

**Separationsfreier Mikrotunnelbau
durch Pumpförderung schaumkonditionierter Böden**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Jochen Vennekötter

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Rainhard Osebold
 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Karsten Körkemeyer

Tag der mündlichen Prüfung: 13.11.2012

Schriftenreihe des
Lehrstuhls für Baubetrieb und Projektmanagement
ibb - Institut für Baumaschinen und Baubetrieb

Jochen Vennekötter

**Separationsfreier Mikrotunnelbau durch
Pumpförderung schaumkonditionierter Böden**

Shaker Verlag
Aachen 2012

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2012)

Herausgeber:

Univ.-Professor Dr.-Ing. Rainard Osebold

für die Gesellschaft zur Förderung des Baubetriebs Aachen e.V.

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1532-4

ISSN 1612-2798

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Infolge einer zunehmenden Urbanisierung werden unterirdische Infrastrukturnetze in dicht besiedelten Gebieten weiter ausgebaut und erneuert. Dies führt zu einer steigenden Nachfrage nach Verfahrenstechniken des grabenlosen Leitungsbaus. Als Alternative zur offenen Bauweise bietet unter anderem die Verfahrenstechnik des Mikrotunnelbaus zahlreiche technische und wirtschaftliche Vorteile. Zur Abraumförderung des Bohrguts wird dabei im Mikrotunnelbau ab einem Rohrdurchmesser von ca. 1 m vorzugsweise ein hydraulischer Förderkreislauf eingesetzt. Die Separation von Bohrgut und Förderflüssigkeit ist allerdings kosten-, energie- und zeitintensiv. Außerdem wirken sich der große Platzbedarf einer Separationsanlage sowie die hohen Lärm- und Schmutzemissionen negativ aus.

An diesem Problempunkt setzt die Arbeit von Herrn Vennekötter an, mit dem Ziel für den Mikrotunnelbau ein neues verfahrenstechnisches Konzept zur separationsfreien Förderung des Bohrguts zu entwickeln und zu erproben. Basierend auf einer Analyse der Verfahrenstechnik und der im Mikrotunnelbau verwendeten Schildtypen wird eine alternative Bohrgutfördertechnik konzipiert. Diese kombiniert die separationsfreie Erd-druckschildtechnik mit einer Pumpförderung des Bohrguts. Die Pumpförderung in Rohrleitungen ist kontinuierlich und platzsparend. Die Förderleitung kann durch Koppeln der Leitungsrohre problemlos mit jedem neu zu verlegenden Vortriebsrohr verlängert werden. Entgegen bisheriger Anwendungen wird erstmals auch im Mikrotunnelbau das Bohrgut mit Schaum konditioniert. Durch den Einsatz von Schaum wird das Bohrgut nur für eine begrenzte Zeit in eine fließfähige Konsistenz überführt. Nach der Förderung zerfällt der Schaum und das Bohrgut erhält seine Ausgangskonsistenz zurück, so dass keine weiteren Separationsmaßnahmen erforderlich sind.

Die Umsetzbarkeit des neuen Verfahrenskonzepts wird durch ein analytisches Strömungsmodell nachgewiesen. Mithilfe dieses durch Versuche validierten Strömungsmodells und zusätzlicher im Rahmen dieser Arbeit entwickelter rheologischer Materialuntersuchungen können die technischen Grenzen der Anwendung, die Anforderungen an die baubetriebliche Umsetzung der neuen Verfahrenstechnik und der wirtschaftliche Nutzen für die Praxis ermittelt werden.

Neben der Innovation für den Mikrotunnelbau leistet die Forschungsarbeit von Herrn Vennekötter einen wesentlichen Wertbeitrag auf den Gebieten der Schaumkonditionierung bei Erddruckschilden, der Strömungsmechanik bei Dickstoffförderungen und der Ermittlung rheologischer Materialeigenschaften von feststoffreichen Suspensionen.

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Rainard Osebold

Meinen Eltern
und meiner Frau Vera

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Methodik	2
2	Separationsfreie Verfahrenstechnik für den Mikrotunnelbau	6
2.1	Verfahrenstechnik des Mikrotunnelbaus	6
2.2	Schildsysteme im Mikrotunnelbau	10
2.2.1	Flüssigkeitsschilde	13
2.2.1.1	Funktionsprinzip	13
2.2.1.2	Hydraulische Förderung und Separation	14
2.2.2	Erddruckschilde	16
2.2.2.1	Funktionsprinzip	16
2.2.2.2	Schneckenförderer	20
2.2.2.3	Bodenkonditionierung	21
2.2.3	Abgrenzung der Einsatzbereiche der Flüssigkeits- und Erddruckschilde	29
2.3	Entwicklung eines Konzepts zur separationsfreien Abraumförderung	32
2.3.1	Mechanische Förderung	33
2.3.2	Feststoffförderung durch Rohrleitungen	34
2.3.2.1	Pneumatische Förderung	34
2.3.2.2	Direkte Pumpförderung von Dickstoffen	37
2.3.3	Auswahl einer geeigneten Pumpentechnik	40
3	Schaum als Konditionierungsmittel	44
3.1	Theoretische Grundlagen der Schaumkonditionierung	45
3.1.1	Tenside zur Schaumherstellung	46
3.1.1.1	Verhalten an flüssig-gasförmigen Grenzflächen	47
3.1.1.2	Verhalten an flüssig-festen Grenzflächen	48
3.1.2	Herstellung und Umweltverträglichkeit von Tensiden	50
3.1.3	Schaumbildung und Zerfall	51

3.1.4 Technische Verfahren der Schaumherstellung	53
3.2 Experimentelle Untersuchung der Schaumherstellung	56
3.2.1 Versuchsanlage zur Schaumherstellung	56
3.2.2 Ermittlung der Betriebsparameter	58
3.2.3 Untersuchung des Schaumzerfalls	60
3.3 Versuche zur Konditionierung mit Tensidschaum	65
3.3.1 Untersuchungen zum Konditionierungsprozess	66
3.3.2 Bestimmung der Materialeigenschaften schaumkonditionierter Böden	77
3.3.2.1 Untersuchung der Konsistenz	77
3.3.2.2 Untersuchung der Dichte	83
3.3.2.3 Kompressionsverhalten	85
3.4 Zusammenfassung	90
4 Berechnung des Förderdrucks bei Rohrleitungsströmungen	92
4.1 Allgemeine Rohrströmungsmechanik	93
4.2 Förderdruckberechnung beim Pumpen von Beton	99
4.3 Analytisches Strömungsmodell für schaumkonditionierte Böden	104
4.3.1 Modellansatz für die Pumpförderung schaumkonditionierter Böden	104
4.3.2 Auswertung des Modellansatzes	107
5 Untersuchungen zur Rheologie schaumkonditionierter Böden	113
5.1 Rheometrische Messverfahren für Suspensionen	113
5.2 Entwicklung eines rheometrischen Messverfahrens für schaumkonditionierte Böden	115
5.2.1 Versuchsaufbau	117
5.2.2 Analyse des Strömungsfelds	120
5.3 Rheometrische Messung an schaumkonditionierten Böden	123
5.3.1 Versuchsdurchführung	123
5.3.2 Versuchsauswertung und -ergebnisse	123

6 Experimentelle Untersuchungen zur Pumpförderung schaumkonditionierter Böden	128
6.1 Versuchsaufbau	128
6.2 Versuchsprogramm	129
6.3 Versuchsauswertung	130
6.4 Versuchsergebnisse	132
6.4.1 Einfluss der Konditionierung	132
6.4.2 Einfluss der Fördergeschwindigkeit	137
6.4.3 Einfluss des Rohrdurchmessers	139
6.4.4 Einfluss des Rohrmaterials	141
6.4.5 Einfluss des Förderdrucks	143
6.5 Zusammenfassung	146
7 Baubetriebliche Umsetzung	148
7.1 Beurteilung der technischen Umsetzbarkeit	148
7.2 Wirtschaftliche Vergleichsbetrachtung	153
8 Zusammenfassung und Ausblick	161
9 Literatur- und Quellenverzeichnis	164
9.1 Allgemeine Literatur	164
9.2 Normen und Regelwerke	186

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Arbeitsprogramm der experimentellen und theoretischen Untersuchung	5
Abbildung 2-1:	Einteilung der Rohrvortriebsverfahren nach DWA-A 125	7
Abbildung 2-2:	Verfahrenstechnik des Mikrotunnelbaus	8
Abbildung 2-3:	Tunnelvortriebsmaschinen	11
Abbildung 2-4:	Berechnung der Ortsbruststabilität	12
Abbildung 2-5:	Flüssigkeitsgestützte Ortsbrust	13
Abbildung 2-6:	Erddruckgestützte Ortsbrust	17
Abbildung 2-7:	Aufbau eines Erddruckschildes	17
Abbildung 2-8:	Betriebsmodi von Erddruckschilden	19
Abbildung 2-9:	Austrag eines Erdbreis aus bindigem Bodenmaterial	24
Abbildung 2-10:	Konditionierungsmittel für Erddruckschilder	25
Abbildung 2-11:	Klassische Einsatzbereiche der Flüssigkeits- und Erddruckschilder	29
Abbildung 2-12:	Praxisbeispiele aktueller Anwendungen von Flüssigkeits- und Erddruckschilden	31
Abbildung 2-13:	Abraumförderung bei Flüssigkeits- und Erddruckschilden	32
Abbildung 2-14:	Prinzip einer Druckluft-Betonförderanlage	35
Abbildung 2-15:	Strömungszustände bei der pneumatischen Förderung	35
Abbildung 2-16:	Doppelkolbenpumpe mit einer Rohrweiche	40
Abbildung 3-1:	Molekularer Aufbau eines Tensidmoleküls (links), symbolische Darstellung (rechts)	46
Abbildung 3-2:	Unterschiedliche Ionenklassen und Kettenstrukturen von Tensiden	47
Abbildung 3-3:	Wässrige Tensidlösung	48
Abbildung 3-4:	Reaktionen an flüssig-festen Grenzflächen	49
Abbildung 3-5:	Schaumblasenbildung	51
Abbildung 3-6:	Kugelschaum (links), Polyederschaum mit Plateaubereich (rechts)	52
Abbildung 3-7:	Schaumgeneratoren zur Bodenconditionierung	54
Abbildung 3-8:	Aufbau der Schaumanlage	57
Abbildung 3-9:	Versuchsstand zur Schaumherstellung	57
Abbildung 3-10:	Leistungsbereich des Generators	59
Abbildung 3-11:	Schaumdichte in Abhängigkeit von der Schaumzusammensetzung	60
Abbildung 3-12:	Schaumzerfall bei unterschiedlichen FER Werten	61
Abbildung 3-13:	Schaumzerfall bei unterschiedlichen c_f Werten	62

Abbildung 3-14: Schaumzerfall unter Druck	64
Abbildung 3-15: Versuchsaufbau zur Bodenkonditionierung	68
Abbildung 3-16: Konsistenzbestimmung über das Setzmaß und das Setzfließmaß	68
Abbildung 3-17: Ausbreitkörper zur Konsistenzbestimmung zu unterschiedlichen Mischzeitpunkten	69
Abbildung 3-18: Qualitative Veränderung der Materialdichte und der Konsistenz	70
Abbildung 3-19: Konditionierungsprozess in 3 Phasen	71
Abbildung 3-20: Setzfließmaß in Abhängigkeit vom FIR Wert	74
Abbildung 3-21: Setzfließmaß in Abhängigkeit vom Tensidgehalt	75
Abbildung 3-22: Konsistenz in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche	79
Abbildung 3-23: Setzfließmaße des Sandbodens B	81
Abbildung 3-24: Kegelauslaufversuch	82
Abbildung 3-25: Kegelauslaufzeiten für die Sandböden A und B	82
Abbildung 3-26: Veränderung der Materialdichte	83
Abbildung 3-27: Abhängigkeit zwischen Dichte und Setzfließmaß	84
Abbildung 3-28: Einfluss von Volumenschwankungen auf den Stützdruck	85
Abbildung 3-29: Druckübertragung bei schaumkonditionierten Böden	86
Abbildung 3-30: Versuchsstand zum Kompressionsverhalten	88
Abbildung 3-31: Kompressionsverhalten schaumkonditionierter Böden	89
Abbildung 4-1: Gleichgewichtszustand bei einer laminaren, stationären Rohrströmung	94
Abbildung 4-2: Scherverhalten einer idealen Flüssigkeit im Plattenmodell	95
Abbildung 4-3: Fließkurven verschiedener Flüssigkeiten	96
Abbildung 4-4: Betonrohrströmung mit Gleitschicht	99
Abbildung 4-5: Nomogramm zur Berechnung des Druckbedarfs bei Normalbetonförderung	101
Abbildung 4-6: Geschwindigkeitsverteilung verschiedener Rohrleitungsströmungen	104
Abbildung 4-7: Versuchsstand der experimentellen Modellpumpversuche	105
Abbildung 4-8: Messrohr zur Visualisierung der Strömungsfront	106
Abbildung 4-9: Visualisierte Strömungsfronten (v.l.n.r. steife, fließfähige, sehr fließfähige Konsistenz)	107
Abbildung 4-10: Scherspannungs- und Geschwindigkeitsverteilung in der Rohrleitung	109
Abbildung 5-1: Rotationsviskosimeter mit koaxialen Zylindern	113
Abbildung 5-2: Betonrheometer	116
Abbildung 5-3: Rotationsviskosimeter mit Flügelsonde	117

Abbildung 5-4:	Viskomat NT mit Mörtelpaddel (a), großes Leimpaddel (b), kleines Leimpaddel (c)	118
Abbildung 5-5:	Viskomat NT mit den Abmessungen der Flügelsonde	118
Abbildung 5-6:	Geschwindigkeitsprofil (links) und äquivalente Fließkurve (rechts)	119
Abbildung 5-7:	Messergebnis einer rheologischen Untersuchung	124
Abbildung 5-8:	Fließgrenzen für Sandboden A bei unterschiedlichen Konditionierungsparametern	125
Abbildung 5-9:	Viskositäten für Sandboden A bei unterschiedlichen Konditionierungsparametern	125
Abbildung 6-1:	Versuchsaufbau zur experimentellen Pumpförderung	128
Abbildung 6-2:	Datenauswertung der Modellpumpversuche	131
Abbildung 6-3:	Einfluss der Konditionierung auf die Pumpfähigkeit	133
Abbildung 6-4:	Druckgradienten bei unterschiedlicher Konditionierung des Sandbodens A	135
Abbildung 6-5:	Druckgradienten bei unterschiedlicher Konditionierung des Sandbodens B	137
Abbildung 6-6:	Ergebnisse der Pumpförderung bei reduzierter Fördergeschwindigkeit	137
Abbildung 6-7:	Druckgradienten bei reduzierter Fördergeschwindigkeit	138
Abbildung 6-8:	Ergebnisse der Pumpförderung bei reduziertem Rohrdurchmesser	140
Abbildung 6-9:	Druckgradienten bei reduziertem Rohrdurchmesser	140
Abbildung 6-10:	Ergebnisse der Pumpförderung bei Verwendung von Kunststoffrohren	141
Abbildung 6-11:	Druckgradienten bei Verwendung von Kunststoffrohren	142
Abbildung 6-12:	Versuchsaufbau zur Pumpförderung gegen einen zusätzlichen Luftgedruck	144
Abbildung 6-13:	Ergebnisse der Pumpförderung gegen einen zusätzlichen Luftgedruck	144
Abbildung 6-14:	Druckgradienten bei einem zusätzlichen Gegendruck (LIR: 2,73 %)	145
Abbildung 7-1:	Dimensionierung einer Dickstoffpumpe	151
Abbildung 7-2:	Mikrotunnelmaschine mit Doppelwellenmischer und Dickstoffpumpe	152
Abbildung 7-3:	Gerätekosten bei einer hydraulischen Förderung	159
Abbildung 7-4:	Gerätekosten bei einer Pumpförderung schaumkonditionierter Böden	160
Abbildung 9-1:	Sieblinie des Sandbodens A	188
Abbildung 9-2:	Sieblinie des Sandbodens B	188
Abbildung 9-3:	Proctorversuch des Sandbodens A	189
Abbildung 9-4:	Proctorversuch des Sandbodens B	189

Abbildung 9-5:	Fließgrenzen für Sandboden B bei unterschiedlichen Konditionierungsparametern	190
Abbildung 9-6:	Viskositäten für Sandboden B bei unterschiedlichen Konditionierungsparametern	190

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Direkte und indirekte Kosteneinsparungen beim Mikrotunnelbau	9
Tabelle 3-1: Spezifische Oberfläche der Versuchsböden	78
Tabelle 4-1: Rheologische Modelle	96
Tabelle 5-1: Rheologische Materialeigenschaften mineralischer Suspensionen	126
Tabelle 6-1: Randbedingungen der Modellpumpversuche	129
Tabelle 7-1: Vorhaltekosten bei einer hydraulischen Förderung	156
Tabelle 7-2: Vorhaltekosten bei einer Pumpförderung schaumkonditionierter Böden	157
Tabelle 7-3: Betriebsstoffkosten	158

Abkürzungsverzeichnis

a	[N/m ²]	Kennwert für die Fließgrenze
A	[m ²]	Fläche
b	[N s/m ³]	Kennwert für die Viskosität
BGL		Baugeräteliste
c_f	[%]	Tensidkonzentration
C	[-]	Integrationskonstante
C_η	[mm m ² min/s]	Umrechnungsfaktor für die Viskosität
C_τ	[mm m ²]	Umrechnungsfaktor für die Fließgrenze
dv	[m/s]	Änderung der Geschwindigkeit
dy	[m]	Änderung der Schichtdicke
D	[m]	Leitungsdurchmesser
D_{Rohr}	[m]	Durchmesser der Rohrleitung
D_{VM}	[m]	Ausbruchsdurchmesser der Vortriebsmaschine
DN	[mm]	Nenndurchmesser
DWA		Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
DWA-A		Arbeitsblatt der DWA
δ	[kg/m ³]	Dichte
Δh	[m]	Förderhöhe
Δp	[m]	Druckdifferenz
EFNARC		European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete
F	[N]	Kraft
FER	[-]	Foam Expansion Ratio
FIR	[%]	Foam Injektion Ratio
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
g	[N mm]	äquivalente Fließgrenze
$\dot{\gamma}$	[1/s]	Schergeschwindigkeit
h	[N mm min]	äquivalente Viskosität
h_a	[mm]	Höhe der Flügelsonde

h_b	[mm]	Abstand zwischen Flügelsonde und Vorlagebehälter
η	[N s/m ²]	dynamische Viskosität
l_c	[-]	Konsistenzzahl
l_p	[%]	Plastizitätszahl
k_f	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
k	[N s/m ²]	Viskositätsfaktor bei nicht linearen rheologischen Modellen
l	[m]	Leitungslänge
LIR	[%]	Liquid Injektion Ratio
m_{Liquid}	[kg]	Masse Liquid
m_{Tensid}	[kg]	Masse Tensid
n	[-]	Fließindex bei nicht linearen rheologischen Modellen
N	[1/min]	Drehgeschwindigkeit
o. J.		ohne Jahr
o. V.		ohne Verfasser
p	[N/m ²]	Druck
p_1	[bar]	gemessener Förderdruck
p_{erfd}	[bar]	erforderlicher Förderdruck
P_{soll}	[bar]	vorgegebener Stützdruck
Q	[m ³ /s]	Förderleistung
Q_{erfd}	[m ³ /h]	erforderliche Förderleistung
r, R	[m]	Radius
r_0	[m]	Grenzradius
R_b	[mm]	Radius der Flügelsonde
R_c	[mm]	Radius des Vorlagebehälters
s	[m]	Kolbenhub
t_1	[s]	Zeitpunkt während der Messung
t_m	[min]	Mischzeit
T	[N mm]	Drehmoment
T_{Cou}	[N mm]	Drehmoment infolge der Couette-Strömung
T_{KK}	[N mm]	Drehmoment infolge einer Kreisscheiben-Strömung
τ	[N/m ²]	Scherspannung
τ_0	[N/m ²]	Fließgrenze

τ_R	[N/m ²]	Randspannung
v	[m/s]	Fördergeschwindigkeit
\bar{v}	[m/s]	mittlere Fördergeschwindigkeit
\bar{v}_{Rohr}	[m/s]	durchschnittliche Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrleitung
\bar{v}_{VM}	[m/min]	durchschnittliche Geschwindigkeit der Vortriebsmaschine
V_{Boden}	[m ³]	Bodenvolumen
V_{Liquid}	[m ³]	Liquidvolumen
V_{Luft}	[m ³]	Luftvolumen unter atmosphärischen Bedingungen
V_{Schaum}	[m ³]	Schaumvolumen
\dot{V}_{theor}	[m ³ /h]	theoretischer Volumenstrom
w	[%]	Wassergehalt
ω	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit