

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Bezeichnungen und Begriffe .....	VI
1 <b>Einleitung</b> .....	1
1.1    Problemstellung .....	1
1.2    Zielsetzung .....	4
1.3    Aufbau der Arbeit .....	4
1.4    Abgrenzung .....	5
2 <b>Stand der Forschung</b> .....	6
2.1    Querkraftragmechanismen 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    Schub schlankheit $a/d$ bzw. Schlankheit $l/d$ .....	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    Querkraftragmodelle .....	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    Kammmmodell nach KANI .....	29
2.2.3.2    Kammmmodell 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	<b>Versuche zur Ermüdung von Stahlbetonbalken ohne Querkraftbewehrung</b> .....	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	<b>Versuche V1 bis V20 am Institut für Massivbau der TU Hamburg-Harburg</b>	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 VI bis V20 .....	89
4.7.1	Allgemein .....	89
4.7.2	Beschreibung und Auswertung der Versuche VI 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	<b>Materialmodelle</b> .....	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 , <i>concrete damaged plasticity</i> ' .....	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
<b>6</b>	<b>Numerische Simulationen .....</b>	<b>149</b>
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 $g^{\text{da}}$ .....	164
6.5.1.4	Im Ermüdungsprozess dissipierte, schädigungswirksame Energie $g^{\text{fat}}$	165
6.5.1.5	Verzerrungszustand beim Ermüdungsbruch .....	166
6.5.1.6	Evolution der Verzerrung $\epsilon^{\text{fat}}$ 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
<b>7</b>	<b>Resümee und Ausblick .....</b>	<b>178</b>
7.1	Resümee.....	178
7.2	Ausblick .....	181
<b>Anhang A: Auswertung der Versuche anderer Universitäten.....</b>		<b>182</b>
<b>Anhang B: Materialkennwerte der Versuchsreihe V1 bis V20 .....</b>		<b>205</b>
<b>Anhang C: Messwerte der Versuche V1 bis V20 .....</b>		<b>208</b>

Anhang D: Auswertung der Versuche VI 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