

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
<b>2 Querkraftabtrag und Rissmechanismen in Stahlbetonbauteilen</b>	<b>4</b>
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
<b>3 Rissfortschrittsmethoden in der FEM</b>	<b>60</b>
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 Netzfreie 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
<b>4 Nichtlineare FEM-Berechnungen in ABAQUS</b>	<b>91</b>
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
<b>5 Simulation von Balkenversuchen</b>	<b>112</b>
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

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