

## ANHANG 3.01-2 BEISPIEL 2

## Bemessung einer Carbonbetonverstärkung unter Anwendung eines CARBorefit®-Typ 3 Carbongitters

Bei Fragen/Anmerkungen  
zu kontaktieren:

E-Mail: [info@carborefit.de](mailto:info@carborefit.de)  
Telefon: +49351 48205 521

Stand: 07.01.2025

Bei dem nachfolgenden Dokument handelt es sich um ein Beispiel, welches die Bemessung einer Carbonbetonverstärkungsschicht auf Basis der aktuell gültigen abZ/aBG Z-31.10-182 „CARBorefit®-Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton“ [1] umfasst. Es wird keine Gewährleistung für Vollständigkeit oder Fehler gegeben. Eine Vervielfältigung dieses Dokuments darf nur vollständig erfolgen.

### 1 Ausgangssituation

In einem Bürogebäude soll ein ehemaliger Büroraum umgenutzt werden. Die Nutzlast wird durch diese neue Belastung signifikant gesteigert, wodurch die Decke nachträglich verstärkt werden muss. An der Unterseite der Decke soll eine Carbonbetonschicht angebracht werden. Die Ausführung und Bemessung erfolgt nach abZ/aBG Z-31.10-182 [1].

Bestandsunterlagen inklusive statischer Berechnungen liegen nur bedingt vor. Die Bestandsdecke ist als einachsige gespannte einfeldrige Platte ausgeführt. Die Belastungen im trockenen Innenraum sind als vorwiegend ruhend zu betrachten.

Die nachfolgenden Berechnungen werden auf einen Streifen von 1 m Breite bezogen.

### 2 Systemlängsschnitt und statisches System

In der nachfolgenden Abbildung sind der Längsschnitt durch die Decke sowie das statische System der Decke dargestellt.

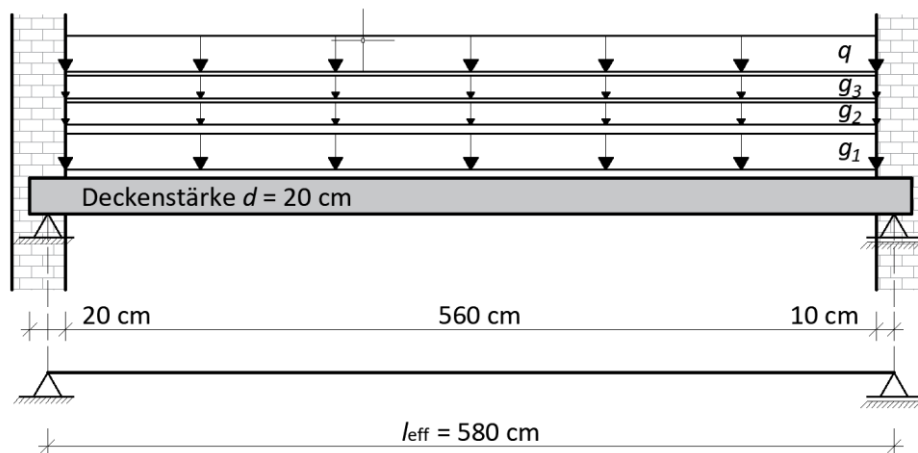


Abbildung 1: Oben: Längsschnitt durch die Decke mit einwirkenden Lasten, unten: statisches System der Decke in Längsrichtung

### 3 Effektive Stützweite

Die effektive Stützweite wird wie folgt bestimmt:

$$l_{\text{eff}} = l_n + a_1 + a_2 = 5,60 \text{ m} + 0,10 \text{ m} + 0,10 \text{ m} = 5,80 \text{ m}$$

### 4 Baustoffe der Bestandskonstruktion

#### 4.1 Beton

##### Oberflächenzugfestigkeit

Der Erwartungswert des Mittelwertes (95 % Zuverlässigkeit) der Oberflächenzugfestigkeit des Betons  $f_{ctm,surf}$  muss nach Abschnitt 1.2 der abZ/aBG [1] größer sein als  $1,0 \text{ N/mm}^2$ . Aufschluss über die Oberflächenzugfestigkeit des Bestandsbetons geben Bauteilprüfungen gemäß DIN EN 1542 [2]. Die Einzelwerte der Prüfungen sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

**Tabelle 1: Einzelwerte der Oberflächenzugfestigkeit des Bestandsbetons aus der Prüfung am Bauteil**

| Anzahl der Prüfungen $n$         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|
| $f_{ctm,surf,i} [\text{N/mm}^2]$ | 2,70 | 2,10 | 2,20 | 2,50 | 2,50 |

Statistische Auswertung der Stichproben nach abZ/aBG [1], Anhang 6:

- Arithmetisches Mittel:  $m_x = 2,40 \text{ N/mm}^2$
- Standardabweichung des Stichprobenumfangs:  $s = 0,24$
- Faktor:  $k_n (n = 5) = 0,953$
- Erwartungswert des Mittelwertes (95 % Zuverlässigkeit):

$$f_{ctm,surf} = m_x - k_n \cdot s = 2,40 \text{ N/mm}^2 - 0,953 \cdot 0,24 = 2,17 \text{ N/mm}^2 > 1,0 \text{ N/mm}^2$$

##### Betondruckfestigkeit

Aus den Bestandsunterlagen geht hervor, dass es sich bei dem Bestandsbeton um einen B35 nach DIN 1045 (1988-07) [3] handelt. Die Bauteilprüfung gemäß DIN EN 1542 [2] ergab die Einordnung des Betons in die heutige Festigkeitsklasse C30/37. Daraus ergeben sich folgende Eigenschaften:

Charakteristische Druckfestigkeit:  $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$

Teilsicherheitsbeiwert (ständig und vorrübergehend):  $\gamma_c = 1,5$

Bemessungsdruckfestigkeit:  $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 \cdot \frac{30 \text{ N/mm}^2}{1,5} = 17 \text{ N/mm}^2$

E-Modul:  $E_{cm} = 33.000 \text{ N/mm}^2$

#### 4.2 Bestandsstahl

Nach DIN 1045 (1988-07) [3] bzw. DIN 488-2 (1986-06) [4] handelt es sich bei dem Bestandsstahl um einen BSt 500 S (IV S, nicht verwunden). Die Eigenschaften sind wie folgt definiert:

Charakteristische Streckgrenze:  $f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$

Teilsicherheitsbeiwert (ständig und vorrübergehend):  $\gamma_s = 1,15$

Bemessungsfestigkeit:  $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500 \text{ N/mm}^2}{1,15} = 435 \text{ N/mm}^2$

E-Modul:  $E_{sm} = 200.000 \text{ N/mm}^2$

Bestandsuntersuchungen ergaben die folgende Bewehrungsmengen:

Längsbewehrung:  $a_{sl} = 7,54 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (\emptyset 12-15)$

Querbewehrung:  $a_{sq} = 1,88 \text{ cm}^2/\text{m}$  ( $\emptyset 6-15$ )

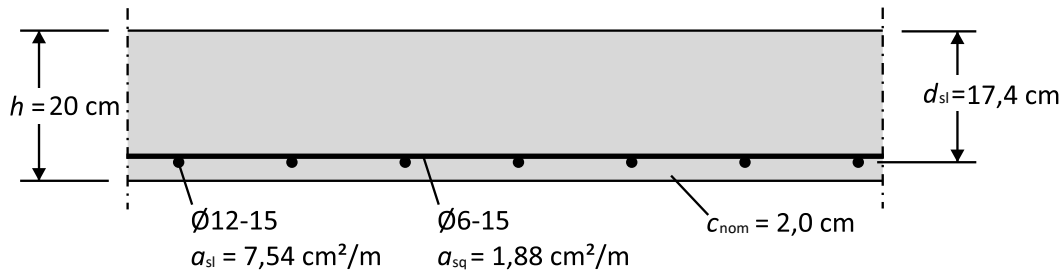
### Lage der vorhandenen Bewehrung:

Die Betondeckung der Längsbewehrung  $c_{nom,l}$  ist in den Bestandsunterlagen mit 2,0 cm angegeben. Dieser Wert wurde vor Ort überprüft und bestätigt, sodass für die Bemessung Folgendes angesetzt wird:

Betondeckung Bestandsbewehrung (längs):  $c_{nom,l} = 2,0 \text{ cm}$

Statische Nutzhöhe (längs):  $d_{sl} = 17,4 \text{ cm}$

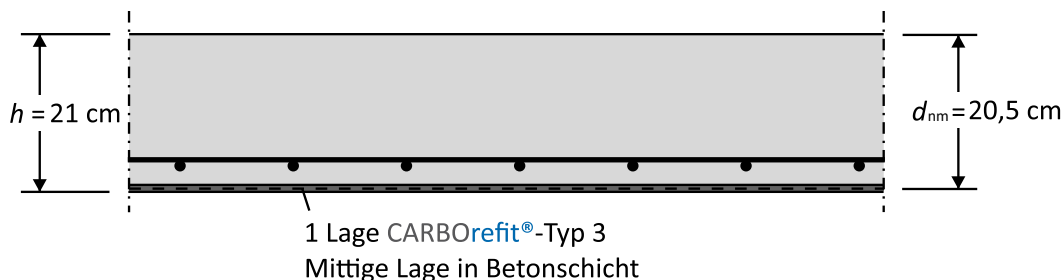
Ein Ausschnitt des Bestandsquerschnitts ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.



**Abbildung 2: Ausschnitt des Bestandsquerschnitts der Decke**

## 5 Verstärkungssystem

Für die Verstärkung der Deckenplatte wird der Verbundwerkstoff Carbonbeton gewählt. Da es sich bei der Decke um ein ebenes Bauteil handelt, wird die Verstärkung mit Carbonschablonen des CARBOrefit®-Typ 3 geplant. Die hohen mechanischen Eigenschaften und Bemessungswerte dieses Typs gewährleisten eine effiziente und wirtschaftliche Verstärkung. Zunächst wird angenommen, dass eine einlagige Verstärkungsschicht ausreichend ist, um die Tragfähigkeit der Decke unter der neuen Belastungssituation sicherzustellen. Gemäß abZ/aBG [1], Abschnitt 3.1 beträgt die erforderliche Mindestbetondeckung der CARBOrefit®-Typ 3 Carbonschablonen 5 mm. Daraus ergibt sich bei einer einlagigen Verstärkungsschicht eine Schichtdicke von 10 mm. Bei mittlerer Lage der Carbonbewehrung beträgt die statische Nutzhöhe  $d_{nm}$  20,5 cm. Die einlagige Carbonbetonverstärkungsschicht besteht aus einer Schicht Feinbeton, einer Lage Carbonbewehrung und einer zweiten Schicht Feinbeton. Das Verstärkungssystem ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Die nach abZ/aBG Z.31.10-182 [1] verwendeten Materialien werden in Abschnitt 5.1 und 5.2 genauer vorgestellt.



**Abbildung 3: Ausschnitt des verstärkten Querschnitts mit unterseitiger, einlagiger Verstärkungsschicht**

### 5.1 Feinbeton

Es wird der in der abZ/aBG [1], Abschnitt 2.1.3 geregelte CARBOrefit®-Feinbeton verwendet.

### 5.2 Carbongitter

Für die Verstärkung werden die in der abZ/aBG [1] geregelten CARBOrefit®-Typ 3 Carbongitter in Regelausführung<sup>1</sup> verwendet. Es ist anzumerken, dass im Rahmen der abZ/aBG [1], Abschnitt 3.2 nur die Faserstränge des Carbongitters in Kettrichtung für die Bemessung der Verstärkungsschicht herangezogen werden dürfen. Die für die Bemessung wichtigen geometrischen Eigenschaften<sup>2</sup> der CARBOrefit®-Typ 3 Carbongitter in Regelausführung in Kettrichtung sind:

Querschnittsfläche Faserstrang Kettrichtung:  $A_{Kf,nm} = 1,8 \text{ mm}^2$

Querschnittsfläche Gitter Kettrichtung:  $a_{Kf,nm} = 140 \text{ mm}^2/\text{m}$

Weitere für die Bemessung relevante Eigenschaften<sup>3</sup> sind:

Charakteristische Zugfestigkeit:  $f_{nm,k} = 2.250 \text{ N/mm}^2$

Charakteristische Verbundfestigkeit:  $T_{nm,b,k} = 10 \text{ N/mm}$

Teilsicherheitsbeiwert (ständig und vorübergehend):  $\gamma_{nm,t} = 1,20$  für Zug

$\gamma_{nm,b} = 1,50$  für Verbund

E-Modul:  $E_{nm,m} = 206.667 \text{ N/mm}^2$

Die Ermittlung der Bemessungszugfestigkeit und der Bemessungsverbundfestigkeit der Carbongitter erfolgt über Abminderungsfaktoren. Diese variieren je nach Carbongitter-Typ und können der Tabelle 4 der abZ/aBG [1] entnommen werden. Für das in diesem Beispiel verwendete CARBOrefit®-Typ 3 Carbongitter sind die Abminderungsfaktoren für die Zug- und Verbundfestigkeit nachfolgend zusammengefasst.

#### Abminderungsbeiwerte für die Zugfestigkeit

$$\alpha_{nm,T,t} = 1,00$$

$$\alpha_{nm,t\infty,t} = 0,70$$

$$\alpha_{nm,D,t} = 1,00$$

Mit  $\alpha_{nm,T,t}$  Abminderungsfaktor der Zugfestigkeit infolge Temperatur

$\alpha_{nm,t\infty,t}$  Abminderungsfaktor der Zugfestigkeit infolge Dauerlast

$\alpha_{nm,D,t}$  Abminderungsfaktor der Zugfestigkeit infolge Dauerhaftigkeit

#### Abminderungsbeiwerte für die Verbundfestigkeit

$$\alpha_{nm,T,b} = 1,00$$

$$\alpha_{nm,t\infty,b} = 0,70$$

$$\alpha_{nm,D,b} = 1,00$$

Mit  $\alpha_{nm,T,b}$  Abminderungsfaktor der Verbundfestigkeit infolge Temperatur

$\alpha_{nm,t\infty,b}$  Abminderungsfaktor der Verbundfestigkeit infolge Dauerlast

$\alpha_{nm,D,b}$  Abminderungsfaktor der Verbundfestigkeit infolge Dauerhaftigkeit

#### Bemessungszugfestigkeit

$$f_{nm,d} = \alpha_{nm,T,t} \cdot \alpha_{nm,t\infty,t} \cdot \alpha_{nm,D,t} \cdot \frac{f_{nm,k}}{\gamma_{nm,t}} = 1,00 \cdot 0,70 \cdot 1,00 \cdot \frac{2.250 \text{ N/mm}^2}{1,20} = 1.300 \text{ N/mm}^2$$

<sup>1</sup> Eigenschaften gemäß [1], Abschnitt 2.1.1

<sup>2</sup> Siehe [1], Abschnitt 2.3.2

<sup>3</sup> Siehe [1], Tabelle 4

### Bemessungsverbundfestigkeit

$$T_{nm,b,d} = \alpha_{nm,T,b} \cdot \alpha_{nm,\infty,b} \cdot \alpha_{nm,D,b} \cdot \frac{T_{nm,b,k}}{\gamma_{nm,b}} = 1,00 \cdot 0,70 \cdot 1,00 \cdot \frac{10 \text{ N/mm}^2}{1,50} = 4,70 \text{ N/mm}$$

## 6 Lastannahmen

### 6.1 Charakteristische Werte der Einwirkungen

Unterschieden werden die folgenden Lastfälle:

- Lastfall 1 bildet die während der Herstellung der Verstärkung vorliegende Belastungssituation ab. Die Ausbaulasten werden vereinfachend zurückgebaut und wirken in diesem Lastfall nicht. Eine Verkehrslast tritt in diesem Lastfall nicht auf und wird nicht angesetzt.
- Lastfall 2 bildet die nach der Verstärkung vorliegende Belastungssituation unter der geplanten Nutzung mit der neuen Verkehrslast ab.

Die Einwirkungen in den jeweiligen Lastfällen setzen sich wie folgt zusammen.

**Tabelle 2: In den jeweiligen Lastfällen zu berücksichtigende Einwirkungen**

| Lastfall                                       |                      | 1    | 2    |
|--|----------------------|------|------|
| Eigengewicht der Decke $g_{k,1}$               | [kN/m <sup>2</sup> ] | 5,00 | 5,00 |
| Eigengewicht der Verstärkungsschicht $g_{k,2}$ | [kN/m <sup>2</sup> ] | 0,24 | 0,24 |
| Ausbaulast $g_{k,3}$                           | [kN/m <sup>2</sup> ] | -    | 1,50 |
| Verkehrslast vor / nach der Verstärkung $q$    | [kN/m <sup>2</sup> ] | -    | 7,00 |

Das Eigengewicht der Verstärkungsschicht resultiert aus einer einlagigen Carbonbetonschicht mit einer Schichtdicke von 1 cm, deren Wichte 24 kN/m<sup>3</sup> beträgt.

### 6.2 Teilsicherheitsbeiwerte zur Ermittlung der Bemessungswerte in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

Die folgenden Teilsicherheitsbeiwerte werden in der Schnittgrößenermittlung berücksichtigt:

**Tabelle 3: Zusammenfassung der Teilsicherheitsbeiwerte zur Ermittlung der Schnittgrößen**

| Einwirkung   | günstig                | ungünstig               |
|--------------|------------------------|-------------------------|
| ständig      | $\gamma_{G,inf} = 1,0$ | $\gamma_{G,sup} = 1,35$ |
| veränderlich | $\gamma_{Q,inf} = 0,0$ | $\gamma_{Q,sup} = 1,50$ |

Zur Ermittlung der Schnittgrößen werden die Teilsicherheitsbeiwerte für ungünstige Einwirkungen angesetzt.

**7 Schnittgrößenermittlung****7.1 Bemessungsschnittgrößen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit**

Die Schnittgrößen werden auf einen Plattenstreifen von 1 m bezogen.

Lastfall 1

$$m_{Ed,LF1} = \frac{(1,35 \cdot (5,00 \text{ kN/m}^2 + 0,24 \text{ kN/m}^2)) \cdot (5,80 \text{ m})^2}{8 \cdot 1 \text{ m}} = 29,75 \text{ kNm/m}$$

$$v_{Ed,LF1} = \frac{4 \cdot 29,75 \text{ kNm/m}}{5,80 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}} = 20,52 \text{ kN/m}$$

Lastfall 2

$$m_{Ed,LF2} = \frac{(1,35 \cdot (5,00 \text{ kN/m} + 0,24 \text{ kN/m} + 1,50 \text{ kN/m}) + 1,50 \cdot 7,00 \text{ kN/m}) \cdot (5,80 \text{ m})^2}{8}$$

$$= 82,41 \text{ kNm/m}$$

$$v_{Ed,LF2} = \frac{4 \cdot 82,41 \text{ kNm/m}}{5,80 \text{ m}} = 56,84 \text{ kN/m}$$

**Tabelle 4: Zusammenfassung der Schnittgrößen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit**

| Lastfall                      |         | 1     | 2     |
|-------------------------------|---------|-------|-------|
| Maximales Feldmoment $m_{Ed}$ | [kNm/m] | 29,75 | 82,41 |
| Querkraft $v_{Ed}$            | [kN/m]  | 20,52 | 56,84 |

**7.2 Schnittgrößen in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit**

Die Schnittgrößen für Lastfall 1 und 2 in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden in der charakteristischen Einwirkungskombination gebildet.

Lastfall 1

$$m_{d,LF1} = \frac{(5,00 \text{ kN/m} + 0,24 \text{ kN/m}) \cdot (5,80 \text{ m})^2}{8 \cdot 1 \text{ m}} = 22,03 \text{ kNm/m}$$

$$v_{d,LF1} = \frac{4 \cdot 22,03 \text{ kNm}}{5,80 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}} = 15,20 \text{ kN/m}$$

Lastfall 2

$$m_{d,LF2} = \frac{(5,00 \text{ kN/m} + 0,24 \text{ kN/m} + 1,50 \text{ kN/m} + 7,00 \text{ kN/m}) \cdot (5,80 \text{ m})^2}{8 \cdot 1 \text{ m}} = 57,78 \text{ kNm/m}$$

$$v_{d,LF2} = \frac{4 \cdot 57,78 \text{ kNm}}{5,80 \text{ m} \cdot 1 \text{ m}} = 39,85 \text{ kN/m}$$

**Tabelle 5: Zusammenfassung der Schnittgrößen in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit**

| Lastfall                              |         | 1     | 2     |
|---------------------------------------|---------|-------|-------|
| Maximales Feldmoment $m_d$ (charakt.) | [kNm/m] | 22,03 | 57,78 |
| Querkraft $v_d$ (charakt.)            | [kN/m]  | 15,20 | 39,85 |

## 8 Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

### 8.1 Ermittlung des Vordehnungszustandes

Der Vordehnungszustand des Bestandsquerschnitts wird zum Zeitpunkt der Verstärkung unter Berücksichtigung des Eigengewichts des Bestands sowie der Verstärkung unter der charakteristischen Belastung im GZG bestimmt. Die Ermittlung der Vordehnung kann auf unterschiedliche Art und Weise berechnet werden. Im Zuge dieses Beispiels wird die Ermittlung der Vordehnung über eine geschlossene Lösung dargestellt. Die geschlossene Lösung bietet die Möglichkeit, die Vordehnung ohne Iteration der Dehnungsebenen abzuschätzen. Zugrunde gelegt wird hier ein linearer Betonspannungsverlauf.

#### Verhältnis der Steifigkeiten Bestandsstahl zu Bestandsbeton

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200.000 \text{ N/mm}^2}{33.000 \text{ N/mm}^2} = 6,06$$

#### Bestimmung der Druckzonenhöhe

$$x = \frac{\alpha_e \cdot A_{s1}}{b} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot d_s}{\alpha_e \cdot A_{s1}}} \right)$$

Bewehrungsfläche:  $A_{s1} = 7,54 \text{ cm}^2$

Bauteilbreite:  $b = 100 \text{ cm}$

Statische Nutzhöhe:  $d_{s1} = 17,4 \text{ cm}$

$$x = \frac{6,06 \cdot 7,54 \text{ cm}^2}{100 \text{ cm}} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot 100 \text{ cm} \cdot 17,4 \text{ cm}}{6,06 \cdot 7,54 \text{ cm}^2}} \right) = 3,56 \text{ cm}$$

#### Bestimmung des inneren Hebelarms

$$z = d_{s1} - \frac{x}{3} = 17,4 \text{ cm} - \frac{3,56 \text{ cm}}{3} = 16,21 \text{ cm}$$

#### Vordehnung Stahlbewehrung

$$\varepsilon_{s,0} = \frac{\frac{m_{d,LF1}}{E_s}}{z \cdot A_{s1}} = \frac{\frac{22.030 \text{ Nm/m}}{200.000 \text{ N/mm}^2}}{16,21 \text{ cm} \cdot 7,54 \text{ cm}^2/\text{m}} = 0,901 \text{ ‰}$$

#### Vordehnung Betondruckzone:

$$\varepsilon_{c,0} = - \frac{2 \cdot \frac{m_{d,LF1}}{E_c}}{b \cdot x \cdot z} = - \frac{2 \cdot \frac{22.030 \text{ Nm/m}}{33.000 \text{ N/mm}^2}}{100 \text{ cm} \cdot 3,56 \text{ cm} \cdot 16,21 \text{ cm}} = - 0,231 \text{ ‰}$$

#### Bestimmung der fiktiven Vordehnung der Carbonbewehrung

$$\varepsilon_{nm,0} = \varepsilon_{s,0} + \frac{d_{nm} - d_{sl}}{d_{sl}} \cdot (\varepsilon_{s,0} - \varepsilon_{c,0}) = 0,901 \text{ ‰} + \frac{205 \text{ mm} - 174 \text{ mm}}{174 \text{ mm}} \cdot (0,901 \text{ ‰} + 0,231 \text{ ‰}) = 1,103 \text{ ‰}$$

**8.2 Überschlägiger Nachweis der Biegetragfähigkeit im Bauzustand (Lastfall 1)**

Um sicherzustellen, dass die im Bauzustand auftretenden Lasten durch den Bestand aufgenommen werden können, wird überschlägig der Nachweis der Biegetragfähigkeit im Lastfall 1 ohne Ansatz der Carbonbetonverstärkung geführt. Die Nachweisführung erfolgt ohne Berücksichtigung der Ausbaulasten, da diese zum Zeitpunkt der Herstellung der Verstärkungsschicht zurück gebaut sind.

Für die Beurteilung der Tragfähigkeit im Bauzustand wird überschlägig das maximal vom Bestand aufnehmbare Moment bestimmt.

Überschlägige Bestimmung des maximal vom Bestand aufnehmbaren Moments

$$z_s \approx 0,90 \cdot d_{sl} = 0,90 \cdot 0,174 \text{ m} = 0,157 \text{ m}$$

$$m_{Rd,LF1} \approx z_s \cdot F_s \approx z_s \cdot a_s \cdot \sigma_s \approx 0,157 \text{ m} \cdot 7,54 \text{ cm}^2/\text{m} \cdot 43,5 \text{ kN/cm}^2 \approx 51,28 \text{ kNm/m}$$

Das in Lastfall 2 maximal auftretende Moment beträgt 29,75 kNm/m.

Nachweis

$$\frac{m_{Ed,LF1}}{m_{Rd,LF1}} = \frac{29,75 \text{ kNm/m}}{51,28 \text{ kNm/m}} = 0,58 \leq 1,0$$

Der überschlägige Nachweis der Biegetragfähigkeit in Lastfall 1 ist mit einer Auslastung von 58 % erfüllt, so dass die Tragfähigkeit der Bestandskonstruktion im Bauzustand gegeben ist.

**8.3 Nachweis der Biegetragfähigkeit der carbonbetonverstärkten Konstruktion (Lastfall 2)**

Der Nachweis der Biegetragfähigkeit der carbonbetonverstärkten Konstruktion erfolgt über die Iteration der Dehnungsebenen. Über die in Abschnitt 8.2 überschlägig ermittelte Biegetragfähigkeit der Bestandskonstruktion von 51,28 kNm/m kann eine erste Abschätzung über die erforderliche Carbonbewehrungsmenge erfolgen.

Aus dem maximal in diesem Lastfall auftretenden Moment von 82,41 kNm/m infolge der geplanten Umnutzung folgt ein Defizit von 31,13 kNm/m, welches durch die Carbonbetonverstärkung aufgenommen werden soll. Über den inneren Hebelarm  $z_{nm}$  der Carbonbewehrung ist ein Abschätzen der erforderlichen Carbonbewehrungsfläche möglich.

$$z_{nm} \approx 0,90 \cdot d_{nm} = 0,90 \cdot 0,205 \text{ m} = 0,185 \text{ m}$$

Abschätzen der erforderlichen Carbongitterfläche

$$a_{kf,nm,erf} \approx \frac{m_{\text{Defizit}}}{z_{nm} \cdot f_{nm,d}} \approx \frac{31,13 \text{ kNm/m}}{0,185 \text{ m} \cdot 130,0 \text{ kN/cm}^2} \approx 1,29 \text{ cm}^2/\text{m} = 129 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Nach dieser Überschlagsrechnung ist eine einlagige Carbonbetonschicht mit einem CARBOrefit®-Typ 3 Carbongitter mit einer Bewehrungsfläche in Kettrichtung  $a_{kf,nm}$  von 140 mm<sup>2</sup>/m ausreichend.

Mit dieser Bewehrungsfläche wird der Nachweis der Biegetragfähigkeit im verstärkten Zustand geführt, in dem die maximale Biegetragfähigkeit des verstärkten Querschnitts bestimmt wird. Die maximale Tragfähigkeit ist erreicht, wenn entweder die Grenzdehnung des Betons  $\varepsilon_{cu}$ , des Bestandsstahls  $\varepsilon_{su}$  oder der Carbonbewehrung  $\varepsilon_{nm,u}$  erreicht ist.



Die nachfolgenden Formeln sind nur für Biegung ohne Längskraft anzuwenden. Im Falle, dass Biegung mit Längskraft auftritt und/oder eine Druckbewehrung im Bestand vorliegt, sind die Formeln um die entsprechenden Anteile zu erweitern. Für weitere Informationen wird auf [5] sowie das Beispiel 1 „Bemessung und Anwendung eines CARBorefit®-Typ 1 Carbongitters“ verwiesen.

### Schätzung der Dehnungsverteilung

$$\varepsilon_{nm} = \varepsilon_{nm,u} = + 6,290 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{nm,0} = + 1,103 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_c = - 2,048 \text{ ‰}$$

### Bezogene Druckzonenhöhe

$$\xi = \frac{-\varepsilon_c}{-\varepsilon_c + \varepsilon_{nm,0} + \varepsilon_{nm}} = \frac{2,048}{2,048 + 1,103 + 6,290} = 0,217$$

### Völligkeitsbeiwert

$$\alpha_R = \frac{|\varepsilon_c| \cdot (6 - |\varepsilon_c|)}{12} = \frac{2,048 \cdot (6 - 2,048)}{12} = 0,675$$

### Höhenbeiwert

$$k_a = \frac{8 - |\varepsilon_c|}{4 \cdot (6 - |\varepsilon_c|)} = \frac{8 - 2,048}{4 \cdot (6 - 2,048)} = 0,377$$

### Angriffspunkt Betondruckkraft

$$a = k_a \cdot \xi \cdot d_{nm} = 0,377 \cdot 0,217 \cdot 0,205 \text{ m} = 0,017 \text{ m}$$

### Innerer Hebelarm der Bewehrungsebenen

$$\text{Stahlbewehrung: } z_s = d_{sl} - a = 0,174 \text{ m} - 0,017 \text{ m} = 0,157 \text{ m}$$

$$\text{Carbonbewehrung: } z_{nm} = d_{nm} - a = 0,205 \text{ m} - 0,017 \text{ m} = 0,188 \text{ m}$$

### Betondruckkraft

$$F_c = \alpha_R \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = \alpha_R \cdot \xi \cdot d_{nm} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,675 \cdot 0,217 \cdot 0,205 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 17.000 \text{ kN/m}^2 = 510 \text{ kN/m}$$

### Stahlzugkraft

Die resultierende Stahldehnung der Bestandsbewehrung kann über die Druckzonenhöhe und die Carbondehnung wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_s = \frac{(d_{sl} - (\xi \cdot d_{nm})) \cdot \varepsilon_{nm}}{d_{nm} - (\xi \cdot d_{nm})} = \frac{(0,174 \text{ m} - (0,217 \cdot 0,205 \text{ m})) \cdot 6,290 \text{ ‰}}{0,205 \text{ m} - (0,217 \cdot 0,205 \text{ m})} = + 5,076 \text{ ‰}$$

→ Stahl fließt, da  $\varepsilon_s = + 5,076 \text{ ‰} > + 2,175 \text{ ‰} = \varepsilon_{yd}$  (Fließdehnung)

$$F_s = a_{sl} \cdot f_{yd} = 7,54 \text{ cm}^2/\text{m} \cdot 43,5 \text{ kN/cm}^2 = 328 \text{ kN/m}$$

### Zugkraft in der Carbonbewehrung

$$F_{nm} = \varepsilon_{nm} \cdot a_{kf,nm} \cdot E_{nm,m} = 6,290 \text{ ‰} \cdot 140 \text{ mm}^2/\text{m} \cdot 206.667 \text{ N/mm}^2 = 182 \text{ kN/m}$$

### Überprüfung der inneren Gleichgewichtsbedingung (Kräftegleichgewicht)

$$F_s + F_{nm} \equiv F_c$$

Es wird keine Gewährleistung für Vollständigkeit oder Fehler gegeben. Eine Vervielfältigung dieses Dokuments darf nur vollständig erfolgen.

$$328 \text{ kN/m} + 182 \text{ kN/m} = 510 \text{ kN/m} = 510 \text{ kN/m} = F_c \rightarrow \text{Bedingung erfüllt!}$$

Die anfänglichen Schätzwerte der Dehnungen erfüllen den Anspruch an die innere Gleichgewichtsbedingung. Die Dehnungsverteilung muss demnach nicht neu iteriert werden.

### Bestimmung der maximalen Biegetragfähigkeit des verstärkten Querschnitts

$$m_{Rd,LF2} = F_s \cdot z_s + F_{nm} \cdot z_{nm}$$

$$m_{Rd,LF2} = 328 \text{ kN/m} \cdot 0,157 \text{ m} + 182 \text{ kN/m} \cdot 0,188 \text{ m} = 85,71 \text{ kNm/m}$$

### Nachweis

$$\frac{m_{Ed,LF2}}{m_{Rd,LF2}} = \frac{82,41 \text{ kNm/m}}{85,71 \text{ kNm/m}} = 0,96 \leq 1,0$$

Der Nachweis der Biegetragfähigkeit im Lastfall 2 ist mit einer Auslastung von 96 % erfüllt.

## 8.4 Nachweis der Biegetragfähigkeit im Brandfall

Der Nachweis der Biegetragfähigkeit im Brandfall wird in diesem Beispiel nicht behandelt. Es wird an dieser Stelle auf das Merkblatt – „Nachweis der Biegetragfähigkeit carbonbetonverstärkter Konstruktionen im Brandfall“ verwiesen.

## 8.5 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit ohne Ansatz der Carbonbetonverstärkung

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit erfolgt nach abZ/aBG [1] Anlage 5, Abschnitt 6.2.2 ohne Ansatz der Carbonbewehrung. Nach der DIN EN 1992-1-1 [6], Abschnitt 6.2.1 (8) darf bei einer direkten Lagerung und gleichmäßiger Belastung die Bemessungsquerkraft im Abstand  $d$  vom Auflagerstand nachgewiesen werden. Der Nachweis wird in diesem Beispiel an der Stelle  $x = d_{sl} + 0,5 \cdot a = 0,174 \text{ m}$  (statische Nutzhöhe + halbe Auflagerbreite) geführt.

### Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit des Bestandsquerschnitts

$$v_{Rd,c} = \left[ \frac{0,15}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \right] \cdot d_{sl}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{sl}}} = 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{174 \text{ mm}}} = 2,07 \leq 2,0$$

$$\rho_l = \frac{a_{sl}}{d_{sl}} = \frac{0,0754 \text{ cm}^2/\text{cm}}{17,4 \text{ cm}} = 0,433 \%$$

|     |            |  |
|-----|------------|--|
| Mit | $v_{Rd,c}$ | Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit        |
|     | $k$        | Beiwert für den Einfluss der statischen Nutzhöhe |
|     | $\rho_l$   | Längsbewehrungsgrad                              |
|     | $a_{sl}$   | Querschnittsfläche der Längsbewehrung            |
|     | $f_{ck}$   | Charakteristische Betondruckfestigkeit           |
|     | $d_{sl}$   | Statische Nutzhöhe Stahlbewehrung                |

$$v_{Rd,c} = \left[ \frac{0,15}{1,5} \cdot 2,00 \cdot (100 \cdot 0,433 \% \cdot 30 \text{ N/mm}^2)^{1/3} \right] \cdot 174 \text{ mm} = 81,8 \text{ kN/m}$$

### Mindestquerkrafttragfähigkeit

$$v_{Rdc,min} = \frac{0,0525}{\gamma_c} \cdot (k^3 \cdot f_{ck})^{0,5} \cdot d_s = \frac{0,0525}{1,5} \cdot (2,00^3 \cdot 30 \text{ N/mm}^2)^{0,5} \cdot 174 \text{ mm} = 94,3 \text{ kN/m}$$

### Abgeminderte Bemessungsquerkraft aufgrund direkter Lagerung und gleichmäßiger Belastung

Mit  $v_{max} = 56,84 \text{ kN/m}$  (Wert aus Lastfall 2)

$$v_{Ed} = v_{max} \cdot \left( 1 - \frac{0,5 \cdot a + d_s}{\frac{l_{eff}}{2}} \right) = 56,84 \text{ kN/m} \cdot \left( 1 - \frac{0,1 \text{ m} + 0,174 \text{ m}}{\frac{5,80 \text{ m}}{2}} \right) = 51,5 \text{ kN/m}$$

### Nachweis

$$\frac{v_{Ed,LF2}}{v_{Rd}} = \frac{51,5 \text{ kN/m}}{94,3 \text{ kN/m}} = 0,55 \leq 1,0$$

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit ohne Ansatz der Carbonbetonverstärkung ist für die neue Belastungssituation im Lastfall 2 mit einer Auslastung von 55 % erfüllt.

## 8.6 Nachweis der Schubfugentragfähigkeit

Die Einwirkungen auf die Schubfuge sind maßgeblich von der Querkraft abhängig. Jedoch kommt es erst ab dem Fließen der Bestandsbewehrung zur überproportionalen Zunahme der Zugkraft innerhalb des Carbongitters. Auf der sicheren Seite liegend, wird der Nachweis der Schubfugentragfähigkeit daher für die Einwirkungskombination  $m_{Ed,Feld,LF2}$  und  $v_{Ed,LF2}$  im Lastfall 2 geführt. Dieser Nachweis stellt den oberen Grenzwert der Einwirkung dar. Sofern dieser Nachweis nicht erfüllt wird, ist es notwendig, die Schubfugentragfähigkeit an den maßgebenden Stellen zu führen. Nach abZ/aBG [1] muss die Fuge zwischen Altbeton und Verstärkung rau ausgeführt werden. Dementsprechend wird für die Ermittlung der Schubfugentragfähigkeit der Beiwert  $c$  mit einem Wert von 0,4 verwendet. Die grundlegende Nachweisführung ähnelt dem in DIN EN 1992-1-1 [6], Abschnitt 6.2.5 beschriebenen Vorgehen.

### Ermittlung der Schubfugentragfähigkeit

Aus den in Abschnitt 4.1 aufgeführten Messwerten zur Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit kann nach DIN EN 1990 [7], Tabelle D.1 ( $V_x$  unbekannt) der charakteristische Wert der Haftzugfestigkeit  $f_{ctk;0,05}$  bestimmt werden. Die Messwerte sind der Übersichtlichkeit halber nachfolgend noch einmal dargestellt.

**Tabelle 6: Einzelwerte der Prüfungen am Bauteil zur Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit (s. Tabelle 1)**

| Anzahl der Prüfungen $n$         | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|
| $f_{ctm,surf,i} [\text{N/mm}^2]$ | 2,70 | 2,10 | 2,20 | 2,50 | 2,50 |

*Statistische Auswertung der Stichproben nach DIN EN 1990 [7], Tabelle D.1 ( $V_x$  unbekannt)*

- Arithmetisches Mittel:  $m_x = 2,40 \text{ N/mm}^2$
- Standardabweichung des Stichprobenumfangs:  $s = 0,24$
- Faktor:  $k_n (n = 5) = 2,33$
- Charakteristischer Wert der Haftzugfestigkeit (5 %-Fraktil)

$$f_{ctk;0,05} = m_x - k \cdot s = 2,40 \text{ N/mm}^2 - 2,33 \cdot 0,24 = 1,84 \text{ N/mm}^2$$

Die Schubfugentragfähigkeit ergibt sich wie folgt:

$$v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} = c \cdot \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} = 0,4 \cdot 0,85 \cdot \frac{1,84 \text{ N/mm}^2}{1,50} = 0,417 \text{ N/mm}^2$$

### Bestimmung der Bemessungsschubspannung

$$v_{Edi} = \frac{\beta \cdot V_{Ed}}{z_{ges}}$$

$$\beta = \frac{F_{nm}}{F_s + F_{nm}} = \frac{165 \text{ kN/m}}{328 \text{ kN/m} + 165 \text{ kN/m}} = 0,335$$

$$V_{Ed} = v_{Ed,LF2} = 51,5 \text{ kN/m} \text{ (Abgeminderte Bemessungsquerkraft)}$$

$$\begin{aligned} z_{ges} &= z_s \cdot \frac{F_s}{F_s + F_{nm}} + z_{nm} \cdot \frac{F_{nm}}{F_s + F_{nm}} \\ &= 0,157 \text{ m} \cdot \frac{328 \text{ kN/m}}{(328 \text{ kN/m} + 165 \text{ kN/m})} + 0,188 \text{ m} \cdot \frac{165 \text{ kN/m}}{(328 \text{ kN/m} + 165 \text{ kN/m})} = 0,167 \text{ m} \end{aligned}$$

Mit  $\beta$  Verhältnis der Zugkraft in der Verstärkungsschicht zu der Gesamtzugkraft in der Zugzone  
 $V_{Ed}$  Bemessungswert der einwirkenden Querkraft  
 $z_{ges}$  Innerer Hebelarm des Gesamtquerschnitts

$$v_{Edi} = \frac{\beta \cdot v_{Ed,LF2}}{z_{ges}} = \frac{0,335 \cdot 51,5 \text{ kN/m}}{0,167 \text{ m}} = 0,103 \text{ N/mm}^2$$

### Nachweis

$$\frac{v_{Edi}}{v_{Rdi}} = \frac{0,103 \text{ N/mm}^2}{0,417 \text{ N/mm}^2} = 0,25 \leq 1,0$$

Der Nachweis der Schubkraftübertragung in der Verbundfuge ist mit einer Auslastung von 25 % erfüllt.

## 8.7 Nachweis gegen Versatzbruch

Nach Anlage 5, Abschnitt 5.12 der abZ/aBG [1] muss die senkrecht zur Ebene der Carbonbetonschicht wirkende Zugspannung am Ende der Verstärkungsschicht in der Bemessung berücksichtigt werden. In diesem Bereich kann es andernfalls infolge dieser abhebenden Kräfte zur Ausbildung eines Versatzbruchs kommen, bei dem sich der Beton von der Bestandsbewehrung ablöst.

### Ermittlung des Widerstandes gegen Versatzbruch<sup>4</sup>

$$v_{Rd,c,nm} = 0,75 \cdot \left( 1 + 19,6 \cdot \frac{(100 \cdot \rho_l)^{0,15}}{a_{nm}^{0,36}} \right) \cdot v_{Rd,c}$$

Mit  $\rho_l$  Längsbewehrungsgrad der Bestandsbewehrung, d. h. ohne Anrechnung der Carbonbewehrungsfläche  
 $a_{nm}$  Abstand des Endes der Carbonbewehrung von der Mitte des Endauflagers (Hier: halbe Auflagerbreite)

<sup>4</sup> Ermittlung gemäß [1], Anlage 5, Gleichung aBG 6.121

$$v_{Rd,c,nm} = 0,75 \cdot \left( 1 + 19,6 \cdot \frac{(100 \cdot 0,433 \%)^{0,15}}{(100 \text{ mm})^{0,36}} \right) \cdot 94,3 \text{ kN/m} = 303,9 \text{ kN/m}$$

Nachweis

$$\frac{v_{Ed}}{v_{Rd,c,nm}} = \frac{51,5 \text{ kN/m}}{303,9 \text{ kN/m}} = 0,17 \leq 1,0$$

Der Nachweis gegen Versatzbruch ist mit einer Auslastung von 17 % erfüllt.

**9 Bemessung in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit****9.1 Nachweis der Begrenzung der Verformungen**

Der Nachweis der Begrenzung der Verformungen ist erfüllt und wird in diesem Beispiel nicht weiter betrachtet.

**9.2 Begrenzung der Stahlspannungen**

Exemplarisch für die Bemessung in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit wird an dieser Stelle des Beispiels der Nachweis zur Begrenzung der Stahlspannungen geführt. Durch die abZ/aBG [1], Anlage 5, Absatz 7.2 ist die Dehnung des Bestandsstahls unter der seltenen Einwirkungskombination auf folgenden Wert zu begrenzen:

$$\epsilon_s \leq \frac{f_{yk}}{E_s}$$

Die Ermittlung der Dehnung erfolgt analog zu Abschnitt 8.1 dieses Beispiels für die Einwirkung  $m_{d,LF2}$  von 57,78 kNm/m.

$$\epsilon_s = \frac{\frac{m_{d,LF2}}{E_s}}{z \cdot a_{sl}} = \frac{\frac{57.780 \text{ Nm/m}}{200.000 \text{ N/mm}^2}}{16,21 \text{ cm} \cdot 7,54 \text{ cm}^2/\text{m}} = 2,364 \text{ ‰} \leq \frac{500 \text{ N/mm}^2}{200.000 \text{ N/mm}^2} = 2,500 \text{ ‰}$$

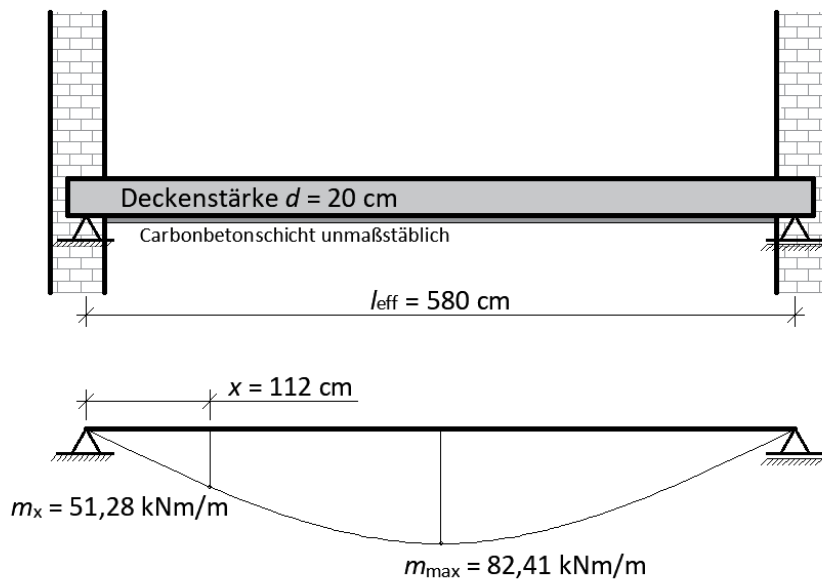
**10 Allgemeine Bewehrungs- und Konstruktionsregeln****10.1 Nachweis der Verankerung der Längsbewehrung**

Die Verankerung der Carbonbewehrung erfolgt ab jenem Punkt  $x$ , ab welchem keine zusätzliche Carbonbewehrung mehr zur Aufnahme des vorhandenen Biegemomentes benötigt wird. Ausgehend von der maximalen Biegetragfähigkeit des Bestandsquerschnittes von 51,28 kNm/m (siehe Abschnitt 8.2) erfolgt anhand der Parabelgleichung des Biegemoments die Bestimmung des Punktes  $x$ , ab dem keine Carbonbewehrung mehr notwendig ist.

Die Parabelgleichung des Momentenverlaufs lautet:

$$y(x) = -9,799x^2 + 56,834x$$

Daraus ergibt sich, dass der Punkt  $x$ , an dem das Moment von 51,28 kNm/m auftritt, 112 cm entfernt vom idealisierten Auflagerpunkt der Deckenplatte liegt (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 4: Darstellung des Punktes x, ab dem die Verankerung der Carbonbewehrung erfolgt**

Zur Berücksichtigung der zusätzlichen Zugkraft  $\Delta F_t$  infolge der Querkraft wird das Moment an der Stelle x zuzüglich des Versatzmaßes  $a_l$  bestimmt.

Versatzmaß nach DIN EN 1992-1-1 [6] für Vollplatten

$$a_l = d_{nm} = 0,205 \text{ m}$$

Stelle, an der die Spannung bestimmt wird

$$x + d_{nm} = 1,12 \text{ m} + 0,205 \text{ m} = 1,325 \text{ m}$$

Über die Parabelgleichung wird das an dieser Stelle einwirkende Moment zu 58,10 kNm/m bestimmt. Durch die Iteration der Dehnungsebenen wird anschließend die Spannung im Carbongitter ermittelt, welche durch den Bestand verankert werden muss.

Schätzung der Dehnungsverteilung

$$\varepsilon_c = -0,901 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{nm} = +2,434 \text{ ‰}$$

Bezogene Druckzonenhöhe

$$\xi = \frac{-\varepsilon_c}{-\varepsilon_c + \varepsilon_{nm}} = \frac{0,901}{0,901 + 2,434} = 0,270$$

Völligkeitsbeiwert

$$\alpha_R = \frac{|\varepsilon_c| \cdot (6 - |\varepsilon_c|)}{12} = \frac{0,901 \cdot (6 - 0,901)}{12} = 0,383$$

Höhenbeiwert

$$k_a = \frac{8 - |\varepsilon_c|}{4 \cdot (6 - |\varepsilon_c|)} = \frac{8 - 0,901}{4 \cdot (6 - 0,901)} = 0,348$$

### Angriffspunkt Betondruckkraft

$$a = k_a \cdot \xi \cdot d_{nm} = 0,348 \cdot 0,270 \cdot 0,205 \text{ m} = 0,019 \text{ m}$$

### Innerer Hebelarm der beiden Bewehrungsebenen

Stahlbewehrung:  $z_s = d_{sl} - a = 0,174 \text{ m} - 0,019 \text{ m} = 0,155 \text{ m}$

Carbonbewehrung:  $z_{nm} = d_{nm} - a = 0,205 \text{ m} - 0,019 \text{ m} = 0,186 \text{ m}$

### Betondruckkraft

$$F_c = \alpha_R \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = \alpha_R \cdot \xi \cdot d_{nm} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,383 \cdot 0,270 \cdot 0,205 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 17.000 \text{ kN/m}^2 = 360 \text{ kN/m}$$

### Stahlzugkraft

Die resultierende Stahldehnung der Bestandsbewehrung kann über die Druckzonenhöhe und die Carbondehnung wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_s = \frac{(d_{sl} - (\xi \cdot d_{nm})) \cdot \varepsilon_{nm}}{d_{nm} - (\xi \cdot d_{nm})} = \frac{(0,155 \text{ m} - (0,270 \cdot 0,205 \text{ m})) \cdot 2,434 \text{ ‰}}{0,205 \text{ m} - (0,270 \cdot 0,205 \text{ m})} = + 1,930 \text{ ‰}$$

$$F_s = E_s \cdot \varepsilon_s \cdot a_{sl} = 20.000 \text{ kN/cm}^2 \cdot 1,930 \text{ ‰} \cdot 7,54 \text{ cm}^2/\text{m} = 291 \text{ kN/m}$$

### Zugkraft in der Verstärkung

$$F_{nm} = E_{nm} \cdot \varepsilon_{nm} \cdot a_{kf,nm} = 206.667 \text{ N/mm}^2 \cdot 2,434 \text{ ‰} \cdot 140 \text{ mm}^2/\text{m} = 70 \text{ kN/m}$$

### Überprüfung der Gleichgewichtsbedingungen

#### *Kräftegleichgewicht*

$$F_s + F_{nm} \equiv F_c$$

$$291 \text{ kN/m} + 70 \text{ kN/m} = 361 \text{ kN/m} \approx 360 \text{ kN/m} = F_c \rightarrow \text{Bedingung erfüllt!}$$

#### *Momentengleichgewicht*

$$F_s \cdot z_s + F_{nm} \cdot z_{nm} \equiv m_x$$

$$291 \text{ kN/m} \cdot 0,155 \text{ m} + 70 \text{ kN/m} \cdot 0,186 \text{ m} = 58,12 \text{ kNm/m} \approx 58,10 \text{ kNm/m} = m_{x+d}$$

→ Bedingung erfüllt!

Die anfänglichen Schätzwerte der Dehnungen erfüllen den Anspruch an die Gleichgewichtsbedingungen. Die Dehnungsverteilung muss demnach nicht neu iteriert werden.

### Bestimmung des Grundwertes der Verankerungslänge

Zu verankernde Spannung im Carbongitter:

$$\sigma_{nm} = E_{nm} \cdot \varepsilon_{nm} = 206.667 \text{ N/mm}^2 \cdot 2,434 \text{ ‰} = 503 \text{ N/mm}^2$$

Notwendige Verankerungslänge:

$$l_{b,nm,rqd} = \frac{\sigma_{nm} \cdot A_{nm,K}}{T_{nm,bd}} = \frac{503 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,80 \text{ mm}^2}{4,7 \text{ N/mm}} = 0,19 \text{ m}$$

### Bemessungswert der Verankerungslänge<sup>5</sup>

$$l_{bd} = l_{b,nm,rqd} = 0,19 \geq 100 \text{ mm}$$

### Nachweis

$$\frac{l_{bd}}{l_{vorh}} = \frac{l_{bd}}{x - \frac{a}{2}} = \frac{0,19 \text{ m}}{1,12 \text{ m} - 0,10 \text{ m}} = 0,19 \leq 1,0$$

Der Nachweis der Verankerung der Carbonbewehrung ist mit einer Auslastung von 19 % erfüllt.

Weiterhin ist hinsichtlich der Bewehrungs- und Konstruktionsregeln anzumerken, dass ein Einschneiden der Zugkraftdeckungslinie nicht zulässig ist.

### **10.2 Nachweis der Verankerung der Bestandsbewehrung am Endauflager**

Der Nachweis zur Verankerung der Bestandsbewehrung am Endauflager ist identisch zu DIN EN 1992-1-1 [6] zu führen und wird an dieser Stelle nicht explizit aufgeführt.

### **10.3 Querbewehrung**

Auch bei verstärkten Bauteilen sind bei einachsig gespannten Platten 20 % der Bestandsstahlbewehrung als Querbewehrung ausreichend. Fehlende Querbewehrung darf durch Carbonbewehrung ersetzt werden. Nachfolgend wird überprüft, ob ausreichend Querbewehrung im Bestand vorhanden ist.

$$a_{sq,erf} = 0,2 \cdot a_{sl} = 0,2 \cdot 7,54 \text{ cm}^2/\text{m} = 1,51 \text{ cm}^2/\text{m} < 1,88 \text{ cm}^2/\text{m} = a_{sq,vorh} \rightarrow \text{Bedingung erfüllt!}$$

### **10.4 Stöße und mechanische Verbindungen**

Es wird an dieser Stelle eine Mattenlänge von mindestens 6 Metern verwendet, sodass in Längsrichtung (Kettichtung) kein Übergreifungsstoß benötigt wird. Im Allgemeinen ist hier die Absprache mit den Gitterherstellern erforderlich. Des Weiteren ist es notwendig, zu überprüfen, ob die gewählte Mattenlänge im konkreten Beispiel gehandelt werden kann.

In Querrichtung (Schussrichtung) wird konstruktiv eine Übergreifung der Carbongitter von 10 cm vorgesehen.

Bei dem Einbau und der Handhabung der Carbongitter ist darauf zu achten, dass der kleinste Biegedurchmesser von 150 mm nicht unterschritten wird.

### **Literatur- und Quellenverzeichnis**

- [1] Deutsches Institut für Bautechnik (Hrsg.): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung / Allgemeine Bauartgenehmigung Z-31.10-182: CARBOrefit®-Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton. Berlin, August 2023 (Geltungsdauer 31. August 2023 bis 31. August 2028)
- [2] DIN EN 1542 (1999-07): Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Messung der Haftfestigkeit im Abreißversuch
- [3] DIN 1045 (1988-07): Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung
- [4] DIN 488-2 (1986-06): Betonstahl, Betonstabstahl; Maße und Gewichte

<sup>5</sup> Bedingung gemäß [1], Anlage 5, Abschnitt 8.4.4



- [5] Curbach, M.; Schumann, A.; May, S.; Müller, E.; Schütze, E.; Wagner, J.: *Verstärken mit Carbonbeton* in: Betonkalender 2022, S. 761-804, Ernst & Sohn
- [6] DIN EN 1992-1-1 (2011-01): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [7] DIN EN 1990 (2021-10): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung