

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Bezeichnungen und Begriffe	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung.....	4
1.3 Aufbau der Arbeit	4
1.4 Abgrenzung.....	5
2 Stand der Forschung	6
2.1 Querkrafttragmechanismen und ihre Einflussparameter	6
2.1.1 Einleitung.....	6
2.1.2 Mechanismen des Querkraftabtrags von Stahl- und Spannbetonbauteilen ohne Querkraftbewehrung	7
2.1.2.1 Allgemein.....	7
2.1.2.2 Querkraftabtrag im ungerissenen Beton der Biegedruckzone $V_{c,c}$	8
2.1.2.3 Querkraftabtrag infolge Dübelwirkung der Längsbewehrung $V_{c,Dü}$	10
2.1.2.4 Querkraftabtrag infolge Rissverzahnung $V_{c,r}$	12
2.1.2.5 Übertragung von Zugspannungen im Biegeriss V_{BPZ}	14
2.1.2.6 Querkraftabtrag über direkte Druckstreben	16
2.1.3 Wichtige Parameter des Querkraftabtrags nicht querkraftbewehrter Bauteile	17
2.1.3.1 Allgemein.....	17
2.1.3.2 Schubslankheit a/d bzw. Slankheit l/d	17
2.1.3.3 Betonfestigkeit	20
2.1.3.4 Längsbewehrungsgrad.....	21
2.1.3.5 Bauteilabmessungen - Maßstabseffekt.....	22
2.1.3.6 Größe der Zuschlagskörner	25
2.1.3.7 Einfluss der beschriebenen Parameter in verschiedenen Normen	26
2.2 Querkrafttragmodelle.....	28
2.2.1 Einleitung.....	28
2.2.2 Bogen mit Zugband bzw. Sprengwerk-Modell	28
2.2.3 Kamm- und Zahnmodelle	29
2.2.3.1 Kammmodell nach KANI.....	29
2.2.3.2 Kammmodell nach FENWICK/PAULAY	29
2.2.3.3 Zahnmodell nach REINECK.....	30
2.2.4 Modelle auf Grundlage der Druckzonentragfähigkeit	32
2.2.4.1 Modell nach ZINK.....	32
2.2.4.2 Modell nach HEGGER/GÖRTZ	33
2.2.4.3 Modell nach NGHIEP	34

2.2.4.4	Empirische Modelle	36
2.2.5	Druckfeldmodelle	38
2.2.5.1	Klassische Druckfeld Theorien	38
2.2.5.2	Modified Compression Field Theory	39
2.2.5.3	Allgemeines Bemessungskonzept basierend auf der MCFT	40
2.2.5.4	Simplified Modified Compression Field Theory	41
2.2.6	Theorie des kritischen Schubrisses	42
2.2.7	Fachwerkmodell auf Basis der Bruchmechanik	44
2.2.8	Nachweis der aufnehmbaren Querkraft bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung nach Eurocode 2 und fib Model Code 2010	46
2.2.8.1	Allgemein	46
2.2.8.2	Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung nach EC2-1-1	46
2.2.8.3	Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung nach MC10	49
2.3	Nachweis der Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung nach EC2-1-1 und MC10	52
2.3.1	Einleitung	52
2.3.2	Nachweis gegen Ermüdung des Betons unter Querkraftbeanspruchung	52
2.3.2.1	Allgemein	52
2.3.2.2	Ermüdungsverhalten von Beton	53
2.3.2.3	Nachweiskonzept nach EC2-1-1 und MC10	56
2.3.2.4	Ermüdungsnachweis von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung nach EC2-1-1	57
2.3.2.5	Ermüdungsnachweis von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung nach MC10	59
2.3.3	Unsicherheiten beim Ermüdungsnachweis nach EC2-1-1 und MC10	59
2.4	Zusammenfassung	60
3	Versuche zur Ermüdung von Stahlbetonbalken ohne Querkraftbewehrung	64
3.1	Einleitung	64
3.2	Versuche von CHANG/KESLER (1958)	64
3.3	Versuche von UEDA/OKAMURA (1982)	65
3.4	Versuche von FREY/THÜRLIMANN (1983)	66
3.5	Versuche von MARKWORTH et al. (1984)	68
3.6	Versuche von SCHLÄFLI/BRÜHWILER (1999)	69
3.7	Versuche von ZANUY et al. (2008)	71
3.8	Auswertung der beschriebenen Versuche in einer Datenbank	72
3.8.1	Zusammenstellung der Datenbank	72

3.8.2	Auswertung der Datenbank	73
3.8.2.1	Einführende Erläuterung	73
3.8.2.2	Ermüdungsnachweis nach Eurocode 2.....	75
3.8.2.3	Ermüdungsnachweis nach Model Code 2010	79
3.8.2.4	Ermüdungsversagen der Bewehrung.....	80
3.9	Zusammenfassung	82
4	Versuche V1 bis V20 am Institut für Massivbau der TU Hamburg-Harburg	84
4.1	Einleitung.....	84
4.2	Ziel der Versuche.....	84
4.3	Festlegung der Versuchskörper	84
4.4	Baustoffeigenschaften.....	85
4.4.1	Beton.....	85
4.4.2	Bewehrung.....	86
4.4.3	Herstellung der Versuchskörper	86
4.5	Messtechnik	87
4.6	Versuchsdurchführung.....	88
4.6.1	Belastungshistorie und Rissdokumentation	88
4.6.2	Versuchsanordnung	89
4.7	Versuche V1 bis V20.....	89
4.7.1	Allgemein	89
4.7.2	Beschreibung und Auswertung der Versuche V1 bis V20	91
4.8	Zusammenstellung wesentlicher Ergebnisse	127
4.8.1	Verlauf des Versagensrisses	127
4.8.2	Mechanismen des Querkraftabtrags	129
4.8.3	Versagensmodus und Versagensart	131
4.8.4	Beurteilung von EC2-1-1, Gl. 6.78 bzw. EC2-2, Bild NA.6.103	133
4.8.5	Abhängigkeit vom Verhältnis der Ober- zur Unterlast.....	134
4.8.6	Abhängigkeit von der maximalen Rissweite der Biegerisse	135
4.9	Zusammenfassung	136
5	Materialmodelle	137
5.1	Einleitung.....	137
5.2	Einaxiales Materialverhalten von Beton.....	137
5.2.1	Beton unter einachsiger Druckbeanspruchung	137
5.2.2	Beton unter einachsiger Zugbeanspruchung.....	140
5.3	Mehraxiales Materialverhalten von Beton.....	142
5.4	Elasto-Plastisches Schädigungsmodell ,concrete damaged plasticity'	144

5.4.1	Einführung	144
5.4.2	Fließbedingung	144
5.4.3	Fließregel	146
5.4.4	Schädigungsmodell	147
5.5	Zusammenfassung	148
6	Numerische Simulationen	149
6.1	Einleitung	149
6.2	Die FE-Methode	149
6.3	Kalibrierung der FE-Simulationen	150
6.3.1	Versuchsbalken	150
6.3.2	Arbeitslinien von Beton und Stahl sowie Schädigungen	151
6.3.3	FE-Modell	153
6.3.4	Ergebnisse	154
6.4	FE-Analysen der statischen Versuche	155
6.4.1	Allgemein	155
6.4.2	Arbeitslinien von Beton und Stahl sowie Einflüsse infolge Schädigungen	156
6.4.3	FE-Modell der statischen Versuche	158
6.4.4	Ergebnisse der FE-Simulationen	158
6.5	Ermüdungsversuche	163
6.5.1	Ermüdungs-Schädigungs-Modell von PFANNER	163
6.5.1.1	Allgemein	163
6.5.1.2	Energiebilanz von Ermüdungsprozessen im Beton	163
6.5.1.3	In Schädigung dissipierte Energie g^{da}	164
6.5.1.4	Im Ermüdungsprozess dissipierte, schädigungswirksame Energie g^{fat}	165
6.5.1.5	Verzerrungszustand beim Ermüdungsbruch	166
6.5.1.6	Evolution der Verzerrung ϵ^{fat} während des Ermüdungsprozesses	169
6.5.1.7	Verifikation des energetischen Ermüdungsmodells	171
6.5.1.8	Degradation der Materialparameter	172
6.5.2	Anwendung des Ermüdungs-Schädigungs-Modells	173
6.5.3	Auswertung der Ermüdungs-Schädigungs-Berechnung	174
6.6	Zusammenfassung	176
7	Resümee und Ausblick	178
7.1	Resümee	178
7.2	Ausblick	181
Anhang A: Auswertung der Versuche anderer Universitäten		182
Anhang B: Materialkennwerte der Versuchsreihe V1 bis V20		205
Anhang C: Messwerte der Versuche V1 bis V20		208

Anhang D: Auswertung der Versuche V1 bis V20 286

Anhang E: Materialkennwerte des Kalibrierungsversuches 289

Anhang F: Materialkennwerte der Versuche V1 und V2..... 295

Anhang G: Umsetzung des Ermüdungs-Schädigungs-Modells von PFANNER 301

Literaturverzeichnis..... 307