

**Entwicklung von selbstverdichtenden Betonen mit hoher
Grünstandfestigkeit für den Einsatz in
Gleitschalungsfertigern im Betonstraßenbau**

von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Ruhr-Universität Bochum zur Erlangung
des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

von

Diego Sarmiento

Bochum, im Juni 2011

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

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

Heft 2012-5

Diego Sarmiento

**Entwicklung von selbstverdichtenden Betonen
mit hoher Grünstandfestigkeit für den Einsatz in
Gleitschalungsfertigern im Betonstraßenbau**

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.: Bochum, Univ., Diss., 2011

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 978-3-8440-1263-7

ISSN 1614-4384

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

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum. Mit der Fertigstellung dieser Dissertation schließt sich eine Etappe in meinem Leben. Hiermit möchte ich ganz besonders meinen Eltern Alicia und Omar danken, die mir nicht nur das Leben geschenkt, sondern auch meine persönliche Entwicklung und Talente immer wieder gefördert und unterstützt haben.

Ein besonderes Anliegen ist es mir, Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher zu danken, der mir nicht nur die Gelegenheit zur Promotion an seinem Lehrstuhl gegeben hat, sondern mich auch Teil einer Gemeinschaft werden ließ, in der ich mich sehr wohl fühlte.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gehlen möchte ich mich für die freundliche Übernahme des Koreferates bedanken.

Ich möchte mich ebenso sehr herzlich bei Herrn Dr.-Ing. Hussein Alawieh bedanken, der mich nicht nur fachlich unterstützt hat, sondern auch für sein Vertrauen, dass er vom ersten Tag an in mich gesetzt hat.

Auch möchte ich meinen Kollegen des Lehrstuhls für Baustofftechnik meinen Dank für ihre zuverlässige Mitarbeit und Hilfe aussprechen. Dazu gehören Herr Dr.-Ing. Hursit Ibuk und Herr Dr.-Ing. Björn Siebert, die für wissenschaftliche Diskussionen immer ein offenes Ohr hatten, ebenso Frau Dipl.-Ing. Andrea Lutter, Herr Dipl.-Ing. Joose Penttilae und Herrn cand. Ing. Stefan Hendricks für ihre Hilfe bei der Korrektur des Manuskriptes. Für Ihre Unterstützung bei den Verwaltungsverfahren während meiner Promotionszeit möchte ich mich bei Frau Marita Fritsche-Kühnemuth herzlich bedanken.

Auch danke ich den Baustoffprüfern der Konstruktionsteilprüfung, die mich stets unterstützt haben. Ganz besonderen Dank gilt Herrn Ruben Sewald, Herrn Thomas Behrendt und Frau Katrin Müller, ohne deren Arbeit keine Promotion durchführbar gewesen wäre.

Diese Arbeit wäre ohne die große Unterstützung der Research School nicht möglich gewesen, weswegen ich mich ganz ausdrücklich bei Frau Dr. Ursula Justus und Frau Maria Sprung, die mir stets freundlich mit Rat und Tat zur Seite standen, bedanken möchte.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur.....IX

1. Einleitung 1

 1.1 Problemstellung 1

 1.2 Zielsetzung..... 2

 1.3 Vorgehensweise..... 3

2. Stand der Erkenntnisse 5

 2.1 Stand der Technik im Betonstraßenbau 5

 2.2 Technologie des selbstverdichtenden Betons..... 9

 2.2.1 Allgemeines 9

 2.2.2 Konzept für die Herstellung eines SVBs: Okamura-Verfahren11

 2.2.3 Frischbetoneigenschaften von selbstverdichtendem Beton15

 2.2.4 Festbetoneigenschaften: SVB gegenüber konventionellem Beton.....20

 2.3 Rheologie.....21

 2.3.1 Allgemeines21

 2.3.2 Lineares Fließverhalten.....23

 2.3.3 Nichtlineares Fließverhalten24

 2.3.3.1 Geschwindigkeitsabhängige Erscheinungsformen.....24

 2.3.3.2 Zeitabhängige Erscheinungsformen25

 2.4 Fließverhalten von Bindemittelleimen bzw. Betonen.....29

 2.4.1 Allgemeines29

 2.4.2 Fließgrenze und Viskosität30

 2.4.2.1 Thixotropie in zementösen Suspensionen35

 2.4.2.2 Interpartikuläre Wechselwirkungen im Frischbeton37

 2.4.3 Modelle für die Beschreibung des Fließverhaltens von Beton43

 2.5 Packungsdichte.....45

 2.6 Grünstandfestigkeit46

 2.7 Hydratation.....47

2.7.1	Ablauf der Hydratation.....	47
2.7.2	Thixotropie infolge Hydratation.....	49
2.8	Beanspruchung des grünstandfesten Betons beim Betonstraßenbau	50
2.8.1	Allgemeines	50
2.8.2	Äußere Reibung: Haft- und Bewegungsreibung	51
2.8.3	Innere Reibung.....	52
2.8.4	Interaktion Beton-Schalung.....	52
3.	Übersicht über das Versuchsprogramm	55
3.1	Allgemeines.....	55
3.2	Methodik	55
3.3	Charakterisierung der verwendeten Ausgangsstoffe	57
3.3.1	Allgemeines	57
3.3.2	Zement.....	57
3.3.3	Betonzusatzstoffe.....	57
3.3.4	Betonzusatzmittel.....	58
3.3.5	Gesteinskörnung.....	61
4.	Basisuntersuchungen an Bindemittelleimen	62
4.1	Bestimmung des Wasseranspruchs der Bindemittelleime	62
4.2	Kombinierte Fließ- und thixotrope Eigenschaften der Bindemittelleime	62
4.3	Rheologische Untersuchungen im Rotationsviskosimeter	64
5.	Ergebnisse der Basisuntersuchungen an den Bindemittelleimen.....	67
5.1	Auswirkungen einzelner Zusätze.....	67
5.1.1	Bestimmung des Wasseranspruchs	67
5.1.2	Wassergehalt	67
5.1.3	Fließmittel	68
5.1.4	Zementart.....	70
5.1.5	Betonzusatzstoffe.....	72
5.1.6	Thixotropierende Zusätze.....	74
5.1.7	Thixotropiermittel.....	76
5.1.8	Gesamtbetrachtung und Diskussion.....	78

5.2	Auswirkungen von Kombinationen zweckmäßiger Zusätze	82
5.2.1	Gruppe T2 und Gruppe T3	82
5.2.2	Gruppe T2	84
5.2.2.1	Untersuchung der rheologischen Parameter im Viskosimeter	84
5.2.2.2	Untersuchung der Fließfähigkeit	84
5.2.2.3	Untersuchung der thixotropen Eigenschaften anhand der Formstabilität	87
5.2.2.4	Gesamtbetrachtung und Diskussion - Bindemittelleime der Gruppe T2	88
5.2.3	Gruppe T3	91
5.2.3.1	Untersuchung der rheologischen Parameter im Viskosimeter	91
5.2.3.2	Untersuchung der thixotropen Eigenschaften im Viskosimeter	95
5.2.3.3	Untersuchung der Fließfähigkeit	98
5.2.3.4	Untersuchung der thixotropen Eigenschaften anhand der Formstabilität	100
5.2.3.5	Gesamtbetrachtung und Diskussion. Bindemittelleime der Gruppe T3	102
5.3	Zusammenfassung	105
6.	Untersuchungen an thixotrop eingestellten SVB	107
6.1	Allgemeines	107
6.2	Entwicklung der Matrix (Mörtel) für einen SVB	107
6.2.1	Setzfließmaß und Formstabilität	107
6.2.2	Grünstandfestigkeit	107
6.3	Entwicklung eines SVBs	109
6.3.1	Basisuntersuchungen am SVB	109
6.3.2	Hauptuntersuchungen	110
6.3.2.1	Allgemeines	110
6.3.2.2	Frischbetonuntersuchungen	110
6.3.2.2.1	Setzfließmaß und Formstabilität	110
6.3.2.2.2	Trichterauslaufzeit	111
6.3.2.2.3	Frischbetonrohddichte und Luftgehalt	111
6.3.2.2.4	Grünstandfestigkeit	111
6.3.2.2.5	Beurteilung der Formstabilität anhand eines Mini-Pavers	111
6.3.2.3	Festbetonuntersuchungen	113

6.3.2.3.1	Druckfestigkeit	113
6.3.2.3.2	Biegezugfestigkeit.....	113
6.3.2.3.3	Frost-Taumittel Widerstand (CDF-Test)	113
7.	Ergebnisse der Untersuchungen an thixotrop eingestellten SVBs	114
7.1	Ermittlung des Mindestwassergehaltes β_p	114
7.2	Entwicklung der Matrix (Mörtel) für einen SVB	115
7.2.1	Ausgangsuntersuchungen.....	115
7.2.2	Optimierung der Matrix.....	117
7.3	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Betonverhalten	124
7.3.1	Basisuntersuchungen.....	124
7.3.1.1	Wassorzementwert.....	124
7.3.1.2	Fließmittelgehalt	126
7.3.1.3	Thixotropierende Zusätze	127
7.3.2	Hauptuntersuchungen: Auswirkungen von Kombinationen zweckmäßiger Zusätze.....	128
7.3.2.1	Ausgangsmischungen	128
7.3.2.2	Frischbetonrohddichte und Luftgehalt.....	129
7.3.2.3	Gesamtbetrachtung des Setzfließmaßes und der Formstabilität	131
7.3.2.4	Trichterauslaufzeiten	133
7.3.2.5	Grünstandfestigkeit.....	134
7.3.2.6	Druckfestigkeit	135
7.3.2.7	Biegezugfestigkeit.....	136
7.3.2.8	Bestimmung des Frost-Taumittel-Widerstands (CDF-Test).....	137
7.3.2.8.1	Abwitterung.....	137
7.3.2.8.2	Relative Feuchteaufnahme und relativer dynamischer E-Modul.....	139
7.4	Optimierung der thixotrop eingestellten Betone	141
7.4.1	Optimierung der Eigenschaften des Betons M-2	141
7.4.2	Optimierung der Eigenschaften des Betons M-10	143
7.4.3	Übertragbarkeit auf Betone mit Zement CEM I 42,5 R.....	146
7.4.3.1	Setzfließmaß und Formstabilität	146

7.4.3.2	Entwicklung der Grünstandfestigkeit.....	150
7.4.3.3	Anforderungen an SVBs und Betone für Fahrbahndecken.....	152
8.	Zusammenführende Diskussion	154
9.	Zusammenfassung.....	165
10.	Literaturverzeichnis.....	170
11.	Normative Verweise.....	180
	Anhänge.....	182

Nomenklatur

Abkürzungen und Symbole

SVB	selbstverdichtender Beton
sm	Setzfließmaß
K_i	Formstabilitätskoeffizient
Gfk	Grünstandfestigkeit
T_i	Thixotropiezahl
SF_i	Setzfließmaßklasse
τ_0	dynamische Fließgrenze
τ_{0R}	statische Fließgrenze
$\eta`$	dynamische Viskosität
η_B	plastische Viskosität
η_r	relative Viskosität
η_F	Viskosität der flüssigen Phase
ρ	dichte
β_p -Wert	Wasserrückhaltemaß
V_w/V_p	Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnissen
Γ_i	relative Setzfließfläche
E_p	Deformationsfaktor
E-Modul	Elastizitätsmodul
τ	Schubspannung
F	Scherkraft
A	Scherfläche
$\dot{\gamma}$	Schergeschwindigkeit
v	Geschwindigkeit
λ_i	Schubspannung (Cross / Ellis)
H	Plattenabstand
t_r	Ruhezeit
A_{thix}	Flockungskoeffizient
σ	Normalspannung

Nomenklatur

φ	Innerer Reibungswinkel
C	Kohäsion
σ_n	Druckspannung normal zur betrachteten Ebene
φ_m	mittlere Winkel der inneren Reibung
n.F _w	Anteil der Adhäsionskräfte bei n Partikeln je Scherfläche
ϕ	Feststoffkonzentration
ϕ_{max}	maximale Feststoffkonzentration
R ²	Bestimmtheitsmaß
DLVO	Derjaugin-Landau-Verwey-Overbeek Theorie
E _{tot}	Gesamtenergie
E _A	anziehende Energie, Van-der-Waals-Energie
E _R	abstoßende Energie
E _B	Energie-Barriere
E _S	sterische Abstoßung
H	Hamaker-Konstante
D	Abstand zwischen den Partikeloberflächen
a_0	Partikelradius
$\epsilon_0 \cdot \epsilon_R$	Permittivität
ψ_0	Oberflächenpotential
Q	Quarzmehl
M	Metakaolin
K	Kalksteinmehl
FM	Fließmittel
PCE	Polycarboxylatether
LP	Luftporenbildner
SK	Schichtsilikate
ST	Stabilisierer
T	Thixotropiermittel
CDF-Test	Capillary Suction, De-icing agent and Freeze-thaw Test
FTW	Frost-Tau-Wechsel