

# Große Tragreserven bei Einzellasten auf CPC-Platten

CPC (Carbon Prestressed Concrete)-Platten sind mit Carbonfasersträngen armiert und vorgespannt. Diese neu entwickelten Platten sind bei gleicher Biegetragfähigkeit deutlich schlanker als herkömmliche Stahlbetonplatten. Dadurch werden das Gewicht und der Materialverbrauch gegenüber herkömmlichen Stahlbetonlösungen deutlich reduziert. Die Tragwirkung von CPC-Platten ist analog derjenigen von vorgespanntem Stahlbeton. Die Bemessung erfolgt anhand der bauaufsichtlichen Zulassung Z-71.3-42 des Deutschen Instituts für Bautechnik. Insbesondere bei Brückenbelägen wird rechnerisch häufig der Nachweis der Einzellast (Unterhaltsfahrzeug) maßgebend. In diversen Versuchen an der TU Graz sowie an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) konnte gezeigt werden, dass die Einzellasten deutlich besser abgetragen werden können, als in der Zulassung rechnerisch angesetzt. Die mitwirkende Breite spielt dabei eine entscheidende Rolle.

## Large load-bearing reserves for point loads on CPC panels

CPC (carbon prestressed concrete) panels are reinforced and prestressed with carbon fibre strands. Thanks to the high strength of the carbon reinforcement, the prestressing and its corrosion resistance, structural components in CPC design can be made significantly slimmer and lighter with the same bending load capacity. This significantly reduces the weight and material consumption compared to conventional solutions. The load-bearing behaviour of CPC panels is analogous to pre-stressed reinforced concrete. The design is carried out based on the technical approval Z-71.3-42 of the DIBt (Deutschen Instituts für Bautechnik). Especially in the case of bridge decks the point load (maintenance vehicle) is often decisive for the static verification. In various tests at the Graz University of Technology, as well as at the ZHAW (Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften), it could be shown that the point loads can be transferred much better than calculated according to the approval. The effective width plays a decisive role in this matter.

**Stichworte** CPC (Carbon Prestressed Concrete)-Bauweise; Abtrag von Einzellasten; Tragreserve

**Keywords** CPC (carbon prestressed concrete) structure; load distribution of point loads; load-bearing capacity

## 1 Einleitung

CPC-Platten sind mit sehr dünnen Carbonfasersträngen zweiachsig stark vorgespannt. Große Platten werden industriell vorgefertigt und anschließend werden daraus die Maßplatten ausgeschnitten. Durch die Vorfertigung im Werk wird eine sehr hohe Präzision erreicht und die CPC-Platten weisen sehr gleichmäßige Eigenschaften auf. Daraus resultiert eine optimale Ausnutzung der Materialien. CPC-Platten sind in Deutschland vorerst für überwiegend ruhende Beanspruchungen und nur auf Linienlagern (noch nicht für punktgestützte Lagerungen) zugelassen. Punktformige Lasten sind zugelassen. Typische Anwendungsbeispiele sind Balkonplatten oder Beläge für Brücken.

In Bild 1 ist ein Steg mit CPC-Belag dargestellt. Im Vergleich zu einem Holzbelag ist ein CPC-Belag deutlich dauerhafter und rutschfester. Werkseitig wird die Rutschsicherheitsklasse R12 erreicht. Er nimmt optisch das Fugenraster eines Holzbelages an und behält die guten Entwässerungseigenschaften bei. Da mit den CPC-Platten erstmalig vom DIBt eine breit einsetzbare, mit Carbon vorgespannte Betonplatte allgemein zugelassen wurde, sind die Bemessungsansätze noch sehr konservativ ge-

wählt. Vor allem beim Abtrag von Einzellasten werden große nutzbare Reserven vermutet.

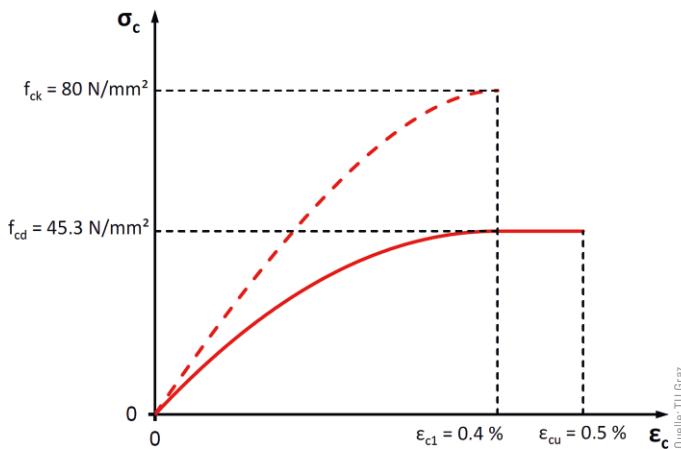
## 2 Materialkennwerte und Plattenaufbau

Um die dünnen großen Platten herzustellen, wird ein hochfester selbstverdichtender Beton mit einem Größ-



Quelle: ZHAW

**Bild 1** Beispiel eines Steges mit CPC Belag  
Example of a footbridge with cpc covering



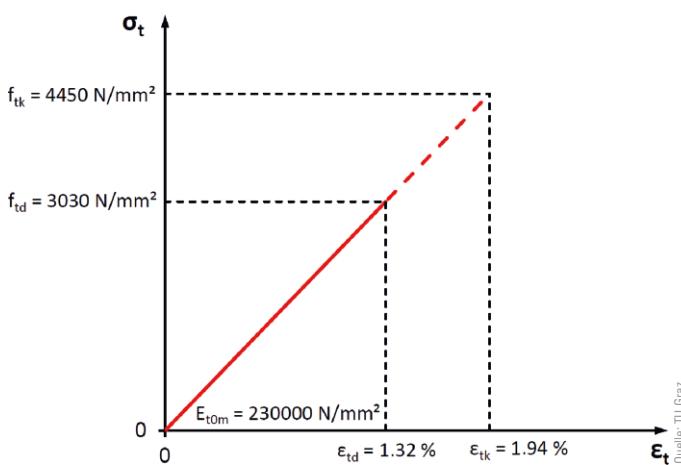
**Bild 2** Arbeitslinie des Betons für CPC-Bauteile analog zu DIN EN 1992-1-1  
Concrete working line for CPC panels analogous to DIN EN 1992-1-1

korn von 5 mm verwendet. Die Eigenschaften des Betons wurden anhand der EN 206 [1] bestimmt. Im Folgenden und in Bild 2 sind die Materialkennwerte dargestellt.

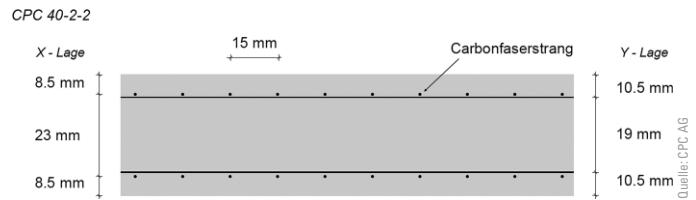
$$\begin{aligned}f_{ck} &= 80 \text{ N/mm}^2 \\f_{ctm} &= 4,5 \text{ N/mm}^2 \\E_{com} &= 31.000 \text{ N/mm}^2 \\e_{c1} &= 0,4\% \end{aligned}$$

Der Teilsicherheitsfaktor für Beton  $\gamma_c$  wird auf der sicheren Seite analog der DIN EN 1992-1-1 [2] bei 1,5 gewählt. Der Dauerstandsfaktor  $\alpha_{ct}$  wird bei 0,85 angesetzt [3].

Ein Carbonfaserstrang wird aus einem Bündel von mehreren Tausend einzelnen Carbonfilamenten hergestellt und mit Harz getränkt. Der Durchmesser eines getränkten Bündels bzw. eines Carbonfaserstrangs beträgt ca. 1 mm. Die Nettocarbonfläche pro Carbonfaserstrang  $A_t$  beträgt dabei  $0,445 \text{ mm}^2$ . Der E-Modul von Carbon  $E_{t0m}$  liegt bei  $230.000 \text{ N/mm}^2$ . Die charakteristische Zugfestigkeit  $f_{tk}$  liegt bei  $4450 \text{ N/mm}^2$ . Der langfristige Bemessungswert der Zugfestigkeit  $f_{td,100a}$  der Carbonrovinge wurde bei  $3030 \text{ N/mm}^2$  festgelegt [3]. Die charakteristische Dehnung  $e_{tk0}$  liegt bei 1,94%, die Dehnung bei Erreichen des Bemessungswerts  $e_{td}$  bei 1,32%. Daraus resultiert die in Bild 3 dargestellte Arbeitslinie. Die Carbon-



**Bild 3** Arbeitslinie der Carbonrovings für die Bemessung der CPC-Platten  
Working line of the carbon rovings for the design of the CPC panels



**Bild 4** Plattenquerschnitt einer 40 mm dicken CPC-Platte  
Panel cross-section of a 40 mm thick CPC panel

faserstränge werden in ein bis vier Lagen je Richtung eingelegt. Die Platten werden zentrisch vorgespannt. Der horizontale Abstand zwischen den Carbonfasersträngen beträgt jeweils 15 mm. In Bild 4 ist ein Querschnitt einer 40 mm dicken CPC-Platte dargestellt.

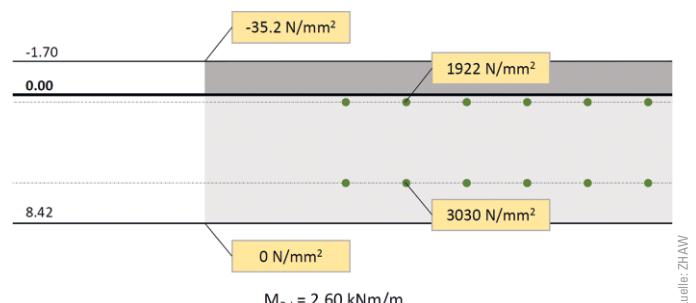
### 3 Bemessungskonzept

Die Ermittlung der Querschnittswiderstände von CPC-Platten erfolgt angelehnt an die Stahlbetonbemessung. Der Momentenwiderstand wird unter Ebenbleiben des Querschnitts ermittelt. Maßgebend wird dabei die Zugfestigkeit in der untersten Bewehrungslage. Die Carbonrovings werden bei der Herstellung auf  $2000 \text{ N/mm}^2$  vorgespannt. Der Wert bezieht sich auf den Zeitpunkt vor Absetzen der Spannkraft. Je nachdem, ob die Vorspannung günstig oder ungünstig wirkt, dürfen folgende Vorspannungen berücksichtigt werden:

$$\begin{aligned}\sigma_{p0,fav} &= \sigma_{p0,100a,fav} = 1800 \text{ N/mm}^2 \\ \sigma_{p0,unfav} &= \sigma_{p0,100a,unfav} = 2100 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

In  $\sigma_{p0,fav}$  sind alle zeitlichen Verluste auf Seiten des Betons und der Carbonbewehrung, die infolge der zentrischen Vorspannung der Platte über die Nutzungszeit entstehen, bereits berücksichtigt.  $\sigma_{p0,unfav}$  bezeichnet den höchsten Wert der Vorspannung direkt nach Absetzen der Spannkraft. Die Carbonbewehrung verfügt gemäß Zulassung über eine Nutzungszeit von 100 Jahren.

In Bild 5 ist der Zustand beim Erreichen der zulässigen Spannung in der untersten Rovinglage einer CPC 40-2-2-Platte dargestellt. Es resultiert ein Biegewiderstand von  $2,60 \text{ kNm/m}$ . Die maximale Beton-



**Bild 5** Auszug aus dem INCA-Programm, mit dem Biegewiderstand bei Erreichen der Zugfestigkeit in der unteren Bewehrungslage  
Extract from the INCA programme, with the bending resistance when the tensile strength is reached in the lower reinforcement layer

druckspannung am oberen Plattenrand beträgt dabei  $35,2 \text{ N/mm}^2$ , was deutlich unter der zulässigen Betondruckspannung von  $45,3 \text{ N/mm}^2$  liegt.

Der Querkraftwiderstand der CPC-Platten wird angelehnt an die DIN EN 1992-1-1 [2] in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1/NA [4] ermittelt [3].

$$V_{Rd,c} = \left( C_{Rd,c} \cdot k \cdot \left( 100 \cdot \rho l \left( \frac{E_{t0m}}{E_s} \right) \cdot f_{ck} \right)^{\frac{1}{3}} + 0,12 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b_w \cdot h \quad (1)$$

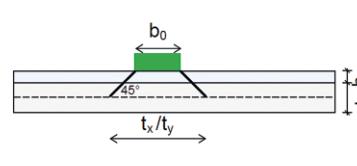
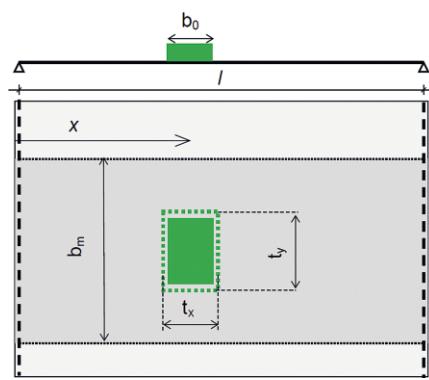
Wie im Folgenden gezeigt, erreicht eine CPC-40-2-2-Platte von 1 m Breite und Auflagern senkrecht zur Bewehrungssachse rechnerisch einen Querkraftwiderstand von ca. 31,6 kN.

$$\begin{aligned} v_{Rd,c} &= \left( C_{Rd,c} \cdot k \cdot \left( 100 \cdot \rho l \left( \frac{E_{t0m}}{E_s} \right) \cdot f_{ck} \right)^{\frac{1}{3}} + 0,12 \cdot \sigma_{cp} \right) \\ &= 0,1 \cdot 2 \cdot \left( 100 \cdot 0,00144625 \cdot \left( \frac{230.000}{200.000} \right) \cdot 80 \right)^{\frac{1}{3}} \\ &\quad + 0,12 \cdot 2,6 = 0,79 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{Rd,c} &= v_{Rd,c} \cdot b_w \cdot h = 0,79 \text{ N/mm}^2 \cdot 40 \text{ mm} \cdot 1000 \text{ mm} \\ &= 31,6 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

**Tab. 1** Mitwirkende Breite gemäß DAfStb-Heft 631 [6]  
Participating width according to DAfStb booklet 63 [6]

| Statisches System | Mitwirkende Breite                             | Gültigkeitsgrenze |   |                |
|-------------------|--|-------------------|---|----------------|
|                   | $b_{m,MF} = t_y + 2.5 \cdot x \cdot (1 - x/l)$ | $0 < x < l$       | $t_y \leq 0.8 \cdot l$                      | $t_x \leq l$   |
|                   | $b_{m,MF} = t_y + 1.5 \cdot x \cdot (1 - x/l)$ | $0 < x < l$       | $t_y \leq 0.8 \cdot l$                      | $t_x \leq l$   |
|                   | $b_{m,MS} = t_y + 0.5 \cdot x \cdot (2 - x/l)$ | $0 < x < l$       | $t_y \leq 0.8 \cdot l$                      | $t_x \leq l$   |
|                   | $b_{m,MS} = t_y + x \cdot (1 - x/l)$           | $0 < x < l$       | $t_y \leq 0.8 \cdot l$                      | $t_x \leq l$   |
|                   | $b_{m,MS} = t_y + 0.5 \cdot x \cdot (2 - x/l)$ | $0 < x < l$       | $t_y \leq 0.8 \cdot l$                      | $t_x \leq l$   |
|                   | $b_{m,MS} = 0.2 \cdot l_k + 1.5 \cdot x$       | $0 < x < l_k$     | $t_y \leq 0.2 \cdot l_k$                    | $t_x \leq l_k$ |
|                   | $b_{m,MS} = t_y + 1.5 \cdot x$                 | $0 < x < l_k$     | $0.2 \cdot l_k \leq t_y \leq 0.8 \cdot l_k$ | $t_x \leq l_k$ |



$$t_x / t_y = b_0 + 2 \cdot h_1 + h$$

Quelle: CPC AG

**Bild 6** Bestimmung der mitwirkenden Breite gemäß DAfStb-Heft 631  
Determination of the effective width according to DAfStb booklet 631

mit:

$$C_{Rd,c} = \left( \frac{f}{\gamma c} \right) = \frac{0,15}{1,5} = 0,1$$

$f$  Beiwert in Abhängigkeit von Plattendicke und Rovingorientierung = 0,15 [3]

$k$  Maßstabsfaktor = 2

$\rho_1$  effektiver Längsbewährungsgrad

$$= n \cdot \frac{A_{Roving}}{b_w \cdot h} = 2 \cdot 65 \cdot \frac{0,445}{1000 \cdot 40} = 0,00144625$$

$E_{t0m}$  Elastizitätsmodul Carbon = 230.000 N/mm<sup>2</sup>

$E_s$  Elastizitätsmodul Stahl = 200.000 N/mm<sup>2</sup>

$f_{ck}$  charakteristische Druckfestigkeit

Beton = 80 N/mm<sup>2</sup>

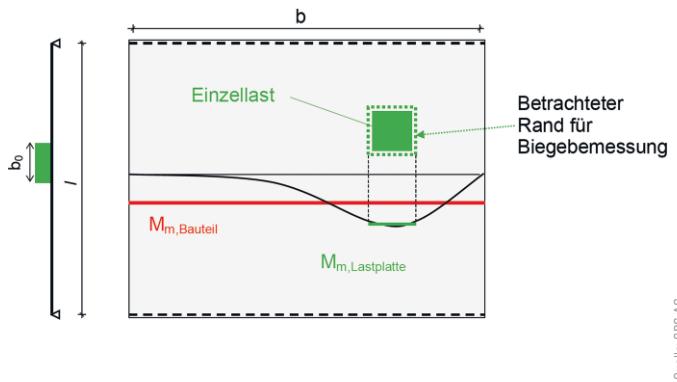
$\sigma_{cp}$  Betondruckspannung infolge Vorspannung

$$\begin{aligned} A_{Roving} \cdot \sigma_{p0,100a,fav} \cdot \frac{n}{b_w \cdot h} \\ = 0,445 \cdot 1800 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{2 \cdot 65}{1000 \cdot 40} = 2,60 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$b_w$  kleinste Querschnittsbreite = 1000 mm

$h$  Plattendicke = 40mm

Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit werden zusätzlich Spannungsnachweise im charakteristischen sowie im quasiständigen Lastfall erforderlich (vgl. [3, 5]). Ob die Tragsicherheit oder die Gebrauchstauglichkeit maßgebend wird, ist vom Vorspanngrad abhängig. Im vorliegenden Bericht wird nur auf die Tragsicherheitsnachweise eingegangen.



Bei Einzellasten darf die mitwirkende Breite für den Querkraftnachweis sowie für den Biegenachweis gemäß DAfStb-Heft 631 [6] ermittelt werden. Bei Durchlaufsystemen ist die mitwirkende Breite für Stützmomente zugrunde zu legen (Tab. 1, Bild 6).

Alternativ darf der Nachweis mithilfe einer FE-Berechnung geführt werden. Dabei darf die Größe der Lastplatte um die Höhe des CPC-Bauteils vergrößert werden. Für die Biegebemessung darf das mittlere Moment am Rand der angesetzten Lastplatte angesetzt werden. Für die Querkraftbeanspruchung wird eine Breite entsprechend dem Verhältnis zwischen dem mittleren Moment über die gesamte Bauteilbreite und dem mittleren Moment über die angesetzte Lastplatte berechnet. Diese Breite, um einen Faktor 0,7 abgemindert, darf dann als mitwirkende Breite angesetzt werden.

$$b_{m, \text{Querkraft}} = M_{m, \text{Bauteil}} / M_{m, \text{Lastplatte}} \cdot b \cdot 0,7$$

Da beide Nachweise auf der sicheren Seite liegen, darf der höhere der beiden Werte verwendet werden [5] und wird im vorliegenden Bericht als maßgebend bezeichnet. Für häufige Anwendungsfälle wie Balkone oder Gehbeläge wird der Nachweis der Einzellast häufig maßgebend. Da hohe Tragreserven vermutet wurden, wurden diverse Versuche mit Einzellasten durchgeführt, um diese zu ermitteln.

#### 4 Versuchsprogramm

An der ZHAW wurden verschiedene Stempeldruckversuche mit Aufstandsflächen von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  durchgeführt [7]. Es wurden verschiedene Bohlenbreiten  $b$ , verschiedene Spannweiten  $L_S$  am Einfeldträger sowie am Dreifeldträger untersucht und die Last wurde an verschiedenen Positionen im Feld platziert. Im Rahmen dieses Aufsatzes werden folgende vier Serien an 40 mm dicken Platten mit zwei Lagen Carbonfasersträngen je Richtung (CPC 40-2-2) ausgewertet:

- Serie 1: Bohlenbreite  $b = 200 \text{ mm}$  und  $300 \text{ mm}/L_S = 500 \text{ mm}$
- Serie 2: Bohlenbreite  $b = 350 \text{ mm}, 400 \text{ mm}$  und  $500 \text{ mm}/L_S = 500 \text{ mm}$

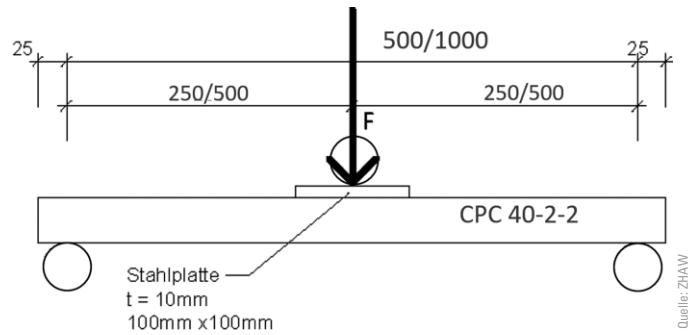


Bild 8 Versuchsaufbau der Serien 1-3  
Experimental set-up of series 1-3

- Serie 3: Bohlenbreite  $b = 200 \text{ mm}, 350 \text{ mm}$  und  $500 \text{ mm}/L_S = 1000 \text{ mm}$
- Serie 4: Bohlenbreite  $b = 350 \text{ mm}, 400 \text{ mm}$  und  $500 \text{ mm}/L_S, \text{Mitte} = 600 \text{ mm}, L_S, \text{Rand} = 470 \text{ mm}$

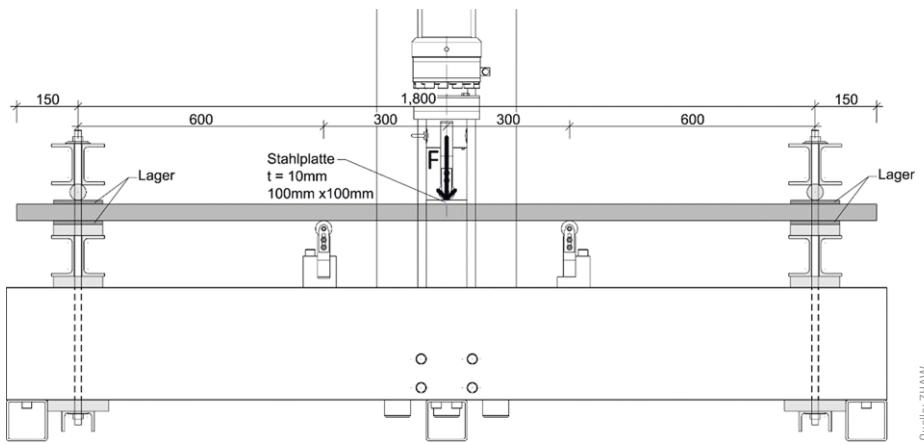
Die Materialeigenschaften aller Prüfkörper wurden vor der Versuchsdurchführung geprüft und die Lage der Carbonfaserstränge wurde exakt vermessen. In Bild 8 ist der Versuchsaufbau der Serien 1-3 dargestellt. Die Platte wird jeweils auf Stahlrollen mit 40 mm Durchmesser aufgelegt. Die Krafteinleitung erfolgte jeweils mit einer 10 mm dicke Stahlplatte, welche durch eine Stahlrolle mit ebenfalls 40 mm Durchmesser belastet wird. Der Versuchsaufbau der Serie 4 ist in Bild 9 dargestellt. Die Endlager sind jeweils auf Zug gehalten.

Pro Bohlenbreite wurden jeweils mindestens drei Versuche mittig sowie drei Versuche asymmetrisch am Rand der Bohle durchgeführt. In Bild 10 ist die Lastanordnung im Querschnitt beispielhaft für 300 mm breite Bohlen dargestellt.

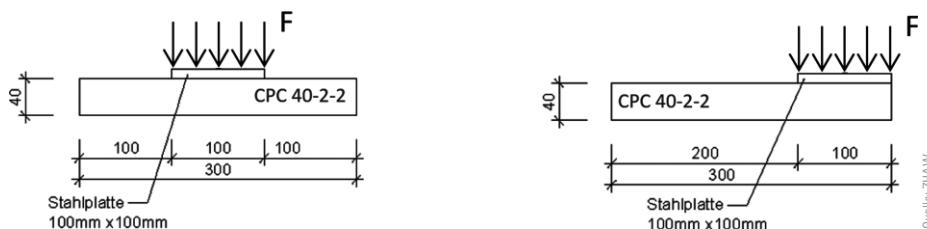
Bei der Serie 4 wurden zusätzliche Querkraftversuche durchgeführt:

- Bohlenbreite  $b = 500 \text{ mm}/L_S, \text{Mitte} = 600 \text{ mm}, L_S, \text{Rand} = 470 \text{ mm}$  asymmetrische Belastung am Plattenrand

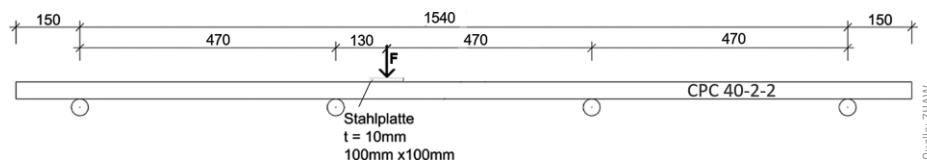
Die Lastplatte wurde in doppelter Plattenhöhe vom Auflager entfernt aufgebracht. Die Versuchsanordnung ist in Bild 11 dargestellt. Die geprüften Bohlen wurden aus größeren CPC-40-2-2-Platten ausgeschnitten. Je nach Zuschnitt kann die Anzahl der Carbonfaserstränge pro Bohlenbreite variieren. Da die Carbonfaserstränge sehr kleine Abstände untereinander aufweisen, hat dies nur einen geringen Einfluss auf die Traglast. Alle Prüfungen wurden mit einer elektromechanischen Biegeprüfmaschine Typ BP-200 kN der Firma Walter & Bai (Genauigkeitsklasse 1,0) durchgeführt. Die Probenkörper wurden grundsätzlich kraftgesteuert bis zum Bruch belastet. Bei den Serien 2 und 3 wurden zusätzlich weggesteuerte Versuche durchgeführt. Die Details sind der Tab. 2 zu entnehmen. Bei allen Versuchen wurden jeweils die aufgebrachte Kraft sowie der Maschinenweg aufgezeichnet.

**Bild 9** Versuchsaufbau der Serie 4

Experimental set-up of series 4

**Bild 10** Querschnitte des Versuchsaufbaus für Bohlen mit einer Breite von 300 mm

Cross-sections of the test setup for panels with a width of 300 mm

**Bild 11** Versuchsaufbau Querkraftversuch

Experimental setup shear force test

## 5 Versuchsergebnisse

### 5.1 Resultate Serien 1–3 am Einfeldträger

In Tab. 3 sind die Resultate der Serie 1 dargestellt. Es wurden ausschließlich Biegebrüche mit Versagen der Zugbewehrung festgestellt. Alle Versuche erfolgten kraftgeregt mit 0,1 kN/s.

In Tab. 4 und 5 sind die Resultate der Serien 2 und 3 dargestellt. Auch hier wurden ausschließlich Biegebrüche mit Versagen der Zugbewehrung festgestellt. Die ersten drei Versuche erfolgten jeweils kraftgeregt mit 0,1 kN/s, der vierte weggeregt mit 1 mm/min (blau hinterlegt).

**Tab. 2** Übersicht Versuchsprogramm  
Overview experimental programme

| Versuchstyp                | Breiten <i>b</i>    | Anzahl Versuche | Regelung                                   | Serie |
|----------------------------|---------------------|-----------------|--|-------|
| Einfeldträger $L_S = 500$  | 200/300/350/400/500 | je 3            | Kraftgeregt 0,1 kN/s                       | 1 & 2 |
| Einfeldträger $L_S = 500$  | 350/400/500         | je 1            | Weggeregt 1 mm/min                         | 2     |
| Einfeldträger $L_S = 1000$ | 200/350/500         | je 3            | Kraftgeregt 0,1 kN/s                       | 3     |
| Einfeldträger $L_S = 1000$ | 200/350/500         | je 1            | Weggeregt 1 mm/min                         | 3     |
| Dreifeldträger $L_S = 600$ | 350/400/500         | je 3            | Kraftgeregt 0,1 kN/s                       | 4     |
| Dreifeldträger $L_S = 600$ | 400                 | 3               | Zyklisch vorbelastet (Details vgl. Tab. 7) | 4     |

**Tab. 3** Resultate Serie 1  
Results series 1

| Nr.  | Breite Probe $b$<br>[mm] | Spannweite $L_S$<br>[mm] | Laststellung | Bruchlast $F_R$<br>[kN] | Anzahl Rovings<br>[Stk.] | Mittelwert $F_{R,m}$<br>[kN] |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|
| A1-1 | 200                      | 500                      | mittig       | 10,0                    | 13                       |                              |
| A1-2 | 200                      | 500                      | mittig       | 10,2                    | 13                       | 10,1                         |
| A1-3 | 200                      | 500                      | mittig       | 10,2                    | 13                       |                              |
| A2-1 | 200                      | 500                      | Rand         | 11,1                    | 14                       |                              |
| A2-2 | 200                      | 500                      | Rand         | 10,4                    | 13                       | 10,7                         |
| A2-3 | 200                      | 500                      | Rand         | 10,7                    | 14                       |                              |
| B1-1 | 300                      | 500                      | mittig       | 15,4                    | 20                       |                              |
| B1-2 | 300                      | 500                      | mittig       | 14,2                    | 19                       | 14,7                         |
| B1-3 | 300                      | 500                      | mittig       | 14,5                    | 19                       |                              |
| B2-1 | 300                      | 500                      | Rand         | 14,7                    | 20                       |                              |
| B2-2 | 300                      | 500                      | Rand         | 14,8                    | 19                       | 14,4                         |
| B2-3 | 300                      | 500                      | Rand         | 13,8                    | 18                       |                              |

**Tab. 4** Resultate Serie 2; die weggeregelten Versuche sind blau hinterlegt  
Results series 2.; the position-controlled experiments are highlighted in blue

| Nr.  | Breite Probe $b$<br>[mm] | Spannweite $L_S$<br>[mm] | Laststellung | Bruchlast $F_R$<br>[kN] | Anzahl Rovings<br>[Stk.] | Mittelwert $F_{R,m}$<br>[kN] |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|
| C1-1 | 350                      | 500                      | mittig       | 18,1                    | 22                       |                              |
| C1-2 | 350                      | 500                      | mittig       | 17,0                    | 23                       | 17,0                         |
| C1-3 | 350                      | 500                      | mittig       | 16,6                    | 23                       |                              |
| C1-4 | 350                      | 500                      | mittig       | 16,1                    | 22                       |                              |
| C2-1 | 350                      | 500                      | Rand         | 14,8                    | 23                       |                              |
| C2-2 | 350                      | 500                      | Rand         | 14,3                    | 23                       | 15,1                         |
| C2-3 | 350                      | 500                      | Rand         | 15,6                    | 23                       |                              |
| C2-4 | 350                      | 500                      | Rand         | 15,7                    | 23                       |                              |
| D1-1 | 400                      | 500                      | mittig       | 20,7                    | 27                       |                              |
| D1-2 | 400                      | 500                      | mittig       | 20,1                    | 27                       | 19,8                         |
| D1-3 | 400                      | 500                      | mittig       | 19,4                    | 27                       |                              |
| D1-4 | 400                      | 500                      | mittig       | 19,0                    | 27                       |                              |
| D2-1 | 400                      | 500                      | Rand         | 17,0                    | 26                       |                              |
| D2-2 | 400                      | 500                      | Rand         | 17,8                    | 26                       | 17,1                         |
| D2-3 | 400                      | 500                      | Rand         | 16,6                    | 26                       |                              |
| D2-4 | 400                      | 500                      | Rand         | 17,1                    | 27                       |                              |
| E1-1 | 500                      | 500                      | mittig       | 24,0                    | 33                       |                              |
| E1-2 | 500                      | 500                      | mittig       | 23,4                    | 33                       | 23,8                         |
| E1-3 | 500                      | 500                      | mittig       | 24,4                    | 33                       |                              |
| E1-4 | 500                      | 500                      | mittig       | 23,1                    | 32                       |                              |
| E2-1 | 500                      | 500                      | Rand         | 18,9                    | 32                       |                              |
| E2-2 | 500                      | 500                      | Rand         | 17,1                    | 33                       | 18,5                         |
| E2-3 | 500                      | 500                      | Rand         | 18,8                    | 33                       |                              |
| E2-4 | 500                      | 500                      | Rand         | 18,6                    | 33                       |                              |

**Tab. 5** Resultate Serie 3; die weggeregelten Versuche sind blau hinterlegt  
Results series 3; the position-controlled experiments are highlighted in blue

| Nr.  | Breite Probe $b$<br>[mm] | Spannweite $L_s$<br>[mm] | Laststellung | Bruchlast $F_R$<br>[kN] | Anzahl Rovings<br>[Stk.] | Mittelwert $F_{R,m}$<br>[kN] |
|------|--------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|
| A3-1 | 200                      | 1000                     | mittig       | 4,3                     | 14                       |                              |
| A3-2 | 200                      | 1000                     | mittig       | 4,1                     | 13                       |                              |
| A3-3 | 200                      | 1000                     | mittig       | 4,3                     | 14                       | 4,2                          |
| A3-4 | 200                      | 1000                     | mittig       | 4,0                     | 13                       |                              |
| A4-1 | 200                      | 1000                     | Rand         | 4,3                     | 14                       |                              |
| A4-2 | 200                      | 1000                     | Rand         | 3,9                     | 13                       |                              |
| A4-3 | 200                      | 1000                     | Rand         | 4,3                     | 13                       | 4,3                          |
| A4-4 | 200                      | 1000                     | Rand         | 4,6                     | 14                       |                              |
| C3-1 | 350                      | 1000                     | mittig       | 7,5                     | 23                       |                              |
| C3-2 | 350                      | 1000                     | mittig       | 7,6                     | 23                       |                              |
| C3-3 | 350                      | 1000                     | mittig       | 7,5                     | 24                       | 7,5                          |
| C3-4 | 350                      | 1000                     | mittig       | 7,5                     | 24                       |                              |
| C4-1 | 350                      | 1000                     | Rand         | 7,1                     | 23                       |                              |
| C4-2 | 350                      | 1000                     | Rand         | 7,2                     | 23                       |                              |
| C4-3 | 350                      | 1000                     | Rand         | 6,7                     | 23                       | 7,1                          |
| C4-4 | 350                      | 1000                     | Rand         | 7,5                     | 23                       |                              |
| E3-1 | 500                      | 1000                     | mittig       | 10,8                    | 33                       |                              |
| E3-2 | 500                      | 1000                     | mittig       | 10,3                    | 33                       |                              |
| E3-3 | 500                      | 1000                     | mittig       | 11,3                    | 33                       | 10,6                         |
| E3-4 | 500                      | 1000                     | mittig       | 10,2                    | 33                       |                              |
| E4-1 | 500                      | 1000                     | Rand         | 9,3                     | 33                       |                              |
| E4-2 | 500                      | 1000                     | Rand         | 9,3                     | 33                       |                              |
| E4-3 | 500                      | 1000                     | Rand         | 9,2                     | 33                       | 9,1                          |
| E4-4 | 500                      | 1000                     | Rand         | 8,6                     | 33                       |                              |

In Bild 12 sind typische Bruchbilder der Versuchskörper C2-3 und E2-3 mit einer Breite von 350 mm bzw. 500 mm dargestellt. Es wird ersichtlich, dass alle Carbonfaserstränge über die gesamte Plattenbreite auf Zug versagten. Beim schmaleren Prüfkörper C2-3 ist ein reiner Biegeriss unmittelbar bei der Krafteinleitung zu erkennen. Der schmale Druckgurt bleibt bis zum Schluss intakt. Beim breiteren Prüfkörper E2-3 ist im Bereich mit aktivem Schub ein kombiniertes Biege- und Schubversagen ersichtlich. Der Versagensriss weist eine deutlich größere Neigung gegenüber dem Riss beim Prüfkörper C2-3 auf.

In Bild 13 sind die Last-Verformungs-Kurven der beiden Prüfkörper C2-3 und E2-3 dargestellt. Die Versuche erfolgten kraftgesteuert mit 0,1 kN/min. Nach Erreichen des maximalen Widerstands der Platte beschleunigt die Maschine bei abnehmendem Widerstand der Platte auf ihre Maximalgeschwindigkeit und wird manuell gestoppt, wenn die Platte keinen Widerstand mehr leistet oder

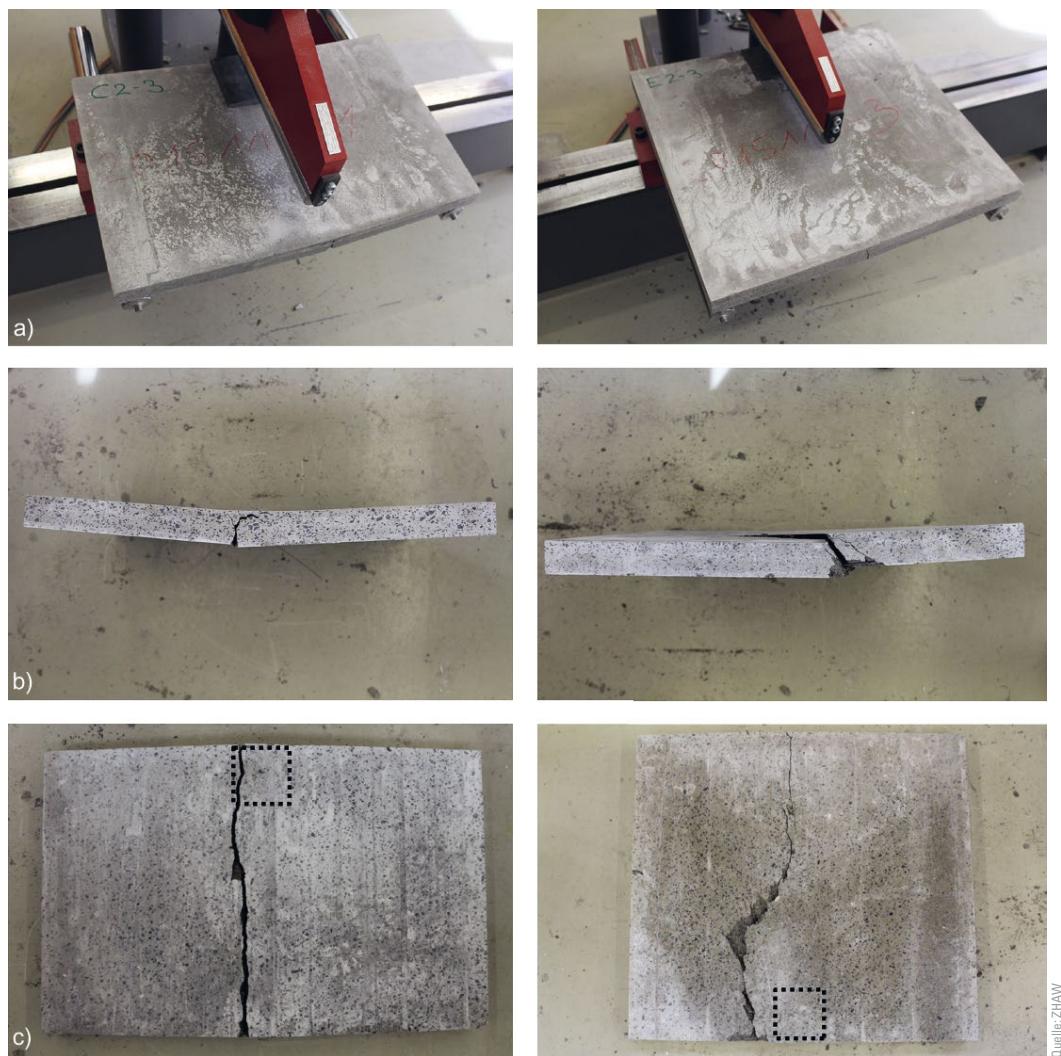
wenn der Versuch aufgrund eines sehr großen gefahrenen Weges abgebrochen werden muss.

## 5.2 Resultate Serie 4 am Dreifeldträger

In Tab. 6 sind die Resultate der Serie 4 dargestellt. Alle Versuche erfolgten kraftgeregt mit 0,1 kN/s.

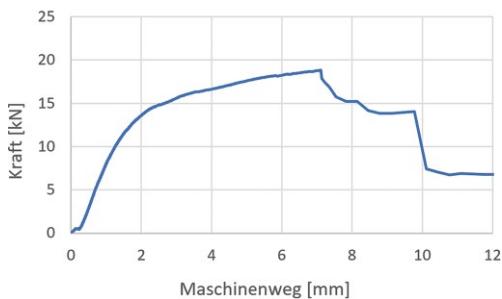
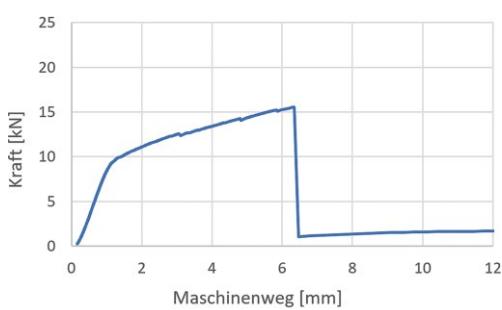
Am Dreifeldträger wurden zusätzlich Versuche mit zyklischer Vorbelastung durchgeführt. Die Resultate sind in Tab. 7 aufgeführt.

Auch bei der Serie 4 wiesen alle Platten einen Biegebruch mit Versagen der Zugbewehrung auf. Bei den meisten Prüfkörpern, z. B. C6-2, konnte ein Biegezugversagen über die gesamte Plattenbreite beobachtet werden. Die Biegerisse über den Auflagern sind deutlich sichtbar. Bei einzelnen Prüfkörpern, z. B. E6-2, hingegen



**Bild 12** Links: 350 mm breiter Prüfkörper C2-3 mit Biegeversagen; a) Prüfkörper bei Bruch; b) Seitenansicht nach Bruch, Oberseite ungerissen; c) Unterseite nach Bruch mit typischem Biegeriss; rechts: 500 mm breiter Prüfkörper E2-3 mit Biegeversagen; a) Prüfkörper bei Bruch; b) Seitenansicht nach Bruch, Oberseite angerissen; c) Unterseite nach Bruch mit typischem Biegeriss

Left: 350 mm wide panel C2-3 with bending failure; a) panel at fracture; b) side view after fracture, top side uncracked; c) bottom side after fracture with typical bending crack; right: 500 mm wide panel E2-3 with bending failure; a) panel at fracture; b) side view after fracture, top side cracked; c) bottom side after fracture with typical bending crack



**Bild 13** Last-Verformungs-Kurven der Prüfkörper C2-3 und E2-3  
Load-deformation curve of the panels C2-3 and E2-3

konnte ein lokales Versagen der Zugbewehrung infolge Biegezug im Bereich der Lasteinleitung mit anschließendem Schubbruch beobachtet werden. Es sind flache Risse unmittelbar neben der Lastplatte ersichtlich, typische Schubrisse, welche aber dem Nachbruch zuzuordnen sind (Bild 14).

In Bild 15 sind die entsprechenden Last-Verformungs-Kurven dargestellt. Die Versuche erfolgten kraftgesteuert mit 0,1 kN/min. Sobald die Platten versagten, beschleunigte die Maschine auf ihre Maximalgeschwindigkeit und musste manuell gestoppt werden.

Da beim Dreifeldträger mit einer Spannweite von 600 mm für breite Bohlen ( $\geq 300$  mm) rechnerisch der Querkraftwiderstand maßgebend ist, wurden zusätzlich drei Querkraftversuche durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tab. 8 dargestellt. Im durchgeföhrten Versuch wurde eine höhere Bruchlast als bei den Biegeversuchen erzielt. Bei den Biegeversuchen E6-1, E6-2, E7-3 wurden Bruchlasten von 29,1 kN, 27,8 kN, 29,0 kN er-

**Tab. 6** Resultate Serie 4 Biegeversuche  
Results series 4 bending test

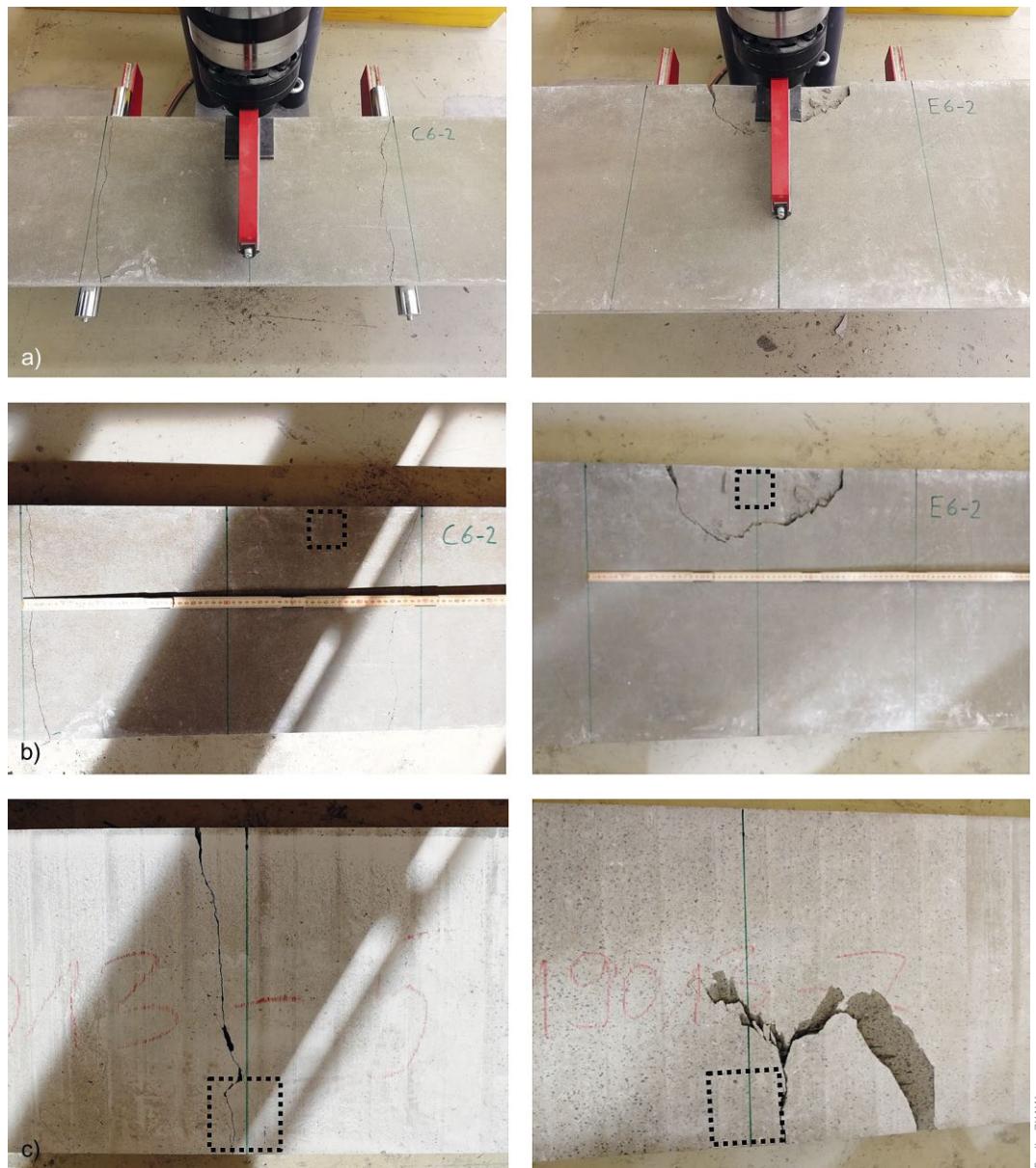
| Nr.  | Breite Probe $b$<br>[mm] | Spannweite<br>$L_{S,\text{rand}}/L_{S,\text{mitte}}/L_{S,\text{rand}}$<br>[mm] | Laststellung | Bruchlast $F_R$<br>[kN] | Anzahl Rovings<br>[Stk.] | Mittelwert $F_{R,m}$<br>[kN] |
|------|--------------------------|--|--------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|
| C5-1 | 350                      | 470/600/470  | mittig       | 20,1                    | 22                       |                              |
| C5-2 | 350                      | 470/600/470  | mittig       | 22,2                    | 23                       | 21,3                         |
| C5-3 | 350                      | 470/600/470  | mittig       | 21,5                    | 23                       |                              |
| C6-1 | 350                      | 470/600/470  | Rand         | 22,3                    | 24                       |                              |
| C6-2 | 350                      | 470/600/470  | Rand         | 22,1                    | 23                       | 22,2                         |
| C6-3 | 350                      | 470/600/470  | Rand         | 22,1                    | 23                       |                              |
| D3-1 | 400                      | 470/600/470  | mittig       | 26,0                    | 27                       |                              |
| D3-2 | 400                      | 470/600/470  | mittig       | 27,9                    | 27                       | 27,5                         |
| D3-3 | 400                      | 470/600/470  | mittig       | 28,6                    | 27                       |                              |
| D4-1 | 400                      | 470/600/470  | Rand         | 25,0                    | 27                       |                              |
| D4-2 | 400                      | 470/600/470  | Rand         | 25,3                    | 27                       | 25,6                         |
| D4-3 | 400                      | 470/600/470  | Rand         | 26,5                    | 27                       |                              |
| E5-1 | 500                      | 470/600/470  | mittig       | 31,1                    | 33                       |                              |
| E5-2 | 500                      | 470/600/470  | mittig       | 33,8                    | 33                       | 33,3                         |
| E5-3 | 500                      | 470/600/470  | mittig       | 35,1                    | 33                       |                              |
| E6-1 | 500                      | 470/600/470  | Rand         | 29,1                    | 33                       |                              |
| E6-2 | 500                      | 470/600/470  | Rand         | 27,8                    | 34                       | 28,6                         |
| E6-3 | 500                      | 470/600/470  | Rand         | 29,0                    | 33                       |                              |

**Tab. 7** Resultate Serie 4 mit zyklischer Vorbelastung  
Results series 4 with cyclical preloading

| Nr.  | Breite<br>Probe $b$<br>[mm] | Spannweite $L_S$<br>[mm] | Laststellung | Vorbelastung/Bruchprüfung  | Anzahl Rovings<br>[Stk.] | Bruchlast $F_R$<br>[kN] |
|------|-----------------------------|--------------------------|--------------|--|--------------------------|-------------------------|
| D3-4 | 400                         | 600                      | mittig       | 20.000 Zyklen 0–10 kN<br>2 kN/s (0,1 Hz)<br>Bruchprüfung: kraftgeregelt 0,1 kN/s | 26                       | 28,1                    |
| D3-5 | 400                         | 600                      | mittig       | 20.000 Zyklen 0–10 kN<br>2 kN/s (0,1 Hz)<br>Bruchprüfung: kraftgeregelt 0,1 kN/s | 26                       | 26,6                    |
| D3-6 | 400                         | 600                      | mittig       | 100.000 Zyklen 0–15 kN<br>2 kN/s (0,07 Hz)                                       |                          |                         |
|      |                             |                          | Rand         | 20.000 Zyklen 0–10 kN<br>2 kN/s (0,1 Hz)   |                          |                         |
|      |                             |                          | Rand         | 20.000 Zyklen 0–12,5 kN<br>2 kN/s (0,08 Hz)                                      |                          |                         |
|      |                             |                          | Rand         | 100.000 Zyklen 0–15 kN<br>2 kN/s (0,07 Hz)                                       | 27                       | 25,2                    |
|      |                             |                          | Rand         | 20.000 Zyklen 0–17,5 kN<br>2 kN/s (0,06 Hz)                                      |                          |                         |
|      |                             |                          | Rand         | 20.000 Zyklen 0–20 kN<br>2 kN/s (0,05 Hz)  |                          |                         |
|      |                             |                          | Rand         | Bruchprüfung: kraftgeregelt 0,1 kN/s   |                          |                         |

reicht. Da die Querkraftversuche nur bei einer Versuchsanordnung erfolgten, ist die Aussagekraft eingeschränkt. Es sind weitere Versuche mit anderen Geometrien erforderlich.

In Bild 16 ist der Querkraftversuch E8-1 abgebildet. Es zeigte sich auch hier ein lokales Versagen der Zugbewehrung mit anschließendem Schubbruch. Das initiale Versagen der Carbonfaserstränge vor dem Versagen



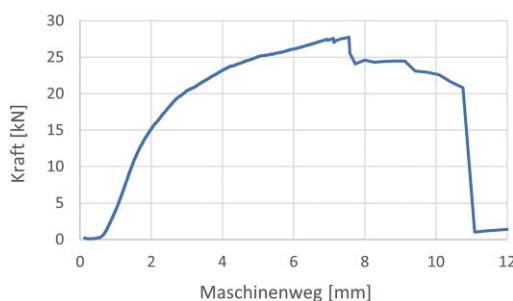
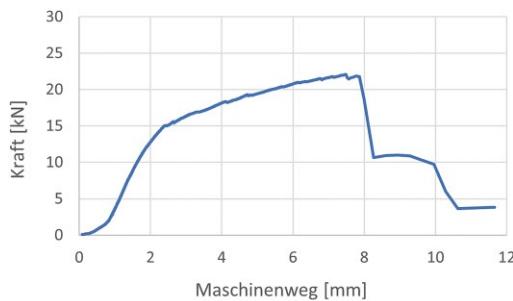
**Bild 14** Links: 350 mm breiter Prüfkörper C6-2 mit typischem Biegeversagen; a) Prüfkörper bei Bruch; b) Oberseite nach Bruch mit Biegerissen bei Auflagern; c) Unterseite nach Bruch mit Biegeriss unter Last; rechts: 500 mm breiter Prüfkörper E6-2 mit lokalem Biegeversagen und anschließendem Schubbruch; a) Prüfkörper bei Bruch; b) Oberseite nach Bruch mit Schubrissen; c) Unterseite nach Bruch  
Left: 350 mm wide panel C6-2 with typical bending failure; a) panel at fracture; b) top side after fracture with bending cracks at support; c) bottom side after fracture with bending cracks under load; right: 500 mm wide panel E6-2 with local bending failure and subsequent shear fracture; a) panel at fracture; b) top side after fracture with shear cracks; c) bottom side after fracture

**Tab. 8** Resultat Querkraftversuch  
Results shear force test

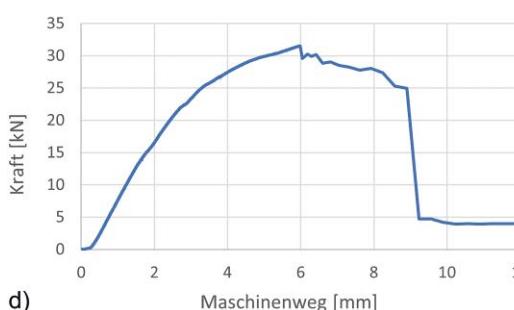
| Nr.  | Breite Probe $b$<br>[mm] | Spannweite<br>$L_{S,\text{rand}}/L_{S,\text{mitte}}/L_{S,\text{rand}}$<br>[mm] | Laststellung | Bruchlast $F_R$<br>[kN] | Anzahl Rovings<br>[Stk.] | Mittelwert $F_{R,m}$<br>[kN] |
|------|--------------------------|--|--------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|
| E8-1 | 500                      | 470/600/470  | Rand         | 31,5                    | 33                       |                              |
| E8-2 | 500                      | 470/600/470  | Rand         | 27,1                    | 33                       | 28,6                         |
| E8-3 | 500                      | 470/600/470  | Rand         | 27,2                    | 33                       |                              |

des Betons war bei allen durchgeführten Versuchen deutlich hörbar. Über den Auflagern sind deutliche Biegerisse zu erkennen. Der schlussendlich ausgebrochene Kegel weist eine sehr flache Neigung auf, was

auf einen nachträglichen Schubbruch zurückzuführen ist.



**Bild 15** Last-Verformungs-Kurven der Prüfkörper C6-2 und E6-2  
Load-deformation curve of the panels C6-2 and E6-2



Quelle: ZHAW

**Bild 16** Querkraftversuch E8-1; a) Prüfkörper bei Versuchsbeginn; b) Oberseite nach Bruch; c) Unterseite nach Bruch; d) Last-Verformungs-Kurve  
Shear force test; a) test panel at the beginning of the test; b) top side after fracture; c) bottom side after fracture; d) load-deformation curve

## 6 Rechnerische Nachweise Einzellast

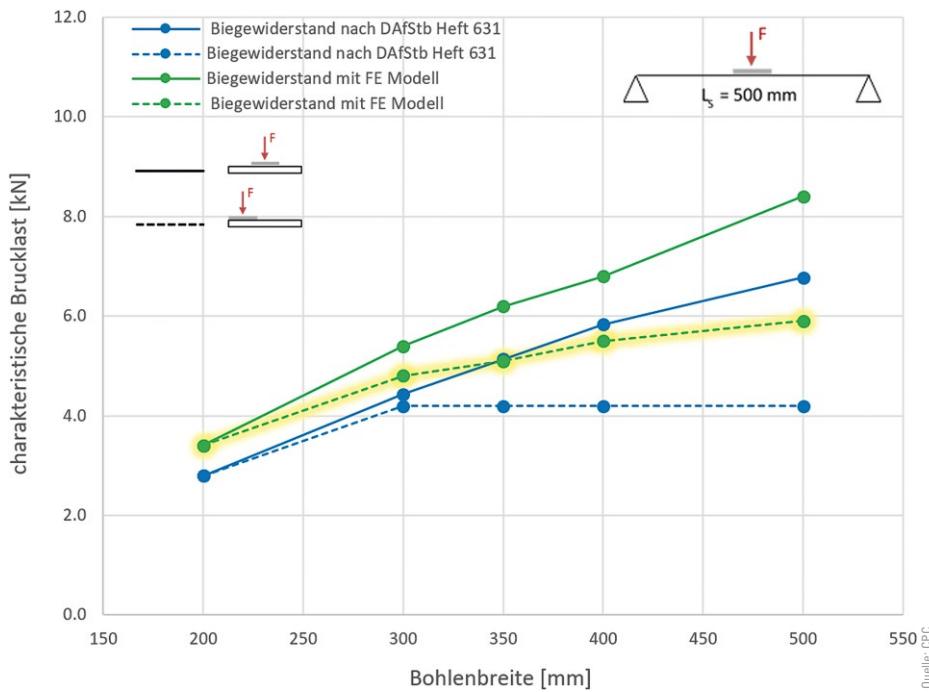
### 6.1 Erläuterungen

Im Folgenden werden die beiden nach DIBt zulässigen Möglichkeiten zur Nachweisführung (vgl. Abschn. 2) gegenübergestellt. Es werden jeweils der Biege- sowie der Querkraftnachweis geführt. Dabei wird jeweils die ungünstigste Laststellung betrachtet. Das bedeutet eine Laststellung bei  $L/2$  für den Biegenachweis und eine Laststellung in doppelter Plattenhöhe vom Auflager entfernt für den Querkraftnachweis. Die rechnerischen Widerstände werden hier exemplarisch für die an der ZHAW durchgeföhrten Versuchskonfigurationen ermittelt (vgl. Abschn. 4). Das heißt, es wurden Einfeldträger mit 500 mm Spannweite, Einfeldträger mit 1000 mm Spannweite sowie Dreifeldträger mit 600 mm Spannweite betrachtet. Es wurden jeweils Bohlen mit verschiedenen Breiten zwischen 200 und 500 mm betrachtet. Die Lasteinleitung erfolgte jeweils einmal mittig und einmal am Plattenrand (Bild 10). Alle betrachteten Bohlen bestehen aus CPC-40-2-2-Platten.

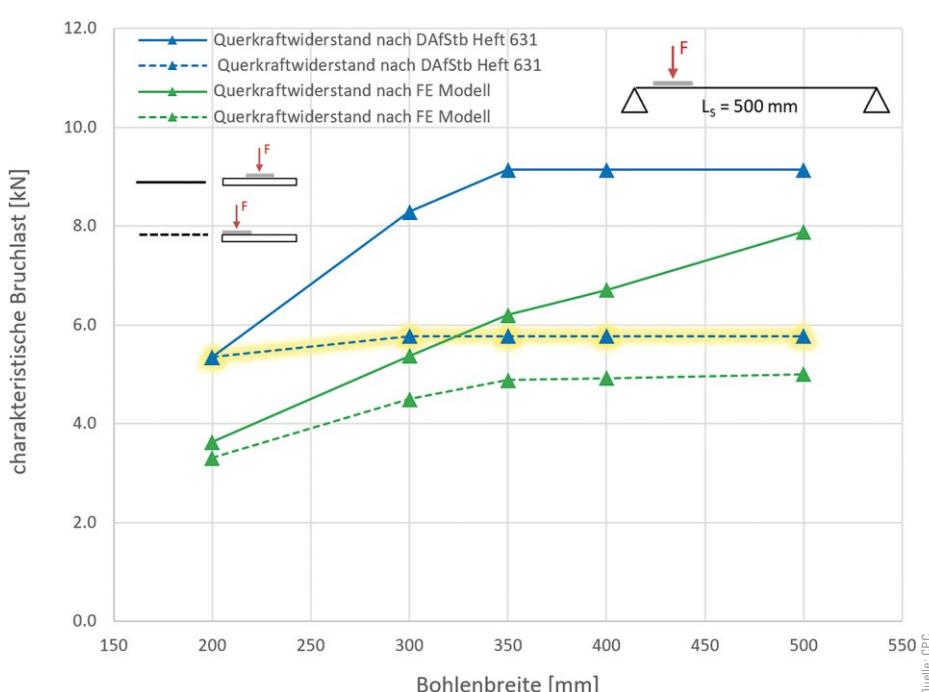
### 6.2 Einfeldträger mit einer Spannweite von 500 mm

In Bild 17 sind die rechnerisch erhaltenen Bruchlasten auf charakteristischem Niveau für eine Biegebelastung bei  $L/2$  dargestellt. Es wurden jeweils die beiden Laststellungen mittig und am Plattenrand betrachtet. Dabei ist immer die Belastung am Plattenrand die maßgebende Laststellung. Es wurden die beiden Bemessungsansätze, die gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung des DIBt zugelassen sind [3], nach DAfStb-Heft 631 und mithilfe eines FE-Modells gegenübergestellt. Für den Biegenachweis für Einfeldträger mit einer Spannweite von 500 mm erzielt die Bemessung mithilfe eines FE-

Modells die höheren Bruchlasten und ist somit maßgebend. In Bild 18 folgt die gleiche Gegenüberstellung für eine Querkraftbelastung in doppelter Plattenhöhe vom Auflager entfernt. Für den Querkraftnachweis erzielt die Bemessung nach DAfStb-Heft 631 die höheren Bruchlasten. Bis zu einer Bohlenbreite von 400 mm wird für einen Einfeldträger mit einer Spannweite von 500 mm rechnerisch der Biegewiderstand maßgebend. Für die Bohle mit 500 mm Breite wurde der Querkraftwiderstand maßgebend.



**Bild 17** Vergleich der rechnerisch bestimmten charakteristischen Bruchlasten nach den beiden Bemessungsansätzen; die maßgebenden Werte sind gelb hinterlegt  
Comparison of the computationally determined characteristic failure loads according to the two design approaches; the decisive values are highlighted in yellow

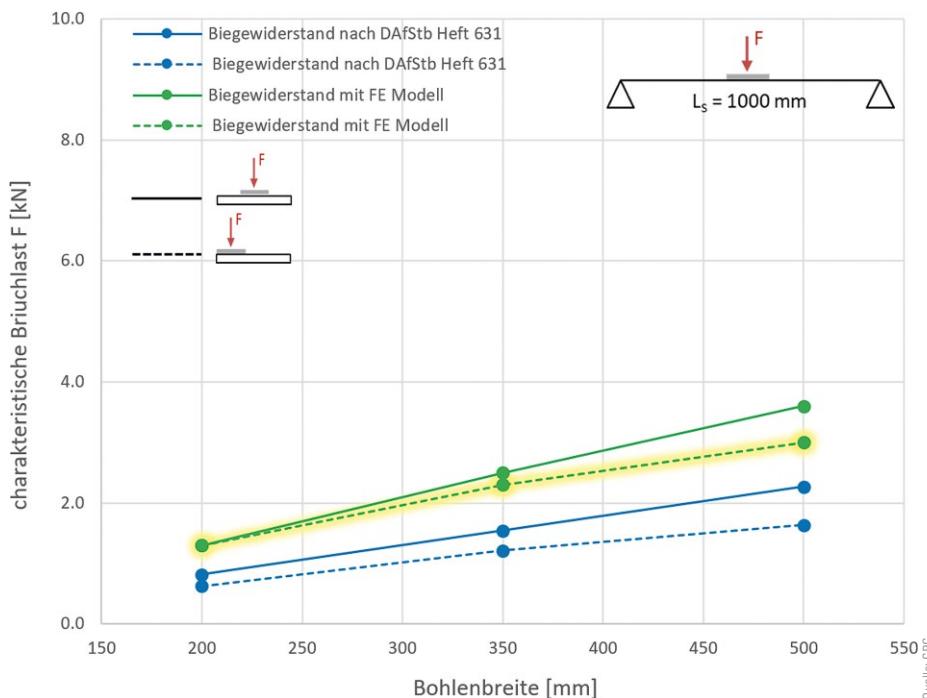


**Bild 18** Vergleich der rechnerisch bestimmten charakteristischen Bruchlasten nach den beiden Bemessungsansätzen; die maßgebenden Werte sind gelb hinterlegt  
Comparison of the computationally determined characteristic failure loads according to the two design approaches; the decisive values are highlighted in yellow

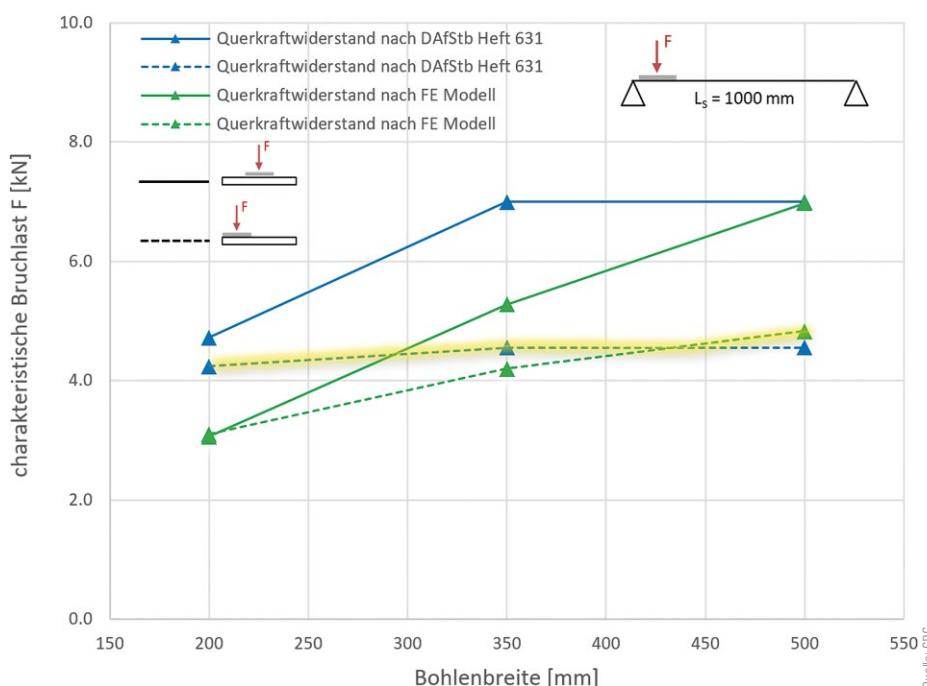
### 6.3 Einfeldträger mit einer Spannweite von 1000 mm

In den Bildern 19 und 20 sind die beiden Berechnungsmöglichkeiten für den Biege- und Querkraftnachweis bei einem Einfeldträger mit einer Spannweite von 1000 mm dargestellt. Für den Biegenachweis erzielt die Bemessung mithilfe eines FE-Modells die höheren Bruchlasten und ist somit maßgebend. Beim Querkraft-

nachweis werden bei Bohlenbreiten von 200 mm und 350 mm mit der Bemessung nach DAfStb-Heft 631 höhere Bruchlasten errechnet und sind somit maßgebend. Bei einer Bohlenbreite von 500 mm werden mit der Bemessung mit einem FE-Modell höhere Lasten erzielt. Rechnerisch wird für Einfeldträger mit einer Spannweite von 1000 mm insgesamt der Biegewiderstand maßgebend.



**Bild 19** Vergleich der rechnerisch bestimmten charakteristischen Bruchlasten nach den beiden Bemessungsansätzen; die maßgebenden Werte sind gelb hinterlegt  
Comparison of the computational determined characteristic failure loads according to the two design approaches; the decisive values are highlighted in yellow

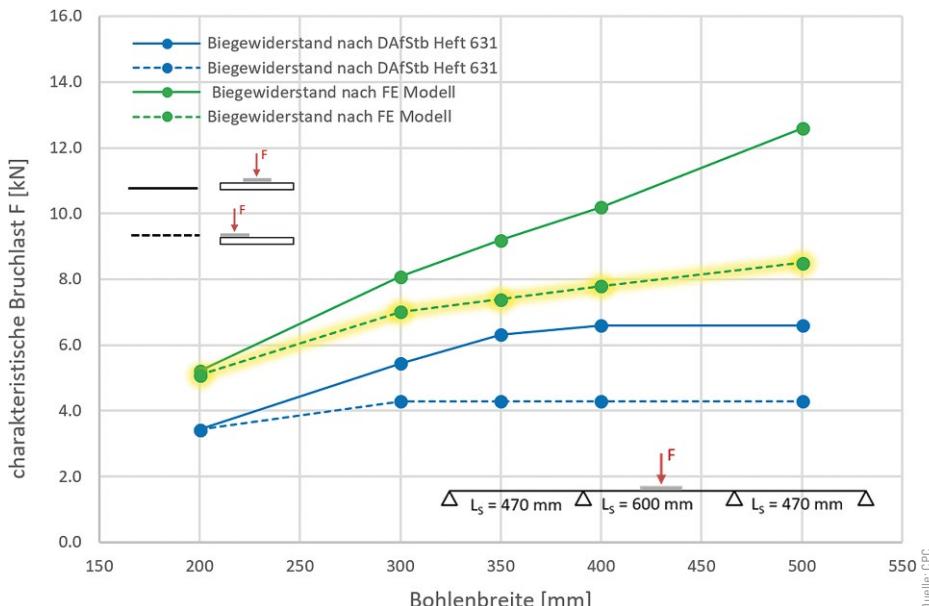


**Bild 20** Vergleich der rechnerisch bestimmten charakteristischen Bruchlasten nach den beiden Bemessungsansätzen; die maßgebenden Werte sind gelb hinterlegt  
Comparison of the computational determined characteristic failure loads according to the two design approaches; the decisive values are highlighted in yellow

#### 6.4 Dreifeldträger mit einer Spannweite von 600 mm

In den Bildern 21 und 22 sind die beiden Berechnungsmöglichkeiten für den Biegenachweis und den Querkraftnachweis bei einem Dreifeldträger mit Spannweiten von 600 mm dargestellt. Für den Biegenachweis erzielt die Bemessung mithilfe eines FE-Modells die höheren Bruch-

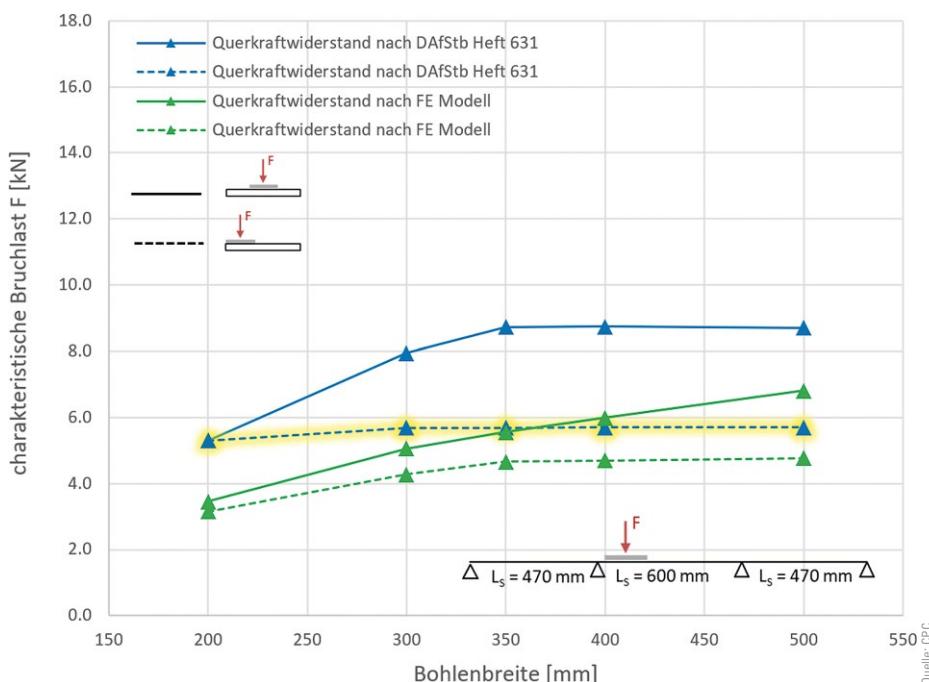
lasten. Für den Querkraftnachweis erzielt die Bemessung nach DAFStb-Heft 631 die höheren Bruchlasten. Insgesamt wird nur für die schmalste Bohle mit einer Breite von 200 mm der Biegenachweis maßgebend. Für alle breiteren Bohlen wird der Querkraftnachweis maßgebend.



Quelle: CPC

**Bild 21** Vergleich der rechnerisch bestimmten charakteristischen Bruchlasten nach den beiden Bemessungsansätzen; die maßgebenden Werte sind gelb hinterlegt

Comparison of the computationally determined characteristic failure loads according to the two design approaches; the decisive values are highlighted in yellow



Quelle: CPC

**Bild 22** Vergleich der rechnerisch bestimmten charakteristischen Bruchlasten nach den beiden Bemessungsansätzen; die maßgebenden Werte sind gelb hinterlegt

Comparison of the computationally determined characteristic failure loads according to the two design approaches; the decisive values are highlighted in yellow

## 7 Vergleich Bemessung mit Versuchen

### 7.1 Umrechnungsfaktoren

Um die gemessenen Werte mit den berechneten Werten vergleichen zu können, wird die experimentell erzielte Bruchkraft nun in eine charakteristische Belastung umgerechnet (Messwert abgemindert). Da immer ein Zugversagen in den Rovings auftritt, werden die Ergebnisse aus

den Zulassungsversuchen [8] für den Abminderungsfaktor der Zugfestigkeit der Carbondrähte für die Beurteilung der Biegefestigkeit der Platten herangezogen. Der Umrechnungsfaktor setzt sich wie in Tab. 9 aufgelistet zusammen. Der Faktor auf der Widerstandsseite bezeichnet das Verhältnis zwischen der experimentell ermittelten mittleren Zugfestigkeit von  $4835,7 \text{ kN/mm}^2$  [8] und dem angesetzten Bemessungswert auf Designniveau von  $3030 \text{ N/mm}^2$  [3]. Der Faktor auf der Einwirkungsseite

**Tab. 9** Umrechnungsfaktoren von gemessenen Werten zur charakteristischen Bruchlast bei Biegebeanspruchung; Werte gemäß [3, 8]  
Conversion factors from the measured values to the characteristic breaking load under bending stress; values according to [3, 8]

| Faktor                           | Wert   |
|----------------------------------|--|
| Widerstandsseite                 | $\frac{3030 \text{ N/mm}^2}{4835,7 \text{ N/mm}^2} = 0,62$ |
| Einwirkungsseite                 | $\frac{1}{1,5} = 0,67$                                     |
| <b>Totaler Umrechnungsfaktor</b> | <b>0,418</b>   |

berücksichtigt den Teilsicherheitsbeiwert für Nutzlasten von 1,5. Der totale Umrechnungsfaktor bildet das Produkt der beiden Faktoren.

Da bei der Querkraftbemessung gemäß [3] nicht die Zugbewehrung maßgebend wird, ergäbe sich ein anderer Umrechnungsfaktor zur Abminderung der Werte aus Querkraftversuchen als bei den Werten aus Biegeversuchen. Da allerdings alle bis anhin durchgeföhrten Querkraftversuche auf Biegung mit anschließendem Schubbruch versagten (vgl. auch [8]), kann experimentell kein Querkraftwiderstand ermittelt und somit auch nicht mit dem Rechenmodell verglichen werden. Die durchgeföhrten Querkraftversuche versagten alle auf Biegung und werden daher ebenfalls mit dem in Tab. 9 ermittelten Faktor abgemindert.

## 7.2 Vergleich Einfeldträger mit Spannweite 500 mm

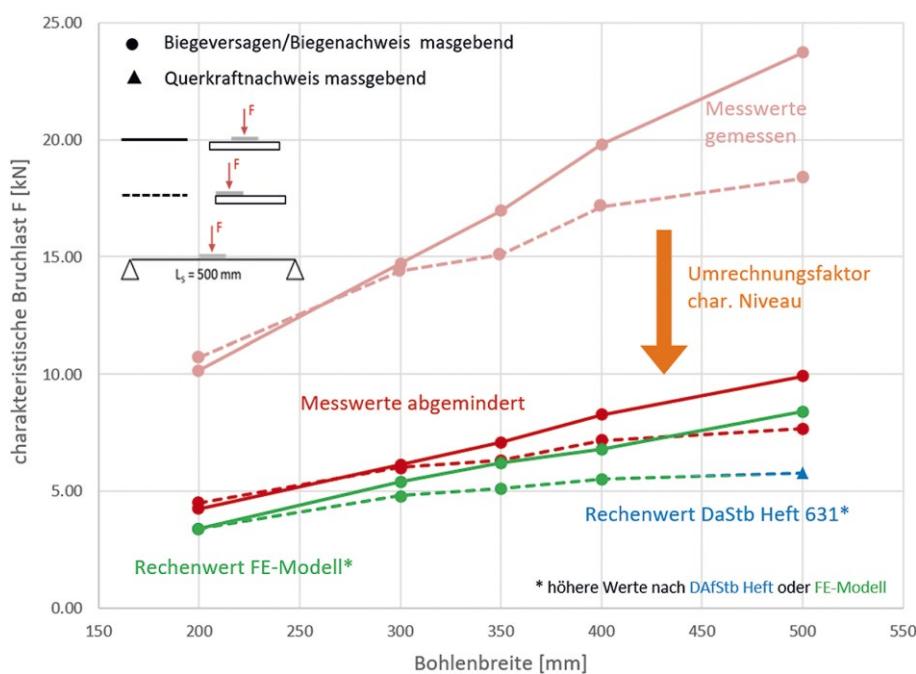
In Bild 23 ist der Vergleich der experimentell und rechnerisch bestimmten Werte dargestellt. Es wird jeweils der maßgebende rechnerische Wert der beiden Berechnungsansätze für eine mittige sowie eine asymmetrische Belastung dargestellt. Die Reserve beim Vergleich auf gleichem Niveau (charakteristisches Niveau) liegt bei 15–25%. Wobei die Reserve bei den am Rand belasteten Platten größer ist als bei den mittig belasteten Platten. Die abgeminderten Messwerte liegen immer über den berechneten Werten.

## 7.3 Vergleich Einfeldträger mit Spannweite 1000 mm

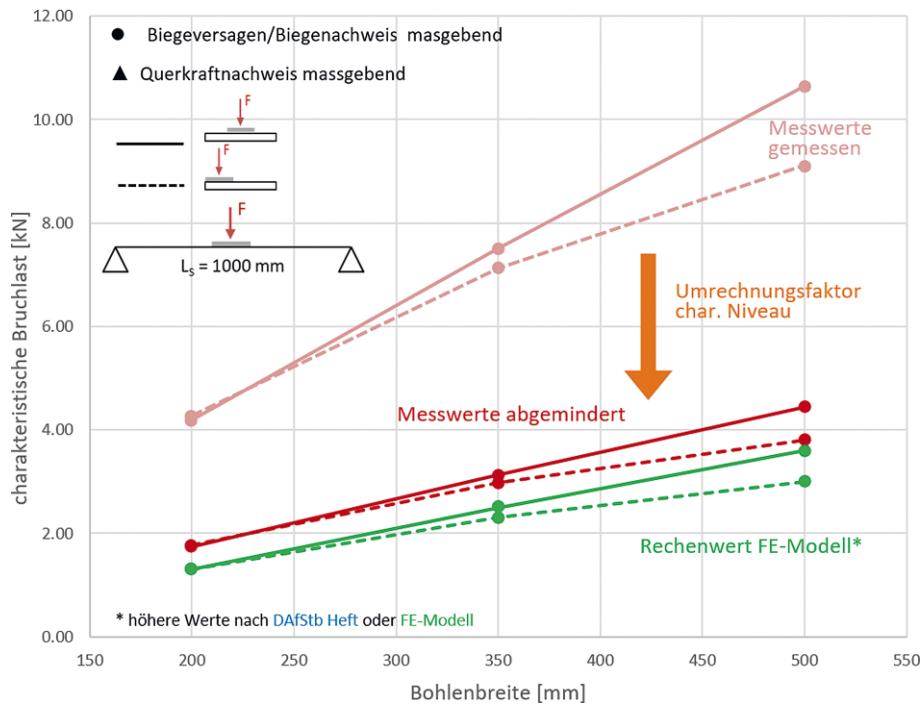
In Bild 24 sind die Ergebnisse der Serie 3 mit einer Spannweite von 1000 mm den rechnerischen Werten gegenübergestellt. Auch hier sind ähnliche Ergebnisse sichtbar wie bei den Platten mit einer Spannweite von 500 mm. Die Reserven liegen mit 20–25 % etwas höher. Wobei auch hier die Reserve bei den am Rand belasteten Platten größer ist als bei den mittig belasteten Platten.

## 7.4 Vergleich Dreifeldträger mit Spannweite 600 mm

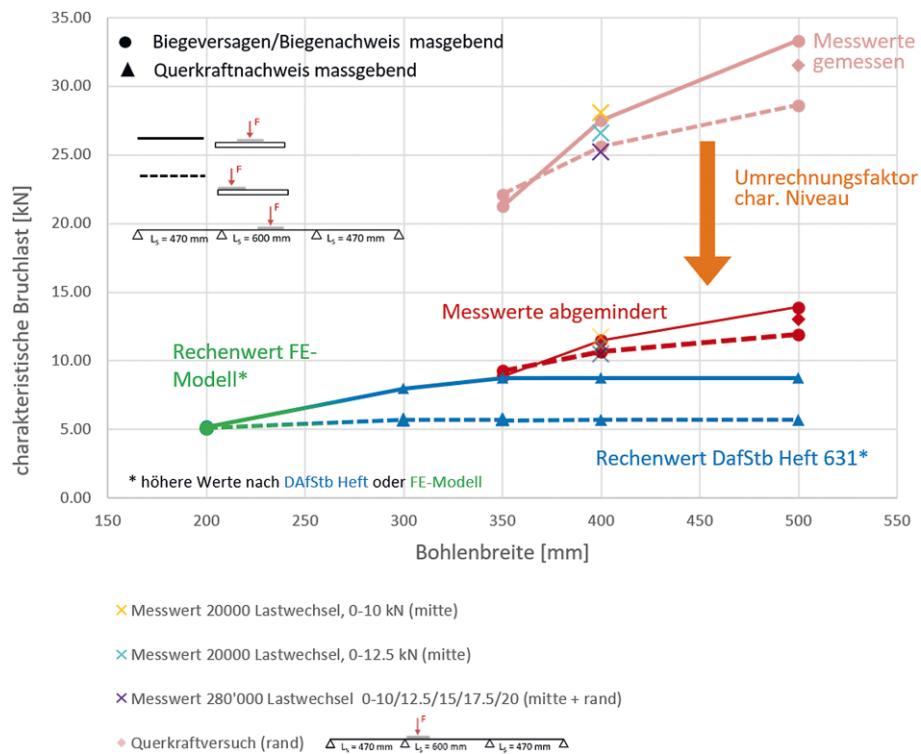
In Bild 25 sind die Ergebnisse am Dreifeldträger (Serie 4) den rechnerischen Bruchlasten gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Differenzen bei einem Dreifeldträger deutlicher ausfallen als bei Einfeldträgern. Vor allem mit zunehmender Bohlenbreite werden die vorhandenen Reserven sehr groß. Zum Beispiel können die 500 mm breiten Platten doppelt so stark



**Bild 23** Vergleich der experimentell und rechnerisch bestimmten Bruchlasten  
Comparison of the experimentally and computational determined breaking loads



**Bild 24** Vergleich der experimentell und rechnerisch bestimmten Bruchlasten  
Comparison of the experimentally and computational determined breaking loads

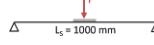


**Bild 25** Vergleich der experimentell und rechnerisch bestimmten Bruchlasten  
Comparison of the experimentally and computational determined breaking loads

belastet werden, als es die Bemessung zulässt. Dies liegt hauptsächlich an der geringen angesetzten mitwirkenden Breite für den Querkraftnachweis bei Dreifeldträgern. Experimentell konnte nicht bestätigt werden, dass ab einer gewissen Bohlenbreite der Querkraftwiderstand maßgebend wird. Alle Versuchsplatten wiesen ein initiales Biegeversagen auf.

Zusätzlich werden hier die Bruchlasten nach zyklischen Lastwechseln dargestellt. Die genaue Belastung kann der Tab. 7 entnommen werden. Trotz sehr hoher zyklischer Vorbelastung im Rissbereich der Platte nimmt die Bruchlast nicht signifikant ab. Ein momentan noch laufender Versuch mit über 3,1 Millionen Lastwechseln im Rissbereich der Platte zeigt das gleiche Bild, keine Veränderung im Last-Verformungs-Verhalten über die Versuchsdauer.

**Tab. 10** Ausnutzungsgrad von Belagsbohlen CPC 40-2-2 verschiedener Breiten, gerechnet mit den heutigen, vom DIBt zugelassenen Berechnungsmodellen; maßgebend sind die Belastungen am Rand  
Utilisation rate of CPC 40-2-2 panels of various widths, calculated with the current calculation models approved by DIBt; the loads at the edge are decisive

| Bohlenbreite in mm  | 200  | 300  | 350  | 400  | 500  |
|---|------|------|------|------|------|
|  | 75 % | 80 % | 80 % | 75 % | 75 % |
|  | 75 % | -    | 75 % | -    | 80 % |
|  | -    | -    | 60 % | 55 % | 50 % |

## 8 Fazit

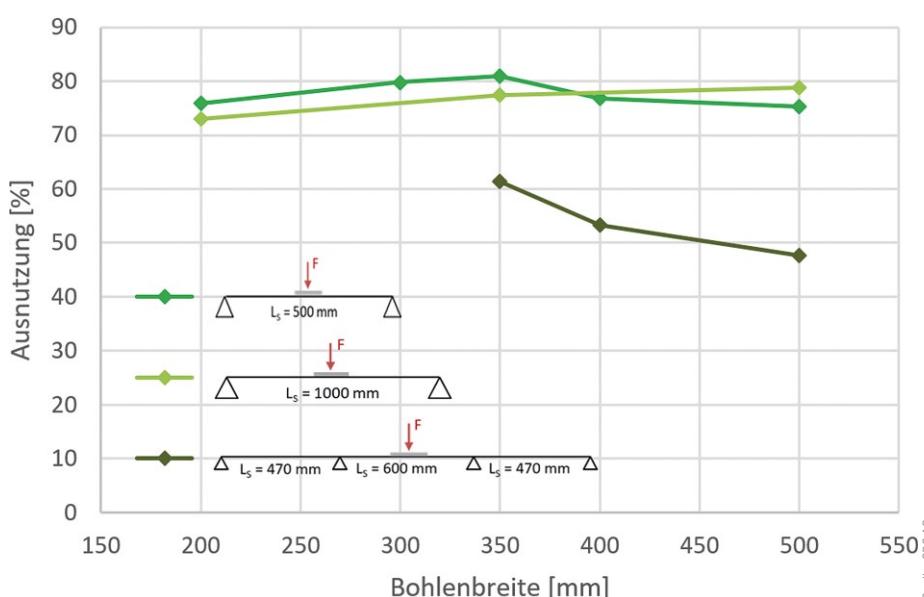
Bei Einfeldträgern ist je nach Breite der Bohlen die Bemessung auf Biegung oder Querkraft maßgebend. Bei schmalen Einfeldträgern ist rechnerisch die Biegebemesung maßgebend. In diesen Fällen liefert die Bemessung mit dem FE-Modell die höheren Traglasten und ist somit maßgebend. Ab einer gewissen Breite wird der Querkraftnachweis maßgebend, wo das Verfahren nach DAfStb-Heft 631 die höheren Werte liefert. Die Ausnutzung (bei der Anordnung der Last am Rand) liegt für beide betrachteten Spannweiten zwischen 75 und 85 %, wenn man die Berechnungen mit den Versuchsresultaten auf Designniveau vergleicht.

Bei Durchlaufträgern hingegen ist mehrheitlich der Querkraftnachweis maßgebend und es sind bei den Berechnungsmodellen sehr deutliche Reserven gegenüber den abgeminderten Versuchsresultaten vorhanden. Diese werden mit zunehmender Breite immer größer. Dies ist hauptsächlich damit zu begründen, dass die mitwirkende Breite für den Querkraftnachweis bei Durchlaufträgern zu konservativ gewählt wird.

Die Versuche zeigen, dass mit einem Dreifeldträger im mittleren Feld mit einer Spannweite von 600 mm ab einer Bohlenbreite von 400 mm eine charakteristische Einzellast von 10 kN auf einer Aufstandsfläche von  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  aufgenommen werden kann. Dies würde den Lastfall eines Unterhaltsfahrzeugs abdecken, was eine Vielzahl von neuen Anwendungen ermöglichen würde. Dieser Nachweis kann mit den heutigen, sehr konservativ ausgelagerten Rechenmodellen nicht erbracht werden. In Tab. 10 und Bild 26 sind die Ausnutzungen der Belagsbohlen dargestellt. Es werden die maßgebenden abgeminderten Messwerte mit den Rechenwerten auf Designniveau verglichen.

## 9 Ausblick

Es kann davon ausgegangen werden, dass in Zukunft weiter in die Forschung zur Tragwirkung von CPC-Platten investiert wird. Durch das bessere Verständnis ist eine Erhöhung der Bemessungswiderstände zu erwarten. Insbesondere beim Abtrag von Einzellasten bei Durchlaufträgern kann mit Anpassungen in den Bemessungsrichtlinien gerechnet werden. Durch die Vielzahl der bisher durchgeföhrten Versuche konnte gezeigt werden, dass in den CPC-Platten deutliche Reserven vorhanden sind, welche mit zunehmender Bohlenbreite immer größer werden. Da in den bisherigen Versuchen nie ein Querkraftversagen erzeugt werden konnte, ist vorstellbar, dass in Zukunft komplett auf einen Querkraftnachweis verzichtet werden kann. Zudem ist zu erwarten, dass in Zukunft weitere Anwendungen von CPC-Platten zugelassen werden. Beispielsweise die punktförmige Lagerung sowie zusätzliche Beanspruchungsarten wie Platten mit großen Öffnungen oder die Scheibentragweise, für welche die CPC-Platten sehr geeignet sind.



**Bild 26** Momentan mögliche Ausnutzung der Belagsbohlen CPC40-2-2, gerechnet mit den heutigen, vom DIBt zugelassenen Berechnungsmodellen  
Utilisation rate of the CPC40-2-2 decking panels calculated with the current calculation models approved by DIBt

## Literatur

- [1] DIN EN 206 (2017) *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Berlin: Beuth.
- [2] DIN EN 1992-1-1 (2011) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth.
- [3] Deutsches Institut für Bautechnik DIBt (2021) *Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung*. Berlin.
- [4] DIN EN 1992-1-1/NA (2013) *Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter-Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth.
- [5] Rusch, M.; Brunner, M.; Kurath, J. (2022) *CPC – Eine neue Betonbauweise – Bemessungskonzept*. Bauingenieur, H. 8, S. 227–239.
- [6] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2019) *Hilfsmittel zur Schnittgrößenermittlung und zu besonderen Detailnachweisen bei Stahlbetontragwerken*, DAfStb-Heft 631. Berlin: Beuth.
- [7] Kurath, J.; Lowiner, C.; Bühler, M. (2020) *cpc-Forschung, Punktlasten auf cpc Bohlen Stempelversuch 10cm × 10cm*. ZHAW, Winterthur. Interne Bericht
- [8] Tue, N. V. (2021) *Abschlussbericht und Stellungnahme über Versuche mit vorgespannten Carbon-Betonbauteile (CPC-Bauteile) im Rahmen der Beantragung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung beim DIBt*. TU Graz.
- [9] DIN EN 1992-1-1 (2022) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth.

## Autor:innen



Mona Rusch, MSc ETH (Korrespondenzautorin)  
mona.rusch@cpcag.ch  
CPC AG  
Niederfeldstrasse 5  
8450 Andelfingen, Schweiz



Christian Lowiner, BSc ZFH  
christian.lowiner@zhaw.ch  
ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte  
Wissenschaften  
Zentrum Bautechnologie und Prozesse ZBP  
Tössfeldstrasse 27  
8400 Winterthur, Schweiz



Prof. Josef Kurath  
josef.kurath@zhaw.ch  
ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte  
Wissenschaften  
Zentrum Bautechnologie und Prozesse ZBP  
Tössfeldstrasse 27  
8400 Winterthur, Schweiz

## Zitieren Sie diesen Beitrag

Rusch, M.; Lowiner, C.; Kurath, J. (2023) *Große Tragreserven bei Einzellasten auf CPC-Platten*. Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 8, S. 589–606. <https://doi.org/10.1002/best.202300004>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.  
Eingereicht: 16. Januar 2023; angenommen: 27. April 2023.