

# 1

## Einleitung und Überblick

Silke Scheerer (1.1) und Frank Schladitz (1.2, 1.3)

### 1.1 Geschichtliche Entwicklung

#### 1.1.1 Die Anfänge des Betonbaus

Mineralisch basierte Materialien wurden schon vor mehreren tausend Jahren zur Errichtung von Bauwerken verwendet. Es ist schon fast eine philosophische Frage, wann zuerst ein Material hergestellt wurde, welches dem Beton im heutigen Sinne gerecht wird [1]. Erste mineralische Bindemittel werden im Osten der heutigen Türkei auf die Zeit um 12 000 v. Chr. datiert [2]. Den Phöniziern wird die Erfindung des hydraulischen Kalkputzes vor ca. 3000 Jahren [3] und auch die Kombination von Mörtel mit Vulkangestein als Zuschlag zugeschrieben, z. B. [2]. Dem „*emplekton*“ [3, 4], – ein mehrschaliges Mauerwerk, in dessen Zwischenraum ein Gemisch aus Mörtel und groben Steinen gefüllt wurde – folgte dann im Römischen Reich der „*opus caementitium*“ oder „*concretum*“, der heute allgemein als erste Hochzeit des Betonbaus gilt [5].

Aus Mauerwerk, Beton bzw. betonähnlichen Kompositen errichtete man druckbeanspruchte Konstruktionen wie Fundamente, Mauern und Gewölbe. Das bekannte Manko einer mangelhaften Zugfestigkeit spiegelte sich also in der Bauform wider. Schon vor mehreren tausend Jahren fügte man Lehmziegeln Stroh bei [6]. In der Antike wurden bereits eiserne Klammern über Stoßfugen hinweg eingesetzt, u. a. beim Kolosseum in Rom oder der Porta Nigra in Trier [4, 5]. Zugringe aus Holz (z. B. aus Kastanienstämmen bei der Kuppel des Florentiner Doms) oder Eisen (Kuppel des Petersdoms in Rom) dienten der Aufnahme des Bogenschubs [7].

„*War das Bewehren von Beton mit Eiseneinlagen also um die Mitte des 19. Jahrhunderts eigentlich naheliegend? Man könnte es vermuten, ...*“, schreibt Wieland Ramm in [4]. Die ersten Patente datieren auf die Jahre 1854 (Coignet und Wilkinson) und 1965 (Lambot) und wurden in England, Frankreich und Belgien erteilt. Die weitere Geschichte des Jahrhundertbaustoffs Stahlbeton als dem führenden Baustoff der Neuzeit ist hinlänglich bekannt, z. B. [4]. Fortschritte bei Bemessung und Konstruktion, Materialien und Bauverfahren haben bewehrten Beton heute zum führenden Baumaterial bei nahezu allen Bauprojekten gemacht. Ein Nachteil besteht

*Handbuch Carbonbeton – Einsatz nichtmetallischer Bewehrung*, 1. Auflage.

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

© 2023 Ernst & Sohn GmbH. Published 2023 by Ernst & Sohn GmbH.

## 2 | 1 Einleitung und Überblick

allerdings bis heute: Bewehrungsstahl kann korrodieren. In Anlehnung an Wieland Ramm muss man sich also die Frage stellen, ob die Suche nach alternativen Bewehrungsmaterialien nicht auch die logische Folge bisheriger Entwicklungen war [8].

### 1.1.2 Faserbewehrungen für Beton

#### 1.1.2.1 Überblick

In den vergangenen Jahrzehnten wurden weltweit verschiedene faserbasierte Alternativen für den herkömmlichen Bewehrungsstahl entwickelt, siehe u. a. [8]. In Abhängigkeit der Faserlänge kann wie folgt unterschieden werden:

- **Kurzfasern:** Die Verwendung von Kurzfasern reicht in Form von Asbestzement (*asbestos cement*) fast in die Anfangszeit des Stahlbetons zurück [9, 10]. Heute werden für (Kurz-)Faserbeton vorwiegend Fasern aus alkaliresistentem (AR) Glas, Stahl oder Kunststoff der zementbasierten Matrix beigemischt, z. B. [11]. Der Faserzusatz bewirkt eine Steigerung der Druck-, Zug- und v. a. Biegezugfestigkeit, weshalb der Werkstoff häufig bei hoch belasteten Industriefußböden eingesetzt wird. Eine Weiterentwicklung ist (HS-)SHCC (*high-strength strain-hardening cement-based composite*), z. B. [12, 13], mit nochmals erhöhter Duktilität.
- **Endlosfasern:** Endlosfaserbasierte Bewehrungen für den Einsatz im Massivbau (s. a. Kap. 2) können unter dem Begriff Faserverbundkunststoffe (FVK) zusammengefasst werden. Grob verallgemeinert handelt es sich um eine Vielzahl von gebündelten Endlosfasern (Filamenten), die in eine Kunststoffmatrix eingebettet sind, welche die Fasern einerseits robuster gegenüber z. B. mechanischer Beschädigung macht und andererseits für eine gleichmäßige Faserauslastung sorgt. Im Gegensatz zum Faserbeton, in welchem die Kurzfasern ungerichtet in der Matrix liegen, haben FVK i. d. R. eindeutig richtungsabhängige Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. Bewehrungen auf Endlosfaserbasis gibt es in der Form von
  - flächigen Bewehrungen: Sheets und Textilien sowie
  - stabförmigen Bewehrungen: Stäbe und Spannglieder/Seile.

Im Folgenden liegt der Fokus auf Textilien und Stäben. Es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

#### 1.1.2.2 Entwicklung bis Anfang der 1990er-Jahre

Frühe Forschungen und Entwicklungen sind von stabförmigen Bewehrungselementen bekannt. Bereits Anfang der 1970er-Jahre wurden in den USA verschiedene Fasertypen für zugtragfähige Elemente getestet, z. B. [14]. In [15] wird über frühe Erfahrungen beim Einbetten von Carbonfaser-Endlosrovings in Zement berichtet. Allerdings war hier der Ansatz, die Rovings anstatt mit einer Kunststoffmatrix wie heutzutage üblich mit Zementsuspension zu durchtränken. In Deutschland sind zuerst die Forschungen an der Universität Stuttgart zu nennen. Hier wurden – ebenfalls in den 1970er-Jahren – kunstharzgebundene Glasfaserstäbe für den Einsatz als Bewehrung im Beton- und Spannbetonbau untersucht, z. B. [16, 17]. Als Fasermaterial kam E-Glas zum Einsatz. Die Untersuchungen umfassten Kurzzeit-

und Langzeit-Zugversuche, Tests unter Dauerstand- und Dauerschwingbeanspruchung, bei Temperaturen bis zu 300 °C und zur Kraftereinleitung.

Wenig später wurden an der Universität München Carbonfasern als Bewehrungsmaterial für Betonbauteile thematisiert [18, 19]. Bereits damals erkannte man die großen Vorteile der Carbonfasern gegenüber Stahl oder anderen Fasermaterialien: Hohe Zugfestigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Dichte, Beständigkeit gegenüber alkalischem Milieu und Korrosion – und damit eine verringerte Betondeckung – sowie die planmäßige Herstellbarkeit als Endlosfaser. Zudem wurden die Vorzüge des Einbettens langer Rovings gegenüber Kurz-/Stapelfasern herausgestellt. Der größte Nachteil im Vergleich zu anderen Materialien war der damals noch sehr hohe Preis. In Verbindung mit Beton wurden das Einbetten einzelner Rovings oder von carbonfaserverstärkten Kunstharzstäben als mögliche Bewehrungsformen hauptsächlich in Biegeversuchen erprobt. Weitere Themen waren die Beständigkeit im alkalischen Milieu und Aspekte des Verbundverhaltens. Als potenzielle Anwendungen wurden Bauteilverstärkungen und membranartige Bauelemente genannt.

Im Osten Deutschlands datiert der Beginn der Forschung an Textilien als Betonbewehrung auf Anfang der 1980er-Jahre. In Fuchs (2001, unveröffentlicht)<sup>1)</sup> wird auf die Aktivitäten am Sächsischen Textilforschungsinstitut e. V. (STFI), Chemnitz, und des WTZ Technology Textilien Dresden und auf erste Patente verwiesen. Mit dem Patent DD 210102 (12/1982) wurde eine Möglichkeit zur Substitution von Bewehrung als Transportsicherung für untergeordnete Bauteile, z. B. für Böschungen oder Platten für den Wegebau, patentiert. In Patent Nr. DD 275008 für ein „Verfahren zur Lagefixierung linienförmiger flexibler Bewehrungselemente bei der vertikalen Fertigung plattenförmiger Bauelemente“ (also Abstandhalter) werden Anwendungsbeispiele für textile Bewehrungen – „Bewehrungsseile“ mit einem Durchmesser von 8 mm – beschrieben, deren Maschenweiten 25 mm betragen. In dieser Patentschrift lassen sich also die ersten Grundzüge des Textilbetons erahnen.

International wurde die Entwicklung in den 1980er-Jahren v. a. in Japan, Kanada, der Schweiz, den USA und Israel vorangetrieben, was sich u. a. in den ersten Ausschüssen (z. B. 1989 *Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials (CFRM) des Concrete Committee of the Japan Society of Civil Engineers*, vgl. [20]), Empfehlungen und State-of-the-Art-Reports für faserbasierte Bewehrungen für den Betonbau, z. B. 1992 ebenfalls in Japan [20] widerspiegelt.

### 1.1.2.3 Textilbetonforschung ab Mitte der 1990er-Jahre

#### **Deutschland**

Mitte der 1990er-Jahre erkannte man in Deutschland das Potenzial textilbewehrten Betons. Um schnelle Fortschritte beim Ausloten der Leistungsfähigkeit dieses neuartigen Baustoffes zu erreichen, war die Bündelung der Kompetenzen nötig. Bereits früh arbeiteten Forscher der Universitäten in Dresden und Aachen eng zusammen. Beleg sind u. a. zwei gemeinsame Forschungsprojekte: 1996 wurde das AiF-Vorhaben Nr. 9272 „Verwirkte Verstärkungsgelege für das textile Bauen“ ab-

1) Fuchs, H. (2001). Ausarbeitung zu Vorarbeiten des WIZTT/STFI vor 1991 für das FK Textil. Unveröffentlichtes Dokument.

4 | 1 Einleitung und Überblick

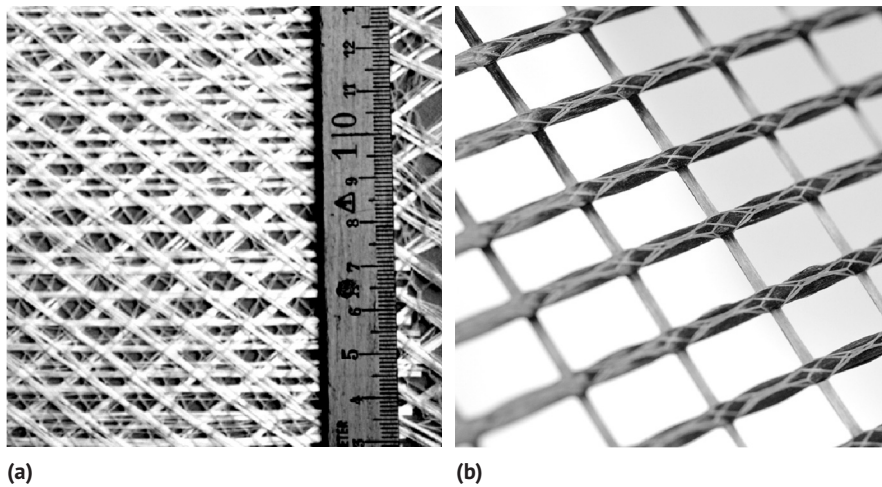


**Abb. 1.1** Probekörper mit Styroporkern aus einem der ersten Forschungsprojekte mit Textilbeton (TRC) (Quelle: IMB, TU Dresden [23]).

geschlossen [21]. Im Vorhaben Nr. 10378 B „Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung gewirkter Verstärkungsgelege für den Einsatz in dünnwandigen Formteilen aus mineralischem Baustoffen“ war außer den Universitäten Dresden und Aachen auch das STFI Chemnitz beteiligt [22]. In beiden Vorhaben wurden v. a. erste gezielte Untersuchungen zum Potenzial textiler Bewehrungen für den Einsatz in mineralischen Matrices durchgeführt. Als Fasern wurde alkaliresistentes Glas präferiert, obwohl die höhere Leistungsfähigkeit von Carbonfasern bekannt war. Grund war zum einen der deutlich höhere Preis der Kohlenstofffasern, aber zum anderen auch die These, dass wissenschaftliche Erkenntnisse von Glasfaserrovings in Beton tendenziell auch auf andere Fasermaterialien übertragbar sein werden.

Das in diesen und weiteren Projekten an verschiedenen Universitäten gesammelte Wissen wurde dann im „Gemeinschaftsforschungskreis Textilbewehrter Beton“ des Deutschen Beton Vereins e. V. gesammelt und 1998 im „Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau“ zusammengefasst [23], s. a. Abb. 1.1. Der Bericht enthält einen Überblick über die bis dato gewonnenen Forschungsergebnisse zum Verbundbaustoff Textilbeton und war maßgebliche Grundlage für zwei von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) von 1999–2011 geförderten Sonderforschungsbereichen: SFB 528 „Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung“ in Dresden und SFB 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“ in Aachen, z. B. [24, 25]. In beiden SFB lag in den ersten Jahren der Fokus auf der Erforschung gelegartiger Strukturen aus AR-Glasfasern zur Bewehrung von Betonbauteilen (Abb. 1.2a). Die anvisierten, verschiedenen Anwendungsgebiete *nachträgliche Verstärkung* und *neue Bauteile* bedingten allerdings unterschiedliche Matrices und Tränkungen.

Ab etwa Mitte der 2000er-Jahre verlagerte sich der Fokus immer mehr zu Bewehrungen auf Carbonfaserbasis (Abb. 1.2b). Auch nahmen Aspekte der Markteinführung textiler Bewehrungen einen immer höheren Stellenwert ein. In der Folge wurden vermehrt praxisorientierte Projekte als Kooperationen zwischen Forschungseinrichtungen und Firmen initiiert. Besonders wirksam bei der Verbreitung von Wissen über den neuartigen Baustoff waren erste Praxisprojekte, die mit Textilbeton realisiert wurden, z. B. 2005 die erste textilbewehrte Brücke für die Landesgar-



**Abb. 1.2** AR-Glastextil (a) aus der Frühzeit der Textilbetonforschung und (b) modernes Carbonbelege. (Quellen: (a) Institut für Massivbau (IMB), TU Dresden [23], (b) Stefan Gröschel, IMB, TU Dresden).

tenschau Oschatz 2006 [26] – es wurde ein AR-Glastextil verwendet – oder die Sanierung einer Hyparschale in Schweinfurt [27] im Jahr 2006 mit Textilbeton und Carbonfaserbewehrung. Weitere Beispiele sind in Kap. 20 zusammengestellt.

2007 wurde mit dem Deutschen Zentrum Textilbeton (DZT) als Einrichtung der TUDAG TU Dresden Aktiengesellschaft, aus dem 2009 der TUDALIT e. V. hervorging [28], zudem eine Anlauf- und Beratungsstelle rund um das Thema Bauen mit Textilbeton geschaffen. Aktuell sind 40 Firmen, Verbände und Forschungseinrichtungen Mitglied im Verband. Ein Meilenstein bei der Markteinführung war die Erlangung einer ersten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) Z-31.10-182 für die Biegeverstärkung mit TUDALIT<sup>®</sup> Textilbeton [29, 30]. Der TUDALIT e. V. fusionierte 2021 mit dem C<sup>3</sup> e. V. [31]. Neben der abZ für Verstärkung haben mittlerweile verschiedene Firmen weitere Zulassungen auf Bauteilebene, z. B. für Fassadenplatten, erwirkt.

Erwähnt werden soll auch, dass die Richtlinienarbeit in Deutschland aktuell verstärkt vorangebracht wird. Die Erkenntnisse aus dem C<sup>3</sup>-Projekt und weiteren Vorhaben werden im Unterausschuss Nichtmetallische Bewehrung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton gebündelt.

### **International**

Auch international wurde immer intensiver an Faserbewehrungen für mineralisch gebundene Komposite gearbeitet. Eine ausführliche Darstellung der Entwicklung würde allerdings den Rahmen dieses Kapitel sprengen. Stellvertretend seien lediglich weitere Richtlinien bzw. State-of-the-Art-Reports wie CSA-S806-2 2002 [32], ACI 440.1R-03 2003 [33] oder RILEM [34] 2006 sowie mit der Street Bridge in Southfield (Michigan, USA) ein erstes maßgebliches Bauwerk, welches bereits Ende der 1990er-Jahre mit Carbonfaserbewehrung errichtet wurde [35]. Als weiterführende Literatur seien bspw. [36, 37] empfohlen.

6 | 1 Einleitung und Überblick

### 1.1.3 Das C<sup>3</sup>-Projekt – Carbonbeton für den baupraktischen Einsatz

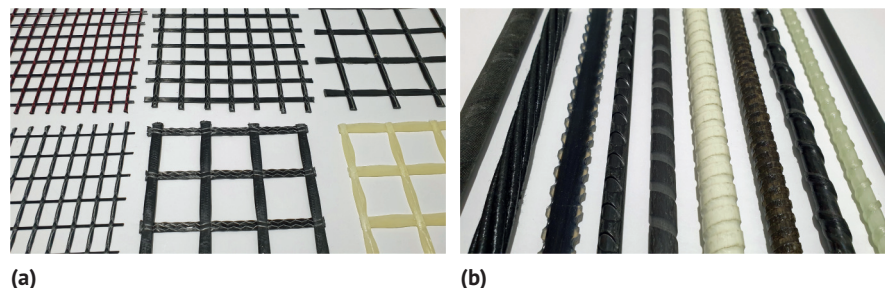
Wegen des national und international immer weiter steigenden Interesses am Betonbau mit faserbasierten Bewehrungen initiierten Dresdner Forscher das Großforschungsprojekt Carbon Concrete Composite C<sup>3</sup> [38, 39], welches seit 2014 durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Initiative „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ gefördert wird. Im C<sup>3</sup>-Netzwerk arbeiten mit Stand Ende 2020 160 Partner an der Weiterentwicklung und Markteinführung von Carbonbeton. Im vorliegenden Buch werden die wichtigsten Ergebnisse aus dem C<sup>3</sup>-Projekt, ergänzt durch Erkenntnisse weiterer Forschergruppen weltweit, zusammengefasst.

## 1.2 Allgemeine Vorteile und Grenzen

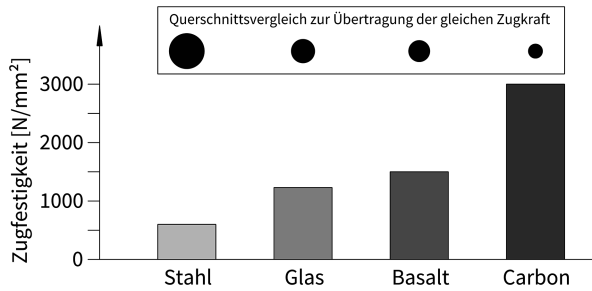
Die Materialkombination von Beton mit einer nichtmetallischen Bewehrung (siehe Abb. 1.3) wird mit einer hohen Lebensdauer, Robustheit, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit sowie Filigranität in Verbindung gebracht. Ein wesentlicher Grund dafür ist, dass die Bewehrung – im Gegensatz zur Stahlbewehrung – nicht korrodieren kann und damit Korrosionsschäden von vornherein ausgeschlossen sind, was unmittelbar zur Erhöhung der Lebensdauer und zur Reduzierung der Instandhaltungskosten über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks führt.

Darüber hinaus ist es u. a. möglich, die Betondeckung auf ein statisch notwendiges Minimum von wenigen Millimetern zu reduzieren. Auf den Beton, der bei einer Stahlbewehrung einen Korrosionsschutz bieten soll, kann verzichtet werden. Des Weiteren haben die Bewehrungen, z. B. aus Carbon-, Glas- und Basaltfasern, in der Regel eine deutlich höhere Zugfestigkeit von 1200 bis über 3000 N/mm<sup>2</sup> anstatt von 500 bis 600 N/mm<sup>2</sup> bei einer Bewehrung aus Stahl. Im Allgemeinen sind die Bewehrungsquerschnitte somit geringer, siehe Abb. 1.4 und Tab. 1.1. In der Summe kann erheblich dünner und filigraner gebaut werden, siehe Abb. 1.5.

Die Bandbreite der mechanischen Eigenschaften der Fasern (Filamente) aus Carbon, Glas und Basalt ist sehr groß. Die Eigenschaften sind u. a. abhängig von den Ausgangsmaterialien und den Herstellprozessen. Zugfestigkeiten von 1000 N/mm<sup>2</sup> aber auch 6000 N/mm<sup>2</sup> sind genauso möglich wie E-Moduln von 20 000 N/mm<sup>2</sup> bis



**Abb. 1.3** Nichtmetallische Bewehrungen: (a) Matten, (b) Stäbe (Quelle: Frank Schladitz).

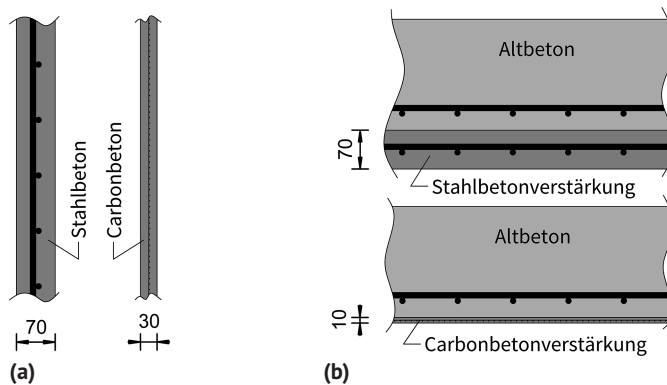


**Abb. 1.4** Vergleich von Zugfestigkeiten und Querschnittsflächen (Orientierungswerte) (Quelle: Frank Schladitz).

**Tab. 1.1** Materialeigenschaften und Vergleichswerte für Querschnittsfläche und Gewicht (Orientierungswerte).

	Stahl	Glas	Basalt	Carbon
Zugfestigkeit in N/mm <sup>2</sup>	550	1 200 <sup>c)</sup>	1 500 <sup>c)</sup>	3 000 <sup>c)</sup>
E-Modul in N/mm <sup>2</sup>	210 000	73 000 <sup>c)</sup>	88 000 <sup>c)</sup>	230 000 <sup>c)</sup>
Dichte in g/cm <sup>3</sup>	7,85	2,7 <sup>c)</sup>	2,6 <sup>c)</sup>	1,8 <sup>c)</sup>
Querschnittsfläche in mm <sup>2</sup> <sup>a)</sup>	182	83	67	33
Querschnittsfläche in %	100	46	37	18
Gewicht in kg/m <sup>b)</sup>	1,42	0,22	0,17	0,06
Gewicht in %	100	16	12	4

- a) Zur Visualisierung der Leistungsfähigkeit – hier ein Vergleich der erforderlichen Querschnittsflächen zur Übertragung einer Zugkraft von 100 kN.
- b) Zur Visualisierung der Leistungsfähigkeit – hier ein Vergleich des Gewichtes (Dichte · Querschnittsfläche · 1 m) des erforderlichen Bewehrungsmaterials zur Übertragung einer Zugkraft von 100 kN.
- c) Werte aus [40] entnommen.



**Abb. 1.5** Vergleich der Dicke bei Stahlbeton- und Carbonbetonanwendungen; (a) Außenschale einer Sandwichwand und (b) Deckenverstärkung (Quelle: Frank Schladitz).

8 | 1 Einleitung und Überblick



**Abb. 1.6** Querschnittsvergleich Stahl- und Carbonbewehrung (Quelle: TU Dresden, Sandra Kranich).

650 000 N/mm<sup>2</sup>. Eine Übersicht ist u. a. Kap. 2 (Bewehrung) und [41] zu entnehmen. Die in den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen genutzten Werte sind typische Orientierungswerte von Materialien, die im Bauwesen zur Anwendung kommen [40].

Je nach Anwendung können bis zu 80 % Beton eingespart werden, der nicht hergestellt, transportiert, eingebaut und recycelt werden muss. In etwa gleicher Größenordnung können der Zement-, Sand-, Kies- und Wasserverbrauch sowie der CO<sub>2</sub>-Ausstoß reduziert werden. Diese Minimierung des Ressourcenverbrauchs, der Transportaufwendungen und der CO<sub>2</sub>-Emissionen zeigen positive Effekte in den Bereichen Wirtschaftlichkeit und ökologische Nachhaltigkeit.

Durch den Einsatz der nichtmetallischen Bewehrung wird auch eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen erreicht. Die Bewehrungen sind deutlich leichter, nicht nur durch den geringeren notwendigen Querschnitt, sondern vor allem durch die geringere Dichte, die bei Carbon 1,8 g/cm<sup>3</sup> statt 7,85 g/cm<sup>3</sup> bei Stahl beträgt. Neben dem Gewicht der Bewehrung wird das Handling auch durch den Einsatz leichterer Geräte und Werkzeuge zur Bearbeitung der Bewehrung stark verbessert.

Aufgrund dieser und weiterer Vorteile werden die nichtmetallischen Bewehrungen in Kombination mit Beton sowohl im Neubau als auch bei der Verstärkung von Gebäuden, Industrieanlagen, Brücken u. v. m. eingesetzt. Die Anwendung des neuen Materialverbundes weist, wie bei jedem Material, auch Grenzen auf. Diese sind u. a. physikalisch, wirtschaftlich und durch noch fehlendes Wissen begründet.

Als physikalische Grenze kann beispielsweise der Verbund zwischen der Bewehrung und dem Beton genannt werden. Die deutlich höhere Zugfestigkeit des Bewehrungsmaterials ermöglicht eine erhebliche Reduzierung des Bewehrungsquerschnittes und damit des Umfangs der Bewehrung. Dadurch wird wiederum die Oberfläche, die für den Verbund genutzt werden kann, reduziert, siehe Abb. 1.6 und Tab. 1.2. In der Folge müssen für die Aufnahme gleicher Zugkräfte höhere Verbundspannungen übertragen werden. Um einen Auszug der Bewehrung aus dem Beton, aber auch ein Aufspalten des Betons zu vermeiden, müssen der Bewehrungsquerschnitt, die Oberflächenprofilierung der Bewehrung und der Beton aufeinander abgestimmt sein.

Als wirtschaftliche Grenze kann beispielsweise die Temperaturbeständigkeit der Bewehrung aufgeführt werden. Diese wird aktuell weniger durch die Fasermaterialien Carbon, Glas oder Basalt bestimmt, sondern vielmehr durch die Tränkung, die den inneren und äußeren Verbund der Bewehrung sicherstellt. Hierfür stehen



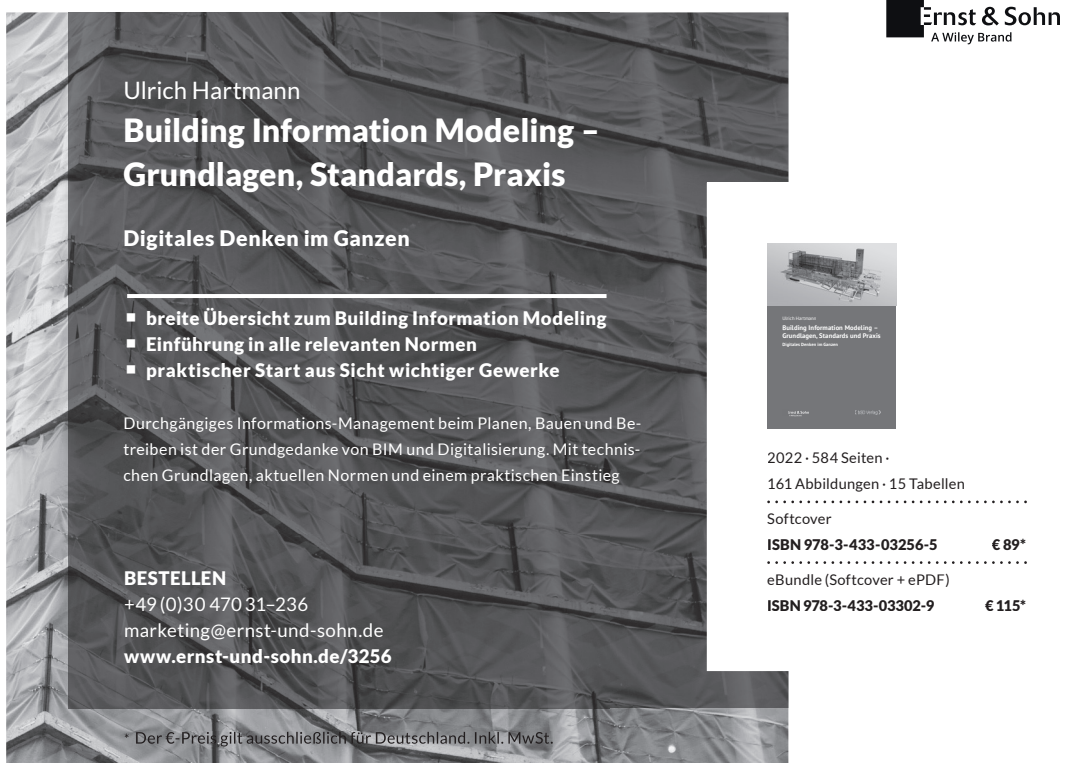


# Combar® Stahl überlegen.

**SCHÖCK**  
Zuverlässigkeit trägt

Der Glasfaserverbundwerkstoff Schöck Combar® ist mit seinen außergewöhnlichen Eigenschaften die überlegene Alternative zu Betonstahl und verfügt als einzige nichtmetallische Bewehrung über die allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung des DIBt.

[www.schoeck.com/de/combar](http://www.schoeck.com/de/combar)



**Ernst & Sohn**  
A Wiley Brand


Ulrich Hartmann  
**Building Information Modeling -  
Grundlagen, Standards, Praxis**

**Digitales Denken im Ganzen**

- breite Übersicht zum Building Information Modeling
- Einführung in alle relevanten Normen
- praktischer Start aus Sicht wichtiger Gewerke

Durchgängiges Informations-Management beim Planen, Bauen und Betreiben ist der Grundgedanke von BIM und Digitalisierung. Mit technischen Grundlagen, aktuellen Normen und einem praktischen Einstieg

**BESTELLEN**  
+49 (0)30 470 31-236  
marketing@ernst-und-sohn.de  
[www.ernst-und-sohn.de/3256](http://www.ernst-und-sohn.de/3256)



2022 · 584 Seiten ·  
161 Abbildungen · 15 Tabellen  
.....  
Softcover  
**ISBN 978-3-433-03256-5** € 89\*  
.....  
eBundle (Softcover + ePDF)  
**ISBN 978-3-433-03302-9** € 115\*

\* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.

**Ernst & Sohn**  
A Wiley Brand

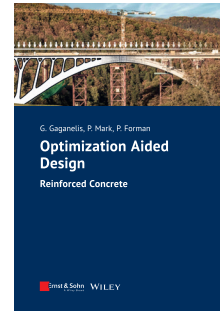
Georgios Gaganelis, Peter Mark, Patrick Forman

# Optimization Aided Design

## Reinforced Concrete

- numerous examples e.g. columns, beams, deep beams, corbels, cantilevers, frame corners, pylons, parabolic trough solar collectors, fiber reinforced concrete
- the book is suitable for graduates, young professionals and for teaching & research
- useful introduction to optimization methods for practicing engineers

Reinforced concrete is the dominating building material and contributes to resource consumption and climate change. The book provides design methods for minimal material use in its outer and inner shape. Numerous examples illustrate the application in theory and practice.



2022 · 184 pages · 200 figures · 6 tables

Softcover

**ISBN 978-3-433-03337-1** € 69\*

eBundle (Softcover + ePDF)

**ISBN 978-3-433-03338-8** € 99\*

### ORDER



+49 (0)30 470 31-236

marketing@ernst-und-sohn.de

[www.ernst-und-sohn.de/en/3337](http://www.ernst-und-sohn.de/en/3337)

\* All book prices inclusive VAT.

**Tab. 1.2** Vergleich von Querschnittswerten.

	Stahl		Carbon
			
Zugkraft in kN <sup>a)</sup>		339	
Durchmesser in mm	28		12
Querschnittsfläche in mm <sup>2</sup>	616		113
Umfang in mm	88		37
E-Modul in N/mm <sup>2</sup>	210 000		230 000
Dehnsteifigkeit in MN <sup>b)</sup>	130		26

a) Annahmen: Zugfestigkeit von 550 N/mm<sup>2</sup> für Stahl und von 3000 N/mm<sup>2</sup> für Carbon.

b) Dehnsteifigkeit = E-Modul · Querschnittsfläche.

grundsätzlich hochtemperaturbeständige, keramische Tränkungen zu Verfügung. Diese können bisher jedoch noch nicht zu einem markfähigen Preis produziert und verarbeitet werden. So kommen bisher Tränkungen zum Einsatz, bei denen eine Temperaturbeständigkeit bis ca. 100 °C sichergestellt werden kann. Für viele Einsatzbereiche ist dies vollkommen ausreichend, jedoch nicht für alle.

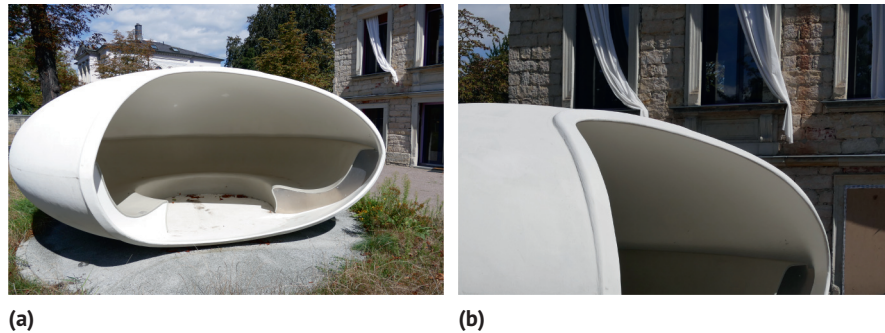
Als Beispiel für Grenzen durch fehlendes Wissen kann die Vorspannung angesehen werden. Carbon hat eine bis zu sechsfach höhere Festigkeit als Stahl, jedoch den annähernd gleichen E-Modul. Wird der Bewehrungsquerschnitt aufgrund der höheren Festigkeit reduziert, reduziert sich auch die Dehnsteifigkeit der Bewehrung, siehe Tab. 1.2. Einer größeren Verformung kann mit einer Vorspannung entgegen gewirkt werden. Auch wenn hierfür bereits erste Systeme, u. a. in der Schweiz [42] und in Japan [43], existieren, liegen bisher nur wenige belastbare Erkenntnisse zum Spannverfahren, zur Verankerung und zum Langzeitverhalten vor. Erste Pilotanwendungen sind bereits umgesetzt. Eine breite Anwendung ist jedoch aktuell noch nicht absehbar.

Wissenslücken werden durch umfangreiche Forschung beseitigt, sodass damit in Verbindung stehende Grenzen zunehmend verschoben oder ganz aufgehoben werden können. Ähnlich ist es bei den wirtschaftlichen Grenzen, die durch Entwicklungen und Innovationen verschoben und beseitigt werden können. Demgegenüber können die physikalischen Grenzen nicht überschritten, sondern lediglich ausgereizt oder durch Alternativen umgangen werden. Diese Alternativen bieten den Unternehmen und Forschungseinrichtungen Entwicklungsmöglichkeiten für zukunftsweisende Produkte und Verfahren im Umfeld des Betonbaus mit nichtmetallischer Bewehrung.

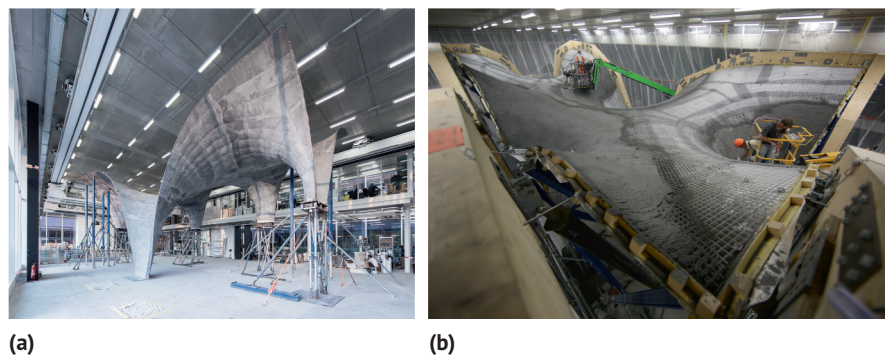
### 1.3 Einsatzgebiete

Prinzipiell kann die nichtmetallische Bewehrung, hier im speziellen die Bewehrung aus Carbon- oder Glasfasern, überall dort eingesetzt werden, wo bisher Stahlbewehrung zur Anwendung kommt. Die filigrane Bauweise mit nichtmetallischer Bewehrung ermöglicht aber auch darüber hinaus beeindruckende Anwendungen, wie beispielsweise Abb. 1.7 und 1.8 zeigen.

Zahlreiche Beispiele sind dem Kap. 20 (Praktische Anwendungen) zu entnehmen. Die durch den Wechsel des Bewehrungsmaterials erzielten Effekte sind je nach Anwendung sehr unterschiedlich, sodass dieser bauwerks- und bauteilbezogen abzuwägen ist. Bleibt beispielsweise die Baukonstruktion unverändert und es erfolgt lediglich ein Wechsel von der Stahlbewehrung zu einer nichtmetallischen Bewehrung, können die Robustheit und Dauerhaftigkeit der Baukonstruktion erhöht und die Instandhaltungskosten reduziert werden. Beispiele sind u. a. Hafenanlagen, Straßenbrücken und Parkhausdeckenplatten, auf die z. B. häufig Salzwasser



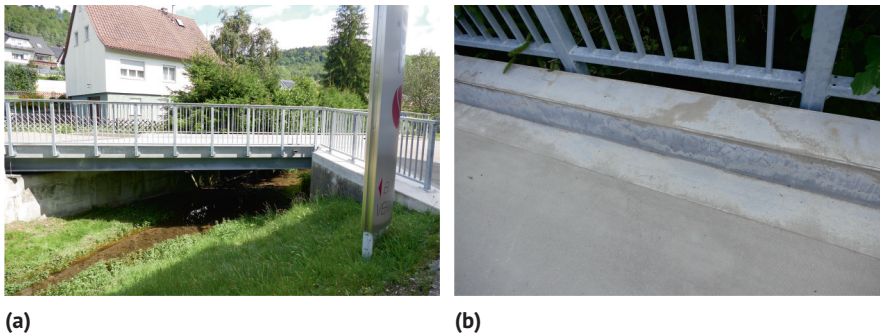
**Abb. 1.7** Ellipsenförmiger Carbonbeton-„Smartie“ mit 2,5 cm Wanddicke von Gerd Priebe (siehe u. a. [44]) – Vorbild eines geplanten Carbonbeton-Wohnhauses mit 18 m Durchmesser; (a) Ansicht, (b) Detail der Randgestaltung (Quelle: C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V., Amer Suliman).



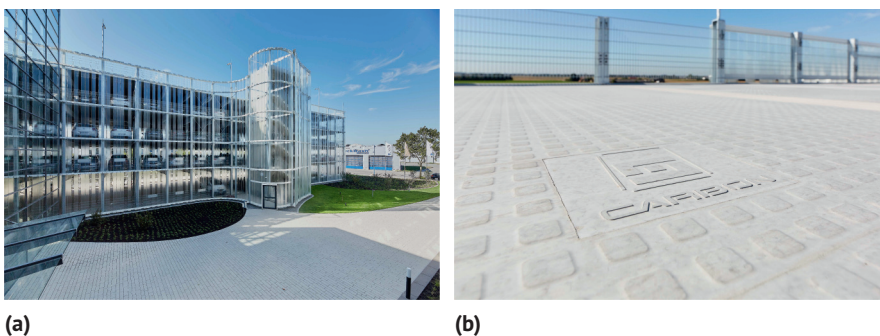
**Abb. 1.8** Mehrfach gekrümmte, auf einer Seilnetzschalung hergestellte, 3–12 cm dicke Carbonbetonschale; (a) Ansicht, (b) Bewehrungsführung (siehe u. a. [45]) (Quellen: ETH Zürich, Block Research Group, (a) Michael Lyrenmann, (b) Naida Iljazovic).

einwirkt, wodurch eine Stahlbewehrung deutlich schneller korrodieren kann als bei anderen Anwendungen. Positive Begleiteffekte sind u. a., dass mit Carbonbeton Brücken und Parkhausdeckenplatten direkt befahrbar – also ohne zusätzliche Abdichtung – ausgeführt werden können, siehe Abb. 1.9 und 1.10. Dies reduziert nicht nur die Kosten und die Fehleranfälligkeit bei der Errichtung, sondern auch die für die Unterhaltung im Lebenszyklus.

Besonders positive Effekte in Bezug auf Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit werden jedoch erreicht, wenn es durch die nichtmetallische Bewehrung gelingt, Baukonstruktionen deutlich dünner auszuführen. Beispiele für ausgeführte Neubauteile sind u. a. Fußgängerbrücken, Fassaden-, Wand- und Dachkonstruktionen sowie Fertigteilgaragen, siehe u. a. Abb. 1.11. Durch die Verringerung der Bauteildicken wird zunächst der Materialeinsatz deutlich reduziert. Dies spart nicht nur Materialkosten, z. B. bei hochpreisigem Architekturbeton, sondern reduziert auch Kosten für Transport, Unterkonstruktionen und Verbindungsmittel. Daneben ermöglichen dünnere Konstruktionen bei Gebäuden einen Flächengewinn und damit mehr vermarktbare Flächen bei gleichen Gebäudeaußenabmessungen. Sind Gewichtsbegrenzungen, z. B. durch Transport, Handling oder bestehende Bau-

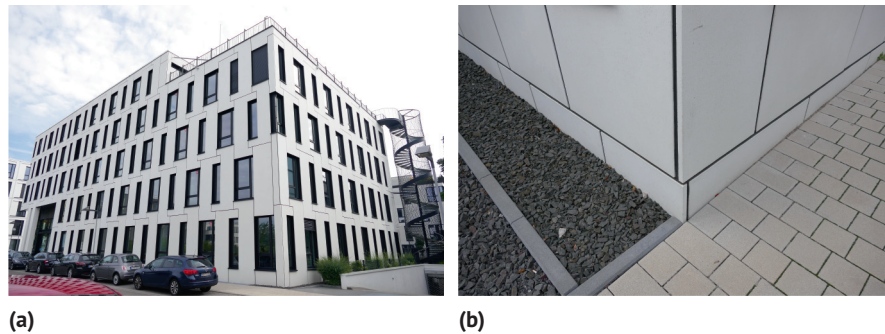


**Abb. 1.9** Straßenbrücke mit direkt befahrbarer Carbonbetonfahrbahnplatte in Albstadt Pfeffingen; (a) Seitenansicht, (b) Randborddetail des Fertigteils (s. z. B. [46]) (Quelle: C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V., Amer Suliman).



**Abb. 1.10** Parkhausdeckenplatte; (a) Ansicht des Parkhauses, (b) Draufsicht auf Parkhausdeckenplatte (s. z. B. [47]) (Quelle: Goldbeck GmbH, Oliver Heppes).

12 | 1 Einleitung und Überblick



**Abb. 1.11** Sandwichwand des Eastsite XI in Mannheim (siehe z. B. [50]) mit einer 3 cm dünnen Außenschale; (a) Ansicht, (b) Eckdetail (Quelle: C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V., Amer Suliman).



**Abb. 1.12** Fußgängerbrücken mit Bewehrungen aus Glasfasern; (a) Trogbrücke in Oschatz, (b) Plattenbalkenbrücke in Albstadt (Quellen: (a) C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V., Amer Suliman; (b) Jörg Singer).

konstruktionen, die einschränkende Randbedingung, können durch die leichteren Konstruktionen größere Bauteile verwendet werden. Beton mit nichtmetallischer Bewehrung kann außerdem in Bereichen zur Anwendung kommen, wo bisher vorzugsweise Holz und Metalle verwendet wurden. Beeindruckende Beispiele sind leichte Fußgängerbrücken mit teils nur 3 cm Bauteildicke, siehe u. a. Abb. 1.12. Beide Brücken sind noch mit konventionellen (stahlbasierten) Systemen vorgespannt, siehe z. B. [48, 49], da zum jeweiligen Zeitpunkt der Errichtung die Entwicklung von Carbonspanngliedern noch nicht weit genug fortgeschritten war.

Neben dem zuvor genannten Neubaubereich ist der Bereich der Verstärkung von Bauwerken ein großes Einsatzgebiet der nichtmetallischen Bewehrung. Der Erhalt bestehender Bauwerke kann oft deutlich nachhaltiger und wirtschaftlicher sein als ein Ersatzneubau. Für die Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbetonbauwerken wird bisher vorrangig Stahlbeton verwendet, der in Dicken von ca. 70–80 mm auf die bestehende Konstruktion aufgebracht wird. Mit dieser Verstärkungsmethode sind jedoch u. a. auch die Erhöhung des Eigengewichts der Konstruktion, bei Gebäuden die Reduzierung der lichten Raumhöhe, bei Parkhäusern und Brücken die Reduzierung der lichten Durchfahrtshöhe, bei Silos die Reduzierung des Silovol-



**Abb. 1.13** Verstärkte Bauwerke: (a) Hyparschale in Magdeburg, (b) Bogenbrücke in Naila, (c) Geschossdecke in Prag, (d) Silo in Uelzen, (e) Tonnendach in Zwickau, (f) Autobahnbrücke über die Nidda (Quellen: (a), (b) Amer Suliman; (c–e) TU Dresden, (f) cbing).

men und bei denkmalgeschützten Bauwerken die Veränderung des Erscheinungsbildes verbunden. Durch den Einsatz der nichtmetallischen Bewehrung können die Dicke der Verstärkungsschicht bis auf ca. 10 mm reduziert werden und somit auch Bauwerke und Baukonstruktionen erhalten werden, bei denen das durch die o. g. negativen Nebeneffekte bisher nicht möglich war. Die erhebliche Materialeinsparung von bis zu 80 % und die zeitliche Einsparung von bis zu 50 % (durch schnelle Verlegung der nichtmetallischen Bewehrung) führen oft auch zu einer deutlich wirtschaftlicheren Lösung im Vergleich zur Verstärkung mit Stahlbeton. Die Abb. 1.13 gibt einen Eindruck über die Vielfältigkeit bereits realisierter oder sich in der Ausführung befindlicher Projekte (siehe u. a. [51–57]) und die Abb. 1.14 einen Einblick in die Anwendung.

Neben der klaren Zuordnung zu Neubau oder Sanierung/Verstärkung bzw. der Verwendung metallischer oder nichtmetallischer Bewehrung gibt es auch zahlrei-

14 | 1 Einleitung und Überblick

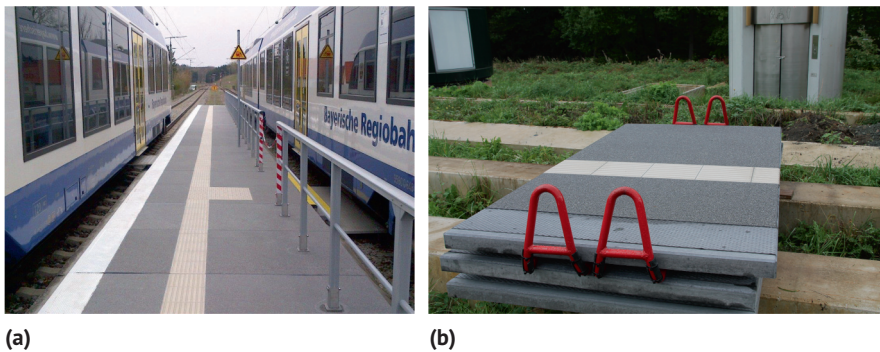


**Abb. 1.14** Verstärkungsarbeiten: (a) Hyparschale in Magdeburg, (b) Bogenbrücke in Naila, (c) Geschossdecke in Prag, (d) Silo in Uelzen, (e) Tonnendach in Zwickau, (f) Autobahnbrücke über die Nidda (Quellen: (a), (f) Amer Suliman; (b) Jörg Singer; (c–e) TU Dresden).

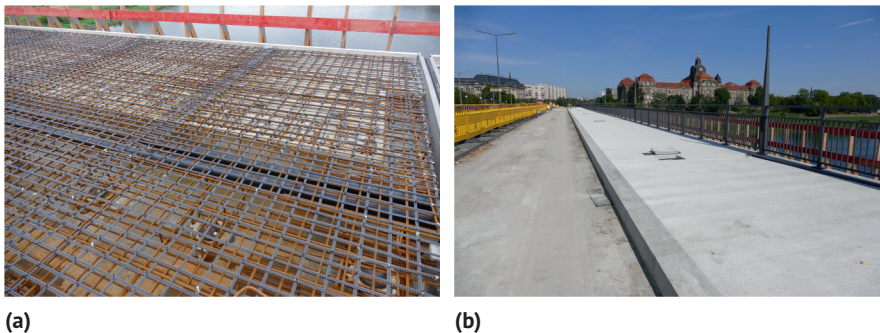
che Hybridanwendungen. Ein Beispiel sind 8 cm dicke, mit Glasfasern bewehrte Betonplatten, die bei der Sanierung von Bahnsteigen zum Einsatz kommen, siehe Abb. 1.15 und [58]. Die großformatigen Platten sind bereits mit allen erforderlichen Markierungen und Leitsystemen versehen und müssen aufgrund der nicht elektrisch leitenden Glasbewehrung nicht geerdet werden. Eine besonders schnelle Verlegung ist möglich, sodass der gleisnahe Gefahrenbereich zügig fertiggestellt und damit Sperrzeiten für die Gleise sowie die damit verbundenen Kosten erheblich reduziert werden können.

Ein weiteres Beispiel sind Kappen, die regulär mit einer Stahlbewehrung versehen sind und in deren Betondeckung zusätzlich Matten aus nichtmetallischer Bewehrung verlegt werden, siehe Abb. 1.16 und [59]. Die oberflächennahen Matten mit geringen Stabquerschnitten und Stababständen minimieren die Rissabstände sowie Rissweiten und erhöhen damit die Dauerhaftigkeit.





**Abb. 1.15** Bahnsteigsystem mit Bewehrung aus Glas: (a) fertiger Bahnsteig, (b) 8 cm dünne Platten (Quelle: Hering Bau GmbH & Co. KG).



**Abb. 1.16** Kappen mit Stahl-, Basalt- und Carbonbewehrung: (a) kombinierte Bewehrung, (b) fertige Kappe (Quelle: C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V., Amer Suliman).

## Literatur

- 1 Jahren, P. (2011). *Concrete – History and Accounts*. Trondheim: Tapirc academic.
- 2 InformationsZentrum Beton GmbH (Hrsg.): *Geschichte des Betons*. <https://www.beton.org/wissen/beton-bautechnik/geschichte-des-betons/>. [Online] [Zugriff am 10.08.2020].
- 3 Hackelsberger, C. (1988). *Beton: Stein der Weisen? Nachdenken über einen Baustoff*. *Bauwelt Fundamente* 79 (Hrsg. U. Conrads). Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn.
- 4 Ramm, W. (2007). Über die faszinierende Geschichte des Betonbaus. In: *Gebaute Visionen. 100 Jahre Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 1907–2007* (Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)), S. 27–130. Berlin, Wien, Zürich: Beuth.
- 5 Lamprecht, H.-O. (1996). *Opus Caementitium. Bautechnik der Römer*. 5. Aufl. Düsseldorf: Beton-Verlag.
- 6 Rienecker, F. und Maier, G. (2006). *Lexikon zur Bibel*. 6. Aufl. Wuppertal: Brockhaus.
- 7 Heinle, E. and Schlaich, J. (1996). *Kuppeln aller Zeiten – aller Kulturen*. Stuttgart: DVA.

16 | 1 Einleitung und Überblick

- 8 Scheerer, S., Schladitz, F. und Curbach, M. (2015). Textile reinforced concrete – From the idea to a high performance material. *Proceedings of the FERRO-11 and 3rd ICTRC in Aachen* (Hrsg. W. Brameshuber), S. 15–33. Bagnoux: Rilem Publications S.A.R.L.
- 9 Mobasher, B. (2012). *Mechanics of Fiber and Textile Reinforced Cement Composites*. Boca Raton: CRC.
- 10 Whitmer, M. (2022) How Were Asbestos and Cement Sheets Used? (Hrsg. W. Pacheco, review J.L. Cook) <https://www.asbestos.com/products/asbestos-sheets/>. [Online] [Zugriff am 10.08.2020].
- 11 Rostásy, F.S., Budelmann, H. und Hankers, C. (1992). Faserverbundwerkstoffe im Stahlbeton- und Spannbetonbau. *Beton- und Stahlbeton*, 87: 123–128.
- 12 Curosu, I. et al. (2017). Tensile behavior of high-strength strain-hardening cement-based composites (HS-SHCC) made with high-performance polyethylene, aramid and PBO fibers. *Cem. Concr. Res.* 98: 71–81.
- 13 Zhou, Y.W. et al. (2018). Mechanical properties of hybrid ultra-high performance engineered cementitious composites incorporating steel and polyethylene fibers. *Materials* 11: 1448.
- 14 Hiao, T.T., Hamstad, M.A. und Jessop, E.S. (1974). Stress-rupture epoxy-coated beryllium wire. *J. Comp. Mater.* 8 (4): 405–410.
- 15 Briggs, A. (1977). Review carbon fibre-reinforced cement. *J. Mater. Sci.* 12: 384–404.
- 16 Rehm, G. und Franke, L. (1974). Kunstharzgebundene Glasfaserstäbe als Bewehrung im Betonbau, Stufe I. *Bautechnik* 1: 115–120.
- 17 Rehm, G., Franke, L. und Patzak, M. (1979). Kunstharzgebundene Glasfaserstäbe als Bewehrung im Betonbau. In: *Schriftenreihe des DAfStb* (Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)). Berlin et al.: Wilhelm Ernst & Sohn, Bd. 304, S. 3–18.
- 18 Springenschmidt, R. und Volkwein, A. (1981). Untersuchung über die Verwendung von Carbonfasern als Bewehrung mineralischer Baustoffe. Abschlußbericht, Az. BI 5-800178-30. TU München: Baustoffinstitut.
- 19 Volkwein, A. (1981). Bewehrung von Naturstein oder Beton mit Kohlenstofffasern. *Proc. der 17. Öffentl. Jahrestagung der AG Verstärkte Kunststoffe e. V. – Int. Tagung über verstärkte Kunststoffe – (Vorabdruck)*, 6.–8.10.1981 in Freudenstadt. Beitrag 18, 5 S.
- 20 Machida, A. et al. (1998). *Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials (Construction)* (Hrsg. JSCE Research Subcommittee on Continuous Fiber Reinforcing Materials), Bd. 31. Concrete Library of JSCE.
- 21 Wulforth, B. et al. (1996). *Verwirkte Verstärkungsgelege für das textile Bauen*. Abschlussbericht AiF-Vorhaben Nr. 9272 B. Institut für Textiltechnik (RWTH Aachen), Institut für Textil- und Bekleidungstechnik (TU Dresden [Anm.: heute Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik ITM]). RWTH Aachen: s.n.
- 22 Offermann, P. et al. (1997). *Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung gewirkter Verstärkungsgelege für den Einsatz in dünnwandigen Formteilen aus mineralischen Baustoffen*. Abschlussbericht AiF-Vorhaben 10378. Inst. f. Bekleidungstechnik (TU Dresden), STFI Chemnitz, Inst. f. Textiltechnik (RWTH Aachen), Inst. f. Tragwerke und Baustoffe (TU Dresden). TU Dresden: s.n.

- 23 Curbach, M. et al. (1998). Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau. In: *Schriftenreihe des DAfStb* (Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)), Bd. 488. Berlin: Beuth.
- 24 Curbach, M. und Ortlepp, R. (Hrsg.) (2011). *Sonderforschungsbereich 528 – Textile Bewehrungen zur bautechnischen Verstärkung und Instandsetzung*. Abschlussbericht (Kurzfassung). TU Dresden: s.n.
- 25 Hegger, J. (Hrsg.) (05/2012). *Sonderforschungsbereich 532 „Textilbewehrter Beton – Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie“*. Abschlussbericht. RWTH Aachen: s.n.
- 26 Curbach, M., Weiland, S. und Jesse, D. (2006). Eine Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton für die Landesgartenschau 2006 in Oschatz. Tagungsband zum 16. Dresdner Brückenbausymposium, (Hrsg. J. Stritzke), S. 143–157. TU Dresden: s.n.
- 27 Curbach, M. et al. (2007). Textilbewehrter Beton zur Verstärkung eines Hyparschalentragwerks in Schweinfurt. *Beton- und Stahlbetonbau*, 102 (6): 353–361.
- 28 TUDALIT e. V. (Hrsg.). Historie. <http://tudalit.de>. [Online] [Zugriff am 14.10.2022].
- 29 Z-31.10-182. Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit TUDALIT (Textilbewehrter Beton). Erstzulassung: 06.06.2014, seither div. Neu- und Verlängerungsbescheide, aktuell gültig bis 01.06.2026 unter dem Namen „CARBOrefit®-Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton“.
- 30 div. (2015). *Verstärken mit Textilbeton*. Beton- und Stahlbetonbau, Bd. 110.
- 31 Gärtner, C. <https://www.bauen-neu-denken.de/c2b3-carbon-concrete-composite-und-tudalit-e-v-fusionieren-zum-weltweit-groessten-industrie-und-forschungsverband-fuer-carbonbeton>. [Online] [Zugriff am 08.04.2021].
- 32 Canadian Standards Association (CSA) (Hrsg.) (05/2002). CSA-S806-2: Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. Toronto, Ontario, Kanada: s.n.
- 33 American Concrete Institute (ACI) (Hrsg.) (2003). ACI 440.1R-03: Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars. Farmington Hills (Michigan, USA): s.n.
- 34 Brameshuber, W. (Hrsg.) (2006). Textile Reinforced Concrete – State-of-the-Art-Report of RILEM TC 201-TRC: Textile Reinforced Concrete. *RILEM Report*. Bd. 36, Rilem Publications S.A.R.L.
- 35 Grace, N.F. et al. (2002). Design-construction of bridge street bridge – First CFRP bridge in the United States. *PCI J.* 47 (5): 20–35.
- 36 Triantafillou, T.C. (Hrsg.) (2016). *Textile Fibre Composites in Civil Engineering*. s. l.: Woodhead Publ.
- 37 Peled, A., Bentur, A. und Mobasher, B. (2019). *Textile Reinforced Concrete*. s. l.: Taylor & Francis.
- 38 [www.bauen-neu-denken.de](http://www.bauen-neu-denken.de). [Online] [Zugriff am 11.08.2020].
- 39 Lieboldt, M., Tietze, M. und Schladitz, F. (2018). C<sup>3</sup>-Projekt – Erfolgreiche Partnerschaft für Innovation im Bauwesen. *Bauingenieur* 93: 265–273.
- 40 solidian GmbH (2021). Technische Datenblätter zur Bewehrung aus Carbon, Glas und Basalt [online]. Albstadt. <https://solidian.com/de/downloads-de/> [Zugriff am 15.10.2022].
- 41 Kulas, C. (2013). Zum Tragverhalten getränkter textiler Bewehrungselemente für Betonbauteile. Dissertation. RWTH Aachen.

18 | 1 Einleitung und Überblick

- 42 Sydow, A., Kurath, J. and Steiner, P. (2019). Extrem leichte Brücke aus vorgespanntem Carbonbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 114: 869–876, <https://doi.org/10.1002/best.201800108>.
- 43 Schlaich, M., Apitz, A. and Jesse, F. (2020). Brücken aus vorgespanntem Carbonbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 115 (9): 684–696, <https://doi.org/10.1002/best.202000018>.
- 44 Priebe, G. (2019). Auf dem Weg zur futuristischen Villa aus Carbonbeton. Magazin Nr. 21 zur 11. Anwendertagung Textilbeton (Hrsg. TUDALIT e. V.). Dresden, 24./25. Sept. 2019, S. 1. URL: <http://tudalit.de/wp-content/uploads/2019/10/TUDALIT21.pdf>.
- 45 Seitz, P. (2018). HiLo – Beton in neuer Schale. Experiment für das Empa NEST. *Schweiz. Bauz. Tec* 21, 144 (10/11): S. 20–25.
- 46 Rempel, S., Will, N. und Hegger, J. (2017). Erste Straßenbrücke aus Carbonbeton. Magazin Nr. 17 zu den 9. Carbon- und Textilbetontagen (Hrsg. TUDALIT e. V.). Dresden, 25./26. Sept. 2017, S. 32. URL: <http://tudalit.de/wp-content/uploads/2018/12/TUDALIT17.pdf>.
- 47 Heppes, O. (2021). Von der Idee zur abZ am Beispiel der GOBACAR<sup>®</sup>-Deckenplatte. Tagungsband der 13. Carbon- und Textilbetontage (C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite e. V.). Dresden, 29./30. Sept. 2021, S. 34–35.
- 48 Curbach, M., Graf, W., Jesse, D., Sickert, J.-U. und Weiland, S. (2007). Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton: Konstruktion, Fertigung, numerische Berechnung. *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (6): 342–352, <https://doi.org/10.1002/best.200700550>.
- 49 Hegger, J., Goralski, C. und Kulas, C. (2011). Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton: Sechsfeldrige Fußgängerbrücke mit einer Gesamtlänge von 97 m. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2): 64–71, <https://doi.org/10.1002/best.201000081>.
- 50 Wirtgen, D. und Kulas, C. (2018). Textilsandwichbau – Eastsite XI\_Mannheim. In: *Beton Bauteile 2019 – Entwerfen Planen Ausführen*, Bauverlag BV GmbH, S. 82–87.
- 51 Hentschel, M., Schumann, A., Ulrich, H. und Jentzsch, S. (2019). Sanierung der Hyparschale Magdeburg. *Bautechnik* 96 (1): 25–30.
- 52 Al-Jamous, A. und Uhlig, K. (2017). Sanierung der historischen Betonbogenbrücke in Naila. Tagungsband zum 27. Dresdner Brückenbausymposium – Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken (Hrsg. M. Curbach), Dresden, 13./14. März 2017, S. 71–80.
- 53 Erhard, E., Weiland, S., Lorenz, E., Schladitz, F., Beckmann, B. und Curbach, M. (2015). Anwendungsbeispiele für Textilbetonverstärkung: Instandsetzung und Verstärkung bestehender Tragwerke mit Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (S1): 74–82, <https://doi.org/10.1002/best.201400124>.
- 54 Weiland, S. (2015). Erfolgreich saniert – Nach Brand im Zuckersilo Uelzen. Magazin Nr. 13 zur 7. Anwendertagung Textilbeton (Hrsg. TUDALIT e. V.). Dresden, 22./23. Sept. 2015, S. 1. URL: <http://tudalit.de/wp-content/uploads/2016/02/TUDALIT13.pdf>.
- 55 Schladitz, F., Lorenz, E., Jesse, F. und Curbach, M. (2009). Verstärkung einer denkmalgeschützten Tonnenschale mit Textilbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (7): 432–437, <https://doi.org/10.1002/best.200908241>.
- 56 Steinbock, O., Pelke, E. und Ost, O. (2021). Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken – Teil 1: Grundlagen und Hintergründe zum Pilotprojekt

- „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“. *Beton- und Stahlbetonbau* 116 (2): 101–108, <https://doi.org/10.1002/best.202000094>.
- 57** Steinbock, O., Teworte, F. und Neis, B. (2021). Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken – Teil 3: Planung und Umsetzung der Verstärkungsmaßnahme mit Carbonbeton am Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“. *Beton- und Stahlbetonbau* 116 (2): 118–126, <https://doi.org/10.1002/best.202000107>.
- 58** Hering Bau GmbH & Co. KG (2018). Modular einsetzbares Bahnsteigsystem – modula flex von Hering-Bau ermöglicht wirtschaftliche Sanierungen. Magazin Nr. 18, S. 1, (Hrsg. TUDALIT e.V. URL: <http://tudalit.de/wp-content/uploads/2018/02/TUDALIT-Heft18.pdf>).
- 59** Michler, H., Burgard, S., Kalbe, H. und Curbach, M. (2021). Nichtmetallische Bewehrung im Großbrückenbau – Kappenverbreiterung Carolabrücke Dresden. Tagungsband zum 30. Dresdner Brückenbausymposium – Ergänzungsband 2021 – Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken (Hrsg. M. Curbach), Dresden, 8./9. März 2021, S. 63–76.
- 60** Curbach, M. et al. (1998). Sachstandbericht zum Einsatz von Textilien im Massivbau. In: *Schriftenreihe des DAfStb* (Hrsg. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb)), Bd. 488. Berlin: Beuth.
- 61** Steinbock, O., Bösche, T. und Schumann, A. (2021). Carbonbeton – Eine neue Verstärkungsmethode für Massivbrücken – Teil 2: Carbonbeton im Brückenbau und Informationen zur Zustimmung im Einzelfall für das Pilotprojekt „Brücken über die Nidda im Zuge der BAB A 648“. *Beton- und Stahlbetonbau* 116 (2): 109–117, <https://doi.org/10.1002/best.202000106>.

