

Marius Schröer

# Neue Methoden zur Untersuchung bindiger und nicht-bindiger Böden beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Erddruckstützung



SFB 837  
Interaktionsmodelle für den  
maschinellen Tunnelbau

Schriftenreihe des Instituts für  
Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2023-06

# **Neue Methoden zur Untersuchung bindiger und nicht-bindiger Böden beim maschinellen Tunnelvortrieb mit Erddruckstützung**

## **Dissertation**

zur Erlangung des Grades

## **Doktor-Ingenieur**

der

## **Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften**

der

## **Ruhr-Universität Bochum**

vorgelegt von

Marius Schröer, M. Sc.

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Thewes, Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Mont. R. Galler, Montanuniversität Leoben  
Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Tag der Einreichung: 30. November 2022

Tag der mündlichen Prüfung: 19. April 2023



Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:  
Geschäftsführender Direktor des  
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau  
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2023-6

**Marius Schröer**

**Neue Methoden zur Untersuchung bindiger  
und nicht-bindiger Böden beim maschinellen  
Tunnelvortrieb mit Erddruckstützung**

Shaker Verlag  
Düren 2023

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2023

Copyright Shaker Verlag 2023

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9192-2

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Danksagung

Die vorliegende Doktorarbeit entstand während meiner langjährigen Tätigkeit am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 837 (SFB 837). Großer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes. Vielen Dank für die Möglichkeit, ein Teil dieses tollen Teams zu sein, für die wissenschaftliche Betreuung dieser Doktorarbeit und für die stets offene Tür sowohl für den wissenschaftlichen Diskurs und Austausch als auch für Ihr offenes Ohr für jegliche anderen Themen. Den Begriff Doktorvater haben Sie für mich geprägt. Ich danke Ihnen von ganzem Herzen.

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler danke ich für das wissenschaftliche Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Danke für den fachlichen Austausch und die Zeit, welche Sie sich für mich genommen haben.

Frau Prof.'in Dr.-Ing. Annette Hafner danke ich herzlichst für ihre Mitwirkung und der Übernahme des Vorsitzes in der Promotionskommission.

Ich bedanke mich bei meinen lieben Freunden und Kollegen aus dem SFB 837. Besonderer Dank gilt dem Geschäftsführer Jörg Sahlmen sowie Elke Köster aus dem SFB-Sekretariat. Auch eure Türen standen immer für mich offen und wo ihr konntet, habt ihr mich unterstützt. Vielen Dank für die großartige Zeit im SFB 837. Mein Dank gilt ebenfalls den lieben Kollegen und Projektpartnern der Herrenknecht AG für den fachlichen und sehr kollegialen Austausch. Ich danke Herrn Dr.-Ing. Gerhard Wehrmeyer, Linus Möller, André Heim und Andreas Kassel. Vielen Dank für eure Ideen und eure Zeit. Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern und Kollegen aus der Konstruktionsteilprüfung der Ruhr-Universität Bochum. Ich danke Yvonne Böck, Sarah Andrzejewski, Marcel Gwodz, Bernd Schmidt und Sebastian Rodemann. Ihr habt mich bei dem Bau meines Versuchsstandes maßgebend unterstützt und standet mir stets mit Rat und Tat zur Seite. Ihr habt mir gezeigt, wie man Gewinde bohrt und auf den Millimeter genau fräst, dreht und sägt. Zudem danke ich Daniel Lehmann, welcher mich ebenfalls beim Bau meines Versuchsstandes technisch unterstützt hat.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Rattmann vom Lehrstuhl für Georessourcen und Verfahrenstechnik der Technischen Hochschule Georg Agricola, welcher mich mit Rat und vor allem Tat beim Brechen des harten Emschermergels unterstützt hat.

Experimentelle Forschung bedeutet Stunden über Stunden im Labor zu verbringen. Danke an mein Hiwi-Team, bestehend aus: Maximilian Lucht und Matthias Rengshausen und meinen ehemaligen Hiwis Georg Haack und Ibrahim Impram. Ihr seid und wart die besten, coolsten und

---

schnellsten Hiwis der Welt. Ohne eure helfenden Hände hätte ich das alles nicht geschafft. Macht genauso weiter, dann werdet ihr im Studium und im Job immer erfolgreich sein.

Auch bedanke ich mich ausdrücklich bei Sven Plückelmann vom Nachbarlehrstuhl der Baustofftechnik, welcher mich bei der Auswertung der großen Datenmengen unterstützt hat und stets ein offenes Ohr für mich hatte.

Meine schönste Zeit am Lehrstuhl wurde maßgebend durch eine Person geprägt. Viele Jahre lang durfte ich mit meinem besten Freund Dr.-Ing. Sascha Freimann meinen Arbeitsalltag gemeinsam im legendären Büro IC 6-147 verbringen. Teilweise wurden wir beide als „eine Person“ bezeichnet und das muss man erstmal schaffen. Mit dir gemeinsam zu forschen, zu arbeiten oder einfach Blödsinn im Büro zu machen, hat mir sehr dabei geholfen, die nicht immer leichte Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter zu überstehen und hat dazu beigetragen, dass ich jeden Morgen gerne zur Arbeit gekommen bin. Auch nach deinem Weggang haben wir beinahe täglich Kontakt gehalten und zahlreiche fachliche Diskussionen geführt. Vielen Dank für deine Zeit, für deine Ideen und vor allem für deine Freundschaft.

Danke an meine Freunde und die Ehemaligen des TLB. Mein Dank gilt Sebastian Kube, Annika Jodehl, Christian Rhein, Nils Gramlich, Hans Adden, Dr.-Ing. Götz Vollmann, Dr.-Ing. Britta Schößer, Fabiana Ochs, Dr.-Ing. Anna-Lena Hammer, Dr.-Ing. Alena Conrads, Dr.-Ing. Zdenek Zizka, Dr.-Ing. Ivan Popovic und Dr.-Ing. Peter Hoffmann. Es war mein großes Glück in all dieser Zeit unter Freunden arbeiten zu dürfen. Ich danke euch allen und ich werde die gemeinsame Arbeit mit euch schmerzhaft vermissen. Liebe Anna-Lena, dir gilt mein ganz besonderer Dank! Vielen lieben Dank an Jessica Buchenfeld, welche all die Seiten der Doktorarbeit mehrmals gelesen und korrigiert hat. Deine zahlreichen Kommentare am Rand, meistens lieb und manchmal etwas frech, haben ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Danke für deine wertvolle Zeit und deine Geduld. Du bist ein ganz besonderer Mensch.

Schließlich möchte ich mich für die liebevolle, moralische und unermüdliche Unterstützung meiner Eltern und meiner beiden Brüder bedanken. Lieber Niklas, danke für die morgendlichen Telefonate auf dem Weg zur Arbeit und deine vielen motivierenden Worte. Liebe Mama, diese Doktorarbeit ist für dich!

Zuletzt danke ich dir liebe Luisa. Jemand, der immer an einen glaubt, ist für so ein Vorhaben unverzichtbar. Du hast mir immer den Rücken freigehalten, hattest Verständnis für die zahlreichen Überstunden, du hast mich in jeder Lebenslage unterstützt und immer zu mir gehalten. Du hast mich motiviert, weiter zu machen, mich getröstet und warst immer für mich da. Ich danke dir so sehr dafür. Ohne dich hätte ich das alles nicht geschafft.

---

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>v</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>ix</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>xvii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>xix</b>
<b>Formelzeichen</b> .....	<b>xx</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>xxii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>xxiii</b>
<b>1 Einleitung und Hintergrund</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation und Problemstellung.....	2
1.2 Zielsetzung .....	3
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	4
<b>2 Grundlagen zum Vortrieb mit Erddruckschilden</b> .....	<b>7</b>
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
<b>3 Baugrund beim Vortrieb mit Erddruckschilden</b> .....	<b>26</b>
3.1 Bindige und nicht-bindige Lockergesteine.....	26
3.1.1 Feinböden .....	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 Böden .....	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
<b>4</b>	<b>Weggesteuerter Penetrationstest .....</b>	<b>58</b>
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
<b>5</b>	<b>Versuche mit konditioniertem Feinsand.....</b>	<b>84</b>
5.1	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung.....	85
5.1.1	V 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
<b>6</b>	<b>Versuche mit bindigen Böden .....</b>	<b>97</b>
6.1	Kegelpenetrationsversuche mit Ton .....	97
6.1.1	Versuche.....	97
6.1.2	V 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
<b>7</b>	<b>Empfehlungen für die Praxis.....</b>	<b>150</b>
7.1	Einsatz des Penetrationstests auf einer EPB-TBM.....	150
7.2	Empfehlungen und Kritik zum Einsatz des Slump Tests.....	154
<b>8</b>	<b>Fazit.....</b>	<b>155</b>
8.1	Zusammenfassung.....	155
8.2	Ausblick.....	158
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>159</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>177</b>
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
<b>11</b>	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>236</b>

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Klassische Einsatzbereiche von Erddruckschildmaschinen und Flüssigkeitsschilden in Abhängigkeit von der Kornverteilung nach Maidl (1995). Geändert: „Hydro“ zu aktueller Kurzform „LS“.	9
Abbildung 2-2:	Erweiterter Einsatzbereich von Erddruckschildmaschinen nach Budach (2012)	10
Abbildung 2-3:	Ansicht und Aufbau eines EPB-Schildes und die wesentlichen Konstruktionselemente	12
Abbildung 2-4:	Schematische Ansicht und Aufbau eines EPB-Schildes und wesentliche Konstruktionselemente zur Stützdruckmessung und Bodenkonditionierung	13
Abbildung 2-5:	Schematische Darstellung eines EPB-Schildes im geschlossenen Modus a); im halb offenen Modus b); im offenen Modus mit teilgefüllter Abbaukammer c) und im offenen Modus mit voll abgesenkter Abbaukammer d). Erklärungen: $p_s$ = Atmosphärischer Druck, $p_{s,EPB}$ = Stützdruck des geschlossenen Modus (support pressure in closed mode), $p_{s,CA}$ = Druck der Druckluft (support pressure of compressed air)	17
Abbildung 2-6:	Druckkommunikation zwischen Baugrund und Boden in der Abbaukammer	19
Abbildung 2-7:	Stützdruckprinzip: Schematische Darstellung der wirkenden Kräfte	20
Abbildung 3-1:	Beispiele für standfeste und in Form gebrachte kohäsive Böden	28
Abbildung 3-2:	Dreieckskoordinatensystem der Bodenarten des Feinbodens nach Stahr et al. (2016)	29
Abbildung 3-3:	Dreischichtmodell der Tonminerale nach Jasmund & Lagaly (1993) und Stahr et al. (2016)	30
Abbildung 3-4:	Schematische Darstellung des mobilen und immobilen Porenwassers im Boden nach Prinz & Strauß (2018)	31
Abbildung 3-5:	Einordnung kohäsiver Böden in Bodengruppen im Plastizitätsdiagramm nach DIN 18196, 2011-05 (geändert mit Angabe der Plastizitätsausprägungen)	32
Abbildung 3-6:	Bodenmechanische Mechanismen bei der Entstehung von Verklebungen nach Thewes (1999), Fall D) mehrheitlich für Vortriebe mit Flüssigkeitsschilden relevant. Fall D) geändert zu aktueller Bezeichnung „Kein Dispergieren in Flüssigkeit“ nach Weiner (2018)	37
Abbildung 3-7:	Allgemeines Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden nach Hollmann & Thewes (2013)	42
Abbildung 3-8:	Allgemeines Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden nach Hollmann & Thewes (2013) mit empfohlenen Konsistenzbereichen für den Vortrieb mit Erddruckschilden nach Thewes (2015-2022) und Maidl (1995)	43
Abbildung 3-9:	Zeichnung und ermittelte Werte des Slump Tests	47
Abbildung 3-10:	Fotostudie zum Einfluss der Schauminjektionsrate (FIR) auf das Setzmaß sowie das Setzfließmaß ermittelt im Slump Test. Sukzessive Erhöhung der FIR in 5 Vol.-% Schritten v. l. n. r. Seitenansicht, Oben; Draufsicht, Mitte; Ermittlung des Setzmaßes, Unten.	48
Abbildung 3-11:	Beispiele für Penetrationsuntersuchungen in der Betontechnologie und Bodenmechanik	49
Abbildung 3-12:	Großskaliger Fallkegelversuch von Merritt (2004) (links) und von Perrot et al. (2018) (rechts)	53
Abbildung 3-13:	Skizze kraftgesteuerter Penetrationstest (links). Bullet (2. v. l.), kleiner 60°-Kegel (2. v. r.), großer 60°-Kegel (rechts)	54

Abbildung 3-14:	Penetrationstiefe korreliert mit dem Setzmaß aus dem Slump Test für verschiedene Sande von Freimann (2021). fS = Feinsand; S = Sand; Sfk = sandiger Feinkies.....	55
Abbildung 3-15:	Ergebnisse der von kraftgesteuerten Penetrationstests an schaumkonditioniertem Feinsand von Freimann (2021) .....	56
Abbildung 3-16:	Scherfestigkeit von Schaumkonditionierten Sanden korreliert mit dem Setzmaß aus dem Slump Test von Freimann (2021) .....	56
Abbildung 4-1:	Modell der Frontansicht (links) und der Seitenansicht (rechts) des neuen Versuchsstandes .....	59
Abbildung 4-2:	3D-Modell des Penetrationsversuchsstandes .....	60
Abbildung 4-3:	Grafische Oberfläche (GUI) der Steuerungs- und Datenerfassungssoftware.....	61
Abbildung 4-4:	60° Aluminiumkegel zur Untersuchung von konditioniertem Lockergestein .....	63
Abbildung 4-5:	Versuchszylinder D100, D60, D50, D30 zur Untersuchung von bindigen Lockergesteinen ...	64
Abbildung 4-6:	Sandwichelement mit D100 Lochplatte.....	65
Abbildung 4-7:	Versuchsstand mit D50 Zylinder und Lochplattenelement .....	66
Abbildung 4-8:	Versuchsstand mit D100 Zylinder und Lochplattenelement.....	67
Abbildung 4-9:	Druckelement mit eingebautem Schlauch und Schalung ohne Deckel (links), Druckelement mit eingebautem Schlauch und Bodenprobe ohne Deckel (rechts) .....	68
Abbildung 4-10:	Stahlschalung (1); Holzsteckschalung (2); perforierte Stahlschalung (3).....	69
Abbildung 4-11:	Ablauf der Validierungsversuche mit Polyethylen-Kugeln.....	71
Abbildung 4-12:	Verlauf der Kraft-Weg-Kurve für drei weggesteuerte Versuche .....	72
Abbildung 4-13:	Verlauf der Kraft-Weg-Kurve für drei kraftgesteuerte Versuche .....	73
Abbildung 4-14:	Verlauf der Kraft-Weg-Kurve für je drei weg- und kraftgesteuerte Versuche.....	73
Abbildung 4-15:	Versuchsprogramm zur Validierung .....	75
Abbildung 4-16:	Penetrationskraft in Abhängigkeit von der Penetrationstiefe sowie der Penetrationsgeschwindigkeit für die Messreihe 1_1/1_2 .....	77
Abbildung 4-17:	Penetrationstiefe in Abhängigkeit von der Penetrationskraft sowie der Penetrationsgeschwindigkeit für die Messreihe 2_1/2_2 .....	77
Abbildung 4-18:	Gemittelte Daten und Spannweiten der Messreihe 1_1/1_2 und 2_1/2_2.....	78
Abbildung 4-19:	Gemittelte Daten und Spannweiten der Messreihe 1_1/1_2 und 2_1/2_2 sowie gemittelte Einzelfahrten auf $i_{max} = 130$ mm .....	79
Abbildung 4-20:	Funktion aus Datenpunkten aus weg- und kraftgesteuerten Versuchen .....	80
Abbildung 4-21:	Funktion aus weg- und kraftgesteuerten Versuchen und gemittelten Einzelmessungen .....	80
Abbildung 4-22:	Penetrationsversuche in plastisches Material aus aufgeschäumtem Polyurethan .....	81
Abbildung 4-23:	Gemittelte Messwerte der Messreihen 1_1/1_2 und 2_1/2_2.....	82
Abbildung 5-1:	Penetrationsversuch mit einem schaumkonditionierten Feinsand.....	84
Abbildung 5-2:	Versuchsprogramm zur Sensitivitätsanalyse. Versuche mit einer schaumkonditionierten Bodenprobe.....	85
Abbildung 5-3:	Versuchsablauf und qualitativer Verlauf der Kraft-Weg-Messung in Feinsand.....	86
Abbildung 5-4:	Penetrationskraft in Abhängigkeit von der Penetrationstiefe für FIR 35 Vol.-% (links) und FIR 40 Vol.-% (rechts) .....	87

Abbildung 5-5:	Penetrationskraft in Abhängigkeit von der Penetrationstiefe für FIR 45 Vol.-% (links) und FIR 50 Vol.-% (rechts) .....	87
Abbildung 5-6:	Penetrationskraft in Abhängigkeit von der Penetrationstiefe für FIR 55 Vol.-% (links) und FIR 60 Vol.-% (rechts) .....	88
Abbildung 5-7:	Penetrationskraft in Abhängigkeit von der Penetrationstiefe für FIR 65 Vol.-% (links) und FIR 70 Vol.-% (rechts) .....	88
Abbildung 5-8:	Messwerte aller Versuche an konditioniertem Feinsand zur Unterscheidung FIR .....	89
Abbildung 5-9:	Gemittelte Messwerte einer Penetrationstiefe zwischen $i = 0$ mm $i = 120$ mm .....	89
Abbildung 5-10:	Slump Test Ergebnisse $\geq 5$ cm und äquivalente Penetrationskraftverläufe .....	91
Abbildung 5-11:	Gemittelte Ergebnisse aus den Slumptests korreliert mit $F_{120}$ . Bilineare Darstellung durch Regressionsgeraden unterhalb des Bereichs der Verarbeitbarkeit und im Bereich der Verarbeitbarkeit sowie Approximation der aller Daten durch Potenzfunktion .....	91
Abbildung 5-12:	Bereich der Verarbeitbarkeit nach Budach (2012) korreliert mit der Penetrationskraft. Logarithmische Skalierung der Ordinate .....	93
Abbildung 5-13:	Studie zum Setzmaß einer Bodenprobe mit verschiedenen Konsistenzen im Slump Test .....	96
Abbildung 6-1:	Versuchsprogramm für Penetrationsversuche mit Ton .....	97
Abbildung 6-2:	Penetrationsversuch mit dem 60°-Kegel in bindigen Boden. Beispielfotos für $I_c = 0,4$ .....	98
Abbildung 6-3:	Penetrationskraft in Abhängigkeit von der Penetrationstiefe sowie der Konsistenzzahl .....	99
Abbildung 6-4:	Kraft an der Stelle $i = 80$ mm in Abhängigkeit von der Konsistenzzahl. Konsistenzbereich guter Verarbeitbarkeit und geringem Verklebungspotential zwischen $I_c = 0,4$ und $I_c = 0,5$ . 100	
Abbildung 6-5:	Emschermergel vor dem Brechen .....	102
Abbildung 6-6:	Verwendeter Backenbrecher und Aushubmaterial (Emschermergel) nach dem Brechen ..	102
Abbildung 6-7:	Gebrochener Emschermergel (links), 50:50-Mischung (Mitte) und Tonmehl (rechts) .....	102
Abbildung 6-8:	Korngrößenverteilung durch Sedimentation und Siebung nach DIN 18123-1 .....	103
Abbildung 6-9:	Allgemeines Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden nach Hollmann & Thewes (2013) – modifiziert mit Isohypse für $I_p = 26,5$ % (grüne Linie) und Konsistenzwerte (graue Dreiecke, gepunktete Linien) für den untersuchten Boden ....	104
Abbildung 6-10:	Material vor (links) und nach der Wasserzugabe und nach dem Kneten (rechts) .....	105
Abbildung 6-11:	Einbau der Bodenprobe in Stahlschalung. Vor und nach dem Verdichten (exemplarisch) ..	106
Abbildung 6-12:	Schnitt durch die Probe $I_c = 0,7$ (links), Versuchsboden $I_c = 0,7$ ausgeschalt (rechts) .....	107
Abbildung 6-13:	Holzschalung, verspannt (links), Einbau der Bodenprobe in Holzschalung (rechts) .....	107
Abbildung 6-14:	Versuchsboden $I_c = 0,7$ eingebaut im Versuchsstand (links), Versuchsboden $I_c = 0,38$ in perforierter Schalung eingebaut im Versuchsstand (rechts) .....	108
Abbildung 6-15:	Vorbereitung und Durchführung der großskaligen Versuche .....	109
Abbildung 6-16:	Versuchsprogramm für großskalige Versuche mit einer bindigen Bodenmischung .....	110
Abbildung 6-17:	Versuchsserie zu $I_c = 1,0$ mit D50/D100 inkl. gemittelter Messreihe .....	111
Abbildung 6-18:	Versuchsserien zu $I_c = 0,7$ und $I_c = 0,45$ mit D50/D100 inkl. gemittelter Messreihe .....	112
Abbildung 6-19:	Versuchsserien zu $I_c = 0,38$ und $I_c = 0,2$ mit D 50/D100 inkl. gemittelter Messreihe .....	112
Abbildung 6-20:	Gemittelte Messreihen für Versuche mit dem D50 Zylinder .....	113
Abbildung 6-21:	Gemittelte Messreihen für Versuche mit dem D100 Zylinder .....	113

Abbildung 6-22:	Konsistenzwert $l_c$ zur Kraft am Punkt $i = 100$ mm für den D50 und D100 Zylinder.....	115
Abbildung 6-23:	Vereinfachte Darstellung der resultierenden Spannungen und der Mantelreibung während des Versuchs .....	116
Abbildung 6-24:	Charakteristischer Verlauf der Messdaten bei Verwendung eines zylindrischen Penetrationskörpers. Differenzierung zwischen Spitzendruck und Mantelreibung.....	118
Abbildung 6-25:	Darstellung der Spannungs- verteilung an der Zylindergrundfläche im Gleichgewichtszustand.....	119
Abbildung 6-26:	Penetrationsspannungen ohne seitliche Begrenzung der Bodenprobe. Gegenüberstellung D50 und D100 für $l_c = 1,0$ (o.l.), $l_c = 0,7$ (o.r.), $l_c = 0,45$ (m.l.), $l_c = 0,38$ (m.r.), $l_c = 0,2$ (u.l.) und Gesamtauswertung (u.r.) .....	120
Abbildung 6-27:	Abschätzung der Penetrationsspannungen in Abhängigkeit von der Konsistenz anhand der Versuchsergebnisse mit D50 und D100 Zylinder.....	121
Abbildung 6-28:	Bodenprobe eingebaut in perforierte Schalung (links), Element eingebaut im Versuchsstand (rechts) .....	122
Abbildung 6-29:	Penetrationsspannungen bei seitlicher Begrenzung der Bodenprobe. Gegenüberstellung D50 und D100 für $l_c = 0,45$ (o.l.), $l_c = 0,38$ (o.r.), $l_c = 0,2$ (u.l.) und Gesamtauswertung (u.r.) .....	123
Abbildung 6-30:	Penetrationswiderstand des D50 Zylinders bei seitlicher Begrenzung .....	124
Abbildung 6-31:	Penetrationswiderstand des D100 Zylinders bei seitlicher Begrenzung.....	125
Abbildung 6-32:	Druckelement mit Acrylschalung und Schlauch (links), eingebaute Bodenprobe nach dem Entfernen der Acrylschalung (Mitte), eingebaute Bodenprobe mit Schlauch (rechts).....	129
Abbildung 6-33:	Druckelement inkl. Schalung, Druckschlauch und Deckel (links), Druckelement eingebaut im Versuchsstand: D60, 0,5 bar (Mitte); D30, 1,5 bar (rechts) .....	129
Abbildung 6-34:	Probe ( $l_c = 0,8$ ) vor dem Versuch (Links). Eindrücken des Schlauchs in die Probe während des Versuchs für 0,5 bar (Mitte) und 1,5 bar (Rechts) .....	130
Abbildung 6-35:	Schema zur Vorbereitung und Durchführung der Druckversuche.....	131
Abbildung 6-36:	Beispiel zum Spannungs- bzw. Druckverlust während einer Messung – Ton/Mergel; 0,5 bar Außendruck .....	132
Abbildung 6-37:	Unkonditionierte Bodenproben, gemahlen/gebrochen.....	133
Abbildung 6-38:	Allgemeines Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden nach Hollmann & Thewes (2013) – modifiziert mit Isolinien für $I_p = 13,8$ %, $I_p = 26,5$ %, $I_p = 36,7$ % und der entsprechenden Konsistenzwerte für die untersuchten Böden .....	133
Abbildung 6-39:	Versuchsprogramm zu Penetrationsuntersuchungen von Bodenproben mit verschiedenen Plastizitätszahlen .....	134
Abbildung 6-40:	Spannungen in Abhängigkeit vom Zylinderdurchmesser, Konsistenz und Außendruck. 0 bar Außendruck (links); 0,5 bar Außendruck (rechts) – Ton/Mergel.....	135
Abbildung 6-41:	Spannungen in Abhängigkeit vom Zylinderdurchmesser, Konsistenz und Außendruck. 1,0 bar Außendruck (links); 1,5 bar Außendruck (rechts) – Ton/Mergel.....	135
Abbildung 6-42:	Zylinderspannung für $i = 70$ mm in Abhängigkeit von der Konsistenz und dem Außendruck sowie dem Zylinderdurchmesser – Versuchsboden: Ton/Mergel .....	136
Abbildung 6-43:	Approximation der Konsistenzstufen über eine Exponentialfunktion – Versuchsboden: Ton/Mergel.....	137
Abbildung 6-44:	Spannungen in Abhängigkeit vom Zylinderdurchmesser, Konsistenz und Außendruck. 0 bar Außendruck (links); 0,5 bar Außendruck (rechts) – Versuchsboden: Ton .....	139

Abbildung 6-45:	Spannungen in Abhängigkeit vom Zylinderdurchmesser, Konsistenz und Außendruck. 1,0 bar Außendruck (links); 1,5 bar Außendruck (rechts) – Versuchsboden: Ton .....	139
Abbildung 6-46:	Zylinderspannung für $i = 70$ mm in Abhängigkeit von der Konsistenz und dem Außendruck sowie dem Zylinderdurchmesser – Versuchsboden: Ton.....	140
Abbildung 6-47:	Approximation der Konsistenzstufen über eine Exponentialfunktion – Versuchsboden: Ton .....	140
Abbildung 6-48:	Spannungen in Abhängigkeit vom Zylinderdurchmesser, Konsistenz und Außendruck. 0 bar Außendruck (links); 0,5 bar Außendruck (rechts) – Versuchsboden: Mergel.....	141
Abbildung 6-49:	Spannungen in Abhängigkeit vom Zylinderdurchmesser, Konsistenz und Außendruck. 1,0 bar Außendruck (links); 1,5 bar Außendruck (rechts). – Versuchsboden: Mergel .....	141
Abbildung 6-50:	Zylinderspannung für $i = 70$ mm in Abhängigkeit von der Konsistenz und dem Außendruck sowie dem Zylinderdurchmesser. Keine Ergebnisse für 1,0 bar und 1,5 bar bei $l_c = 0,8$ – Versuchsboden: Mergel.....	142
Abbildung 6-51:	Approximation der Konsistenzstufen über eine Exponentialfunktion – Versuchsboden: Mergel .....	142
Abbildung 6-52:	Messwerte für Penetrationsversuche mit Mergel, Ton und Ton/Mergel. D30 und D60. 0 bar Außendruck .....	143
Abbildung 6-53:	Messwerte für Penetrationsversuche mit Mergel, Ton und Ton/Mergel. D30 und D60. 0,5 bar Außendruck .....	143
Abbildung 6-54:	Messwerte für Penetrationsversuche mit Mergel, Ton und Ton/Mergel. D30 und D60. 1,0 bar Außendruck .....	144
Abbildung 6-55:	Messwerte für Penetrationsversuche mit Mergel, Ton und Ton/Mergel. D30 und D60. 1,5 bar Außendruck .....	144
Abbildung 6-56:	Eindringspannung an der Stelle $i = 70$ mm in Abhängigkeit von der Konsistenz sowie dem Außendruck. Versuchsboden: Ton/Mergel.....	145
Abbildung 6-57:	Eindringspannung an der Stelle $i = 70$ mm in Abhängigkeit von der Konsistenz sowie dem Außendruck. Versuchsboden: Ton.....	145
Abbildung 6-58:	Eindringspannung an der Stelle $i = 70$ mm in Abhängigkeit von der Konsistenz sowie dem Außendruck. Versuchsboden: Mergel .....	145
Abbildung 6-59:	Spannung an der Stelle $i = 70$ mm in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl und der Konsistenz (Mergel, Ton/Mergel und Ton). D30 und D60 bei 0 bar Außendruck.....	146
Abbildung 6-60:	Spannung an der Stelle $i = 70$ mm in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl und der Konsistenz (Mergel, Ton/Mergel und Ton). D30 und D60 bei 0,5 bar Außendruck .....	147
Abbildung 6-61:	Spannung an der Stelle $i = 70$ mm in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl und der Konsistenz (Mergel, Ton/Mergel und Ton). D30 und D60 bei 1 bar Außendruck.....	147
Abbildung 6-62:	Spannung an der Stelle $i = 70$ mm in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl und der Konsistenz (Mergel, Ton/Mergel und Ton). D30 und D60 bei 1,5 bar Außendruck .....	147
Abbildung 6-63:	Ergebnisse des einaxialen Druckversuchs an bindigen Böden nach Pietsch (1996) (Grafik überarbeitet, Normierung von $l_p$ geändert).....	148
Abbildung 7-1:	Skizze zum Einbau und Einsatz des weggesteuerten Penetrationstests auf einer EPB-TBM .....	150
Abbildung 7-2:	Qualitatives Diagramm zur Interpretation von Spannungs-/Weg-Kurven .....	151
Abbildung 7-3:	Spannungsprofil eines fiktiven Tunnelprojektes in Abhängigkeit von dem Baugrund und der entsprechenden Konditionierung mit Wasser .....	153



Abbildung 10-1:	Weggesteuerte und kraftgesteuerte Messungen; $v = 1 \text{ mm/s}$ ; $i_{\max} = 130 \text{ mm}$ .....	181
Abbildung 10-2:	Weggesteuerte Messungen und gemittelte Datenreihe; $v = 1 \text{ mm/s}$ ; $i_{\max} = 130 \text{ mm}$ .....	181
Abbildung 10-3:	Kraftgesteuerte Messungen und gemittelte Datenreihe; $v = 1 \text{ mm/s}$ ; $i_{\max} = 130 \text{ mm}$ .....	182
Abbildung 10-4:	Penetrationskraft in Abhängigkeit von der Penetrationstiefe; Phase 2; Reihe 1_1/1_2 .....	191
Abbildung 10-5:	Penetrationstiefe in Abhängigkeit von der Penetrationskraft; Phase 2; Reihe 2_1/2_2 .....	191
Abbildung 10-6:	Standardverfahren zur Durchführung des Slump Tests nach Freimann (2021) .....	192
Abbildung 10-7:	Standardverfahren zur Durchführung des Penetrationstests nach Freimann (2021).....	192
Abbildung 10-8:	Slump Test Ergebnisse und Messdaten aus dem weggesteuerten Penetrationstest. Auswertung der einzelnen Versuchsreihen und Mittelwert aus Slump Tests und Penetrationstests. ....	193
Abbildung 10-9:	Systemzeichnung Sandwichelement für Großversuche .....	194
Abbildung 10-10:	Systemzeichnung der Prüfzylinder. D100, D60, D50, D30 (v. l. n. r.) .....	194
Abbildung 10-11:	Versuchszylinder D100, D60, D50 und D30 (v.l.n.r.) .....	195
Abbildung 10-12:	Bemaßung des Versuchsstandes, Frontansicht .....	196
Abbildung 10-13:	Bemaßung des Versuchsstandes, Seitenansicht .....	197
Abbildung 10-14:	Protokoll zur Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze. Versuchsboden: Emschermergel, Probe 1 .....	198
Abbildung 10-15:	Darstellung im Plastizitätsdiagramm. Versuchsboden: Emschermergel, Probe 1.....	199
Abbildung 10-16:	Protokoll zur Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze. Versuchsboden: Emschermergel, Probe 2 .....	200
Abbildung 10-17:	Darstellung im Plastizitätsdiagramm. Versuchsboden: Emschermergel, Probe 1.....	201
Abbildung 10-18:	Protokoll zur Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze. Versuchsboden: Ton .....	202
Abbildung 10-19:	Darstellung im Plastizitätsdiagramm. Versuchsboden: Ton.....	203
Abbildung 10-20:	Protokoll zur Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze. Versuchsboden: Ton/Mergel.....	204
Abbildung 10-21:	Darstellung im Plastizitätsdiagramm. Versuchsboden: Ton/Mergel .....	205
Abbildung 10-22:	Spannung an der Stelle $i$ in Abhängigkeit von der Konsistenz, D50, Auswertung von $R^2$ ....	206
Abbildung 10-23:	Spannung an der Stelle $i$ in Abhängigkeit von der Konsistenz, D100, Auswertung von $R^2$ ..	206
Abbildung 10-24:	Versuchsserien zu allen Konsistenzen; D 50/D100 – gemittelte Messreihen .....	207
Abbildung 10-25:	Versuchsserie zu $I_c = 1,0$ mit D 50/D100; gemittelte Messreihen.....	207
Abbildung 10-26:	Versuchsserie zu $I_c = 0,7$ mit D 50/D100; gemittelte Messreihen.....	208
Abbildung 10-27:	Versuchsserie zu $I_c = 0,45$ mit D 50/D100; gemittelte Messreihen .....	208
Abbildung 10-28:	Versuchsserie zu $I_c = 0,38$ mit D 50/D100; gemittelte Messreihen .....	208
Abbildung 10-29:	Versuchsserie zu $I_c = 0,2$ mit D 50/D100; gemittelte Messreihen.....	209
Abbildung 10-30:	Versuchsserie zu $I_c = 0,45$ mit D 50/D100; gemittelte Messreihen; mit Schalung .....	209
Abbildung 10-31:	Versuchsserie zu $I_c = 0,38$ mit D 50/D100; gemittelte Messreihen; mit Schalung .....	209
Abbildung 10-32:	Versuchsserie zu $I_c = 0,2$ mit D 50/D100; gemittelte Messreihen; mit Schalung .....	210
Abbildung 10-33:	Auswertung der Spannung in Abhängigkeit von den Druckstufen für $I_c = 0,8$ .....	210
Abbildung 10-34:	Auswertung der Spannung in Abhängigkeit von den Druckstufen für $I_c = 0,6$ .....	211

---

Abbildung 10-35:	Auswertung der Spannung in Abhängigkeit von den Druckstufen für $I_c = 0,4$ .....	211
Abbildung 10-36:	Lineare Regression der Messdaten Ton/Mergel D60; $i = 20$ mm, $i = 30$ mm,.....	212
Abbildung 10-37:	Lineare Regression der Messdaten Ton/Mergel D60; $i = 40$ mm, $i = 50$ mm.....	212
Abbildung 10-38:	Lineare Regression der Messdaten Ton/Mergel D60; $i = 60$ mm, $i = 70$ mm.....	213
Abbildung 10-39:	Lineare Regression der Messdaten Ton/Mergel D60; $i = 80$ mm.....	213
Abbildung 10-40:	Lineare Regression der Messdaten Ton/Mergel D30; $i = 20$ mm, $i = 30$ mm.....	214
Abbildung 10-41:	Lineare Regression der Messdaten Ton/Mergel D30; $i = 40$ mm, $i = 50$ mm.....	214
Abbildung 10-42:	Lineare Regression der Messdaten Ton/Mergel D30; $i = 60$ mm, $i = 70$ mm.....	215
Abbildung 10-43:	Lineare Regression der Messdaten Ton/Mergel D30; $i = 80$ mm.....	215
Abbildung 10-44:	Approximation der Messdaten über e-Funktion, $i = 20$ mm, Ton/Mergel-Mischung.....	216
Abbildung 10-45:	Approximation der Messdaten über e-Funktion, $i = 30$ mm, Ton/Mergel-Mischung.....	216
Abbildung 10-46:	Approximation der Messdaten über e-Funktion, $i = 40$ mm, Ton/Mergel-Mischung.....	217
Abbildung 10-47:	Approximation der Messdaten über e-Funktion, $i = 50$ mm, Ton/Mergel-Mischung.....	217
Abbildung 10-48:	Approximation der Messdaten über e-Funktion, $i = 60$ mm, Ton/Mergel-Mischung.....	217
Abbildung 10-49:	Approximation der Messdaten über e-Funktion, $i = 70$ mm, Ton/Mergel-Mischung.....	218
Abbildung 10-50:	Approximation der Messdaten über e-Funktion, $i = 80$ mm, Ton/Mergel-Mischung.....	218
Abbildung 10-51:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,8$ ; Druck = 0 bar; alle Versuchsböden.....	221
Abbildung 10-52:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,6$ ; Druck = 0 bar; alle Versuchsböden.....	221
Abbildung 10-53:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,4$ ; Druck = 0 bar; alle Versuchsböden.....	222
Abbildung 10-54:	Daten der Messreihe D30; $I_c = 0,8; 0,6; 0,4$ ; Druck = 0 bar; alle Versuchsböden.....	222
Abbildung 10-55:	Daten der Messreihe D60; $I_c = 0,8; 0,6; 0,4$ ; Druck = 0 bar; alle Versuchsböden.....	223
Abbildung 10-56:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,8$ ; Druck = 0,5 bar; alle Versuchsböden.....	223
Abbildung 10-57:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,6$ ; Druck = 0,5 bar; alle Versuchsböden.....	224
Abbildung 10-58:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,4$ ; Druck = 0,5 bar; alle Versuchsböden.....	224
Abbildung 10-59:	Daten der Messreihe D30; $I_c = 0,8; 0,6; 0,4$ ; Druck = 0,5 bar; alle Versuchsböden.....	225
Abbildung 10-60:	Daten der Messreihe D60; $I_c = 0,8; 0,6; 0,4$ ; Druck = 0,5 bar; alle Versuchsböden.....	225
Abbildung 10-61:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,8$ ; Druck = 1 bar; alle Versuchsböden.....	226
Abbildung 10-62:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,6$ ; Druck = 1 bar; alle Versuchsböden.....	226
Abbildung 10-63:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,4$ ; Druck = 1 bar; alle Versuchsböden.....	226
Abbildung 10-64:	Daten der Messreihe D30; $I_c = 0,8; 0,6; 0,4$ ; Druck = 1 bar; alle Versuchsböden.....	227
Abbildung 10-65:	Daten der Messreihe D60; $I_c = 0,8; 0,6; 0,4$ ; Druck = 1 bar; alle Versuchsböden.....	227
Abbildung 10-66:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,8$ ; Druck = 1,5 bar; alle Versuchsböden.....	228
Abbildung 10-67:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,6$ ; Druck = 1,5 bar; alle Versuchsböden.....	228
Abbildung 10-68:	Daten der Messreihen D60 & D30; $I_c = 0,4$ ; Druck = 1,5 bar; alle Versuchsböden.....	228
Abbildung 10-69:	Daten der Messreihe D30; $I_c = 0,8; 0,6; 0,4$ ; Druck = 1,5 bar; alle Versuchsböden.....	229
Abbildung 10-70:	Daten der Messreihe D60; $I_c = 0,8; 0,6; 0,4$ ; Druck = 1,5 bar; alle Versuchsböden.....	229

---

Abbildung 10-71:	Anwendungsbeispiel 2) für das Eintragen von Konsistenzwerten im Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden nach Hollmann & Thewes (2013).....	230
Abbildung 10-72:	Anwendungsbeispiel 2) für das Eintragen von Konsistenzwerten im Bewertungsdiagramm zur Beurteilung möglicher kritischer Umwandlungen von Böden nach Hollmann & Thewes (2013).....	231
Abbildung 10-73:	Produktdatenblatt des verwendeten Feinsandes (vgl. Kapitel 5) .....	232
Abbildung 10-74:	Produktdatenblatt des verwendeten Tonpulvers (vgl. Kapitel 6) .....	233
Abbildung 10-75:	Datenblätter des verwendeten Tensidproduktes CONDAT CFL F5/TM (vgl. Kapitel 5) .....	235

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Einteilung der Arbeitspakete und Forschungsziele der vorliegenden Arbeit.....	4
Tabelle 2-1:	Einordnung von Tunnelbohrmaschinen nach DAUB (2021).....	8
Tabelle 3-1:	Einteilung der Böden in Abhängigkeit von der Korngröße nach DIN EN ISO 14688-1, 2018-05 .....	27
Tabelle 3-2:	Plastizität des Bodenmaterials nach DIN EN ISO 14688-1, 2018-05.....	33
Tabelle 3-3:	Übersicht der Normungen zur Bestimmung von Bodeneigenschaften und Bodenklassifikation .....	39
Tabelle 3-4:	Empirische Korrelation zwischen der Konsistenzzahl $I_c$ und der einaxialen Druckfestigkeit, der undrainierten Scherfestigkeit und der Schlagzahl mit dem SPT .....	45
Tabelle 3-5:	Definiertes Zielsetzmaß im Slump Test verschiedener Autoren .....	46
Tabelle 3-6:	Forschungsarbeiten zu Penetrationsuntersuchungen an Böden .....	50
Tabelle 4-1:	Technische Details zum Versuchsstand .....	61
Tabelle 4-2:	Adaptierbare Systeme und Elemente für den weggesteuerten Penetrationstest .....	62
Tabelle 4-3:	Spannweiten der Daten für verschiedene Penetrationsbereiche, weg- und kraftgesteuert...74	
Tabelle 4-4:	Gemittelte Spannweiten der Messungen A, B, C, D in Abhängigkeit von der Penetrationsgeschwindigkeit; Versuche je Reihe = 3 .....	76
Tabelle 4-5:	Gemittelte Spannweiten der Messungen A, B, C, D; Versuche je Reihe = 18.....	82
Tabelle 5-1:	Ergebnisse Slump Tests/Penetrationstest .....	90
Tabelle 5-2:	Spannweiten und Abweichungen der Penetrationstests und der Slump Test Ergebnisse.....	92
Tabelle 5-3:	Gegenüberstellung von Slump Test und Penetrationstest in Pro- und Conraliste .....	94
Tabelle 6-1:	Penetrationskraft $F$ an der Stelle $i = 80$ mm.....	99
Tabelle 6-2:	Zusammenfassung der Zustandsgrenzen von Probe A, Probe B und der Mischungen.....	105
Tabelle 6-3:	Eingestellter Wassergehalt $w$ und entsprechende Konsistenz $I_c$ .....	106
Tabelle 6-4:	Eindringwiderstand an der Stelle $i = 100$ mm und Reduzierung der Kraft in Abhängigkeit von der Konsistenz $I_c$ .....	114
Tabelle 6-5:	Spannungen an der Zylindergrundfläche.....	119
Tabelle 6-6:	Zusammenfassung der Penetrationskräfte $F_{100}$ und Penetrationsspannung $\sigma_{100}$ .....	119
Tabelle 6-7:	Faktoren zur Spannungsberechnung bei Veränderung der Konsistenz für eine Penetrationstiefe $i = 70$ mm – Ton/Mergel.....	137
Tabelle 10-1:	Charakteristische Eigenschaften und zugehörige empfohlene Testverfahren für Tensidschaum.....	177
Tabelle 10-2:	Charakteristische Eigenschaften und zugehörige empfohlene Prüfungen zur Beurteilung konditionierten Böden für den EPB-Vortrieb.....	177
Tabelle 10-3:	Literaturauswahl von Versuchen zur Messung der Adhäsion oder zur Bewertung der Verklebungsneigung von bindigen Böden .....	180
Tabelle 10-4:	Literaturauswahl von Penetrationsversuchen mit Beton oder Boden.....	180
Tabelle 10-5:	Phase 1; Messreihe 1_1; $v = 0,1$ mm/s .....	182

---

Tabelle 10-6:	Phase 1; Messreihe 1_2; $v = 0,1$ mm/s inkl. Auswertung der Abweichungen $\Delta$ .....	183
Tabelle 10-7:	Phase 1; Messreihe 2_1; $v = 0,1$ mm/s .....	183
Tabelle 10-8:	Phase 1; Messreihe 2_2; $v = 0,1$ mm/s inkl. Auswertung der Abweichungen $\Delta$ .....	184
Tabelle 10-9:	Phase 1; Messreihe 1_1; $v = 1$ mm/s .....	184
Tabelle 10-10:	Phase 1; Messreihe 1_2; $v = 0,1$ mm/s inkl. Auswertung der Abweichungen $\Delta$ .....	185
Tabelle 10-11:	Phase 1; Messreihe 2_1; $v = 1$ mm/s .....	185
Tabelle 10-12:	Phase 1; Messreihe 2_2; $v = 0,1$ mm/s inkl. Auswertung der Abweichungen $\Delta$ .....	186
Tabelle 10-13:	Phase 1; Messreihe 1_1; $v = 5$ mm/s .....	186
Tabelle 10-14:	Phase 1; Messreihe 1_2; $v = 5$ mm/s inkl. Auswertung der Abweichungen $\Delta$ .....	187
Tabelle 10-15:	Phase 1; Messreihe 2_1; $v = 5$ mm/s .....	187
Tabelle 10-16:	Phase 1; Messreihe 2_2; $v = 5$ mm/s inkl. Auswertung der Abweichungen $\Delta$ .....	188
Tabelle 10-17:	Spannweite für weggesteuerte Versuche .....	188
Tabelle 10-18:	Spannweite für kraftgesteuerte Versuche .....	189
Tabelle 10-19:	Phase 2; Messreihe 1_1; $v = 1$ mm/s .....	189
Tabelle 10-20:	Phase 2; Messreihe 2_2; $v = 1$ mm/s inkl. Auswertung der Abweichungen $\Delta$ .....	190
Tabelle 10-21:	Phase 2; Messreihe 2_1; $v = 1$ mm/s .....	190
Tabelle 10-22:	Phase 2; Messreihe 2_2; $v = 1$ mm/s inkl. Auswertung der Abweichungen $\Delta$ .....	190
Tabelle 10-23:	Verwendete Formeln zur Berechnung der Spannungen .....	219
Tabelle 10-24:	Approximierte Spannungen $\sigma_{70}$ für verschiedene Konsistenzen, D30 .....	219
Tabelle 10-25:	Faktoren zur Berechnung der resultierenden Spannungen $\sigma_{70}$ durch Druckerhöhung, D30 .....	219
Tabelle 10-26:	Approximierte Spannungen $\sigma_{70}$ für verschiedene Konsistenzen, D60 .....	220
Tabelle 10-27:	Faktoren zur Berechnung der resultierenden Spannungen $\sigma_{70}$ durch Druckerhöhung, D60 .....	220

---

## Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent	inkl.	inklusive
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid	kg	Kilogramm
ASTM	American Society for Testing and Materials	kPa	Kilopascal
BSG	Boden-Schaum-Gemisch	l	Liter
bzw.	beziehungsweise	M.-%	Masseprozent
ca.	circa	m/s	Meter pro Sekunde
CLB F5/TM	Produktname des Tensids	m <sup>2</sup>	Quadratmeter
cm	Zentimeter	m <sup>3</sup> /min	Kubikmeter pro Minute
CPT	Cone Penetration Test	m <sup>3</sup> /s	Kubikmeter pro Sekunde
d/D	Durchmesser	mm	Millimeter
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen	MPa	Megapascal
DIN	Deutsches Institut für Normungen	N/cm <sup>2</sup>	Newton pro Quadratdezimeter
DOS	Doppelschild	OPS	Einfachschild
engl.	Englisch	Pa	Pascal
EPB	Earth Pressure Balance	S	Setzmaß in cm
et al.	und andere	SF	Setzfließmaß in cm
F	Kraft in Newton	SFB	Sonderforschungsbereich
FER	Foam Expansion Ratio	SiO <sub>2</sub>	Siliciumdioxid
FIR	Foam Injection Rate	SIR	Slurry Injection Rate
fS	Feinsand	SLS	Flüssigkeitsschild
g	Gramm	SM	Schildmaschine
GRT	Gripper-TBM	SPT	Standard Penetration Test
HDS	High Density Slurry	TBM	Tunnelbohrmaschine
HYS	Hybrid-/Multimode-Schilde	VDS	Variable-Density-Schild
Hz	Herz	vgl.	vergleiche
I <sub>c</sub>	Konsistenzzahl	Vol.-%	Volumenprozent
I <sub>p</sub>	Plastizitätszahl	w	Wassergehalt
		XTS	Erweiterungs-TBM

## Formelzeichen

$\alpha$	spezifischer Wasserabfluss durch Porenüberdruck
$A_D$	Zylindergrundfläche in $\text{cm}^2$
$A_S$	Abbaufäche des Schilds in $\text{m}^2$
$c$	Kegelkonstante [-]
$c$	Kohäsion des Bodens in MPa
$c_u$	undrainierte Scherfestigkeit in $\text{kN/m}^2$
$c_f$	Tensidkonzentration in M.-%
$c_{susp}$	Konzentration der Suspension in M.-%
$\varphi$	Reibungswinkel in $^\circ$
$FER$	Aufschäumrate (Foam Expansion Ratio) [-]
$FER_\alpha$	FER bei atmosphärischem Druck [-]
$FER_{eff.}$	Effektive Aufschäumrate [-]
$FER_{ist}$	Erzielte Aufschäumrate [-]
$FIR$	Schauminjektionsrate (Foam Injection Rate) in Vol.-%
$F_{90}$	Penetrationskraft an der Stelle $i = 90$ mm in N
$F_{100}$	Penetrationskraft an der Stelle $i = 100$ mm in N
$F_{120}$	Penetrationskraft an der Stelle $i = 120$ mm in N
$g$	Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$
$h$	Eindringtiefe in mm
$i$	Penetrationstiefe in mm
$I_c$	Konsistenzzahl des Bodens [-]
$I_p$	Plastizitätszahl des Bodens in %
$K$	Kegeleinflussfaktor (0,3 für einen $60^\circ$ Kegel)
$m$	Masse in g
$m_{Schaum}$	Zugabemenge des Schaums in g
$m_w$	Masse Zugabewasser in g
$n$	Anzahl der Messdaten
$n$	Porenanteil des Baugrunds [-]
$\omega$	relative Spannweite in %
$Q_{Boden}$	Bodenausbruchsvolumen in $\text{m}^3/\text{min}$
$Q_{Boden}$	Volumenstrom des Bodens in $\text{m}^3/\text{s}$

---

$Q_{fein,susp}$	Volumenstrom des Feinstoffanteils in m <sup>3</sup> /s
$Q_{Liquid}$	Volumenstrom Liquid in m <sup>3</sup> /s
$Q_{Luft}$	Volumenstrom Luft in m <sup>3</sup> /s
$Q_{Schaum}$	Schaumvolumenstrom in l/min
$Q_{susp}$	Volumenstrom Feinstoffsuspension in m <sup>3</sup> /s
$Q_{Tensid}$	Volumenstrom Tensid in m <sup>3</sup> /s
$\sigma_{70}$	Penetrationsspannungen an der Stelle $i = 90$ mm in N/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{90}$	Penetrationsspannungen an der Stelle $i = 90$ mm in N/cm <sup>2</sup>
$\sigma_{120}$	Penetrationsspannungen an der Stelle $i = 120$ mm in N/cm <sup>2</sup>
$\sigma_N$	Normalspannung in MPa
$\sigma_1$	größte Hauptnormalspannung in MPa
$\sigma_3$	kleinste Hauptnormalspannung in MPa
$S$	Setzmaß in cm
$SF$	Setzfließmaß in cm
$SIR$	Suspensionsinjektionsrate in Vol.-%
$\tau$	resultierende(r) Schubspannung/Scherwiderstand in MPa
$V_g$	Fördervolumen pro Umdrehung (1,5 cm <sup>3</sup> /U)
$v_{Vortrieb}$	Vortriebsgeschwindigkeit in m/min
$V_W$	Volumen des Wassers in cm <sup>3</sup>
$V_S$	Volumen des Bodens in cm <sup>3</sup>
$w$	Wassergehalt in M.-%
$w_L$	Wassergehalt an der Fließgrenze in M.-%
$w_P$	Wassergehalt an der Ausrollgrenze in M.-%
$w_{soll}$	einzustellender Wassergehalt in M.-%
$\beta$	Öffnungswinkel des Fallkegels in °
$\rho_{Boden}$	Dichte des Bodens in g/cm <sup>3</sup>
$\rho_{Liquid}$	Dichte des Liquids in g/cm <sup>3</sup>
$\rho_S$	Dichte des Schaums in g/l
$\rho_d$	Trockendichte des Bodens in g/cm <sup>3</sup>
$\rho_w$	Dichte des Wassers g/cm <sup>3</sup>
$Q$	Gewicht des Kegels in N

---



## Kurzfassung

Beim Vortrieb mit Erddruckschildmaschinen können bindige Böden zu Verklebungserscheinungen führen und gravierende Folgen auf Leistung und Kosten hervorrufen. Eine wesentliche Folge von Verklebungen ist der Verlust der Verarbeitbarkeit, zu deren Charakterisierung bislang der aus der Betontechnologie entlehnte Slump Test verwendet wird. Dieser ist jedoch nicht hinreichend für Experimente mit bindigen Böden geeignet. Des Weiteren sind die Ergebnisse des Slump Tests häufig von manuellen Einflüssen abhängig und weisen eine große Streuung auf.

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht daher die Entwicklung eines Penetrationsverfahrens zur Messung der Verarbeitbarkeit sowohl von bindigen als auch nicht-bindigen Böden. Ausgangspunkt ist die bekannte Korrelation der Kegelpenetration zur Konsistenz bindiger Böden. Die Bandbreite der untersuchten Baugrundtypen umfasst konditionierte Abbauprodukte aus veränderlichem Festgestein, wie Mergelstein, aus Tonböden und aus Sanden.

Mit dem neu konzipierten Versuchsstand kann die Kraft-Weg-Beziehung beim Eindringen eines Penetrationskörpers in eine Bodenprobe sowohl kraft- als auch weggeregelt gemessen werden. Mit Penetrationskörpern unterschiedlicher Geometrien konnten verschiedene konditionierte Böden erfolgreich untersucht und eindeutige Korrelationen zwischen Eindringwiderstand und Konditionierungsgrad ermittelt werden. Entwicklung, Konstruktion, Steuerung und Validierung des weggesteuerten Versuchsstandes wurden dokumentiert und zahlreiche Versuche zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit von Daten, gemessen mit dem neuentwickelten Versuchsstand, ausgewertet. Es zeigt sich, dass der weggesteuerte Penetrationstest ein gut geeignetes Messinstrument zur Bewertung der Verarbeitbarkeit und eine zuverlässige Alternative zum Slump Test darstellt. Der Messbereich des Penetrationstests ist ausreichend groß, um die Schauminjektionsrate bei konditionierten nicht-bindigen Böden quantitativ zu differenzieren. Der weggesteuerte Penetrationstest schließt im Vergleich zum Slump Test die vorhandene Lücke zur Untersuchung bindiger Böden. Die experimentellen Erkenntnisse zur Korrelation zwischen Eindringwiderstand und Konsistenz- sowie Plastizitätszahl erlauben eine Bewertung von Verarbeitbarkeit und Verklebungspotential. Damit kann der Erfolg von Konditionierungsmaßnahmen bei Bedarf auch vortriebsbegleitend in der Praxis bewertet werden. Dies wird mit dem entwickelten Verfahren auch in automatisierter Form möglich sein. Das Verfahren stellt zudem einen Entwicklungsschritt zur Verringerung des Materialeinsatzes von Konditionierungsmitteln sowie zur Reduktion von Deponierungskosten dar.

---

## Abstract

When driving with earth pressure balance shield machines, cohesive soils can lead to clogging which cause serious consequences on performance and costs. A major consequence of clogging is the loss of workability, which has so far been characterized using the slump test borrowed from concrete technology. However, because of clogging, the slump test is not suitable for the investigation of cohesive soils regarding their suitability for EPB tunneling. Furthermore, test results from the slump test are often dependent on manual influences of the user and show a large variation.

The focus of the present work is the development of a penetration method to measure the workability of non-cohesive soils and the consistency of cohesive unconsolidated soils. The starting point is the known correlation of cone penetration to the consistency of cohesive soils. The range of soil types investigated includes conditioned excavation products from variable solid rock, such as marlstone, from clay soils and from sands.

With the new test device, the force-displacement relationship during penetration into a soil sample can be measured both force-controlled and displacement-controlled. With penetration bodies of different geometries, various conditioned soils could be successfully investigated and clear correlations between penetration resistance and degree of conditioning could be determined. Development, construction, control and validation of the displacement-controlled penetration test were documented and numerous tests were evaluated to verify the rate of reproducibility of the measured data. It is shown that the displacement-controlled penetration test is a well-suited measuring instrument for evaluating workability and a reliable alternative to the frequently used slump test. The measuring range of the penetration test is sufficiently large to quantitatively differentiate the foam injection rate in conditioned non-cohesive soils. Compared to the slump test, the displacement-controlled penetration test closes the existing gap for the investigation of cohesive soils. The experimental findings on the correlation between penetration resistance and the consistency index as well as plasticity index allow an evaluation of both, workability and clogging potential. This allows for an evaluation of the success of conditioning on a TBM during excavation, if required. Further, an automation of the measurement is possible using the developed method. The method also represents a development step towards reducing the use of conditioning agents and reducing landfill costs.

---