

Trag- und Verformungsverhalten von CPC-Platten unter vorwiegenden Biegebeanspruchungen

Vorgespannte Carbonbetonplatten (CPC – Carbon Prestressed Concrete) mit einer Dicke zwischen 20 und 69 mm sind ein innovatives Produkt, dessen Anwendung zur deutlichen Reduzierung des Bauwerkseigengewichts führt. In der Schweiz wird die CPC-Technologie seit ca. zehn Jahren für unterschiedliche Nutzungszwecke verwendet. In Deutschland wird die Anwendung von CPC-Platten mit der Zulassung Z-71.3-42 geregelt und die ersten CPC-Projekte konnten auch hier erfolgreich abgeschlossen werden. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass die Ermittlung der Biegetragfähigkeit von CPC-Platten anlog den mechanischen Zusammenhängen im Spannbetonbau erfolgen kann. Die Bedeutung der Dekompression ist jedoch nicht vergleichbar. Über die Ermittlung der Spannungszunahme in der Carbonbewehrung und der Reduzierung der Steifigkeit nach der Rissbildung kann darüber hinaus gezeigt werden, dass die Ankündigung des Versagens trotz fehlender plastischer Verformung der Bewehrung gegeben ist. Basierend auf der Analyse der Zusammenhänge wird ein Vorschlag zur besseren Ausnutzung der Tragkapazität der CPC-Platten in der Bemessung angeregt.

Stichworte Carbonbewehrung; Biegetragfähigkeit; Rissbildung; Steifigkeit; Versagensankündigung; Verformungszunahme; Vergussbeton; Selbstverdichtender Beton

Bearing and deformation behavior of carbon prestressing concrete slabs (CPC) under bending

Carbon prestressed concrete slabs (CPC) with thickness between 20 and 69 mm are an innovative product which leads to significant reduction of construction own weight in usage. In Switzerland CPC-technology is used at different purpose of use for over 10 years. In Germany the usage of CPC slabs is regulated through permit Z-71.3-42 and first CPC-projects are completed successfully. This paper will show that bending load capacity determination of CPC slabs can occur analogue the mechanical correlation with prestressed concrete. The meaning of the decompression is however not comparable. Through the stress increase determination in carbon reinforcement and the reduction of stiffness after cracking can be shown over and beyond that failure announcement is given despite lack of reinforcement plastic deformation capacity. Based on correlation analysis a proposal for better exploitation of CPC slab design capacity will be encouraged.

Keywords announcement of failure; bending capacity; carbon reinforcement; cracking; grouting concrete; self-compacting concrete; stiffness

1 Einleitung

CPC ist die Abkürzung für das innovative Produkt „Carbon Prestressed Concrete“, das von der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften Winterthur in Zusammenarbeit mit der CPC AG und der Silidur AG entwickelt wurde und seit mehr als zehn Jahren in der Schweiz erfolgreich zur Anwendung kommt. Es handelt sich hierbei um zwischen 20 und 69 mm dicke Platten aus hochfestem Vergussbeton oder selbstverdichtendem Beton. Die Platten werden in beiden Richtungen mit einer Carbonbewehrung zentrisch im sofortigen Verbund vorgespannt. Die Hauptanwendungsgebiete sind bisher Balkonplatten und Beläge für Fuß- und Radwegbrücken. Durch das Zusammenstecken der Platten können jedoch auch Bauteile mit hoher Steifigkeit und Tragfähigkeit konstruiert werden, wie die neulich in [1] vorgestellte Optima Brücke zeigt. In Deutschland steht die Anwendung von CPC-Platten erst am Anfang. Wie die DAfStb-Richtlinie für nichtmetallische Bewehrung [2] für eine breite Anwendung von Textilbeton kann mit der vom Deutschen Institut für Bautechnik genehmigten Zulassung Z-71.3-42 [3] die Planungssicherheit für dieses innovative Produkt erzielt werden. Zusätzliche

Hinweise für die Bemessung für CPC-Platten können z. B. [4] entnommen werden.

Durch die geringe Plattendicke, gepaart mit einem sehr kleinen Bewehrungsgrad (gesamte Carbon-Nettofläche bezogen auf die gesamte Querschnittsfläche $< 0,15\%$), ist die Biegetragfähigkeit in den meisten Anwendungsfällen maßgebend für die Bemessung. Im gerissenen Zustand nimmt die Steifigkeit um mehr als 90 % der Steifigkeit des Zustands I ab, sodass die Anforderung bezüglich der Durchbiegungsbegrenzung ($l/250$ bzw. $l/500$) i. d. R. nur durch ein Vermeiden der Rissbildung im Gebrauchszustand erfüllt werden kann. Die Festlegungen zur Ermittlung des Bemessungswerts des Biegewiderstands und zum Nachweis der Dekompression beeinflussen somit die Wirtschaftlichkeit der CPC-Anwendung sehr deutlich.

Im Rahmen des Zulassungsverfahrens wurden in Abstimmung mit dem Deutschen Institut für Bautechnik zahlreiche Biegeversuche durchgeführt. Die Nachrechnung der Versuche zeigt, dass das Biegetragverhalten von CPC-Platten mit den bekannten mechanischen Zusammenhängen des Spannbetonbaus ausreichend genau beschrieben werden kann. In diesem Beitrag werden die

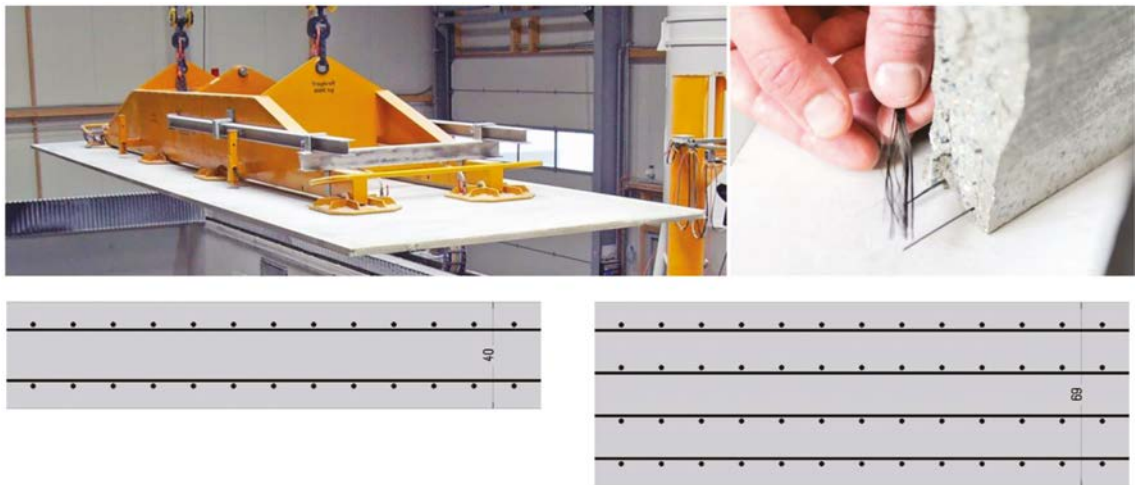


Bild 1 Querschnitt der CPC-Platten mit Bewehrungsbelegung, beispielhaft für die Dicken 40 und 69 mm
Cross section of CPC Slabs with reinforcement assignment, exemplary for thicknes of 40 and 69 mm

Biegeversuche und theoretische Überlegungen für die Erstellung der Bemessungsregel in der Zulassung Z-71.3-42 [3] zusammenfassend dargestellt und diskutiert, um zu verdeutlichen, dass die Festlegungen in der Zulassung sehr auf der sicheren Seite liegen.

2 Kurze Beschreibung der CPC-Platten

Die CPC-Platten werden mit einer Abmessung von bis zu 3,5 m × 17 m ausgeliefert. Derzeit werden vorzugweise Platten mit einer Dicke von 40 mm bzw. 69 mm hergestellt. Die Platten werden mit Carbondrähten (Carbonbewehrung, bestehend aus nicht rezyklierten Carbonrovings, welche mit einem Harzsystem, einer Matrix, getränkt sind, vgl. Zulassung [3]), mit einem Nenndurchmesser von nur 1 mm vorgespannt, wobei der Carbon-Nettoquerschnitt je Draht 0,445 mm² beträgt. Der Abstand zwischen den einzelnen Drähten in der gleicher Bewehrungslage beträgt 15 mm. Bei 40 mm dicken Platten werden i. d. R. zwei Bewehrungslagen je Richtung angeordnet, bei 69 mm dicken Platten sind es vier Bewehrungslagen je Richtung. Die einzelnen Bewehrungslagen werden so angeordnet, dass die beiden Richtungen etwa die gleiche Biegetragfähigkeit aufweisen. Die Carbonbewehrung wurde mit einer Spannung von ca. 2000 MPa (für Details siehe Zulassung [3]) vorgespannt, sodass die 40 mm dicke Platte eine zentrische Vorspannung von ca. 3 MPa erfährt. Für die 69 mm dicke Platte liegt die Vorspannung bei ca. 3,5 MPa. Durch die Vorspannung in beiden Richtungen werden vor allem Vorteile für die konstruktive Ausbildung von unterschiedlichen Anwendungen erzielt, z. B. die Öffnungen, lokale Lasteinleitung etc. Die Betondeckung der äußersten Bewehrungslage beträgt i. d. R. 5 mm. In Bild 1 ist der Querschnitt der beiden Plattendicken mit einer Bewehrungsbelegung aus [3] dargestellt.

Die CPC-Platten werden mit Vergussbeton (VB) gemäß der DAfStb-Richtlinie für Vergussbeton [5] oder Selbstverdichtendem Beton (SVB) gemäß der DAfStb-Richtlinie für selbstverdichtenden Beton [6] hergestellt. Die Fließfähigkeit des Betons ist außerordentlich

gut, sodass der Beton zusammen mit dem maximalen Korndurchmesser der Gesteinskörnung von nur 5 mm einwandfrei durch das engmaschige Bewehrungsnetz eingebracht werden kann. In Tab. 1 sind die wesentlichen Eigenschaften der beiden Betone laut den Angaben in der Zulassung [3] dargestellt. Tatsächlich ist die Zylinderdruckfestigkeit von SVB ca. 20 MPa höher als jene von VB (113 MPa versus 93 MPa). Für die Bemessung werden die beiden Betone vereinfachend auf der sicheren Seite liegend als C80/95 definiert [3].

3 Biegeversuche mit CPC-Platten

Es handelt sich um Vierpunktbiegeversuche, wobei die Platte an beiden Auflagern auf beweglichen Rollen liegt. Dies soll eine ungewollte Zwangbeanspruchung vermeiden. Die Versuchskörper wurden aus großformatigen Platten geschnitten. Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung ist der Beton bereits mehr als 28 Tage alt. Die Platten wurden trocken bei Raumtemperatur geprüft. Vor dem Einbau der Platte in den Versuchsstand wurde die genaue Lage der einzelnen Bewehrungsdrähte aufgenommen. Diese Daten bilden eine der Grundlagen für die Nachrechnung der Versuche. In allen Versuchen wiesen die CPC-Platten eine Breite von 15 cm und eine Länge von 70 cm auf. Die Spannweite zwischen beiden Auflagern beträgt 60 cm, sodass der Überstand je Seite 5 cm

Tab. 1 Wesentliche Eigenschaften der Betone für die Herstellung der CPC-Platten gemäß Zulassung [3]
Main concrete properties for casting of CPC Slabs acc. to approval [3]

Eigenschaften	Vergussbeton	SVB
Char. Druckfestigkeit	80 N/mm ²	80 N/mm ²
Mittelwert des E-Moduls	31.000 N/mm ²	43.000 N/mm ²
Mittelwert der Zugfestigkeit	4,5 N/mm ²	5,2 N/mm ²
Expositionsklasse	X0, XC1-XC4, XF4	X0, XC1-XC4, XD3, XS3, XM2, XF4



Bild 2 Rissbild einer 40 mm CPC-Platte im Vierpunktbiegeversuch kurz vor dem Versagen
Crack pattern of a 40 mm CPC Slab during four-point bending testing, shortly before failure occurs

ist. Zum Auflager hin haben die beiden Einzelasten einen Abstand von 20 cm. Der Versuch wurde verformungssteuert gefahren. Neben der aufgetragenen Last wurden die Durchbiegung und das Rissbild aufgenommen. In Bild 2 ist ein Versuchskörper mit einer Plattendicke von 40 mm kurz vor dem Versagen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein sehr engmaschiges Rissbild vorhanden ist. Der Rissabstand im Bereich zwischen den beiden Einzelasten (konstantes Biegemoment) liegt zwischen 2 und 4 cm und die maximale Rissbreite vor dem Bruch ist kleiner als 0,4 mm. Der Versuchskörper zeigt vor dem Versagen eine erkennbare Durchbiegung. In den Versuchen zeigt es sich, dass die Rissanzahl für die jeweilige Bauteildicke etwa konstant ist und diese mit zunehmender Bauteildicke abnimmt. Dies kann mit der absoluten Vergrößerung der Zugfläche bei zunehmenden Bauteildicken erklärt werden.

In allen Versuchen kann festgestellt werden, dass das Versagen durch Bruch der Carbonbewehrung eingeleitet wird. Hierbei soll nicht unerwähnt bleiben, dass der Bruch des schwächsten Bewehrungsdrahts gleichzeitig das Versagen der getesteten Platte bedeutet, da zum einen die Tragreserve der verbleibenden Drähte (i. d. R. neun Drähte) nicht ausreichend ist, um den Kraftverlust eines Drahts auszugleichen, und zum anderen die Carbonbewehrungsdrähte keine plastische Verformung aufweisen, sodass das Versagen unmittelbar nach dem Erreichen der Zugfestigkeit eines Drahts auftritt. In Bild 3 ist das Last-Verformungs-Diagramm für die beiden Plat-

tendicken 40 mm und 69 mm als Beispiel dargestellt. Die Verformungszunahme nach der Rissbildung ist sehr deutlich. Die Steifigkeit des gerissenen Zustand II ist wegen des geringen Bewehrungsgrads sehr gering. Die Verformungskurven der Platten haben kein Fließplateau im Bruchzustand. Das ist auf die fehlende plastische Verformung der Carbonbewehrung zurückzuführen.

In Tab. 2 sind Ergebnisse wesentlicher Biegeversuche an der TU Graz zusammengestellt. Die rückgerechnete Zugfestigkeit der Carbonbewehrung wurde mit dem Programm INCA2 [7] unter Zugrundelegung des Ebenbleibens des Querschnitts für die einzelnen Versuche unter Verwendung der vor dem Versuch aufgenommenen Lage der Bewehrungsdrähte ermittelt. Für den Beton wurde die Arbeitslinie auf der Mittelwertbasis gemäß den Versuchsergebnissen zugrunde gelegt. Für die Carbonbewehrung wird ein linear elastisches Materialverhalten mit einem E-Modul von 230.000 MPa entsprechend den Versuchsergebnissen angenommen. Bei der Nachrechnung wurde die Vorspannung der Drähte mit 2000 MPa zugrunde gelegt und das Biegemoment so lange gesteigert, bis das im Versuch festgestellte Bruchmoment erreicht wird. In diesem Zusammenhang wird noch einmal erwähnt, dass der Bruch in den Versuchen immer durch den schwächsten Bewehrungsdraht bestimmt wird. Zur Verdeutlichung ist in Bild 4 das Ergebnis der Nachrechnung einer Platte dargestellt. Es ist zu erkennen, dass maßgebend für die Bruchlast die Zugfestigkeit der Carbonbewehrung ist. Entsprechend den Ergebnissen der Nachrechnung kann für die verwendete Carbonbewehrung eine charakteristische Zugfestigkeit von 4600 MPa angegeben werden. Hierbei wird eine Standardnormalverteilung angenommen.

Um das äquivalente Tragverhalten der CPC-Platten zum Spannbeton zu verdeutlichen, wurden einige Versuche mit Lastwiederholung durchgeführt. Hierzu wurden die CPC-Platten zuerst über das Risslastniveau beansprucht. Danach folgte eine zyklische Belastung. Die Ergebnisse von Versuchen mit dieser Lastgeschichte sind in Bild 5 für die Plattendicken 40 mm und 69 mm dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Wechsel in dem gerissenen Zustand II bei Erstbelastung dank der

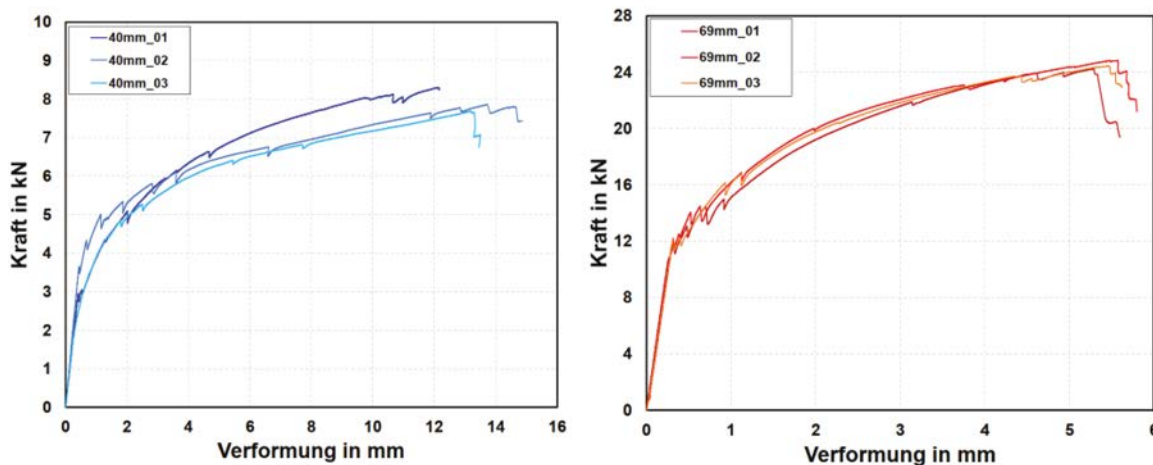


Bild 3 Last-Verformungs-Diagramm für die Plattendicke 40 mm (links) und 69 mm (rechts) als Beispiel zur Verdeutlichung des Verhaltens von CPC-Platten bei Biegung
Force-displacement diagram for slab thickness of 40 mm (left) and 69 mm (right) as example to illustrate CPC slab behaviour at bending

Tab. 2 Zusammenstellung der Ergebnisse der Biegeversuche
Summary of results for bending tests

Versuchs-Nr.	Plattendicke [mm]	Betonart	Bruchmoment [kNm]	rückger. Zugfestigkeit aus Versuchen [N/mm ²]
65.2-B90-1	24	VB	0,440	4743,6
65.2-B90-2	24	VB	0,449	4809,3
65.2-B90-3	24	VB	0,449	4737,1
76.4-B90-1	24	VB	0,468	5035,5
76.4-B90-2	24	VB	0,413	5246,0
76.4-B90-3	24	VB	0,396	5098,9
77.2-B90-1	24	VB	0,472	4722,6
77.2-B90-2	24	VB	0,401	4917,2
77.2-B90-3	24	VB	0,441	5187,2
51.2-B90-1	40	VB	0,712	4770,4
51.2-B90-2	40	VB	0,693	4716,3
51.2-B90-3	40	VB	0,720	4806,7
51.4-B90-1	40	VB	0,733	4942,3
51.4-B90-2	40	VB	0,732	4875,1
51.4-B90-3	40	VB	0,718	4735,7
59.2-B90-1	40	VB	0,767	4933,7
59.2-B90-2	40	VB	0,724	4736,6
59.2-B90-3	40	VB	0,781	5087,2
Ch2-B90-1	40	SVB	0,712	4780,1
Ch2-B90-2	40	SVB	0,706	4783,8
Ch2-B90-3	40	SVB	0,731	4733,7
Ch2-B90-4	40	SVB	0,711	4769,7
Ch2-B90-5	40	SVB	0,697	4738,2
Ch2-B90-6	40	SVB	0,713	4743,2
Ch5-B90-1	40	SVB	0,830	5218,8
Ch5-B90-2	40	SVB	0,786	4923,0
Ch5-B90-3	40	SVB	0,769	4809,1
80.1-B90-1	60	VB	2,046	4876,4
80.1-B90-2	60	VB	1,997	4767,7
80.1-B90-3	60	VB	2,005	4764,6
84.2-B90-1	60	VB	2,023	5087,6
84.2-B90-2	60	VB	1,936	5077,8
84.2-B90-3	60	VB	2,188	5135,3
Ch1-B90-1	60	SVB	1,959	4847,3
Ch1-B90-2	60	SVB	1,951	4733,6
Ch1-B90-3	60	SVB	2,076	5083,9
Ch1-B90-4	60	SVB	1,933	4871,8
Ch1-B90-5	60	SVB	1,935	4781,7
Ch1-B90-6	60	SVB	1,922	4890,5
Ch6-B90-1	69	SVB	2,426	5050,4
Ch6-B90-1	69	SVB	2,484	5186,2
Ch6-B90-1	69	SVB	2,446	5097,2
Mittelwert der erreichten Zugfestigkeit [N/mm ²]				4901,3
Standardabweichung [N/mm ²]				165,1
Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit [N/mm ²]				4625,6

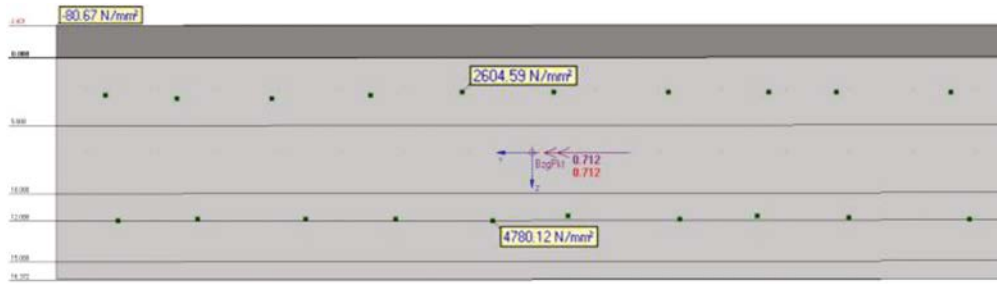


Bild 4 Ergebnis der Nachrechnung einer 40 mm CPC-Platte mit dem Programm INCA [7]
Result of a recalculation for one 40 mm CPC slab with software INCA [7]

sukzessiven Rissbildung und der Betonzugfestigkeit bei einem höheren Lastlevel stattfindet als bei anschließender zyklischer Belastung. Unabhängig von der Vorbelastung kann im Bereich der Dekompression immer die Steifigkeit des ungerissenen Zustands zugrunde gelegt werden (Bild 5). Zwischen Dekompression und Zustand II ist ein Übergangsbereich vorhanden. Dies ist auf das nacheinander erfolgende Schließen der Risse zurückzuführen. Das Verformungsverhalten der CPC-Platten entspricht somit dem Verhalten von Spannbeton mit Bewehrung im Verbund. Die Steifigkeit des Zustands II ist bei den CPC-Platten jedoch deutlich geringer als bei gewöhnlichen Spannbetonbauteilen. Dies ist auf den geringen Bewehrungsgrad zurückzuführen. Die Biegetragfähigkeit der CPC-Querschnitte kann prinzipiell analog den Spannbetonquerschnitten ermittelt werden, wobei selbstverständlich die fehlende plastische Verformung der Carbonbewehrung berücksichtigt werden muss. Dies wurde bei der Nachrechnung der Versuche auch so gemacht.

4 Ankündigungsverhalten der CPC-Platten im Bruchzustand

Aus Sicherheitsgründen sollen Bauwerke so konzipiert werden, dass ein bevorstehendes Versagen rechtzeitig angekündigt wird. Im Stahl- und Spannbeton stellen im Allgemeinen übermäßige Rissbreiten und Verformungen, welche durch Fließen der Bewehrung im Bruchzustand entstanden sind, die Alarmsignale dar. Bei CPC-Bauteilen weist die Carbonbewehrung bis zum

Erreichen der Zugfestigkeit ein linear elastisches Verhalten auf. Die Rissbreite ist infolge des guten Verbunds und des geringen Bewehrungsdurchmessers im Bruchzustand klein, sodass die Risse als alleiniges Erkennungsmerkmal nicht ausreichend sind. Die Ankündigung des Versagens muss deshalb zusätzlich durch eine sichtbare Zunahme der Verformung sichergestellt werden. Dieses Kriterium kann als erfüllt betrachtet werden, wenn zum einen die Verformung vor Erreichen der Bruchlast zumindest das 5-Fache der Verformung im ungerissenen Zustand I beträgt, welcher gemäß der Zulassung [3] für den Gebrauchszustand einzuhalten ist, und zum anderen die absolute Verformung nicht kleiner als $l/250$ ist, sichtbare Verformung gemäß EC2 [8].

Die derzeitige Planungspraxis von CPC-Bauteilen sieht vor, dass im Gebrauchszustand (seltene Lastkombination) eine Rissbildung unter Berücksichtigung der 5%-Fraktile der Zugfestigkeit ($0,7 \cdot f_{ctm}$) und des Dauerstandeffekts (0,85) ausgeschlossen wird. Darüber hinaus muss der Dekompressionsnachweis bei Verwendung von Vergussbeton für die quasiständige Lastkombination und bei Selbstverdichtendem Beton für eine häufige Lastkombination erbracht werden. Beim Wechsel in den Zustand II kann die Spannungszunahme in der Carbonbewehrung als Beispiel für die 40 mm Plattendicke näherungsweise wie in Bild 6 beschrieben werden. Nach einigen Umformungen lässt sich die Spannungszunahme in der Carbonbewehrung mit Gl. (1) angeben:

$$\Delta\sigma_{cb} = \frac{15 \cdot h \cdot (f_{ct,fl} - 1,8 \cdot \sigma_{cp})}{6 \cdot 0,75 \cdot 0,445} \quad (1)$$

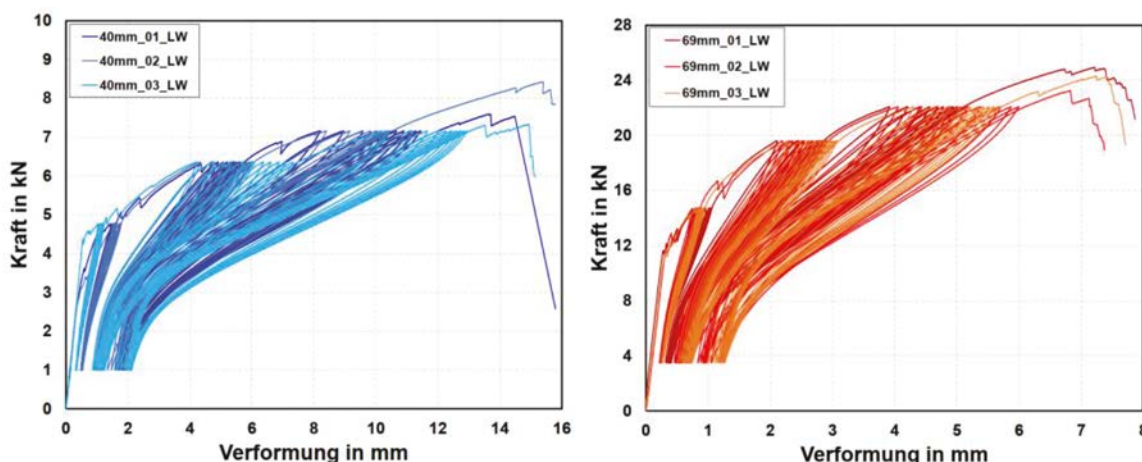


Bild 5 Verhalten von CPC-Platten bei wiederholter Belastung für die Plattendicken 40 mm (links) und 69 mm (rechts)
Behavior of CPC Slabs at repeated loading for a slab thickness of 49 mm (left) an 69 mm (right)

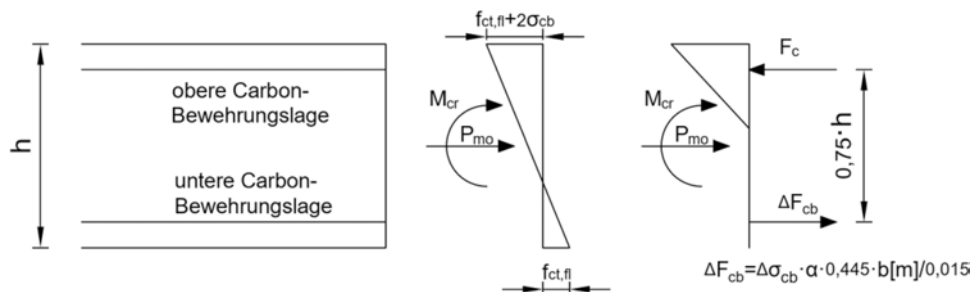


Bild 6 Vereinfachung zur Ermittlung der Spannungszunahme in Carbonbewehrung nach der Rissbildung
Simplification for the determination of stress increase at carbon-reinforcement after cracking

mit:

σ_{cp}	Vorspannung der Platte [N/mm ²]
$f_{ct,fl}$	Biegezugfestigkeit des verwendeten Betons [N/mm ²]
h	Höhe der CPC-Platte [mm]
0,445	Carbon-Nettofläche eines Drahts der Carbonbewehrung [mm ²]
15	Abstand der Carbonbewehrungsdrähte [mm]
$0,75 \cdot h$	innerer Hebelarm der Zugkraft [mm]

Werden für die obige Gleichung die Höhe $h = 40$ mm, die Vorspannung $\sigma_{cp} = 3$ MPa und die Biegezugfestigkeit gemäß der Materialprüfung [3] für den selbstverdichtenden Beton ($f_{ctm} = 5,2$ MPa unter Berücksichtigung des Umrechnungsfaktors gemäß EC2 [8] ($f_{ct,fl} = (1,6 - \frac{h}{1000}) \cdot f_{ctm}$) eingesetzt, so kann die Spannungszunahme in der Carbonbewehrung bei Erreichen des Rissmoments mit ca. 900 MPa ermittelt werden. Zusammen mit einer Vorspannung von 2000 MPa beträgt die Spannung in der Carbonbewehrung bei Auftreten der Rissbildung somit ca. 3000 MPa. Wird auf der sicheren Seite davon ausgegangen, dass die Carbonbewehrung bei Erreichen der Bruchlast eine Spannung nicht kleiner als 4500 MPa (vgl. Tab. 2) hat, so kann festgestellt werden, dass von der Rissbildung bis zum Bruch mindestens eine weitere Spannungszunahme von 1500 MPa in der Carbonbewehrung oder 50 % der Rissspannung noch möglich ist. Der Vergleich mit den Versuchsergebnissen bestätigt, dass mit dieser ingenieurmäßigen Betrachtung eine gute Übereinstimmung erzielt wird. In keinem Versuch ist die Lastzunahme nach der Rissbildung nennenswert kleiner als der hier angegebene Wert von 50 % der Risslast (Bild 7).

Da die Carbonbewehrung keine plastische Verformung aufweist, kann die Verformung von den CPC-Platten jeweils mit der Biegesteifigkeit ermittelt werden. Die Biegesteifigkeit vor der Rissbildung $(EI)^I$ lässt sich unter Berücksichtigung des E-Moduls vom verwendeten SVB mit Gl. (2) angeben:

$$(EI)^I = E_c \cdot \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2)$$

Die Biegesteifigkeit nach der Rissbildung $(EI)^{II}$ ergibt sich analog dem E-Modul der Carbonbewehrung E_{cb} gemäß [9] zu:

$$(EI)^{II} = A_{cb} \cdot E_{cb} \cdot (d - x) \cdot z \quad (3)$$

In Gl. (3) ist $(d - x)$ die Höhe der Zugzone nach der Rissbildung und z der innere Hebelarm. Für eine sichere Abschätzung kann für die 40 mm dicken CPC-Platten der Ansatz in Gl. (4) zugrunde gelegt werden:

$$(d - x) \cdot z = 0,64 \cdot h^2 \quad (4)$$

Hiermit ergibt sich das Steifigkeitsverhältnis zwischen Zustand II und I im Zusammenhang mit der Bewertung der Verformungszunahme im Bruchzustand zu Gl. (5):

$$\frac{(EI)^{II}}{(EI)^I} = \frac{A_{cb} \cdot E_{cb} \cdot 0,64 \cdot h^2}{b \cdot h^3 \cdot E_c} \cdot 12 \quad (5)$$

Um den Einfluss von mehrlagiger Bewehrung zu erfassen, wird der Faktor α eingeführt. Vereinfachend kann dieser Faktor durch das Verhältnis zwischen dem Schwerpunkt

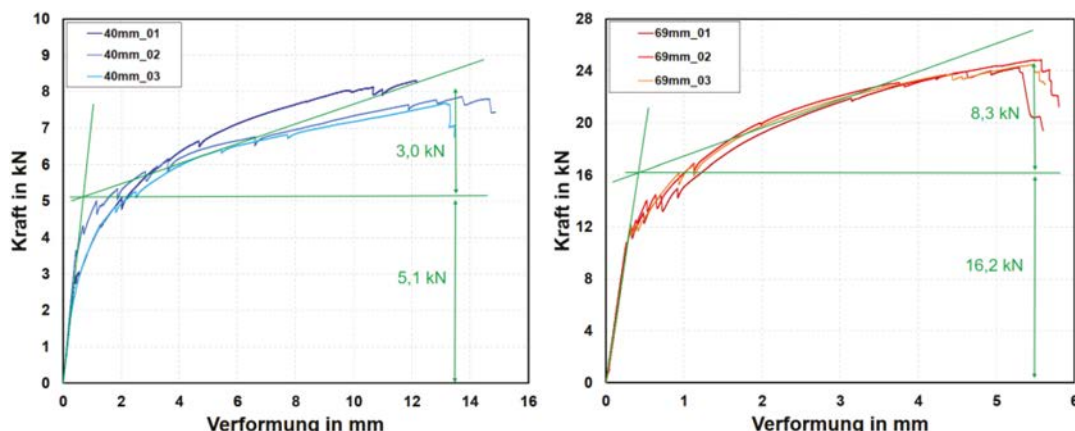


Bild 7 Lastzunahme nach der Rissbildung bei 40 mm (links) und 69 mm (rechts) dicken CPC-Platten
Force increase after cracking at 40 mm (left) and 69 mm (right) thickness of CPC Slabs

der gesamten Bewehrung in einer Richtung und dem Schwerpunkt der meist beanspruchten Bewehrungslage unter Berücksichtigung der zugehörigen Bewehrungsfläche beschrieben werden. Hiermit kann für 40 mm Platten mit zwei Bewehrungslagen je Richtung ein Faktor 1,2 ($\frac{2 \cdot 20}{34} \approx 1,2$) und für 69 mm Platten mit vier Bewehrungslagen je Richtung ein Faktor 2,0 ($\frac{4 \cdot 34,5}{63} \approx 2,0$) abgeschätzt werden. Werden in diesem Zusammenhang zusätzlich der Abstand der Carbonbewehrung in einer Bewehrungslage von 15 mm sowie die Fläche eines Drahts von 0,445 mm² berücksichtigt, so kann Gl. (6) gewonnen werden:

$$\frac{(EI)^{II}}{(EI)^I} = \alpha \cdot \frac{b \cdot 0,445 \cdot 10^{-6} \cdot E_{cb} \cdot 0,64 \cdot h^2}{0,015 \cdot b \cdot h^3 \cdot E_c} \cdot 12 = 228 \cdot 10^{-6} \cdot \alpha \cdot \frac{E_{cb}}{h \cdot E_c} \quad (6)$$

Dies bedeutet, dass das Verhältnis der Steifigkeit Zustand II/Zustand I mit zunehmendem E-Modul des verwendeten Betons kleiner wird. Da die Verformung umgekehrt proportional mit der Steifigkeit ist, kann hiernach erwartet werden, dass das Verhältnis der Verformung im Bruchzustand zu der Verformung im Zustand I bei einem bewehrten Bauteil mit gleichem Rissbild größer wird. Mit anderen Worten beeinflusst ein größerer E-Modul des Betons im Allgemeinen das Ankündigungsverhalten von Bauteilen mit Bewehrung ohne plastische Verformung.

Das Steifigkeitsverhältnis für 40 mm Platten ergibt sich zu Gl. (7):

$$\frac{(EI)^{II}}{(EI)^I} = 228 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2 \cdot \frac{230.000}{0,04 \cdot 43.300} = 0,037 \quad (7)$$

Unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons zwischen den Rissen kann auf der sicheren Seite liegend ein weiterer Faktor von 0,6 zur Erfassung der mittleren Dehnung der Carbonbewehrung zwischen den Rissen angesetzt werden. Das Steifigkeitsverhältnis ergibt sich letztendlich zu Gl. (8):

$$\frac{(EI)^{II}}{(EI)^I} = \frac{0,037}{0,6} = 0,062 \quad (8)$$

Dies bedeutet, dass das Verhältnis zwischen Verformung im Bruchzustand und der Verformung im Gebrauchszustand unter Berücksichtigung der Lastzunahme bei Erreichen der Bruchlast mit Gl. (9) angegeben werden kann.

$$\frac{f_u}{f_I} = 1,5 \cdot \xi \cdot \frac{1}{0,062} + 1,5 \cdot (1 - \xi) \quad (9)$$

In Gl. (9) ist ξ das Verhältnis zwischen gerissenem und ungerissenem Bereich im Bruchzustand. Bei Einfeldträgern mit vorwiegender Gleichstreckenlast (parabolischer Momentverlauf) und einem Verhältnis zwischen Bruchlast und Risslast von 1,5 kann für ξ auf der sicheren Seite liegend ein Wert von 0,6 angesetzt werden. Somit kann für die 40 mm Platten eine Verformungszunahme um das ca. 17-Fache ermittelt werden.

Bei den 69 mm Platten mit vier Bewehrungslagen je Richtung kann das Steifigkeitsverhältnis analog mit einem Faktor von 0,10 angegeben werden. Das Verhältnis, welches von Interesse ist, ergibt sich zu Gl. (10):

$$\frac{f_u}{f_I} = 1,5 \cdot 0,6 \cdot \frac{1}{0,1} + 1,5 \cdot (1 - 0,6) = 9,6 \quad (10)$$

Diese Abschätzung stimmt mit den Versuchsergebnissen gut überein und liegt darüber hinaus auf der sicheren Seite, wie Bild 8 für beide Plattendicken zeigt (Bild 8 links: $12,6 - 0,6/0,6 = 20 > 17$ und Bild 8 rechts: $5,1 - 0,4/0,4 = 11,8 > 9,6$).

Mit den hergeleiteten Steifigkeitsverhältnissen kann die Verformung im Gebrauchs- und Bruchzustand für die CPC-Platten einfach ermittelt werden. Für den Gebrauchszustand kann die Steifigkeit des Zustands I zugrunde gelegt werden. Für den Bruchzustand kann für den gerissenen Bereich bei 40 mm Plattendicke 7 % der Steifigkeit des Zustands I und bei 69 mm Plattendicke 10 % angesetzt werden. Die zu erwartende Durchbiegung kann unter Berücksichtigung des Einflusses von gerissenen und ungerissenen Bereichen mit Gl. (11) ermittelt werden:

$$f = f_{II} \cdot \xi + f_I \cdot (1 - \xi) \quad (11)$$

5 Vergleich mit den Regelungen in der Zulassung Z-71.3-42

Im Vergleich zu den Versuchsergebnissen liegen die Festlegungen in der Zulassung Z-71.3-42 bezüglich der Eigenschaften der Carbonbewehrung sehr auf der sicheren Seite. Auch wenn dies durch fehlende Erfahrung mit den vorgespannten Bauteilen mit einer Carbonbewehrung verständlich erscheint, sollten an dieser Stelle einige Besonderheiten der CPC-Platten erwähnt werden:

- Die Carbonbewehrung wird nur mit ca. 40 % der tatsächlichen Zugfestigkeit vorgespannt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass eine Rissbildung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ausgeschlossen wird, beträgt die Dauerbeanspruchung der Bewehrungsdrähte weniger als 50 % der Zugfestigkeit der Drähte.
- Gemäß der Untersuchung im Rahmen des Zulassungsverfahrens kann der Reduzierungsfaktor für die Dauerlast für die verwendete Carbonbewehrung mit 0,95 angegeben werden. Dieser Wert stimmt mit den Ergebnissen verschiedener Untersuchungen weltweit überein, z. B. [10, 11]. Dennoch wird in der Zulassung ein Wert von nur 0,85 zugrunde gelegt. Die Carbonbewehrung ist gemäß der Zulassung ein getränktes Produkt. Die Carbon-Nettofläche beträgt nur ca. 60 % der Bruttofläche.
- In der Zulassung wird die charakteristische Zugfestigkeit mit 4450 MPa festgelegt, obwohl die statistische Auswertung der Ergebnisse einen charakteristischen Wert von mehr als 4600 MPa ergibt (vgl. Tab. 2).

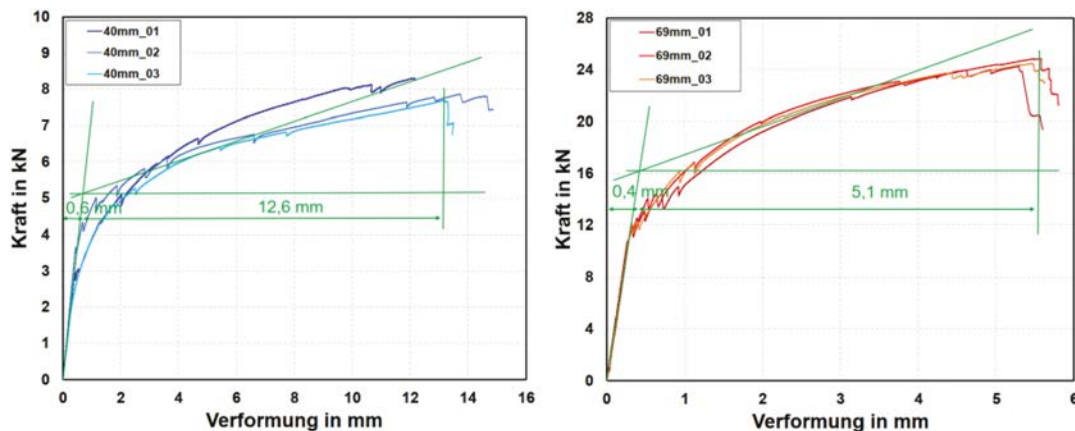


Bild 8 Verformungsverhalten der 40 mm (links) und 69 mm (rechts) CPC-Platten
Deformation behavior of 40 mm (left) and 69 mm (right) CPC Slabs

- Bei der statischen Berechnung wird die Vorspannkraft mit einem $P_{\text{sup}} = 1,1 \cdot P_m$ und $P_{\text{inf}} = 0,9 P_m$ berücksichtigt. Bei den CPC-Platten sind nur gerade Spanndrähte eingebaut. Die Drähte werden gleichmäßig vorgespannt und aus verschiedenen Gründen, wie z. B. der Durchbiegung der Drähte, unterliegt die Vorspannung einem strengen Qualitätssicherungsprogramm. Darüber hinaus sind viele Spanndrähte in einem Bauteil vorhanden, sodass die mögliche Streuung in einem Draht respektive einigen Drähten keinen nennenswerten Einfluss auf die Vorspannkraft im Betonquerschnitt hat.
- Bei Verwendung von SVB muss die Dekompression für die häufige Lastkombination anstelle der quasiständigen Lastkombination nachgewiesen werden. Da die Vorspannung der Spanndrähte ($\sigma_{pm} = 2000 \text{ MPa}$) aus Dauerfestigkeitsgründen vorerst nicht erhöht werden soll und der Abstand zwischen den Drähten bereits an der Untergrenze liegt (15 mm), geht diese Forderung im Allgemeinen mit einer Reduzierung der Spannweite bzw. der Nutzlast einher. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass diese Forderung im Allgemeinen zu einer geringeren Ausnutzung des Querschnitts führt. Ein besseres Ankündigungsverhalten im Bruchzustand in Form von einer größeren Verformung wird nicht erreicht.

- Charakteristische Zugfestigkeit: 4600 MPa
- Dauerstandfaktor: 0,90
- Sicherheitsfaktor 1,15

Der hier vorgeschlagene Sicherheitsfaktor wurde gemäß EC0 [12] unter Berücksichtigung der Modellunsicherheit von 1,1 ermittelt.

Im Unterschied zum Spannbeton hat die Dekompression bei den CPC-Platten keine Bedeutung für die Dauerhaftigkeit. Weiterhin sind bei den CPC-Platten wegen ihrer Abmessung unabhängig von ihren statischen Systemen kaum Eigenspannungen zu erwarten. Die Dekompression ist praktisch nur eine zusätzliche Absicherung zur Vermeidung von Rissbildung im Gebrauchszustand. Für den Gebrauchszustand sollen folgende Nachweise für beide Betone (Vergussbeton und SVB) durchgeführt werden:

- Ungerissen für die charakteristische Lastkombination
- Dekompression für quasiständige Lastkombination

Für die Sicherstellung einer Vorankündigung des Versagens sollten folgende Nachweise durchgeführt werden:

- Von der Rissbildung bis zum Bruch muss mindestens 50 % der Risslast gesteigert werden können.
- Die Verformung im Bruchzustand muss mindesten $l/125$ betragen.

6 Verbesserungsvorschlag für die Bemessung

Die Materialeigenschaften einer Carbonbewehrung wurden im Rahmen des Zulassungsverfahrens eingehend untersucht. Die Datenbasis für die statistische Auswertung ist ausreichend groß, sodass eine abgesicherte Aussage abgeleitet werden kann. Darüber hinaus wird CPC seit ca. zehn Jahren in der Schweiz für unterschiedliche Anwendungen, vor allem im Außenbereich wie für Brücken oder Treppen, erfolgreich eingesetzt. Aus den genannten Gründen scheint ein zusätzliches Sicherheitselement infolge fehlender Erfahrung etwas zu vorsichtig. Ähnlich gilt dies ebenfalls für die Festlegung des Dauerstandfaktors. Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen erscheinen folgende Parameter für die Beschreibung der Carbonbewehrung im Rahmen der Bemessung als ausreichend:

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die CPC-Platten sind ein innovatives Produkt im Bauwesen, insbesondere in Bezug auf die Nachhaltigkeit dank ihrer geringen Abmessung. Deren Anwendung führt zu einer deutlichen Reduktion des Eigengewichts und somit der Primärenergie im Vergleich mit der herkömmlichen Stahlbetonbauweise. Die Nachrechnung von zahlreichen Versuchen zeigt, dass die Biegebemessung von CPC-Platten auf Grundlage jener des Spannbetonbaus erfolgen kann, also ein Ebenbleiben des Querschnitts und Vorspannkraft als äußere Druckkraft oder Vordehnung der Bewehrungsdrähte.

Die fehlende plastische Verformung der Carbonbewehrung zur Sicherstellung des Ankündigungsverhaltens im

Bruchzustand kann durch zwei folgende Forderungen ausgeglichen werden. Einerseits soll nach der Rissbildung eine weitere Laststeigerung von mindestens 50 % der Risslast möglich sein und andererseits soll eine sichtbare Durchbiegung von $l/125$ vor dem Bruch auftreten. Die Forderung, dass hierzu die Dekompression für die häufige Lastkombination nachgewiesen werden soll, ist für die CPC-Platten nicht geeignet, da das praktisch eine Reduzierung der Traglast bedeutet und dies eine nicht notwendige Einschränkung ist. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Dekompression bei den CPC-Platten keine Bedeutung für die Dauerhaftigkeit hat, wie bei gewöhnlichem Spannbeton.

Literatur

- [1] Swissbau, Basel, Jänner 2024, <https://www.swissbau.ch/de/e/cpc-eine-komplett-neue-betonbauweise.45879>
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2014) *DAfStb-Richtlinie DAfStb Betonbauteile, nichtmetallische Bewehrung:2024-01*. Berlin: DIN Media.
- [3] Deutsches Institut für Bautechnik (2023) *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung /Allgemeine Bauartgenehmigung Nummer Z-71.3-42, Carbonbewehrte, vorgespannte CPC-Platten aus Vergussbeton oder selbstverdichtendem Beton*. Berlin.
- [4] CPC Technologie, vorgespannter Carbonbeton, Holcim (Deutschland) GmbH, https://www.holcim.de/sites/germany/files/documents/cpc_technologie_1.pdf
- [5] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2019) *DAfStb-Richtlinie – VeBMR: Herstellung und Verwendung von zementgebundem Vergussbeton und Vergussmörtel*. Berlin: Beuth.
- [6] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2012) *DAfStb-Richtlinie – SVBR: Selbstverdichtender Beton*. Berlin: Beuth.
- [7] INCA2 - Interactive Nonlinear Cross-Section Analysis Biaxial, Programm, <https://www.u-pfeiffer.de>
- [8] DIN EN 1992-1-1 (2011) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth.
- [9] König, G.; Tue, N. V.; Schenck, G. (2007) *Grundlagen des Stahlbetonbaus*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- [10] Spelter, S.; Rempler, S.; Bielak, J.; Hegger, J. (2019) *Long-time durability of carbon-reinforced concrete: An overview and experimental investigation*. Applied Sciences, H. 8, 1651. <https://doi.org/10.3390/app9081651>
- [11] Mertol, H. C.; Rizkalla, S.; Scott, P.; Lees, J. M.; El-Hacha, R. (2008) *Durability of concrete beams prestressed with CRFP*, ACI Special publication, Symposium Paper, Januar 2007, S. 1–20. <https://doi.org/10.14359/18759>
- [12] DIN EN 1990 (2021) *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*, Berlin Beuth.

Autor:innen



Dipl.-Ing. Goran Vojvodic (Korrespondenzautor:in)
vojvodic@khp-leipzig.de
König und Heunisch Planungsgesellschaft
mbH Leipzig – Niederlassung Graz
Rechbauerstraße 4
8010 Graz
Österreich



Prof. Josef Kurath
josef.kurath@zhaw.ch
ZHAW Architektur
Gestaltung und Bauingenieurwesen
Institut Bautechnologie und Prozesse
Tössfeldstrasse 27
8400 Winterthur
Schweiz



Prof. Dr.-Ing. habil. Viet Tue Nguyen
tue@khp-leipzig.de
König und Heunisch Planungsgesellschaft
mbH Leipzig
Sebastian-Bach-Str. 4–6
04018 Leipzig

Zitieren Sie diesen Beitrag

Vojvodic, G.; Nguyen, V. T.; Kurath, J. (2026) *Trag- und Verformungsverhalten von CPC-Platten unter vorwiegenden Biegebeanspruchungen*. Beton- und Stahlbetonbau 121, H. 3, S. 213–221.
<https://doi.org/10.1002/best.70079>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 12. September 2025; angenommen: 9. Januar 2026.