RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM
Bauingenieurwesen

RUB

Christina Fust

Zum Tragverhalten von gering querkraftbewehrten Stahlbetonbalken

Schriftenreihe des Instituts für
Konstruktiven Ingenieurbau, Heft 2018-02

Zum Tragverhalten von gering querkraftbewehrten Stahlbetonbalken

vorgelegte

Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der

Ruhr-Universität Bochum

von

Dipl.-Ing. Christina Fust

Bochum, im Januar 2017

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

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

Heft 2018-2

Christina Fust

Zum Tragverhalten von gering querkraftbewehrten Stahlbetonbalken

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5876-5
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

Zusammenfassung

Ein duktiles Querkrafttragverhalten soll im Stahlbetonbau durch die Anordnung einer Mindestbewehrung sowie die Einhaltung konstruktiver Regeln sichergestellt werden. Dabei bedingt die Unterschreitung so geforderter Bügelbewehrungsmengen nicht zwingend ein sprödes Versagen. In der Arbeit werden das Trag- und Verformungsverhalten unter besonderer Berücksichtigung des sich einstellenden Versagensrisses anhand von Balkenversuchen analysiert. So sollen Empfehlungen abgeleitet werden, um gegebenenfalls reduzierte Bügelbewehrungsmengen als „noch ausreichend“ zu bewerten. Die Querkraftbewehrung der Prüfkörper wird dafür von der vollen Mindestbewehrung nach aktuellem Standard bis auf 25 % reduziert. Auch wird die konstruktive Begrenzung des Bügelabstands in Balkenlängsrichtung mitunter bewusst nicht erfüllt. Die Messung der oberflächennahen Rissweite im Schubfeld erfolgt neben dem Einsatz konventioneller Messtechnik mit einem hier entwickelten Verfahren auf Basis einer mathematischen Bildanalyse. Der aufgehende Riss wird mit einer Digitalkamera im definierten Intervall während des Versuchs fotografiert. In der nachlaufenden Analyse werden zur Rissidentifizierung Segmentierungsverfahren kombiniert und durch eine Binärbildanalyse gerissene Bereiche quantitativ und qualitativ ausgewertet. So können die mittlere Rissweite eines Rissabschnitts pro Zeitschritt sowie die Rissweitenentwicklung über den Versuchsverlauf bestimmt werden.

Aus der Analyse der geometrischen Ausbildung des kritischen Schubrisses werden der Querkraftwiderstand über die Wirksamkeit der Bügelbewehrung im identifizierten effektiven Schubbereich untersucht und Empfehlungen für die rechnerische Betrachtung abgeleitet. Die Versuche zeigen, dass bereits 50 % Mindestquerkraftbewehrung die Umlagerung in ein fachwerkartiges Tragverhalten, bei gleichzeitig deutlichen Steifigkeitsverlusten und großen Rissweiten, erlauben können. Ab 75 % Mindestbewehrung erfolgt in der Regel stets eine duktile Umlagerung. Zur Bewertung des sich einstellenden Versagenstyps (duktil oder spröde) wird eine Kombination verschiedener Bewertungskriterien empfohlen. Insbesondere sollten die realitätsnahen Werte von Betontraganteil zu einem additiven Bewehrungstraganteil ins Verhältnis gesetzt werden. Da die Duktilität neben einer ausreichenden Bügelmenge insbesondere von der Anzahl aktivierter Bügel abhängt, sollten zusätzlich sinnvoll begrenzte Stababstände vorliegen. Irreversible Bügeldehnungen sollten dabei vermieden werden und können indirekt über eine Rissweitenbegrenzung ausgeschlossen werden. Als ergänzendes Bewertungskriterium dient die Betrachtung der Rissaufweitung. Ein hier entwickelter Ansatz basiert auf der These, dass das beginnende Versagen durch die Aufweitung des Versagensrisses charakterisiert werden kann. Dafür wird die Ableitung der Rissaufweitung gegenüber der Zeit oder der Last mit Hilfe von Differenzenquotienten angenähert.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während und nach meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Massivbau der Ruhr-Universität Bochum und wurde von der dortigen Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften als Dissertation angenommen.

Mein Dank gilt Herrn Professor Mark für die wissenschaftliche Begleitung und Förderung sowie die konstruktive Kritik in vielen Besprechungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Für die stets angenehme Arbeitsatmosphäre, die vielen schönen Erinnerungen und entstandenen Freundschaften sowie die vielen fachlichen und nicht fachlichen Diskussionen danke ich den aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Massivbau.

Besonderer Dank gilt meinen ehemaligen studentischen Hilfskräften und Abschlussarbeitsstudenten, insbesondere Frau Sarah Becker MSc., die mir durch ihre Mitarbeit in der Lehre sowie bei den durchgeführten Experimenten engagiert geholfen haben. Den Mitarbeitern der Konstruktionsteilprüfung KiB Kon der Ruhr-Universität Bochum, allen voran den Herren Dr.-Ing. Hussein Alawieh, Dr.-Ing. Karsten Winkler, Dipl.-Ing. Heiko Rahm sowie Dieter Abraham, danke ich für die Beratung, Betreuung und Mithilfe bei allen Experimenten. Für die Durchsicht des Manuskripts und die daraus entstandenen wertvollen Anregungen danke ich Dr.-Ing. Thomas Putke, Dr.-Ing. Patrick Forman sowie Dr.-Ing. Lars Gödde.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie und meinem Freund und Partner Sascha für ihre Unterstützung und den bedingungslosen Rückhalt während der Entstehung dieser Arbeit und die stetige, wichtige (Neu)Ausrichtung meines Lebensfokus.

Bochum, im November 2017

Christina Fust

Tag der Einreichung: 20. Januar 2017

Tag der Prüfung: 14. Juli 2017

Dekan: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark

Ko-referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Rolf Breitenbücher

Für meine Eltern

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ..... **I**

Vorwort ..... **III**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung und Aufbau 3

2 Modellvorstellungen zum Querkrafttragverhalten von Stahlbetonbalken **6**

2.1 Schubspannungen im ungerissenen Zustand 6

2.2 Balken im Zustand II ohne Querkraftbewehrung 8

2.2.1 Tragverhalten 8

2.2.2 Etablierte Modellvorstellungen 11

2.3 Balken im Zustand II mit Querkraftbewehrung 15

2.3.1 Tragmechanismen 15

2.3.2 Etablierte Modellvorstellungen 16

2.4 Bestimmung der rechnerischen Querkrafttragfähigkeit 20

2.4.1 Bauteile ohne Querkraftbewehrung nach Eurocode 2 20

2.4.2 Bauteile mit Querkraftbewehrung nach Eurocode 2 21

2.4.3 Mindestquerkraftbewehrung nach Eurocode 2 24

2.4.4 Ansatz mit additiven Traganteilen 26

2.5 Betrachtung des Rissverhaltens 29

2.5.1 Bruchmechanische Zusammenhänge 29

2.5.2 Entwicklung des kritischen Schubrisses 32

2.6 Entwicklung einer funktionalen Rissbeschreibung querkraftunbewehrter Balken 34

2.6.1 Statistische Kenngrößen 34

2.6.2 Approximationsansätze 35

3 Entwicklung von Bewertungskriterien für das Ankündigungsverhalten **42**

3.1 Duktilität – Merkmale der Vorankündigung 42

3.1.1 Bauteile ohne Querkraftbewehrung 43

3.1.2 Bauteile mit geringen Querkraftbewehrungsgraden 44

3.2 Bewertungskriterien für Bauteile mit geringen Querkraftbewehrungsgraden 45

3.2.1 Kombinierter Ansatz 45

3.2.2 Entwicklung eines Ansatzes auf Basis der Rissaufweitung 47

3.2.2.1 Erforderliche Abtastraten ... 48
3.2.2.2 Betrachtung der Rissaufweitung gegenüber der Zeit ... 49
3.2.2.3 Betrachtung der Rissaufweitung gegenüber der Last ... 52
3.3 Zwischenfazit ... 55

4 Entwicklung eines Verfahrens zur oberflächennahen Rissweitenmessung ... 56
4.1 Allgemeines ... 56
4.1.1 Rissuntersuchungen mit digitalfotografischen Methoden ... 57
4.2 Rissweitenbestimmung ... 59
4.2.1 Prinzip der Rissweitenbestimmung ... 60
4.2.2 Technische Aspekte von Einkamera-Systemen ... 63
4.3 Grundlagen der mathematischen Bildverarbeitung ... 63
4.4 Rissselektion mittels Segmentierung ... 65
4.4.1 Histogrammbasierte Segmentierung ... 66
4.4.2 Gradientenbasierte Segmentierung ... 68
4.4.3 Wahl der Segmentierungsmethode ... 70
4.5 Rechentechnische Umsetzung der mathematischen Bildverarbeitung ... 71
4.6 Umsetzung der Aufnahmetechnik im Versuch ... 72
4.6.1 Fehlerquellen ... 72
4.6.2 Verwendete Kameratechnik ... 73
4.7 Verifikation und Genauigkeitsuntersuchung ... 75
4.7.1 Auswertung synthetischer Testbilder ... 75
4.7.2 Auswertung fotografischer Testbilder ... 77
4.8 Zwischenfazit ... 80

5 Querkraftversuche an Einfeldträgern ... 81
5.1 Versuchsprogramm und Ziele ... 81
5.2 Versuchsaufbau und Messtechnik ... 83
5.3 Materialeigenschaften ... 86
5.3.1 Bewehrungsstahl ... 86
5.3.2 Beton ... 87
5.4 Vergleich der Versuchsergebnisse mit Versuchen aus der Literatur ... 89
5.4.1 Vereinheitlichte Betrachtung der Betonkennwerte ... 90
5.5 Versuchsauswertung ... 91
5.5.1 Bauteile ohne Querkraftbewehrung ... 92
5.5.2 Bauteile mit Querkraftbewehrung ... 94
5.6 Rechnerische Betrachtung ... 103

5.6.1 Vergleich experimenteller und rechnerischer Bruchlasten 103
5.6.2 Bauteilwiderstand unter Berücksichtigung der Bügelwirksamkeit..... 106
5.6.3 Ableitung eines Nachrechnungsansatzes 109
5.7 Zwischenfazit 113

6 Bewertung des Ankündigungsverhaltens 115
6.1 Experimentelle Betrachtung 115
6.1.1 Betrachtung der durchgeführten Querkraftversuche 116
6.1.2 Betrachtung des Rissaufweitungsverhaltens 118
6.1.2.1 Ansatz der Rissaufweitungsgeschwindigkeit („Gradient“)..... 119
6.1.2.2 Ansatz der Rissrate..... 121
6.1.3 Vergleichende Betrachtung mit Versuchen aus der Literatur 123
6.2 Einfluss von Konstruktion und Rissverlauf 124
6.3 Rechnerische Betrachtung 126
6.4 Zwischenfazit 127

7 Schlussfolgerungen 129

Literaturverzeichnis 132

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis 146

Abbildungsverzeichnis 149

Tabellenverzeichnis 155

A Querkraftversuche 156
A.1 Versuchsaufbau und technische Daten..... 156
A.2 Serie I 157
A.2.1 Bauteil V0 157
A.2.2 Bauteil V1 160
A.2.3 Bauteil V2 164
A.3 Serie 2..... 168
A.3.1 Bauteil V0C..... 169
A.3.2 Bauteil V2C..... 170
A.3.3 Bauteil V3 172
A.3.4 Bauteil V4 176
A.3.5 Bauteil V5 179

B Gradienten und Rissraten 183
B.1 V0 – Ohne Querkraftbewehrung 183

B.2 V1 – $a_{sw,min}$ 185
B.3 V2 – 50 % $a_{sw,min}$ 186
B.4 V3 – 75 % $a_{sw,min}$ 188
B.5 V4 – 25 % $a_{sw,min}$ 190
B.6 V5 – 37 % $a_{sw,min}$ 191

C Versuchsdatenbank 193
C.1 Balken ohne Querkraftbewehrung 194
C.2 Balken mit wenig Querkraftbewehrung 200

Lebenslauf 202