

Ein Verbundelement für nichtlineare Finite Elemente Analysen - Anwendung auf Übergreifungsstöße

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

vorgelegt von

Steffen Lettow

aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Eligehausen
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Januar 2006

Institut für Werkstoffe im Bauwesen
der Universität Stuttgart
2006

Kurzfassung

Mit der Weiterentwicklung der elektronischen Datenverarbeitung findet auch die rechnergestützte Tragwerk-Analyse mittels der Finite Elemente Methode (FEM) immer größeren Einzug in Forschung und Praxis. Nichtlineare dreidimensionale FE Programme werden zur wirklichkeitsnahen Simulation von Stahlbetonbauteilen eingesetzt, um deren Trag- und Verformungsverhalten zu untersuchen und Bemessungsregeln zu optimieren.

Die Funktion des Verbundwerkstoffes Stahlbeton beruht auf der Interaktion (Verbund) zwischen Bewehrung und umgebenden Beton. Damit beeinflussen die Verbundeigenschaften der Bewehrung wesentlich die Rissentwicklung in einem Stahlbetonbauteil sowie die globalen Tragwerksverformungen.

In umfangreichen numerischen Studien von komplexen Stahlbetonbauteilen ist eine detaillierte, dreidimensionale Modellierung der Bewehrungsstäbe meist nicht durchführbar. Deshalb ist eine möglichst einfache Realisierung der Verbundwirkung durch eindimensionale Stahlelemente in Kombination mit einem geeigneten Verbundelement erforderlich. Das zugehörige Verbundelement-Modell muss, bei einfacher Anwendung und zahlreichen Einsatzmöglichkeiten, gleichzeitig die wesentlichen Verbundeigenschaften und die Einflüsse veränderlicher Faktoren mit einbeziehen. Mit einem geeigneten Ansatz für die Verbundelemente besteht die Möglichkeit mit relativ geringem Modellierungs- sowie Rechenaufwand das Verbundverhalten in unterschiedlichen Stahlbetonbauteilen zu simulieren.

Für die realistische Simulation des Verhaltens von Stahlbeton wurde ein neues diskretes Verbundelement in ein dreidimensionales nichtlineares FE Programm implementiert. Das verwendete Verbundelement-Modell basiert auf einer vereinfachten Verbundspannungs-Relativverschiebungs-Beziehung und berücksichtigt veränderliche Verbundeinfluss-Faktoren wie Spannungs- und Dehnungszustände in der Bewehrung und dem umgebenden Beton.

Zur Kalibrierung der Modell-Parameter sowie zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Verbundelements wurden numerische Vergleichsuntersuchungen zum Verbundverhalten bei Scherbruch- und Sprenggrissversagen sowie bei verschiedenen Einflüssen und Randbedingungen durchgeführt. Zur Validierung der in den numerischen Studien ermittelten Modell-Parameter und der Anwendungsmöglichkeiten der Verbundelemente wurden Ergebnisse von Versuchen verwendet, in welchen eine Kombination wesentlicher Verbundeinflüsse vorlag.

Die Anwendbarkeit der neuen diskreten Verbundelemente wurde in einer numerischen Studie zum Verhalten von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen gezeigt. Dabei wurden Stöße bei verschiedenen Brucharten untersucht und besonderes Augenmerk auf den Einfluss von Betondruckfestigkeit, Übergreifungslänge und Querbewehrung gelegt. Die numerischen Ergebnisse wurden mit den aus der Literatur bekannten Ansätzen zur Berechnung der Bruchstahlspannung von Übergreifungsstößen verglichen. Basierend auf diesen Untersuchungen wurde ein modifizierter Ansatz vorgelegt und damit ermittelte Bruchstahlspannungswerte wurden abschließend mit Werten einer Datenbank, bestehend aus vorhandenen experimentellen Ergebnissen, verglichen.

Abstract

With the continued increase in computing resources, three-dimensional computer-aided structural analysis using the Finite Element Method (FEM) has experienced a steady increase in use in research and practice. Nonlinear three-dimensional FE programs are used to simulate realistic behavior of reinforced concrete (RC) structures, in order to better understand the stress and strain states in structural members as well as to verify and improve design codes.

The interaction between concrete and reinforcement (bond) ensures the transmission of forces between reinforcing steel and the surrounding concrete. Hence, the behavior of RC structures, e.g. deformation, cracking and durability, is strongly influenced by the bond properties of the reinforcing steel.

In sophisticated simulations of RC structures with varying boundary conditions, three-dimensional modeling of the reinforcement is often not feasible. Therefore a one-dimensional representation of reinforcement with a bond interface element based on an appropriate bond model is required. This model must account for the main influencing parameters on bond behavior and also be adaptable for the application using new reinforcing materials in concrete structures. By using a bond interface element, a simplified FE model can be generated with less complex meshes and geometries and a realistic simulation of the load-bearing capacity and the deformation behavior of reinforced concrete structures can be obtained.

For the realistic numerical simulation of the behavior of reinforced concrete, in particular for complex structural members where bond behavior plays a decisive role, a new discrete bond element has been implemented into a fracture analysis based nonlinear three-dimensional FE program. The model used for the bond element is based on a simplified bond stress-slip relation and can easily be modified to take into account the important factors influencing bond. It also accounts for the influence of strain and stress in reinforcement and concrete on bond strength.

To calibrate and validate the bond element model, experimental investigations on special pull-out tests with short and long embedment length and on structural members are simulated with the new discrete bond elements. The results of the numerical and experimental investigations are compared and the significant characteristics are analyzed. Using these results the bond element model and the main parameters employed in the bond element model are determined and verified.

To demonstrate the applicability of the new bond elements numerical investigations on lap splices under tension have been carried out. Specific attention is put on the influences of concrete strength and lap length, as well as transverse reinforcement on the behavior of splices. Using these results, present analytical models for describing the failure load of lapped splices are reviewed with respect to the main influencing parameters. On basis of these investigations a modified approach for calculating steel stress at failure of lapped splices is proposed and compared with a database of existing experimental results.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Aufgabenstellung	1
1.3	Zielsetzung	2
2	STAND DER WISSENSCHAFT	5
2.1	Einführung	5
2.1.1	Allgemeines	5
2.1.2	Bedeutung der Verbundwirkung im Stahlbetonbau	5
2.1.3	Stand der Finite Elemente Methode im Bauwesen	7
2.2	Verbundverhalten von Stahlbeton	9
2.2.1	Verbundgrundmaterialien – Beton und Bewehrungsstahl	9
2.2.2	Verbundforschung – Entwicklung und Literaturüberblick	10
2.2.3	Verbundmechanismen – Kraftübertragung und Versagensarten	13
2.2.4	Verbundeinflussfaktoren – Konstante und veränderliche Größen	17
2.2.5	Verbundeigenschaften – Ermittlung und Bestimmung	21
2.2.6	Verbundmodelle – Formulierung und Kenngrößen	25
2.2.7	Verbundsimulation – Phänomenologisch und detailliert	33
3	VERBUNDELEMENT UND FINITE ELEMENTE PROGRAMM	37
3.1	Übersicht	37
3.2	Diskretes Verbundelement	38
3.2.1	Implementierung des diskreten Verbundelements	38
3.2.2	Verbundelement-Grundmodell und konstante Parameter	41
3.2.3	Ansatz-Funktionen zur Berücksichtigung veränderlicher Einflüsse	43
3.3	Nichtlineares Finite Elemente Programm MASA®	47
3.3.1	Allgemeines	47
3.3.2	Konstitutives Gesetz für Beton – „microplane“ Materialmodell	48
3.3.3	Lokalisierungsbegrenzer	52
3.3.4	Materialverhalten von Beton und Bewehrungsstahl	54
3.3.5	Konventionen und Vereinfachungen	56

4 VERGLEICHSUNTERSUCHUNGEN ZUM VERBUNDVERHALTEN	57
4.1 Übersicht	57
4.2 Kalibrierung der konstanten Parameter im Verbundelement-Grundmodell	59
4.2.1 Analyse des Verbundverhaltens bei Scherbruchversagen	59
4.2.2 Analyse des Verbundverhaltens bei Spaltrissversagen	64
4.3 Kalibrierung der veränderlichen Modell-Parameter	68
4.3.1 Analyse des Verbundverhaltens bei Querdruckspannungen	68
4.3.2 Analyse des Verbundverhaltens bei inelastischen Stahldehnungen	72
4.3.3 Analyse des Verbundverhaltens bei zyklischer Beanspruchung	76
4.4 Validierung des Verbundelement-Modells	80
4.4.1 Analyse von zugbeanspruchten Stahlbetonkörpern	80
4.4.2 Analyse von einfeldrig gelagerten Stahlbetonplatten	85
4.4.3 Analyse von beidseitig eingespannten Stahlbetonplatten	89
4.4.4 Analyse von Stahlbetonplatten mit Übergreifungsstößen	95
4.5 Wahl der Parameter des Verbundelement-Grundmodells	100
4.6 Zusammenfassung	103
5 STUDIEN ZUM VERHALTEN VON ÜBERGREIFUNGSSTÖßEN	105
5.1 Übersicht	105
5.2 Verhalten von Übergreifungsstößen	106
5.2.1 Allgemeines	106
5.2.2 Kraftübertragung	106
5.2.3 Versagensarten	107
5.2.4 Einflussgrößen	109
5.3 Ansätze zur Berechnung der Bruchspannung von Übergreifungsstößen	112
5.3.1 Allgemeines	112
5.3.2 Generelle Formulierung bekannter Berechnungsansätze	112
5.3.3 Berechnungsansatz nach <i>Orangun et al. (1977)</i>	113
5.3.4 Berechnungsansatz nach <i>Eligehausen (1979)</i>	114
5.3.5 Berechnungsansatz nach <i>Esfahani/Rangan (1996)/(1998)</i>	115
5.3.6 Berechnungsansatz nach <i>Zuo/Darwin (1998)/(2000)</i>	116
5.3.7 Berechnungsansatz nach <i>Burkhardt (2000)</i>	117
5.3.8 Berechnungsansatz nach <i>CEB-FIP MC 90 (1993)</i>	119

5.3.9	Berechnungsansatz nach <i>DIN 1045-1 (2001)</i>	119
5.3.10	Berechnungsansatz nach <i>EUROCODE 2 (2003)</i>	120
5.3.11	Berechnungsansatz nach <i>ACI 318 (2005)</i>	121
5.4	Numerische Untersuchungen zum Übergreifungsstoßverhalten	122
5.4.1	Allgemeines	122
5.4.2	Idealisierung und Modellfindung	123
5.4.3	Einfluss einer Umschnürungswirkung durch Bewehrung	126
5.4.4	Einfluss der Betondruckfestigkeit	128
5.4.5	Einfluss der Übergreifungslänge	130
5.4.6	Einfluss der Verbundwirkung (Rippengeometrie)	131
5.5	Vergleich bekannter Berechnungsansätze mit numerischen Ergebnissen	133
5.5.1	Allgemeines	133
5.5.2	Bewertung des Einflusses der Übergreifungslänge	134
5.5.3	Bewertung des Einflusses der Betondruckfestigkeit	136
5.5.4	Bewertung des Einflusses der Umschnürungswirkung	137
5.6	Modifizierter Ansatz zur Berechnung der Stoßbruchspannung	139
5.7	Zusammenfassung	144
6	SCHLUSSBETRACHTUNG	145
6.1	Zusammenfassung	145
6.2	Folgerungen	147
6.3	Ausblick	147
	LITERATURANGABEN	149
	ANHANG	161
	WERDEGANG	195

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Mit der Weiterentwicklung der elektronischen Datenverarbeitung findet auch die rechnergestützte Tragwerk-Analyse immer größeren Einzug, besonders in Forschung und Wissenschaft, aber auch in der Praxis. Sie kann heutzutage als ein anerkanntes Verfahren zur Berechnung linearer Festigkeits- und Schwingungsprobleme angesehen werden. Die Finite Elemente Methode (FEM) ist ursprünglich aus den Grundlagen der bekannten baustatischen Methoden hervorgegangen und ermöglicht aufgrund ihrer Flexibilität bei der Erfassung komplizierter Tragwerksgeometrien die Berechnung aller in Frage kommenden Tragwerksarten. Weiterhin ist die FEM auch gut geeignet zur Erfassung des nichtlinearen Tragwerksverhaltens infolge großer Verformungen (geometrische Nichtlinearität) und nichtlinearen Materialverhaltens (physikalische Nichtlinearität). Somit führte besonders in den letzten Jahren der Einsatz der nichtlinearen dreidimensionalen FEM im Stahlbetonbau zu immer komplexeren Berechnungsvorgängen, blieb jedoch im Wesentlichen auf die Forschung an Hochschulen oder auf Spezialgebiete, wie z. B. die Schadensanalyse, beschränkt.

Derzeitiger Stand der Technik im Stahlbetonbau ist die linearelastische Berechnung von Tragwerken mit anschließender Querschnittsbemessung. In den meisten Fällen wird hierbei das nichtlineare Materialverhalten des Stahlbetons, wie z. B. bei der Umlagerung von Kräften oder der Ermittlung der Rotationsfähigkeit durch zusätzliche Regeln berücksichtigt. Jedoch ist für das Verformungs- und Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen neben den nichtlinearen Materialeigenschaften der beiden Komponenten Beton und Bewehrungsstahl hauptsächlich das Zusammenwirken zwischen beiden (Verbund) von erheblicher Bedeutung. Der Verbund ermöglicht hierbei insbesondere nach der Rissbildung im Beton die Kraftübertragung zwischen Bewehrung und Beton und beeinflusst damit auch über das Rissverhalten die globalen Verformungen eines Bauteils. In jedem Fall stellt die einwandfreie Kraftübertragung zwischen Bewehrung und Beton die unabdingbare Grundlage für das Funktionieren von Stahlbeton dar.

Um den Einfluss des Verbundes zwischen Bewehrungsstahl und Beton auf das Verformungs- und das Tragverhalten von dreidimensionalen Stahlbeton-Konstruktionen in der Finite Elemente Analyse (FEA) wirklichkeitsnah berücksichtigen zu können, ist es notwendig, ein geeignetes Verbundelement in ein nichtlineares, auf der Bruchmechanik basierendes dreidimensionales Finite Elemente Programm zu übertragen.

1.2 Aufgabenstellung

Auf der Grundlage von aus der Literatur bekannten Verbundmodellen, welche anhand von experimentellen und theoretischen Untersuchungen in den letzten Jahren formuliert und weiterentwickelt wurden und die wichtigsten das Verbundverhalten beeinflussenden Größen berücksichtigen, wurde ein neues, für ein FE Programm geeignetes diskretes Verbundelement in ein nichtlineares dreidimensionales FE Programm implementiert. Dieses Verbundelement soll in der numerischen Analyse von Stahlbetonbauteilen das Zusammenwirken der Bewehrung

mit dem Beton für unterschiedlichste Anwendungsgebiete wirklichkeitsnah berücksichtigen. Dabei wird die Bewehrung durch eindimensionale Stabelemente und der Beton durch dreidimensionale Volumenelemente abgebildet. Um dies zu gewährleisten sind die folgenden Punkte zu bearbeiten.

- Für die Kalibrierung der Parameter im Verbundelementmodell sowie zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Verbundelement-Grundmodells werden numerische Studien basierend auf eigenen und aus der Literatur bekannten Ergebnissen experimenteller Untersuchungen ausgeführt. Hierbei werden Vergleichsuntersuchungen unter Verwendung diskreter Verbundelemente zum Verbundverhalten bei Scherbruch- und Sprenggrissversagen, im Bereich von inelastischen Stahldehnungen, bei vorhandenem äußeren Querdruck, sowie unter zyklischer Beanspruchung durchgeführt. Diese Studien dienen dazu, die vorab getroffenen Annahmen und Vereinfachungen zu bestätigen bzw. zu überprüfen und gegebenenfalls Verbesserungen oder Änderungen vornehmen zu können.
- Zur Validierung der in den numerischen Studien ermittelten konstanten und veränderlichen Modell-Parameter und zur Bestimmung der Anwendungsmöglichkeiten bzw. -grenzen des Verbundelements werden Forschungsarbeiten herangezogen, in welchen das Verbundverhalten eine entscheidende Rolle spielt. Zu diesem Zweck werden gezielt Versuchskörper in Finite Element Analysen nachgerechnet, in welchen eine Kombination der wesentlichen Einflüsse auf das Verbundverhalten vorhanden ist.
- Nach Kalibrierung und Validierung der Grundmodell-Kenngrößen und der Berechnungsansätze der veränderlichen Einflussgrößen, wird eine numerische Parameterstudie anhand von idealisierten FE Modellen zum Verhalten von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen durchgeführt und der Einfluss der wesentlichen Kenngrößen analysiert. Des Weiteren werden auf Basis von theoretischen Untersuchungen bekannte Berechnungsansätze gegenübergestellt und anhand der numerischen Ergebnisse werden Modifikationen zur Vereinfachung und Optimierung vorgeschlagen.

1.3 Zielsetzung

Ziel ist die Erarbeitung sowie Kalibrierung und Validierung eines Verbundelementmodells, das in nicht-linearen Finite Elemente Programmen eingebaut werden kann. Durch dieses Verbundelement wird gewährleistet, dass in numerischen Untersuchungen das Verformungs- und Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen wirklichkeitsnah simuliert werden kann. Weiterhin wird die Effizienz und die Genauigkeit von numerischen Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen in den meisten Anwendungsfällen verbessert.

Durch Verwendung eines geeigneten Verbundelements in numerischen Studien können beliebige Stahlbetonbauteile unter variierenden Randbedingungen wirklichkeitsnah simuliert werden. Auf diese Weise können die Spannungs- und Dehnungszustände sowohl im Beton als auch in der Bewehrung und damit auch das Verbundverhalten in Gebrauchs- und

Bruchzuständen eingehend und vor allem gegenüber experimentellen Untersuchungen kostengünstig untersucht werden. Dadurch können weiterhin die wichtigsten Einflussfaktoren auf das Verbundverhalten von Stahlbetonbauteilen, wie die physikalischen und geometrischen Eigenschaften der beiden Baustoffe Beton und Bewehrung oder äußere Einflüsse, wie geometrische Randbedingungen, vorhandene Querbewehrung und auch die Belastungsgeschichte in FE Analysen realistisch und zuverlässig berücksichtigt werden.

Die Anwendbarkeit der neuen diskreten Verbundelemente wird in einer numerischen Studie zum Verhalten von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen gezeigt. Dabei wird besonderes Augenmerk dem Einfluss der Querbewehrung geschenkt und deren Auswirkung auf die Bruchspannung der Bewehrung bei verschiedenen Stoß-Brucharten betrachtet. Die numerischen Ergebnisse werden mit aus der Literatur bekannten Ansätzen zur Bruchspannungsberechnung verglichen und es wird ein Vorschlag zur Berechnung der Stahlspannung beim Versagen von Übergreifungsstößen vorgelegt.

6 Schlussbetrachtung

6.1 Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wurde ein Beitrag zur Erweiterung des am Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart entwickelten FE Programms MASA[®] in Bezug auf die Berücksichtigung der Verbundwirkung in numerischen Untersuchungen geleistet. Des Weiteren wurden die wichtigsten Einflussgrößen auf die Bruchlast von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen untersucht und bewertet sowie basierend auf diesen Untersuchungen bekannte Berechnungsansätze modifiziert.

Die Behandlung der Verbundtragwirkung zwischen Bewehrung und Beton, einschließlich deren Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten ist ein wichtiger Bestandteil der Arbeit. Basierend auf diesen Erkenntnissen erfolgt im Hauptteil nach Beschreibung der Implementierung und Funktionen des diskreten Verbundelements die Kalibrierung und Validierung der Parameter des Verbundelement-Modells. Abschließend werden anhand einer Studie zum Verhalten von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen die Anwendung der Verbundelemente demonstriert und mittels Gegenüberstellung der in der Literatur vorhandenen Berechnungsansätze sowie einem Vergleich mit numerischen Ergebnissen modifizierte Ansätze zur Berechnung der Bruchstahlspannung von Übergreifungsstößen abgeleitet.

Kapitel 2 zeigt in einem Teilabschnitt den auf Basis einer Literaturrecherche zusammengefassten Stand der Kenntnis zum mechanischen Verhalten zwischen Bewehrung und Beton und den Verbundversagensarten sowie eine Übersicht über die wichtigsten Einflussgrößen auf das Verbundverhalten. Zum Abschluss dieses Kapitels wird der Kenntnisstand zur Methode der Finiten Elemente kurz umrissen und deren speziell im Rahmen dieser Arbeit wesentlichen Aussagen dargelegt.

In Kapitel 3 wird die Implementierung eines neuen diskreten Verbundelementes in ein vorhandenes Finite Elemente Programm behandelt und es werden die Bestandteile des Verbundelement-Grundmodells sowie die Ansatz-Funktionen zur Berücksichtigung der wichtigsten Einflussgrößen beschrieben. Das Verbundelement beschreibt die Verbindung zwischen eindimensionalen Stabelementen (1D Bewehrung) und dem durch dreidimensionale Volumenelemente diskretisierten Beton (3D Beton). Dabei werden die Kräfte (bzw. Verschiebungen) in Richtung der Bewehrungsstabachse über das Verbundelement auf Grundlage einer Verbundspannungs-Relativverschiebungs-Beziehung übertragen. Die Kraftübertragung senkrecht zur Stabachse erfolgt durch eine starre Verbindung. Das in dem Verbundelement verwendete Modell wird durch zwei Parametergruppen gesteuert. Dies sind zum einen konstante Grundmodell-Parameter, wie die Verbundsteifigkeit und -festigkeit sowie die Form der Verbundspannungs-Relativverschiebungs-Beziehung, und zum anderen veränderliche Parameter. Hierzu gehören der Spannungs- und Dehnungszustand des Bewehrungsstahls und des Betons im Bereich der Bewehrung sowie die Art der Belastung. Abschließend werden in diesem Kapitel noch die wesentlichen Grundlagen und Gesetzmäßigkeiten des hier verwendeten nichtlinearen dreidimensionalen Finite Elemente Programms MASA[®] erläutert.

In Kapitel 4 wurden Vergleichsuntersuchungen mit dem nichtlinearen FE Programm unter Verwendung der neuen diskreten Verbundelemente durchgeführt. Hierbei wurden anhand von numerischen Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen Bewehrung und Beton die für das diskrete Verbundelement gewählten Grundmodell-Parameter und Ansatz-Funktionen kalibriert und validiert. Es wurde gezeigt, dass die Verbundversagensarten ‚Herausziehen des Bewehrungsstabes‘ (Scherbruchversagen) und ‚Spalten der Betondeckung‘ (Spaltrissversagen) gut simuliert und die das Verbundverhalten hauptsächlich beeinflussenden Größen, wie große inelastische Stahldehnungen, Querdruckspannungen im Bereiche der Bewehrung und zyklische Belastungsvorgänge durch die Ansatz-Funktionen richtig angepasst sind. Im Zuge der Validierung wurden ausgewählte Groß-Versuchskörper nachgerechnet und mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen verglichen. Die Vergleichsuntersuchungen anhand von Stahlbetonbauteilen in welchen das Bewehrung-Beton Verbundverhalten eine wesentliche Rolle spielt, zeigte gute Übereinstimmungen zwischen Rechen- und Versuchswerten. Die neuen diskreten Verbundelemente sind in Kombination mit eindimensionalen Bewehrungselementen sehr gut geeignet, das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen realistisch und anschaulich wiederzugeben.

Darauf aufbauend wurden in Kapitel 5 zunächst die speziellen Einflüsse auf das Verhalten von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen kurz erläutert und die Versagenskriterien sowie die theoretischen Brucharten von Bauteilen mit durch Übergreifung gestoßener Bewehrung aufgezeigt. Weiterhin wurde eine umfangreiche Studie zum Verhalten von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen durchgeführt. In einem weiteren Teil dieses Kapitels wurde eine Zusammenstellung aus in der Literatur bekannten Ansätzen zur Berechnung der Bruchstahlspannung von Übergreifungsstößen gegeben. Die von verschiedenen Autoren und in den Normen vorhandenen Berechnungsansätze wurde vereinheitlicht und in Form einer allgemeinen Gleichung wiedergegeben. Durch dieses Vorgehen konnten die in den Ansätzen angegebenen Bewertungen und Wichtungen vor allem der Haupt-Einflussparameter übersichtlicher dargestellt und detailliert verglichen werden. Im anschließenden Abschnitt wurden mittels einer numerischen Parameterstudie Einflüsse von Umschnürungswirkung, Betondruckfestigkeit, Übergreifungslänge und Oberflächengeometrie der Bewehrung (Verbundwirkung) analysiert und bewertet.

Abschließend wurde mithilfe von Vergleichen der numerischen Ergebnisse mit bekannten Berechnungsansätzen sowie mittels geeigneter in der Literatur vorhandener Ergebnisse experimenteller Untersuchungen Modifikationsvorschläge zur Vereinfachung und Optimierung der Berechnungsansätze formuliert. Die mit dem modifizierten Berechnungsansatz ermittelten Bruchstahlspannungen wurden daraufhin den Ergebnissen aus 258 Versuchen an Stahlbetonbauteilen ohne Querbewehrung und 281 Bauteil-Versuchen mit Querbewehrung gegenübergestellt. Die Vergleiche der Bruchlasten zeigten im Allgemeinen eine zufrieden stellende Übereinstimmung zwischen berechneten und experimentell ermittelten Stahlspannungswerten, wobei die Streuungen in annehmbaren Grenzen verlaufen.

6.2 Folgerungen

Die wirklichkeitsnahe Simulation des Verbundverhaltens in der Finite Elemente Analyse von Stahlbeton ist analog zur realistischen Modellierung des Verhaltens der Verbundkomponenten Beton und Bewehrung in vielen Anwendungsfällen von großer Bedeutung, um das Trag- und Verformungsverhalten im Gebrauchs- als auch im Bruchzustand von Stahlbetontragwerken realistisch zu simulieren. Im Rahmen nichtlinearer, numerischer Berechnungen von Stahlbetonbauteilen ist es daher angebracht, die sehr komplexe Verbundwirkung zwischen Bewehrung und Beton anhand geeigneter Verbundelemente zu erfassen. Diese Verbundelemente sollten bei relativ einfacher Anwendung gleichzeitig den Einfluss aller wesentlichen Parameter erfassen und zuverlässige Ergebnisse liefern.

Der Einsatz diskreter Verbundelemente in Verbindung mit durch ein-dimensionale Stabelemente idealisierte Bewehrung liefert gute Ergebnisse und ist aufgrund des deutlich geringeren Modellierungs- und Rechenaufwands gegenüber der detaillierten dreidimensionalen Modellierung der Bewehrung für komplexe Stahlbetonbauteile mit großer Elementanzahl besonders geeignet. Durch direkte Übertragung der an speziellen Versuchskörpern (z. B. Auszieh-Versuchen) bestimmten Verbundgesetzmäßigkeiten in das Verbundelement-Modell kann durch numerische Untersuchungen ein wichtiger Beitrag zur Simulation des Verhaltens von Stahlbetonbauteilen geleistet werden. Insgesamt steht mit dem überprüften diskreten Verbundelement, in Kombination mit ausgesuchten experimentellen Untersuchungen, ein wichtiges Instrument für Studien zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton zur Verfügung und eröffnet zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten bei sämtlichen Problemstellungen in welchen die Verbundwirkung eine maßgebende Rolle spielt. Als Beispiele hierfür seien die Bestimmung der erforderlichen Duktilitätseigenschaften der Bewehrung bzw. allgemein die Untersuchung des plastischen Verformungs- und Rotationsvermögens oder die in dieser Arbeit durchgeführten numerischen Studien zum Verhalten von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen genannt.

Anhand umfangreicher FE Berechnungen im Rahmen der Studien zum Verhalten von zugbeanspruchten Übergreifungsstößen konnten die Anwendungsmöglichkeiten der diskreten Verbundelemente gut demonstriert werden.

6.3 Ausblick

Mit vorliegender Arbeit konnte ein wesentlicher Beitrag zur Weiterentwicklung der realistischen Simulation des Verbundverhaltens von Stahlbeton in der Finite Element Methode geleistet werden sowie wichtige Einflussfaktoren zum Übergreifungsstoßverhalten genauer untersucht und deren Bewertung in anerkannter Literatur überprüft werden. Dennoch verbleiben in Teilbereichen noch einige offene Punkte, die in weiterführenden Arbeiten geklärt werden sollten.

In Bezug auf die Funktionsfähigkeit und die Anwendungsmöglichkeiten der diskreten Verbundelemente sollten weitere Vergleichsuntersuchungen durchgeführt werden. Im Rahmen

dieser Arbeit wurde das Verbundverhalten unter zyklischer Beanspruchung in Grundzügen untersucht. Jedoch sollte eine umfassende Kalibrierung und Validierung der Modell-Parameter des Verbundelements unter zyklischer und dynamischer Beanspruchung erfolgen. Ebenso sollte die Funktionsfähigkeit der Verbundelemente für weitere das Verbundverhalten beeinflussende Faktoren, wie Zwangbeanspruchungen (z. B. durch Kriechen und Schwinden des Betons oder Temperaturänderungen), Querkzugspannungen im Bereich der Bewehrung (z. B. bei doppelt gespannten Platten) und Schäden an Bauteilen (z. B. bei Korrosion der Bewehrung) überprüft werden um gegebenenfalls Modellerweiterungen vorzunehmen. Des Weiteren sollten die Einsatzmöglichkeiten der Verbundelemente in anderen Anwendungsbereichen z. B. bei nachträglich eingemörtelten Bewehrungsstäben, nicht metallischer Bewehrung und bei Anwendung der Vorspannung mit nachträglichem Verbund untersucht werden.

Ferner sollte eine Überprüfung und Weiterentwicklung des modifizierten Berechnungsansatzes auf Basis von ausgesuchten Versuchsergebnissen erfolgen. In der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten numerischen Studie wurde gezeigt, dass die wesentlichen Parameter, wie die Betondruckfestigkeit und die Übergreifungslänge in gewissen Grenzen vergleichbar gut erfasst werden, jedoch im Bereich hoher Stahlspannungen überschätzt werden. Ebenso sind weitere Einflussparameter aufgrund geringer Wichtigkeit in den meisten Berechnungsansätzen nicht berücksichtigt bzw. nur indirekt integriert. Einflüsse durch veränderte Eigenschaften neuartiger Betonmaterialien wie z. B. bei ultrahochfestem, faserverstärktem oder selbstverdichtendem Beton werden aber von wachsender Wichtigkeit und dürfen bei der Ermittlung von Verankerungs- oder Übergreifungslängen von Bewehrungsstäben nicht unberücksichtigt bleiben.