

Manfred Curbach, Josef Hegger, Frank Schladitz,
Matthias Tietze, Matthias Lieboldt (Hrsg.)

Handbuch Carbonbeton

Einsatz nichtmetallischer Bewehrung

- **umfassendes Handbuch über Carbonbeton und andere nichtmetallische Bewehrungen**
- **Zusammenführung der Erkenntnisse aus universitärer und industrieller Forschung mit ersten Anwendungserfahrungen**

Einziges Handbuch mit aktuellem Wissensstand zur Anwendung der neuen Bauweise – für Neubau sowie Ertüchtigung und Instandsetzung: Konstruktionen aus Carbonbeton ermöglichen Materialersparnis, Reduzierung von Energiebedarf und CO₂-Ausstoß und lassen hohe Lebensdauern erwarten.



2023 · 596 Seiten · 392 Abbildungen ·
60 Tabellen

Hardcover
ISBN 978-3-433-03206-0 € 109*

eBundle (Print + ePDF)
ISBN 978-3-433-03379-1 € 139*

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3206

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland, inkl. MwSt. Der Subskriptionspreis gilt nur bis zum Erscheinungstermin des Buches. Danach kann das Buch nur zum Vollpreis bestellt werden.

ÜBER DAS BUCH

Carbonbeton ist die Bauweise der Zukunft. Angesichts der drängenden Aufgaben zur Begrenzung des Klimawandels und des sorgsamsten Umgangs mit den begrenzten Ressourcen hat der Carbonbeton genau die richtigen Eigenschaften. Er spart mehr als 50 % Ressourcen, insbesondere Sand, und reduziert den CO₂-Ausstoß um bis zu 70 %.

Carbonbeton ist somit ein Game-Changer, der auf das Bauen ebenso Auswirkungen hat wie auf das Erscheinungsbild und die Nutzung der gebauten Umwelt. Zusammen mit der sehr langen Lebensdauer, dem Werterhalt, der Bezahlbarkeit und der Ästhetik verdient er die Bezeichnung einer disruptiven Innovation.

Nach Entstehung der Idee vor fast 30 Jahren und nach intensiver Grundlagenforschung im Rahmen zweier Sonderforschungsbereiche der DFG konnte die erforderliche anwendungsorientierte Forschung durch das Konsortium C³ – Carbon Concrete Composite durchgeführt werden. Dieses vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Zwanzig20-Programms unterstützte Großprojekt hat gezeigt, dass Carbonbeton in die Praxis überführt werden kann.

Hierzu haben über 160 Partner alle notwendigen neuen Kenntnisse erarbeitet.

Höhepunkt und zusammenfassendes Ergebnis ist der CUBE, das erste komplett aus Carbonbeton gefertigte Gebäude. Es besteht aus der „Box“, die die Möglichkeiten wirtschaftlichen und modularen Bauens zeigt, und aus dem „Twist“, der die Entstehung einer neuen Architektursprache visualisiert.

Das vorliegende Buch fasst den heute vorliegenden Stand des Wissens zu Carbonbeton von den Grundlagen bis zur Anwendung zusammen und darf daher als Standardwerk des Neuen Bauens bezeichnet werden.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03206-0	Handbuch Carbonbeton: Einsatz nichtmetallischer Bewehrung	€ 109*
	978-3-433-03379-1	Handbuch Carbonbeton [...] (Print + ePDF)	€ 139*

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:

Tel. +49 (0)30 47031-236

Fax +49 (0)30 47031-240

marketing@ernst-und-sohn.de

Privat	Geschäftlich	
Firma, Abteilung	UST-ID Nr.	
Name, Vorname	Telefon	Fax
Straße, Nr.		
PLZ/Ort/Land	E-Mail	
Datum/Unterschrift		

www.ernst-und-sohn.de/3206

Vorwort

Carbonbeton wurde in den vergangenen Jahren von der Bauweise der Zukunft zur Baustoffkombination der Gegenwart entwickelt. In einem immer größeren Umfang werden die Vorteile des Carbonbetons in der Baupraxis sichtbar. Die Anwendung erstreckt sich über fast alle Bereiche des Neubaus und der Sanierung im Hoch-, Tief- und Ingenieurbau. Verwendete Bewehrungen erreichen Zugfestigkeiten von über 4000 N/mm^2 . Der Automatisierungsgrad der Herstellung von Bauteilen und Bauwerken entspricht in vielen Bereichen den neuesten Industriestandards der Produktionstechnik. Bemessungs- und Konstruktionsprinzipien erfahren zunehmend eine Standardisierung.

Der mit dem Carbonbeton verbundene geringe Ressourcenverbrauch und CO_2 -Ausstoß sowie die hohe Lebensdauer leisten einen deutlichen Beitrag zum nachhaltigen Bauen und zur Begrenzung des Klimawandels. Geringe Materialverbräuche, leichtere Bauteile, kürzere Bauzeiten, Flächengewinne u. v. m. machen den Carbonbeton in wirtschaftlicher Hinsicht überaus attraktiv.

Nach der ersten Idee vor etwa 30 Jahren erfolgte eine intensive Grundlagenforschung im Rahmen zweier Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Darauf aufbauend konnte in den letzten zehn Jahren die erforderliche anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung durch das Konsortium C^3 – Carbon Concrete Composite e. V. durchgeführt werden. Das Konsortium umfasste bis zu 180 Organisationen aus Wirtschaft und Wissenschaft, die in über 350 Einzelvorhaben den Carbonbeton zur Anwendungsreife entwickelt haben. Das gleichnamige C^3 -Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Zwanzig20-Programms unterstützt.

Die Forschung und Entwicklung sowie der damit verbundene Erkenntnisgewinn gehen rasant weiter. Das vorliegende Buch fasst den bis zum Jahr 2021 vorliegenden Stand des Wissens zum Carbonbeton – von den Grundlagen bis zur Anwendung – zusammen. Es ist thematisch das erste seiner Art und darf daher als Standardwerk des Neuen Bauens bezeichnet werden.

Das Buch soll den am Bau Beteiligten einen umfassenden Überblick über die Erfordernisse beim Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten von Bauwerken mit Carbonbeton geben. Für Studierende soll es ein Lehrbuch sein, welches auch einen Überblick über mögliche Problemlösungen gibt und als Ergänzung

zu den an den Universitäten und den Hochschulen für angewandte Wissenschaften angebotenen Vorlesungen, Übungen, Studien- und Diplomarbeiten dient.

Das Buch entstand über eine Zeit von fünf Jahren und besteht aus 22 Kapiteln. Die zum Teil wechselnden Autorinnen und Autoren für die einzelnen Kapitel waren immer bestrebt, die Inhalte aufeinander abzustimmen. Doppelungen und teils auch kontroverse Ansichten sind damit jedoch nicht vollständig ausgeschlossen, zeigen doch gerade letztere den die Wissenschaft voranbringenden Diskurs. Hinweise sowie Verbesserungs- und Ergänzungsvorschläge nehmen die Autorinnen und Autoren und Herausgeber sehr gern entgegen.

Die Herausgeber danken allen Autorinnen und Autoren des Buches für ihren unermüdlichen Einsatz, die Kapitel über die Entstehungszeit immer wieder auf den aktuellen Stand des Wissens zu bringen. Vor allem danken die Herausgeber den Mitwirkenden im Umfeld der Autorinnen und Autoren, die den Inhalt für dieses Buch geschaffen haben: Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Forschungseinrichtungen, Planungsbüros, Bauunternehmen und Behörden sowie Lieferantinnen und Lieferanten von Materialien, Einbauteilen und Maschinen. Ein großer Dank geht an das Bundesministerium für Bildung und Forschung als Fördermittelgeber, ohne das eine so großartige Entwicklung nicht möglich gewesen wäre.

Aachen, Dresden, Weimar
im Juni 2022

*Manfred Curbach, Josef Hegger, Frank Schladitz,
Matthias Tietze, Matthias Lieboldt*

Inhaltsverzeichnis

Vorwort V

Herausgeber- und Autor:innenverzeichnis XVII

1	Einleitung und Überblick	1
	<i>Silke Scheerer und Frank Schladitz</i>	
1.1	Geschichtliche Entwicklung	1
1.1.1	Die Anfänge des Betonbaus	1
1.1.2	Faserbewehrungen für Beton	2
1.1.3	Das C ³ -Projekt – Carbonbeton für den baupraktischen Einsatz	6
1.2	Allgemeine Vorteile und Grenzen	6
1.3	Einsatzgebiete	10
	Literatur	14
2	Bewehrung	21
	<i>Steffen Rittner, Frank Schladitz und Elisabeth Schütze</i>	
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

3	Beton	55
	<i>Marko Butler, Viktor Mechtcherine und Kai Wilhelm</i>	
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
	<i>Maximilian May</i>	
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
	<i>Josef Hegger, Sergej Rempel, Alexander Schumann, Elisabeth Schütze und Norbert Will</i>	
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
	<i>Klaus Holschemacher, Stefan Käseberg, Sebastian May, Egbert Müller, Silke Scheerer, Alexander Schumann und Christian Wagner</i>	
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

7	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit	163
	<i>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</i>	
7.1	Sicherheitskonzept	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
	<i>Ulrich Häußler-Combe</i>	
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	Selbsteheilung 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

- 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 Schlaffe 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, textilbewehrte 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

16	Recycling 485
	<i>Peter Jehle und Jan Kortmann</i>
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
	<i>Marleen Backes, Carl-Alexander Graubner, Torsten Mielecke, Christoph Müller und Julia Schütz</i>
17.1	Grundlagen der Ökobilanzierung 497
17.2	Umweltwirkungen von C ³ -Betonen 498
17.2.1	Allgemeines 498
17.2.2	C ³ -Betonen für neue Bauteile 498
17.2.3	C ³ -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	DSLIT-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
	<i>Peter Jehle, Florian Kopf, Thorsten Streibel und Ralf Zimmermann</i>
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
	<i>Klaus Holschemacher, Stefan Käseberg, Tobias Rudloff und Dominik Schlüter</i>	
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
	<i>Michael Frenzel, Matthias Lieboldt, Stefan Minar, Silke Scheerer und Angela Schmidt</i>	
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

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

Alexander Kahnt und Matthias Tietze

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

Ammar Al-Jamous

Literatur 593

Inserentenverzeichnis 595

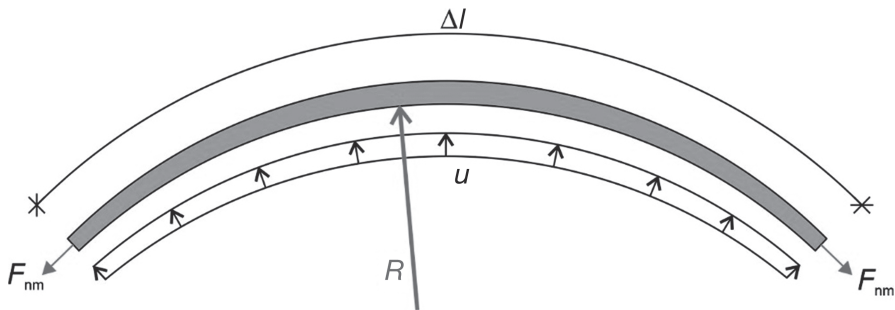


Abb. 5.9 Beanspruchung des Betons und der Bewehrung (Quelle: Sergej Rempel).

sehr kleine Biegerollendurchmesser ($D_{\min} \geq 4 \text{ mm}$) angestrebt, die zu einer Reduzierung der aufnehmbaren Zugbruchspannung der Bewehrung führen. Daher sollte ein Abminderungsfaktor $\alpha_{D,\min}$ für die zulässige Bruchspannung $f_{nm,d}$ berücksichtigt werden.

Die Beanspruchung im direkten Krümmungsbereich unterscheidet sich nicht vom herkömmlichen Stahlbeton. Es werden sowohl der Beton als auch die nichtmetallische Bewehrung durch die Umlenkkräfte beansprucht. Grund dafür ist die aus der Zugkraft F_{nm} entstehende Umlenkkraft u (Gl. (5.4)), die eine Pressung sowohl auf den Beton als auch auf die Bewehrung ausübt (Abb. 5.9).

$$u = \frac{F_{nm}}{R} \quad (5.4)$$

Da die nichtmetallische Bewehrung deutlich querdruckempfindlicher ist als der Beton, ist in der Regel zuerst mit einem Versagen der gebogenen Bewehrung zu rechnen. Aus diesem Grund kann auf einen Nachweis der Betonpressung verzichtet werden.

Im Gegensatz dazu wird die Zugtragfähigkeit der nichtmetallischen Bewehrung in hohem Maße durch die Umlenkpressung beeinflusst. Aus Untersuchungen des SFB 532 T08 [4] und des C³-Projektes [13] ist bekannt, dass sich die Zugbruchspannungen der Faserstränge mit kleineren Biegerollendurchmessern und damit zunehmender Umlenkpressung deutlich verringern. Eine allgemeine Angabe zum Abminderungsbeiwert $\alpha_{D,\min}$ in Abhängigkeit des Biegerollendurchmessers ist nicht möglich, da dieser von der Art der Tränkung abhängt. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass der Bewehrungshersteller den Abminderungsfaktor $\alpha_{D,\min}$ in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser angibt. Ein möglicher Versuchsaufbau wird in [13] beschrieben.

Falls kein Abminderungsfaktor $\alpha_{D,\min}$ des Herstellers vorliegt, können für eine Vorbemessung die Werte aus Abb. 5.10 entnommen und die reduzierten Bemessungswerte der Zugfestigkeit $f_{nm,d}$ mit Gl. (5.5) bestimmt werden.

$$f_{nm,d} = f_{nm,k} \cdot \alpha_{nmt} \cdot \frac{\alpha_{D,\min}}{\gamma_{nm}} \quad (5.5)$$

Zur Ermittlung von $f_{nm,d}$ (Gl. (5.5)) werden der Beiwert zur Berücksichtigung der Langzeitauswirkungen α_{nmt} und der Teilsicherheitsbeiwert γ_{nm} benötigt.

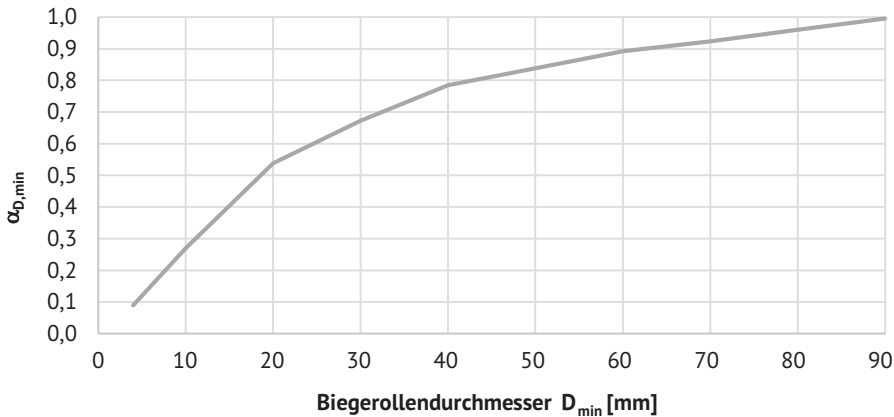


Abb. 5.10 Abminderungsfaktor $\alpha_{D,\min}$ in Abhängigkeit vom Biegerollendurchmesser [13] (Quelle: Sergej Rempel).

5.2.2.2 Endverankerung

Allgemeines

Eine ausreichende Verankerung der nichtmetallischen Bewehrung ist bei allen Baukonstruktionen notwendig. Das Bewehrungsgitter sollte so verankert sein, dass die Verbundkräfte sicher und ohne Längsrissbildung sowie ohne Abplatzungen in den Beton eingeleitet werden. Um das sicher zu stellen, sollten die folgenden Abschnitte beachtet werden.

Verankerungsverhalten- und -arten

Anhand der bisher durchgeführten Untersuchungen zum Verankerungsverhalten von nichtmetallischer Bewehrung lassen sich produktbezogene erste Ansätze zur Ermittlung der erforderlichen Verankerungslänge ableiten. Eine Verallgemeinerung auf andere Bewehrungen ist allerdings nicht möglich, da die Ergebnisse vom Fasermaterial, vom Tränkungsmaterial, der Geometrie der Bewehrung und der umgebenden Matrix abhängig sind [14]. Vor allem die Form der Faserstränge, deren Querschnitt sich im Bereich der Knotenpunkte verjüngt, führt zu einem nichtlinearen Verlauf der Verbundkräfte in der Verankerungslänge. Insbesondere im Bereich der keilförmigen Aufweitungen an den Verbindungspunkten der Kett- und Schussfaserstränge werden konzentriert Verbundkräfte eingeleitet (Abb. 5.11).

In Abb. 5.11 ist zu erkennen, dass die Änderungen der Querschnittsformen nicht regelmäßig ausgebildet sind, sondern vom Herstellprozess der Bewehrung beeinflusst werden. Je mehr das Bewehrungsgitter beim Aushärten gestreckt wird, desto gleichmäßiger ist der Querschnitt der Faserstränge und somit die Übertragung der Verankerungskraft. Die Variation der Querschnittsform und die Streuung der Verbundkraft sind bei der Ableitung eines Bemessungsmodells für die Verankerungslänge zu berücksichtigen. Um einen Bemessungsansatz für die erforderliche Verankerungslänge eines textilen Gitters abzuleiten, sind systematische Versuchsreihen mit verschiedenen Verankerungslängen durchzuführen. Es wird empfohlen für mindestens fünf verschiedene Verankerungslängen die aufnehmbare Veranke-

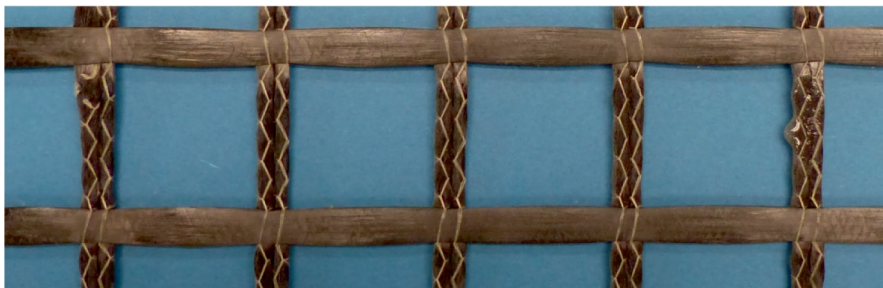


Abb. 5.11 Detailansicht von zwei Fasersträngen mit ihren Keilen (Quelle: Sergej Rempel).

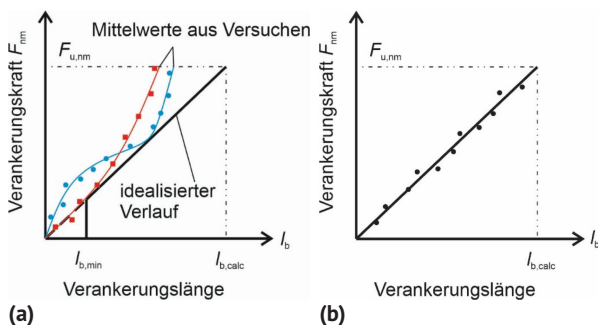


Abb. 5.12 Verankerungskraft in Abhängigkeit der Verankerungslänge; (a) zwei aus Versuchen ermittelte und der idealisierte Verlauf der Beziehung zwischen Verankerungskraft und Verankerungslänge; (b) Verlauf für einen gestreckten Faserstrang mit gleichmäßiger Verbundspannungsbeziehung [15] (Quelle: Sergej Rempel).

rungskraft experimentell zu bestimmen. Trägt man dann die in den Versuchen für die verschiedenen Verankerungslängen ermittelten Verankerungskräfte über die Verankerungslänge auf, erhält man die in Abb. 5.12 dargestellten Verläufe.

Zwei mögliche Verläufe der Verankerungskraft F_{nm} in Abhängigkeit von der Verankerungslänge l_b sind in Abb. 5.12a dargestellt. Damit trotzdem eine einfache Berechnung der Verankerungslänge möglich ist, wird der Verlauf auf der sicheren Seite liegend als linearer Verlauf angenommen und weicht damit nicht von dem Vorgehen aus dem Stahlbetonbau ab, wenn von einer konstanten Verbundspannung der Verankerungslänge ausgegangen wird. In Abb. 5.12b wird der idealisierte Verlauf der Verankerungskraft F_{nm} über die Verankerungslänge l_b für ein gestrecktes Bewehrungsgitter mit einer gleichmäßigen Verteilung der Bewehrung dargestellt [15].

In Abb. 5.12a wird zusätzlich eine Mindestverankerungslänge $l_{b,min}$ eingeführt, die der zweifachen Gitterweite entspricht (Gl. (5.6)) [15].

$$l_{b,min} \geq 2 \cdot \text{Gitterweite} \quad (5.6)$$

Die Faserstränge, die quer zum Zugstrang verlaufen, sollten für die Ermittlung der Verankerungslänge nicht berücksichtigt werden, da sie nicht wie bei Betonstahlmatten verschweißt, sondern mit einem Wirkfaden verbunden sind, wie in Abb. 5.11 dargestellt. Diese Verbindung sichert das Raster der Bewehrungsgitter bei Transport und Einbau.

kann die Dehnung zwischen der Grenzdehnung im Druckbereich sowie der Bemessungsbruchdehnung der nichtmetallischen Bewehrung liegen.

Grundsätzlich ist die Biegetragfähigkeit von den zulässigen Dehnungen der Materialien im Querschnitt abhängig. Je größer die zulässige Dehnung, desto größer sind die Krümmungen und die resultierenden Verformungen. In Abhängigkeit des zulässigen Dehnungszustandes und des linear elastischen Materialverhaltens der nichtmetallischen Bewehrung ergibt sich die für die Bemessung ansetzbare Festigkeit.

Die Bruchspannung einer Carbonbewehrung ist fünf- bis achtmal größer als die Fließspannung von Betonstahl B500. Aufgrund des linear elastischen Materialverhalten der Carbonbewehrung liegt hingegen der Bemessungswert der Festigkeit signifikant unterhalb des charakteristischen Wertes, wodurch die ausnutzbare Festigkeit nur der drei- bis vierfachen Festigkeit des Betonstahls entspricht (vgl. Abschn. 7.5.1). Da bei Betonstahl oberhalb der Fließspannung kein signifikanter Spannungszuwachs möglich ist und die daraus resultierenden Dehnungen im Wesentlichen zu großen Verformungszuwächsen bzw. Zusatzmomenten aus der Theorie II. Ordnung führen, ist eine Begrenzung auf die Fließdehnung sinnvoll. Das linear elastische Materialverhalten von Carbonbewehrungen hat durch eine größere Dehnung der Bewehrung sowohl Verformungszuwächse als auch eine Erhöhung der Biegetragfähigkeit zur Folge.

Während die Mitwirkung des Betons auf Zug die Krümmungen der Stütze im Zustand II vermindern, werden sie durch das zeitabhängige Materialverhalten vergrößert.

Zu den zeitabhängigen Eigenschaften zählen das Kriechen des Betons und das Verbundkriechen zwischen der Carbonbewehrung und dem Beton. Für einen geeigneten Ansatz sind entsprechende Untersuchungen erforderlich (siehe u. a. Abschn. 13.2). Die Relaxation der Carbonbewehrung darf aufgrund der geringen Verformungsanteile vernachlässigt werden.

Untersuchungen zu Stützen mit nichtmetallischer Bewehrung und Stützen aus Stahlbeton mit Verstärkung aus nichtmetallischer Bewehrung lassen sich z. B. [127–136] entnehmen.

7.6 Verstärkung/Instandsetzung von Stahlbetonbauteilen

7.6.1 Biegung

7.6.1.1 Allgemeine Herleitung

Die Biegeverstärkung von bestehenden Stahlbetonkonstruktionen mit Carbonbeton bzw. ehemals Textilbeton wurde in der Forschung schon weitreichend untersucht. Ausgehend von den ersten großformatigen Bauteilversuchen im Rahmen des Sonderforschungsbereiches (SFB) 528, siehe [137], wurden erste Ingenieur- und Bemessungsmodelle für die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton aufgestellt, u. a. [138]. Auf dieser Grundlage wurden die Bemessungsansätze in Folgeprojekten weiterentwickelt und anhand von größeren Versuchsreihen validiert, u. a. [137, 139, 140].

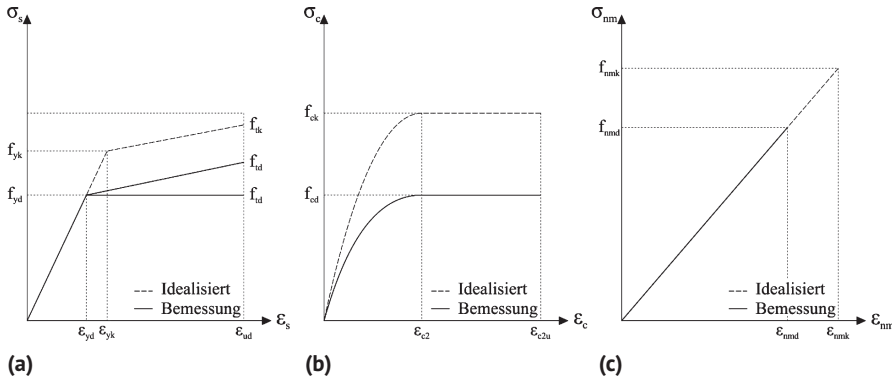


Abb. 7.23 Spannungs-Dehnungs-Kennlinien für die Bemessung der Verstärkung. (a) Betonstahl, (b) Beton, (c) Carbonbewehrung (Quelle: Egbert Müller).

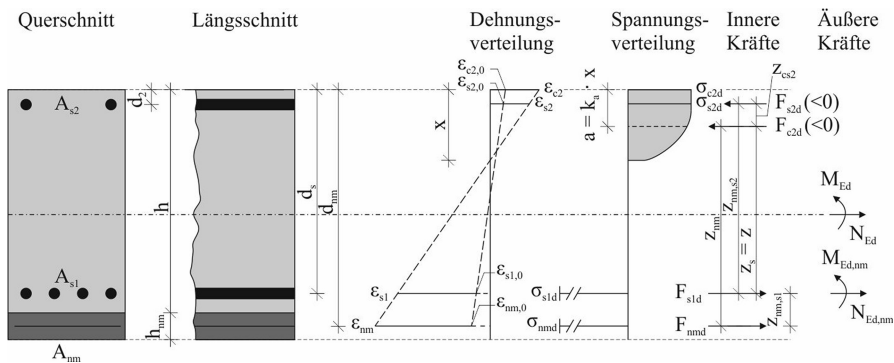


Abb. 7.24 Querschnitt eines mit Carbonbeton verstärkten Bauteils mit Dehnungs- und Spannungsverteilung inklusive der Darstellung der inneren und äußeren Kräfte (Variante I, bezogen auf die Schwerachse der Betonstahlbewehrung), in Anlehnung an [141].

Analog zum konventionellen Stahlbetonbau beruht die Nachweisführung für die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton auf einem iterativen Berechnungsmodell zur Bildung eines Gleichgewichts zwischen den inneren (Bauteilwiderstand) und den äußeren Kräften (Einwirkungen). Im Nachweis werden unter Annahme der in Abb. 7.23 dargestellten Materialkennlinien für Beton, Betonstahl und Carbonbewehrung die Dehnungsverteilungen so lange iteriert, bis ein Gleichgewicht zwischen den einwirkenden Kräften und den Bauteilwiderständen besteht.

Für die Iteration der Dehnungsverteilung über den Querschnitt wurde zu Beginn der Forschungstätigkeiten die Schwerachse der Betonstahlbewehrung als Bezugsgröße zur Bestimmung des Widerstandsmomentes verwendet, siehe Abb. 7.24 und [141]. Auf den Ergebnissen in [141] aufbauend wurde eine Modifikation entwickelt, bei der nicht die Schwerachse der Stahlbewehrung, sondern die idealisierte Schwerachse der Verstärkungsschicht als Grundlage für die Berechnung herangezogen wird, vgl. Abb. 7.25 und [142]. Durch die Weiterentwicklung des Bemessungsansatzes konnte die zuvor bestandene Geometrieabhängigkeit zwischen den idealisierten Schwerpunkten der Stahl- und der Verstärkungslage beseitigt werden,

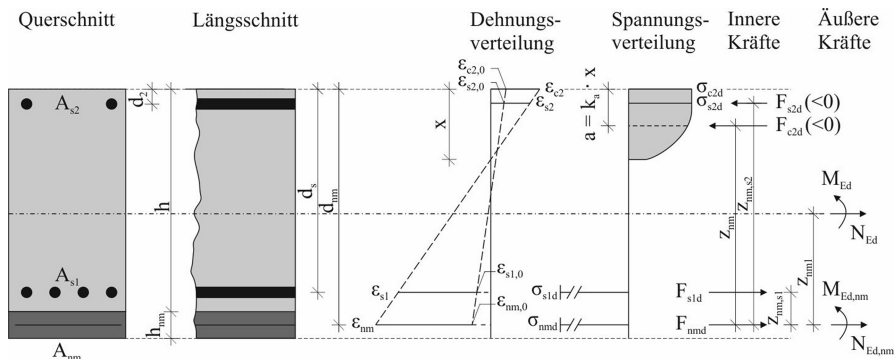


Abb. 7.25 Querschnitt eines mit Carbonbeton verstärkten Bauteils mit Dehnungs- und Spannungsverteilung inklusive der Darstellung der inneren und äußeren Kräfte (Variante II, bezogen auf die Schwerachse der Carbonbewehrung), in Anlehnung an [142].

wodurch ein anwenderfreundlicheres Bemessungsmodell zur Verfügung steht. Für ausführlichere Informationen zu beiden Ansätzen wird auf [141, 142] verwiesen.

Unter Beachtung der Kräfteaufteilung in Abb. 7.25 kann folglich das Kräfte- und Momentengleichgewicht für eine Biegeverstärkung nach [142] mit nachfolgenden Gleichungen aufgestellt werden.

$$N_{Ed} = N_{Rd} = F_{s1d} + F_{s2d} + F_{nmd} + F_{c2d} \quad (7.68)$$

$$M_{Ednm} = M_{Rd} \quad (7.69)$$

$$M_{Ed} - N_{Ed} \cdot z_{nm1} = -F_{s1d} \cdot z_{nm,s1} - F_{s2d} \cdot z_{nm,s2} - F_{c2d} \cdot z_{nm} \quad (7.70)$$

Für die iterative Berechnung der Biegetragfähigkeit von mit Carbonbeton verstärkten Stahlbetonplatten liegen in Anlehnung an DIN EN 1992-1-1 [6] sowohl für den Ansatz nach [141] als auch nach [142] folgende Annahmen zu Grunde:

- Ebene Querschnitte bleiben eben.
- Die Dehnungen der im Verbund liegenden Bewehrung haben die gleiche Größe wie die des umgebenden Betons.
- Die Betonzugfestigkeit wird nicht berücksichtigt.
- Die Verteilung der Betondruckspannungen wird entsprechend den Arbeitslinien aus DIN EN 1992-1-1 [6] angenommen.
- Die Spannungen im Betonstahl werden entsprechend den Arbeitslinien aus DIN EN 1992-1-1 [6] angenommen.
- Die Spannungen im Carbongelege werden entsprechend den Arbeitslinien angenommen (Abb. 7.23c).
- Der Carbonbewehrung dürfen planmäßig keine Druckkräfte zugeordnet werden.

Wie zuvor erwähnt, erfolgt die Bestimmung der Biegetragfähigkeit eines verstärkten Stahlbetonbauteils durch einen iterativen Prozess. Da dieses Vorgehen für den

Tab. 7.3 Bemessungstabeln für die Biegeverstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton nach [141].

μ_{nm}	ω_{nm}	$\xi_{nm} = \frac{x}{d_{nm}}$	$\xi_{nm} = \frac{z_s}{d_{nm}}$	ε_{c2}	ε_{s1}	σ_{s1d}^{**}	σ_{s1d}^{***}	ε_{nm}	σ_{nmd}	
[-]	[-]	[-]	[-]	[‰]	[‰]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[‰]	[N/mm ²]	
0,01	0,010	0,05	0,83	-0,42	6,31	435	439	7,50	769	Textilversagen (wirtschaftlicher Bereich)
0,02	0,021	0,08	0,82	-0,61	6,28	435	439	7,50	769	
0,03	0,031	0,09	0,82	-0,77	6,26	435	439	7,50	769	
0,04	0,042	0,11	0,81	-0,91	6,24	435	439	7,50	769	
0,05	0,052	0,12	0,81	-1,04	6,22	435	439	7,50	769	
0,16	0,177	0,24	0,76	-2,42	6,01	435	438	7,50	769	
0,17	0,189	0,26	0,75	-2,57	5,99	435	438	7,50	769	
0,18	0,201	0,27	0,74	-2,73	5,97	435	438	7,50	769	
0,19	0,214	0,28	0,74	-2,89	5,94	435	438	7,50	769	
0,20	0,227	0,29	0,73	-3,06	5,92	435	438	7,50	769	
0,21	0,240	0,30	0,73	-3,24	5,89	435	438	7,50	769	Textilversagen (unwirtschaftlicher Bereich)
0,22	0,253	0,31	0,72	-3,43	5,86	435	438	7,50	769	
0,2235	0,258	0,32	0,72	-3,50	5,85	435	438	7,50	769	
0,23	0,266	0,33	0,71	-3,50	5,54	435	438	7,13	731	
0,24	0,280	0,35	0,71	-3,50	5,09	435	438	6,60	677	
0,25	0,295	0,36	0,70	-3,50	4,68	435	437	6,12	627	
0,26	0,309	0,38	0,69	-3,50	4,29	435	437	5,67	581	
0,27	0,324	0,40	0,68	-3,50	3,94	435	436	5,25	538	
0,28	0,339	0,42	0,68	-3,50	3,60	435	436	4,86	498	
0,29	0,355	0,44	0,67	-3,50	3,29	435	436	4,49	460	
0,30	0,371	0,46	0,66	-3,50	3,00	435	436	4,15	425	Betonversagen
0,31	0,387	0,48	0,65	-3,50	2,72	435	435	3,82	392	
0,32	0,404	0,50	0,64	-3,50	2,46	435	435	3,52	361	
0,33	0,421	0,52	0,63	-3,50	2,22	435	435	3,23	331	
0,3319	0,424	0,52	0,63	-3,50	2,17*	435	435	3,18	326	
0,34	0,439	0,54	0,62	-3,50	1,99	397	397	2,95	303	
0,35	0,458	0,57	0,61	-3,50	1,76	353	353	2,69	276	

* Fließdehnung Betonstahl B500, ** σ - ε -Linie mit horizontalem Ast, *** σ - ε -Linie mit geneigtem Ast

Planer nicht benutzerfreundlich ist, wurden in der Vergangenheit ebenfalls Bemessungstabeln aufgestellt, die in Anlehnung an bekannte Hilfsdiagramme aus dem Stahlbetonbau den Nachweis führen. So ist in [141] beispielsweise eine Bemessungstabelle für Gelege älterer Generationen dargestellt (siehe Tab. 7.3). Neuere Bemessungsdiagramme für aktuelle Gelegegenerationen finden sich u. a. in [143] wieder (siehe Tab. 7.4). Jedoch muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass diese Bemessungstabellen nicht allgemein auf alle Carbonbewehrungen übertragbar sind, da die Bemessungshilfen immer von den Materialeigenschaften der Carbonbewehrungen abhängen.

Im Rahmen des C³-Projektes V1.2 „Nachweis und Prüfkonzeppte für Normen und Zulassungen“ und V2.7 „Erstellung von Gesamtkonzepten für die nachträgliche Bauteilverstärkung mit Carbonbeton“ wurden zum Biegetragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbetonverstärkung noch weitergehende Untersuchungen durchgeführt, die nachfolgend kurz beschrieben werden [144, 145].

Tab. 7.4 Bemessungstabeln für die Biegeverstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton nach [143].

μ_{nm}	ω_{nm}	$\xi_{nm} = \frac{x}{d_{nm}}$	$\xi_{nm} = \frac{z_s}{d_{nm}}$	ε_{c2}	ε_{nm}	σ_{nmd}^{**}	
[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]	[N/mm ²]	
0,01	0,0102	0,0526	0,9821	-0,42	7,5	1291,67	Versagen der textilen Bewehrung
0,02	0,0205	0,0751	0,9743	-0,61	7,5	1291,67	
0,03	0,0310	0,0927	0,9680	-0,77	7,5	1291,67	
0,04	0,0416	0,1079	0,9624	-0,91	7,5	1291,67	
0,05	0,0522	0,1216	0,9573	-1,04	7,5	1291,67	
0,22	0,2529	0,3139	0,8699	-3,43	7,5	1291,67	Versagen von Beton
0,23	0,2665	0,3292	0,8631	-3,5	7,13	1228,28	
0,24	0,2804	0,3464	0,8559	-3,5	6,60	1137,45	
0,34	0,4390	0,5424	0,7744	-3,5	2,95	508,63	
0,35	0,4576	0,5653	0,7649	-3,5	2,69	463,59	

7.6.1.2 Einfluss der Spannungs-Dehnungs-Linie der Carbonbewehrung

In der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) für die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Textilbeton [146] sowie in früheren Veröffentlichungen wurde die Bemessungskennlinie für die Carbonbewehrung nach Abb. 7.26 (Variante I) definiert. Neuere Forschungsergebnisse aus dem Bereich des Neubaus für Carbonbeton geben die Bemessungskennlinie für Carbonbewehrungen nach Abb. 7.26 (Variante II) an. Anhand von Parameter- und Sensitivitätsstudien wurde untersucht, welche der beiden Spannungs-Dehnungs-Linien für die Berechnung von biegeverstärkten Bauteilen mit Carbonbeton als geeigneter erscheint.

Die theoretischen Betrachtungen zeigten, dass sowohl für Neubauteile als auch für die Biegeverstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton die Spannungs-Dehnungs-Linie nach Variante II zu bevorzugen ist, da diese das reale Bauteilverhalten realistischer und wirtschaftlicher wiedergibt [142], ohne auf der unsicheren Seite zu liegen.

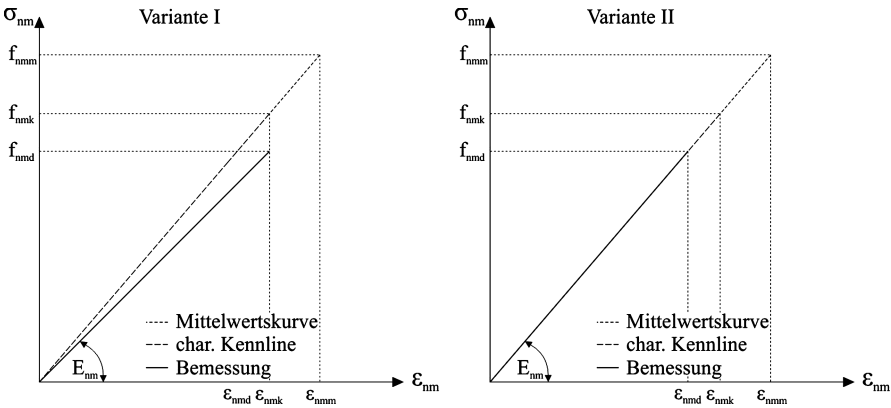


Abb. 7.26 Mögliche Spannungs-Dehnungs-Linien für Carbonbewehrungen, in Anlehnung an [142].

7.6.1.3 Einfluss der Vordehnung auf die Berechnung

Bei der praktischen Anwendung von Carbonbeton als Biegeverstärkung ist zu beachten, dass die zu verstärkenden Stahlbetonelemente i. d. R. bereits eine Vorschädigung bzw. eine Vorbelastung aufweisen. Während nach ersten Untersuchungen zunächst der Einfluss der Vorschädigung nur geringe Auswirkung auf die Tragfähigkeit zu haben schien, ergaben detaillierte Parameterstudien im C³-Projekt, dass die Höhe der Vordehnungen des Stahlbetongrundkörpers nicht zu vernachlässigende Auswirkungen auf die erforderliche Bewehrungsmenge, die Dehnungsebene sowie der Versagensart (Druck- oder Zugversagen) besitzen kann. Aus diesem Grund ist nach [142, 143] die Vordehnung bei der Bemessung von Bauteilen mit Carbonbetonverstärkung bei größeren Vordehnungen bzw. großen bezogenen Momenten zu berücksichtigen. Nach den Untersuchungen im Vorhaben V1.2 des C³-Projektes sollte die Vordehnung entweder wirklichkeitsnah mit den vorhandenen Einwirkungen oder vereinfacht auf Gebrauchstauglichkeitsniveau mit der quasi-ständigen Belastungskombination ermittelt werden.¹⁾

7.6.1.4 Theoretische Betrachtungen zum Teilsicherheitsbeiwert von carbonbetonverstärkten Bauteilen

In der abZ [146] wurde der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{\text{tex,t}}$ für den Biegnachweis zu 1,2 festgelegt. In weiterführenden Untersuchungen im C³-Projekt wurde analysiert, ob dieser Teilsicherheitsbeiwert auch für die heutzutage aktuellen Carbongelege mit verbesserten Trageigenschaften, im Vergleich zu den Gelegen in der abZ [146], gilt. Die stochastischen Untersuchungen bestätigten, dass auch für die Carbongelege mit verbesserter Leistungsfähigkeit der Teilsicherheitsbeiwert von 1,2 übernommen werden kann. Weiterhin wird in [147] angeführt, dass ebenfalls ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,1 in der Zukunft denkbar wäre. Jedoch müssen dazu noch weiterführende Untersuchungen angestellt werden, bevor eine finale Aussage getätigt werden kann.

7.6.1.5 Experimentelle Untersuchung des Biegetragverhaltens von Carbonbeton verstärkten Stahlbetonbauteilen mit aktuellen Carbongelegen

Neben theoretischen Betrachtungen wurden im Projekt V1.2 und V2.7 insgesamt 24 großmaßstäbliche Bauteilversuche (6 unverstärkte und 18 verstärkte Probekörper) durchgeführt, um zu überprüfen, ob die bekannten Erkenntnisse zum Biegetragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbetonverstärkung auch auf aktuelle Carbongelege mit verbesserten Materialeigenschaften zutreffen. Bei den Versuchen wurden zudem weitere relevante Einflussfaktoren experimentell untersucht, u. a. der Einfluss des Carbongeleges, der Lagenanzahl, einer Vorschädigung sowie des Prüfaufbaus. Die Versuche und die dabei gewonnen Erkenntnisse können [144, 148, 149] entnommen werden. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich die prinzipiellen Tragmechanismen auch für aktuelle Carbongelege mit dem bestehenden Ingenieur- und Bemessungsmodell abbilden lassen. Jedoch stellen sich

1) C³-V1.2 (2019). Normung und Prüfungskonzepte für Carbonbeton: Arbeitspapier Bemessung (unveröffentlicht).

bei hohen Verstärkungsgraden bzw. mehreren Lagen an Carbongelege zusätzliche Versagensmechanismen ein, die in Zukunft weiter erforscht werden müssen [144].

7.6.2 Querkraft

7.6.2.1 Querkrafttragverhalten allgemein

Das Querkrafttragverhalten von Stahlbetonbauteilen ist nach mehr als 100-jähriger Forschung noch immer nicht abschließend geklärt. Der nach dem Reißen des Betons eintretende komplexe Kräftezustand wird mit vereinfachten Modellvorstellungen und Bemessungsansätzen unterschiedlich erfasst. Ein allgemein anerkanntes mechanisches Modell liegt bis heute noch nicht vor. Die zu den verschiedenen Belastungszeitpunkten auftretenden Tragmechanismen werden unter Forschern unterschiedlich betrachtet und gewichtet. Die nachfolgende Abb. 7.27 stellt die in einem Schubriss wirkenden Querkrafttragmechanismen dar, vgl. [58, 150].

Die Anteile in den einzelnen Tragmechanismen lassen sich dabei wie folgt beschreiben:

- Schubspannungen in der Druckzone (V_{cz}),
- rissübergreifende Zugspannungen in der Rissprozesszone (V_{cr}),
- Querkrafttragfähigkeit der Schubbewehrung (V_s),
- Rissreibung bzw. Rissverzahnung (V_{ag}),
- Dübelwirkung der Längsbewehrung (V_{da}) und
- Lastabtragung über direkte Druckstrebe/Sprengwerk/Bogen (V_{sp}).

Bei vorgespannten Bauteilen erweitert sich der Querkrafttragmechanismus um die Vertikalkomponente der Vorspannkraft (V_p), siehe hierzu u. a. [58]. Wesentliche Einflussfaktoren hierbei sind vor allem die Schubslankheit, der Längsbewehrungsgrad und die Bauteilgeometrie.

7.6.2.2 Querkraftverstärkung

Bei einer Querkraftverstärkung wird die anspruchsvolle Erfassung der maßgebenden Tragmechanismen komplexer, da die Verstärkung fast alle Tragmechanismen mehr oder weniger beeinflusst. Die Querkrafttragfähigkeit nachträglich verstärkter Betonbauteile kann mithilfe empirisch und physikalisch basierter Bemessungsansätze, die von Stahlbetonmodellen abgeleitet wurden, auf der sicheren Seite liegend ermittelt werden. Die nachfolgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick über die Verstärkung mit CFK-Lamellen und Textilbeton.

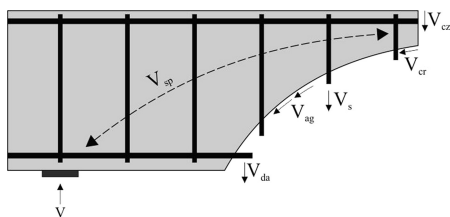


Abb. 7.27 Querkraftanteile im Schubriss, in Anlehnung an [150] (Quelle: Sebastian May).

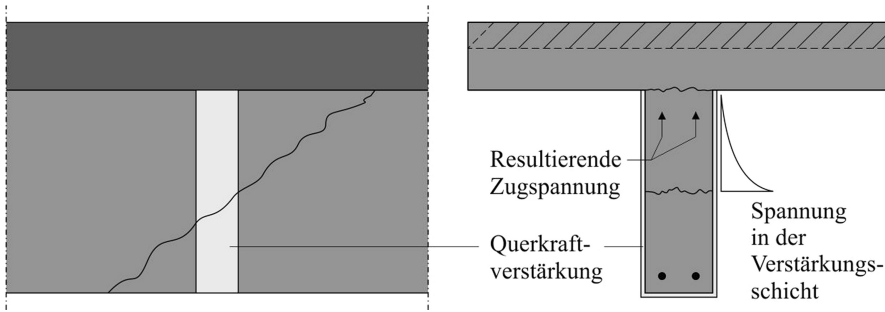


Abb. 7.28 Fehlende Verankerung der Querkraftverstärkung in der Druckzone nach [152] (Quelle: Sebastian May).

CFK-Lamellen-Verstärkung

Gültige Bemessungsansätze für die Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit von mit CFK-Lamellen verstärkten Betonbauteilen dienen als Grundlage für die spätere Berechnung der Tragfähigkeit der Textilbeton-Verstärkungsschicht und können u. a. [151–153] entnommen werden.

Da sowohl im Brücken- als auch im Hochbau vorrangig gegliederte Bauteilquerschnitte (z. B. Plattenbalken) vorzufinden sind, werden nachfolgend kurz die Besonderheiten bei der Verstärkung genannt. Da bei Plattenbalken die Druckzone i. A. in der Platte liegt, können CFK-Lamellen nicht in der Druckzone verankert werden. Die auftretenden Schubrisse können zwar ggf. durch die aufgeklebten Lamellen überbrückt werden, eine Verankerung der Zugkräfte der Lamelle in Druckzone ist jedoch nicht möglich. vgl. Abb. 7.28.

Die Traglaststeigerung durch den beschriebenen Mechanismus wird in [152] als eher klein und schwer zu quantifizieren beschrieben. Von der Verwendung halbgeschlossener Lamellen bei Plattenbalken wird daher abgeraten.

Textilbeton-Verstärkung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB 528 [154] wurden sowohl experimentelle als auch theoretische Untersuchungen zur Traglaststeigerung der Querkrafttragfähigkeit von Platten- und Balkenquerschnitten mit Textilbetonverstärkung durchgeführt, z. B. [155–157]. Auch wurden Versuche mit AR-Glastextilien durchgeführt, deren Faserstränge in Kett- und Schussrichtung um 45° gegenüber der Bauteillängsachse geneigt waren (Abb. 7.29).

Nach der Auswertung der eigenen Versuche kommt Brückner [155] zu der Erkenntnis, dass die für FRP-Sheets hergeleiteten Ansätze [159, 160] das Tragverhalten von Verstärkungen mit Textilbeton nicht ausreichend genug beschreiben. Beide Ansätze leiten die zusätzlich aufnehmbare Kraft von der Tragfähigkeit der Verstärkungsschicht ab. Nach Brückner [155] ist dagegen bei einer Textilbetonverstärkung zum einen die Stahldehnung im Bruchzustand zu begrenzen und zum anderen eine Änderung der Druckstrebenneigung zu berücksichtigen. Diese Erkenntnisse sollten nach [155] in zukünftigen Bemessungsmodellen berücksichtigt werden. Diese Annahme gilt nach [155] auch für vorgeschädigte Bauteile mit Schubrisen, da die

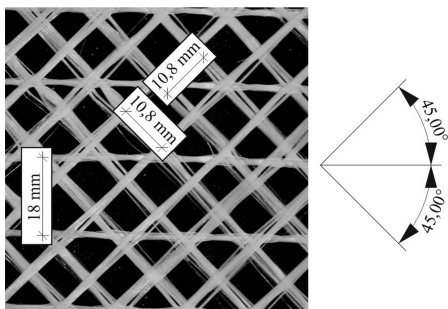


Abb. 7.29 Querkraftverstärkung mit AR-Glastextil im Rahmen der SFB 528-Untersuchungen [158] (Quelle: Frank Schladitz, TU Dresden).

nachträglich aufgebraute Verstärkungsschicht die Zugstrebensteifigkeit vergrößert und gleichzeitig einen steileren Druckstrebenwinkel verursacht.

Aufbauend auf den ersten statischen Versuchsergebnissen wurden im Rahmen des SFB 528 auch zyklische Versuche an Plattenbalken unter Querkraftbeanspruchung durchgeführt, siehe [158]. Ausführlichere Informationen zu den durchgeführten statischen und zyklischen Bauteilversuchen im Rahmen des SFB 528 sind u. a. [161] zu entnehmen. Ergebnisse zu weiteren Querkraftuntersuchungen können den Beiträgen von Herbrand et al. [162] und Adam et al. [163] entnommen werden.

7.6.2.3 Ingenieurmodelle Carbonbetonverstärkung

Modell Brückner

Aufbauend auf den in [151, 153] beschriebenen Bemessungsmodellen für die Querkraftverstärkung mit CFK-Lamellen leitete Brückner [155] einen Berechnungsansatz für die Tragfähigkeit eines Stahlbetonbauteils mit Textil-/Carbonbetonverstärkung ab. Die nachfolgende Abb. 7.30 zeigt das in [155] aufgestellt Fachwerkmodell für einen textilbetonverstärkten Plattenbalken mit mittiger Einzellast $V_{R,nm}$.

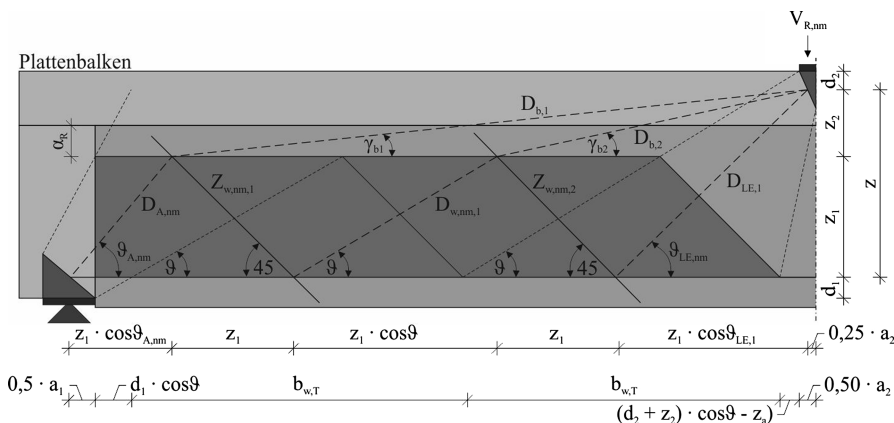


Abb. 7.30 Vereinfachtes Fachwerkmodell für die Berechnung der Textilbeton-Verstärkungsschicht am Plattenbalken [155] (Quelle: Annett Brückner).

Bedingt der wirtschaftlichsten und praxisnahsten Annahme, dass die Verstärkung mit Textilbeton nur in der Biegezone verankert werden kann, schließt Brückner [155] die obere Druckstrebe D_{b1} schräg an die Einzellast $V_{R,nm}$ an (vgl. Abb. 7.30). Demzufolge ist das entwickelte Fachwerkmodell geometrieabhängig und wirkt sich auch auf die Beanspruchung der Zugstrebe aus. Durch die Neigung der oberen Druckstrebe D_{b1} wird der Zuggurt entlastet. Mit Zunahme des Abstandes der angreifenden Last zum Auflager, verringert sich der Winkel γ_{b1} der geneigten Druckstrebe und der Einfluss nimmt ab. Aus diesem Grund kann der Anteil der Druckstrebe vernachlässigt werden, was zu einer Vereinfachung des Fachwerkmodells führt.

Der Querkraftanteil der textilen Bewehrung $V_{Rd,nm}$ lässt sich nach Brückner [155] wie folgt bestimmen:

$$V_{Rd,nm} = \frac{A_{w,nm}}{s_{w,nm}} \cdot f_{nmd} \cdot b_{w,nm} \cdot \sin \alpha \quad (7.71)$$

Dabei sind

$A_{w,nm}/s_{w,nm}$	Querschnittsfläche der textilen Bewehrung je Meter
f_{nmd}	Bemessungsfestigkeit des Textils
$b_{w,nm}$	Breite der Zugstrebe
α	Winkel der textilen Bewehrung zur Bauteilachse

Folgende Randbedingungen müssen im Modell von Brückner [155] eingehalten sein, vgl. Abb. 7.30:

1. Die Zugkräfte in der textilen Bewehrungsschicht müssen im auflagnahen Bereich sowie im Übergang zwischen Steg- und Plattenquerschnitt verankert und in die Druckstreben eingeleitet werden. Dies geschieht nur, wenn die resultierende Kraft der Biegezugbewehrung das Druckfeld am Auflager mit einem Abstand von mindestens α_R schneidet.
2. Die Zugstrebe darf die Wirkungslinie der einwirkenden Kraft $V_{R,nm}$ im Lasteinleitungsbereich nicht kreuzen.

Der Querkrafttraganteil $V_{Rd,s}$ des Stahlbetonbauteils lässt sich dabei unverändert entsprechend EC 2 [6] bestimmen und wird für die Gesamtragfähigkeit V_{Rd} des verstärkten Bauteils zum Anteil $V_{Rd,nm}$ hinzuaddiert. Lediglich der Bemessungswert der Streckgrenze der Querkraftbewehrung f_{ywd} wird auf die Spannung an der 0,2 %-Dehnungsgrenze zur Berücksichtigung des geringeren Dehnungsvermögens der textilen Bewehrung begrenzt.

Weiterführende Erläuterungen zum Fachwerkmodell sowie die umfangreiche Berechnung der Zugstrebenbreite $b_{w,nm}$ können der Dissertation Brückner [155] entnommen werden. Die dazugehörigen Tragmechanismen und Versagensarten der Verbundfuge Altbeton-Verstärkungsschicht sind u. a. in [155, 164, 165] erläutert.

Modell Escrig

Die Gesamtragfähigkeit V_{Rd} nach Escrig [166] setzt sich ebenso aus den Anteilen des Stahlbetonbauteils $V_{Rd,s}$ und der textilen Verstärkungsschicht $V_{Rd,tex}$

zusammen. Die Grundlagen des Modells beruhen u. a. auf den Forschungsergebnissen von [167–169]. Der Ansatz in [166] geht davon aus, dass die zusätzliche textile Zugstrebe durch ein sorgfältiges Vorbereiten des Betonuntergrundes die Lasten vollständig mittragen kann und es zu keinem frühzeitigen Verbundversagen zwischen der Kontaktflächen Altbeton-Verstärkungsschicht kommt.

Der Querkraftanteil der textilen Bewehrung $V_{\text{Rd,tex}}$ lässt sich nach Escrig [166] wie folgt bestimmen:

$$V_{\text{Rd,tex}} = 2 \cdot n \cdot \varepsilon_{\text{eff,tex}} \cdot E_f \cdot t_{\text{tex}} \cdot d_f \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) \cdot (\sin \alpha)^2 \quad (7.72)$$

Dabei sind:

n	textile Lagenzahl
E_f	Elastizitätsmodul der Textils
d_f	effektive statische Nutzhöhe der Verstärkung
α	Winkel der textilen Bewehrung zur Bauteilachse
θ	Druckstrebenwinkel
$t_{\text{tex}} = \frac{a}{s} \cdot t$	äquivalente Dicke der Textilbewehrung (a Faserstrangbreite, s Achsabstand Roving, t Faserstrangdicke)
$\varepsilon_{\text{eff,tex}}$	effektive Textildehnung nach [170]

Die effektive Textildehnung $\varepsilon_{\text{eff,tex}}$ lässt sich nach [170] für eine seitliche oder U-förmige angeordnete Verstärkung am Plattenbalken wie folgt berechnen:

$$\varepsilon_{\text{eff,tex}} = A \cdot \left(\frac{f_{\text{cm}}^{2/3}}{E_f \cdot \rho_{\text{tex}}} \right)^B \cdot \varepsilon_f \quad (7.73)$$

Dabei sind

$A; B$ Beiwerte für die Anordnung der Verstärkung

Umlaufende Verstärkung: $A = 0,035$, $B = 0,65$

U-förmige oder seitliche Verstärkung: $A = 0,02$, $B = 0,55$

f_{cm} mittlere Betondruckfestigkeit

ε_f Bruchdehnung der Faser

ρ_{tex} textile Querkraftbewehrungsgrad

Der textile Querkraftbewehrungsgrad lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\rho_{\text{tex}} = \frac{2 \cdot n \cdot t_{\text{tex}} \cdot \sin \alpha}{b_w} \quad (7.74)$$

Dabei ist b_w die kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone. Weitere Informationen zu diesem Ansatz sind [166] zu entnehmen.

7.6.2.4 Aktuelle Untersuchungen im C³-Projekt

Die aktuellen Untersuchungen zur statischen und zyklischen Querkrafttragfähigkeit von Betonbauteilen mit Carbonbetonverstärkung wurden in den Teilvorhaben V1.2²⁾, V2.1 [171] und V2.7 [172] durchgeführt. Die von Brückner [155] erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse wurden dabei zunächst weiter numerisch ausgewertet [173] und anschließend gemeinsam mit den Teilprojektpartnern diskutiert. Aufbauend den offenen Fragestellungen wurden zwei unterschiedliche Plattenbalkengeometrien im Vier-Punkt-Biegeversuch auf ihre maximale Querkrafttragfähigkeit untersucht, siehe [164].

Die gedrungenen Plattenbalken (PB-G) waren dabei einlagig mit 4 Ø 25 in der Biegezugzone und mit Bügeln 6 Ø 25 bewehrt. Die schlanken Plattenbalken hingegen besaßen 6 Ø 25 als Biegezugbewehrung (dreilagig) und ebenso Bügel 6 Ø 25. Beide Stahlbewehrungsdurchmesser entsprachen dabei der Güte B500B. Die Grundkörper wurden des Weiteren mit einem Fertigteilbeton der Klasse C20/25 betoniert, siehe Abb. 7.31.

Die Abb. 7.32 und 7.33 zeigen die beiden in die Carbonbetonverstärkung verwendeten Gelege.

In Summe wurden 28 statische Bauteilversuche mit einer Schubslankheit von 3,3 und zwei Versuche mit 2,1 durchgeführt. Zur Bestätigung der erzielten Bruchlast und Versagensart wurde jede Verstärkungskonfiguration zweimal getestet. Dabei wurden die in Abb. 7.32 und 7.33 gezeigten Carbongelege ein- und zweilagig in der Verstärkungsschicht angeordnet. Des Weiteren wurde sowohl die Gelegerichtung zwischen 0°/90° und ±45° auf die Bauteillängsachse bezogen. Zudem wurden die Verstärkungsflächen zwischen nur seitlicher und U-förmiger Anordnung am Steg variiert. Zur Validierung der Traglaststeigerung wurden ebenso Querkraftver-

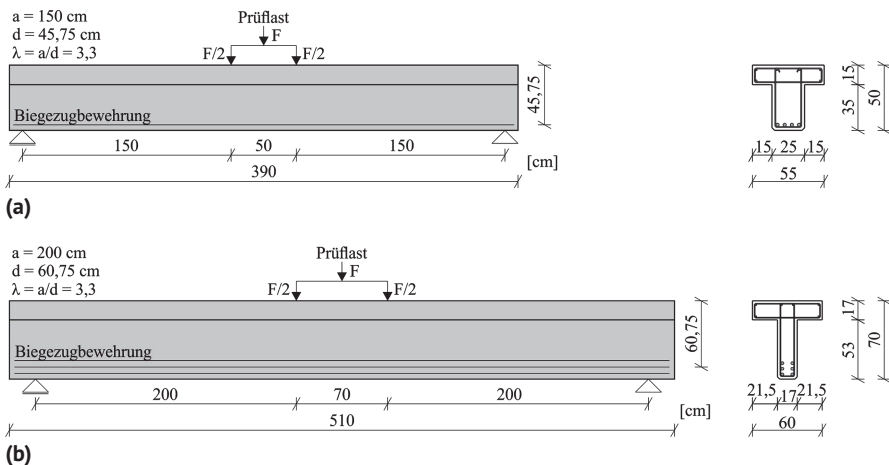


Abb. 7.31 (a) Versuchsaufbau für gedrungene Plattenbalken PB-G; (b) Versuchsaufbau für schlanken Plattenbalken PB-S (Quelle: Sebastian May).

2) C³-V1.2 (2019). Normung und Prüfkonzepte für Carbonbeton: Arbeitspapier Bemessung (unveröffentlicht).

17

Ökologische Beurteilung von Betonbauteilen mit Bewehrung aus Carbongelege

Marleen Backes (17.1–17.4), Carl-Alexander Graubner (17.1–17.4), Torsten Mielecke (17.1–17.4), Christoph Müller (17.5) und Julia Schütz (17.1–17.4)

17.1 Grundlagen der Ökobilanzierung

Unter einer Ökobilanzierung wird die Beurteilung und Abschätzung der über den gesamten Lebenszyklus entstehenden Umweltwirkungen eines Produktsystems verstanden. Die ökologische Bewertung zielt in erster Linie auf eine Reduktion globaler Umweltwirkungen (insbesondere CO₂-Emissionen) ab und forciert einen effizienteren Umgang mit nicht erneuerbaren Ressourcen [1]. Eine wissenschaftlich anerkannte Methode zur Erfassung der Umweltwirkungen aus Ressourceninanspruchnahme und Emissionen bietet die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 (2009–2011) [2].

Eine Ökobilanzstudie beginnt mit der *Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen* sowie der damit einhergehenden Definition der Systemgrenze. Regelmäßig wird hierbei der gesamte Lebensweg eines Produktsystems betrachtet. Dieser reicht im Sinne einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse von der Rohstoffgewinnung zur Herstellung der Produkte über deren Nutzung und die anschließende Entsorgung (End-of-Life). Mithilfe der anschließenden *Sachbilanz* werden sämtliche Input- und Outputflüsse des definierten Systems beschrieben bzw. die zugehörigen Mengen erfasst, bevor diese im Zuge der *Wirkungsabschätzung* mit ausgewählten Umweltwirkungsindikatoren verknüpft werden. Abschließend erfolgt eine *Auswertung* als typischerweise vergleichende Analyse der Ergebnisse mit Referenzwerten [2].

Die rahmengebenden Ökobilanznormen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 schreiben keine Indikatoren vor, die zwingend im Rahmen einer Ökobilanz einzubeziehen sind. Für das Bauwesen wird die ökologische Bewertung von Gebäuden hingegen in der Norm DIN EN 15978 oder im Rahmen der Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden gemäß BNB- bzw. DGNB-System spezifiziert. Emissionen, die Auswirkungen auf die Ressourcen Luft, Wasser und Boden haben, werden in der DIN EN 15978 als Umweltauswirkungen bezeichnet und entsprechend ihres *Treibhaus-* (GWP), *Eutrophierungs-* (EP), *Versauerungs-* (AP), *Ozonbildungs-* (POCP) und *Ozonabbaupotenzials* (ODP) bewertet. Diese Indikatoren werden auch

in den gängigen deutschen Systemen zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden herangezogen. Die Verwendung der Ressourcen Energie, Rohstoffe und Wasser spiegelt sich sowohl normativ als auch in der Nachhaltigkeitsbewertung vor allem durch Indikatoren zur *Verwendung erneuerbarer bzw. nicht erneuerbarer Primärenergieressourcen* und *Sekundärbrennstoffe* (im Sinne von Sekundärrohstoffen) wider [3].

Darüber hinaus wird im Rahmen der Wirkungsabschätzung oftmals eine Gewichtung einzelner Indikatorwerte vollzogen, um diese zu einer aggregierten, leichter zu interpretierenden und vergleichenden Kennzahl zusammenzufassen. Dies geschieht beispielsweise im BNB-System auf Ebene der Kriterien mittels Bedeutungszahlen zu einer Gesamtbewertung, aus der eine Gesamtnote für das zu untersuchende Bauwerk abgeleitet wird [4]. Alle Ergebnisse einer Ökobilanz sind auf eine *funktionelle Einheit* zu beziehen, die als „quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit“ [5] definiert wird.

17.2 Umweltwirkungen von C³-Betonen

17.2.1 Allgemeines

Zur Begrenzung der Umweltbelastungen wird angestrebt, Carbonbeton als einen nachhaltigen, gesellschaftlich relevanten, ökologisch sinnvollen und wirtschaftlich bedeutsamen Baustoff zu etablieren. Im Rahmen von Forschungsprojekten wurde eine Optimierung der Betonmatrix zur Anwendbarkeit von carbonbewehrten Betonbauteilen vorgenommen. Herkömmliche Beton- bzw. Feinbetonmischungen können aufgrund der spezifischen Besonderheiten der C³-Bauweise zwar für gewisse Mischungszusammensetzungen verwendet werden, bieten allerdings nicht das Optimum. Ziele neuerer Forschung sind neben der Reduzierung der Schwind- und Kriechverformungen die Minimierung der negativen Umweltwirkungen und des Primärenergiebedarfs. Bzgl. der ökologischen Optimierung sollen die globalen Umweltwirkungen (insbesondere der Ausstoß an Kohlenstoffdioxid) reduziert, ein effizienter Umgang mit nicht erneuerbaren Ressourcen gefördert, der Primärenergieeinsatz minimiert sowie die negativen Auswirkungen auf die lokale Umwelt vermieden werden. Betontechnologisch bedeutet dies zunächst den Zementklinkeranteil auf das Notwendigste zu reduzieren, da die Herstellung von Zementklinker in erheblichen Mengen zum CO₂-Ausstoß beiträgt. Des Weiteren sind nicht erneuerbare und nicht recycelfähige Rohstoffe so sparsam und effizient wie möglich einzusetzen. Durch die Verwendung lokal verfügbarer Ausgangsstoffe werden Transportprozesse vermieden und der Schadstoffausstoß geringgehalten [1].

17.2.2 C³-Betone für neue Bauteile

17.2.2.1 Zusammensetzung normalfester und hochfester Betone

Die Mischungsentwicklung bezieht sich im Bereich des Neubaus auf normal- und hochfeste Betone. Die beiden Referenzmischungen *Ref.-NF-1* und *Ref.-NF-2* (siehe Tab. 17.1) der normalfesten Betone sind repräsentativ für die Anwendung im Be-

Tab. 17.1 Mischungszusammensetzungen für normalfesten Frischbeton ($f_{cm,28} < 90 \text{ N/mm}^2$) [kg/m³] [1].

Bestandteil	Ref.-NF-1	Ref.-NF-2	C3-NF-1	C3-NF-2	C3-NF-3
CEM I 52,5 R	475	—	—	—	—
CEM II/A-M (S-LL) 52,5 R	—	475	—	—	—
CEM II/C-M (S-LL)	—	—	353	294	233
Kalksteinmehl	—	—	172	225	300
Quarzfeinsand 0,06–0,2 mm	—	—	175	175	175
Sand 0–2 mm	1010	1003	625	625	625
Kies 2–8 mm	673	669	900	900	910
Fließmittel	6,4	6,4	8–9	8–9	7–8
Wasser	184	184	150	150	139
Summe	2348	2337	2383	2377	2389

tonfertigteilsektor. Die Mischung *Ref.-NF-2* stellt bereits eine ökologisch optimierte Mischung dar. Der darin verwendete Zement ist ein Kompositzement, der neben Portlandzementklinker aus zwei weiteren Zementhauptbestandteilen besteht. Trotz der Zementklinkersubstitution durch Hüttensand und Kalksteinmehl weist dieser immer noch einen relativ hohen Zementklinkeranteil auf. Der verwendete Zement entspricht aktuell der Normung und stellt somit den Stand der Technik dar. Die Zusammensetzung der beiden Ausgangsreferenzmischungen sowie der drei im Rahmen des C³-Projektes entwickelten Basismischungen sind Tab. 17.1 zu entnehmen [1].

Voruntersuchungen haben ergeben, dass bei der Herstellung der Kompositzemente der Zementklinkeranteil möglichst fein aufgemahlen werden sollte, damit der Einsatz des mit hohen Umweltwirkungen verbundenen Zementklinkers besonders effizient erfolgt. Durch die Mahlfeinheit werden bereits mit geringeren Zementanteilen gleiche Betonfestigkeiten erzielt. Die Optimierung der Betonmatrix wird durch die Anforderungen an eine gute Verarbeitbarkeit und die Mindestfestigkeit eingeschränkt, weshalb der Wasser-Zement-Wert (w/z) in einer definierten Bandbreite einzustellen ist. Die Optimierung der Sieblinie vermindert den Mindestleimgehalt und innerhalb des Leims den Mindestwassergehalt. Dadurch wird bei einem konstanten w/z -Wert die erforderliche Klinkermenge reduziert. Der eingesparte Klinkeranteil wird durch inertes Gesteinsmehl (Hüttensand, Kalksteinmehl), welches in der Ökobilanzierung wesentlich geringere negative Umweltwirkungen aufweist, ersetzt. Untersuchungen haben ergeben, dass durch die Optimierung der Rezeptur die Mischungen jedoch immer hochviskoser werden und damit schlechter zu verarbeiten sind [1].

Im Bereich der hochfesten Betone werden die gleichen Entwicklungsziele wie bei den normalfesten Betonen verfolgt. Eine repräsentative Referenzmischung liegt nicht vor. Bekannt ist, dass in den verschiedenen Bindemittelcompounds (siehe *Ref.-HF-1*, *Ref.-HF-2*) neben Portlandzementklinker ebenfalls Hüttensand als zweiter wichtigster Bestandteil enthalten ist. Das Bindemittelcompound der Mischung *Ref.-*

Tab. 17.2 Mischungszusammensetzungen für hochfesten Frischbeton ($f_{cm,28} > 90 \text{ N/mm}^2$) [kg/m^3] [1].

Bestandteil	Ref.-HF-1	Ref.-HF-2	C3-HF-1	C3-HF-2
Bindemittelcompound	974	967	500	621
Kalksteinmehl	—	—	140	—
Quarzfeinsand 0,06–0,2 mm	—	—	251	250
Sand 0–1 mm	239	237	—	—
Sand 0–2 mm	160	159	530	530
Granitsplitt 2–5 mm	817	811	837	837
Fließmittel	10	10	12,5	16
Wasser	156	159	140	145
Summe	2356	2343	2410,5	2399

HF-2 verfügt zudem über Flugasche und Kalksteinmehl. Die Mischungen weisen selbstverdichtende Eigenschaften auf; bei der Optimierung der Betonzusammensetzung wird diese Eigenschaft beibehalten. Tabelle 17.2 zeigt die Zusammensetzung von Referenzmischungen sowie die im Rahmen des C³-Projektes entwickelten Basismischungen für hochfeste Betone [1].

17.2.2.2 Umweltwirkungen

Für eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung von mit Carbon bewehrten Betonbauteilen gegenüber Stahlbetonbauteilen werden vergleichende Untersuchungen der Umweltwirkungen der verschiedenen Bauteilschichten benötigt. In diesem Kapitel werden die Umweltwirkungen der Betonzusammensetzungen vorgestellt, welche zunächst bezogen auf das Betonvolumen von jeweils einem Kubikmeter Frischbeton dargestellt sind. Innerhalb der sogenannten „gradle-to-gate“ Bilanzierung ist die Bereitstellung eines Kubikmeter Frischbetons ab Werkstor inkl. sämtlicher Vorketten berücksichtigt, der Transport zur Baustelle sowie der Einbau wird nicht betrachtet. Tabelle 17.3 enthält die wichtigsten Ergebnisse. Ein weiterer Vergleich der ökologischen Wirkung je m³-Frischbeton – jedoch zusätzlich normiert auf die einaxiale Druckfestigkeit von 28 Tagen – verdeutlicht die mit der Produktentwicklung einhergehenden Verbesserung bezüglich der Umweltwirkungen (vgl. Tab. 17.4) [1].

17.2.3 C³-Betone zur Verstärkung bestehender Bauteile

17.2.3.1 Zusammensetzungen der Feinbetone

Als Referenzmischung für die Weiterentwicklung von Spritzbeton für die Instandhaltung und Verstärkung von Betonbauteilen dient ein Feinbeton, der auf die Textilbetonanwendung optimiert ist. Die Anwendung kann sowohl im Laminierverfahren als auch im Nassspritzverfahren erfolgen. Die optimierte Zusammensetzung der Spritzbetone für das Laminierverfahren (vgl. C3-SP-1) und für das Nassspritzverfahren (vgl. C3-SP-2) kann Tab. 17.5 entnommen werden [1].

Tab. 17.3 Volumenbezogene Ökobilanz unterschiedlicher Betonzusammensetzungen (Umweltwirkungen pro m³ Frischbeton) [1].

Mischung	GWP [kg CO ₂ -Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ -Äqv.]	PE, ges. [MJ]
Ref.-NF-1	397	7,75E-07	0,54	0,067	0,052	3189
Ref.-NF-2	328	7,45E-07	0,46	0,057	0,044	2643
Ref.-HF-1	428	1,40E-06	0,64	0,088	0,060	4291
Ref.-HF-2	360	1,35E-06	0,58	0,083	0,053	3802
C3-NF-1	206	8,62E-07	0,34	0,053	0,031	1730
C3-NF-2	178	8,46E-07	0,30	0,049	0,027	1514
C3-NF-3	149	7,88E-07	0,27	0,044	0,024	1299
C3-HF-1	288	1,29E-06	0,47	0,074	0,043	2593
C3-HF-2	289	1,56E-06	0,49	0,077	0,044	2524

Tab. 17.4 Leistungsbezogene Ökobilanz unterschiedlicher Betonzusammensetzungen (Umweltwirkungen pro m³ Frischbeton je MPa Druckfestigkeit^{a)}) [1].

Mischung	$f_{cm,28}$ [N/mm ²]	GWP [kg CO ₂ -Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ -Äqv.]	PE, ges. [MJ]
Ref.-NF-1	86,9	4,56	8,92E-09	6,22E-03	7,76E-04	6,04E-04	36,69
Ref.-NF-2	85,4	3,84	8,72E-09	5,35E-03	6,69E-04	5,15E-04	30,95
Ref.-HF-1	123,0	3,48	1,14E-08	5,17E-03	7,17E-04	4,85E-04	34,89
Ref.-HF-2	112,3	3,21	1,20E-08	5,15E-03	7,36E-04	4,74E-04	33,85
C3- NF-1	74,8	2,75	1,15E-08	4,50E-03	7,06E-04	4,11E-04	23,13
C3-NF-2	62,5	2,85	1,35E-08	4,85E-03	7,81E-04	4,36E-04	24,22
C3-NF-3	55,1	2,71	1,43E-08	4,84E-03	8,04E-04	4,29E-04	23,58
C3-HF-1	105,0	2,75	1,23E-08	4,43E-03	7,04E-04	4,08E-04	24,69
C3-HF-2	125,0	2,31	1,25E-08	3,90E-03	6,16E-04	3,49E-04	20,19

a) Bezogen auf den Mittelwert der 28 d Betondruckfestigkeit bei Wasserlagerung.

Tab. 17.5 Zusammensetzung der Mischungen für Spritzbeton [1].

Bestandteil	Trockenmörtel [kg/t]		Frischbeton [kg/m ³]	
	C3-SP-1	C3-SP-2	C3-SP-1	C3-SP-2
CEM I 42,5R	200	280	376,6	532,8
Kalksteinmehl	60	80	113,0	152,2
Sand 0–2 mm	700	600	1318,1	1141,8
Fließmittel (trocken)	5	5	89,4	9,5
Sonstiges	35	35	65,9	66,6
Wasser	—	—	237	257
Summe	1000	1000	2120	2160

Tab. 17.6 Volumenbezogene Ökobilanz verschiedener Spritzbetonmischungen (Umweltwirkungen pro m³ Spritzbeton) [1].

Mischung	GWP [kg CO ₂ -Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ -Äqv.]	PE,ges [MJ]
C3-SP-1	324	9,89E-07	0,47	0,060	0,044	2624
C3-SP-2	449	1,06E-06	0,63	0,080	0,060	3615

Tab. 17.7 Leistungsbezogene Ökobilanz verschiedener Spritzbetonmischungen (Umweltwirkungen pro m³ Spritzbeton je MPa Druckfestigkeit^{a)}) [1].

Mischung	$f_{cm,28}$ [N/mm ²]	GWP [kg CO ₂ -Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ -Äqv.]	PE, ges. [MJ]
C3-SP-1	41,9	7,73	2,36E-08	1,13E-02	1,44E-03	1,06E-03	62,62
C3-SP-2	62,1	7,23	1,71E-08	1,01E-02	1,28E-03	9,70E-04	58,22

a) Bezogen auf den Mittelwert der 28 d Betondruckfestigkeit bei Wasserlagerung.

17.2.3.2 Umweltwirkungen der Spritzbetone

Entsprechend der Ergebnisse der C³-Betone im Neubau werden Umweltwirkungen der Spritzbetone ebenfalls bezogen auf das Betonvolumen (vgl. Tab. 17.6) und nachfolgend zusätzlich auf die Festigkeit dargestellt (vgl. Tab. 17.7). Die Bilanzierung beinhaltet die Bereitstellung eines Kubikmeters Spritzbeton ab Werkstor inkl. der Vorketten. Der Transport sowie der Einbau auf der Baustelle bleiben unberücksichtigt [1].

17.3 Umweltwirkungen von Carbongelegen

Werden die Umweltwirkungen von Carbongelegen nach den Anteilen der Grundstoffe differenziert betrachtet, zeigt sich, dass die enthaltene Polyacrylnitrilfaser (PAN) und der für die Herstellung erforderliche Energieaufwand die Umweltwirkungen determiniert [6]. Entsprechend der Ergebnisse des Basisvorhabens B1 des C³-Projektes zu den ökologischen Aspekten von Carbonfasern weist die Herstellung von 1 kg Carbongelege die in Tab. 17.8 aufgeführten Umweltwirkungen auf. Da zum aktuellen Zeitpunkt nicht abschließend geklärt ist, inwieweit Bewehrung aus Carbon als solche wiederverwendet werden kann, wurde bei der Bilanzierung davon ausgegangen, dass aufbereitete Carbongelege für die Herstellung von Glasvlies verwendbar sind [7]. Somit wird die vermiedene Herstellung des Glasvlieses als Gutschrift berücksichtigt [8].

Tab. 17.8 Umweltwirkungen pro 1 kg Carbongelege.

GWP [kg CO ₂ -Äqv.]	ODP [kg R11-Äqv.]	AP [kg SO ₂ -Äqv.]	EP [kg PO ₄ -Äqv.]	POCP [kg C ₂ H ₄ -Äqv.]	PE, ges. [MJ]
4,53	4,44E-14	8,33E-03	1,50E-03	9,10E-04	98,3

17.4 Vergleichende Ökobilanzierung von Bauteilen

17.4.1 Grundlagen

Um die ökologischen Wirkungen der neuen Bauweise konkret zu dokumentieren, wurden zwei praxisnahe Fertigbauteilen in jeweils unterschiedlichen Varianten vergleichend bilanziert. Es handelt sich um eine Parkhausdecke und ein mehrschaliges Fertigteilwandsystem. Durch die höhere Leistungsfähigkeit von Carbongelegen können die Querschnittsabmessungen optimiert werden, wodurch Ressourceneinsparungen ergeben. Für die vergleichende Betrachtung wurde ein Beton der Mischung C3-HF-2 (siehe Tab. 17.3) angesetzt und die Carbongelege wurden mit den Werten nach Abschn. 17.3 bilanziert.

17.4.2 Parkhausdecke

Im Rahmen des Vorhabens V4.19 des C³-Projektes „Carbonbewehrte Parkhausdeckenplatten“ wurden Deckenplatten aus Carbonbeton speziell für den Einsatz im Parkhausbau entwickelt¹⁾. Die Platten sind einachsigt gespannt und einlagig mit einer expoxidharzgetränkten Carbonmatte bewehrt. Durch den Einsatz der korrosionsresistenten Bewehrung kann die Betondeckung auf ein Mindestmaß von 1,0 cm reduziert und Beton eingespart werden. Die Carbonbetonplatten sind 9,0 cm dick und bestehen aus 225 kg/m² Beton und 210 g/m² Carbongelege. Die Vergleichsplatten aus Stahlbeton bestehen aus 290 kg/m² Beton und 5,5 kg/m² Bewehrungsstahl und sind 12 cm stark.

Die Umweltwirkungen des gesamten Lebenszyklus beider Deckenplatten ist in Tab. 17.9 aufgeführt. Die Bilanzierung beinhaltet dabei Herstellung und Entsorgung einschließlich der Rohstoffgewinnung, Verarbeitung, Transporte, Abriss, Aufbereitung und ggf. Gutschriften für Recycling (cradle to grave).

Die carbonbewehrte Deckenplatte weist in 50 % der untersuchten Kategorien niedrigere Umweltwirkungen auf, als die vergleichbare Stahlbetonplatte. Hinsichtlich des Primärenergiebedarfs, sowie des Ozonbildungs- (POCP) und des Treibhauspotenzials (GWP) sind die Umweltwirkungen trotz geringerer Kubatur hingegen größer.

1) Graubner, C.-A., Krieger, L. und Proske, T. (2020). Carbon Concrete Composite C³; V4.19 – Carbonbewehrte Parkhausdeckenplatten, TP II (unveröffentlichter Ergebnisbericht).