

# **Frischbetondruck lotrechter, geneigter und gekrümmter Betonbauteile bei Verwendung von Betonen mit hoher Fließfähigkeit**

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

DISSERTATION

von

**Björn Freund M.Sc.**

aus  
Rotenburg an der Fulda

**D 17**

**Darmstadt 2017**

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell
Tag der Einreichung:	23. November 2016
Tag der mündlichen Prüfung:	10. Februar 2017

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Massivbau  
Franziska-Braun-Straße 3  
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.tu-darmstadt.de>

Freund, Björn:

Frischbetondruck lotrechter, geneigter und gekrümmter Betonbauteile  
bei Verwendung von Betonen mit hoher Fließfähigkeit

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 34

ISBN 978-3-942886-11-6

Dr.-Ing. Björn Freund

Geboren 1982 in Rotenburg an der Fulda. Von 2001 bis 2005 Studium des Bauingenieurwesens (Diplom) an der Fachhochschule Darmstadt (heute Hochschule Darmstadt). Von 2005 bis 2007 Studium des Bauingenieurwesens (Master of Science) an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2007 bis 2010 Mitarbeiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt am Main. Von 2010 bis 2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit auch als freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt am Main tätig. Seit 2015 technischer Projektleiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt am Main.

# VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt und meiner dortigen Forschungstätigkeit im Rahmen des Schwerpunktprogramms „Leicht bauen mit Beton“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner gilt mein besonderer Dank für die Betreuung meiner Dissertation, die mir gewährten Freiheiten und das mir entgegenbrachte Vertrauen während meiner Tätigkeit am Institut für Massivbau.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell möchte ich sehr herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Motzko als Vorsitzenden des Güteschutzverbands Betonschalungen Europa e. V. und Herrn Dr.-Ing. Olaf Leitzbach von der MEVA Schalungssysteme GmbH gilt mein Dank für ihre Unterstützung und Förderung der experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Tilo Proske für seine herausragende Arbeit auf dem Forschungsgebiet des Frischbetondrucks, die die Grundlage dieser Arbeit darstellt sowie für die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen.

Außerdem möchte ich mich sehr herzlich bei meinen Kolleginnen und Kollegen vom Institut für Massivbau für die freundschaftliche und sehr angenehme Zusammenarbeit während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter danken. Unsere gemeinsame Zeit wird mir immer in freudiger Erinnerung bleiben.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern Ursula und Fritz sowie meiner Schwester Rebecca für ihre liebevolle und bedingungslose Unterstützung in all den Jahren. Meinem Vater möchte ich diese Arbeit widmen, da er zu meinem großen Bedauern die Fertigstellung nicht mehr erleben konnte.

Darmstadt, im Februar 2017

Björn Freund



## **Zusammenfassung**

In der modernen Architektur werden zunehmend zur Vertikalen geneigte Betonbauteile in Form von geneigten Wänden und Stützen als Gestaltungselemente verwendet. Im Ingenieurbau werden seit geraumer Zeit Behälterbauwerke sowie radiale bzw. elliptische Tunnelschalen in Betonbauweise erstellt. Die vorgenannten Betonbauteile bzw. Bauwerke werden i.d.R. mit doppelhäuptigen Betonschalungen errichtet. Die maßgebliche Einwirkung für Betonschalungen ist der aus dem Frischbeton resultierende, auf die Schalhaut einwirkende, Frischbetondruck. Der auf geneigte Schalungssysteme einwirkende Frischbetondruck ist bisher wissenschaftlich weitestgehend unerforscht. Normative Angaben zum Frischbetondruck geneigter Schalungen fallen höchst unterschiedlich aus, von sehr konservativen Ansätzen bis hin zu Ansätzen, die zu einer unsicheren Bemessung führen können.

Um eine sichere und wirtschaftliche Bemessung von Schalungen für geneigte und gekrümmte Betonbauteile zu ermöglichen, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit der Frischbetondruck geneigter und gekrümmter Betonbauteil erforscht. Neuartige Modelle zur Simulation des Frischbetondrucks können eine Vielzahl von im Aufriss geneigten und gekrümmten Geometrien abbilden und das zeitlich veränderliche Materialverhalten des Frischbetons erfassen. Anhand der Ergebnisse experimenteller und theoretischer Untersuchungen wird ein praxistauglicher Vorschlag erarbeitet, der eine sichere und wirtschaftliche Bemessung von Schalungen für lotrechte und im Aufriss geneigte oder gekrümmte Betonbauteile bei Verwendung von hoch fließfähigen Betonen ermöglicht.

## **Abstract**

In modern architecture, the popularity of inclined and curved concrete elements in conventional applications is increasing. Besides, inclined concrete elements are often used in special engineering structures such as cooling towers, digesters or tunnels. Such structures are usually constructed with double-faced concrete formworks. In general, the casting rate of concrete and the dimensions of the formwork system are controlled by the pressure of fresh concrete. The pressure of the fresh concrete on inclined concrete components has not been investigated yet and the regulations for determining the fresh concrete pressure in the inclined formworks are very different. These include mainly some conservative approaches that lead often to an overestimated design.

In this thesis, the pressure of fresh concrete of inclined and curved concrete components was investigated. In order to ensure a safe and economical design approach for formwork systems, innovative models were developed. In addition to the geometrical details of the inclined formworks, these models consider the time-dependent material behavior of the fresh concrete to prove an accurate pressure distribution. Based on the obtained experimental and theoretical results, a practical recommendation to predict the pressure of vertical, inclined and curved formworks was proposed. This can enable a safe and economical design of formwork for vertical, inclined or curved concrete components by using highly flowable concretes.



---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Motivation .....	1
1.2	Zielsetzung .....	2
1.3	Vorgehensweise.....	2
<b>2</b>	<b>Schalungssysteme für geneigte und gekrümmte Betonbauteile .....</b>	<b>5</b>
2.1	Allgemeines .....	5
2.2	Bauwerke mit geneigten und gekrümmten Betonbauteilen.....	5
2.2.1	Ingenieurbauwerke .....	5
2.2.2	Architekturbauwerke .....	6
2.3	Schalungssysteme.....	8
2.3.1	Allgemeines .....	8
2.3.2	Trägerschalungen.....	11
2.3.3	Rahmenschalungen .....	11
2.3.4	Tunnelschalungen.....	12
2.4	Bemessung von Schalungssystemen und Traggerüsten .....	14
2.4.1	Allgemeines .....	14
2.4.2	Einwirkungen.....	14
2.4.3	Entwurf und Bemessung.....	15
<b>3</b>	<b>Frischbetondruck – Stand der Technik .....</b>	<b>17</b>
3.1	Einleitung .....	17
3.2	Modelle zur Beschreibung des Frischbetondrucks .....	19
3.2.1	Einführung .....	19
3.2.2	Hydrostatischer Druckansatz.....	19
3.2.3	Modellansätze in Anlehnung an die Bodenmechanik .....	19
3.2.4	Rheologische Ansätze.....	22
3.2.5	Ansätze nach der Silotheorie ohne Erstarrung .....	24
3.2.6	Ansätze nach der Silotheorie mit Erstarrung.....	27
3.2.7	Ansätze für geneigte und gekrümmte Schalungen von Specht .....	32
3.2.8	Bemessungsansatz für rotationssymmetrische Schalungen.....	33
3.2.9	Übersicht bestehender Modellansätze .....	34
3.3	Normen und Regelwerke zur Berechnung des Frischbetondrucks.....	35
3.3.1	Einführung .....	35
3.3.2	DIN 18218 (2010) – Frischbetondruck auf lotrechte Schalungen.....	35
3.3.3	Lastansatz für geneigte Schalungen nach Ast & Fröhlich.....	37
3.3.4	CIRIA Report 108 – Concrete pressure on formwork.....	38
3.3.5	ACI 347R-14 (2014) – Guide to formwork for concrete.....	40

3.3.6	Bulletin d'Information (1977) – Manual de Technologie "Coffrage".....	42
3.3.7	TGL 33421/01 (1977) – Betonbau, Schalverfahren, Standschalung.....	43
3.3.8	Vergleich von Berechnungsansätzen.....	46
3.4	Experimentelle Untersuchungen zum Seitendruck- und Reibbeiwert von Frischbeton .....	48
3.4.1	Einführung .....	48
3.4.2	Versuchsapparatur und Versuchsdurchführung.....	48
3.4.3	Versuche zum Seitendruckbeiwert .....	51
3.4.4	Ergebnisse der Versuche zum Reibbeiwert.....	55
3.5	Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zum Frischbetondruck .....	59
3.5.1	Einführung .....	59
3.5.2	Versuche mit Betonen fließfähiger und sehr fließfähiger Konsistenz.....	59
3.5.3	Versuche mit selbstverdichtenden Betonen.....	61
3.6	Numerische Modellierung von Betonierprozessen auf Grundlage der Bodenmechanik .....	63
3.6.1	Einführung .....	63
3.6.2	Finite-Elemente-Methode .....	64
3.6.3	Stoffgesetze.....	64
3.6.4	Modellierungsvorschlag von Proske.....	68
3.6.5	Modellierung von Gallego et al. ....	73
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zum Frischbetondruck.....</b>	<b>75</b>
4.1	Einführung .....	75
4.2	Versuche mit lotrechten und geneigten Wandschalungen (Darmstadt 2012/13) .	75
4.2.1	Allgemeines .....	75
4.2.2	Versuchsstand, Geometrie, Schalung und Bewehrung.....	76
4.2.3	Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung.....	77
4.2.4	Verwendete Betone.....	79
4.2.5	Versuchsprogramm.....	80
4.2.6	Auswertung der Versuche und Darstellung der Ergebnisse .....	81
4.3	Versuche zur Bestimmung der Materialparameter des Frischbetons .....	88
4.3.1	Allgemeines .....	88
4.3.2	Versuchsapparatur, Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung .....	88
4.3.3	Versuchsprogramm.....	89
4.3.4	Ergebnisse und Auswertung der Versuche zum Seitendruck .....	92
4.3.5	Ergebnisse und Auswertung der Versuche zum Reibungsverhalten .....	97



---

<b>5</b>	<b>Modellbildung zur Beschreibung des Frischbetondrucks .....</b>	<b>105</b>
5.1	Einführung .....	105
5.2	Annahmen und Randbedingungen.....	106
5.3	Numerisches Verfahren zur Berechnung des Frischbetondrucks auf lotrechte, geneigte und gekrümmte Schalungen.....	107
5.3.1	Allgemeines .....	107
5.3.2	Modellbeschreibung .....	107
5.3.3	Bauteil- bzw. Schalungsgeometrien .....	108
5.3.4	Zeitabhängige Modellparameter.....	109
5.3.5	Zeitlich unabhängige Modellparameter.....	110
5.4	Analytisches Modell zur Berechnung des Frischbetondrucks auf lotrechte und geneigte Schalungen .....	111
5.4.1	Allgemeines .....	111
5.4.2	Berechnungsansatz unter Berücksichtigung des zeitlich veränderlichen Verhaltens .....	111
5.5	Voruntersuchungen zur Bestimmung zeitabhängiger Materialparameter .....	114
5.5.1	Allgemeines .....	114
5.5.2	Nachrechnung eigener Versuche .....	114
5.5.3	Schlussfolgerung .....	118
5.6	Zeitlich veränderliche Seitendruck- und Reibbeiwerte .....	119
5.6.1	Allgemeines .....	119
5.6.2	Ermittlung von zeitlichen Seitendruckbeiwerten .....	119
5.6.3	Ermittlung von zeitlichen Reibbeiwerten .....	122
5.7	Modellverifizierung .....	126
5.7.1	Allgemeines .....	126
5.7.2	Untersuchung des Frischbetondrucks über die Schalungshöhe.....	126
5.7.3	Nachrechnung von Versuchen und Bauteilmessungen .....	130
5.7.4	Schlussfolgerung .....	133
5.8	Zusammenfassung .....	134

<b>6</b>	<b>Theoretische Untersuchungen zum Frischbetondruck.....</b>	<b>135</b>
6.1	Einführung .....	135
6.2	Berechnungen zur Bestimmung des Frischbetondrucks.....	135
6.2.1	Allgemeines und Untersuchungsparameter .....	135
6.2.2	Lotrechte Wände.....	136
6.2.3	Geneigte Wände mit konstanter Bauteildicke .....	139
6.2.4	Bauteile mit nach unten hin zunehmender Bauteildicke .....	144
6.2.5	Bauteile mit nach unten hin abnehmender Bauteildicke .....	150
6.2.6	Im Aufriss radial gekrümmte Wände .....	154
6.3	Betrachtungen zu Sicherheit und Zuverlässigkeit .....	156
6.3.1	Allgemeines .....	156
6.3.2	Kalibrierung der Sicherheitselemente.....	157
6.4	Zusammenfassung .....	164
<b>7</b>	<b>Berechnungsvorschlag zur Bestimmung des Frischbetondrucks .....</b>	<b>167</b>
7.1	Einführung .....	167
7.2	Maximaler Frischbetondruck und Druckverteilung auf Schalungen.....	168
7.2.1	Mindestwert und Maximalwerte des Frischbetondrucks.....	168
7.2.2	Anforderungen an die Bewehrung.....	169
7.2.3	Teilsicherheitsbeiwerte .....	169
7.2.4	Lotrechte Wände.....	170
7.2.5	Geneigte Wände mit konstanter Bauteildicke .....	174
7.2.6	Bauteile mit nach unten zunehmender Bauteildicke .....	177
7.2.7	Bauteile mit nach unten abnehmender Bauteildicke .....	179
7.2.8	Radial gekrümmte Wände .....	181
7.3	Vergleich des Berechnungsvorschlags mit DIN 18218 (2010).....	185
7.3.1	Lotrechte Wände.....	185
7.3.2	Geneigte Wände mit konstanter Bauteildicke .....	186
7.4	Zusammenfassung .....	188
<b>8</b>	<b>Resümee und Ausblick .....</b>	<b>189</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>193</b>

---

<b>Anhang</b> .....	<b>203</b>
Anhang A	Versuchsparameter und maximale Frischbetondrücke..... 205
Anhang B	Betoniersuche ..... 207
Anhang C	Versuche zum Seitendruck- und Reibungsbeiwert..... 244
Anhang D	Versuchsnachrechnungen mit analytisches Modell..... 254
Anhang E	Frischbetondruck lotrechter Schalungen ..... 255
Anhang F	Frischbetondruck geneigter Schalungen mit konstanter Wanddicke .. 258
Anhang G	Frischbetondruck v. BT mit nach unten zunehmender Dicke ..... 264
Anhang H	Frischbetondruck v. BT mit nach unten abnehmender Dicke ..... 271
Anhang I	Frischbetondruck von gekrümmten Bauteilen..... 276