

Querkrafttragfähigkeit zugbeanspruchter Stahlbetonplatten in Verbundbrücken

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Jochen Ehmann
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. U. Kuhlmann
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. G. Hanswille
Prof. Dr.-Ing. B. Novák

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Mai 2003

Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart
2003

Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf; Nr. 2003-3

Jochen Ehmann Querkrafttragfähigkeit zugbeanspruchter Stahlbetonplatten
in Verbundbrücken

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart
Telefon: (0711) 685 6245
Telefax: (0711) 685 6236

Redaktion Dr.-Ing. Hans-Peter Günther

D 93

© Institut für Konstruktion und Entwurf; Stuttgart 2003
Alle Rechte vorbehalten

ISSN 1439-3751

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart.

Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Lehrstuhl für Stahlbau, Holzbau und Verbundbau und Leiterin des Instituts für Konstruktion und Entwurf der Universität Stuttgart, danke ich sehr herzlich für ihre Unterstützung bei der Durchführung der Versuche und der Anfertigung dieser Arbeit. Ebenso danke ich ihr für die Übernahme des Hauptberichts.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart, und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hanswille, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Bergischen Universität Wuppertal, für die kritische Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Des Weiteren danke ich der Forschungsvereinigung der Arbeitsgemeinschaft der Eisen und Metall verarbeitenden Industrie e.V. (AVIF), dem Wirtschaftsverband Stahlbau und Energietechnik e.V. (SET) sowie der Firma Halfen für die finanzielle Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen und theoretischen Untersuchungen. Auch den Firmen Ed. Züblin AG (Stuttgart) Brückenbau Plauen (Neulsenburg) stahlbau lavis (Aschaffenburg) Dörnen Stahlbauwerk (Dortmund) und den Ingenieurbüros Meyer und Schubart (Wunstorf) Leonhardt Andrä und Partner (Stuttgart) Bornscheuer Drexler Eisele GmbH (Stuttgart) Schmitt Stumpf Frühauf und Partner (München) möchte ich meinen herzlichen Dank für die Beratung und Mitwirkung bei der Zusammenstellung der Daten ausgeführter Verbundbrücken aussprechen.

Herzlichen Dank auch an Herrn Dr.-Ing. habil. J. Ožbolt, der mir bei den Berechnungen mit Finiten Elementen zur Seite gestanden ist, sowie an Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Zilch und seinen Mitarbeitern C. Brandes, A. Jähring, F. Spittra und M. Staller für die gute Zusammenarbeit.

Ein weiterer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen, den Angestellten und den wissenschaftlichen Hilfskräften des Instituts für Konstruktion und Entwurf für die Anregungen, die gute Zusammenarbeit und das stets freundliche Betriebsklima. Ich wünsche allen viel Erfolg für ihren weiteren Lebensweg.

Für die Durchsicht des Manuskripts möchte ich mich bei Kai Kürschner, Else Ehmann und Claudia Ehmann bedanken. Für die Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Forschungsarbeiten danke ich im Besonderen Willy Kurz, Harry Wurster, Seika Nakajima und Matthias Zipperlen. Für die Anfertigung der Zeichnungen danke ich Claudia Ehmann und für die französische Übersetzung der Kurzdarstellung Franck Moreau.

Ein spezieller Dank gilt meiner Gemeinde, meinen Eltern und meiner lieben Frau, die mich in der vergangenen Zeit getragen und gestärkt haben. Mein innigster Dank richtet sich an meinen Vater im Himmel, der mein Leben in seiner guten Hand hält.

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen	IX
Kurzdarstellung	XII
Abstract	XII
Résumé	XIII
1 Einleitung	15
1.1 Motivation	15
1.2 Überblick	16
2 Stand der Forschung	18
2.1 Allgemeines	18
2.2 Traganteile	18
2.3 Querkraftversuche an Bauteilen unter Längszugbeanspruchung	22
2.3.1 Allgemeines	22
2.3.2 Elstner und Hognestad (1957)	22
2.3.3 Mattock (1969)	23
2.3.4 Haddadin, Hong und Mattock (1971)	24
2.3.5 Regan (1971)	26
2.3.6 Leonhardt, Rostásy, Mac Gregor und Patzak (1977)	27
2.3.7 Johnson und Arnaouti (1980)	29
2.3.8 Bhide und Collins (1989)	30
2.3.9 Sørensen, Løset und Olsen	31
2.3.10 Saul und Koch (1989)	32
2.3.11 Emrich (1993)	34
2.3.12 Tamura, Shigematsu und Hara (1994)	35
2.3.13 Yamada und Kiyomiya (1995)	36
2.3.14 Adebar und Collins (1996)	38
2.4 Fazit der Versuche	40
2.5 Mechanische Erklärung der Querkraftabtragung	43
2.5.1 Allgemeines	43
2.5.2 Überblick über die Modellierung der Querkraftabtragung	43
2.5.3 Mechanische Modelle mit Zugkomponente	46
2.5.3.1 Modifizierte Druckfeldtheorie	46
2.5.3.2 Theorie von Zararis	48
2.5.3.3 Zahnmodell von Reineck	50
2.5.3.4 Dreigeteiltes Querkraft-Tragmodell von Specht	53
2.5.3.5 Modelle von Emrich	55
2.6 Fazit der Modellbildung	58

3	Versuche.....	60
3.1	Allgemeines.....	60
3.2	Materialkennwerte.....	60
3.2.1	Beton.....	60
3.2.2	Betonstahl.....	62
3.3	Versuchsdurchführung.....	64
3.3.1	Versuchs- und Messeinrichtung.....	64
3.3.2	Versuchsprogramm.....	66
3.3.3	Versuchsablauf.....	68
3.4	Versuchsauswertung.....	73
3.4.1	Bestimmung der Bruchlast.....	73
3.4.2	Korrektur der Ergebniswerte.....	74
3.4.2.1	Allgemeines.....	74
3.4.2.2	Theorie II. Ordnung.....	74
3.4.2.3	Normierung von Geometrie und Materialeigenschaften.....	74
3.4.3	Einfluss der Normalkraft.....	77
3.4.4	Einfluss des Bewehrungsgrads.....	81
3.4.5	Einfluss der Betonfestigkeit.....	84
3.4.6	Einfluss der Schubslankheit.....	85
3.4.7	Versuche mit Bügelbewehrung.....	87
3.4.8	Einfluss der Trennrisse.....	88
3.4.9	Einfluss der Bewehrungsanordnung.....	90
3.4.10	Rissabstand.....	91
3.5	Fazit.....	91
4	Statistische Versuchsauswertung.....	93
4.1	Linearer Ansatz.....	93
4.2	Auswirkungen auf die Praxis.....	97
4.3	Bi-linearer Ansatz mit horizontalem Verlauf.....	98
4.4	Fazit.....	99
5	Numerische Untersuchungen.....	101
5.1	Allgemeines.....	101
5.2	Das Programm MASA.....	101
5.3	Modellentwicklung.....	102
5.4	Parameterstudie.....	108
5.4.1	Allgemeines.....	108
5.4.2	Normalkraft.....	109
5.4.3	Bewehrungsgrad.....	111
5.4.4	Betongüte.....	113
5.4.5	Bauteilhöhe.....	115
5.5	Fazit.....	117

6	Modellierung des Querkraftversagens bei Längszug.....	118
6.1	Vorliegende Modelle und Theorien	118
6.1.1	Allgemeines.....	118
6.1.2	Die Modifizierte Druckfeldtheorie	118
6.1.3	Das Modell von Reineck	119
6.1.4	Fazit der untersuchten Modelle	121
6.2	Das Modell von Zararis und Papadakis.....	121
6.3	Vergleich des Modells von Zararis/Papadakis mit DIN 1045-1	125
6.3.1	Allgemeines.....	125
6.3.2	Bewehrungsgrad	125
6.3.3	Betongüte.....	126
6.3.4	Bauteilhöhe	127
6.3.5	Schub schlankheit.....	128
6.4	Berücksichtigung der Normalkraft im Modell von Zararis/Papadakis (Modell 1).....	129
6.5	Eigenes Modell (Modell 2).....	133
6.6	Weitere Bewertung der Modelle 1 und 2	137
6.6.1	Allgemeines.....	137
6.6.2	Normalkraft.....	138
6.6.3	Bewehrungsgrad	139
6.6.4	Betongüte.....	141
6.6.5	Bauteilhöhe und Schub schlankheit.....	142
6.7	Fazit.....	142
7	Fazit	144
7.1	Erkenntnisse und Ergebnisse.....	144
7.2	Ausblick	145
8	Literaturverzeichnis.....	147
A1	Tabellarische Zusammenstellung der Versuche aus der Literatur	153
A2	Bewehrungsplan der Versuchskörper C3 bis C8.....	156
A3	Zusammenstellung untersuchter Verbundbrücken.....	157
A4	Übersicht über die Versuche	159
A5	Ergebnisse der numerischen Untersuchungen	162
A6	Parametereinflüsse bei Modell 1	163

Bezeichnungen

a	Schubspannweite (Abstand der Last zum Lager)
A_c	Betonfläche
A_s	Bewehrungsfläche
A_{sl}	Fläche der Zugbewehrung, die wirksam verankert ist
α, α_r	Rissneigungswinkel
α_z	Verhältnis des Rissabstandes zur statischen Nutzhöhe
b	Bauteilbreite
b_n	Nettobreite des Querschnitts
b_w	Stegbreite oder kleinste Querschnittsbreite in der Zugzone
β	Rissneigungswinkel
β	Abminderungsfaktor für auflagernahe Einzellasten
β_1	Beiwert zur Berechnung des Abstandes der Druckkraft von der Oberkante
β_{cc}	Faktor zur Berücksichtigung der zeitlichen Entwicklung des Betons
β_R	Rechenfestigkeit des Betons
β_w	Würfeldruckfestigkeit des Betons
β_z	Zugfestigkeit des Betons
c	Druckzonenhöhe
C	Druckkraft in der Druckzone
C_f	Druckkraft in der Druckzone unter der Lasteinleitung
d	statische Nutzhöhe
d_1	Abstand der Bewehrungsstabachse von der Betonoberfläche
d_s	Bewehrungsstabdurchmesser
D	Druckkraft in der Druckzone
ΔD_b	Änderung der Druckkraft in der Druckzone
e	Exzentrizität
E_{cm}	mittlerer Elastizitätsmodul des Betons
E_h	Verfestigungsmodul
E_s	Elastizitätsmodul des Stahls
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	Hauptdehnungen
ε_c	Betondehnung
ε_s	Stahldehnung
f	Durchbiegung
Δf	Lastschrittweite
f_{ck}	charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit
f_{cm}	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit
f_{ctm}	Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit
f_{um}	Zugfestigkeit des Stahls
f_{ym}	Streckgrenze des Stahls
G_F	Bruchenergie
G_{F0}	Ausgangswert der Bruchenergie

γ_N	Teilsicherheitsbeiwert für Normalkraftanteil
h	Höhe
H_r	Horizontalkomponente der Rissreibung
η_1	Beiwert zur Berücksichtigung der Betonart (Normalbeton oder Leichtbeton)
φ	Rissneigungswinkel
k	Konstante
k_z	Verhältnis des inneren Hebelarms z zur statischen Nutzhöhe d
κ	Faktor zur Berücksichtigung des Maßstabeffektes
l_{cr}	äquivalenter Spaltzylinderdurchmesser
L	Länge
M	Moment
N	Normalkraft
N_{Ed}	Bemessungswert der Längskraft
ν	Querdehnzahl
P	Kraft, Einzellast
Q	Querkraft
Q_b	Querkrafttraganteil des Betons
Q_d	Querkrafttraganteil der Längsbewehrung
Q_D	Querkrafttraganteil der Druckzone
$Q_{Dü}$	Querkrafttraganteil der Längsbewehrung
Q_N	Abzugswert der Querkrafttragfähigkeit bei Längszug
Q_r	Querkrafttraganteil der Rissreibung (bei Reineck)
Q_r	Querkrafttragfähigkeit (bei Specht)
Q_s	Querkrafttraganteil der Querkraftbewehrung
Q_v	Querkrafttraganteil der vorgespannten Längsbewehrung
θ	Rissneigungswinkel
ϑ	Rissneigungswinkel
R	resultierende Kraft
ρ	Bewehrungsgrad
ρ_l	Bewehrungsgrad der Längsbewehrung
ρ_w	Bewehrungsgrad der Bügelbewehrung
s_{mr}	mittlerer Rissabstand
s_r	Rissabstand
σ_1, σ_2	Hauptspannungen
σ_{cd}	Bemessungswert der Betonlängsspannung
σ_N	Normalspannung
σ_t, σ_{ct}	Zugspannung
t	Zeit
T	Zugkraft in der Bewehrung
T_f	Zugkraft in der Bewehrung unter der Lasteinleitung
ΔT	Änderung der Zugkraft in der Bewehrung
$\Delta \tau$	Abminderung der Schubtragfähigkeit

$\text{zul.}\tau_0$	zulässige Schubspannung
τ_{011}	zulässige Schubspannung in Trägern ohne Schubbewehrung
τ_{0r}	maximale Schubspannung (Mittelwert)
v	querschnittsbezogene Querkraft
v_u	querschnittsbezogene Bruchquerkraft
V	Querkraft
ΔV	Querkraftabzug aus Theorie II. Ordnung
V_c	Querkrafttraganteil der Druckzone
V_{cal}	Querkrafttragfähigkeit mit mittleren Materialkennwerten
V_d	Querkrafttraganteil der Dübelwirkung der Längsbewehrung
$V_{d,cr}$	Maximalkraft der Dübelwirkung
$V_{d,20}$	Maximalkraft der Dübelwirkung bei Bewehrungsstabdurchmesser 20 mm
$V_{d,25}$	Maximalkraft der Dübelwirkung bei Bewehrungsstabdurchmesser 25 mm
V_{korr}	Versuchswert, korrigiert um Querkraftabzug aus Th. II. O. und Betonwerte
V_{korr}^*	Versuchswert, korrigiert um Querkraftabzug aus Theorie II. Ordnung
$V_{Rd,ct}$	Bemessungsquerkraft für Träger ohne Querkraftbewehrung
$V_{Rd,ct}^{mod}$	modifizierte Bemessungsquerkraft für Träger ohne Querkraftbewehrung
V_{mess}^{DIN}	Querkrafttragfähigkeit nach DIN 1045-1 mit Ist-Werten des Versuchs
V_{nom}^{DIN}	Querkrafttragfähigkeit nach DIN 1045-1 mit Soll-Werten des Versuchs
V_{test}	Versuchswert der Querkraft
V_u	Bruchquerkraft
w, w_r	Rissöffnung
z	innerer Hebelarm

Kurzdarstellung

Im Verbundbau aus Stahl und Beton können in der Betonplatte bereichsweise oder über die gesamte Länge des Trägers Zugnormalkräfte auftreten, die weit größer sind als die Zugnormalkräfte in reinen Stahlbeton- bzw. Spannbetonbauwerken. So ist die in Längsrichtung nicht vorgespannte Fahrbahnplatte einer Stabbogenverbundbrücke oder die Betonplatte über der Stütze von Durchlaufträgersystemen i. A. schon im Gebrauchszustand fast vollständig gerissen. Über diese Risse hinweg müssen **Querlasten** wie beispielsweise die Radlasten des über die Fahrbahnplatte rollenden Verkehrs abgetragen werden.

Die Tragfähigkeit von „gezogenen“ Platten ohne Querkraftbewehrung unter Querbela- tung wurde bislang nicht umfassend untersucht. Für die Bemessung wird i. A. eine Gleichung verwendet, die für die Ausnutzung der tragfähigkeitssteigernden Wirkung einer **Längsdruckkraft** z. B. aus Vorspannung bestimmt wurde.

Diese Arbeit hat zum Ziel die Querkrafttragfähigkeit infolge **Zugbeanspruchung** gerissener Verbundplatten umfassend zu untersuchen. Dazu werden zuerst Versuche anderer Forscher in diesem Themenbereich analysiert sowie einige Modelle zur Querkraftabtragung auf ihre Anwendbarkeit für Stahlbetonplatten mit Längszugkräften überprüft. Eigene Versuche, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit durchgeführt wurden, werden beschrieben und ausgewertet. Ein numerisches Modell auf der Grundlage der Methode der Finiten Elemente wird durch Versuchsergebnisse verifi- ziert und zur Untersuchung verschiedener Einflussparameter auf die Querkrafttragfä- higkeit verwendet. Ein mechanisches Modell wird entwickelt, das den Versagensme- chanismus des Querkraftversagens bei gleichzeitiger Normalkraftbeanspruchung beschreibt. Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit münden in einen Bemessungsan- satz, der die Querkrafttragfähigkeit von Platten unter Längszug wirklichkeitsnah erfasst.

Abstract

In concrete slabs of composite structures tension forces may occur over the whole length or partially, exceeding the tension forces in mere reinforced or prestressed structures. For example the non-prestressed concrete slab in a bowstring arch bridge or the concrete slab above the internal support of a continuous beam are generally almost completely cracked, even under service loading. Those cracks have to transmit the shear forces induced by concentrated loads such as wheel loads.

The investigation of the shear capacity of slabs in tension without shear reinforcement has not been processed very far. In practice a design equation is used, that has been derived in order to take into account the positive effect of the compression force in prestressed members.

The aim of this work is to thoroughly study the shear capacity of composite slabs cracked by tension stresses. At the beginning test results of other scientists are analysed and some theoretical models for the shear failure mechanism are investigated in order to see, whether they apply for reinforced concrete plates in tension. Laboratory experiments that have been made during this research work are described and evaluated. A numerical model on the basis of the Finite Element method is verified by the test results and used to investigate the influence of different parameters on the shear strength. A new concept is developed modelling the shear failure mechanism of slabs in tension. The results yield a design equation rendering realistic values for the shear capacity of reinforced concrete slabs in tension.

Résumé

Dans la construction mixte acier-béton, les dalles de béton peuvent être soumises, soit partiellement ou sur toute leur longueur, à des forces normales de traction qui sont bien supérieures aux forces normales de traction que l'on rencontre dans les structures de construction de béton armé ou de béton précontraint. La dalle de roulement non précontrainte dans sa direction longitudinale d'un pont mixte arc ou encore une dalle sur appuis d'un système continu, sont deux exemples de structures en général fissurées déjà à l'état de service. Ces fissures doivent cependant transmettre des forces de cisaillement causées par les charges de trafic.

La résistance de dalles tendues sans armature de cisaillement soumises à une charge transversale n'a, jusqu'à présent, été que peu étudiée. La méthode actuelle de dimensionnement consiste à utiliser une formule développée à prendre en compte l'effet positif de compression d'une précontrainte.

Ce travail a pour objectif d'étudier la résistance au cisaillement de dalles mixtes fissurées soumises à un effort de traction. Pour ce faire, des essais effectués par d'autres chercheurs sont analysés et quelques modèles théoriques du mécanisme de rupture au cisaillement sont examinés afin de valider si ces derniers sont applicables au cas de dalles en béton armé soumises à des forces de traction longitudinales. Les essais de laboratoires qui ont été effectués lors de cette étude sont exposés et analysés. Un modèle par éléments finis est vérifié par les résultats des essais et utilisé afin d'étudier l'influence de différents paramètres sur la résistance au cisaillement. De plus, un modèle théorique est développé pour décrire le mécanisme de rupture au cisaillement de dalles soumises à la traction. Enfin, les résultats de cette recherche conduisent à l'élaboration d'une formule de dimensionnement qui évalue la résistance au cisaillement de dalles soumises à une traction longitudinale.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Zugband einer Stabbogenverbundbrücke entsprechend Bild 1.1 tritt der Fall auf, dass eine Querkraft über die durch die Zugkraft entstandenen Risse der Platte übertragen werden muss /42/, /43/. Ein anderes Beispiel ist die Fahrbahnplatte einer breiten Verbundbrücke entsprechend Bild 1.2, die aus wirtschaftlichen Gründen in Brückenlängsrichtung spannt und aus Biegung der Verbundhauptträger im Stützbe-
reich in der Platte Zugnormalkräfte erhält /68/. Auch bei geneigten Stegen von Hohl-

kastenbrücken oder bei in Querrichtung geneigten Fachwerkstäben von Verbundbrücken verursachen die Verkehrslasten Querkraften und Zugnormalspannungen in Querrichtung der Fahrbahnplatte.

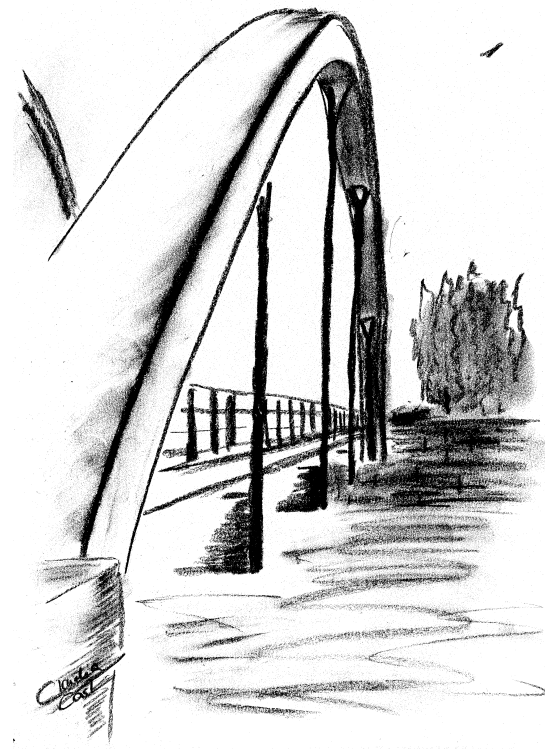


Bild 1.1: Stabbogenbrücke

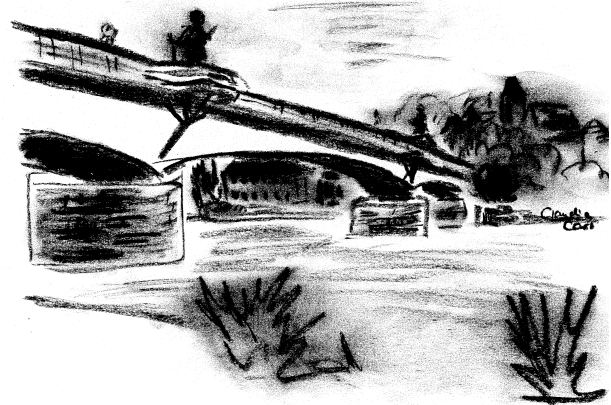


Bild 1.2: Verbunddeckbrücke

In ähnlichen Situationen im Massivbrückenbau kommt eine Vorspannung mit Spanngliedern zum Einsatz, so dass die auftretenden Zugkräfte überdrückt werden. Diese Methode ist aber nur begrenzt im Verbundbrückenbau sinnvoll anwendbar, da wegen des Steifigkeitsverhältnisses die Stahlkonstruktion in Brückenlängsrichtung den größten Anteil der Vorspannkraft aufnimmt. Außerdem werden durch das Betonkriechen noch weitere Anteile der Vorspannkraft des Betons auf den Stahl umgelagert. Eine Vorspannung in Längsrichtung wirkt nach einiger Zeit nur noch in geringem Maße auf den Beton. Im Verbundbau hat sich in Deutschland die Konstruktionsweise durchgesetzt die Betonplatte nur mit schlaffer Bewehrung auszuführen und die Rissbreiten durch eine günstige Anordnung der Bewehrung bzw. durch einen erhöhten Bewehrungsgrad zu begrenzen /28/ /39/, /40/, /41/.

Der Parameterbereich der Untersuchungen in dieser Arbeit ist auf den Verbundbrückenbau zugeschnitten. So orientiert sich die Wahl der Betongüte, des Bewehrungsgrades und der Plattendicke bei den experimentellen und theoretischen Untersuchungen an den Gegebenheiten des Brückenbaus. Dies bedeutet jedoch keineswegs, dass die Ergebnisse und Erkenntnisse nur für den Brückenbau ihre Gültigkeit hätten. Zwar tritt der Fall der gezogenen Betonplatte in Brücken häufiger auf, als dies im Hochbau geschieht, doch lassen sich auch dort Beispiele finden. Denkbar ist die Einspannung einer Platte zwischen zwei Kernen. Durch das Schwinden entstehen Normalzugspannungen, die allerdings durch Rissbildung aufgrund von Biegebeanspruchung oder nach Überschreiten der Betonzugfestigkeit teilweise wieder abgebaut werden. Bei Stahlbetonträgern mit großen Aussparungen in den Stegen entsteht ebenfalls eine Kombination von Querkraft und Normalzugkraft im Biegezugbereich /70/.

Alle beispielhaft genannten Bauteile sind entweder Platten oder „Bauteile von untergeordneter Bedeutung“ (EC 2-1-1, 4.3.2.1 (2) /16/), in denen auf eine Querkraftbewehrung verzichtet werden darf. Dieser Verzicht ist allerdings nur zulässig, wenn diese „nicht großen Zugspannungen ausgesetzt sind.“ Diese Einschränkung beruht u.a. darauf, dass für den Fall der Querkraftabtragung in zugbeanspruchten Bauteilen nur wenige Versuchsergebnisse vorliegen /34/.

Tatsächlich wurde bislang noch nicht ausreichend geklärt, wie Querkräfte über Trennrisse hinweg abgetragen werden können. Es liegen nur wenige grundlegende experimentelle Untersuchungen der Querkrafttragfähigkeit zugbeanspruchten Stahlbetonbauteile vor. Mechanische Modelle berücksichtigen die Wirkung einer Zugkraft meist gar nicht oder nur unzureichend. Für die Bemessung der Fahrbahnplatten von Stabbogenverbundbrücken wird die in der Normung (z.B. ARS 4/97 /3/ EC 2-1-1 /16/ oder DIN 1045-1 /14/) verankerte Bemessungsgleichung verwendet, die den Einfluss der Normalkraft berücksichtigt. Dieser Normalkraftanteil ist aus Querkraftversuchen mit Längsdruck hergeleitet worden. Für Längszug führt sie zu einer starken rechnerischen Abminderung der Querkrafttragfähigkeit. Die wenigen vorliegenden Versuchsergebnisse zeigen eine lediglich geringe Abminderung der Querkrafttragfähigkeit durch die Zugbeanspruchung. Daher erscheint es unnötig, dass Eurocode 2 bei großen Zugkräften eine Mindestschubbewehrung vorschreibt. Außerdem ist es in hochbewehrten Platten, wie sie im Verbundbrückenbau vorliegen, sehr aufwendig diese Bewehrung zu verlegen, so dass das Betonieren dadurch erschwert und die Qualität der Platten eingeschränkt wird.

1.2 Überblick

Zunächst wurde die Literatur auf Arbeiten gesichtet, die Versuche und Modelle zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit bei gleichzeitigem Längszug beschreiben. Die Ergebnisse wurden zusammengefasst und ausgewertet (Kapitel 2).

Um die Möglichkeit zu untersuchen, auf eine Schubbewehrung in aus Normalkraft gerissenen Platten zu verzichten, wurden am Institut für Konstruktion und Entwurf 31 Versuche an Plattenstreifen durchgeführt. Variiert wurden die Zugnormalkraft, der Bewehrungsgrad, die Betongüte, die Schubschlankheit und die Belastungsgeschichte; zum Vergleich wurden auch zwei Versuche mit Querkraftbewehrung ausgeführt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse bestätigten die Vermutung, dass die Abminderung der Querkrafttragfähigkeit durch eine Zugnormalkraft deutlich geringer ausfällt als von Regelungen in gängigen Normen angegeben (Kapitel 3).

Eine statistische Auswertung der Versuchsergebnisse führte zu zwei Regressionsgleichungen, die für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonplatten bei gleichzeitigem Längszug verwendet werden können (Kapitel 4).

Unterstützt und erweitert wurde das experimentelle Ergebnis durch Berechnungen mit der Methode der Finiten Elemente, basierend auf dem Materialmodell mit Mikroebenen nach Ožbolt /57/. Ein FE-Modell wurde durch die Versuche verifiziert und zur Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter eingesetzt (Kapitel 5).

Daraufhin wurden mechanische Modelle zur Erklärung der Lastabtragung herangezogen. Das Modell von Zararis/Papadakis /81/ wurde um einen Anteil zur Berücksichtigung der Normalkraft erweitert und ein neues Modell unter der Annahme entwickelt, dass ein Spaltzugversagen des Betons zum Querkraftversagen eines Bauteils führt (Kapitel 6).

Die gesamte Arbeit mündete schließlich in einem Bemessungsvorschlag, dessen Auswirkungen auf die Praxis an ausgeführten Verbundbrücken untersucht wurden. Es wurden Anregungen für weitere Untersuchungen zusammengefasst (Kapitel 7).