

Gert König, Nguyen Viet Tue, Martin Zink

# Hochleistungsбетон

Bemessung, Herstellung und Anwendung

10

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	V
<b>1 Einführung</b> .....	1
<b>2 Technologie</b> .....	5
2.1 Allgemeines .....	5
2.2 Ausgangsstoffe .....	8
2.2.1 Zement .....	8
2.2.2 Zuschläge .....	10
2.2.3 Anmachwasser .....	12
2.2.4 Zusatzstoffe .....	12
2.2.4.1 Steinkohlenflugasche .....	13
2.2.4.2 Silikastaub .....	13
2.2.4.3 Nanosilika .....	17
2.2.4.4 Metakaolin .....	17
2.2.5 Zusatzmittel .....	18
2.2.5.1 Fließmittel .....	18
2.2.5.2 Luftporenbildner .....	21
2.2.5.3 Verzögerer .....	21
2.3 Betonzusammensetzung und Mischungsentwürfe .....	22
2.4 Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung von Hochleistungsbeton	24
2.4.1 Herstellung .....	24
2.4.2 Verarbeitung .....	25
2.4.3 Nachbehandlung .....	25
2.5 Besonderheiten beim Erhärten von Hochleistungsbeton .....	27
2.5.1 Hydratation von Portlandzementen unter Normalbedingungen .....	27
2.5.2 Rücksteifen von Hochleistungsbeton .....	29
2.5.3 Erhärten von Hochleistungsbeton .....	30
2.5.3.1 Einfluß des $w/b$ -Wertes .....	32
2.5.3.2 Einfluß von Silikastaub .....	32
2.5.3.3 Einfluß von Fließmitteln .....	33
2.6 Temperaturentwicklung bei Hochleistungsbeton .....	34
2.7 Festigkeitsentwicklung von Hochleistungsbeton .....	38
2.8 Schwinden von Hochleistungsbeton .....	41
2.8.1 Plastisches Schwinden (Kapillarschwinden) .....	41
2.8.2 Trocknungsschwinden und Karbonatisierungsschwinden .....	41
2.8.3 Chemisches (autogenes) Schwinden .....	42
<b>3 Eigenschaften des Festbetons</b> .....	45
3.1 Mikrostruktur des Hochleistungsbetons .....	45
3.2 Verhalten unter Druckbeanspruchung .....	49

3.2.1	Druckfestigkeit .....	49
3.2.2	E-Modul und Querdehnung .....	51
3.2.3	Spannungs-Dehnungslinie .....	53
3.2.4	Betonfestigkeitsklassen .....	57
3.3	Verhalten unter Zugbeanspruchung .....	58
3.3.1	Zugfestigkeit .....	58
3.3.2	Bruchenergie und Sprödigkeit .....	59
3.4	Zeitabhängige Verformungen .....	61
3.4.1	Allgemeines .....	61
3.4.2	Kriechen .....	62
3.4.3	Schwinden .....	64
3.5	Wärmedehnzahl .....	65
3.6	Verhalten bei dynamischer Beanspruchung .....	65
3.7	Festigkeit unter mehraxialer Belastung und Teilflächenbelastung .....	67
3.8	Dauerhaftigkeit und besondere Eigenschaften .....	68
3.8.1	Allgemeines .....	68
3.8.2	Gas- und Flüssigkeitstransport .....	69
3.8.3	Widerstand gegen chemischen Angriff .....	71
3.8.4	Widerstand gegen Frost- und Frost-Taumittel-Einwirkung .....	73
3.8.5	Korrosionsschutz und Alkalität .....	76
3.8.6	Verschleißwiderstand .....	78
<b>4</b>	<b>Verbund zwischen Bewehrung und Hochleistungsbeton</b> .....	<b>79</b>
4.1	Einflußfaktoren des Verbundes .....	79
4.2	Beziehung zwischen Verbundspannung und Schlupf .....	81
4.3	Zusammenwirken zwischen Spannstahl und Betonstahl bei Bauteilen aus Hochleistungsbeton .....	82
4.4	Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen .....	84
4.5	Neuentwicklungen von Betonstahl für Hochleistungsbeton .....	86
<b>5</b>	<b>Grundlagen der Bemessung</b> .....	<b>89</b>
5.1	Sicherheitskonzept .....	89
5.2	Bemessungswerte der Materialeigenschaften .....	92
5.2.1	Druckfestigkeit .....	93
5.2.2	E-Modul .....	93
5.2.3	Spannungs-Dehnungslinie .....	95
5.2.4	Querdehnzahl .....	96
5.2.5	Zugfestigkeit .....	96
<b>6</b>	<b>Besonderheiten bei vorgespannten Konstruktionen</b> .....	<b>99</b>
6.1	Allgemeines .....	99
6.2	Begrenzung der Zugspannungen .....	100
6.3	Aufbringen der Vorspannkraft .....	102
6.4	Einleitung der Vorspannkraft .....	103
6.4.1	Einleitung der Vorspannkraft bei sofortigem Verbund .....	103

6.4.2	Einleitung der Vorspannkraft bei nachträglichem Verbund . . . . .	104
6.5	Spannkraftverluste infolge Bauteilverformungen . . . . .	106
6.5.1	Verkürzungen während der Hydratation . . . . .	106
6.5.2	Zeitabhängige Verkürzungen nach der Hydratation . . . . .	108
<b>7</b>	<b>Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit</b> . . . . .	<b>109</b>
7.1	Bemessung für Biegung mit und ohne Normalkraft . . . . .	109
7.1.1	Allgemeines . . . . .	109
7.1.2	Querschnittstragfähigkeit von Bauteilen aus Hochleistungsbeton unter Biegung . . . . .	110
7.1.3	Bemessung bei ausmittigem Druck . . . . .	114
7.1.4	Besonderheiten bei vorgespannten Bauteilen . . . . .	115
7.1.5	Bauteilverhalten unter Biegebeanspruchung . . . . .	115
7.1.6	Erhöhung der Duktilität der Biegedruckzone . . . . .	120
7.2	Bemessung für Querkraft und Torsion . . . . .	123
7.2.1	Einleitung . . . . .	123
7.2.2	Querschnitte ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung . . . . .	124
7.2.2.1	Querschnitte mit Biegung und Querkraft . . . . .	124
7.2.2.2	Querschnitte mit Biegung, Normalkraft und Querkraft . . . . .	126
7.2.3	Mindestquerkraftbewehrung . . . . .	129
7.2.4	Bemessung der Querkraftbewehrung . . . . .	131
7.2.5	Tragfähigkeit der Druckstreben . . . . .	136
7.3	Durchstanzen . . . . .	138
7.3.1	Anwendung von hochfestem Beton im Durchstanzbereich . . . . .	138
7.3.2	Durchstanztragfähigkeit von Platten aus Hochleistungsbeton . . . . .	139
7.3.3	Bemessungsansatz nach DIN 1045-1 . . . . .	141
7.3.3.1	Nachweiskonzept . . . . .	141
7.3.3.2	Tragfähigkeit bei Platten ohne Querkraftbewehrung . . . . .	143
7.3.3.3	Durchstanztragfähigkeit mit Durchstanzbewehrung . . . . .	144
7.4	Stützen . . . . .	146
7.4.1	Tragfähigkeit von Stützen . . . . .	146
7.4.2	Tragverhalten von Stützen . . . . .	149
7.4.3	Konstruktive Durchbildung von Stützen . . . . .	151
7.4.4	Bemessung und konstruktive Durchbildung des Fertigteilstützenstoßes . . . . .	153
7.4.5	Anschluß zwischen Stützen und Decken . . . . .	156
7.5	Wände aus Hochleistungsbeton . . . . .	158
7.6	Brandschutz . . . . .	160
<b>8</b>	<b>Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit</b> . . . . .	<b>165</b>
8.1	Allgemeines . . . . .	165
8.2	Begrenzung der Spannungen . . . . .	165
8.3	Begrenzung der Durchbiegung . . . . .	166
8.3.1	Durchbiegung von Bauteilen aus Hochleistungsbeton . . . . .	166
8.3.2	Biegesteifigkeit von Bauteilen aus Hochleistungsbeton . . . . .	166

8.4	Begrenzung der Rißbreite .....	168
8.4.1	Anforderungen an die Rißbreite .....	168
8.4.2	Phasen der Rißbildung und rechnerische Rißbreite .....	169
8.4.3	Durchmessertabelle für die Begrenzung der Rißbreiten .....	173
8.5	Mindestbewehrung bei vorwiegend zwangbeanspruchten Bauteilen ..	175
8.5.1	Oberflächenbewehrung .....	175
8.5.2	Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rißbreite unter Zwang .....	176
8.5.2.1	Zwangkräfte in Bauteilen aus Hochleistungsbeton .....	176
8.5.2.2	Bestimmung der Rißkraft .....	177
8.5.2.3	Ermittlung der Mindestbewehrung .....	182
<b>9</b>	<b>Voraussetzungen für die erfolgreiche Anwendung von Hochleistungsbeton</b> .....	<b>183</b>
9.1	Allgemeines .....	183
9.2	Eignungsprüfung .....	184
9.3	Qualitätssicherungsplan .....	190
9.4	Verarbeitungsversuch .....	197
9.5	Einbau und Nachbehandlung .....	205
<b>10</b>	<b>Anwendungsbeispiele</b> .....	<b>209</b>
10.1	Hochbau .....	209
10.1.1	Hochhaus Trianon – Erstanwendung in Deutschland .....	209
10.1.2	Hochhaus Taunustor Japan Center .....	213
10.1.3	Forum Frankfurt: Kastor und Pollux .....	217
10.1.4	Commerzbank Zentrale .....	222
10.1.5	Der Main Tower .....	225
10.2	Brückenbau .....	229
10.2.1	Die zweite Stichtse Brücke und andere Pilotprojekte in Holland .....	229
10.2.2	Brücke Sasbach – Spannbetonpremiere in Deutschland .....	235
10.2.3	Fußgängerbrücke Rudisleben – Betonstäbe in Leichtbeton .....	240
10.2.4	Betriebsbrücke Weißeritz – Spannbetonpremiere in Sachsen .....	246
10.2.5	Der Karl-Heine-Bogen: eine hybride Brückenkonstruktion .....	251
10.2.6	Muldebrücke Glauchau .....	257
10.2.7	Rheinbrücke Altenheim–Eschau .....	261
<b>11</b>	<b>Betone mit besonderen Eigenschaften</b> .....	<b>267</b>
11.1	Hochleistungsleichtbetone .....	267
11.1.1	Bandbreite des Leichtbetons .....	267
11.1.2	Konstruktive Leichtbetone .....	268
11.1.2.1	Klassifizierung konstruktiver Leichtbetone .....	268
11.1.2.2	Definition von Hochleistungsleichtbeton .....	270
11.1.3	Eigenschaften von Hochleistungsleichtbeton .....	271
11.1.3.1	Grundlagen .....	271
11.1.3.2	E-Modul .....	277
11.1.3.3	Spannungs-Dehnungslinie .....	278

11.1.3.4	Zugfestigkeit .....	281
11.1.3.5	Dauerhaftigkeit, Dichte und Wärmeleitfähigkeit .....	282
11.1.4	Besonderheiten bei Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung von Hochleistungsleichtbeton .....	283
11.1.4.1	Mischungsentwurf .....	283
11.1.4.2	Herstellung .....	286
11.1.4.3	Verarbeitung .....	287
11.1.4.4	Nachbehandlung .....	288
11.1.5	Einsatzgebiete der Hochleistungsleichtbetone .....	289
11.2	Stahlfaserbeton .....	293
11.2.1	Allgemeines .....	293
11.2.2	Technologie .....	295
11.2.2.1	Stahlfasern .....	295
11.2.2.2	Polypropylenfasern .....	296
11.2.2.3	Frischbetoneigenschaften .....	296
11.2.3	Festbetoneigenschaften .....	297
11.2.3.1	Spannungs-Dehnungslinie .....	297
11.2.3.2	E-Modul und Querdehnzahl .....	298
11.2.3.3	Zugfestigkeit .....	298
11.2.3.4	Schwinden .....	299
11.2.3.5	Dauerhaftigkeit .....	299
11.2.4	Zugtragverhalten .....	299
11.2.5	Tragverhalten unter zentrischem und ausmittigem Druck .....	301
11.2.6	Tragverhalten unter Biegebeanspruchung .....	304
11.2.7	Querkrafttragverhalten stahlfaserverstärkter Betone .....	305
11.3	Ultrahochfeste Betone .....	307
11.3.1	Herstellung ultrahochfester Betone .....	308
11.3.1.1	Grundprinzip .....	308
11.3.1.2	Verbesserung der Homogenität .....	309
11.3.1.3	Optimierung des Korngemischs .....	310
11.3.2	Auswahl der Stoffe .....	312
11.3.2.1	Zuschläge .....	312
11.3.2.2	Zement .....	313
11.3.2.3	Silikastaub .....	314
11.3.2.4	Wasser und Fließmittel .....	315
11.3.2.5	Stahlfasern .....	316
11.3.3	Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung von ultrahochfesten Betonen .....	317
11.3.3.1	Mischen von ultrahochfesten Betonen .....	317
11.3.3.2	Verdichtung von ultrahochfesten Betonen .....	318
11.3.3.3	Nachbehandlung von ultrahochfesten Betonen .....	318
11.3.4	Mikrostrukturelle und chemische Eigenschaften von <i>UHPC</i> .....	321
11.3.4.1	Hydratation .....	321
11.3.4.2	Puzzolanische Reaktion .....	321

11.3.4.3	Autogenes Schwinden von <i>UHPC</i> .....	323
11.3.4.4	Porosität .....	323
11.3.4.5	Dauerhaftigkeit von <i>UHPC</i> .....	326
11.3.4.6	Mikrostruktur von <i>UHPC</i> .....	326
11.3.5	Eigene Erfahrungen mit ultrahochfestem Beton .....	327
11.3.5.1	Mischversuche .....	327
11.3.5.2	Nachbehandlung und Wärmebehandlung .....	328
11.3.5.3	Festigkeitsprüfungen .....	329
11.3.5.4	Ergebnisse .....	329
11.3.6	Praktische Anwendungen von ultrahochfestem Beton .....	330
11.3.7	Beispielrezepturen für ultrahochfesten Beton .....	332
11.4	Selbstverdichtender Beton .....	333
11.4.1	Einführung .....	333
11.4.2	Rheologie .....	335
11.4.2.1	Allgemeines .....	335
11.4.2.2	Rheologie des Zementleims .....	337
11.4.2.3	Auswirkungen der Rheologie auf <i>SCC</i> .....	338
11.4.3	Mischungsentwurf für einen <i>SCC</i> (Puder-Typ) .....	339
11.4.3.1	Einleitung .....	339
11.4.3.2	Luftporenvolumen .....	342
11.4.3.3	Grobzuschlagsvolumen .....	342
11.4.3.4	Feinzuschlagsvolumen .....	343
11.4.3.5	Wasser-Mehlkorn-Verhältnis $w/m$ .....	344
11.4.3.6	Fließmitteldosierung .....	344
11.4.3.7	Verifizierung der Mischung .....	344
11.4.3.8	Bestimmung des Wasser-Mehlkorn-Volumenverhältnisses $V_w/V_m$ .....	344
11.4.3.9	Verifizierung der Mörtel Eigenschaften .....	345
11.4.3.10	Bestimmung der optimalen Zusatzmitteldosierungen am Beton .....	346
11.4.4	Mischungsbestandteile zur Herstellung von <i>SCC</i> .....	346
11.4.4.1	Mehlkorn .....	346
11.4.4.2	Fließmittel .....	347
11.4.4.3	Stabilisierer .....	347
11.4.5	Testverfahren für <i>SCC</i> .....	348
11.4.5.1	Prüfungen für Leim und Mörtel .....	348
11.4.5.2	Betonprüfungen .....	349
11.4.5.3	Weitere Prüfverfahren zur Beurteilung von <i>SCC</i> .....	351
11.4.6	Festbetoneigenschaften von <i>SCC</i> .....	352
11.4.7	Mischen, Verarbeiten und Nachbehandeln von <i>SCC</i> .....	354
11.4.8	Praktische Anwendungsbeispiele .....	354
<b>Anhang: Bemessungsbeispiele nach DIN 1045-1 .....</b>		<b>357</b>
<b>Literatur .....</b>		<b>387</b>
<b>Stichwortverzeichnis .....</b>		<b>409</b>