

Schriftenreihe des Instituts für Massivbau

Lukas Henze

Querkrafttragverhalten von Stahlbeton-Fahrbahnplatten

Herausgeber:

Prof. Dr. sc. techn. Viktor Sigrist, Prof. Dr.-Ing. Günter Rombach

Querkrafttragverhalten von Stahlbeton-Fahrbahnplatten

**Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Lukas Henze

aus
Herford

2019

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Günter Axel Rombach
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

Tag der mündlichen Prüfung: 10.04.2019

Schriftenreihe des Instituts für Massivbau der TUHH

Heft 18

Lukas Henze

**Querkrafttragverhalten von
Stahlbeton-Fahrbahnplatten**

Shaker Verlag
Düren 2019

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.: Hamburg, Techn. Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6730-9

ISSN 1865-8407

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

Vorwort

Trotz Jahrzehnte langer Forschungsarbeit, die ersten Untersuchungen wurden von Mörsch in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts durchgeführt, ist die Querkraftbemessung von Stahlbetonkonstruktionen *ohne* Querkraftbewehrung bislang immer noch nicht zufriedenstellend geklärt. Diese Problematik betrifft besonders Fahrbahnplatten von Betonbrücken, da diese im Allgemeinen ohne Schubbewehrung ausgeführt wurden. Weiterhin werden sie durch hohe Radlasten beansprucht.

Mit Einführung der DIN 1045-1 im Jahre 2001 bzw. des Eurocodes 2 Teil 1-1 im Jahr 2011 ist die Querkraftbemessung in den Mittelpunkt des Interesses von Tragwerksplanern, Aufsichtsbehörden und Wissenschaftlern gerückt. Nach den dort festgelegten Bemessungsansätzen kann die Tragfähigkeit von Brückenfahrbahnplatten aus Stahlbeton häufig nicht mehr ohne Querkraftbewehrung rechnerisch nachgewiesen werden. Der Einbau von Bügeln in neue Bauwerke bzw. die Verstärkung von bestehenden Bauwerken ist jedoch mit einem sehr großen Aufwand und damit hohen Kosten verbunden. Es werden daher dringend neue, zutreffendere Bemessungsverfahren für Fahrbahnplatten benötigt. Mit dieser Problematik befasst sich Herr Henze in seiner Forschungsarbeit. Dabei möchte er den zahlreichen vorliegenden Querkraftmodellen nicht noch einen eigenen Rechenansatz hinzufügen. Vielmehr geht es ihm um eine einheitliche und nachvollziehbare Vorgehensweise zur Ermittlung von Beanspruchungen und Widerständen von Stahlbetonplatten auf Basis der derzeitigen Bemessungsregeln beim Querkraftnachweis.

Um das Tragverhalten von Fahrbahnplatten unter konzentrierten Radlasten besser zu verstehen, führt Herr Henze eine umfangreiche Versuchsserie an großmaßstäblichen Stahlbetonplatten durch und simuliert deren Tragverhalten mittels stofflich nichtlinearer FE-Berechnungen. Bei den Versuchen wird im Wesentlichen der Abstand der Radlasten vom Auflager variiert. Herr Henze stellt u.a. fest, dass eine Stahlbetonplatte unter Blocklasten nicht am Auflager, sondern an der Stelle der maximalen Querkraftbeanspruchung d.h. im Bereich der konzentrierten Lasten versagt. Weiterhin besitzen Platten auch nach der maximalen Belastung noch ein großes Resttragvermögen. Ein sprödes Versagen trat in den Versuchen nicht auf. Die Traglast in den Versuchen war bei einer Schubschlankheit von $a_v/d > 3,00$ nahezu konstant. Die in der Praxis verwendeten Ansätze einer Lastausbreitung zum Auflager bzw. einer mittragende Plattenbreite bilden somit das Tragverhalten nicht korrekt ab.

Eine weitere wichtige Erkenntnis aus den Versuchen ist, dass ein Bemessungsansatz nicht unabhängig von dem Tragsystem (Balken – Platte) und den Beanspruchungen in einem festzulegenden Schnitt betrachtet werden kann. Die Gleichungen der Norm, welche mit Balkenversuchen validiert wurden, sind somit bei Platten anzupassen. Durch eine statistische Auswertung einer Datenbank mit Plattenversuchen unter Blocklasten bestimmt Herr Henze einen neuen Vorfaktor $C_{Rd,c}^*$ von 0,18 für die Bemessungsgleichung des EC2's, welcher erheblich größer als der Normwert von 0,10 ist. Hiermit ergeben sich für eine Kragplatte ca. 50 % größere rechnerische Querkrafttragfähigkeiten als bisher.

Mit dem von Herrn Henze entwickelten Rechenverfahren lassen sich viele Fahrbahnplatten von Betonbrücken ohne Querkraftbewehrung ausführen bzw. nachrechnen.

Die Forschungsarbeit von Herrn Henze liefert somit wichtige Erkenntnisse zum Tragverhalten von Stahlbetonplatten unter Blocklasten. Das neue Bemessungsverfahren hat eine große wirtschaftliche Relevanz.

Hamburg, April 2019

Prof. Dr.-Ing. G.A. Rombach

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Tragverhalten von Stahlbeton-Fahrbahnplatten. Der Schwerpunkt liegt auf dem Lastabtrag von konzentrierten Einzel- bzw. Blocklasten, wie sie bei Brückenbauwerken in Form von Radlasten auftreten. Die gewonnenen Erkenntnisse können aber auch ohne weiteres auf allgemeine Fälle von konzentrierten Blocklasten auf Stahlbetonplatten übertragen werden.

Im Zuge der bisherigen Forschungstätigkeit zur Querkrafttragfähigkeit von Stahlbeton-Fahrbahnplatten konnte wiederholt festgestellt werden, dass die Querkrafttragfähigkeit der Platten unter Einzellasten höher ist, als der rechnerische Widerstand nach aktuellen Bemessungsregeln erwarten lässt. Trotzdem konnte bisher kein erhöhter Tragwiderstand abgeleitet werden. Diese Diskrepanz soll durch die vorliegende Arbeit behoben werden.

Nach einem Überblick über den Stand des Forschungsgebietes werden zunächst der Forschungsbedarf und offene Fragestellungen abgeleitet. Anhand von eigenen Großmodellversuchen an der Technischen Universität Hamburg (TUHH) kann direkt eine Vielzahl dieser offenen Fragen aus den vorhergehenden Forschungsarbeiten beantwortet werden. Unter anderem kann der Einfluss des direkten Lastabtrags von Einzellasten bei Platten quantifiziert werden. Ergänzend werden Material-nichtlineare FE-Simulationen durchgeführt, um den Lastabtrag der Platten vertieft zu erforschen. Die Berechnungen werden mit realen Messwerten validiert.

Es lässt sich zeigen, dass der übliche ortsfeste Schnitt im Auflagerbereich zur Bestimmung der Beanspruchung von Platten unter Einzellasten nicht sinnvoll ist. Der Ort des Versagens liegt im Bereich der Lasteinleitung der Einzellasten. Hier sollten auch die maßgebenden Querkräfte bestimmt werden. Diese sind aber um ein Vielfaches höher als die Querkräfte am Auflager der Platte.

Ein praxisnahes Vorgehen zur Ermittlung der Beanspruchung aus konzentrierten Einzellasten aus linear-elastischen FE-Berechnungen wird gezeigt und ein Ansatz zur Berücksichtigung der erhöhten Tragfähigkeit für Stahlbetonplattentragwerke auf Grundlage der aktuellen Bemessungsgleichung nach EC2 vorgeschlagen. Es ergibt sich eine mögliche Steigerung der rechnerischen Querkrafttragfähigkeit für Plattentragwerke um ca. 50 %. Das erforderliche Sicherheitsniveau bei diesem modifizierten Nachweis der Querkrafttragfähigkeit wird mit Hilfe einer statistischen Datenbankanalyse von ausgewählten Plattenversuchen nachgewiesen.

Es wird erläutert, wie der direkte Lastabtrag von auflagnahen konzentrierten Lasten phänomenologisch funktioniert und wie der Versagensmechanismus der Platten unter Einzellasten mit dem Durchstanzen zusammenhängt. Abschließend kann aus den gewonnenen neuen Erkenntnissen abgeleitet werden, wie der Anteil der geneigten Druckstrebe aus Biegung V_{ced} bei geouteteten Platten beurteilt werden sollte.

Abstract

The present work deals with the load-bearing behavior of reinforced concrete slabs. The focus is on the load transfer of concentrated single or block loads, as they occur in bridge structures in the form of wheel loads. However, the findings can also easily be applied to general cases of concentrated block loads on reinforced concrete slabs.

In the previous research work on the bearing capacity in shear of reinforced concrete roadway slabs it could be repeatedly stated that the shear bearing capacity of the slabs under single loads is higher than the calculated resistance according to current design rules would expect. Nevertheless, so far no increased bearing capacity could be derived. This discrepancy should be remedied by the present work.

After an overview of the field of research and previously performed test series, the research needs and open questions are derived. Based on this, the structural behavior of reinforced concrete slabs under single loads is examined on the basis of large-scale model tests performed at TUHH. From this, one can directly answer many open questions from previous research. In addition, material-non-linear FE simulations are performed to investigate the load transfer of the plates in more detail. The calculations are validated based on the real experiments.

It can be shown that the usual fixed relevant design section at the support region is not meaningful, and that the shear forces should be determined close to the concentrated loads. However, these are many times higher than the shear forces at the support of the slab.

A hands-on approach to determining the internal forces out of concentrated loads from linear-elastic FE calculations is presented and an approach to taking into account the increased load bearing capacity of reinforced concrete slab structures based on the current design equation according to EC2 is proposed. In doing so, the required level of safety in the case of modified proof of the shear bearing capacity is demonstrated by means of a statistical database analysis of selected tests on slabs.

It is explained how the direct load transfer of concentrated loads close to the support works phenomenological, and how the failure mechanism of slabs under single loads is related to punching. Finally, it will be shown how the fraction of the inclined compression strut from bending V_{ced} should be evaluated on haunched slabs.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	3
1.3 Vorgehen und Aufbau der Arbeit	4
1.4 Abgrenzung	6
2 Stand der Forschung	8
2.1 Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen ohne Querkraftbewehrung	8
2.2 Balkenversuche zum Einfluss der Schubslankheit	9
2.3 Berücksichtigung des direkten Lastabtrags in verschiedenen Baubestimmungen	10
2.4 Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung	11
2.5 Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten aus Stahlbeton	13
3 Ermittlung der Beanspruchung bei Plattentragwerken	14
4 Versuche zur Querkrafttragfähigkeit von Stahlbeton Fahrbahnplatten	19
4.1 Versuche von Regan	19
4.1.1 Erkenntnisse	20
4.2 Versuche von Muttoni und Rodriguez	21
4.2.1 Erkenntnisse	24
4.3 Versuche von Rombach und Latte	25
4.3.1 Kragarme	27
4.3.2 Innenfelder	29
4.3.3 Erkenntnisse:	29
4.4 Versuche von Reißer und Hegger	30
4.4.1 Einfeldplattenversuche	31
4.4.2 Erkenntnisse Einfeldplatten	34
4.4.3 Kragplattenversuche	34
4.4.4 Erkenntnisse Kragplatten	37
4.5 Versuche von Lantsoght und Walraven	37
4.5.1 Erkenntnisse:	43
4.6 Versuche von Natário und Muttoni	43
4.6.1 Erkenntnisse	45
4.7 Zusammenstellung der Erkenntnisse und Forschungsbedarf	45

4.8	Zielsetzung.....	48
5	Eigene Versuche an Stahlbetonplatten unter konzentrierten Einzellasten.....	49
5.1	Versuche mit einer Einzellast	52
5.2	Variation der Bewehrung.....	56
5.3	Versuche mit zwei Blocklasten.....	58
5.4	Versuche an äquivalenten Meterstreifen.....	60
5.5	Zusammenfassung	60
5.6	Direkte Erkenntnisse aus der Versuchsreihe an der TUHH	62
6	Grundlagen der nichtlinearen FEM-Berechnungen	65
6.1	Verwendetes Stoffmodell für den Beton	65
6.1.1	Beton unter einachsigem Zug	65
6.1.2	Beton unter einachsigem Druck	68
6.1.3	Schädigung des Betons	71
6.1.4	Einachsiale Spannungsdehnungsbeziehungen und Schädigung für die Simulation	74
6.1.5	Mehrachiale Beanspruchung	75
6.2	Modellierung des mechanischen Verhaltens der Bewehrung.....	79
6.3	Verbundverhalten.....	79
6.4	Berechnungsmethode.....	79
6.4.1	ABAQUS-Standard	79
6.4.2	ABAQUS-Explizit.....	81
6.5	Steuerung der expliziten Berechnung.....	83
6.5.1	Amplitude der Laststeigerung.....	83
6.5.2	Massenskalierung.....	84
6.5.3	Dämpfung	84
6.6	Einflüsse der Eingangsparameter des Materialmodells	85
6.6.1	Dilatanzwinkel ψ	85
6.6.2	Exzentrizität e_{cc} bzw. ε	86
6.6.3	Biaxial/uniaxial compression plastic strain ratio σ_{b0}/σ_{c0}	86
6.6.4	Invariant stress ratio K_c	86
6.7	Fazit Materialmodell und Berechnungsmethode	86
6.8	Zusammenfassung und Empfehlungen	87
7	Anwendung / Validierung der Simulation.....	89
7.1	Validierung	90
7.1.1	FE-Modell.....	90
7.1.2	Ergebnisse der FE-Simulation	90
7.1.3	Last-Verformungskurven.....	91
7.1.4	Rissbilder	91

7.1.5 Stahldehnungen.....	92
7.1.6 Dickenänderungen	93
7.1.7 Rissweiten.....	94
7.1.8 Grenzen der Simulation	94
7.1.9 Zusammenfassung Validierung	96
7.2 Tiefergehende Untersuchungen mit der nichtlinearen FEM.....	97
7.2.1 Einfluss der Plattenbreite	97
7.2.2 Bestimmung nichtlinearer Schnittgrößen	98
7.2.3 Ermittlung der Querkräfte.....	99
7.2.4 Querkraftverteilung in ausgewählten Schnitten.....	100
7.2.5 Vergleich der nichtlinearen Querkräfte mit linear-elastischen Ergebnissen	100
7.2.6 Fazit Querkraftverteilung.....	103
8 Querkrafttragfähigkeit von Stahlbeton-Fahrbahnplatten	104
8.1 Vorbemerkungen	104
8.2 Auswahl repräsentativer Versuche und Festlegung wichtiger Randbedingungen.....	104
8.2.1 Maßgebender Schnitt zu Bestimmung der Hauptquerkraft.	110
8.2.2 Ermittlung des Einflusses des direkten Lastabtrags über Druckstreben ins Auflager.	113
8.2.3 Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung.	117
8.2.4 Einflussparameter auf die Querkrafttragfähigkeit	120
8.2.5 Zusammenfassung	121
8.2.6 Probleme der statistischen Auswertung.....	122
8.3 Weiterführende Betrachtungen zum Querkraftwiderstand von Platten	124
9 Phänomenologische Betrachtungen zum Lastabtrag von konzentrierten Lasten....	128
9.1 Direkter Lastabtrag von Einzellasten nahe dem Auflager	128
9.2 Durchstanzen oder Querkraftversagen?.....	132
9.2.1 Charakteristika des Durchstanzens	133
9.2.2 Gegebenheiten bei Kragplatten unter konzentrierten Einzellasten.....	134
9.2.3 Analyse des Tragverhaltens	134
9.2.4 Fazit	142
9.3 V_{ced} - Anteil der geeigneten Biegedruckkraft bei gevouteten Platten.....	143
9.4 Berücksichtigung von Linien- und Flächenlasten.....	143
10 Zusammenfassung und Ausblick	145
10.1 Zusammenfassung	145
10.2 Ausblick	147
11 Literaturverzeichnis	149
Formelzeichen, Variablen und Abkürzungen	157
Verwendete Software	163

Anhang A: Datenbank repräsentativer Versuche	A-1
Anhang B: Validierung der nichtlinearen Simulationen	B-1
Versuchsreihe an der TUHH (Henze & Rombach, 2017a).....	B-2
Schnittgrößenvergleiche <i>nIFEM</i> und <i>leFEM</i>	B-22
Versuchsreihe an der EPFL (Natário F. M., 2015)	B-24
Versuchsreihe an der TUHH (Rombach et al. 2009)	B-27
Anhang C: Materialkennwerte in ABAQUS	C-1
Grundparameter.....	C-1
Materialfunktionen im Druckbereich	C-2
Materialfunktionen im Zugbereich.....	C-7
Wertepaare für die direkte Eingabe in ABAQUS	C-9
Lebenslauf	