

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik und Normung beim UHPC	4
1.3 Problemstellung	5
1.4 Ziel der Arbeit	6
1.5 Gliederung der Arbeit	6
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>8</b>
2.1 Beton	8
2.1.1 Allgemeines	8
2.1.2 Beton - Tragverhalten auf Druck	9
2.1.3 Stahlfaserbeton - Tragverhalten auf Druck	14
2.1.4 Beton - Tragverhalten bei Querdruck / Umschnürung	16
2.2 Stahl - Tragverhalten auf Druck	23
2.3 Stahlbetonstützen aus HPC	24
2.4 Stahlbetonstützen aus HPFRC	31
2.5 Stützen aus UHPC	33
2.5.1 Bewehrte UHPC-Stützen	33
2.5.2 Verbundstützen aus UHPC	35
2.6 Stützen aus UHPFRC	37
2.6.1 UHPFRC-Stützen bei Erdbebeneinwirkung	37
2.6.2 Längs- und bügelbewehrte UHPFRC-Stützen bei zentrischem Längsdruck	38
2.6.3 UHPFRC-Stützen bei zentrischem und einachsrig exzentrischem Längsdruck ohne Bügelbewehrung	39
2.7 Zusammenfassung und offene Fragen	44
<b>3 Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>46</b>
3.1 Vorbemerkungen	46
3.2 Stützenversuche	46
3.2.1 Gedrungene Stützen bei zentrischem Längsdruck	46
3.2.2 Gedrungene UHPFRC-Stützen bei exzentrischem Längsdruck	48
3.2.3 Schlanke UHPFRC-Stützen bei exzentrischem Längsdruck	49
3.3 Materialeigenschaften	50
3.3.1 Spannungs-Stauchungsbeziehung des Betons im Druckbereich	50
3.3.2 Spannungs-Dehnungsbeziehung des Betons im Zugbereich	53
3.3.3 Spannungs-Dehnungsbeziehung der Betonstähle	54
3.4 Versuchsergebnisse	55
3.4.1 Gedrungene Stützen unter zentrischem Längsdruck	55

3.4.2	Gedrungene UHPFRC-Stützen unter einachsiger exzentrischer Längsdruck	61
3.4.3	Schlanke UHPFRC-Stützen unter einachsiger exzentrischer Längsdruck	65
<b>4</b>	<b>Auswertung der eigenen Versuche</b>	<b>67</b>
4.1	Vorbemerkungen	67
4.2	Festigkeit des UHPFRC im Bauteil	67
4.3	Spannungs-Stauchungsbeziehung des einachsiger gedrückten UHPFRC	69
4.4	Spannungs-Stauchungsbeziehung des umschnürten UHPFRC	70
4.5	Querschnittstragfähigkeit $M / N$	81
4.6	Systemtragfähigkeit	83
4.7	Nachbruchverhalten	88
4.7.1	Allgemein	88
4.7.2	Beton im Druckbereich	89
4.7.3	Stahl im Druckbereich	90
4.7.4	Gedrungene Stützen unter zentrischer Längsdruck	90
4.7.5	Gedrungene Stützen unter einachsiger exzentrischer Längsdruck	93
4.7.6	Schlanke Stützen unter einachsiger exzentrischer Längsdruck	93
4.8	Zusammenfassung	93
<b>5</b>	<b>Numerisches Modell</b>	<b>95</b>
5.1	Allgemeines	95
5.2	Bruchkriterien	96
5.2.1	Einführung	96
5.2.2	Einparametrische Bruchkriterien	99
5.2.3	Zweiparametrische Bruchkriterien	100
5.2.4	Mehrpametrische Bruchkriterien	102
5.2.5	Verhalten im Nachbruchbereich / Fließregel	102
5.3	Nachrechnung der Spannungs-Stauchungsbeziehung mit dem eigenen numerischen Modell	103
5.4	Nachrechnung der UHPC- und UHPFRC-Stützen S1 bis S6 und VK1 bis VK2 mit dem eigenen numerischen Modell	107
5.5	Nachrechnung UHPFRC-Stützen SE1 bis SE7 mit dem eigenen numerischen Modell	112
5.6	Nachrechnung UHPFRC-Stützen C1 und C2 mit dem eigenen numerischen Modell	116
5.7	Nachrechnung der Versuche von WATANABE (KOMURO)	122
5.8	Nachrechnung der Versuche von SUGANO	124
5.9	Nachrechnung der Versuche von MALIK	125
5.10	Zusammenfassung	127

<b>6</b>	<b>Ingenieurmodell zum Nachbruchverhalten von UHPFRC-Stützen</b>	<b>128</b>
6.1	Allgemeines	128
6.2	Ansatz zur Beschreibung der Spannungs-Stauchungsbeziehung des UHPFRC bei einachsigem Druck	128
6.3	Ansatz zur Beschreibung der Spannungs-Stauchungsbeziehung von UHPFRC bei dreiachsigem Spannungszustand (Längsdruck / Querdruck)	136
6.4	Ansatz zur Beschreibung des Tragverhaltens der Längsbewehrung	138
6.5	Validierung des Ingenieurmodells	144
6.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Nachrechnung	152
<b>7</b>	<b>Parameterstudien zur Tragfähigkeit und dem Nachbruchverhalten von UHPFRC-Stützen</b>	<b>153</b>
7.1	Allgemeines	153
7.2	Gedrungene UHPFRC-Stützen bei zentrischem Längsdruck	153
7.3	Gedrungene UHPFRC-Stützen bei zentrischem und einachsig exzentrischem Längsdruck	157
7.3.1	Allgemeines	157
7.3.2	Einfluss des Bügelbewehrungsgrades $\rho_w$	157
7.3.3	Einfluss des Längsbewehrungsgrades $\rho_l$	162
7.3.4	Einfluss der Stahlgüte der Bügelbewehrung	165
7.3.5	Einfluss der Stahlgüte der Längsbewehrung	166
7.4	Schlanke UHPFRC-Stützen bei zentrischem und einachsig exzentrischem Längsdruck	167
7.4.1	Einfluss des Bügelbewehrungsgrades $\rho_w$	167
7.4.2	Einfluss des Längsbewehrungsgrades $\rho_l$	169
7.5	Zusammenfassende Auswertung der Parameterstudie	171
7.5.1	Grundsätzliches	171
7.5.2	Gedrungene UHPFRC-Stützen bei zentrischem und einachsig exzentrischem Längsdruck	171
7.5.3	Schlanke UHPFRC-Stützen bei zentrischem und einachsig exzentrischem Längsdruck	174
7.6	Ergebnisse der Parameterstudie	177
<b>8</b>	<b>Zusammenstellung der entwickelten Modelle</b>	<b>178</b>
8.1	Materialgesetze	178
8.1.1	Modell zur Beschreibung der Spannungs-Stauchungsbeziehung des UHPFRC bei einachsigem Druck	178
8.1.2	Modell zur Beschreibung der Spannungs-Stauchungsbeziehung von UHPFRC bei dreiachsigem Spannungszustand (Längsdruck / Querdruck)	179

8.1.3	Modell zur Beschreibung des Tragverhaltens der Längsbewehrung	181
8.2	Querschnittstragfähigkeit von UHPFRC-Stützen	182
8.2.1	Modell zur rechnerischen Ermittlung der Tragfähigkeit von zentrisch gedrückten UHPFRC-Stützen	182
8.2.2	Querschnittstragfähigkeit von UHPFRC-Stützen bei zentrischem und einachsig exzentrischem Längsdruck	184
8.2.3	Systemtragfähigkeit von schlanken UHPFRC-Stützen bei zentrischem und einachsig exzentrischem Längsdruck	187
8.3	Nachbruchverhalten	187
8.3.1	Nomogramme zur Stauchungsduktilität $\mu_{50}$ gedrungener UHPFRC-Stützen	188
8.3.2	Nomogramme zur Stauchungsduktilität $\mu_{50}$ schlanker UHPFRC-Stützen ( $\lambda \leq 70$ )	189
<b>9</b>	<b>Empfehlung zur konstruktiven Durchbildung von UHPFRC-Stützen</b>	<b>192</b>
9.1	Längsbewehrung	192
9.2	Bügelbewehrung	192
9.3	Stahlfaserbewehrung	193
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>195</b>
<b>11</b>	<b>Literatur</b>	<b>198</b>
Anhang A:	Betonzusammensetzungen	A-1
Anhang B:	Bestimmung der Spannungs-Stauchungsbeziehungen der Betone bei Druckbeanspruchung	B-1
Anhang C:	Bestimmung der Spannungs-Dehnungsbeziehungen der Betone bei Zugbeanspruchung	C-1
Anhang D:	Bestimmung der Spannungs-Dehnungsbeziehungen der Stähle	D-1
Anhang E:	Versuche an gedrungenen zentrisch gedrückten UHPC- und UHPFRC-Stützen (S1 bis S6 und VK1 bis VK2)	E-1
Anhang F:	Versuche an gedrungenen zentrisch gedrückten Stützen aus normal- und hochfesten Betonen (VK3 bis VK10)	F-1
Anhang G:	Versuche an gedrungenen exzentrisch gedrückten UHPFRC-Stützen (SE1 bis SE7)	G-1
Anhang H:	Versuche an schlanken exzentrisch gedrückten UHPFRC-Stützen C1 und C2	H-1
Anhang I:	FE-Nachrechnung der Versuche mit zentrischem Längsdruck	I-1
Anhang J:	FE-Nachrechnung der Versuche mit exzentrischem Längsdruck	J-1