

Schriftenreihe des Instituts für Massivbau

Adrian Faron

Diskrete Rissimulationen von Stahlbetonbauteilen mit der XFEM

Herausgeber:

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

Diskrete Rissimulationen von Stahlbetonbauteilen mit der XFEM

Vom Promotionsausschuss der

Technischen Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

M. Sc. Adrian Faron

aus

Neiße, Polen

2024

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Günter Axel Rombach

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Düster

Tag der mündlichen Prüfung: 08. Dezember 2023

Schriftenreihe des Instituts für Massivbau der TUHH

Heft 21

Adrian Faron

**Diskrete Risssimulationen von Stahlbetonbauteilen
mit der XFEM**

Shaker Verlag
Düren 2024

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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9406-0

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

Kurzfassung

Das Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen wird wesentlich durch die Entstehung von Rissen bestimmt. Während in den letzten Jahrzehnten Fortschritte bei der Beschreibung des Betonverhaltens und des Verbundes zwischen der Bewehrung und dem Zementmörtel sowie der numerischen Simulation erzielt wurden, kann man bislang weder den Rissverlauf noch die Weiterleitung der Normal- und Schubspannungen über einen Riss zufriedenstellend numerisch in einem Finite Elemente Modell beschreiben. Dies trifft insbesondere für Querkraftrisse zu, welche schräg zur Bauteilachse verlaufen.

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die diskrete numerische Modellierung von Rissen in Betonbauteilen. Im Unterschied zu der größtenteils verwendeten verschmierten Abbildung von Rissen lässt sich hiermit u.a. der Spannungsverlauf in einer Diskontinuität realitätsnah bestimmen. Für die diskrete Abbildung von Rissen stehen verschiedene numerische Verfahren zur Verfügung. Deren Vor- und Nachteile werden eingehend erörtert. Es zeigt sich, dass die Extended Finite Element Method (XFEM) für die geplanten Untersuchungen am geeignetsten erscheint. Neben der numerischen Modellierung einer Diskontinuität im Verformungsfeld sind Modelle zur Beschreibung des Rissfortschritts erforderlich. Hierbei wird das Kohäsionszonenmodell eingesetzt. Für realistische numerische Simulationen von Betonbauteilen ist es wichtig, das nichtlineare Materialverhalten von Beton möglichst genau abzubilden. Aufgrund der vorliegenden Erfahrungen wird das elasto-plastische Schädigungsmodell „Concrete Damage Plasticity“ verwendet. Weiterhin wird ein Modell benötigt, mit welchem sich die Spannungen in einem Riss aus der Risskinematik realitätsnah bestimmen lassen. Hierzu wurden unterschiedliche Rissverzahnungsmodelle publiziert. Repräsentative mechanische Modelle werden näher untersucht und in das Rechenprogramm eingebunden. Die Validierung des so erweiterten FE-Programms erfolgt anhand von Balkenversuchen. Es ergibt sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen den numerischen Simulationen und den realen Experimenten.

Durch die Entwicklung eines numerischen Rechenmodells für diskrete Rissfortschrittssimulationen ist es nun möglich, die Spannungen an den Rissufern zu bestimmen. Diese fortschrittliche Methode eröffnet neue Perspektiven für die Untersuchung des Tragverhaltens von Stahlbetonbauteilen, insbesondere im Hinblick auf den Querkraftabtrag.

Abstract

The load-bearing behavior of reinforced concrete components is essentially determined by the propagation of cracks. Although advances have been made in recent decades in the description of concrete behavior and the bond between the reinforcement and the cement mortar, as well as in numerical simulation, it has not yet been possible to satisfactorily capture the crack path or the transmission of normal and shear stresses across a crack in a finite element model. This is especially the case for shear cracks, which propagate inclined to the component axis.

This research work aims at the discrete numerical modeling of cracks in concrete components. Compared to the mostly used smeared modeling of cracks, the stress distribution in a discontinuity can be determined realistically. Various numerical methods are available for the discrete mapping of cracks. Their advantages and disadvantages are discussed thoroughly. It is shown that the Extended Finite Element Method (XFEM) appears to be the most suitable for the planned investigations. Further to the numerical modeling of a discontinuity in the deformation field, models for the description of the crack propagation are required. Here, the cohesion zone model is used. For realistic numerical simulations of concrete components, it is important to represent the nonlinear material behavior as accurately as possible. Furthermore, a model is needed with which the stresses in a crack can be realistically determined from the crack kinematics. For this purpose, different crack aggregate models have been published. These will be investigated in more detail and integrated into the computational program. The validation of the extended FE-simulations is done by beam tests. There is a satisfactory agreement between the numerical simulations and the real experiments.

A numerical model for discrete crack propagation simulations has been developed, which can also be used to determine the stresses at the crack banks. This provides a new method for investigating the load-bearing behavior of reinforced concrete components and, in particular, the shear force transfer.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Verzeichnis der Formelzeichen	VI
Abkürzungsverzeichnis	XVI
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Querkraftabtrag und Rissmechanismen in Stahlbetonbauteilen	4
2.1 Allgemeines	4
2.2 Querkraftabtrag und dessen Traganteile	4
2.3 <i>Aggregate Interlock</i>	12
2.3.1 Versuche zum <i>Aggregate Interlock</i>	12
2.3.2 Mechanische Modelle zum <i>Aggregate Interlock</i>	20
2.4 Bruchverhalten und Rissfortschritt in Stahlbetonbauteilen	48
2.4.1 Allgemeines	48
2.4.2 Linear-elastische Bruchmechanik (LEBM)	49
2.4.3 Übergang zur nichtlinearen Bruchmechanik	51
2.4.4 Nichtlineare Bruchmechanik (NLBM)	53
2.4.5 Bruchenergie	56
2.4.6 Dynamik des kritischen Biegeschubrisses	58
3 Rissfortschrittmethoden in der FEM	60
3.1 Konventionelle FE-Rissmodelle	60
3.1.1 Verschmierte Rissmodellierung	61
3.1.2 Diskrete Rissmodellierung	62
3.2 Erweiterte FE-Rissmodelle	63
3.2.1 Strong Discontinuity Approach (SDA)	64
3.2.2 Extended Finite Element Method (XFEM)	67
3.2.3 Virtual Element Method (VEM)	76

3.3	Netzfremde FE-Rissmodelle	79
3.3.1	Element-free Galerkin Method (EFG)	80
3.3.2	Isogeometric Approximation (IGA)	83
3.4	Vergleich vorgestellter Rissfortschrittmethoden	86
3.4.1	Gegenüberstellung diskreter Verfahren	86
3.4.2	Abschließende Bewertung	89
3.5	Rissfortschrittsanalysen der XFEM im Stahlbetonbau	89
4	Nichtlineare FEM-Berechnungen in ABAQUS	91
4.1	Materialverhalten von Beton	91
4.1.1	Materialverhalten unter einaxialer Belastung	91
4.1.2	Materialverhalten unter mehraxialer Belastung	97
4.2	Elasto-plastisches Schädigungsmodell „Concrete Damage Plasticity“	99
4.2.1	Fließbedingung	100
4.2.2	Fließregel	101
4.2.3	Isotrope Schädigung	102
4.3	Simulationsmodell „Extended Finite Element Method (XFEM)“	103
4.3.1	Grundlagen	103
4.3.2	Rissmodellierung	108
4.4	Materialverhalten und Modellierung des Bewehrungsstahls	111
5	Simulation von Balkenversuchen	112
5.1	Einleitung	112
5.2	Versuchsserie von <i>Rombach et al.</i>	112
5.3	Numerische Simulationen	115
5.3.1	FE-Modell	115
5.3.2	Untersuchung des Simulationsvorgangs	117
5.3.3	Last-Verformungskurven	119
5.3.4	Rissfortschritt	121
5.3.5	Betondruckspannungen	122
5.3.6	Rissverzahnung	124
5.3.7	Auswertung der FE-Simulationen	132
5.3.8	Vergleich der Rechenwerte mit Querkraftmodellen	138

6 Schlussbetrachtung	141
6.1 Zusammenfassung	141
6.2 Ausblick	143
Anlage I – Transformiertes Algolskript [Wal79b]	145
Anlage II – Optimiertes Algolskript [Wal79b]	148
Anlage III – Übersetzung Algolskript [Wal79b] in <i>Python</i>	152
Anlage IV – .inp Datei Balken B1 (komprimiert)	155
Anlage V – Pythonskript für die Ausgabe der Rissspannungen in ABAQUS	167
Anlage VI – Pythonskript zur Ausgabe der Rissspannungen bezogen auf die Versuchsergebnisse	179
Anlage VII – Rissverschiebungen (w, δ) und Spannungsgrößen (τ, σ) der Balken B2 bis B5	196
Anlage VIII – Spannungsverläufe aus (a) Versuch und (b) numerische Simulation	204
Literatur	208
Lebenslauf	