

Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton

Ein wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung der Einwirkungen auf Schalung und Rüstung

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Tilo Proske

aus
Cottbus/Brandenburg

Darmstadt 2007

D 17

Dr.-Ing. Tilo Proske

Geboren am 23.07.1973 in Cottbus/Brandenburg. Von 1992 bis 1998 Studium des Bauingenieurwesens an der Bauhaus-Universität Weimar. Von 1999 bis 2001 Tragwerksplanung, Bauüberwachung bei ISP Scholz Beratende Ingenieure AG in München. Von 2001 bis 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Seit 2007 freier Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2001 bis 2006 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich sehr herzlich für seine Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans-Wolf Reinhardt danke ich sehr für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferates.

Für die kritische Durchsicht der Arbeit danke ich Herrn Dr.-Ing. Holger Schmidt und Ing. Gerhard Proske.

Meinen Kollegen sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich für die angenehme Zeit am Institut für Massivbau. Ein sehr herzlicher Dank für die fruchtbaren wissenschaftlichen Diskussionen gilt Dipl.-Ing. Simon Glowienka und Dipl.-Ing. Guido Hausmann. Ebenso danke ich allen beteiligten Mitarbeitern der Versuchshalle, wissenschaftlichen Hilfskräften und Diplomanden und hierbei insbesondere Dipl.-Ing. Peter Ramge und Dipl.-Ing. Oliver Obst.

Für die angenehme Zusammenarbeit möchte ich auch Herrn Dipl.-Ing. Helmut Schuon und Dr.-Ing. Olaf Leitzbach von der Meva Schalungssysteme GmbH danken.

Des Weiteren danke ich meinen Freunden für die motivierende Unterstützung, insbesondere Dr.-Ing. Lilian Höfflin, ebenso Dipl.-Ing. Stefan Proske.

Meinen Eltern Susanne und Gerhard Proske bin ich für die fortwährende liebevolle Unterstützung sehr dankbar.

Ein besonderer Dank gilt meiner Großmutter Ella Proske.

Darmstadt, Mai 2007

Tilo Proske

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h.
Hans-Wolf Reinhardt

Tag der Einreichung: 15.12.2006

Tag der mündlichen Prüfung: 25.05.2007

ABSTRACT

Formwork Pressure using Self-Compacting Concrete

The thesis deals with experimental studies and modelling regarding the lateral concrete pressure on vertical formwork exerted by Self-Compacting-Concrete (SCC).

In the last 10 years the application of High-Workability-Concretes including SCC has increased significantly. SCC can be placed from below by pumping or from above. Designing the formwork the lateral concrete pressure is of high importance. The formwork has to stabilize the concrete from the start of casting until the self-stabilisation of the concrete which is normally reached at the final setting time. The final setting time can be measured with the Vicat-Penetration-Test according to DIN EN 480-2. In this state the concrete has a compressive strength higher than 1,0 N/mm².

A number of parameters influence the lateral formwork pressure. Beside the setting behaviour the velocity of placing (rising), the total filling height, the consistency, the concrete density, the geometry of the formwork and the compaction technique have to be mentioned.

Systematic measurements on slender columns showed that the time dependent behaviour of SCC in combination with the friction between the fresh concrete and the formwork surface as well as the friction between the concrete and the reinforcement bars influence the lateral pressure on the formwork. Therefore an appropriate proposal for the calculation of the pressure on formwork was developed based on the Silo-Theory of Janssen. In the model the time-dependent properties of the SCC can be considered.

The required time-dependent model parameters were determined in extensive experimental tests. An extra designed testing machine allowed the determination of the friction between the fresh concrete and the formwork surface as well as the friction between the fresh concrete and the reinforcement. Further the placing process was simulated and the ratio between the lateral pressure and the exerted vertical pressure determined. The influences of the mixture design as well as external impacts and the formwork deformation on the model parameters were investigated.

It was pointed out that the development of the material parameters is first of all influenced by the time after placing and the final setting time of the concrete. Further a significant influence of frequent shock and vibration, reinforcement and formwork deformation on the model parameters was found. On the base of the test results practicable analytical relations for the parameters friction and pressure ratio of SCC were developed.

The validity of the analytical model was verified analysing published pressure measurements on slender concrete elements. Further on Finite-Element-Method calculations pointed out the suitability of the analytical model. Also recommendations for the calculation of inclined formwork were given.

For the calculation in practice several pressure distributions over the height of the formwork were developed. Further on partial safety factors for the design of the formwork were calibrated.

INHALTSVERZEICHNIS

SYMBOLE, ABKÜRZUNGEN UND BEGRIFFE	VII
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Prinzipielle Vorgehensweise.....	2
2 STAND DER TECHNIK	5
2.1 Einführung.....	5
2.2 Normen und Regelwerke zur Berechnung des Frischbetondrucks.....	7
2.3 Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton	10
2.3.1 Einführung.....	10
2.3.2 Rheologische Eigenschaften	11
2.3.3 Blockierverhalten	18
2.3.4 Gefügestabilität	20
2.3.5 Entlüftungsverhalten	24
2.3.6 Konsistenzhaltung/Robustheit.....	25
2.3.7 Einfluss der Ausgangsstoffe auf die Frischbetoneigenschaften von SVB	27
2.3.8 Interpartikulare Wechselwirkungen im Frischbeton	35
2.3.9 Ansteifen und Erstarren von Frischbeton.....	38
2.3.10 Mischungskonzepte für Selbstverdichtenden Beton	45
2.4 Reibungsverhalten von Frischbeton.....	47
2.4.1 Allgemeines.....	47
2.4.2 Haft- und Gleitreibung an Gleitflächen.....	48
2.4.3 Kohäsion.....	49
2.4.4 Geschmierte Gleitflächen.....	49
2.4.5 Reibung zwischen Beton und Schalung sowie Beton und Bewehrung.....	50
2.4.6 Innere Reibung von Frischbeton	53
2.5 Baubetriebliche Aspekte.....	57
2.5.1 Typisierung der Betonschalungen.....	57
2.5.2 Schalhaut	57
2.5.3 Betontrennmittel.....	58
2.5.4 Einbau von fließfähigem Beton.....	58
2.5.5 Wirtschaftliche Auswirkungen des Frischbetondrucks.....	59

2.6	Modellvorstellungen und Berechnungskonzepte zur Bestimmung des Frischbetondrucks sowie normative Umsetzung	60
2.6.1	Allgemeines.....	60
2.6.2	Hydrostatischer Ansatz.....	63
2.6.3	Bodenmechanische Ansätze bei konstantem Materialverhalten	64
2.6.4	Bodenmechanische Ansätze bei zeitlich veränderlichem Materialverhalten .	68
2.6.5	Ansatz nach der Silotheorie bei konstantem Materialverhalten.....	73
2.6.6	Ansatz nach der Silotheorie unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Reibung über rheologische Kennwerte	75
2.6.7	Rheologische Ansätze	77
2.6.8	Berechnung des Frischbetondrucks über den Wasserverbrauch infolge Hydratation und über die Permeabilität des Frischbetons.....	77
2.6.9	Empirisch abgeleitete Ansätze	80
2.6.10	Vergleich verschiedener Berechnungsansätze zur Bestimmung des maximalen Frischbetondrucks.....	82
2.6.11	Druckverlauf über die Schalungshöhe	83
2.7	Untersuchungen zum Frischbetondruck bei Verwendung von Selbstverdichtendem Beton.....	85
2.7.1	Einführung.....	85
2.7.2	Verfahren zur Messung des Frischbetondrucks	85
2.7.3	Betoniergeschwindigkeit.....	86
2.7.4	Erstarrungszeiten.....	88
2.7.5	Betonzusatzstoffe und Betonzusatzmittel	89
2.7.6	Gesteinskörnungen	90
2.7.7	Rheologische Eigenschaften bzw. Frischbetonkonsistenz	90
2.7.8	Gefügestabilität	91
2.7.9	Permeabilität.....	91
2.7.10	Schalungsoberfläche.....	92
2.7.11	Einbauprozess.....	92
2.7.12	Eignung vorhandener Modelle zur Berechnung des Frischbetondrucks bei Selbstverdichtendem Beton.....	93
2.8	Zusammenfassung.....	94

3	EXPERIMENTELLE BESTIMMUNG DES FRISCHBETONDRUCKS AN STÜTZEN UND WÄNDEN.....	95
3.1	Einführung.....	95
3.2	Frischbetondruck an schlanken Stützen.....	95
3.2.1	Allgemeines.....	95
3.2.2	Geometrie, Schalung und Bewehrung.....	96
3.2.3	Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung	97
3.2.4	Versuchsprogramm	98
3.2.5	Verwendete Betone	99
3.2.6	Auswertung und Darstellung der Ergebnisse.....	101
3.3	Frischbetondruck an hohen Wänden.....	105
3.3.1	Einführung.....	105
3.3.2	Bauvorhaben Steinbruch Seebach.....	105
3.3.3	Bauvorhaben Pflegeheim Rheinstetten	111
3.4	Zusammenfassung.....	115
4	THEORETISCHE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN DER RELEVANTEN MATERIALKENNGRÖSSEN VON SVB.....	117
4.1	Einführung.....	117
4.2	Entwicklung einer Versuchsapparatur zur Bestimmung des Seitendruckbeiwertes und des Reibungswiderstandes	120
4.2.1	Allgemeines.....	120
4.2.2	Aufbau der Versuchsapparatur.....	121
4.2.3	Simulation einer geringeren Schalungssteifigkeit bzw. eines Schalungsversagens.....	126
4.2.4	Simulation einer Bewehrung.....	126
4.2.5	Simulation von Erschütterungen	127
4.2.6	Messung der horizontalen Schalungsverformungen	128
4.2.7	Schalungsoberflächen und Trennmittel am Schalungsschwert.....	128
4.2.8	Kalibrierung und Vorversuche	129
4.3	Versuchsprogramm zur Ermittlung des Seitendruckbeiwertes und des Reibungswiderstandes	133
4.3.1	Generelles Versuchsprogramm	133
4.3.2	Versuchsablauf/Versuchsdurchführung	136
4.3.3	Verwendete Betone	142
4.3.4	Versuchsumfang.....	144
4.3.5	Frischbetoneigenschaften und Erstarrungszeiten	144

4.4	Ergebnisse der Versuche zum Seitendruckbeiwert	148
4.4.1	Allgemeines.....	148
4.4.2	Einfluss der Mischungsrezeptur (Versuchsgruppe 4-1)	152
4.4.3	Von der Mischungsrezeptur unabhängige Einflüsse (Versuchsgruppe 4-2)	161
4.4.4	Bauteilbeton (Versuchsgruppe 4-3).....	172
4.4.5	Abschätzung des Winkels der inneren Reibung des Frischbetons	173
4.4.6	Statistische Auswertung	178
4.4.7	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zum Seitendruckbeiwert	182
4.5	Ergebnisse der Versuche zum Reibungsverhalten.....	183
4.5.1	Vorgehen zur Ergebnisanalyse.....	183
4.5.2	Ergebnisüberblick.....	184
4.5.3	Einfluss der Mischungsrezeptur (Versuchsgruppe 4-1)	186
4.5.4	Von der Mischungsrezeptur unabhängige Einflüsse (Versuchsgruppe 4-2)	189
4.5.5	Bauteilbeton (Versuchsgruppe 4-3).....	198
4.5.6	Statistische Auswertung	200
4.5.7	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zur Reibung	201
4.6	Zusätzliche Untersuchungen zur zielsicheren Quantifizierung des Ansteif- und Erstarrungsverhaltens.....	203
4.6.1	Allgemeines.....	203
4.6.2	Verwendete Prüfverfahren und Versuchsablauf.....	203
4.6.3	Untersuchte Betone	205
4.6.4	Ermittelte Erstarrungszeiten und Vergleich der Verfahren.....	205
4.6.5	Einfluss der Frischbetontemperatur auf die Erstarrungszeiten.....	210
4.6.6	Zusammenhang zwischen den Erstarrungszeiten der Betone und der eingesetzten Zemente	211
4.6.7	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse zur Prüfung des Erstarrungsverhaltens	212
4.7	Zusammenfassung.....	213

5	BERECHNUNGSANSÄTZE ZUR ERMITTLUNG DES FRISCHBETONDRUCKS AUF SCHALUNGEN	215
5.1	Einführung	215
5.2	Analytische Modelle zur Berechnung des Frischbetondrucks auf lotrechte Schalungen	216
5.2.1	Annahmen und Randbedingungen	216
5.2.2	Berechnungsansätze unter Berücksichtigung des Ansteif- und Erstarrungsverhaltens	218
5.2.3	Wirklichkeitsnahes Modell zur Bestimmung des maximalen Frischbetondrucks	222
5.3	Verifizierung des analytischen Modells anhand von Versuchsergebnissen	231
5.3.1	Allgemeines.....	231
5.3.2	Vergleich mit eigenen Messergebnissen	232
5.3.3	Vergleich mit Messergebnissen aus der Literatur	234
5.3.4	Schlussfolgerungen	237
5.4	Numerische Verfahren zur Berechnung des Frischbetondrucks	238
5.4.1	Allgemeines.....	238
5.4.2	Beschreibung des gewählten Systems und der Materialparameter	238
5.4.3	Untersuchungsumfang und Vorauswertung	243
5.4.4	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen.....	244
5.5	Ergänzende Betrachtungen	250
5.5.1	Einfluss des Einfüllprozesses auf den Frischbetondruck	250
5.5.2	Vertikale Belastung der Schalung infolge Reibung	252
5.5.3	Einfluss der Systemsteifigkeit auf die Druckverteilung.....	253
5.6	Zusammenfassung	257

6	VORSCHLAG ZUR BESTIMMUNG DES FRISCHBETONDRUCKS IN DER BAUPRAXIS.....	259
6.1	Einführung.....	259
6.2	Maximaler Frischbetondruck auf Schalungen.....	260
6.2.1	Berechnungskonzept für lotrechte Schalungen	260
6.2.2	Hydrostatischer Grenzwert.....	260
6.2.3	Grenzwert nach dem vereinfachten Verfahren - Erstarrungsmodell ohne Silowirkung	260
6.2.4	Grenzwert nach dem genaueren Verfahren - Erstarrungsmodell mit Silowirkung	262
6.2.5	Vergleich des Vorschlages mit anderen Berechnungsansätzen	264
6.2.6	Geneigte Schalungen.....	266
6.2.7	Frischbetondruck bei Betoneinbau von unten.....	268
6.2.8	Frischbetondruck bei fließfähigen Rüttelbetonen	269
6.3	Druckverteilung über die Schalungshöhe.....	270
6.3.1	Allgemeines.....	270
6.3.2	Druckverteilung bei lotrechten Schalungen	270
6.3.3	Druckverteilung bei geneigten Schalungen.....	275
6.4	Zusätzliche Regelungen	275
6.4.1	Vertikale Belastung von Schalung und Bewehrung.....	275
6.4.2	Berechnung der tatsächlichen Betoniergeschwindigkeit unter Praxisbedingungen	276
6.5	Überlegungen hinsichtlich Sicherheit und Zuverlässigkeit.....	277
6.5.1	Allgemeines.....	277
6.5.2	Statische Nachweise und obere Grenzwerte des maximalen Frischbetondrucks.....	278
6.5.3	Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte	279
6.6	Bemessungswert des Frischbetondrucks von SVB zur Dimensionierung von Schalung und Rüstung	287
6.7	Zusammenfassung.....	291
7	RESÜMEE UND AUSBLICK	293
8	LITERATURVERZEICHNIS.....	297
	ANHANG A	A-1
	ANHANG B	B-1
	ANHANG C	C-1
	ANHANG D	D-1