

CPC-Technologie – Elemente aus vorgespanntem Carbonbeton

Simon Liebl

Holcim Deutschland GmbH, Hamburg, Deutschland

CPC steht für Carbon Prestressed Concrete. Inhaltlich aber steht CPC für ressourcenschonende und klimafreundliche Betonbauteile. Denn statt wie gewöhnlich mit Stahl wird der Beton von CPC-Elementen ausschließlich mit vorgespannten Carbonfasern bewehrt, wodurch sehr schlanke Bauteile realisiert werden können. Der Ersatz der Stahlbewehrung im Beton durch Carbon wird seit vielen Jahren erforscht. Entwicklungen mit schlaff eingelegten Fasern, Netzen oder Stäben aus Carbon und Glas erfahren unter dem Namen Textilbeton oder Carbonbeton reges Interesse und es konnten bereits bei einigen Brückenbauwerken Erfahrungen gesammelt werden. CPC-Betonelemente basieren auf der «carbon prestressed concrete»-Technologie, die aus einem langjährigen Forschungsprojekt der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Winterthur (ZHAW) und Industriepartnern, wie der Silidur AG, Andelfingen, hervorging. Seit November 2021 verfügen die CPC-Betonelemente über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt): abZ Nr. Z-71.3-42 [1]. Die Großplatten werden seit Sommer 2022 in einem Betonfertigteilwerk der Holcim (Deutschland) GmbH produziert. In der Zulassung ist eine komplette statische Bemessung der CPC-Betonplatten enthalten. Damit lassen sich verschiedene Bauteile, wie Treppenstufen, Beläge, Balkonplatten und Außenwandbekleidungen individuell bemessen.

1 Einleitung

Die hervorragenden technischen Eigenschaften der Carbonbewehrung können im Verbund mit Beton erst dann ausgeschöpft werden, wenn die Bewehrung vorgespannt eingesetzt wird. Dies reduziert den Carbonverbrauch deutlich, was insbesondere im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Betonprodukte und den Ressourcenverbrauch relevant ist. Aus dieser Erfahrung hat die Fachgruppe Faserverbundkunststoffe der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW gemeinsam mit der Silidur AG ein sehr leistungsfähiges, dünnes Betonelement entwickelt, welches ausschließlich mit vorgespanntem Carbon bewehrt ist.

2 Die Herstellung der CPC Elemente

Die CPC-Großplatten werden seit Sommer 2022 in einem dafür umgebauten

Betonfertigteilwerk der Holcim (Deutschland) GmbH, in Deutschland produziert. Die Elemente werden in Dicken zwischen 20 mm und 70 mm hergestellt. Die Carbonbewehrung besteht aus Carbonrovings, welche mit einer Matrix getränkt sind. Die Carbonrovings sind vollständig gestreckt und orthogonal über die gesamte Platte mit einem konstanten Bewehrungsgehalt je Richtung angeordnet. Die sich kreuzenden Bewehrungslagen dürfen sich berühren. Der Achsabstand der Carbonrovings in einer Lage beträgt im Mittel 15 mm. Der Achsabstand des äußeren Carbonrovings zum Außenrand beträgt ≥ 5 mm. Es sind je x- und y-Richtung ein bis vier Lagen Carbonbewehrung orthogonal zueinander angeordnet, die stets eine zentrische Vorspannung in beide Richtungen erzeugen. Bezogen auf den Plattenquerschnitt beträgt die Gesamtvorspannung pro Richtung $\geq 1 \text{ N/mm}^2$ bzw. $\leq 5 \text{ N/mm}^2$. Pro Richtung ist die Vorspannung der Carbonrovings konstant.

Die Vorspannung vor dem Ablassen beträgt 2000 MPa (+/-5 %), die planmäßige elastische Vordehnung der Rovings zum Zeitpunkt der Vorspannung entspricht 8,7 ‰ (Toleranzbereich 8,3 ... 9,1 ‰). Die Mindestbetondeckung zur Verbundsicherung $c_{\min}$ beträgt 5 mm.

Die CPC-Großplatten sind mit den Materialien Carbonbewehrung, Vergussbeton oder selbstverdichtendem Beton nach den beim DIBt hinterlegten verfahrenstechnischen Parametern des Herstellungsprozesses in dem beim DIBt hinterlegten Herstellwerk zu fertigen. Die Fertigungsgröße der CPC-Großplatte liegt bei max. 65 x 10 m und die Herstellung der CPC-Großplatten darf den Grundsätzen der Herstellung und Verwendung von Vergussbeton nach der DAfStb-Richtlinie "Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel", Fassung Juli 2019 [2] nicht widersprechen.

Die CPC-Maßplatten sind aus den CPC-Großplatten mit festbetonbearbeitenden, erschütterungsarmen Verfahren, die auf Schneiden, Fräsen, Bohren (kein Schlagbohren), Schleifen, Sägen, Bürsten und Strahlen basieren, zu fertigen.



Abbildung 1 CPC Maßplatte in 3,5 x 17 m, Quelle Holcim (Deutschland) GmbH

Klopfende Verfahren, die zum Beispiel auf Stocken, Meißeln und Hämmern basieren, dürfen nicht angewendet werden. Wenn die Bewehrungsrichtung der CPC-Großplatten oder Anschnitte von CPC-Großplatten nicht sicher festgestellt werden kann und die Kennzeichnung unvollständig ist, dürfen diese

für die Fertigung der CPC-Maßplatten nicht verwendet werden. Bei der Herstellung von Oberflächenprofilierungen sind die Vorgaben des Herstellers der CPC-Großplatten zu beachten.

Die Herstellverfahren müssen mechanisch und erschütterungsarm sein. Öffnungen in den CPC-Maßplatten sind mittels mechanischer, erschütterungsarmer Verfahren herzustellen.



Abbildung 2 Ausfräsung in einer CPC Maßplatte, Quelle Holcim (Deutschland) GmbH

2.1 Materialkennwerte

Ein einzelner, ca. 1,0 mm dünner, Carbonroving besteht aus mehreren tausend Carbonfasern, die mit einer Matrix getränkt sind. Das linear-elastische Materialverhalten der Carbonbewehrung ist durch die in Abbildung 3 dargestellte Spannungs-/Dehnungs-Linie charakterisiert.

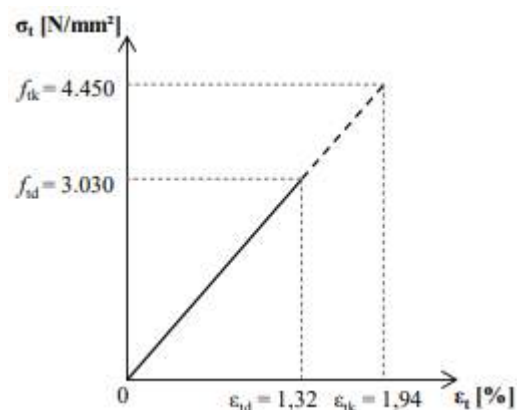


Abbildung 3 Spannungs-Dehnungslinie gemäß der Zulassung [1]

Die wichtigsten Materialkennwerte der Bewehrung sind in der nachfolgenden Tabelle aufgelistet.

Tabelle 1 Materialkennwerte der Bewehrung gemäß der Zulassung [1]

Nettoquerschnittsfläche eines Carbonrovings	$A_t = 0,445 \text{ mm}^2$
charakteristische Zugfestigkeit eines Carbonrovings	$f_{tk} = 4.450 \text{ N/mm}^2$
Teilsicherheitsfaktor Carbonbewehrung	$\gamma_t = 1,25$
Dauerstandfaktor	$\alpha_t = 0,85$
Bemessungswert der Zugfestigkeit	$f_{td,100a} = 3.030 \text{ N/mm}^2$
Elastizitätsmodul	$E_{t0m} = 230.000 \text{ N/mm}^2$
Charakteristische Dehnung	$\epsilon_{tk0} = 1,94 \%$
Dehnung bei Erreichen der Bemessungszugfestigkeit	$\epsilon_{td} = 1,32 \%$
Spannung im Roving zum Zeitpunkt $t = 0$ nach Absetzen der Vorspannkraft	$\sigma_{p0m} = 2.000 \text{ N/mm}^2$

Der anrechenbare Wert der Vorspannkraft für die Bemessung unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Spannkraftverluste beträgt:

$$\sigma_{p0,100a,fav} = 1.800 \text{ N/mm}^2 \text{ (günstig wirkend)}$$

$$\sigma_{p0,100a,unfav} = 2.100 \text{ N/mm}^2 \text{ (ungünstig wirkend)}$$

Der verwendete selbstverdichtende Beton weist ein Größtkorn von 5 mm auf. Die wichtigsten Materialeigenschaften des Betons sind in der nachfolgenden Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2 Materialeigenschaften des Betons gemäß der Zulassung [1]

Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit	$f_{ck} = 80 \text{ N/mm}^2$
Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit	$5,2 \text{ N/mm}^2$
Elastizitätsmodul	43.000 N/mm^2
Dehnung beim Höchstwert der Betondruckspannung	$0,35 \%$

Die Bauteile aus den CPC Elementen dürfen im Innen- und Außenbereich in den Expositionsklassen X0, XC1 bis XC4 sowie XF4, XD3, XS3 sowie XM2 ausgeführt werden.

Der mit Carbon-Rovings bewehrte selbstverdichtende Beton erfüllt bei Einhaltung der Anforderungen an die Ausführung der Carbonbewehrung die Anforderungen an das Brandverhalten von Baustoffen der Baustoffklasse A2 nach DIN 4102 [3] (nicht brennbar).

2.2 Bemessung

Zurzeit liegt das Einsatzgebiet der CPC-Platten hauptsächlich bei sekundären Tragelementen. Bohlenbeläge bei Steganlagen oder Brücken, Balkonplatten und Treppentritte werden daraus gefertigt. Es gibt aber auch aktuelle Projekte, wo Decken- bzw. Dachkonstruktionen und Fassadenelemente aus 4 bzw. 7 cm dünnen CPC-Elementen zum Einsatz kommen.

Die rechnerischen Nachweise werden unter der Annahme des Ebenbleibens der Querschnitte (Bernoulli-Hypothese) geführt. Generell sind statische Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT) und der Gebrauchstauglichkeit (GZG) zu führen. Im GZT ist neben der Biege- und Querkrafttragfähigkeit eine ausreichende Verankerungslänge nachzuweisen. Unter Gebrauchslasten sind verschiedene Spannungsnachweise zu erbringen. Hierzu zählen die Rissfreiheit der Platte, der Dekompressionsnachweis sowie die

Begrenzung der Betondruckspannungen und der Rovingzugfestigkeit. Ein Nachweis der Rissbreite ist aufgrund der geführten Spannungsnachweise nicht erforderlich. Für den Durchbiegungsnachweis darf ein ungerissener Zustand zugrunde gelegt werden. In vielen Fällen wird der Nachweis der Rissfreiheit maßgebend für die Bemessung. Sofern größere Durchbrüche oder Öffnungen in der Platte vorhanden sind, sind diese statisch nachzuweisen.

3 Beispiele aus der Praxis

3.1 Modulbrücken aus Carbonbeton

Seit mittlerweile über zwei Jahrzehnten forscht die Fachgruppe Faserverbundkonstruktionen der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften ZHAW an Komposit-, Carbon- und Naturfaserbaustoffen. Davon ausgehend hat sie zusammen mit Industriepartnern in den letzten gut zehn Jahren über 170 Projekte mit CPC umgesetzt. Ergebnis einer Forschungsarbeit der ZHAW ist auch eine patentierte multifunktionale Kappa-Verbindung, die ausschließlich aus CPC-Elementen und hochfestem Mörtel besteht. Diese innovative Keilverbindung gewährleistet nicht nur eine stabile und dauerhafte Verbindung zwischen den Platten, sondern bewahrt auch alle positiven Eigenschaften des CPC-Materials. Durch mehrere Bauteilversuche und den Bau von Prototypen konnte eindeutig nachgewiesen werden, dass diese Verbindungsmethode erfolgreich ist und die Verbindung stärker ist als das Grundmaterial.

Ein herausragendes Beispiel für die Größe und Leistungsfähigkeit der CPC-Elemente ist die eigens für einen Großversuch konzipierte Fußgänger- und Radwegbrücke „Optima“ hergestellt und auf Querkraft und Biegung geprüft worden. Dabei konnte die vorab ermittelte Tragfähigkeit der Brücke im Versuch bestätigt werden. Mit einer Länge von 17 Metern, einer Breite von knapp 3,0 Metern (mit einer lichten Weite von 2,5 Metern) und lediglich 7,0 Zentimetern Bauteilstärke

demonstriert sie eindrucksvoll das enorme Potenzial dieser fortschrittlichen Bauweise.



Abbildung 4 CPC Trogbrücke „Optima“ 17x3m unter Belastung, Quelle Holcim (Deutschland) GmbH

Die Brückenplatte wurde in einem Stück mit den Maßen 17×3 Meter mit allen Aussparungen für die Kappa-Verbindung gefertigt. Die Brüstungselemente (vertikale Bauteile) bestehen je Seite aus einem Druckgurt mit unten angeordneten Zapfen, welche in die entsprechenden Aussparungen der Brückenplatte eingeführt und sorgfältig ausgerichtet wurden.



Abbildung 5 CPC Steg Kappa Verbindung, Quelle CPC AG



Abbildung 6 CPC Brückenplatte, Quelle CPC AG

Im letzten Arbeitsschritt konnten die so entstandenen Verbindungen mit einem hochfesten, ermüdungsbeständigen und selbstverdichtenden Mörtel verfüllt werden.



Abbildung 7 Vermörtelung der Stege mit der Brückenplatte, Quelle CPC AG

Die Verbindungselemente spielen eine entscheidende Rolle bei der Stabilität und Festigkeit der Brücke. Erst durch die Verbindung zwischen Brückenplatte und Steg entsteht die Wirkung einer sogenannten Trogbrücke, an der die Brückenplatte die aus dem globalen Moment entstehenden Zugkräfte übernimmt und die Brüstungen die Druckkräfte. Zusätzlich fungiert die Brüstung als Geländer. Dieses kann, abhängig von der Dimension der Brücke, von 30 cm bis zu einer Höhe von 1,3m ausgeführt werden und ist ohne Öffnungen ideal als Radwegbrücke, da sich das Fahrrad nicht im Geländer verhaken kann. Eine bemerkenswerte Eigenschaft dieser Brücke ist, dass sie vollständig ohne den Einsatz von Stahl realisiert wurde. Dies bietet

einen erheblichen Vorteil in Bezug auf den Unterhalt des Bauwerks, da Korrosion und Abplatzungen vermieden werden können. Darüber hinaus erfordert die Brückenoberfläche keine zusätzliche Abdichtung, was zu einer Reduzierung der Wartungskosten führt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Rutschfestigkeit der Brückenoberfläche, die mit einem R13-Wert bewertet wurde. Diese hohe Rutschfestigkeit gewährleistet die Sicherheit von Fußgängern und Fahrrädern, insbesondere unter schwierigen Witterungsbedingungen.

Überzeugende Argumente für diese Brücke sind der geringe Ressourcenverbrauch und der minimale CO₂-Fußabdruck, die im Vergleich zu konventionellen Brücken deutlich niedriger sind. Darüber hinaus benötigt sie lediglich etwa 30 Prozent der Ressourcen einer Stahlbetonbrücke und weist eine fünfmal höhere Lebenserwartung als eine Holzbrücke auf. Der Einsatz des richtigen Bausystems spielt eine entscheidende Rolle bei der Schonung der Umwelt. Die Wahl dieser CPC-Brücke trägt somit maßgeblich zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen und zum sparsamen Umgang mit natürlichen Ressourcen bei. Durch die Kombination von Langlebigkeit, geringem Wartungsaufwand und einem umweltfreundlichen Herstellungsprozess setzt diese Brücke einen wichtigen Maßstab für nachhaltige Infrastrukturprojekte.

In der größten Abmessung 17 x 3m sind auch Unterhaltsfahrzeuge von 8,5 Tonnen möglich. Mit diesen hohen Punktlasten kann die schlanke Brücke problemlos umgehen. Neben dem Unterhaltsfahrzeug ist die Brücke auch für Menschenansammlungen ausgelegt.

Die Brücke, die ein Eigengewicht von unter 14 Tonnen aufweist, ist in der Lage, eine Last von über 17 Tonnen zu tragen. Im Vergleich dazu wäre eine Stahlbetonbrücke ca. 47,5 Tonnen schwer.

3.2 Brückenbeläge mit 4 Zentimeter dünnem CPC-Elementen

Neben Modulbrücken werden im Neubau und in der Instandsetzung von Fuß- und Radwegbrücken die 4cm dünnen CPC-Beläge verwendet.

Die Tragstruktur wird bei der Sanierung in der Regel erhalten und die CPC-Beläge tragen die Verkehrslasten in die Unterkonstruktion ein. Zusätzlich schützen CPC-Elemente die witterungsempfindliche Tragstrukturen, wie z. B. Holzbalken oder Stahlkonstruktionen, vor Nässe und gewährleisten so einen dauerhaften Schutz über 100 Jahre.



Abbildung 8 Brückensanierung Nadamer Bach, Essen, Quelle Holcim (Deutschland) GmbH



Abbildung 9 Sanierung Steg, Mercedes-Benz, Bremen, Quelle Holcim (Deutschland) GmbH

3.3 Balkone mit 4 Zentimeter dünnem CPC-Belag

In Zeiten steigender Urbanisierung und dichter Bebauung gewinnen Balkone zunehmend an Bedeutung als Oasen der Erholung und als wertvoller Wohnraum. Mit der Einführung von Carbonbeton in der Bauindustrie erleben Balkone eine technologische Revolution, die ihre Funktionalität und Langlebigkeit erheblich verbessert. Besonders hervorzuheben sind die vorgeständerten Balkone mit den 4 cm dünnen Belägen aus CPC, die neue Maßstäbe in Design und Nachhaltigkeit setzen.

Die CPC-Beläge sind nicht nur leichter und langlebiger, sondern auch umweltfreundlicher. Sie ermöglichen eine filigranere Bauweise, die insbesondere bei Balkonen für mehr Designfreiheit und ästhetische Eleganz sorgt.

Vorgeständerte Balkone, die mit 4 cm dünnen Belägen aus CPC ausgestattet sind, bieten eine Reihe von Vorteilen:

1. Gewichtsreduktion

Dank der geringen Dicke und der generellen Leichtigkeit von CPC-Elementen sind diese Balkone erheblich leichter als herkömmliche Konstruktionen, was die Belastung der Gebäudestruktur minimiert.

2. Ästhetik und Design

Die schlanken Beläge ermöglichen eine elegante und moderne Optik, die herkömmliche Balkone in den Schatten stellt. Diese Bauweise eröffnet Architekten neue gestalterische Freiheiten, alle Formen sind möglich.

3. Langlebigkeit und Wartungsarmut

Die CPC-Elemente und -Beläge sind korrosionsbeständig und äußerst langlebig, was die Lebensdauer der gesamten Balkone verlängert und die Wartungskosten reduziert.

4. Umweltfreundlichkeit

Die Herstellung von Carbonbeton erfordert weniger Ressourcen und Energie, was zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen führt.

Ein herausragendes Beispiel für die Nutzung von aufgeständerten Balkonen mit CPC Betonbelägen ist das Projekt Widumstraße in Zürich.



Abbildung 10 Balkonturm Zürich, Quelle CPC

Hier wurden alle alten und sehr kleinen Balkone erneuert und vergrößert. Auf die neue Stahlkonstruktion wurden bis zu 2,95m x 4,40 m große und 4 cm dünne CPC-Beläge gelegt, was nicht nur die Ästhetik der Gebäude verbessert, sondern auch die Wohnqualität durch größere Balkone und dementsprechend mehr Wohnraum.

Die 4 cm dünnen CPC-Elemente wurden werkseitig mit einer rutschhemmenden R 12 Oberfläche hergestellt und passgenau auf die Baustelle geliefert. Dabei überbrücken die CPC-Elemente fugenlos den schmalen Teil der alten Balkone und dienen zur Erweiterung der Balkonflächen.



Abbildung 11 Balkonturm Zürich, Quelle CPC AG

Die Bewohner schätzen die modernen, langlebigen Balkone, die durch ihre schlanke Bauweise mehr nutzbaren Raum bieten. Die Integration von CPC-Balkonbelägen in den Balkonbau ist ein bedeutender Schritt hin zu nachhaltigeren und langlebigeren Bauwerken. Angesichts der vielen Vorteile, die dieses Material bietet, ist zu erwarten, dass es in den kommenden Jahren eine immer größere Rolle in der Bauindustrie spielen wird. Dies eröffnet neue Möglichkeiten für die Gestaltung und Nutzung von Balkonen in städtischen Wohnräumen.

Auch im Neubau eignen sich die dünnen CPC-Beläge für nachhaltiges und barrierefreies Bauen. Insbesondere bei nachhaltigen Holz-Hybridbauten werden vorgeständerte Balkone verwendet. Beim Bauvorhaben „UBS4“ der Fa. Blu by AUG-PRIEN GmbH in Norderstedt wurden 71 Balkone mit CPC-Elementen errichtet.



Abbildung 12 Balkone Bauvorhaben „UBS4“ Norderstedt, Quelle Holcim (Deutschland) GmbH



Abbildung 13 Barrierefreier Übergang beim Bauvorhaben „UBS4“, Quelle Holcim (Deutschland) GmbH

4 Ausblick

Die Grundidee der CPC-Bauweise ist, industriell hochwertige Elemente zu produzieren, diese zu Bauteilen weiterzuverarbeiten und daraus große Bauwerksteile zu fertigen.

Dadurch können z.B. große Mengen an Stahlbeton reduziert werden und durch die nichtrostende Carbonbewehrung können die CPC-Bauteile deutlich länger genutzt werden. Des Weiteren ist der Zeitraum von der Bestellung bis Montage der CPC-Elemente dank der modularen und seriellen Vorfertigung enorm kurz. Durch die Materialersparnis kann zudem die CO₂- und Massenbilanz von Gebäuden massiv reduzieren. Der Stahl- und der Holzbau haben das serielle Bauen vorgemacht. Mit der neuen CPC-Betonbauweise ist das für den Betonbau heute auch möglich.

5 Literatur

- [1] Carbonbewehrte, vorgespannte CPC-Platten aus Vergussbeton oder selbstverdichtendem Beton, Deutsches Institut für Bautechnik, allgemeine bauaufsichtliche Zulassung / allgemeine Bauartgenehmigung Z-71.3-42
- [2] DAfStb-Richtlinie "Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel", Fassung Juli 2019
- [3] Brandverhalten von Baustoffen nach DIN 4102