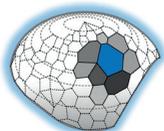


Jasmin Tkocz

Schnellfertigung von dünnwandigen Stabbauteilen aus Hochleistungsbeton mit gesteuerter Wärmebehandlung



SPP 2187
Schnellbau der Zukunft

Schriftenreihe des Instituts für
Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2021-04

Schnellfertigung von dünnwandigen Stabbauteilen aus Hochleistungsbeton mit gesteuerter Wärmebehandlung

vorgelegte

Dissertation

zur

**Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

der

**Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der
Ruhr-Universität Bochum**

von

Jasmin Tkocz, M. Sc.

Bochum, im März 2020

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

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

Heft 2021-4

Jasmin Tkocz

**Schnellfertigung von dünnwandigen Stabbauteilen
aus Hochleistungsbeton mit gesteuerter
Wärmebehandlung**

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., 2020

Coverbild: Dr. Patrick Forman

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 978-3-8440-8105-3

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

Kurzfassung

In der Arbeit wird eine Methode zur Schnellfertigung von dünnwandigen Stabbauteilen aus Hochleistungsbeton mit integrierter gesteuerter Wärmebehandlung entwickelt. Wesentliche Themenfelder der Wärmebehandlung einerseits und der Präzisionsfertigung andererseits werden vorab experimentell behandelt.

Eine erhöhte Temperatur während der Betonerhärtung beeinflusst neben der Geschwindigkeit die Reaktionsvorgänge des gesamten Hydratationsprozesses. Der Ablauf der Hydratation entscheidet wiederum über wesentliche Eigenschaften des Betons wie die Druckfestigkeit und zeitabhängige Verformungen. In Versuchsprogrammen wird die Erhärtungstemperatur zwischen 20 °C und 80 °C variiert. Dies stellt einen für Wärmebehandlungen typischen Temperaturbereich dar. Das Hydratations-, Erstarrungs- und Schwindverhalten sowie die Druckfestigkeitsentwicklung eines speziellen selbstverdichtenden Hochleistungsbetons werden untersucht.

Die Thematik der Fertigung wird zweigeteilt behandelt. Zum einen gilt es, durch die Fertigungsmethode hohe Genauigkeiten zu erzielen, die für schlanke Bauteile tragfähigkeitsrelevant sind. Zum anderen werden Schalungskonzepte hinsichtlich der erreichbaren Druckfestigkeit der resultierenden Körper optimiert. Variierende, reduzierte Steifigkeiten der Schalung sollen dem geometriebedingt überdurchschnittlich großen Verhältnis zwischen Schalflächen und Betonvolumen entgegenwirken.

Eine Fertigungseinheit für Betonrohrsegmente mit integrierter Wärmebehandlung in Form einer innerseitig verlaufenden, temperierten Wasserleitung wird prototypisch umgesetzt. Integrierte Temperaturmesssysteme dienen der kontinuierlichen Erfassung entstehender Temperaturgradienten innerhalb der Betonwandung. Vorgestellt werden drei Anwendungsszenarien: die Herstellung mithilfe der entwickelten Fertigungseinheit ohne Wärmebehandlung, die Herstellung bei temperierter Wasserleitung unter 80 °C sowie die Erwärmung von bereits erhärtetem Beton. Abhängig vom Szenario kommt es zur Überlagerung der Temperaturbeaufschlagung durch den Heizkreislauf und der Wärme infolge Hydratation, die wiederum temperatur- und zeitabhängig im Beton freigesetzt wird.

In numerischen Vergleichsrechnungen zur Temperaturentwicklung in der Betonwandung werden gute Übereinstimmungen zu gemessenen Temperaturen in allen drei Anwendungsfällen erzielt. Beliebige abweichende Temperaturgeschichten können damit rechnerisch statt experimentell berücksichtigt werden. Ein Temperaturmonitoring innerhalb der Schnellfertigung kann somit entfallen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum in den Jahren 2014 bis 2019. Von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften wurde sie als Dissertation angenommen.

Mein persönlicher Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark. Die Möglichkeit zur Promotion an seinem Lehrstuhl sowie die vertrauensvolle Zusammenarbeit und seine kontinuierliche Förderung weiß ich sehr zu schätzen. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher für die baustofftechnische Begleitung, Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn für seine praktischen Inspirationen und Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg für die freundliche Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Den aktuellen sowie ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Massivbaulehrstuhls sei herzlich gedankt für den optimalen Rahmen aus gegenseitiger Unterstützung, zwischenmenschlich angenehmer Atmosphäre und regem Austausch während der Promotion. Namentlich gilt Gisela Wegener mein ganz besonderer Dank – einer nicht wegzudenkenden Stütze auf organisatorischer sowie privater Ebene auf meinem akademischen Wege und auch darüber hinaus.

Für das Ermöglichen der experimentellen Arbeiten zum einen innerhalb des Betonlabors, der Werkstatt sowie der Versuchshalle der Konstruktionsteilprüfung KIBKON unter der Leitung von Herrn Dr.-Ing. Hussein Alawieh und zum anderen innerhalb des Baustofflabors der Hochschule Bochum bin ich ebenso dankbar.

Bei meiner Familie, insbesondere bei meinen Eltern Gabriela und Stefan Tkocz sowie bei meiner Schwester Andrea Caesar bedanke ich mich herzlich für ihre motivierenden und fördernden Gedanken, Worte und Werke. Einen stets freien Rücken und unentwegten Rückhalt während der Entstehungszeit der Dissertation habe ich von ganzem Herzen meinem Partner Fabian Langer zu verdanken, auf dessen verständnisvolle und unterstützende Begleitung ich zählen konnte. Auch gilt herzlicher Dank meinen Freunden, darunter Cornelis Engelke und Kim Vender für fleißige Revisionen sowie Motivation auf den letzten Metern.

Bochum, im Juni 2021

Jasmin Tkocz

Tag der Einreichung: 3. März 2020

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juli 2020

- | | |
|---------------|---|
| 1. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Ruhr-Universität Bochum |
| 2. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher, Ruhr-Universität Bochum |
| 3. Gutachter: | Prof. Dr.-Ing. Matthias Pahn, Technische Universität Kaiserslautern |

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Aufbau	3
2	Grundlagen der Wärmebehandlung von Beton und rechnerische Behandlung	5
2.1	Methoden der Wärmebehandlung	5
2.2	Einfluss auf die Hydratation	6
2.2.1	Messmethoden	6
2.2.2	Reaktionskinetik	6
2.2.3	Reifekonzept und wirksames Betonalter	10
2.2.4	Aktivierungsenergie	11
2.3	Einfluss auf das Schwinden	12
2.4	Theorie der Wärmeübertragung	13
2.4.1	Analytisch	15
2.4.2	Numerisch	18
2.5	Temperaturmessung im Beton	18
2.5.1	Diskret: Thermoelemente	18
2.5.2	Quasi-kontinuierlich: Faseroptische Temperaturmessung	19
3	Grundlagen präziser Herstellung stabförmiger Betonbauteile	21
3.1	Fertigungsmethoden	23
3.2	Schalungsmethoden	24
3.3	Genauigkeitsmessung	25
3.3.1	Gestaltabweichungen stabförmiger Bauteile	25
3.3.2	Normanforderungen und -toleranzen	26
3.3.3	Messmethoden	27
3.3.4	Messunsicherheiten	29
4	Eigene Experimente zur Wärmebehandlung	31
4.1	Verwendete Baustoffe	31
4.2	Druckfestigkeit	32
4.2.1	Versuchsprogramm	32
4.2.2	Ergebnisse und Auswertung	33
4.3	Erstarrungsverhalten	35
4.4	Schwindverhalten	35
4.4.1	Versuchsprogramm	35
4.4.2	Ergebnisse und Auswertung	37

4.5	Hydratation	42
4.5.1	Versuchsprogramm	42
4.5.2	Ergebnisse und Auswertung	44
4.6	Anwendung von Temperatur-Zeit-Beziehungen	49
4.6.1	Bestimmung der Aktivierungsenergie	49
4.6.2	Anwendung auf Druckfestigkeitsergebnisse	50
5	Entwicklung und Beurteilung von Fertigungsmethoden für Betonrohre	53
5.1	Angewandte Methoden	53
5.2	Einfluss auf die Druckfestigkeit	53
5.2.1	Referenz	54
5.2.2	Modifizierung der Schalung	56
5.2.3	Verstärkung durch Bewehrung	60
5.3	Genauigkeitsmessungen	62
5.3.1	Diskret: Digitaler Messschieber	63
5.3.2	Quasi-kontinuierlich: Interferometrischer Lasertracker und Streifenprojektion	68
5.4	Auswertung und Beurteilung	74
5.4.1	Erzielbare Genauigkeit und Druckfestigkeit der Betonbauteile	74
5.4.2	Eignung der Messkonzepte	76
6	Anwendung: Fertigung von stabförmigen Betonbauteilen mit Wärmebehandlung	79
6.1	Rahmenbedingungen für präzise Serienfertigung	79
6.1.1	Möglichkeiten der Präzisionssteigerung	80
6.1.2	Möglichkeiten der Integration einer Wärmebehandlung	80
6.2	Prototyp zur innerseitigen Wärmebehandlung von Betonrohren	81
6.2.1	Aufbau	82
6.2.2	Messtechnik	83
6.2.3	Durchführung und Messergebnisse	86
6.2.4	Auswertung der Messdaten	88
6.2.5	Vergleichsrechnung mittels Tabellenkalkulation	93
6.2.6	Fazit und Diskussion	105
6.3	Erweiterte Anwendung der Methode	107
7	Schlussfolgerungen und Ausblick	109
A	Berechnungsgrundlagen zur querschnittsabhängigen Knicklaststeigerung	113
B	Nanodur-Beton	115
B.1	Betonrezeptur	115
B.2	Mischungsregime	115
C	Ergebnisse aus Festigkeitsprüfungen	117
C.1	Mit Wärmebehandlung	117
C.2	Ohne Wärmebehandlung	122
D	Ergebnisse aus Schwindmessungen	125
D.1	Setzdehnungsmessung	125
D.2	Schwindkegelmessung	128
D.3	Referenzmessungen aus der Literatur	131

E	Daten und erweiterte Auswertung der isothermen Wärmeflusskalorimetrie	133
E.1	Messdaten TAM Air Kalorimeter	133
E.2	Bestimmung der Aktivierungstemperatur in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad	141
F	Datensammlung zu Schalungsmaterialien	143
G	Ergebnisse der Genauigkeitsmessung nach Stufe 1	145
G.1	Daten zu Abb. 5.8 mit erweitertem 3D-Modellvergleich und 2D-Konturenvergleich	145
G.2	Daten zu Abb. 5.9	150
H	VBA-Hilfsfunktionen für analytische Vergleichsrechnungen	151
	Literatur	155