

Sascha Freimann

Untersuchung der Verarbeitbarkeit von konditionierten Lockergesteinsböden für den EPB-Schildvortrieb

Schriftenreihe des Instituts für
Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2021-01

**Untersuchung der Verarbeitbarkeit von konditionierten Lockergesteins-
böden für den EPB-Schildvortrieb**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

der

Ruhr-Universität Bochum

vorgelegt von

Sascha Freimann, 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: 20.11.2020

Tag der mündlichen Prüfung: 24.03.2021

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

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

Heft 2021-1

Sascha Freimann

**Untersuchung der Verarbeitbarkeit von konditionierten
Lockergesteinsböden für den EPB-Schildvortrieb**

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8049-0

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 • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Dank

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum entstanden. Mein größter Dank gilt dabei zunächst meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes, der nicht nur die wissenschaftliche Betreuung dieser Dissertation übernommen, sondern mich stets in allen Bereichen gefördert hat. Vielen Dank für die Möglichkeit, am „TLB“ meine Kenntnisse zu vertiefen und viele neue Erfahrungen sammeln zu können.

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler danke ich für das wissenschaftliche Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Der fachliche Austausch hat mir sehr viel Spaß gemacht.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher danke ich herzlich für seine Mitwirkung und den Vorsitz in der Promotionskommission.

Diese Arbeit entstand im Rahmen der Mitarbeit im Sonderforschungsbereich (SFB) 837. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Kollegen im SFB aber insbesondere bei Jörg Sahlmen, Elke Köster, Sven Plückelmann, Dr.-Ing. Christoph Schulte Schreppling und Dr.-Ing. Jakob Küpferle bedanken.

Die Zeit am Lehrstuhl als wissenschaftlicher Mitarbeiter kann einen manchmal an seine persönlichen Grenzen bringen. Umso schöner, wenn jemand das Glück hat einen Bürokollegen zu haben, der nicht nur als Kollege, sondern auch als Freund stets mit Rat und Tat zur Stelle ist. Deshalb möchte ich mich an dieser Stelle ganz besonders bei meinem Bürokollegen, Teilprojekt-Partner, Büro-DJ und Freund Marius Schröder bedanken! Seine Hilfe und die zahlreichen fachlichen Diskussionen haben maßgebend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen!

Ein überaus großer Dank geht an Christian Rhein, der mich während seiner Studienzeit durch sein Interesse am maschinellen Tunnelvortrieb mit Erddruckschilden und seinen studentischen Arbeiten außerordentlich professionell unterstützt hat. Dieses Interesse und dieser Einsatz haben nicht zuletzt dazu geführt, dass Herr Rhein mich in den letzten Monaten meiner Dissertation als Kollege am TLB begleitet hat. Vielen Dank!

Vielen Dank auch an Sebastian Kube. Dank Herrn Kube bin ich nicht nur der amtierende Rekordsieger der TLB Open im Minigolf, sondern konnte ich alle auftretenden Probleme hinsichtlich Formatierung meistern.

Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern und Kollegen aus der Konstruktionsteilprüfung der Ruhr-Universität Bochum. Besonders hervorzuheben sind Marcel Gwodz, Bernd Schmidt, Yvonne Böck und Dieter Abraham.

Dass EPB-Forschung zusammenschweißen kann, konnte ich während der Bearbeitung meiner Arbeit eindrucksvoll feststellen. An dieser Stelle möchte ich Dr.-Ing Mario Galli und Prof. Dr.-Ing. Christoph Budach für die zahlreichen fachlichen Diskussionen rund um das Thema Bodenconditionierung und experimentelle Forschung herzlich danken.

Für die fachliche Unterstützung bei der Vorbereitung auf meine Promotionsprüfung, aber vor allem für die moralische Unterstützung während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter möchte ich mich ganz besonders bei Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Sissis Kamarianakis bedanken.

Die Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl habe ich sehr genossen. Insbesondere die freundliche, kollegiale und heitere Arbeitsatmosphäre haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Danke an Dr.-Ing Britta Schößer, Dr.-Ing Götz Vollmann, Dr.-Ing Hammer, Hans Adden, Annika Jodehl, Ahn Ngoc Pham, Hendrik Wahl, Tim Göbel und Fabiana Ochs. Großer Dank gilt auch meinen ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Alena Conrads, Dr.-Ing. Zdenek Zizka, Dr.-Ing. Ivan Popovic, Peter Hoffmann und Stephan Wisberg.

Experimentelle Forschung ist ohne helfende Hände kaum zu bewältigen. Daher möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Studierenden und studentischen Hilfskräften des TLB bedanken, welche mich entweder durch Ihre Arbeiten oder durch Ihre Hilfe bei der Durchführung von Versuchen unterstützt haben. Großer Dank an das EPB-Labor Team Gerrit, Timon, Bozhidar, Georg, Max und Matthias.

Schließlich möchte ich mich für die liebevolle moralische und unermüdliche Unterstützung meiner Eltern bedanken. Ohne Sie wäre diese Leistung nicht möglich gewesen.

Zuletzt gilt mein allergrößter Dank meiner Frau Jill. Neben ihrer äußerst kritischen Begutachtung meiner Probenvorträge ist besonders ihr Verständnis für die zeitintensive Bearbeitung dieser Arbeit hervorzuheben. Insbesondere zuletzt konnte ich mich stets darauf verlassen, dass mir mein Rücken gestärkt und freigehalten wird. Um all die Unterstützung im Einzelnen zu nennen, müsste ich an dieser Stelle noch weitere Seiten füllen. Danke für den ununterbrochenen liebevollen Zuspruch und die kontinuierliche Motivation. Das werde ich dir nie vergessen. Mein allerliebster Dank gilt meinem Sohn Tom, der mich auch in den stressigsten Phasen aufheitern und zum Lachen durch sein fröhliches Wesen bringen konnte.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Dank	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	viii
Tabellenverzeichnis	xv
Abkürzungsverzeichnis	xvi
Formelzeichenverzeichnis	xviii
Kurzfassung	xxii
Abstract	xxiv
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung und wissenschaftliches Vorgehen	3
1.3 Gliederung der Arbeit	4
2 Grundlagen zur Bodenkonditionierung beim Vortrieb mit Erddruckschilden	7
2.1 Maschineller Tunnelvortrieb mit Erddruckschildmaschinen	7
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise einer Erddruckschildmaschine	8
2.1.2 Bodenkonditionierung beim EPB-Vortrieb	14
2.1.3 Einsatzbereich von Erddruckschildmaschinen	20
2.2 Rheologie und Verarbeitbarkeit von konditionierten Böden.....	22
2.2.1 Darstellung der rheologischen Parameter	22
2.2.2 Darstellung der wesentlichen Fließkurvenmodelle	23
2.3 Vortriebsvorbereitende Konditionierungsuntersuchungen im Labor	26
2.4 Stand der Forschung zum Fließverhalten von Boden-Schaum-Gemischen.....	30
2.4.1 Slump Test.....	30
2.4.2 Scherfestigkeitsuntersuchungen.....	31
2.4.3 Rheometertests.....	33
2.4.4 Ausbreittisch und Mini-Slump-Test	35
2.4.5 Fließrinnenversuch und Tilt Sliding Test.....	37
2.5 Penetrationstests.....	38
2.5.1 Fallkegelversuch zur Untersuchung von Bodenproben	38
2.5.2 Penetrationsuntersuchungen zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Frischbeton und Mörtel	42
2.6 Untersuchungen zur Schaumpenetration an der Ortsbrust	44
2.7 Motivation für weitergehende Forschung zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von konditionierten Böden.....	49
3 Experimenteller Ansatz	53
3.1 Mehrskaliger Versuchsansatz zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von Boden-Schaum-Gemischen	53

3.2	Verwendete Versuchsmaterialien	55
3.2.1	Beschreibung und Herstellung der untersuchten Böden	55
3.2.2	Herstellung von Tensidschaum	56
3.2.3	Herstellung von Boden-Schaum-Gemischen.....	59
4	Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von konditionierten Böden mittels Slump Test	61
4.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	61
4.2	Versuchsergebnisse.....	63
4.2.1	Setzmaß.....	63
4.2.2	Setzfließmaß.....	68
4.2.3	Fließgrenze.....	71
4.3	Empirisch analytischer Ansatz zur Abschätzung der Schauminjektionsrate	72
4.3.1	Körnungslinien und Parameter	73
4.3.2	Evaluierung des Einflusses der Granulometrie auf die Konditionierung	75
5	Rheologische Untersuchungen von konditionierten Böden mit dem Kugelmesssystem.....	79
5.1	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung mit dem Rheolab QC	79
5.2	Diskussion der angewandten Fließkurvenmodelle	81
5.3	Einfluss der ersten Runde bei der Versuchsdurchführung	84
5.4	Versuchsergebnisse der rheologischen Untersuchungen in der Mesoskala	88
5.4.1	Untersuchung der Schubspannung und Fließgrenze von Boden-Schaum-Gemischen.....	89
5.4.2	Untersuchung der Viskosität von Boden-Schaum-Gemischen.....	94
5.5	Implementierung einer Kugelmesszelle im Großversuchsstand COSMA zur Untersuchung von Boden-Schaum-Gemischen	97
5.5.1	Versuchsaufbau und -beschreibung	97
5.5.2	Ermittlung der Drehzahl und des Drehmoments bei den rheologischen Untersuchungen mit dem Großversuchsstand COSMA	100
5.6	Großskalige rheologische Untersuchungen von Boden-Schaum-Gemischen.....	102
5.6.1	Versuchsprogramm und Versuchsdurchführung	102
5.6.2	Darstellung der Ergebnisse der großskaligen Kugelrheometerversuche	103
5.7	Diskussion der Versuchsergebnisse und Anwendung des Kugelrheometers zur Untersuchung der Fließfähigkeit von Boden-Schaum-Gemischen.....	111
6	Experimentelle Untersuchungen zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von konditionierten kohäsionslosen Böden mittels Penetrationstest.....	114
6.1	Entwicklung des Penetrationstests zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von Boden-Schaum-Gemischen	114
6.2	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	124
6.3	Versuchsergebnisse.....	128
6.3.1	Penetrationstiefe	128
6.3.2	Undrainierte Scherfestigkeit und Penetrationsfließgrenze	133
6.4	Erkenntnisse aus den Penetrationstests.....	141
7	Vergleichende Analyse der vorgestellten Untersuchungsmethoden zur Charakterisierung von Boden-Schaum-Gemischen	142

7.1	Korrelation zwischen den Ergebnissen der Kugelrheometerversuche und den Ergebnissen des Slump Tests	142
7.2	Korrelation zwischen den Ergebnissen des Penetrationstests und den Ergebnissen des Slump Tests	144
7.2.1	Penetrationstiefe	145
7.2.2	Undrainierte Scherfestigkeit und Penetrationsfließgrenze	150
7.3	Korrelation zwischen den Ergebnissen des Penetrationstests und den Ergebnissen der Kugelrheometerversuche	155
8	Empfehlungen für die Praxis.....	159
8.1	Abschätzung der Schauminjektionsrate für den EPB-Vortrieb im geschlossenen Modus als Planungsgrundlage	159
8.2	Einsatz des Penetrationstests als Alternative zum Slump Test	161
8.3	Diskussion und Auswertung der unterschiedlichen Untersuchungsmethoden zur Ermittlung der Verarbeitbarkeit von konditionierten Böden	164
8.4	Ansatz für einen weggesteuerten Penetrationsversuch.....	169
9	Fazit	173
9.1	Zusammenfassung	173
9.2	Ausblick	176
10	Literaturverzeichnis	179
11	Anhang	197
12	Lebenslauf.....	259

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Flussdiagramm zum Aufbau der Arbeit	6
Abbildung 2-1:	Schematischer Aufbau eines Erddruckschildes mit den wesentlichen Konstruktionselementen zur Stützdruckregulierung	9
Abbildung 2-2:	Schematische Darstellung einer Schaumanlage auf einer EPB-Schildmaschine	18
Abbildung 2-3:	Erweiterter Einsatzbereich von Erddruckschildmaschinen auf Grundlage der durchgeführten Laboruntersuchungen von Budach (2012)	21
Abbildung 2-4:	Exemplarische Darstellung der in dieser Arbeit vorgestellten Fließkurvenmodelle mit linearer Darstellung der Scherrate (links) und logarithmischer Darstellung der Scherrate (rechts)	25
Abbildung 2-5:	Foto (links) und schematische Darstellung (rechts) der Prüfkammer zur Untersuchung der Flügelscherfestigkeit unter Druckbedingungen nach Mori (2016)	33
Abbildung 2-6:	Durchschnittliche BMS Fließgrenze von Boden-Schaum-Gemischen mit einem Setzmaß von 10 und 20 cm (Galli, 2016)	35
Abbildung 2-7:	Ausbreitisch (links) und Aufzeichnung der Ergebnisse aus dem Mini-Slump-Test (rechts) (Oliveira et al., 2019a)	36
Abbildung 2-8:	Fließverhalten eines Boden-Schaum-Gemisches in Abhängigkeit von der Schauminjektionsrate im Fließrinnenversuch (Feinsand; w=12%; FER=15; FIR=50 Vol.% (oben) und 75 Vol.% (unten))	37
Abbildung 2-9:	Schematische Darstellung des Tilt Sliding Tests (links) und Foto (rechts) (Carigi et al., 2019)	38
Abbildung 2-10:	Schematische Darstellung einer Fallkegel-Versuchseinrichtung (links) und Beispiel eines Fallkegels mit einem Spitzenwinkel von 60° (rechts) (DIN EN ISO 17892-12:10-2018)..	39
Abbildung 2-11:	Schematische Darstellung des Kelly-Ball-Tests (links) und Draufsicht (rechts) nach (ASTM C360)	42
Abbildung 2-12:	Schematische Darstellung des Fallkegelversuchs nach Abd Elaty, M. A. A. & Ghazy (2016) (links) und Foto des Fallkegelversuchs (rechts) (Abd Elaty, M. A. A. & Ghazy, 2016)	44
Abbildung 2-13:	Restwassergehalt in Abhängigkeit der Penetrationszeit für unterschiedliche Versuchsböden anhand einer typischen Vortriebsituation nach Galli (2016)	47
Abbildung 2-14:	Schematische Darstellung des Grenzbereichs bei der Versuchsdurchführung mit reinem Schaum (links) und mit einem Boden-Schaum-Gemisch (rechts) (Xu, 2018)	48
Abbildung 2-15:	Foto eines Flappers in der Abbaukammer (links) und schematische Darstellung der Anordnung mehrerer Flapper in der Abbaukammer einer Erddruckschildmaschine (rechts) (Dobashi et al., 2013)	51
Abbildung 3-1:	Mehrskaliger Versuchsansatz des Teilprojekts A4 „Konditionierung des Stützmediums und Ortsbruststützung beim Schildvortrieb mit Erddruckschilden“ im Sonderforschungsbereich 837	54

Abbildung 3-2:	Darstellung der Kornverteilungslinien der in dieser Arbeit untersuchten Böden	56
Abbildung 3-3:	Durchströmte Querschnittsfläche der Schaumlanze bei horizontaler Einbauposition (a)) und bei vertikaler Einbauposition (b))	58
Abbildung 3-4:	Großschaumanlage des Lehrstuhls für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum	59
Abbildung 4-1:	Übersicht der Slumpkörper für eine adäquate Verarbeitbarkeit von Boden-Schaum-Gemischen (grün und Übergang grün/rot) und ungeeignete Verarbeitbarkeit (rot)	61
Abbildung 4-2:	Modifizierter Slump Test mt Führungsschienen zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit von konditionierten Böden	62
Abbildung 4-3:	Standardverfahren zur Durchführung des Slump Tests	63
Abbildung 4-4:	Versuchsergebnisse der durchgeführten Slump Tests mit schaumkonditionierten Feinsand - Logistische Regressionsfunktion	64
Abbildung 4-5:	Vereinfachte Darstellung der Versuchsergebnisse der durchgeführten Slump Tests mit schaumkonditionierten Feinsand für den EPB-Vortrieb relevanten Bereich des Setzmaßes - lineare Regression	65
Abbildung 4-6:	Einfluss der Körnungslinie des konditionierten Bodens auf das Setzmaß in Abhängigkeit der Schaumzugabemenge	66
Abbildung 4-7:	Darstellung der Setzfließmaße von schaumkonditioniertem Feinsand in Abhängigkeit von der Schauminjektionsrate FIR - Logistische Regression	69
Abbildung 4-8:	Vereinfachte Darstellung der Setzfließmaße von schaumkonditioniertem Feinsand in Abhängigkeit von der Schauminjektionsrate FIR für die EPB-Vortrieb relevanten Boden-Schaum-Gemische - lineare Regression	69
Abbildung 4-9:	Darstellung der Mittelwerte der Setzfließmaße und der maximalen Abweichungen in Abhängigkeit von den zugehörigen Setzmaßen	70
Abbildung 4-10:	Darstellung der ermittelten Setzmaßfließgrenzen $\tau_{0,s}$ in Abhängigkeit von der Schauminjektionsrate FIR für konditionierten Feinsand mit spezifischem Wassergehalt - Logistische Regression	71
Abbildung 4-11:	Vereinfachte Darstellung der ermittelten Setzmaßfließgrenzen $\tau_{0,s}$ in Abhängigkeit von der Schauminjektionsrate FIR für konditionierten Feinsand mit spezifischem Wassergehalt - linearer Regression	72
Abbildung 4-12:	Korrelation der geschätzten FIR_s und der tatsächlichen FIR basierend auf den Regressionsanalysen mit den Bodenparametern Krümmungszahl C_c (links) und Ungleichförmigkeitszahl C_u (rechts)	75
Abbildung 4-13:	Korrelation der geschätzten FIR_s und der tatsächlichen FIR unter Berücksichtigung des Korndurchmessers d_{50}	77
Abbildung 5-1:	Schematische Darstellung des Kugelrheometers nach (Müller et al., 1999) und des verwendeten Messprofils (rechts) nach Galli (2016)	80
Abbildung 5-2:	Rheometer Rheolab QC von Anton Paar (links) und die in dieser Arbeit verwendeten unterschiedlichen Kugelaufsätze (rechts) (Galli, 2016)	81

Abbildung 5-3:	Darstellung der unterschiedlichen Fließkurvenmodelle zur Approximation der Messwerte eines Beispielversuchs	83
Abbildung 5-4:	Messbereich der Kugel beim Durchfahren der Probe in der ersten Runde (links) und in den Runden 2 bis 6 (rechts)	85
Abbildung 5-5:	Darstellung ermittelten Schubspannungen für die jeweiligen Runden bei den Untersuchungen mit dem Kugelrheometer	86
Abbildung 5-6:	Darstellung der Schubspannungen zur Untersuchung des Einflusses der ersten Runde auf die Versuchsergebnisse des Kugelrheometers	87
Abbildung 5-7:	Kanalbildung bei Kugelrheometerversuchen mit Feinsand ($w=12$ M.-%, FER=15, FIR=55 Vol.-%) links und mit Feinsand ($w=12$ M.-%, FER=15, FIR=150 Vol.-%) rechts.....	88
Abbildung 5-8:	Verdrehung der Probe im Rheolab QC unter Verwendung des Kugelrheometers	89
Abbildung 5-9:	Mittlere Fließkurven für konditionierten Feinsand mit einem Wassergehalt w von 2 M.-% und unterschiedlicher Schauminjektionsrate FIR - Regression mit Herschel-Bulkley Modell	90
Abbildung 5-10:	Mittlere Fließkurven für konditionierten Feinsand mit einem Wassergehalt w von 4 M.-% und unterschiedlicher Schauminjektionsrate FIR - Regression mit Herschel-Bulkley Modell	91
Abbildung 5-11:	Mittlere Fließkurven für konditionierten Feinsand mit einem Wassergehalt w von 6 M.-% und unterschiedlicher Schauminjektionsrate FIR - Regression mit Herschel-Bulkley Modell	91
Abbildung 5-12:	Mittlere Fließkurven für konditionierten Feinsand mit einem Wassergehalt w von 8 M.-% und unterschiedlicher Schauminjektionsrate FIR - Regression mit Herschel-Bulkley Modell	92
Abbildung 5-13:	Mittlere Fließkurven für konditionierten Feinsand mit einem Wassergehalt w von 10 M.-% und unterschiedlicher Schauminjektionsrate FIR - Regression mit Herschel-Bulkley Modell	92
Abbildung 5-14:	Mittlere Fließkurven für konditionierten Feinsand mit einem Wassergehalt w von 12 M.-% und unterschiedlicher Schauminjektionsrate FIR - Regression mit Herschel-Bulkley Modell	93
Abbildung 5-15:	Graphische Darstellung der Abhängigkeit der BMS-Fließgrenze von der FIR.....	94
Abbildung 5-16:	Gemittelte Viskositätsverläufe von schaumkonditionierten Feinsand	96
Abbildung 5-17:	Mittlere Effektive Viskosität in Abhängigkeit von der Schauminjektionsrate	97
Abbildung 5-18:	Großversuchsstand COSMA inkl. Einbauposition des Kugelrheometers.....	98
Abbildung 5-19:	Druckdifferenz der Drücke D_1 und D_2 in den Hydraulikschläuchen bei einer Drehzahl des Hydraulikaggregats von 316 U/min.....	100
Abbildung 5-20:	Darstellung der linearen Abhängigkeit zwischen der Drehzahl des Hydraulikaggregats und der Drehzahl des Kugelrheometers im Großversuchsstand COSMA	101

Abbildung 5-21:	Vergleich zwischen Homogenisierung der konditionierten Probe durch Schaumzugabe in COSMA (links) und Probenvorbereitung im Freifallmischer vor Versuchsbeginn (rechts)	103
Abbildung 5-22:	Drehmomentverlauf des Kugelrheometers im Leerlauf bei einer Drehzahl von 2 U/min	104
Abbildung 5-23:	Drehmomentverläufe des Kugelrheometers von drei Versuchen mit identischer Einstellung der Motordrehzahl des Hydraulikaggregats im Leerlauf bei einer Drehzahl von 2 U/min (links) und 8 U/min (rechts).....	105
Abbildung 5-24:	Drehmomentverläufe des Kugelrheometers von drei Versuchen mit identischer Drehzahl im Leerlauf nach Phasenbereinigung für eine Drehzahl von 2 U/min (links) und 8 U/min (rechts).....	105
Abbildung 5-25:	Normalverteilung der Messwerte und der bereinigten Werte des Drehmoments bei einer Drehzahl des Rheometers von 2 U/min im Leerlauf.....	107
Abbildung 5-26:	Darstellung des Drehmomentverlaufs nach der Extremwertbereinigung im Leerlauf für eine Drehzahl von 2 U/min	107
Abbildung 5-27:	Vergleich der Drehmomentverläufe des Kugelrheometers in COSMA für die untersuchten Boden-Schaum-Gemische für eine Drehzahl von 8 U/min.....	108
Abbildung 5-28:	Darstellung des Medians und des 1. und 3. Quartils der aufgezeichneten Drehmomente über die Drehzahl des Kugelrheometers im Großversuchsstand COSMA	110
Abbildung 5-29:	Darstellung des Streubereichs der Messwerte des Differenzdrehmoments	111
Abbildung 6-1:	Versuchsaufbau des Penetrationstest in der 1. Stufe des Vorversuchsprogramms mit dem Penetrationskörper Bullet	115
Abbildung 6-2:	Korrelation zwischen Penetrationstiefe und Setzmaß aus der ersten Stufe des Vorversuchsprogramms zur Entwicklung eines Penetrationstests für konditionierte Böden (Freimann et al., 2019)	117
Abbildung 6-3:	Darstellung des Einflussbereichs der Scherverformung durch die Penetration eines Kegels mit einem Öffnungswinkel von 60° (Hansbo, 1957) (links) und Berechnung des Einflussbereichs (Koumoto & Houlsby, 2001) (rechts).....	118
Abbildung 6-4:	Versuchsergebnisse der 3. Vorversuchsstufe - Prüfung der Reproduzierbarkeit der Penetrationstiefe nach Optimierungsmaßnahme am Schaft des Versuchsstands	119
Abbildung 6-5:	Zusatzgewichte für den Penetrationstest	120
Abbildung 6-6:	Darstellung der Versuchsergebnisse aus der 4. Vorversuchsstufe - Variation des Penetrationsgewichts für Boden-Schaum-Gemische aus Feinsand	121
Abbildung 6-7:	Beziehung zwischen Setzmaß S und Penetrationstiefe i für fS, S und Sf _k in Abhängigkeit von dem Penetrationsgewicht.....	122
Abbildung 6-8:	Überschreiten der maximal möglichen Penetrationstiefe des kleinen Kegels und Volumenverdrängung über den Penetrationskörper.....	123
Abbildung 6-9:	Darstellung des Einflusses der Maße und Beschaffenheit der kegelförmigen Penetrationskörper mit einem Öffnungswinkel von 60° auf die Penetrationstiefe.....	124

Abbildung 6-10:	Foto des Penetrationstests (links) und Schematische Darstellung des kraftgesteuerten Penetrationstests (rechts).....	125
Abbildung 6-11:	Positionierung des Penetrationskörpers auf der Probenoberfläche vor Versuchsbeginn	127
Abbildung 6-12:	Standardverfahren zur Durchführung des Penetrationstests	127
Abbildung 6-13:	Verlauf der mittleren Penetrationstiefe i aus den Penetrationsversuchen mit Feinsand und einem Kegel mit dem Öffnungswinkel 60° - Regression mit Polynom 3. Grades	129
Abbildung 6-14:	Verlauf der mittleren Penetrationstiefe i aus den Penetrationsversuchen mit Sand und einem Kegel mit dem Öffnungswinkel 60° - Regression mit Polynom 3. Grades	129
Abbildung 6-15:	Verlauf der mittleren Penetrationstiefe i aus den Penetrationsversuchen mit feinkiesigen Sand und einem Kegel mit dem Öffnungswinkel 60° - Regression mit Polynom 3. Grades	130
Abbildung 6-16:	Verlauf der Penetrationstiefe i aus den Penetrationsversuchen mit Feinsand und einem Kegel mit dem Öffnungswinkel 60° - lineare Regression	131
Abbildung 6-17:	Überprüfung der Kegelkonstante c aus (DIN EN ISO 17892-6:07-2017) mittels linearer Regression der Messwerte der Flügelscherfestigkeit.....	135
Abbildung 6-18:	Kraftwirkung am Penetrationskegel beim Penetrationstest.....	136
Abbildung 6-19:	Abmessungen am Penetrationskegel zur Ermittlung der fiktiven Penetrationstiefe.....	137
Abbildung 6-20:	Werte der fiktiven Penetrationstiefe in Abhängigkeit von der gemessenen Penetrationstiefe	137
Abbildung 6-21:	Verlauf der mittleren Penetrationsscherfestigkeit $c_{urf,c}$ aus den Penetrationsversuchen mit Feinsand und einem Kegel mit dem Öffnungswinkel 60° - Regression mit Potenzfunktion	138
Abbildung 6-22:	Verlauf der mittleren Penetrationsscherfestigkeit $c_{urf,c}$ aus den Penetrationsversuchen mit Sand und einem Kegel mit dem Öffnungswinkel 60° - Regression mit Potenzfunktion .	139
Abbildung 6-23:	Verlauf der mittleren Penetrationsscherfestigkeit $c_{urf,c}$ aus den Penetrationsversuchen mit feinkiesigen Sand und einem Kegel mit dem Öffnungswinkel 60° - Regression mit Potenzfunktion	139
Abbildung 6-24:	Verlauf der mittleren Fließgrenze τ_0, P, v aus den Penetrationsversuchen mit Feinsand und einem Kegel mit dem Öffnungswinkel 60° - Regression mit Potenzfunktion	140
Abbildung 6-25:	Verlauf der Schubspannung $\tau_{0,P,v}$ aus den Penetrationsversuchen mit einem Kegel mit dem Öffnungswinkel 60° - Regression mit Potenzfunktion.....	141
Abbildung 7-1:	Darstellung der BMS-Fließgrenzen $\tau_{0,BMS}$ für Boden-Schaum-Gemische mit einem Setzmaß S von 10 und 20 cm	143
Abbildung 7-2:	Graphische Darstellung der BMS-Fließgrenze der untersuchten Boden-Schaum-Gemische mit BMS12 über die Setzmaßfließgrenze - Lineare Regressionsfunktion.....	144
Abbildung 7-3:	Vergleich der Dichten aus den Slump Tests und den Penetrationsversuchen	145

Abbildung 7-4:	Mittlere Penetrationstiefe i in Abhängigkeit von dem ermittelten Setzmaß S aus dem Slump Test für konditionierten Feinsand - Regression mit Polynom 3. Grades.....	146
Abbildung 7-5:	Mittlere Penetrationstiefe i in Abhängigkeit von dem ermittelten Setzmaß S aus dem Slump Test für konditionierten Sand - Regression mit Polynom 3. Grades	147
Abbildung 7-6:	Mittlere Penetrationstiefe i in Abhängigkeit von dem ermittelten Setzmaß S aus dem Slump Test für konditionierten feinkiesigem Sand - Regression mit Polynom 3. Grades	147
Abbildung 7-7:	Mittlere Penetrationstiefe in Abhängigkeit von dem ermittelten Setzmaß S aus dem Slump Test für alle untersuchten Boden-Schaum-Gemische - Regression mit Polynom 3. Grades	149
Abbildung 7-8:	Mittlere Penetrationstiefe in Abhängigkeit von den aus den Setzmaßen ermittelten Fließgrenzen $\tau_{0(S)}$ nach (Galli, 2016) für alle untersuchten Boden-Schaum-Gemische - Multilineare Regression	150
Abbildung 7-9:	Mittlere Penetrationsscherfestigkeit c_{urfc} in Abhängigkeit von dem ermittelten Setzmaß S aus dem Slump Test für konditionierten Feinsand - Regression mit Potenzfunktion.....	151
Abbildung 7-10:	Mittlere Penetrationsscherfestigkeit c_{urfc} in Abhängigkeit von dem ermittelten Setzmaß S aus dem Slump Test für konditionierten Sand - Regression mit Potenzfunktion	152
Abbildung 7-11:	Mittlere Penetrationsscherfestigkeit c_{urfc} in Abhängigkeit von dem ermittelten Setzmaß S aus dem Slump Test für konditionierten feinkiesigen Sand - Regression mit Potenzfunktion	152
Abbildung 7-12:	Mittlere Penetrationsscherfestigkeit c_{urfc} in Abhängigkeit von dem Setzmaß S für alle untersuchten Boden-Schaum-Gemische - Regression mit Potenzfunktion	153
Abbildung 7-13:	Mittlere Penetrationsscherfestigkeit c_{urfc} in Abhängigkeit von dem ermittelten Setzmaß S für alle untersuchten Boden-Schaum-Gemische - Multilineare Regression.....	154
Abbildung 7-14:	Mittlere Penetrationsfließgrenze $\tau_{0,P,v}$ in Abhängigkeit von den Setzmaßfließgrenzen $\tau_{0,S}$ nach (Galli, 2016) für alle untersuchten Boden-Schaum-Gemische - Regression mit Exponentialfunktion.....	155
Abbildung 7-15:	Mittlere Penetrationstiefe in Abhängigkeit von der BMS-Fließgrenze aus dem Herschel-Bulkley Modell - lineare Regression	156
Abbildung 7-16:	Darstellung der BMS-Fließgrenze über die Penetrationsfließgrenze für schaumkonditionierten Feinsand - logarithmische Regressionsfunktion.....	157
Abbildung 8-1:	Darstellung des geschätzten Schauminjektionsbands basierend auf Beispieldaten aus einem geotechnischen Gutachten mittels entwickeltem Prognosemodells.....	160
Abbildung 8-2:	Darstellung des Grenzbereichs für eine adäquate Verarbeitbarkeit von Boden-Schaum-Gemischen aus Penetrationstests und Slump Tests.....	162
Abbildung 8-3:	Grafische Darstellung der Penetrationsfließgrenze über das Setzmaß	163
Abbildung 8-4:	Einordnung der analysierten Untersuchungsmethoden anhand der unterschiedlichen Materialzustandsformen des Boden-Schaum-Gemischs	165
Abbildung 8-5:	Mögliches Konzept zur Entwicklung eines weggesteuerten Penetrationstests.....	170

Abbildung 8-6:	Mögliche Einbauposition des weggesteuerten Penetrationstests in der Abbaukammer einer Erddruckschildmaschine.....	172
----------------	---	-----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Einordnung von Tunnelbohrmaschinen nach DAUB (2020)	7
Tabelle 2-2:	Vortriebsmodi einer Erddruckschildmaschine in Anlehnung an DAUB (2020)	10
Tabelle 2-3:	Charakteristische Eigenschaften und zugehörige empfohlene Untersuchungsmethoden für Tensidschaum.....	27
Tabelle 2-4:	Charakteristische Eigenschaften und zugehörige empfohlene Untersuchungsmethoden zur Beurteilung konditionierter Böden für den EPB-Vortrieb	28
Tabelle 2-5:	Zielgrößen des Slump Tests für konditionierte Böden.....	30
Tabelle 2-6:	Werte für die Kegelkonstante c zur Bestimmung der undrainierten Scherfestigkeit für Fallkegel mit dem Öffnungswinkel 60°	41
Tabelle 2-7:	Darstellung der verschiedenen Untersuchungsmethoden zur Bewertung der Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit von konditionierten Böden	50
Tabelle 3-1:	Zusammenfassung der verwendeten Schaumproduktionsparameter.....	57
Tabelle 4-1:	Ergebnisse der Sensitivitätsstudie zur Ermittlung des maßgebenden Bodenparameters d (Korndurchmesser) mittels Bestimmtheitsmaß R^2 und Standardfehler s'	76
Tabelle 5-1:	Ermittelte Fließgrenzwerte für schaumkonditionierten Feinsand mit dem Bingham Modell, Herschel-Bulkley Modell und Yield-Stress Modell	84
Tabelle 5-2:	Gemittelter Fließkoeffizient k in Abhängigkeit von der FIR und dem Wassergehalt	95
Tabelle 5-3:	Ausgewählte Drehzahlen des Rheometers für die großskaligen rheologischen Untersuchungen in COSMA	101
Tabelle 5-4:	Ergebnisse der Analyse der großskaligen rheologischen Untersuchungen mit drei ausgewählten Boden-Schaum-Gemische	109
Tabelle 5-5:	Verhältnis zwischen der maximalen Korngröße der Probe und dem Kugeldurchmesser des Kugelhrometers in den durchgeführten Versuchen	112
Tabelle 6-1:	Darstellung der verwendeten Penetrationskörper inkl. Systemskizze und Abmessungen bzw. Gewicht.....	116
Tabelle 6-2:	Differenz der ermittelten Penetrationstiefen zwischen den Grenzwerten der Verarbeitbarkeit unter Variation des Penetrationsgewichts.....	121
Tabelle 6-3:	Versuchs-Setup des Penetrationstests für die Hauptuntersuchungen anhand des Vorversuchsprogramms.....	124
Tabelle 6-4:	Flüssigkeitsindex für schaumkonditionierten Sand ($w = 4 \text{ M.-%}$) mit den dazugehörigen mittleren Penetrationstiefen und Schauminjektionsraten	133
Tabelle 8-1:	Bewertungsmatrix der analysierten Versuchsmethoden zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit von konditionierten Böden	168

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent	HDF	High Density Foam
AG	Aktiengesellschaft	Hz	Herz
ASTM	American Society for Testing and Materials	i. d. R.	in der Regel
BMS	Ball Measuring System	inkl.	inklusive
BSG	Boden-Schaum-Gemisch	insb.	insbesondere
bspw.	beispielsweise	k. A.	keine Angabe
bzw.	beziehungsweise	kg	Kilogramm
ca.	circa	kPa	Kilopascal
CLB F5/TM	Produktname	l	Liter
cm	Zentimeter	lat.	Lateinisch
CM	Closed Mode	lb	Pfund
Co. KG	Compagnie Kommanditgesellschaft	M.-%	Masseprozent
CPT	Cone Penetration Test	m/s	Meter pro Sekunde
CSR	Conversion Shear Rate	m ²	Quadratmeter
CSS	Conversion Shear Strength	m ³ /min	Kubikmeter pro Minute
d	Durchmesser	m ³ /s	Kubikmeter pro Sekunde
d. h.	das heißt	MK	Modified Kovács
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V.	ml	Milliliter
DIN	Deutsches Institut für Normungen	mm	Millimeter
DT	Drainage Test	mS	Mittelsand
e. V.	eingetragener Verein	mSfs	feinsandiger Mittelsand
engl.	Englisch	Ncm	Newtonzentimeter
EPB	Earth Pressure Balance	OM	Open Mode
et al.	und andere	P1	Projektboden 1
Fa.	Firma	Pa	Pascal
FER	Foam Expansion Ratio	S	Sand
FI	Flüssigkeitsindex	S	Setzmaß
FIR	Foam Injection Rate	SCC	selbstverdichtender Beton
FR-SCC	Faserverstärkter selbstverdichtender Beton	SF	Setzfließmaß
fS	Feinsand	SFB	Sonderforschungsbereich
g	Gramm	Sfk	feinkiesiger Sand
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung	SIR	Slurry Injection Rate
gS	Grobsand	SLS	Flüssigkeitsschilde
gSms	mittelsandiger Grobsand	SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik	SWCC	Soil Water Characteristic Curve
		TBM	Tunnelbohrmaschine
		TM	Transition Mode
		TR	Trockenrückstand

u. a.	unter anderem	Vol.-%	Volumenprozent
U/min	Umdrehungen pro Minute	z. B.	zum Beispiel
USA	United States of America	z. Z.	zur Zeit
VFD	Variable Frequency Drive		
vgl.	vergleiche		

Formelzeichenverzeichnis

a	Fluidkonsistenzfaktor in $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$
A	Scherfläche in m^2
A	aktivierte Kegelfläche in m^2
A_S	Abbaufläche des Schilds in m^2
c	Fließkoeffizient in $\text{Pa} \cdot \text{s}$
c	Kegelkonstante
C_C	Krümmungszahl
c_f	Tensidkonzentration in M.-%
c_{susp}	Konzentration der Suspension in M.-%
C_{SS}	Umrechnungsfaktor Schubspannung [-]
C_U	Ungleichförmigkeitszahl
c_{urfc}	undrainierte Scherfestigkeit des aufbereiteten Bodens in kPa
d_1	Durchmesser der Probe in Längsrichtung in cm
d_2	Durchmesser der Probe in Querrichtung in cm
d_{10}	Korndurchmesser bei 10 M.-% Siebdurchgang in mm
d_{30}	Korndurchmesser bei 30 M.-% Siebdurchgang in mm
d_{50}	Korndurchmesser bei 50 M.-% Siebdurchgang in mm
d_{60}	Korndurchmesser bei 60 M.-% Siebdurchgang in mm
d_m	maßgebender Korndurchmesser in mm
d_i	repräsentativer Korndurchmesser für die Kornfraktion i in mm
F	Scherkraft in N
FER	Aufschäumrate (Foam Expansion Ratio)
$FER_{eff.}$	Effektive Aufschäumrate
FER_{ist}	Erzielte Aufschäumrate [-]
FI	Flüssigkeitsindex
FIR	Schauminjektionsrate (Foam Injection Ratio) in Vol.-%
g	Erdbeschleunigung $9,81 \text{ m/s}^2$
h	Abstand zwischen den Platten in m
h_{tool}	Penetrationstiefe des Abbauwerkzeugs in mm
i	Penetrationstiefe des Fallkegels in mm

m	Masse des Fallkegels in g
m	Faktor zur Steuerung bei niedrigen Scherraten in s
M	Drehmoment in μNm
M	Drehmoment des Kuglrheometers in Ncm
m_{Boden}	Masse des feuchten Bodens in g
m_{S}	Schaumzugabemenge in g
$m_{\text{S,dry}}$	Masse trockener Boden in g
m_{Schaum}	Zugabemenge des Schaums in g
m_{tot}	Penetrationsgewicht in g
m_{w}	Masse Zugabewasser in g
n	Porenanteil des Baugrunds
n	Drehzahl des Hydraulikaggregats in U/min
n	Drehzahl in 1/s
n	Anzahl der Messdaten
N	Drehzahl des Kuglrheometers in U/min
n_{p}	Porenanteil des Bodens im natürlichen Zustand [-]
p	Strömungsparameter
Q	Volumenstrom des Hydrauliköls in cm^3/min
q_0	Volumenstrom Porenwasser in m^3/s
Q_{Boden}	Bodenausbruchsvolumen in m^3/min
Q_{Boden}	Volumenstrom des Bodens in m^3/s
$Q_{\text{fein,susp}}$	Volumenstrom des Feinstoffanteils in m^3/s
Q_{Liquid}	Volumenstrom Liquid in m^3/s
Q_{Luft}	Volumenstrom Luft in m^3/s
Q_{Schaum}	Schaumvolumenstrom in l/min
Q_{susp}	Volumenstrom Feinstoffsuspension in m^3/s
Q_{Tensid}	Volumenstrom Tensid in m^3/s
s	Standardabweichung
S	Setzmaß in cm
s^2	Varianz
SF	Setzfließmaß in cm
SIR	Suspensionsinjektionsrate in Vol.-%

t_{inj}	Schauminjektionszeit in min
v	Schergeschwindigkeit in m/s
V_{dis}	verdrängtes Volumen in cm ³
V_g	Fördervolumen pro Umdrehung (1,5 cm ³ /U)
$v_{Vortrieb}$	Vortriebsgeschwindigkeit in m/s
w	Wassergehalt in M.-%
W	Gewichtskraft in N
w_{Rest}	Restporenwassergehalt in Vol.-%
$w_{Rest}(t)$	Restwassergehalt in Abhängigkeit von der Zeit in Vol.-%
$w_{rest,DT}$ oder SWCC	Minimalwert des Restwassergehalts aus Drainagetest oder SWCC in M.-%
w_{sat}	Wassergehalt des Bodens im wassergesättigten Zustand in M.-%
w_{Schaum}	Wassergehalt des Bodens in Schaumpenetrationszone in M.-%
X	Bodenparameter
$z_p(t)$	Schaumpenetration in Abhängigkeit von der Zeit in m
α	spezifischer Wasserabfluss durch Porenüberdruck
β	Öffnungswinkel des Fallkegels in °
β	Winkel des Kreissegments in °
$\dot{\gamma}$	Scherrate in 1/s
Δ	Messbereich für eine adäquate Verarbeitbarkeit
Δp	Differenzdruck in den Hydraulikschläuchen in bar
Δp_i	Prozentanteil der Kornfraktion i
η	Mechanischer Wirkungsgrad (0,9)
η	Viskosität in Pa·s
η_B	Bingham Fließkoeffizient in Pa·s
ξ	Relative Standardabweichung
ρ_{Boden}	Dichte des Bodens in g/cm ³
ρ_{Liquid}	Dichte des Liquids in g/cm ³
ρ_m	Dichte der Probe in g/cm ³
ρ_S	Dichte des Schaums in g/l
τ	Schubspannung in Pa
τ^*	Fließgrenze in Pa
$\tau_0(S)$	Setzmaßfließgrenze in Pa

$\tau_{0(BMS)}$	BMS-Fließgrenze in Pa
$\tau_{0(P)}$	Penetrationsfließgrenze in Pa
$\tau_{0(P),korrr.}$	Korrigierte Penetrationsfließgrenze in Pa
$\tau_{0(P),v}$	vorübergehende Penetrationsfließgrenze in Pa
τ_B	Bingham Fließgrenze in Pa
τ_{HB}	Herschel Bulkley Fließgrenze in Pa
\bar{x}	Mittelwert aller gemessenen Drehmomentwerte
x_i	einzelner gemessener Wert des Drehmoments

Kurzfassung

Beim Tunnelvortrieb mit einer Erddruckschildmaschine (EPB-Schild) ist eine adäquate Verarbeitbarkeit des Stützmediums für eine homogene Stützdruckübertragung erforderlich. Zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von konditionierten Böden existieren verschiedene nicht standardisierte und nicht genormte Prüfmethode, welche auf unterschiedlichen Versuchsprinzipien beruhen. Dies hat zur Folge, dass die Bodenconditionierung in der Praxis bislang auf Grundlage von Erfahrungswerten oder Indexversuchen erfolgt. Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Arbeit drei experimentelle Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Verarbeitbarkeit und des Fließverhaltens von Boden-Schaum-Gemischen vorgestellt und analysiert. Zu den analysierten Untersuchungsmethoden zählen zum einen der Slump Test und zum anderen das Kugelrheometer, welche bereits zur Untersuchung von Boden-Schaum-Gemischen verwendet wurden. Der in dieser Arbeit entwickelte kraftgesteuerte Penetrationsversuch stellt die dritte Prüfmethode dar.

Die erste vorgestellte Untersuchungsmethode ist der Slump Test, welcher als international weit verbreiteter Indexversuch zur Untersuchung der Verarbeitbarkeit von konditionierten Böden dient. Mit dem Slump Test lässt sich das Setzmaß, das Setzfließmaß und die rechnerische Setzmaßfließgrenze für unterschiedliche Boden-Schaum-Gemische ermitteln. Ergänzend zu den Laborversuchen wird mit Hilfe multipler Regressionsverfahren ein Prognosemodell für EPB-Vortriebe im geschlossenen Modus zur Abschätzung der erforderlichen Schauminjektionsrate unter Berücksichtigung des Wassergehalts und eines spezifischen Korndurchmessers entwickelt.

Die Ermittlung der rheologischen Stoffkennwerte von Boden-Schaum-Gemischen wird mit Hilfe der zweiten Untersuchungsmethode, dem Kugelrheometer, durchgeführt. Unter Anwendung des Herschel-Bulkley Modells können die rheologischen Parameter Fließgrenze und Fließkoeffizient identifiziert werden. Des Weiteren wird der Einsatz eines Kugelrheometers in der Abbaukammer anhand von großskaligen Laborversuchen untersucht. Die Auswertung der Versuche zeigt, dass durch weitere technische Optimierungen des Versuchsstands belastbare Aussagen über den Conditionierungsgrad von Boden-Schaum-Gemischen möglich sind.

Basierend auf Versuchsmethoden aus der Betontechnologie und der Geotechnik wird ein kraftgesteuerter Penetrationstest entwickelt und dessen Anwendbarkeit auf konditionierte Böden untersucht. Dieser Versuch stellt die dritte analysierte Untersuchungsmethode in dieser Arbeit dar und erweitert das Spektrum der für den EPB-Vortrieb relevanten Baugrundtypen. Unter Verwendung des kraftgesteuerten Penetrationstests sollen auch konditionierte kohäsive Böden sowie veränderliche Festgesteine hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit und

Eignung als Stützmedium untersucht werden können. Die Ergebnisse aus den Penetrationstests zeigen eine gute Korrelation zwischen den Konditionierungsparametern und der Penetrationstiefe, der Scherfestigkeit sowie der Penetrationsfließgrenze.

Abschließend werden die Ergebnisse aus den drei experimentellen Untersuchungsmethoden vergleichend analysiert und Empfehlungen hinsichtlich der Eignung bzw. der Anwendungsgrenzen der jeweiligen Methode gegeben. Das Prinzip der Kegelpenetration bietet die Möglichkeit, das Stützmedium in Laborversuchen und in der Abbaukammer mit Hilfe eines weggesteuerten Verfahrens zu untersuchen. Hierzu wird ein Konzept für die Konstruktion eines weggesteuerten Penetrationstests erarbeitet, der in der Fortsetzung der Forschung des Lehrstuhls für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb weiter verfolgt wird.

Abstract

When tunnelling with an earth pressure balance shield machine (EPB-shield), an adequate workability of the support-medium is necessary for a homogeneous support pressure transmission. For the investigation of the workability of conditioned soils different non-standardized test methods exist, which are based on different test principles. As a result, soil conditioning in practice has so far been based on empirical values or index tests. Therefore, three experimental test methods for determining the workability and the flow behaviour of soil-foam mixtures are presented and analysed in this thesis. Among the analysed investigation methods are the slump test and the rheometer with a ball measuring system, which have already been used to investigate soil-foam mixtures. The force-controlled penetration test developed in this thesis presents the third test method.

The first test method presented is the slump test, which is an internationally widely used index test to investigate the workability of conditioned soils. The slump test can be used to determine the slump, the slump flow and the calculated slump yield point for different soil-foam mixtures. In addition to the laboratory tests, a prognosis model for EPB tunnelling in closed mode is developed with the help of multiple regression methods to estimate the required foam injection rate, considering the water content and a specific grain diameter.

The determination of the rheological properties of soil-foam mixtures is carried out using the second investigation method, the rheometer with ball measuring system. By applying the Herschel-Bulkley model the rheological parameters yield point and viscosity parameter can be identified. Furthermore, the application of a ball measuring system in the excavation chamber is investigated by means of large-scale laboratory tests. The evaluation of the tests shows that further technical optimizations of the test apparatus allow reliable information about the state of conditioning of soil-foam-mixtures.

Based on test methods from concrete technology and geotechnics, a force-controlled penetration test is being developed and its applicability to conditioned soils is being investigated. This test represents the third analysed investigation method in this thesis and extends the spectrum of soil types relevant for EPB tunnelling. Using the force controlled penetration test, conditioned cohesive soils as well as variable solid rocks shall be investigated regarding their workability and suitability as support medium. The results of the penetration tests show a good correlation between the conditioning parameters and the penetration depth, the shear strength and the penetration yield point.

Finally, the results from the three experimental investigation methods are analysed comparatively and recommendations are given regarding the suitability or application limits of the respective method. The principle of cone penetration offers the possibility to investigate the

support medium in laboratory experiments and in the excavation chamber by means of a pathway-controlled method. For this purpose, a concept for the design of a pathway-controlled penetration test is developed, which will be further followed in the continuation of the research of the Institute for Tunnelling and Construction Management.
