

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *V*

Herausgeber- und Autor:innenverzeichnis *XVII*

- 1 Einleitung und Überblick** *1*
Silke Scheerer und Frank Schladitz
 - 1.1 Geschichtliche Entwicklung *1*
 - 1.1.1 Die Anfänge des Betonbaus *1*
 - 1.1.2 Faserbewehrungen für Beton *2*
 - 1.1.3 Das C³-Projekt – Carbonbeton für den baupraktischen Einsatz *6*
 - 1.2 Allgemeine Vorteile und Grenzen *6*
 - 1.3 Einsatzgebiete *10*
Literatur *14*

- 2 Bewehrung** *21*
Steffen Rittner, Frank Schladitz und Elisabeth Schütze
 - 2.1 Material *21*
 - 2.1.1 Einleitung *21*
 - 2.1.2 Carbon *23*
 - 2.1.3 Glas *26*
 - 2.1.4 Basalt *28*
 - 2.1.5 Naturfasern *28*
 - 2.1.6 Wirkfaden *29*
 - 2.1.7 Schlichte *29*
 - 2.1.8 Tränkung – Imprägnierung – Beschichtung *30*
 - 2.1.9 Auswahl am Markt erhältlicher Produkte *33*
 - 2.2 Bewehrungsformen *34*
 - 2.2.1 Einleitung *34*
 - 2.2.2 Stabbewehrung *34*
 - 2.2.3 Mattenbewehrung *39*
 - 2.2.4 Auswahl am Markt erhältlicher Produkte *50*
Literatur *51*

VIII | *Inhaltsverzeichnis*

- 3** **Beton** 55
 Marko Butler, Viktor Mechtcherine und Kai Wilhelm
- 3.1 Bindemittel und Zusatzstoffe 55
- 3.1.1 Portlandzementklinker 56
- 3.1.2 Reaktive und inerte Stoffe für den Ersatz von Portlandzementklinker 57
- 3.1.3 Neuartige/Alternative Bindemittel 61
- 3.2 Konzepte für den Betonentwurf 65
- 3.2.1 Was ist Frischbeton? 65
- 3.2.2 Unterschied Carbonbeton (Textilbeton) zu Normalbeton 67
- 3.2.3 Betonnomenklatur 68
- 3.3 Parameter des Betonentwurfs 68
- 3.3.1 Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie Bauteilgeometrie 68
- 3.3.2 Wasser- und Fließmittelgehalt 70
- 3.3.3 Größtkorn der Gesteinskörnung 71
- 3.3.4 Theorie der Kornzusammensetzung 74
- 3.3.5 Mischverfahren/Mischregime 78
- 3.4 Marktverfügbare Bindemittel und Betone 79
- 3.4.1 Bindemittel und Zusatzstoffe 79
- 3.4.2 Betone für den Neubau 80
- 3.4.3 Betone für Verstärkung und Instandsetzung 82
- Literatur 83

- 4** **Verbundwerkstoff** 87
 Maximilian May
- 4.1 Grundlagen 87
- 4.1.1 Erläuterung des Verbundwerkstoffs 87
- 4.1.2 Bestandteile und Aufgaben der Komponenten im VWS-System
 „Nichtmetallische Bewehrung“ 87
- 4.1.3 Bestandteile und Aufgabe der Komponenten im VWS-System
 „Bewehrter Beton“ 88
- 4.2 Zugtragverhalten des VWS-Systems „Bewehrter Beton“ 88
- 4.3 Verbundmechanismen 90
- 4.3.1 Verbund innerhalb der nichtmetallischen Bewehrung 91
- 4.3.2 Verbund zwischen der Betonmatrix und der nichtmetallischen
 Bewehrung 91
- 4.3.3 Verbund- und Versagensmechanismen bei Stabbewehrungen 93
- 4.3.4 Verbund- und Versagensmechanismen bei Gitterbewehrungen 94
- 4.3.5 Einflussfaktoren auf das Verhalten des VWS-Systems „Bewehrter
 Beton“ 97
- Literatur 97

- 5 Grundlagen des Bewehrens 99**
Josef Hegger, Sergej Rempel, Alexander Schumann, Elisabeth Schütze und Norbert Will
 - 5.1 Allgemeine Konstruktionsdetails 99
 - 5.1.1 Allgemeines 99
 - 5.1.2 Wahl der Bewehrung 99
 - 5.1.3 Herstellungsprozess der bewehrten Betonbauteile 103
 - 5.2 Textile Bewehrung 107
 - 5.2.1 Betondeckung und Einbautoleranzen 107
 - 5.2.2 Allgemeine Bewehrungsregeln für textile Bewehrungen 109
 - 5.3 Stabförmige Bewehrung 120
 - 5.3.1 Vorbemerkung 120
 - 5.3.2 Betondeckung 121
 - 5.3.3 Biegen von nichtmetallischen Stäben 123
 - 5.3.4 Endverankerung 124
 - 5.3.5 Stöße 130
 - 5.3.6 Sonstige Konstruktionsdetails und offene Fragestellungen 131
 - Literatur 132

- 6 Verarbeitung und Produktion 135**
Klaus Holschemacher, Stefan Käseberg, Sebastian May, Egbert Müller, Silke Scheerer, Alexander Schumann und Christian Wagner
 - 6.1 Einleitung 135
 - 6.2 Herstellung und Transport des Betons 135
 - 6.3 Verarbeitung der Bewehrung 137
 - 6.3.1 Lagerung auf der Baustelle und im Fertigteilwerk 137
 - 6.3.2 Verarbeitung der Bewehrung 137
 - 6.3.3 Automatisierung 140
 - 6.4 Lagesicherung beim Bewehrungseinbau 140
 - 6.5 Schalung 143
 - 6.6 Beton-Einbautechnologien 144
 - 6.7 Nachbehandlung 147
 - 6.7.1 Allgemeines zur Nachbehandlung 147
 - 6.7.2 Beginn und Dauer der Nachbehandlung 148
 - 6.7.3 Besonderheiten beim Carbonbeton 149
 - 6.8 Transport- und Montagezustände bei Fertigteilen 151
 - 6.9 Weiterverarbeitung von Halbfertigteilen in der Elementbauweise 153
 - 6.10 Verstärkung und Instandsetzung 154
 - 6.10.1 Einführung 154
 - 6.10.2 Untergrund vorbereiten 154
 - 6.10.3 Spritz- und Laminierverfahren 156
 - 6.10.4 Nachbehandlung 160
 - 6.10.5 Eigen- und Fremdüberwachung 160
 - Literatur 160

X | *Inhaltsverzeichnis*

- 7** **Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit** 163
Sarah Bergmann, Jan Bielak, Sven Bosbach, Josef Hegger, Sebastian May, Egbert Müller, Eric Mündecke, Jan Philip Schulze-Ardey, Alexander Schumann, Arne Spelter und Norbert Will
- 7.1 Sicherheitkonzept 163
- 7.2 Ermittlung der Bemessungswerte 168
- 7.3 Teilsicherheitsbeiwerte 171
- 7.4 Mindestbewehrung 175
- 7.5 Neubau 177
- 7.5.1 Biegung mit/ohne Normalkraft 177
- 7.5.2 Querkraft 189
- 7.5.3 Torsion 206
- 7.5.4 Durchstanzen 212
- 7.5.5 Bauteile unter Normalkraft nach Theorie II. Ordnung 216
- 7.6 Verstärkung/Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen 222
- 7.6.1 Biegung 222
- 7.6.2 Querkraft 228
- 7.6.3 Torsionsverstärkung mit Carbonbeton 237
- 7.6.4 Normalkraftbeanspruchte Bauteile 242
- 7.7 Bemessungshilfen 246
Literatur 251

- 8** **Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit** 263
Ulrich Häußler-Combe
- 8.1 Allgemeines 263
- 8.2 Einführung zum fortlaufenden Berechnungsbeispiel 264
- 8.3 Dehnungs- und Spannungsverhältnisse des Biegequerschnitts 266
- 8.3.1 Querschnittswerte im Zustand I 266
- 8.3.2 Dehnungs- und Spannungsverhältnisse im Zustand II 268
- 8.3.3 Beispiel 270
- 8.4 Spannungsnachweise 272
- 8.4.1 Allgemeines 272
- 8.4.2 Berechnungsansätze 273
- 8.4.3 Beispiel 274
- 8.5 Berechnung der Rissbreiten 277
- 8.5.1 Allgemeines 277
- 8.5.2 Berechnungsansätze 277
- 8.5.3 Beispiel 279
- 8.6 Direkte Berechnung der Verformungen 281
- 8.6.1 Allgemeines 281
- 8.6.2 Berechnungsansätze 282
- 8.6.3 Beispiel 285
Literatur 288

9	Dauerstand und Ermüdung	289
	<i>Josef Hegger, Steffen Müller, Arne Spelter, Juliane Wagner und Norbert Will</i>	
9.1	Grundlagen des Dauerstand- und Ermüdungsverhaltens	289
9.2	Materialverhalten unter Dauerbeanspruchung	292
9.2.1	Dauerstandverhalten von Carbon/CFK	292
9.2.2	Dauerstandverhalten der zementgebundenen Matrix	293
9.2.3	Dauerstandverhalten von Carbonbeton	296
9.2.4	Dauerstandverhalten von Carbonbetonbauteilen	300
9.2.5	Nachweise	303
9.3	Materialverhalten bei Ermüdungsbeanspruchung	305
9.3.1	Ermüdungsverhalten von Carbon/CFK	305
9.3.2	Ermüdungsverhalten der zementgebundenen Matrix	307
9.3.3	Ermüdungsverhalten von Carbonbeton	310
9.3.4	Ermüdungsverhalten von Carbonbetonbauteilen	313
9.3.5	Nachweise	316
	Literatur	316
10	Dauerhaftigkeit	323
	<i>Philipp Kunz und Viktor Mechtcherine</i>	
10.1	Einführung	323
10.2	Mechanismen der Schädigung	325
10.3	Grundlagen der Dauerhaftigkeitsbewertung und Konzept	326
10.3.1	Allgemeine Bemerkungen	326
10.3.2	Korrosionsschutz der Stahlbewehrung	327
10.3.3	Dauerhaftigkeit der Matrix	328
10.3.4	Dauerhaftigkeit von Faser und Polymertränkung	329
10.3.5	Dauerhaftigkeit des Faser-Matrix-Verbundes	329
10.4	Charakteristische Materialeigenschaften für die Vorhersage von Langzeitdauerhaftigkeit und Lebensdauer	330
10.4.1	Allgemeine Bemerkungen	330
10.4.2	Transporteigenschaften	330
10.4.3	Dehnvermögen von Carbonbeton	333
10.4.4	Selbstheilung von Rissen	334
10.5	Zusammenfassung und Ausblick	336
	Literatur	337
11	Vorspannung	341
	<i>Andreas Apitz, Alex Hückler, Juan P. Osman-Letelier und Mike Schlaich</i>	
11.1	Einleitung	341
11.1.1	Allgemeines	341
11.1.2	Stand der Forschung	342
11.1.3	Anwendungen	342
11.2	Biegebemessung	348
11.2.1	Einleitung und Stand der Normung	348

XII | *Inhaltsverzeichnis*

- 11.2.2 Konzept für eine Bemessung von Bauteilen aus vorgespanntem Carbonbeton 349
- 11.2.3 Grenzzustand der Tragfähigkeit 350
- 11.2.4 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 350
- 11.2.5 Sonstige Nachweise 351
- 11.3 Beispiel Biegebemessung 351
- 11.3.1 System: Plattenbalken mit sofortigem Verbund vorgespannt 351
- 11.3.2 Tragfähigkeitskriterien 353
- 11.3.3 Verformungskriterien 355
- 11.4 Technologie und Herstellung 356
- 11.4.1 Schläffe Stabbewehrung 356
- 11.4.2 Spannglied 358
- 11.4.3 Vorspannen von Gelegen 358
- 11.4.4 Bewehren 359
- 11.4.5 Spannglied – Transport, Montage und Vorspannen 361
- 11.4.6 Fertigstellung 362
- 11.5 Zusammenfassung und Ausblick 362
- Literatur 364

12 Einbauteile 367

Matthias Roik und Frank Schladitz

- 12.1 Befestigungs- und Verbindungsmittel 367
- 12.1.1 Einleitung 367
- 12.1.2 Versagensarten 368
- 12.2 Verbindungsmittel 372
- 12.3 Abstandhalter 372
- 12.4 Transportankersysteme 375
- 12.4.1 Einleitung 375
- 12.4.2 Versagensarten 377
- 12.4.3 Transportanker für dünne, textildbewehrte Betonelemente 378
- 12.5 Auswahl der auf dem Markt erhältlichen Produkte 379
- 12.5.1 Vertikalverankerung, Fassadenplattenanker 379
- 12.5.2 Horizontalverankerungen 380
- 12.5.3 Verstiftungen 381
- 12.5.4 Transportanker 382
- Literatur 383

13 Materialprüfung 385

Marko Butler, Josef Hegger, Thomas Heiermann, Karoline Holz, Philipp Kunz, Maximilian May, Cynthia Morales Cruz, Stephan Reichel, Silke Scheerer, Jörg Schmidt, Jan Philip Schulze-Ardey, Alexander Schumann, Arne Spelter, Juliane Wagner, Kai Wilhelm und Norbert Will

- 13.1 Ausgangsmaterialien 385
- 13.1.1 Vorbemerkungen 385

- 13.1.2 Chemische Komponenten für Schlichte und Tränkung 385
- 13.1.3 Faser 388
- 13.1.4 Betone 390
- 13.2 Verbundmaterial 393
 - 13.2.1 Zugfestigkeit 394
 - 13.2.2 Verbundverhalten 402
 - 13.2.3 Temperaturbeständigkeit 417
 - 13.2.4 Dauerstand 421
 - 13.2.5 Ermüdung 427
 - 13.2.6 Dauerhaftigkeit 432
 - 13.2.7 Brand 439
 - Literatur 441

- 14 Normen und Richtlinien 449**
Christoph Alfes, Alexander Schumann und Robert Zobel
 - 14.1 Nationale Normen und Richtlinien 449
 - 14.1.1 Technische Baubestimmungen – Grundlagen 449
 - 14.1.2 Aktueller Stand der rechtlichen Grundlage 452
 - 14.1.3 Vorbereitung von Richtlinien für Carbonbeton 454
 - 14.2 Internationale Normen und Richtlinien 457
 - 14.3 Genehmigungen für Bauarten mit Textilbeton/Carbonbeton 459
 - 14.3.1 Zustimmung im Einzelfall – vorhabenbezogene Bauartgenehmigung 459
 - 14.3.2 Zulassung 462
 - 14.4 Zusammenfassung 463
 - Literatur 464

- 15 Bauphysik 467**
John Grunewald, Karoline Holz, Michael Juknat, Alexander Kahnt, Stephan Reichel, Jörg Schmidt und Mario Stelzmann
 - 15.1 Wärme und Feuchte 467
 - 15.1.1 Vergleich Außenwände aus Carbon- und Stahlbeton 468
 - 15.1.2 Tauwasser im Inneren von Baukonstruktionen 470
 - 15.1.3 Nachweis Periodenbilanzverfahren 471
 - 15.1.4 Nachweis hygrothermische Simulation 474
 - 15.1.5 Schlagregenschutz 475
 - 15.1.6 Winterlicher Wärmeschutz 476
 - 15.1.7 Sommerlicher Wärmeschutz 476
 - 15.1.8 Optische Dauerhaftigkeit 476
 - 15.2 Schallschutz 478
 - 15.3 Brand 479
 - Literatur 483

XIV | *Inhaltsverzeichnis*

- 16 Recycling 485**
Peter Jehle und Jan Kortmann
 - 16.1 Einleitung 485
 - 16.2 Abbruch und Rückbau 486
 - 16.3 Baustoffaufbereitung 488
 - 16.3.1 Einleitung 488
 - 16.3.2 Zerkleinerung und Aufschluss 489
 - 16.3.3 Sortierung und Klassierung 490
 - 16.3.4 Empfohlener Aufbereitungsprozess 491
 - 16.4 Materialverwertung 492
 - 16.4.1 Einleitung 492
 - 16.4.2 Verwertung mineralische Fraktion 493
 - 16.4.3 Verwertung Faserfraktion 493
 - Literatur 495

- 17 Ökologische Beurteilung von Betonbauteilen mit Bewehrung
 aus Carbongelegen 497**
*Marleen Backes, Carl-Alexander Graubner, Torsten Mielecke,
Christoph Müller und Julia Schütz*
 - 17.1 Grundlagen der Ökobilanzierung 497
 - 17.2 Umweltwirkungen von C³-Betonen 498
 - 17.2.1 Allgemeines 498
 - 17.2.2 C³-Betonen für neue Bauteile 498
 - 17.2.3 C³-Betonen zur Verstärkung bestehender Bauteile 500
 - 17.3 Umweltwirkungen von Carbongelegen 502
 - 17.4 Vergleichende Ökobilanzierung von Bauteilen 503
 - 17.4.1 Grundlagen 503
 - 17.4.2 Parkhausdecke 503
 - 17.4.3 Fertigteil-Wandsysteme 504
 - 17.5 Umweltverträglichkeit 506
 - 17.5.1 Charakterisierungsversuche und Festlegung der Carbonfaser und des
 Feinbetons für die weiteren Auslaug- und Beregnungsversuche 506
 - 17.5.2 Herstellung der Feinbetonprüfkörper 507
 - 17.5.3 DSLT-Auslaugung der vier unterschiedlichen Feinbetonprobekörper FB-1
 bis FB-1-4-2 508
 - 17.5.4 Zusammenfassung 510
 - Literatur 511

- 18 Arbeits- und Gesundheitsschutz 513**
Peter Jehle, Florian Kopf, Thorsten Streibel und Ralf Zimmermann
 - 18.1 Gesundheitsrisiken bei Tätigkeiten mit Carbonbeton 513
 - 18.1.1 Einleitung 513
 - 18.1.2 Physikalisch-morphologische Analyse 514
 - 18.1.3 Chemische Analyse 514
 - 18.1.4 In-vitro Untersuchungen 515

- 18.1.5 Thermische Beanspruchung 516
- 18.2 Verarbeitung von Carbonbewehrungen 517
 - 18.2.1 Einleitung 517
 - 18.2.2 Be- und Verarbeitungsverfahren und Gefährdungen 518
 - 18.2.3 Schutzmaßnahmen 519
 - 18.2.4 Zusammenfassung 520
- 18.3 Be- und Verarbeitung von Carbonbeton 520
 - 18.3.1 Einleitung 520
 - 18.3.2 Be- und Verarbeitungsverfahren und Gefährdungen 521
 - 18.3.3 Schutzmaßnahmen 522
 - 18.3.4 Zusammenfassung 523
 - Literatur 523
- 19 Multifunktionalität 525**
Klaus Holschemacher, Stefan Käseberg, Tobias Rudloff und Dominik Schlüter
 - 19.1 Designkriterien multifunktionaler Bauteile aus Carbonbeton 525
 - 19.2 Konstruktionsentwicklung multifunktionaler Fertigteile am Beispiel elektrischer Energiespeicherung 528
 - 19.3 Basisstruktur zur Funktionsintegration 533
 - 19.4 Lichtleitung in Carbonbeton 534
 - 19.4.1 Allgemeines 534
 - 19.4.2 Optische Fasern und Lichtwellenleiter 536
 - 19.4.3 Technische Textilien mit aktiven Leuchtfunktionen 536
 - 19.4.4 Transluzenter Beton 537
 - 19.4.5 Lichtleitender Beton 538
 - 19.4.6 Anwendung im Carbonbetonbau 539
 - 19.5 Strukturüberwachung 539
 - 19.5.1 Allgemeines 539
 - 19.5.2 Bewehrungen aus Carbonfasergelegen mit Sensorintegration für Betonfertigteile 541
 - Literatur 543
- 20 Praktische Anwendung 545**
Michael Frenzel, Matthias Lieboldt, Stefan Minar, Silke Scheerer und Angela Schmidt
 - 20.1 Neubau 545
 - 20.1.1 Allgemeine Entwicklung in der Bundesrepublik Deutschland 545
 - 20.1.2 Hochbauweise 548
 - 20.1.3 Ingenieurbauweise 550
 - 20.2 Verstärkung und Instandsetzung 552
 - 20.2.1 Allgemeine Entwicklung 552
 - 20.2.2 Hochbau 553
 - 20.2.3 Ingenieurbau 559
 - 20.2.4 Tiefbau/Infrastruktur 564

XVI | *Inhaltsverzeichnis*

20.3	C ³ -Ergebnishaus	565
20.3.1	Ziele und Intensionen	565
20.3.2	Entwurf	567
20.3.3	Planung und Ausführung der BOX (Halb-)Fertigteile	567
20.3.4	Planung und Ausführung der TWIST-Schalenelemente	568
20.3.5	Bewertung der Carbonbetonbauweise	570
20.3.6	Danksagung	570
20.4	Mehr als ein Baustoff – Carbonbeton in Kunst und Alltag	570
20.4.1	Vorbemerkung	570
20.4.2	Betonboote	571
20.4.3	Kunstwerke	572
20.4.4	Carbonbeton im Innen- und Außenraum	573
	Literatur	575
21	Ausschreibung und Vergabe für Carbon- und Textilbeton	581
	<i>Alexander Kahnt und Matthias Tietze</i>	
21.1	Ausschreibung, Vergabe, Leistungsbeschreibung	581
21.1.1	Einleitung	582
21.1.2	Verschiedene Verfahren	582
21.1.3	Bauvorhaben mit dem Einsatz von Carbonbeton	584
21.2	Ausschreibungsplanung	584
21.2.1	Einleitung	584
21.2.2	Funktionale Ausschreibung	585
21.2.3	Leistungspositionen	585
21.3	Ausschreibungstexte Beispiele	585
21.3.1	Verstärkung	586
21.3.2	Fertigteile	588
21.4	Ausblick	590
	Literatur	590
22	Aus- und Weiterbildung	591
	<i>Ammar Al-Jamous</i>	
	Literatur	593
	Inserentenverzeichnis	595