

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung und Ziel der Arbeit	1
1.2	Aufbau der Arbeit	3
2	STAND DER FORSCHUNG	6
2.1	Verbundverhalten	6
2.1.1	Grundlagen des Verbundverhaltens von Stahlbeton	6
2.1.2	Mechanismus des Verbundversagens	8
2.1.3	Einflussparameter auf das Verbundverhalten	10
2.1.3.1	Einfluss des Bewehrungsstahls	10
2.1.3.2	Einfluss des Betons	11
2.1.3.3	Einfluss des Probekörpers	11
2.1.3.4	Einfluss der Belastung	12
2.1.4	Überblick über durchgeführte Verbunduntersuchungen	13
2.1.5	Berechnungsansätze	14
2.1.5.1	Globaler Tension-Stiffening Ansatz	15
2.1.5.2	Differenzialgleichung des verschieblichen Verbundes	16
2.1.5.3	Aus Verbunduntersuchungen abgeleitete Verbundspannungs-Verschiebungsbeziehungen	17
2.1.5.4	Federmodelle	18
2.1.5.5	Numerische Modelle unter Verwendung von Verbundelementen	18
2.1.5.5.1	Delfter Verbund Modell	18
2.1.5.5.2	Verbundmodell von <i>Mainz</i>	20
2.1.5.6	Numerische Modelle ohne Verwendung von Verbundelementen	22
2.1.5.6.1	Verfahren nach <i>Martin</i>	22
2.1.5.6.2	Untersuchungen von <i>Vos</i>	23
2.2	Verhalten von Beton und Zementmörtel unter mechanischer Beanspruchung	25
2.2.1	Verhalten von Beton unter Zugbeanspruchung	26
2.2.1.1	Einaxiales Verhalten	26
2.2.1.2	Mehraxiales Verhalten	27
2.2.2	Verhalten von Beton unter Druckbeanspruchung	27
2.2.2.1	Einaxiale Spannungs-Dehnungsbeziehung	27
2.2.2.2	Mehraxiale Spannungs-Dehnungsbeziehungen	32
2.2.3	Verhalten von Zementmörtel unter Zug- und Druckbeanspruchungen	33
2.2.4	Berechnungsmodelle für Beton und Zementmörtel	36
2.2.4.1	Kontinuumsmodelle	36
2.2.4.2	Bruchmechanische Ansätze	38
2.2.4.3	Berücksichtigung von Rissen bei der Methode der Finiten Elemente	40
2.2.4.4	Berechnungsansätze	41

2.3	Kontaktverhalten zwischen Stahl und Beton	43
2.3.1	Modell von <i>Keuser</i>	43
2.3.2	Modell von <i>Needleman / Tvergaard</i>	44
2.3.3	Modell von <i>Chaboche et al.</i>	46
3	MODELLIERUNG VON BETON UNTER ZUGBEANSPRUCHUNG	48
3.1	Grundlagen	48
3.2	Ableitung von Materialgleichungen	50
3.2.1	Uniaxiale Beanspruchungsprozesse	50
3.2.1.1	Prinzip der elastischen Degradation	50
3.2.1.2	Ableitung möglicher Kontinuitätsfunktionen	52
3.2.2	Multiaxiale Beanspruchungsprozesse	53
3.2.2.1	Sonderfall <i>isotrope Schädigung</i>	53
3.2.2.2	Modellierung orthotroper Schädigung	54
3.2.2.2.1	Verteilungsmodell der Schädigung	54
3.2.2.2.2	Materialgleichungen	56
3.2.2.3	Evolutionsvorschriften der Kontinuität	58
3.3	Lokalisierungsproblem	58
3.4	Beispiel	60
3.4.1	Elementwahl	60
3.4.2	Besonderheiten bei der Diskretisierung	60
3.4.3	Beispiel: Zugversuch	61
4	ÜBERGANG VON DER MAKROSKOPISCHEN ZUR MESOSKOPISCHEN EBENE	64
4.1	Überlegungen zum Betrachtungsmaßstab	64
4.1.1	Unterteilung des Betons in Betrachtungsebenen nach <i>van Mier</i>	64
4.1.2	Unterteilung des Verbundbereichs in Stufen nach <i>Keuser</i>	65
4.1.3	Schlussfolgerungen	66
4.2	Zellenmodell	67
4.2.1	Aufbau des Modells	67
4.2.2	Betonzelle	67
4.2.3	Stahlzelle	68
4.2.4	Verbundzelle	69
5	MODELLIERUNG VON BETON UNTER MECHANISCHER BEANSPRUCHUNG	71
5.1	Druckschädigung im Modell von <i>Mark</i>	71
5.1.1	Ergebnis des zentrischen Druckversuchs	71

5.1.2	Interpretation und Erklärung des Ergebnisses	71
5.2	Konzept zur Berücksichtigung von Druckschädigungen	76
5.3	Ableitung einer Theorie zur Berücksichtigung von Druckschädigungen	77
5.3.1	Definition einer Druckschädigung	77
5.3.2	Ableitung einer Kontinuitätsfunktion für Druckdehnungen aus der Spannungs-Dehnungsbeziehung nach ModelCode 90	77
5.3.2.1	Ermittlung des Ausgangselastizitätsmoduls E_0	78
5.3.2.2	Ableitung der Kontinuitätsfunktion ψ_c	79
5.3.3	Zusammenhang zwischen Ausdehnung und Druckstauchung	80
5.3.4	Anpassung der Druckkontinuität im Bereich $ \epsilon_c > \epsilon_{cu} $ an die Ausdehnungskontinuität	81
5.3.5	Einfluss der Querdehnzahl ν	83
5.3.6	Druckkontinuität ψ_c als Funktion der Ausdehnungskontinuität ψ_t	85
5.3.6.1	Berücksichtigung von dynamischen Effekten bei der Druckschädigung	88
5.3.6.2	Abhängigkeit der Druckschädigung vom Ausgangselastizitätsmodul E_0	88
5.4	Verallgemeinerung der Druck-Zugkontinuitätsbeziehung für alle weiteren ebenen Dehnungszustände	89
5.4.1	Zugdehnungen in beiden Hauptrichtungen	90
5.4.2	Druckstauchungen in beiden Hauptrichtungen	90
5.4.3	Zugdehnungen bzw. Ausdehnungen und Druckstauchungen in den Hauptrichtungen	90
5.5	Anmerkungen zur Erweiterung auf räumliche Dehnungszustände	90
5.6	Implementierung	92
5.7	Anwendung auf ein homogenes Betonmodell	93
5.8	Berücksichtigung der Heterogenität: Beton als Dreiphasenmodell	93
5.9	Materialeigenschaften des Zuschlags	94
5.10	Materialeigenschaften von Zementmörtel	95
5.10.1	Ermittlung der charakteristischen Werte der Spannungs-Dehnungsbeziehung von Zementmörtel mit erhöhtem Bindemittelanteil	95
5.10.1.1	Mittlere maximale Druckfestigkeit	95
5.10.1.2	Zur Druckfestigkeit korrespondierende Stauchung ϵ_{c1}	96
5.10.1.3	Bruchdehnung ϵ_{cu}	96
5.10.1.4	Initialelastizitätsmodul E_0	96
5.10.1.5	Zugfestigkeit f_{ct}	97
5.10.1.6	Zusammenstellung der mittleren mechanischen Kenngrößen eines Zementmörtels	98
5.10.2	Ableitung einer allgemeinen Spannungs-Dehnungsbeziehung für Druckstauchungen	99
5.11	Ableitung der Druck- Ausdehnungskontinuitätsbeziehung für Zementmörtel	101
5.12	Anwendung auf ein heterogenes Betonmodell	103

6	LOKALISIERUNGSPHÄNOMEN	106
6.1	Problembeschreibung	106
6.2	Lokalisierungslimitierung	107
6.2.1	Umformulierung der Kontinuitätsfunktionen	107
6.2.1.1	Anpassen an maximale lokale Dehnung	107
6.2.1.2	Begrenzung der maximalen Degradationsrate	110
6.2.2	Nonlocal-Damage-Ansatz (<i>Saouridis/Mazars</i>)	111
6.2.3	Schlussfolgerungen	114
6.3	Ansatz eines lokalen Materialgesetzes	115
7	KONZEPT DES THEORETISCHEN MATERIALVERHALTENS	116
7.1	Theoretischer Hintergrund und Analogien zu anderen Technologien	116
7.1.1	Theorie vom Bruch der Festkörper nach <i>Griffith</i>	116
7.1.2	Analogie zur Whisker-Technologie	118
7.1.3	Analogie zu Glasfasern	119
7.2	Definition des theoretischen Materialverhaltens von Zementmörtel	121
7.2.1	Übertragung der Analogien auf Beton bzw. Zementmörtel	121
7.2.2	Definition des theoretischen Materialverhaltens	122
7.2.3	Bestimmung des theoretischen Materialverhaltens	122
7.3	Umsetzung des theoretischen Materialverhaltens im Rahmen des Schädigungskonzeptes	124
7.4	Ermittlung der Berechnungsparameter	128
7.4.1	Grenzdehnungen ε_g und deren Streuung	128
7.4.1.1	Ermittlung der Mittelwerte und der Standardabweichungen der Grundgesamtheit	128
7.4.1.2	Normalverteilung	129
7.4.1.3	Weibull-Verteilung	129
7.4.1.4	Umsetzung	131
7.4.1.5	Sampling	132
7.4.2	Elastizitätsmodul	133
7.4.3	Betonstruktur	133
7.5	Beispiel	133
8	MODELLIERUNG DES KONTAKTBEREICHS ZWISCHEN BETON UND STAHL	139
8.1	Umsetzung des Modells von <i>Chaboche et al.</i>	139
8.2	Finite-Elemente Implementierung	141

9	ANWENDUNG AUF DAS VERBUNDPROBLEM	142
9.1	Kombination der Verbund-Einflussparameter	142
9.2	Modellierung des Versuchskörpers	143
9.3	Rechenergebnisse	146
9.4	Fazit	151
10	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	152
11	LITERATURVERZEICHNIS	156