extrembeanspruchung	245
7.2.1 Einfluss der Amplitude der zyklischen Beanspruchung	245
7.3 Vorversuche mit Extrembeanspruchung	247
7.3.1 Monotone Extrembeanspruchung	247
7.3.2 Zyklische Beanspruchung	248
7.4 Fazit der numerischen Simulationen	253
8 Zusammenfassung und Ausblick	254
8.1 Zusammenfassung	254
8.2 Ausblick	258
Literaturverzeichnis	261
Liste der Abkürzungen	271
A Ergebnisse der Modellversuche	273
A.1 Modellversuch 113 – 12	273
A.2 Modellversuch 313 – 12	276
A.3 Modellversuch $MV - B2$	278