

Zur Tragfähigkeit von Stahlbeton- Fahrbahnplatten ohne Querkraftbewehrung

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Sören Latte

aus
Hamburg

2010

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Günter A. Rombach

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer

Tag der mündlichen Prüfung: 27.09.2010

Schriftenreihe des Instituts für Massivbau der TUHH

Heft 6

Sören Latte

**Zur Tragfähigkeit von Stahlbeton-Fahrbahnplatten
ohne Querkraftbewehrung**

Shaker Verlag
Aachen 2011

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-Harburg, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0000-9

ISSN 1865-8407

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

Vorwort

Trotz Jahrzehnte langer Forschungsarbeiten, die ersten Untersuchungen wurden von Mörsch in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts durchgeführt, ist die Querkraftbemessung von Stahlbetonkonstruktionen ohne Querkraftbewehrung immer noch nicht zufriedenstellend geklärt. Dies zeigt sich unter anderem an den sehr unterschiedlichen Bemessungsansätzen in den verschiedenen Normen und den hieraus resultierenden großen Differenzen der rechnerischen Tragfähigkeit. Diese Problematik betrifft besonders Brückenfahrbahnplatten, da auf diesen hohe Flächen- und Radlasten wirken.

Mit Einführung der DIN 1045-1 im Jahre 2001 bzw. des DIN-Fachberichtes 102 ist die Querkraftbemessung in den Mittelpunkt des Interesses von Tragwerksplanern und Aufsichtsbehörden gerückt. Nach den dort festgelegten Bemessungsansätzen kann die Tragfähigkeit von Brückenfahrbahnplatten aus Stahlbeton rechnerisch häufig nicht mehr ohne Querkraftbewehrung nachgewiesen werden. Der Einbau von Bügeln in neue Bauwerke ist jedoch mit großem Aufwand und damit hohen Kosten verbunden. Bei vielen Brücken im Bestand, welche nach DIN 1045:88 bzw. DIN 1075 bemessen wurden, ist die rechnerische Tragfähigkeit mit vollem Sicherheitsabstand nach den heutigen Regelungen nicht mehr gegeben. Eine einfache Sanierung, d.h. der nachträgliche Einbau von Querkraftbewehrung in eine Stahlbetonplatte, ist kaum möglich. Es werden daher dringend neue, zutreffendere Bemessungskonzepte zum Nachweis von Stahlbetonplatten benötigt, welche durch hohe Querkräfte beansprucht sind. Zu deren Entwicklung möchte die Forschungsarbeit von Herrn Latte beitragen.

Die vorliegende Dissertationsschrift besitzt zwei Schwerpunkte: Zum einen sind es die umfangreichen statistischen Analysen zur Aussagekraft verschiedener bekannter Querkraftmodelle. Hierzu wird auf eine Datenbank zurückgegriffen, welche die Ergebnisse von 374 Balkenversuchen enthält. Die Problematik statistischer Untersuchungen, wie beispielsweise die Verteilung der Versuchswerte, wird eingehend erläutert. Auf der Grundlage von Regressionsanalysen entwickelt Herr Latte ein neues Bemessungsmodell, welches gute Ergebnisse liefert. Zum anderen wurden zur Untersuchung des flächigen Tragverhaltens von Platten umfangreiche experimentelle Untersuchungen an großmaßstäblichen Stahlbetonplatten durchgeführt und mittels stofflich nichtlinearer FE-Analysen analysiert. Es zeigt sich, dass die bestehenden Rechenmodelle die Tragfähigkeit von Platten unter Radlasten erheblich unterschätzen.

Diese Forschungsarbeit liefert einen wesentlichen Beitrag zum besseren Verständnis des Biege- und Querkrafttragverhaltens von Stahlbetonbalken und -platten. Zur Entwicklung zutreffender Bemessungsmodelle sind jedoch noch weitere Untersuchungen erforderlich.

Hamburg, Oktober 2010
Prof. Dr.-Ing. G. A. Rombach.

Abstract

After the introduction of the new generation of standards, which are based on the concept of partial safety factors, it became apparent, that the design of reinforced concrete bridge deck slabs is now often governed by the shear bearing capacity. While a sufficient bearing capacity of thin slabs is frequently only reached with the alignment of shear reinforcements, it has formerly been common practice to construct thin bridge deck slabs without shear reinforcement. It is highly essential to further examine this evident discrepancy in order to achieve sound design regulations and correctly assess the reliability of existing bridge deck slabs. Hence, the purpose of this thesis is to analyse the bearing behaviour of slabs under concentrated loads, such as wheel loads, and to further improve the evaluation of the shear bearing capacity of reinforced concrete bridge deck slabs without shear reinforcement. The influencing factors, that have to be integrated in an appropriate design formula, are systematically investigated. Furthermore, the load bearing behaviour of reinforced concrete slabs without shear reinforcement under concentrated loads is studied experimentally and numerically. Fundamental models for the numerical analysis of the shear bearing capacity of reinforced concrete slabs are discussed and compared with test results.

The first part of the thesis focuses on the bearing behaviour of reinforced concrete members under shear based on studies of published research results. A substantial database comprising test data and results of experiments with reinforced concrete beams exhibiting shear failures and various models to calculate the shear bearing capacity are discussed. A new model based on the theory of the critical crack in combination with fracture mechanics is proposed. The design formula is developed by a regression analysis of the shear database. The model is verified and compared to the shear database and other models. Particular emphasis is devoted to the accuracy of the various models predicting the bearing capacity of tests with characteristics typical for bridge deck slabs. The model, which has been developed in this thesis, shows a better agreement with test results than the design formula of the present DIN 1045-1. Furthermore, the influence of typical bridge deck slab geometries and load arrangements is examined. A beneficial effect of a tapered slab bottom on the shear capacity as implemented in the DIN code with the reduction shear force V_{ce} cannot be verified by test results.

The second part of the thesis starts with an overview of methods for calculating the shear force distribution in slabs. Following this, large scale tests with slabs under point loads, representing bridge deck slabs, are described and analysed. A procedure for calculating the bearing capacity of bridge deck slabs without shear reinforcement accounting for possible deviations of principal moment, principal shear force and reinforcement directions is described and compared with test results. It appears that the implementation of the known design formulas provides conservative estimates of the shear bearing capacity. While the capacities calculated with various design formulas differ little, the choice of method determining the design shear force distribution results in a considerable variation of the calculated bearing capacity. The need for further experimental research of slabs under pointloads with and without haunches is emphasized.

Kurzfassung

Mit der Einführung der neuen, auf dem Teilsicherheitskonzept basierenden, Normengeneration zeigte sich, dass die Tragfähigkeit von Brückenfahrbahnplatten aus Stahlbeton häufig nicht mehr ohne Querkraftbewehrung nachgewiesen werden kann. Dies steht im Widerspruch zur langjährigen Praxis, nach der die Platten von Brücken meist ohne eine Bügelbewehrung im stegnahen Bereich ausgeführt wurden. Eine Untersuchung dieser Diskrepanz ist für die Baupraxis dringend notwendig. Die vorliegende Arbeit soll daher einen Beitrag zum besseren Verständnis des Tragverhaltens von Platten unter örtlich konzentrierten Einwirkungen, wie Radlasten, und damit zur Weiterentwicklung der Bemessung von Fahrbahnplatten ohne Querkraftbewehrung leisten. Hierzu werden die wesentlichen Einflussfaktoren, die in einem solchen Bemessungskonzept zu integrieren sind, systematisch analysiert. Die Tragfähigkeit von Stahlbetonplatten ohne Querkraftbewehrung unter Punktlasten wird durch Versuche und numerische Berechnungen untersucht. Weiterhin werden die wesentlichen Rechenmodelle für die Anwendung bei Fahrbahnplatten erörtert und mit einer Gegenüberstellung zu Versuchsergebnissen überprüft.

Der erste Abschnitt der Arbeit befasst sich mit dem Studium des Tragverhaltens von Stahlbetonbauteilen unter Querkraftbelastung anhand von veröffentlichten Forschungsergebnissen. Eine umfangreiche Datenbank mit Versuchsergebnissen zur Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonbalken und verschiedene Querkraftmodelle aus der Literatur werden ausführlich diskutiert. Mittels Regressionsanalysen der Datenbank wird ein neues Rechenmodell entwickelt, das mechanisch durch die bestehende Theorie des kritischen Biegeschubrisses und der Anwendung der Bruchmechanik begründet ist. Anschließend erfolgt eine Überprüfung dieses und weiterer Bemessungsansätze durch eine Gegenüberstellung der Rechenergebnisse mit den Versuchswerten der Querkraftdatenbank. Insbesondere wird das Sicherheitsniveau bei Versuchen mit für Fahrbahnplatten typischen Parametern betrachtet. Die Auswertung zeigt, dass der entwickelte Ansatz weitaus bessere Ergebnisse in diesen Parameterbereichen liefert, als der Ansatz der DIN 1045-1. Des Weiteren werden Einflüsse typischer bei Fahrbahnplatten auftretender Bauteilgeometrien und Belastungsanordnungen auf die Querkrafttragfähigkeit untersucht. Es zeigt sich, dass die in der DIN erlaubte Abminderung der bemessungsrelevanten Querkraft durch Anwendung des Abzugswertes V_{cc} bei Vouten teilweise widersprüchlich ist. Weiterhin liegen in der Literatur nur wenige übertragbare Versuche vor, so dass der Einfluss einer Voute auf die Tragfähigkeit von Platten ohne Querkraftbewehrung experimentell nicht abgesichert ist.

Der zweite Abschnitt widmet sich zunächst den verschiedenen Ansätzen zur Schnittgrößenberechnung von Brückenfahrbahnplatten. Es folgt eine Darstellung speziell auf diese Bauteile zugeschnittener Versuche an Platten unter Einzellasten. Hieraus wird ein Modell zur Berechnung der Tragfähigkeit von Fahrbahnplatten ohne Querkraftbewehrung mit Berücksichtigung abweichender Momenten-, Querkraft- und Bewehrungsrichtung entwickelt und dieses mit Versuchsergebnissen verglichen. Es zeigt sich, dass die bekannten Rechenansätze die Tragfähigkeit auf der sicheren Seite abschätzen. Während die Abweichungen unterschiedlicher Querkraftmodelle relativ gering sind, ergeben sich aus der Systembildung zur rechnerischen Lastausbreitung und Schnittgrößenermittlung, sowie bei Berücksichtigung des Abzugswertes V_{cc} bei Vouten wesentliche Differenzen der berechneten Tragfähigkeiten. Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Arbeit werden weitere experimentelle Untersuchungen empfohlen.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Abstract	II
Kurzfassung	III
Inhaltsverzeichnis.....	IV
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Übersicht	6
1.3 Abgrenzung.....	7
2 Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen	9
2.1 Allgemeines zur Bemessung von Stahlbetonquerschnitten	9
2.2 Stahlbetonbauteile unter Querkraftbeanspruchung.....	11
2.3 Tragwirkung von Stahlbetonbauteilen unter Querkraft	13
2.3.1 Zusammensetzung der Tragwirkung.....	13
2.3.2 Querkrafttragwirkung der Betondruckzone	14
2.3.3 Rissübergreifende Zugspannungen.....	16
2.3.4 Rissreibung	18
2.3.5 Dübeltragwirkung der Längsbewehrung.....	22
2.3.6 Druckbögen oder direkte Druckstreben	24
2.4 Zusammenfassung.....	25
3 Querkraftwiderstand des Stahlbetonquerschnitts.....	26
3.1 Einführung	26
3.2 Datenbank von Querkraftversuchen an Balken ohne Bügelbewehrung	28
3.3 Modelle zur Berechnung des Querkraftwiderstands von Stahlbetonquerschnitten	32
3.3.1 Allgemeines	32
3.3.2 Bemessungsgleichungen der DIN Normen.....	33
3.3.3 Stabwerkmodelle.....	42
3.3.4 Kamm- und Zahnmodelle	44
3.3.5 Modelle auf Basis der Druckzonentragfähigkeit	45
3.3.6 Fracturing Truss Model und energetischer Maßstabseffekt.....	47
3.3.7 Modified Compression Field Theory	49
3.3.8 Theorie des kritischen Biegeschubrisses.....	55
3.3.9 Kritischer Biegeschubriss mit energetischem Maßstabseffekt	57
3.4 Vergleich der Rechenmodelle.....	62
3.5 Zusammenfassung.....	72
4 Einflüsse der Bauteilgeometrie auf die Querkrafttragfähigkeit.....	73
4.1 Einführung	73

4.2	Querkrafttragfähigkeit bei lagernaher Laststellung.....	74
4.3	Querkrafttragfähigkeit bei veränderlicher Querschnittshöhe.....	77
4.3.1	Balkenversuche mit veränderlicher Querschnittshöhe in der Literatur.....	77
4.3.2	Berücksichtigung veränderlicher Querschnittshöhen im Rechenmodell.....	80
4.4	Zusammenfassung.....	86
5	Fahrbahnplatten unter konzentrierter Lasteinwirkung.....	88
5.1	Einführung.....	88
5.2	Schnittgrößenermittlung bei Platten.....	89
5.3	Fahrbahnplatten von Brücken.....	94
5.4	Traglastversuche mit Platten unter konzentrierten Lasten.....	97
5.4.1	Versuche von Leonhardt und Walther.....	97
5.4.2	Großmodellversuche der EPF Lausanne.....	99
5.4.3	Großmodellversuche der TU Hamburg-Harburg.....	102
5.5	Berechnung der Tragfähigkeit von Fahrbahnplatten ohne Querkraftbewehrung.....	111
5.5.1	Rechenmodelle für Platten unter konzentrierten Lasten.....	111
5.5.2	Vergleich der Rechenmodelle mit Versuchen.....	116
5.6	Zusammenfassung.....	128
6	Numerische Untersuchungen.....	130
6.1	Einführung.....	130
6.2	Zusammenstellung des nichtlinearen FE-Modells.....	130
6.2.1	Beton unter Zugbeanspruchung.....	130
6.2.2	Beton unter Druckbeanspruchung.....	133
6.2.3	Beton unter mehraxialer Beanspruchung.....	134
6.2.4	Materialmodell für Beton.....	135
6.2.5	Modellierung der Bewehrung.....	141
6.3	Untersuchungen von Stahlbetonbalken.....	141
6.4	Numerische Untersuchungen von Stahlbetonplatten.....	145
6.5	Zusammenfassung.....	152
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	154
7.1	Zusammenfassung.....	154
7.2	Ausblick.....	157
	Literaturverzeichnis.....	159
	Formelzeichen und Abkürzungen.....	168