

<b>ANHANG 3.01-1</b>	<b>Bemessung einer Carbonbetonverstärkung unter Anwendung eines CARBOfit®-Typ 1 Carbongitters</b>
----------------------	---

Bei Fragen/Anmerkungen  
zu kontaktieren:

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

Stand: 07.01.2025

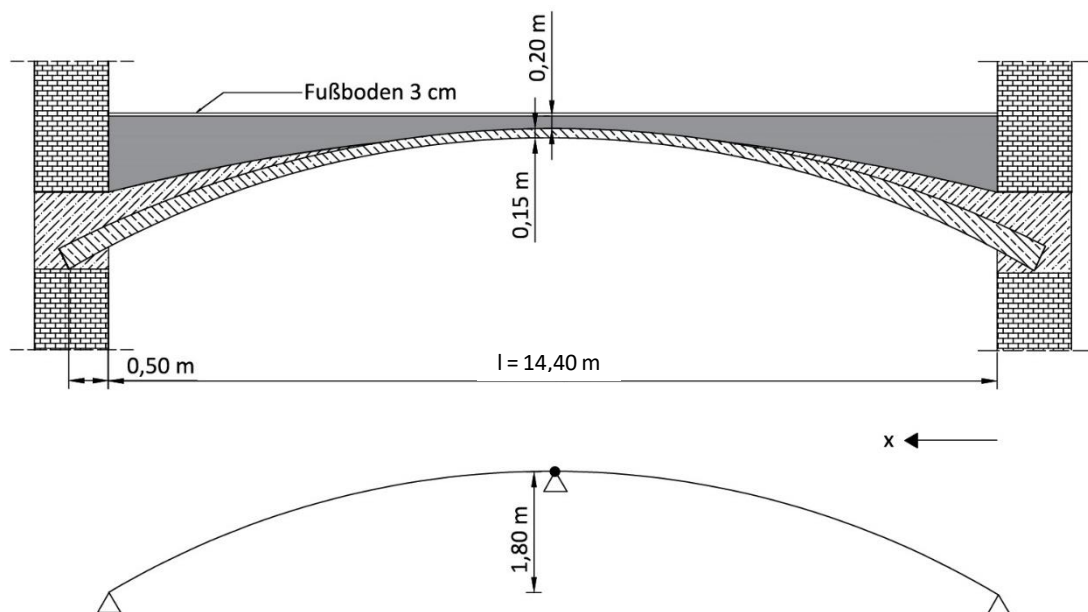
Bei dem nachfolgenden Dokument handelt es sich um ein Beispiel, welches die Bemessung einer Carbonbetonverstärkungsschicht auf Basis der aktuell gültigen abZ/aBG Z-31.10-182 „CARBOfit®-Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton“ [1] umfasst. Es wird keine Gewährleistung für Vollständigkeit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

## 1 Ausgangssituation

Ein altes Kloster soll zukünftig als Museum genutzt werden. Bei einer Ortsbegehung wurden an der Unterseite einer Gewölbedecke aus historischem Stahlbeton umfassende Schäden festgestellt. Die Bestandsbewehrung ist stellenweise freigelegt und stark korrodiert. Aus anschließenden Bauteiluntersuchungen geht hervor, dass die Bestandsbewehrung infolge der fortgeschrittenen Korrosion statisch nur zu 30 % angesetzt werden kann. Das dadurch maximal vom Bestand aufnehmbare Biegemoment beträgt 57 kNm/m. Unter der geplanten Museumsnutzung müssen 80 kNm/m von der Bestandskonstruktion abgetragen werden. Zum Ausgleich dieses Defizits und zur Erhaltung des historischen Wertes soll an der Unterseite des Tragbogens eine Carbonbetonverstärkung angebracht werden. Die Ausführung und Bemessung erfolgt nach den Bestimmungen der abZ/aBG Z-31.10-182 [1].

Der Tragbogen der Gewölbekonstruktion besitzt eine lichte Weite von 14,40 m und einen Stich von 1,80 m. Die Dicke des Tragbogens im Bereich des Scheitels beträgt 15 cm. Der Bogen weitet sich zu den Auflagerbereichen hin auf 25 cm auf. Oberhalb des Tragbogens befindet sich eine Aufbetonschicht sowie der Fußbodenaufbau.

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



**Abbildung 1: Oben: Längsschnitt durch die Gewölbedecke, unten: statisches System der Gewölbedecke in Längsrichtung**

### 2 Systemlängsschnitt und statisches System

In Abbildung 1 sind der Längsschnitt durch die Decke sowie das statische System dargestellt. Die Gewölbedecke besitzt ein Gelenk im Stich. In den Auflagerbereichen wird ebenfalls von einer gelenkigen Lagerung ausgegangen.

### 3 Effektive Stützweite

Die effektive Stützweite  $l_{\text{eff}}$  beträgt 15,40 m.

### 4 Baustoffe der Bestandskonstruktion

#### 4.1 Beton

##### Oberflächenzugfestigkeit

Der Erwartungswert des Mittelwertes (95 % Zuverlässigkeit) der Oberflächenzugfestigkeit des Betons  $f_{\text{ctm,surf}}$  muss nach Abschnitt 1.2 der abZ/aBG [1] größer sein als 1,0 N/mm<sup>2</sup>. 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
$f_{\text{ctm,surf,i}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,10	2,30	2,25	2,45	2,10

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

- Arithmetisches Mittel:  $m_x = 2,24 \text{ N/mm}^2$
- Standardabweichung des Stichprobenumfangs:  $s = 0,083$
- Faktor:  $k_n (n = 5) = 0,953$
- Erwartungswert des Mittelwertes (95 % Zuverlässigkeit):

$$f_{\text{ctm,surf}} = m_x - k_n \cdot s = 2,24 \text{ N/mm}^2 - 0,953 \cdot 0,083 = 2,16 \text{ N/mm}^2 > 1,0 \text{ N/mm}^2$$

##### Betondruckfestigkeit

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

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

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

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

#### 4.2 Bestandsstahl

Gemäß der Bestandsunterlagen handelt es sich bei dem Bestandsstahl um einen Glattstahl (Flussstahl) der Sorte St 37. Bestandsuntersuchungen konnten dies bestätigen. Nach [3] sind die Eigenschaften wie folgt:

Charakteristische Streckgrenze:	$f_{yk} = 210 \text{ N/mm}^2$
Teilsicherheitsbeiwert (ständig und vorrübergehend):	$\gamma_s = 1,15$
Bemessungsfestigkeit:	$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{210 \text{ N/mm}^2}{1,15} = 183 \text{ N/mm}^2$
E-Modul:	$E_{sm} = 200.000 \text{ N/mm}^2$
Bestandsuntersuchungen ergaben die folgenden Bewehrungsmengen:	
Längsbewehrung:	$a_{sl} = 9,24 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (\text{Ø}10-8,5)$
Querbewehrung:	$a_{sq} = 1,88 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (\text{Ø}6-15)$
Infolge der fortgeschrittenen Korrosion können lediglich 30 % der Bestandsbewehrung in Längsrichtung angesetzt werden. In der Bemessung wird dementsprechend der folgende Wert angesetzt:	
Längsbewehrung (30 %):	$a_{sl,30\%} = 2,77 \text{ cm}^2/\text{m}$

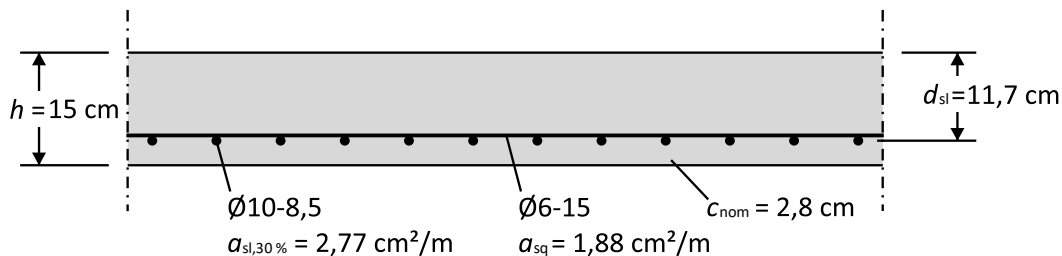
### Lage der vorhandenen Bewehrung:

Die Betondeckung der Längsbewehrung  $c_{nom,l}$  ist in den Bestandsunterlagen mit 2,8 cm angegeben. Dieser Wert wurde vor Ort überprüft und bestätigt, sodass für die Bemessung Folgendes angesetzt wird:

Betondeckung Bestandsbewehrung (längs):  $c_{nom,l} = 2,8 \text{ cm}$

Statische Nutzhöhe (längs):  $d_{sl}$  abhängig von Stelle, an der der Nachweis geführt wird, aufgrund veränderlicher Bogendicke

Ein Ausschnitt des Bestandsquerschnitts des Tragbogens im Bogenstich ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.



**Abbildung 2: Ausschnitt des Bestandsquerschnitts des Tragbogens im Bogenstich**

## 5 Verstärkungssystem

Für die Verstärkung des Tragbogens wird der Verbundwerkstoff Carbonbeton gewählt. Aufgrund der hohen Flexibilität der CARBOrefit®-Typ 1 Carbongitter besteht die Möglichkeit, diese als Rollenware auf die Baustelle zu liefern und zu verbauen. Die Carbongitter können entlang des Tragbogens abgerollt werden, wodurch der Einbau erleichtert wird und Übergreifungsstöße in Längsrichtung vermieden werden. Zunächst wird angenommen, dass eine einlagige Verstärkungsschicht ausreichend ist, um die Tragfähigkeit der Gewölbedecke wiederherzustellen. Gemäß abZ/aBG [1], Abschnitt 3.1 beträgt die erforderliche Mindestbetondeckung der CARBOrefit®-Typ 1 Carbongitter 3 mm. Bei einer einlagigen Verstärkungsschicht beträgt die aufzubringende Schichtdicke dementsprechend 6 mm. Dabei besteht eine Lage aus einer Schicht Feinbeton, einer Lage Carbonbewehrung und einer zweiten abschließenden 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.

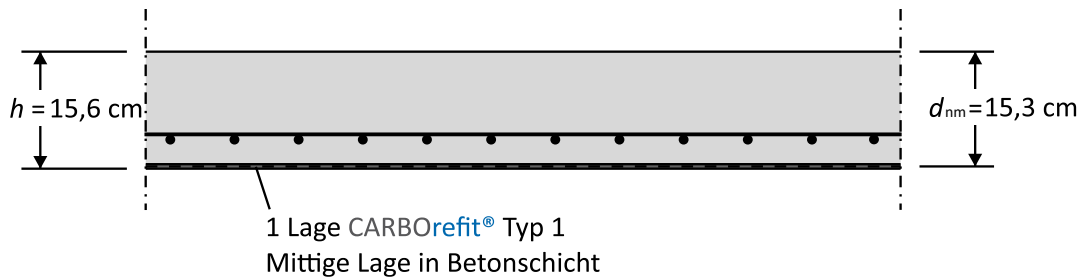


Abbildung 3: Ausschnitt des verstärkten Querschnitts im Bogenstich mit unterseitiger, einlagiger Verstärkungsschicht

## 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 1 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 1 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:  $f_{nm,k} = 1.150 \text{ N/mm}^2$

Charakteristische Verbundfestigkeit:  $T_{nm,b,k} = 4,00 \text{ N/mm}$

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 1 Carbongitter sind die Abminderungsfaktoren für die Zug- und Verbundfestigkeit nachfolgend zusammengefasst.

### Abminderungsbeiwerte für die Zugfestigkeit

$$\alpha_{nm,T,t} = 0,85$$

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

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

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

<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

## Abminderungsbeiwerte für die Verbundfestigkeit

$$\alpha_{nm,T,b} = 0,45$$

$$\alpha_{nm,t\infty,b} = 0,47$$

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

- 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

$$f_{nm,d} = \alpha_{nm,T,t} \cdot \alpha_{nm,t\infty,t} \cdot \alpha_{nm,D,t} \cdot \frac{f_{nm,k}}{\gamma_{nm,t}} = 0,85 \cdot 0,70 \cdot 1,00 \cdot \frac{1.150 \text{ N/mm}^2}{1,20} = 768 \text{ N/mm}^2$$

## Bemessungsverbundfestigkeit

$$T_{nm,b,d} = \alpha_{nm,T,b} \cdot \alpha_{nm,t\infty,b} \cdot \alpha_{nm,D,b} \cdot \frac{T_{nm,b,k}}{\gamma_{nm,b}} = 0,45 \cdot 0,47 \cdot 1,00 \cdot \frac{4 \text{ N/mm}^2}{1,50} = 0,60 \text{ N/mm}$$

## 6 Lastannahmen

### 6.1 Lastfälle und Einwirkungen

Unterschieden werden die folgenden Lastfälle:

- Lastfall 1 bildet die Belastungssituation des Tragbogens während der Herstellung der Verstärkung ab. Es wird lediglich das Eigengewicht des Tragbogens sowie der Verstärkungsschicht berücksichtigt. Die Ausbaulasten des Bestands werden 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 umfassen

- das Eigengewicht des Gewölbetragbogens,
- das Eigengewicht der Verstärkungsschicht,
- die Ausbaulasten (Aufbetonschicht und Fußbodenaufbau) sowie
- die Nutzlasten der Kategorie C3 der DIN EN 1991-1-1 [4] für Museumsflächen.

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

Die folgenden Teilsicherheitsbeiwerte werden in der Schnittgrößenermittlung berücksichtigt:

**Tabelle 2: 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 Ermittlung der Schnittgrößen erfolgte im Vorfeld. In den Grenzzuständen der Tragfähigkeit sind die folgenden Schnittgrößen zu berücksichtigen:

**Tabelle 3: Zusammenfassung der Schnittgrößen in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit**

Lastfall		1	2
Maximales Feldmoment $m_{Ed}$	[kNm/m]	4,20	80,00
Querkraft $v_{Ed}$	[kN/m]	2,80	70,00
Normalkraft $n_{Ed}$	[kN/m]	-59,69	-250,00

### 7.2 Schnittgrößen in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

Die Einhaltung der durch die DIN EN 1992-1-1 [5] vorgegebenen Nachweise zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit werden an dieser Stelle nicht geführt. Eine Verstärkung zur Sicherstellung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit wird in diesem Beispiel nicht beschrieben.

Das charakteristische Moment  $m_d$  sowie die charakteristische Normalkraft  $n_d$  im Lastfall 1 werden für die Ermittlung des Vordehnungszustandes benötigt. Es werden die folgenden Werte verwendet:

Einwirkende Schnittgrößen:  $m_{d,LF1} = 3,00 \text{ kNm/m}$

$$n_{d,LF1} = -42,60 \text{ kN/m}$$

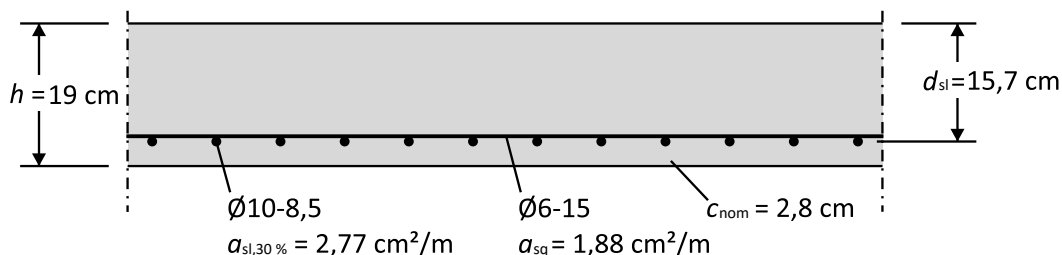
## 8 Bemessung in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit

### 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 über eine geschlossene oder iterative Lösung berechnet werden. Im Zuge dieses Beispiels wird die Ermittlung der Vordehnung über die iterative Lösung dargestellt.

Für eine beispielhafte Ermittlung der Vordehnungen über die geschlossene Lösung wird auf das Beispiel 2 „Bemessung und Anwendung eines CARBObrefit®-Typ 3 Carbongitters“ verwiesen.

Die unter Abschnitt 7.2 aufgeführten Einwirkungen treten an der Stelle des maximalen Biegemoments (maßgebend), welche bei  $x = 2,66 \text{ m}$  (siehe Abbildung 1) liegt, auf. Die Dicke des Tragbogens beträgt an dieser Stelle 19 cm. Die Geometrie des betrachteten Querschnitts ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.



**Abbildung 4: Querschnittsabmessungen an der Stelle des maximalen Moments**

### Schätzung der Dehnungsverteilung

$$\varepsilon_{c,0} = -0,0339 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{s,0} = +0,0271 \text{ ‰}$$

### Bezogene Druckzonenhöhe

$$\xi = \frac{-\varepsilon_{c,0}}{-\varepsilon_{c,0} + \varepsilon_{s,0}} = \frac{0,0339}{0,0339 + 0,0271} = 0,5557$$

### Völligkeitsbeiwert

$$\alpha_R = \frac{|\varepsilon_{c,0}| \cdot (6 - |\varepsilon_{c,0}|)}{12} = \frac{0,0339 \cdot (6 - 0,0339)}{12} = 0,0168$$

### Höhenbeiwert

$$k_a = \frac{8 - |\varepsilon_{c,0}|}{4 \cdot (6 - |\varepsilon_{c,0}|)} = \frac{8 - 0,0339}{4 \cdot (6 - 0,0339)} = 0,3338$$

### Angriffspunkt Betondruckkraft

$$a = k_a \cdot \xi \cdot d_{sl} = 0,3338 \cdot 0,5557 \cdot 0,157 \text{ m} = 0,029 \text{ m}$$

### Innerer Hebelarm der Bewehrungsebene

$$\text{Stahlbewehrung: } z_s = d_{sl} - a = 0,157 \text{ m} - 0,029 \text{ m} = 0,128 \text{ m}$$

### Betondruckkraft

$$F_c = \alpha_R \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = \alpha_R \cdot \xi \cdot d_{sl} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,0168 \cdot 0,5557 \cdot 0,157 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 30.000 \text{ kN/m}^2 = 43,9 \text{ kN/m}$$

### Stahlzugkraft

$$F_s = \varepsilon_{s,0} \cdot \sigma_{sl,30\%} \cdot E_s = 0,0271 \text{ ‰} \cdot 277 \text{ mm}^2/\text{m} \cdot 200.000 \text{ NN/mm}^2 = 1,5 \text{ kN/m}$$

### Überprüfung der Gleichgewichtsbedingungen

#### *Kräftegleichgewicht*

$$F_s - F_c \equiv n_{Ed}$$

$$1,5 \text{ kN/m} - 43,9 \text{ kN/m} = -42,4 \text{ kN/m} \approx n_{d,LF1} \rightarrow \text{Bedingung erfüllt!}$$

#### *Momentengleichgewicht um Achse der Betondruckkraft*

$$\text{Abstand Schwerelinie – Angriffspunkt Betondruckkraft: } a_n = \frac{h}{2} - a = \frac{19 \text{ cm}}{2} - 2,9 \text{ cm} = 6,6 \text{ cm}$$

$$F_s \cdot z_s + F_{nm} \cdot z_{nm} - n_{Ed} \cdot a_n \equiv m_{d,LF1}$$

$$1,5 \text{ kN/m} \cdot 0,128 \text{ m} + 42,6 \text{ kN/m} \cdot 0,06 \text{ m} = 2,7 \text{ kNm/m} \approx m_{d,LF1}$$

→ Bedingung erfüllt!

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

### Bestimmung der fiktiven Vordehnung der Carbonbewehrung



$$\varepsilon_{nm,0} = \varepsilon_{s,0} + \frac{d_{nm} - d_{sl}}{d_{sl}} \cdot (\varepsilon_{s,0} - \varepsilon_{c,0}) = 0,0271 \text{ ‰} + \frac{193 \text{ mm} - 157 \text{ mm}}{157 \text{ mm}} \cdot (0,0271 \text{ ‰} + 0,0339 \text{ ‰}) = 0,041 \text{ ‰}$$

**8.2 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. Aufgrund der Stahlkorrosion können für die Aufnahme der Biegemomente lediglich 30 % der Bestandsbewehrung angesetzt werden. Die Nachweisführung erfolgt an der Stelle des maximalen Biegemoments, welche bei  $x = 2,66 \text{ m}$  liegt. Die Dicke des Tragbogens beträgt an dieser Stelle  $19 \text{ cm}$ . Die Nachweisführung erfolgt ohne Berücksichtigung der Ausbaulasten, da diese zum Zeitpunkt der Herstellung der Verstärkungsschicht zurück gebaut sind.

Einwirkende Schnittgrößen:  $m_{Ed,LF1} = 4,20 \text{ kNm/m}$

$$n_{Ed,LF1} = -59,69 \text{ kN/m}$$

Statische Nutzhöhe Bestandsbewehrung:  $d_{sl} = 0,157 \text{ m}$

Abstand Bewehrung – Schwerelinie:  $z_{s1} = d_{sl} - \frac{h}{2} = 0,157 \text{ m} - \frac{0,19 \text{ m}}{2} = 0,062 \text{ m}$

Bestimmung des bezogenen Moments

$$m_{Eds,LF1} = m_{Ed,LF1} - n_{Ed,LF1} \cdot z_{s1} = 4,20 \text{ kNm/m} + 59,69 \text{ kN/m} \cdot 0,062 \text{ m} = 7,9 \text{ kNm/m}$$

Ermittlung des Widerstandsmoments

$$a_{sl,erf} = \frac{1}{\sigma_{sd}} \cdot (\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} + n_{Ed})$$

$$\omega = \frac{a_{sl,vor} \cdot \sigma_{sd} - n_{Ed}}{b \cdot d \cdot f_{cd}} = \frac{2,77 \text{ cm}^2/\text{m} \cdot 18,3 \text{ kN/cm}^2 + 0,5969 \text{ kN/cm}}{100 \text{ cm} \cdot 15,7 \text{ cm} \cdot 1,7 \text{ kN/cm}^2} = 0,01922$$

$$\mu_{Eds} = 0,02$$

$$m_{Rds,LF1} = \mu_{Eds} \cdot b \cdot d_{sl}^2 \cdot f_{cd} = 0,02 \cdot 1 \text{ m} \cdot (0,157 \text{ m})^2 \cdot 17.000 \text{ kN/m}^2 = 8,4 \text{ kNm/m}$$

Nachweis

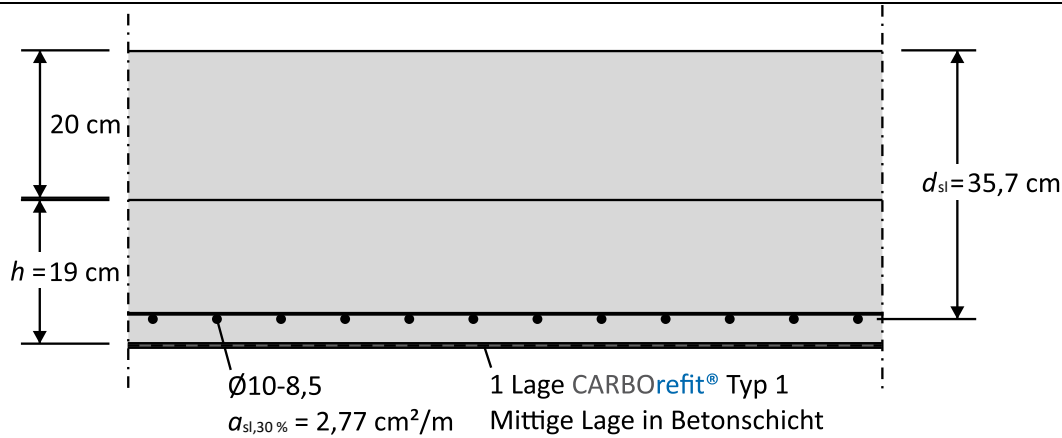
$$\frac{m_{Eds,LF1}}{m_{Rds,LF1}} = \frac{7,9 \text{ kNm/m}}{8,4 \text{ kNm/m}} = 0,94 \leq 1,0$$

Der Nachweis der Biegetragfähigkeit im Bauzustand ist mit einer Auslastung von 94 % erfüllt. Die im Bauzustand auftretenden Lasten können durch den Bestand aufgenommen werden.

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

Der Nachweis der Biegetragfähigkeit der carbonbetonverstärkten Konstruktion erfolgt über die Iteration der Dehnungsebenen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass nur 30 % der Bestandsbewehrung angesetzt werden können. Zunächst wird angenommen, dass eine einlagige Verstärkungsschicht ausreichend ist, um die Tragfähigkeit der Konstruktion unter der neuen Belastungssituation zu gewährleisten. Dementsprechend beträgt die Schichtdicke der Verstärkung nach abZ/aBG [1] sowie Abschnitt 5 dieses Beispiels  $6 \text{ mm}$ . Die maßgebende Stelle für den Nachweis der Biegetragfähigkeit ist die, an der das maximale Biegemoment  $m_{Ed,LF2}$  auftritt. Diese Stelle  $x$  liegt  $2,66 \text{ m}$  vom Auflagerinnenrand entfernt. Die Dicke des Querschnitts (inklusive der Aufbetonschicht und Verstärkung) beträgt an dieser Stelle  $39,6 \text{ cm}$ . Der Querschnitt an der maßgebenden Stelle ist in Abbildung 5 dargestellt.





**Abbildung 5: Querschnittsabmessungen an der Stelle des maximalen Moments inklusive Aufbetonschicht**

Die nachfolgenden Formeln sind für Biegung mit Längskraft anzuwenden. Im Falle, dass eine Druckbewehrung im Bestand vorliegt, sind die Formeln um die entsprechenden Anteile zu erweitern. Für weitere Informationen wird auf [6] verwiesen.

Einwirkende Schnittgrößen:  $m_{Ed,LF2} = 80 \text{ kNm/m}$

$$n_{Ed,LF1} = -250 \text{ kN/m}$$

Statische Nutzhöhe Bestandsbewehrung:  $d_{sl} = 0,357 \text{ m}$

Statische Nutzhöhe Carbonbewehrung:  $d_{nm} = 0,393 \text{ m}$

Abstand Bewehrung – Schwerelinie:  $z_{s1} = d_{sl} - \frac{h}{2} = 0,357 \text{ m} - \frac{0,393 \text{ m}}{2} = 0,1605 \text{ m}$

### Bestimmung des bezogenen Moments

$$m_{Eds,LF2} = m_{Ed,LF2} - n_{Ed,LF2} \cdot z_{s1} = 80 \text{ kNm/m} + 250 \text{ kN/m} \cdot 0,1605 \text{ m} = 120 \text{ kNm/m}$$

### Schätzung der Dehnungsverteilung

$$\varepsilon_{nm} = \varepsilon_{nm,u} = + 3,716 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_{nm,0} = + 0,041 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_c = - 0,802 \text{ ‰}$$

### Bezogene Druckzonenhöhe

$$\xi = \frac{-\varepsilon_c}{-\varepsilon_c + \varepsilon_{nm,0} + \varepsilon_{nm}} = \frac{0,802}{0,802 + 0,041 + 3,716} = 0,176$$

### Völligkeitsbeiwert

$$\alpha_R = \frac{|\varepsilon_c| \cdot (6 - |\varepsilon_c|)}{12} = \frac{0,802 \cdot (6 - 0,802)}{12} = 0,347$$

### Höhenbeiwert

$$k_a = \frac{8 - |\varepsilon_c|}{4 \cdot (6 - |\varepsilon_c|)} = \frac{8 - 0,802}{4 \cdot (6 - 0,802)} = 0,346$$

### Angriffspunkt Betondruckkraft

$$a = k_a \cdot \xi \cdot d_{nm} = 0,346 \cdot 0,176 \cdot 0,393 \text{ m} = 0,024 \text{ m}$$

### Innerer Hebelarm der Bewehrungsebenen

Stahlbewehrung:  $z_s = d_{sl} - a = 0,357 \text{ m} - 0,024 \text{ m} = 0,3328 \text{ m}$

Carbonbewehrung:  $z_{nm} = d_{nm} - a = 0,393 \text{ m} - 0,024 \text{ m} = 0,3688 \text{ m}$

### Betondruckkraft

$$F_c = \alpha_R \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = \alpha_R \cdot \xi \cdot d_{nm} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,347 \cdot 0,176 \cdot 0,393 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 17.000 \text{ kN/m}^2 = 408,0 \text{ kN/m}$$

### Stahlzugkraft

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

$$\varepsilon_s = \frac{(d_{sl} - (\xi \cdot d_{nm})) \cdot \varepsilon_{nm}}{d_{nm} - (\xi \cdot d_{nm})} = \frac{(0,357 \text{ m} - (0,176 \cdot 0,393 \text{ m})) \cdot 3,716 \text{ ‰}}{0,393 \text{ m} - (0,176 \cdot 0,393 \text{ m})} = + 3,303 \text{ ‰}$$

→ Stahl fließt, da  $\varepsilon_s = + 3,303 \text{ ‰} > + 0,915 \text{ ‰} = \varepsilon_{yd}$  (Fließdehnung)

$$F_s = a_{sl} \cdot f_{yd} = 2,77 \text{ cm}^2/\text{m} \cdot 18,3 \text{ kN/cm}^2 = 50,7 \text{ kN/m}$$

### Zugkraft in der Carbonbewehrung

$$F_{nm} = \varepsilon_{nm} \cdot a_{kf,nm} \cdot E_{nm,m} = 3,176 \text{ ‰} \cdot 140 \text{ mm}^2/\text{m} \cdot 206.667 \text{ N/mm}^2 = 107,5 \text{ kN/m}$$

### Überprüfung der inneren Gleichgewichtsbedingung (Kräftegleichgewicht)

$$F_s + F_{nm} - F_c \equiv n_{Ed}$$

$$50,7 \text{ kN/m} + 107,5 \text{ kN/m} - 408,0 = \text{kN/m} = -250 \text{ kN/m} = n_{Ed,LF2} \rightarrow \text{Bedingung erfüllt!}$$

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

### Bestimmung des bezogenen Widerstandsmoments

Das Momentengleichgewicht wird um die Achse der Stahlbewehrung gebildet.

Abstand Carbonbewehrung – Stahlbewehrung:  $a_{nm} = z_{nm} - z_s = 0,3688 \text{ m} - 0,3328 \text{ m} = 0,036 \text{ m}$

$$m_{Rds,LF2} = F_{nm} \cdot a_{nm} + F_c \cdot z_s$$

$$m_{Rds,LF2} = 107,5 \text{ kN/m} \cdot 0,036 \text{ m} + 408,0 \text{ kN/m} \cdot 0,3328 \text{ m} = 139,7 \text{ kNm/m}$$

### Nachweis

$$\frac{m_{Eds,LF2}}{m_{Rds,LF2}} = \frac{120 \text{ kNm/m}}{139,7 \text{ kNm/m}} = 0,86 \leq 1,0$$

Der Nachweis der Biegetragfähigkeit im Lastfall 2 ist mit einer Auslastung von 86 % 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. Der Nachweis wird in diesem Beispiel an der Stelle  $x = d_{sl} = 0,417$  m geführt. Der maßgebende Wert der einwirkenden Querkraft an dieser Stelle beträgt 70 kN/m.

Hinweis: die Laufvariable  $x$  beginnt bei diesem Beispiel am Auflagerinnenrand.

#### Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit des Bestandsquerschnitts

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

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{d_{sl}}} = 1 + \sqrt{\frac{200 \text{ mm}}{417 \text{ mm}}} = 1,69 \leq 2,0$$

$$\rho_l = \frac{a_{sl}}{d_{sl}} = \frac{0,0277 \text{ cm}^2/\text{cm}}{41,7 \text{ cm}} = 0,066 \%$$

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

$$v_{Rd,c} = \left[ \frac{0,15}{1,5} \cdot 1,69 \cdot (100 \cdot 0,066 \% \cdot 30 \text{ N/mm}^2)^{1/3} \right] \cdot 417 \text{ mm} = 88,49 \text{ kN/m}$$

#### Mindestquerkrafttragfähigkeit

$$v_{Rd,c,min} = \frac{0,0525}{\gamma_c} \cdot (k^3 \cdot f_{ck})^{0,5} \cdot d_s = \frac{0,0525}{1,5} \cdot (1,69^3 \cdot 30 \text{ N/mm}^2)^{0,5} \cdot 417 \text{ mm} = 175,6 \text{ kN/m}$$

#### Nachweis

$$\frac{v_{Ed,LF2}}{v_{Rd}} = \frac{70 \text{ kN/m}}{175,6 \text{ kN/m}} = 0,40 \leq 1,0$$

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit ohne Ansatz der Carbonbetonverstärkung ist für die neue Belastungssituation im Lastfall 2 mit einer Auslastung von 40 % 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  $m_{Ed,LF2}$  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 [5], Abschnitt 6.2.5 beschriebenen Vorgehen.

Die Anwendung einer Carbonbetonverstärkung bei konkav gekrümmten Bauteilen ist zulässig, wenn nach abZ/aBG Z-31.10-182 [1] Anlage 5, Abschnitt 6.2.5 die beiden folgenden Bedingungen erfüllt sind:

$$(1) \quad 1 \text{ N/mm}^2 + 5 \cdot p_{\text{konkav}} \leq f_{\text{ctm,surf}}$$

- (2) Der Nachweis der Schubfugentragfähigkeit nach Gleichung 6.25 der DIN EN 1992-1-1 [5] ist erfüllt für:

$$f_{\text{ctd}} = \alpha_{\text{ct}} \cdot \frac{f_{\text{ctk},0,05}}{\gamma_c} \quad \text{mit} \quad f_{\text{ctk},0,05} = f_{\text{ctk},0,05,\text{surf}} - \sigma_n$$
$$\sigma_n = a_{\text{Kf,nm}} \cdot \frac{\sigma_{\text{K,nm,k}}}{r}$$

### Prüfung der Bedingung 1

Der Erwartungswert des Mittelwertes (95 % Zuverlässigkeit) der Oberflächenzugfestigkeit des Betons  $f_{\text{ctm,surf}}$  wurde bereits in Abschnitt 4.1 dieses Beispiels bestimmt. Dieser beträgt 2,16 N/mm<sup>2</sup>.

Die Umlenkspannung  $p_{\text{konkav}}$  wird wie folgt ermittelt:

$$p_{\text{konkav}} = a_{\text{Kf,nm}} \cdot f_{\text{nm,k}} \cdot \frac{1,5}{r}$$

Mit  $a_{\text{Kf,nm}}$  Querschnittsfläche der Gitter in Kettrichtung

$f_{\text{nm,k}}$  Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit der Carbongitter

$r$  Krümmungsradius der konkaven Bauteiloberfläche, hier:  $r = 15,4 \text{ m}$

$$p_{\text{konkav}} = 140 \text{ mm}^2/\text{m} \cdot 1.550 \text{ N/mm}^2 \cdot \frac{1,5}{15,4 \text{ m}} = 21.136 \text{ N/m}^2 = 0,021 \text{ N/mm}^2$$

Prüfung der Bedingung:

$$1 \text{ N/mm}^2 + 5 \cdot 0,021 \text{ N/mm}^2 = 1,11 \text{ N/mm}^2 \leq 2,16 \text{ N/mm}^2 = f_{\text{ctm,surf}} \rightarrow \text{Bedingung erfüllt!}$$

### Prüfung der Bedingung 2 über den Nachweis der Schubfugentragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1 [5]

Der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit wird für konkav gekrümmte Bauteile wie folgt ermittelt:

$$f_{\text{ctd}} = \alpha_{\text{ct}} \cdot \frac{f_{\text{ctk},0,05}}{\gamma_c} \quad \text{mit} \quad f_{\text{ctk},0,05} = f_{\text{ctk},0,05,\text{surf}} - \sigma_n \quad \text{mit} \quad \sigma_n = a_{\text{Kf,nm}} \cdot \frac{\sigma_{\text{K,nm,k}}}{r}$$

Mit  $\sigma_{\text{K,nm,k}}$  Zugspannung in den Fasersträngen des Carbongitters an der Stelle der konkaven Krümmung der Carbonbetonschicht unter der seltenen Einwirkungskombination, hier:  
 $\sigma_{\text{K,nm,k}} = 414 \text{ N/mm}^2$

$$\sigma_n = 140 \text{ mm}^2/\text{m} \cdot \frac{414 \text{ N/mm}^2}{15,4 \text{ m}} = 0,0038 \text{ N/mm}^2$$

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  $f_{\text{ctk},0,05}$  bestimmt werden. Die Messwerte sind der Übersichtlichkeit halber nachfolgend noch einmal dargestellt.

**Tabelle 4: Einzelwerte der Prüfungen am Bauteil zur Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit (s. Tabelle 1)**

Anzahl der Prüfungen $n$	1	2	3	4	5
$f_{ctm,surf,i}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,10	2,30	2,25	2,45	2,10

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

- Arithmetisches Mittel:  $m_x = 2,24$  N/mm<sup>2</sup>
- Standardabweichung des Stichprobenumfangs:  $s = 0,15$
- Faktor:  $k_n (n = 5) = 2,33$
- Charakteristischer Wert der Haftzugfestigkeit (5 %-Fraktil)

$$f_{ctk;0,05} = m_x - k \cdot s = 2,24 \text{ N/mm}^2 - 2,33 \cdot 0,15 = 1,89 \text{ N/mm}^2$$

### Bestimmung der Schubfugentragfähigkeit

$$v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} = c \cdot \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} = 0,4 \cdot 0,85 \cdot \frac{1,89 \text{ N/mm}^2 - 0,0038 \text{ N/mm}^2}{1,50} = 0,423 \text{ N/mm}^2$$

### Bestimmung der Bemessungsschubspannung

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

$$\beta = \frac{F_{nm}}{F_s + F_{nm}} = \frac{57,9 \text{ kN/m}}{50,7 \text{ kN/m} + 57,9 \text{ kN/m}} = 0,533$$

$$V_{Ed} = v_{Ed,LF2} = 70 \text{ kN/m}$$

$$z_{ges} = z_s \cdot \frac{F_s}{F_s + F_{nm}} + z_{nm} \cdot \frac{F_{nm}}{F_s + F_{nm}}$$

$$= 0,328 \text{ m} \cdot \frac{50,7 \text{ kN/m}}{(50,7 \text{ kN/m} + 57,9 \text{ kN/m})} + 0,364 \text{ m} \cdot \frac{57,9 \text{ kN/m}}{(50,7 \text{ kN/m} + 57,9 \text{ kN/m})} = 0,347 \text{ m}$$

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

$$v_{Edi} = \frac{\beta \cdot v_{Ed,LF2}}{z_{ges}} = \frac{0,533 \cdot 70 \text{ kN/m}}{0,347 \text{ m}} = 0,107 \text{ N/mm}^2$$

### Nachweis

$$\frac{v_{Edi}}{v_{Rdi}} = \frac{0,107 \text{ N/mm}^2}{0,423 \text{ N/mm}^2} = 0,25 \leq 1,0$$

Der Nachweis der Schubkraftübertragung in der Verbundfuge ist mit einer Auslastung von 25 % erfüllt. Die Bedingung 2 ist erfüllt und die konkav gekrümmte Fläche kann mit Carbonbeton verstärkt werden.

### 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)

$$v_{Rd,c,nm} = 0,75 \cdot \left( 1 + 19,6 \cdot \frac{(100 \cdot 0,077 \%)^{0,15}}{(250 \text{ mm})^{0,36}} \right) \cdot 175,6 \text{ kN/m} = 372,4 \text{ kN/m}$$

#### Nachweis

$$\frac{v_{Ed,LF2}}{v_{Rd,c,nm}} = \frac{70 \text{ kN/m}}{372,4 \text{ kN/m}} = 0,19 \leq 1,0$$

Der Nachweis gegen Versatzbruch ist mit einer Auslastung von 19 % erfüllt.

### 9 Bemessung in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

Entsprechend Abschnitt 7.2 wird die Einhaltung der durch die DIN EN 1992-1-1 [5] vorgegebenen Nachweise zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit an dieser Stelle vom Bestand als erfüllt angesehen. Eine Verstärkung zur Sicherstellung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit wird in diesem Beispiel nicht beschrieben.

### 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. Im Vorfeld wurde der Punkt x bestimmt, ab dem die maximale Biegetragfähigkeit des Bestands von 57 kNm/m überschritten wird. Dieser liegt 1,30 m entfernt vom Auflagerstand des Tragbogens. Die Dicke des Querschnitts (inklusive der Aufbetonschicht und Verstärkung) beträgt an dieser Stelle 41,6 cm. Durch die Iteration der Dehnungsebenen wird die Spannung im Carbondgitter ermittelt, welche durch den Bestand verankert werden muss.

Einwirkende Schnittgrößen:  $m_{Ed} = 57 \text{ kNm/m}$

$n_{Ed} = -150 \text{ kN/m}$

Statische Nutzhöhe Bestandsbewehrung:  $d_{sl} = 0,377 \text{ m}$

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

### Schätzung der Dehnungsverteilung

$$\varepsilon_{nm} = + 1,157 ‰$$

$$\varepsilon_c = - 0,323 ‰$$

### Bezogene Druckzonenhöhe

$$\xi = \frac{-\varepsilon_c}{-\varepsilon_c + \varepsilon_{nm}} = \frac{0,323}{0,323 + 1,157} = 0,2182$$

### Völligkeitsbeiwert

$$\alpha_R = \frac{|\varepsilon_c| \cdot (6 - |\varepsilon_c|)}{12} = \frac{0,323 \cdot (6 - 0,323)}{12} = 0,1528$$

### Höhenbeiwert

$$k_a = \frac{8 - |\varepsilon_c|}{4 \cdot (6 - |\varepsilon_c|)} = \frac{8 - 0,323}{4 \cdot (6 - 0,323)} = 0,338$$

### Angriffspunkt Betondruckkraft

$$a = k_a \cdot \xi \cdot d_{nm} = 0,338 \cdot 0,2182 \cdot 0,413 \text{ m} = 0,03 \text{ m}$$

### Innerer Hebelarm der Bewehrungsebenen

Stahlbewehrung:  $z_s = d_{sl} - a = 0,377 \text{ m} - 0,03 \text{ m} = 0,347 \text{ m}$

Carbonbewehrung:  $z_{nm} = d_{nm} - a = 0,413 \text{ m} - 0,03 \text{ m} = 0,383 \text{ m}$

### Betondruckkraft

$$F_c = \alpha_R \cdot x \cdot b \cdot f_{cd} = \alpha_R \cdot \xi \cdot d_{nm} \cdot b \cdot f_{cd} = 0,1528 \cdot 0,2182 \cdot 0,413 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 17.000 \text{ kN/m}^2 = 234,1 \text{ kN/m}$$

### Stahlzugkraft

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

$$\varepsilon_s = \frac{(d_{sl} - (\xi \cdot d_{nm})) \cdot \varepsilon_{nm}}{d_{nm} - (\xi \cdot d_{nm})} = \frac{(0,377 \text{ m} - (0,2182 \cdot 0,413 \text{ m})) \cdot 1,157 ‰}{0,413 \text{ m} - (0,2182 \cdot 0,413 \text{ m})} = + 1,028 ‰$$

→ Stahl fließt, da  $\varepsilon_s = + 1,028 ‰ > + 0,915 ‰ = \varepsilon_{yd}$  (Fließdehnung)

$$F_s = a_{sl} \cdot f_{yd} = 2,77 \text{ cm}^2/\text{m} \cdot 18,3 \text{ kN/cm}^2 = 50,7 \text{ kN/m}$$

### Zugkraft in der Carbonbewehrung

$$F_{nm} = \varepsilon_{nm} \cdot a_{kf,nm} \cdot E_{nm,m} = 1,157 ‰ \cdot 140 \text{ mm}^2/\text{m} \cdot 206.667 \text{ N/mm}^2 = 33,5 \text{ kN/m}$$

### Überprüfung der Gleichgewichtsbedingungen

#### *Kräftegleichgewicht*

$$F_s + F_{nm} - F_c \equiv n_{Ed}$$

$$50,7 \text{ kN/m} + 33,5 \text{ kN/m} - 234,1 \text{ kN/m} = -150 \text{ kN/m} = n_{Ed} \rightarrow \text{Bedingung erfüllt!}$$



### Momentengleichgewicht um Achse der Betondruckkraft

Abstand Schwerelinie – Angriffspunkt Betondruckkraft:  $a_n = \frac{h}{2} - a = \frac{41,6 \text{ cm}}{2} - 3,0 \text{ cm} = 17,8 \text{ m}$

$$F_s \cdot z_s + F_{nm} \cdot z_{nm} - n_{Ed} \cdot a_n \equiv m_{Ed,LF2}$$

$$50,7 \text{ kN/m} \cdot 0,347 \text{ m} + 33,5 \text{ kN/m} \cdot 0,383 \text{ m} + 150 \text{ kN/m} \cdot 0,178 \text{ m} = 57 \text{ kNm/m} = m_{Ed,LF2}$$

→ 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:

$$\sigma_{nm} = E_{nm} \cdot \varepsilon_{nm} = 206.667 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,157 \text{ ‰} = 239 \text{ N/mm}^2$$

Notwendige Verankerungslänge:

$$l_{b,nm,rqd} = \frac{\sigma_{nm} \cdot A_{nm,K}}{T_{nm,bd}} = \frac{239 \text{ N/mm}^2 \cdot 1,80 \text{ mm}^2}{0,6 \text{ N/mm}} = 0,72 \text{ m}$$

Zur Berücksichtigung der zusätzlichen Zugkraft  $\Delta F_t$  infolge der Querkraft wird das Versatzmaß  $a_l = d_{nm}$  bei der Bestimmung des Bemessungswertes der Verankerungslänge berücksichtigt.

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

$$l_{bd} = l_{b,nm,rqd} + d_{nm} = 0,72 + 0,413 \text{ m} = 1,13 \text{ m} \geq 100 \text{ mm}$$

### Nachweis

$$\frac{l_{bd}}{l_{vorh}} = \frac{1,13 \text{ m}}{1,30 \text{ m}} = 0,87 \leq 1,0$$

Der Nachweis der Verankerung der Carbonbewehrung ist mit einer Auslastung von 87 % erfüllt.

Weiterhin ist hinsichtlich der Bewehrungs- und Konstruktionsregeln anzumerken, dass ein Einschneiden der Zugkraftdeckungsline 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 [5] 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 nachzuweisen. Fehlende Querbewehrung darf durch Carbonbewehrung ersetzt werden. Nachfolgend wird überprüft, ob ausreichend Querbewehrung im Bestand vorhanden ist.

$$a_{sq,erf} = 0,2 \cdot a_{sl} = 0,2 \cdot 9,24 \text{ cm}^2/\text{m} = 1,85 \text{ cm}^2/\text{m} < 1,88 \text{ cm}^2/\text{m} = a_{sq,vorh} \rightarrow \text{Bedingung erfüllt!}$$

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

### 10.4 Stöße und mechanische Verbindungen

Auf Grund der Flexibilität des vorliegenden Carbongitters, kann das Material als Rollenware für den Einbau geliefert werden. Die Mattenlänge kann daher an die Länge des Tragbogens angepasst werden, sodass in Längsrichtung (Kettrichtung) keine Übergreifungsstöße erforderlich werden.

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 30 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] Schnell, J.; Fischer, A.; Loch, M.: *Anwendung von Teilsicherheitsbeiwerten auf Bestandsbauten im Hochbau*, Fraunhofer IRB Verlag, 2009
- [4] DIN EN 1991-1-1 (2010-12): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau
- [5] 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
- [6] Curbach, M.; Schumann, A.; May, S.; Müller, E.; Schütze, E.; Wagner, J.: *Verstärken mit Carbonbeton* in: Betonkalender 2022, S. 761-804, Ernst & Sohn
- [7] DIN EN 1990 (2021-10): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung