

Danksagung	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xix
Formelzeichen	xx
Kurzfassung	xxii
Abstract	xxiii
1 Einleitung und Hintergrund	1
1.1 Motivation und Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	4
2 Grundlagen zum Vortrieb mit Erddruckschilden	7
2.1 Einordnung und Einsatzbereiche von Erddruckschildmaschinen.....	7
2.2 Aufbau und Funktionsweise eines EPB-Schildes.....	11
2.2.1 Funktionsprinzip.....	11
2.2.2 Bodenkonditionierung	13
2.2.3 Ziele der Bodenkonditionierung.....	14
2.2.4 Betriebsmodi.....	16
2.2.5 Stützdruckregelung	18
2.3 Konditionierungsmittel und Injektionsraten.....	21
3 Baugrund beim Vortrieb mit Erddruckschilden	26
3.1 Bindige und nicht-bindige Lockergesteine.....	26
3.1.1 Feinboden.....	28
3.1.2 Plastizität von bindigem Lockergestein	32
3.1.3 Verklebungen beim Vortrieb mit EPB-Schilden.....	34
3.1.4 Zustandsgrenzen und Normungen.....	37
3.1.5 Konsistenz und Bedeutung für den EPB-Vortrieb.....	40
3.1.6 Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Boden	41
3.1.7 Empfohlene Konsistenzzahlen für den Vortrieb mit EPB-Schilden	42

3.2	Untersuchungsmethoden für Böden	44
3.2.1	Genormte Versuche zur Korrelation zwischen der Konsistenzzahl und bodenmechanischen Messwerten	44
3.2.2	Slump Test in Anlehnung an die DIN EN 12350-2, 2019-09.....	46
3.2.3	Penetrationsuntersuchungen	49
4	Weggesteuerter Penetrationstest	58
4.1	Konstruktionselemente und Steuerung	59
4.2	Penetrationskörper und Schalungen.....	62
4.2.1	60° Kegel	63
4.2.2	Druckzylinder	64
4.2.3	Sandwich- und Druckelement	64
4.2.4	Schalungen für großskalige Versuche.....	69
4.3	Validierung.....	70
4.3.1	Phase 1: Penetrationsversuche in Polyethylen-Kugeln	71
4.3.2	Phase 2: Penetrationsversuche in plastisches Material.....	81
4.4	Zusammenfassung	83
5	Versuche mit konditioniertem Feinsand.....	84
5.1	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	85
5.1.1	Versuchsergebnisse und Analyse der Penetrationstests	87
5.1.2	Korrelation zwischen Penetrationskraft und Slump Test Ergebnissen.....	90
5.1.3	Sensitivität – Penetrationstest vs. Slump Test.....	92
5.2	Zusammenfassung und Kritik am Einsatz des Slump Test bei bindigen Böden.....	95
6	Versuche mit bindigen Böden	97
6.1	Kegelpenetrationsversuche mit Ton	97
6.1.1	Versuche.....	97
6.1.2	Versuchsergebnisse und Auswertung	98
6.1.3	Zusammenfassung und weiteres Vorgehen	100
6.2	Großskalige Penetrationsversuche mit Druckzylindern	101
6.2.1	Verwendete Bodenproben.....	101
6.2.2	Zielkonsistenz der Bodenproben und Bodenaufbereitung.....	104
6.2.3	Bodeneinbau in Sandwichelement und Versuchsdurchführung.....	106
6.3	Versuchsprogramm und Ergebnisse der großskaligen Versuche	110
6.3.1	Ergebnisse der Penetrationsuntersuchungen ohne seitliche Begrenzung der Bodenprobe	110
6.3.2	Ergebnisse der Penetrationsuntersuchungen mit seitlicher Begrenzung der Bodenprobe	122
6.3.3	Zusammenfassung und Erkenntnisse aus den großskaligen Versuchen	125
6.3.4	Vorgehen für weitere Versuche.....	126

6.4	Berücksichtigung von Druckbedingungen und Penetrationsuntersuchungen mit Böden mit verschiedenen Plastizitätszahlen	128
6.4.1	Versuchsdurchführung	129
6.4.2	Bodenproben und Versuchsprogramm	133
6.4.3	Versuchsergebnisse mit Ton/Mergel-Mischung	134
6.4.4	Versuchsergebnisse mit Ton	139
6.4.5	Versuchsergebnisse mit Mergel	140
6.5	Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse	143
6.5.1	Korrelation mit der Konsistenzzahl	144
6.5.2	Korrelation mit der Plastizitätszahl	146
7	Empfehlungen für die Praxis	150
7.1	Einsatz des Penetrationstests auf einer EPB-TBM	150
7.2	Empfehlungen und Kritik zum Einsatz des Slump Tests	154
8	Fazit	155
8.1	Zusammenfassung	155
8.2	Ausblick	158
9	Literaturverzeichnis	159
10	Anhang	177
10.1	Literaturauswahl	177
10.1.1	Versuche zur Bodenkonditionierung	177
10.1.2	Versuche und Studien zur Messung der Adhäsion und Bewertung des Verklebungspotentials	180
10.1.3	Penetrationsversuche	180
10.2	Anhang Kapitel 4.3 – Daten der Validierung	181
10.2.1	Graphische Auswertung und Mittelung der Datenreihen	181
10.2.2	Daten Phase 1	182
10.2.3	Daten Phase 2	189
10.3	Anhang Kapitel 5 – Versuche mit konditioniertem Feinsand	192
10.3.1	Chronologische Versuchsdurchführung von Slump- und Penetrationstests	192
10.3.2	Auswertung der Slump Tests und Penetrationstests – Einzelergebnisse	193
10.4	Anhang Kapitel 6 – Versuche mit bindigen Böden	194
10.4.1	Systemzeichnung Sandwichelement und Zylinder	194
10.4.2	Bemaßung Penetrationsversuchsstand	196
10.4.3	Protokolle zur Ermittlung der Zustandsgrenzen	198
10.4.4	Bestimmtheitsmaß, ausgewertet für verschiedene Penetrationstiefen	206
10.4.5	Versuchsergebnisse Großversuche – ohne Schalung	207
10.4.6	Versuchsergebnisse Großversuche – mit Schalung	209
10.5	Anhang Kapitel 6.4 – Druckversuche Ton/Mergel Mischung	210

10.5.1	Auswertung der Spannung in Abhängigkeit von den Druckstufen.....	210
10.5.2	Lineare Regression der Messdaten Ton/Mergel	212
10.5.3	Approximation über e-Funktion für die Ton/Mergel-Mischung.....	216
10.5.4	Berechnung der Faktoren zur Druckerhöhung über e-Funktion.....	219
10.6	Anhang Kapitel 6.5 – Zusammenführung der Ergebnisse.....	221
10.6.1	Vergleich der Ergebnisse für 0 bar Außendruck.....	221
10.6.2	Vergleich der Ergebnisse für 0,5 bar Außendruck	223
10.6.3	Vergleich der Ergebnisse für 1,0 bar Außendruck	226
10.6.4	Vergleich der Ergebnisse für 1,5 bar Außendruck	228
10.7	Berechnung der Koordinaten für Konsistenzwerte im Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden	230
10.8	Produktdatenblätter.....	232
11	Lebenslauf.....	236