

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Variablen.....</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Erläuterung der Forschungsfrage.....	1
1.2 Zielsetzung der Forschungsarbeit.....	4
1.3 Aufbau und Vorgehensweise der Forschungsarbeit .....	4
<b>2 Werkstoffeigenschaften .....</b>	<b>7</b>
2.1 Beton.....	7
2.1.1 Allgemeines .....	7
2.1.2 Mechanische Eigenschaften von Betonen nach DIN EN 1992-1-1 .....	7
2.1.3 Ermittlung von mechanischen Kenngrößen an Kleinversuchskörpern .....	10
2.1.4 Einfluss aus Schwinden und Kriechen .....	13
2.2 Betonstahlbewehrung .....	16
2.3 Bewehrung aus Faserverbundkunststoffen.....	17
2.3.1 Einführung.....	17
2.3.2 Herstellung und Eigenschaften von Bewehrung aus Basaltfaserverbundkunststoff .....	19
2.3.2.1 Allgemeines .....	19
2.3.2.2 Herstellung der Basaltfaser .....	19
2.3.2.3 Kunststoffe zur Verwendung als Matrixsysteme für Faserverbundkunststoffe.....	22
2.3.2.4 Herstellung eines Bewehrungselementes aus Basaltfaserverbundkunststoff .....	24
2.3.2.5 Eigenschaften der Basaltfaserverbundkunststoffbewehrung .....	25
2.3.3 Dauerhaftigkeit von Basaltfaserverbundkunststoffen .....	27
<b>3 Stand der Technik zur Verwendung nichtmetallischer Bewehrung im Betonbau .....</b>	<b>29</b>
3.1 Allgemeines .....	29
3.2 Verbundverhalten von FVK-Bewehrung in Betonbauteilen .....	30
3.2.1 Einführung .....	30
3.2.2 Modellbildung zur Erfassung der Verbundfestigkeit zwischen Bewehrung und Beton .....	31
3.2.2.1 Allgemeines .....	31
3.2.2.2 Verbundverhalten von Faserverbundkunststoffbewehrung .....	32

3.2.2.3	Modellierung des Verbunds zwischen Bewehrung und Beton .....	34
3.2.3	Verbundkriechen.....	36
3.3	Rissabstände und Rissbreiten von FVK-bewehrten Betonbauteilen .....	37
3.3.1	Allgemeines .....	37
3.3.2	Rissbildung in Betonbauteilen.....	38
3.3.3	Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes .....	41
3.3.4	Berechnung der Rissabstände und -breiten.....	43
3.4	Berechnung der Bauteilverformung von FVK-bewehrten Betonbauteilen .....	47
3.5	Biegetragverhalten von BFK-bewehrten Betonbauteilen.....	52
3.6	Querkrafttragverhalten von FVK-bewehrten Betonbauteilen .....	54
<b>4</b>	<b>Stand der Normung zur Bemessung von Betonbauteilen mit nichtmetallischer Bewehrung .....</b>	<b>55</b>
4.1	Einführung .....	55
4.2	Bemessungswerte der FVK-Bewehrung .....	56
4.2.1	Bemessungswert der Zugfestigkeit.....	56
4.2.2	Bemessungswert des E-Moduls von FVK-Bewehrung .....	60
4.2.3	Zusammenfassung .....	62
4.3	Grenzzustand der Tragfähigkeit .....	63
4.3.1	Nachweis der Biegetragfähigkeit.....	63
4.3.2	Nachweis der Querkrafttragfähigkeit .....	65
4.3.3	Ermittlung der Verankerungslänge.....	67
4.4	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	68
4.4.1	Begrenzung der Rissbreite.....	68
4.4.1.1	Allgemeines .....	68
4.4.1.2	Rissmodell nach DIN EN 1992-1-1 (2011) .....	68
4.4.1.3	Rissmodell nach ACI 440.1R-15 (2015).....	69
4.4.1.4	Rissmodell nach CSA-806-12 (2012).....	70
4.4.1.5	Rissmodell nach JSCE (1997).....	71
4.4.1.6	Zusammenfassung und Bewertung der normativen Ansätze.....	72
4.4.2	Begrenzung der Verformungen .....	72
4.4.2.1	Verformungsberechnung nach DIN EN 1992-1-1 (2011) .....	72
4.4.2.2	Verformungsberechnung nach ACI 440.1R-15 (2015).....	75
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>77</b>
5.1	Einführung .....	77
5.1.1	Zielsetzung und Untersuchungsumfang .....	77
5.1.2	Materialeigenschaften des Betons und der Bewehrung.....	77

5.1.3	Verwendete Messtechnik.....	78
5.2	Auszugversuche zur Untersuchung des Verbundverhaltens .....	79
5.2.1	Zielsetzung und Untersuchungsschwerpunkt .....	79
5.2.2	Versuchsprogramm der Auszugversuche .....	80
5.2.3	Auswertung der Auszugversuche .....	85
5.2.3.1	Versuchsserie 1 – Vergleich zwischen Betonstahl und BFK-Bewehrung .....	85
5.2.3.2	Versuchsserie 2 – Einfluss des Stabdurchmessers und der Betonfestigkeit auf das Verbundverhalten.....	89
5.2.3.3	Versuchsserie 3 – Einfluss der Verbundlänge auf das Verbundverhalten .....	94
5.2.3.4	Versuchsserie 4 – Einfluss der Staboberfläche auf das Verbundverhalten .....	98
5.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	103
5.3	Zugversuche an zentrisch bewehrten Betonkörpern zur Untersuchung der Rissbildung.....	104
5.3.1	Zielsetzung und Untersuchungsschwerpunkt der Zugversuche am zentrisch bewehrten Betonkörper .....	104
5.3.2	Versuchsprogramm.....	105
5.3.3	Auswertung der Versuchsergebnisse.....	106
5.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	109
5.4	Untersuchung der Rissentwicklung in Plattenstreifen unter Biegebeanspruchung.....	110
5.4.1	Zielsetzung und Untersuchungsschwerpunkt der Biegeversuche .....	110
5.4.2	Versuchsprogramm zur Untersuchung der Rissentwicklung .....	110
5.4.3	Auswertung der Versuchsergebnisse an biegebeanspruchten Plattenstreifen hinsichtlich der Rissentwicklung.....	114
5.4.4	Auswertung der Bauteilverformungen am Plattenstreifen .....	121
5.5	Untersuchung der Rissbildung an Balken unter Biegebeanspruchung.....	123
5.5.1	Zielsetzung und Untersuchungsschwerpunkt .....	123
5.5.2	Versuchsprogramm zur Untersuchung der Rissbildung.....	124
5.5.3	Auswertung der Versuchsergebnisse an biegebeanspruchten Balken.....	125
5.6	Auswertung der Großversuche hinsichtlich der Tragfähigkeit von BFK bewehrten Betonbauteilen .....	130
5.6.1	Vorbemerkung.....	130
5.6.2	Auswertung der Biegetragfähigkeit der Plattenstreifen.....	131
5.6.3	Auswertung der Querkrafttragfähigkeit am Balkenquerschnitt.....	132
5.7	Zusammenfassung der Erkenntnisse der experimentellen Untersuchungen .....	135

<b>6</b>	<b>Modelle zur Beschreibung des Verbundverhaltens sowie zur Rissbreitenberechnung BFK-bewehrter Betonbauteile .....</b>	<b>137</b>
6.1	Modell zur Beschreibung des ansteigenden Astes der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung für straff umwickelte und besandete BFK-Bewehrung .....	137
6.1.1	Randbedingungen und Grundlagen für die Modellbildung .....	137
6.1.2	Bestimmung der Parameter zur Beschreibung des ansteigenden Astes der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung .....	141
6.1.3	Verbundmodell für straff umwickelte und besandete BFK-Bewehrung .....	148
6.2	Modell zur Berechnung der Rissbreiten für straff umwickelte und besandete BFK-Bewehrung in Betonbauteilen .....	155
6.2.1	Zielsetzung und Grundlagen für das Rissmodell .....	155
6.2.2	Lösung der Differenzialgleichung des verschieblichen Verbundes und Bestimmung der mittleren Beton-, Bewehrungs- und Verbundspannungen in allgemeiner Form .....	158
6.2.2.1	Integration der Schlupffunktion und Ableitung der wirkenden Verbundspannungen am Riss .....	158
6.2.2.2	Funktion zur Beschreibung der Betonspannungen .....	161
6.2.2.3	Funktion zur Beschreibung der Bewehrungsspannungen .....	163
6.2.2.4	Ableitung der Beziehungen für die mittleren Verbund-, Beton-, und Bewehrungsspannungen .....	164
6.2.3	Berechnung der Rissbreiten .....	166
6.2.3.1	Randbedingungen und Eingabeparameter .....	166
6.2.3.2	Berechnung der Rissbreite eines Einzelrisses .....	169
6.2.3.3	Berechnung der maximalen Rissbreite bei abgeschlossener Rissbildung .....	170
6.2.4	Validierung der Gleichungen zur Berechnung der Rissabstände sowie der Rissbreiten .....	173
6.2.4.1	Validierung der Berechnungsgleichung anhand experimenteller Untersuchungen an zentrisch gezogenen Betonkörpern .....	173
6.2.4.2	Validierung der Berechnungsgleichung anhand experimenteller Untersuchungen am Plattenstreifen .....	175
6.2.4.3	Validierung der Berechnungsgleichung mit Hilfe einer Versuchsdatenbank .....	177
6.3	Untersuchung der maßgebenden Einflussparameter auf die Rissbreitenberechnung .....	180
6.3.1	Vorgehensweise .....	180

6.3.2	Einfluss des Exponenten $\alpha$ des Verbundgesetzes .....	181
6.3.3	Einfluss des Bewehrungsgrades .....	186
6.3.4	Einfluss der Steifigkeit der Bewehrung .....	189
6.3.5	Einfluss des Stabdurchmessers .....	191
6.3.6	Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse .....	192
<b>7</b>	<b>Bemessungsvorschlag zur Begrenzung der Rissbreiten BFK-bewehrter Betonbauteile .....</b>	<b>195</b>
7.1	Ausgangssituation .....	195
7.2	Vereinfachung der Berechnungsgleichung des Rissabstandes .....	196
7.3	Bemessungsvorschlag zur Begrenzung der Rissbreiten .....	203
7.3.1	Sicherheitskonzept .....	203
7.3.2	Direkte Berechnung der Rissbreite .....	205
7.3.3	Indirekte Begrenzung der Rissbreiten .....	207
<b>8</b>	<b>Resümee .....</b>	<b>211</b>
8.1	Zusammenfassung .....	211
8.2	Ausblick .....	214
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>215</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>227</b>