Forschung für die Praxis
Universität Leipzig
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie

L. Kützing
Tragfähigkeitsermittlung
stahlfaserverstärkter Betone

Forschung für die Praxis

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König

Universität Leipzig

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie

Die Reihe „Forschung für die Praxis“ stellt Beiträge und Arbeiten der Bauingenieure und Architekten an der Universität Leipzig vor. Diese Forschungsarbeiten und Dissertationen liefern Bausteine für ein vertieftes Grundlagenwissen aus allen Bereichen des aktuellen Baugeschehens, und sie stellen aussichtsreiche Neuentwicklungen vor.

Die Reihe wendet sich an interessierte Ingenieure aus Forschung und Baupraxis, für die das Hintergrundwissen zu Vorschriften, Richtlinien und Neuentwicklungen zum Handwerkszeug gehört.

Tragfähigkeitsermittlung stahlfaserverstärkter Betone

Von Dr.-Ing. Lars Kützing
Universität Leipzig

B.G.Teubner Stuttgart · Leipzig · Wiesbaden

Dr.-Ing. Lars Kützing

Geboren 1970 in Mainz. Von 1989 bis 1994 Studium des Konstruktiven Ingenieurbaus an der Technischen Hochschule Darmstadt mit Studienschwerpunkten in den Fächern Statik, Stahlbau und Massivbau. Von 1994 bis 1996 Mitarbeiter bei IBC Ingenieurbau-Consult GmbH Mainz-Erfurt. 1996 bis 1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Leipzig bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König. Seit 1999 Beratender Ingenieur und selbständiger Mitarbeiter bei IBC Ingenieurbau-Consult GmbH Mainz-Erfurt-Leipzig.

Die Arbeit „Ein Beitrag zur Tragfähigkeitsermittlung stahlfaserverstärkter Betone unter besonderer Berücksichtigung bruchmechanischer Kenngrößen“ ist eine von der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Universität Leipzig genehmigte Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.). Die Gutachten wurden vorgelegt von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. Gert König, Prof. Dr.-Ing. Rolf Thiele und Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. em. Karl Kordina. Die Verteidigung fand am 18. November 1999 in Leipzig statt. Mitglied der Prüfungskommission war neben den Gutachtern u.a. auch Herr Prof. Dr.-Ing. Horst Falkner.

Der Titel dieser Dissertation lautet:

Ein Beitrag zur Tragfähigkeitsermittlung stahlfaserverstärkter Betone unter besonderer Berücksichtigung bruchmechanischer Kenngrößen

Diese Veröffentlichung entstand mit freundlicher Unterstützung der Firma

IBC Ingenieurbau-Consult GmbH Mainz-Erfurt-Leipzig

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei
Der Deutschen Bibliothek erhältlich.

1. Auflage Oktober 2000

Alle Rechte vorbehalten

© B. G. Teubner GmbH, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2000

Der Verlag Teubner ist ein Unternehmen der Fachverlagsgruppe BertelsmannSpringer.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

www.teubner.de

Umschlaggestaltung: Peter Pfitz, Stuttgart, nach einer Idee von Christoph Nahn

ISBN-13: 978-3-519-05267-8

e-ISBN-13: 978-3-322-84845-1

DOI: 10.1007/978-3-322-84845-1

Vorwort

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Tragverhalten von Stahlfaserbetonen unter Schub-, Biege- und Normkraftbeanspruchung. Die rechnerische Modellierung wird unter besonderer Berücksichtigung bruchmechanischer Kenngrößen vorgenommen. Dabei werden die Eigenschaften normalfester und hochfester Betone beschrieben.

Während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Leipzig hatte ich Gelegenheit, mich mit dieser Thematik intensiv auseinanderzusetzen.

Die Anregung hierzu verdanke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. G. König, der mir die Chance bot, an zwei Forschungsvorhaben mitzuwirken. Herzlichen Dank für die umfangreiche Unterstützung, die vielfältigen Anregungen und die Bereitschaft zur Diskussion !

Für die Übernahme des Koreferates danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. K. Kordina. Er war mir bei der Konzeption, Durchführung und Beurteilung der Brandversuche ein wichtiger Diskussionspartner.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. H. Falkner und Prof. Dr.-Ing. R. Thiele danke ich für die Bereitschaft zur Übernahme der Koreferate.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. V. Slowik für das entgegengebrachte Interesse an meiner Arbeit bedanken. Seine uneingeschränkte Hilfsbereitschaft führte dazu, daß das umfangreiche experimentelle Versuchsprogramm auch auf die Laboratorien der HTWK Leipzig ausgedehnt werden konnte.

Besonderer Dank gilt all denen, die bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen tatkräftig und verlässlich mitwirkten.

Stellvertretend für die MFPA Leipzig sind dies die Herren Dr.-Ing. Meichsner, Dipl.-Ing. Wojan, Dipl.-Ing. Löwe und Dipl.-Ing. Sonntag.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Herren Diefenbach und Koster aus Darmstadt für die meßtechnische Unterstützung meiner Arbeit in deren Anfangszeit.

Ohne studentische Hilfe wäre es mir nicht möglich gewesen, die umfangreichen Versuchsserien in der kurzen Zeit durchzuführen. Ich möchte mich besonders bei den Herren Dipl.-Ing. Torsten Römer, Dipl.-Ing. Martin Meister und Dipl.-Ing. Marco Seiferth bedanken, die ihre Diplomarbeiten im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen anfertigten.

Herrn Dipl.-Ing. Franz Morawietz gebührt dankbare Erwähnung für die Aufbereitung des Bildmaterials, der Versuchszeichnungen und die Übernahme des Layouts dieser Arbeit.

Frau Cathérine Buey danke ich für das Korrekturlesen meiner Texte.

Allen Mitarbeitern am Institut sei für die schöne Zeit und die kollegiale Zusammenarbeit gedankt.

Ein besonderer Dank gebührt Herrn Prof. Dr.-Ing. Heinrich Paschen für seine vielfältige Unterstützung und seine stete Bereitschaft, meine neuen Erkenntnisse zu diskutieren.

Abschließend möchte ich mich herzlich bei meinen Eltern für die vielfältige Unterstützung in den letzten Jahren bedanken. Ohne Euch wäre diese Arbeit nicht entstanden !

Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsziel	11
1.1	Problemstellung	11
1.2	Ziel der Arbeit	12
2	Materialeigenschaften	13
2.1	Allgemeines	13
2.2	Stahlfaserbeton	15
2.2.1	Historische Entwicklung	15
2.2.2	Moderne Anwendungen	16
2.2.3	Herstellung von Stahlfasern	18
2.2.4	Herstellung von Stahlfaserbeton und Frischbetoneigenschaften	23
2.2.5	Festbetoneigenschaften	25
2.2.6	Korrosionsverhalten	27
3	Ermittlung der Tragfähigkeit - Grundlagen und Konzepte	29
3.1	Überlegungen zur Bemessung von Stahlfaserbeton	29
3.2	Empfohlene Bemessungskonzepte	30
3.3	Bruchmechanik	34
3.3.1	Einführung	34
3.3.2	Beschreibung von Bruchvorgängen in Beton	34
3.3.3	Experimentelle Ermittlung bruchmechanischer Kenngrößen von Beton	37
3.3.4	Bruchmechanische Kenngrößen von Stahlfaserbeton	39
4	Modellierung des Bruchverhaltens	40
4.1	Allgemeine Überlegungen	40
4.2	Entwicklung einer σ -w Beziehung für Stahlfaserbeton	42
4.2.1	Betonanteil	43
4.2.2	Anteil der Stahlfasern	44
4.2.3	Beurteilung der nötigen Parameter	49
4.2.4	Ermittlung der rechnerischen Zugspannungs-Rißöffnungsbeziehung	56
4.3	Modellvergleich mit durchgeführten Versuchen	57

4.3.1	Versuchskonzeption.....	57
4.3.2	Vergleich der Ergebnisse.....	60
4.4	Herleitung einer vereinfachten trilinearen Entfestigungsfunktion.....	62
4.4.1	Funktionsverlauf der vereinfachten Kurve.....	62
4.4.2	Ermittlung der Bruchenergie bzw. Auszugsenergie.....	65
4.4.3	Beispielrechnung.....	66
4.5	Fasertragwirkungen bei Rißgleitungen.....	68
4.5.1	Vorüberlegungen	68
4.5.2	Modellüberlegungen.....	69
4.5.3	Betonanteil.....	70
4.5.4	Anteil der Stahlfasern	71
5	Tragverhalten unter zentrischer Druckbeanspruchung.....	72
5.1	Allgemeines.....	72
5.2	Bruchcharakteristik.....	73
5.2.1	Grundbegriffe.....	73
5.2.2	Verformungsverhalten von Beton und Bemessungsverfahren.....	75
5.2.3	Überlegungen zur Duktilitätssteigerung.....	79
5.3	Experimentelle Untersuchungen.....	80
5.3.1	Einführung.....	80
5.3.2	Versuchsaufbau.....	81
5.3.3	Materialtechnologie.....	83
5.3.4	Versuche an Zylindern.....	84
5.3.5	Versuche an Stützen.....	96
5.4	Rechnerische Modellierung.....	100
5.4.1	Tragverhalten unter einachsialer Druckbeanspruchung.....	100
5.4.2	Das CDZ Modell.....	101
5.4.3	Ermittlung der Werkstoffparameter für Faserbeton.....	108
5.4.4	Das BDZ Modell.....	115
5.4.5	Vergleich mit experimentellen Untersuchungen.....	122
5.4.6	Vergleich der Verformungskapazität durch Bügel und Fasern.....	123
5.4.7	Optimierung der Verformungskapazität.....	127
6	Schubtragfähigkeit stahlfaserverstärkter Balken.....	129
6.1	Allgemeine Einführung.....	129

6.2	Charakteristiken des Schubversagens.....	130
6.2.1	Biegeschubbruch.....	131
6.2.2	Schubzugbruch.....	132
6.2.3	Schubdruckbruch.....	132
6.3	Bemessungsvorschriften nach EC 2.....	132
6.3.1	Grundlagen des Nachweiskonzeptes.....	132
6.3.2	Das Nachweisverfahren nach EC 2.....	134
6.3.3	Zum Einfluß von Stahlfasern.....	134
6.4	Experimentelle Untersuchungen an schubslanken Balken.....	137
6.4.1	Versuchskonzeption.....	137
6.4.2	Versuchsergebnisse.....	140
6.4.3	Literaturangaben.....	142
6.5	Empirische Modellierungen für Bauteile ohne Schubbewehrung.....	144
6.5.1	Allgemeines.....	144
6.5.2	Die Auswertungen von Gustafsson / Hillerborg.....	145
6.5.3	Berücksichtigung durch einen Proportionalitätsfaktor.....	147
6.6	Das Parabel-Schrägriß Modell von Fischer.....	151
6.6.1	Zur Entwicklung.....	151
6.6.2	Modell - Grundlagen.....	151
6.6.3	Modellparameter.....	153
6.6.4	Modifizierung zur Anwendung bei Stahlfaserbeton.....	156
6.6.5	Ergebnisse und Diskussion.....	158
6.7	Das Druckzonenmodell nach Zink.....	160
6.7.1	Zur Entwicklung.....	160
6.7.2	Modell - Parameter.....	160
6.7.3	Modifizierung zur Anwendung bei Stahlfaserbeton.....	161
6.8	Modellbewertungen und Anwendungsvorschlag.....	162
7	Biegetragfähigkeit stahlfaserverstärkter Balken.....	165
7.1	Allgemeine Einführung.....	165
7.2	Charakteristiken des Biegeversagens.....	166
7.3	Experimentelle Untersuchungen an Biegeträgern.....	167
7.3.1	Versuchskonzeption.....	167
7.3.2	Betontechnologie.....	168
7.3.3	Versuchsergebnisse.....	168
7.4	Modellierungen des Tragverhaltens.....	170

7.5	Ausblick.....	173
8	Sonderanwendungen und Ausblick.....	174
8.1	Sonderanwendungen.....	174
8.1.1	Brandverhalten.....	174
8.1.2	Fertigteilbau.....	178
8.1.3	Tunnelbau.....	179
8.1.4	Verstärkung von Bauteilen.....	180
8.2	Ausblick.....	180
	Zusammenfassung.....	181
	Versuchsaufbau der zentrischen Zugversuche.....	184
	Diagramme.....	185
	Literaturverzeichnis.....	197
	Variablendeklaration.....	208
	Index.....	213