

## MERKBLATT 3.01

## Bemessung und Konstruktion von mit Carbonbeton verstärkten Bauteilen

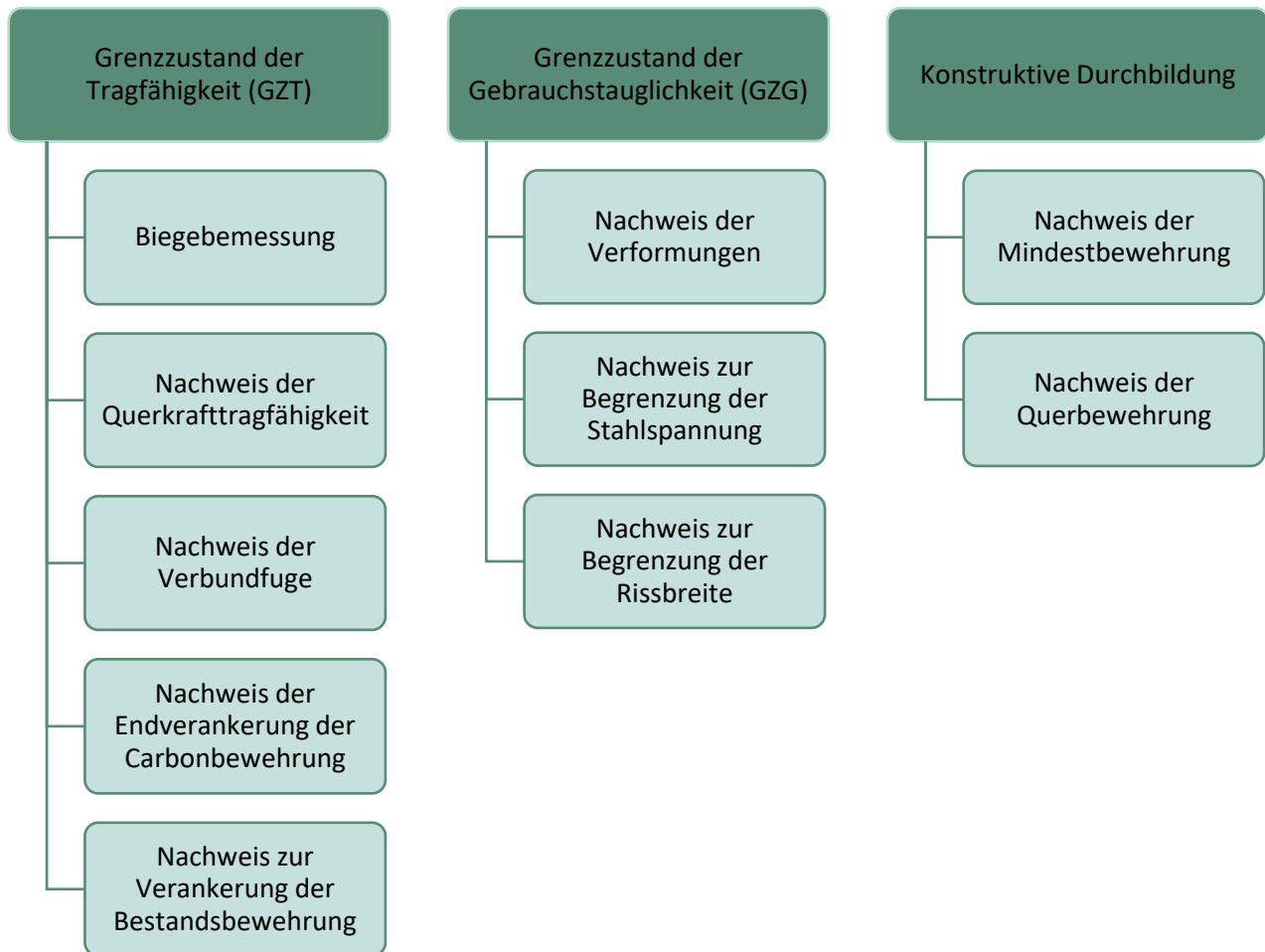
Bei Fragen/Anmerkungen  
zu kontaktieren:

E-Mail: [info@carborefit.de](mailto:info@carborefit.de)  
Telefon: +49351 48205521

Stand: 07.01.2025

### 1 Allgemeines

In diesem Merkblatt werden die in Anlage 5 der abZ/aBG Z-31.10-182 [1] geregelte Bemessung und Konstruktion von auf Biegung beanspruchten Bauteilen mit Carbonbetonverstärkung vorgestellt. Es werden die folgenden Nachweise betrachtet:



Die für die Nachweisführung anzusetzenden Bemessungskennwerte der CARBOrefit®-Carbongitter können dem „Merkblatt 01 - Eigenschaften der CARBOrefit®-Typ 1 und -Typ 3 Carbongitter in Regel- und Sonderausführung“ entnommen werden.

### 2 Ermittlung des Vordehnungszustandes

Die zu verstärkenden Stahlbetonbauteile haben in der Regel meist eine Vorbelastung erfahren. Aus diesem Grund sollte vor der Bemessung der Carbonbetonverstärkung der fiktive Vordehnungszustand der Carbonbewehrung  $\varepsilon_{nm,0}$  bestimmt und in der Biegebemessung berücksichtigt werden. Die vorhandenen Dehnungen sind dabei entweder wirklichkeitsnah mit den vorhandenen Einwirkungen oder vereinfachend auf Gebrauchstauglichkeitsniveau mit der quasi-ständigen Belastungskombination zu ermitteln. Die Berücksichtigung der Vordehnung ist vor allem bei stark ausgelasteten Querschnitten erforderlich, da diese sich auf die

zu erwartende Versagensart (Zug- oder Druckversagen), die Dehnungsverteilung im Querschnitt sowie die erforderliche Carbonbewehrungsfläche auswirkt [2]. Um eine wirtschaftliche Bemessung der Carbongitter zu erzielen, ist das Versagen der Carbonbewehrung anzustreben, sodass die volle Zugfestigkeit der Gitter ausgenutzt wird. Die fiktive Vordehnung der Carbonbewehrung kann über ein iteratives Vorgehen oder über eine geschlossene Lösung bestimmt werden. Beide Verfahren werden im Folgenden vorgestellt.

### 2.1 Ermittlung des Vordehnungszustands über die Iteration der Dehnungsebenen

In diesem Abschnitt wird der Ablauf der iterativen Bestimmung des Vordehnungszustandes beschrieben. 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 [3] verwiesen.

1. Schätzen der Vordehnungen des Betons  $\varepsilon_{c,0}$  und der Bewehrung  $\varepsilon_{s,0}$  des Bestandsquerschnitts

2. Bestimmung der bezogenen Druckzonenhöhe  $\xi$

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

3. Bestimmung des Völligkeitsbeiwertes  $\alpha_R$  für Betone  $\geq C12/15$  und  $\leq C50/60$

$$\alpha_R = \begin{cases} \frac{-\varepsilon_{c,0}}{2} - \frac{\varepsilon_{c,0}^2}{12}, & 0 \geq \varepsilon_{c,0} \geq -2 \text{ ‰} \\ 1 + \frac{2}{3 \cdot \varepsilon_{c,0}}, & -2 \text{ ‰} \geq \varepsilon_{c,0} \geq -3,5 \text{ ‰} \end{cases}$$

4. Bestimmung des Höhenbeiwerts  $k_a$  für Betone  $\geq C12/15$  und  $\leq C50/60$

$$k_a = \begin{cases} \frac{8 + \varepsilon_{c,0}}{24 + 4 \cdot \varepsilon_{c,0}}, & 0 \geq \varepsilon_{c,0} \geq -2 \text{ ‰} \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_{c,0}^2 + 4 \cdot \varepsilon_{c,0} + 2}{6 \cdot \varepsilon_{c,0}^2 + 4 \cdot \varepsilon_{c,0}}, & -2 \text{ ‰} \geq \varepsilon_{c,0} \geq -3,5 \text{ ‰} \end{cases}$$

5. Bestimmung des Angriffspunkts  $a$  der Betondruckkraft

$$a = k_a \cdot \xi \cdot d_s$$

6. Bestimmung des inneren Hebelarms der Bestandsbewehrung

$$z_s = d_s - a$$

7. Bestimmung der Betondruckkraft und der Stahlzugkraft

$$\text{Betondruckkraft: } F_c = \alpha_R \cdot x \cdot b \cdot f_c = \alpha_R \cdot \xi \cdot d_s \cdot b \cdot f_c$$

$$\text{Stahlzugkraft: } F_s = \varepsilon_s \cdot a_s \cdot E_s$$

Annahme einer neuen Dehnungsverteilung

8.

Überprüfen der Gleichgewichtsbedingungen

Kräftegleichgewicht:  $F_c = F_s$  ?

Momentengleichgewicht:  $M_{d,char} = F_s \cdot z_s$  ?

Gleichgewichtsbedingungen  
erfüllt

Gleichgewichtsbedingungen  
nicht erfüllt

9.

Ermittlung der fiktiven Vordehnung der Carbonbewehrung

$$\varepsilon_{nm,0} = \varepsilon_{s,0} + \frac{d_{nm} - d_s}{d_s} \cdot (\varepsilon_{s,0} - \varepsilon_{c,0})$$

Mit  $d_{nm}$  statische Nutzhöhe der Carbonbewehrung

### 2.2 Ermittlung des Vordehnungszustandes über die geschlossene Lösung

Die geschlossene Lösung bietet die Möglichkeit, die Vordehnung ohne Iteration der Dehnungsebenen abzuschätzen. In diesem Verfahren wird ein linearer Betondruckspannungsverlauf angenommen. Die nachfolgenden Formeln können nur für Rechteckquerschnitte ohne Druckbewehrung und bei reiner Biegung angewendet werden.

1.

Bestimmung des Verhältnisses der E-Moduln von Bestandsbewehrung zu Bestandsbeton

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c}$$

2.

Bestimmung der Druckzonenhöhe

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

3.

Bestimmung des inneren Hebelarms

$$z = d_s - \frac{x}{3}$$

4.

Bestimmung der Vordehnungen

$$\text{Stahlbewehrung: } \varepsilon_{s,0} = \frac{\frac{m_{d,LF1}}{E_s}}{z \cdot A_{s1}} \quad \text{Beton: } \varepsilon_{c,0} = - \frac{2 \cdot \frac{m_{d,LF1}}{E_c}}{b \cdot x \cdot z}$$

5.

Ermittlung der fiktiven Vordehnung der Carbonbewehrung

$$\varepsilon_{nm,0} = \varepsilon_{s,0} + \frac{d_{nm} - d_s}{d_s} \cdot (\varepsilon_{s,0} - \varepsilon_{c,0})$$

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

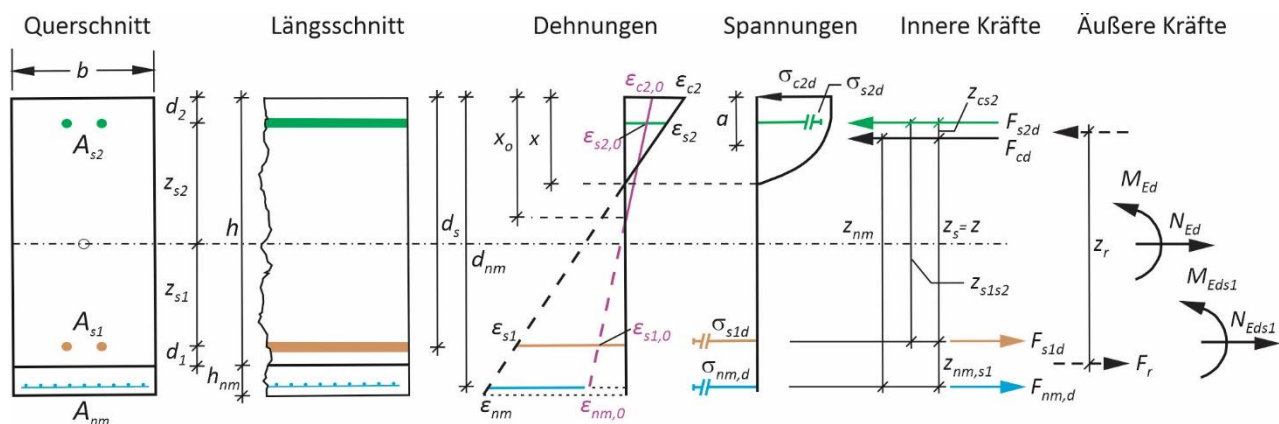
### 3 Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit

#### 3.1 Biegebemessung

Die Biegebemessung carbonbetonverstärkter Konstruktionen erfolgt über die Iteration der Dehnungsebenen. Der generelle Ablauf entspricht dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Vorgehen. Die Formeln werden lediglich um die Zugkraftanteile der Carbonbewehrung ergänzt. Das iterative Verfahren legt die folgenden Annahmen zu Grunde:

- Anwendung der Bernoulli-Hypothese: Ebenbleiben des Querschnitts und lineare Dehnungsverteilung über den Querschnitt
- reine Biegung (ohne Normalkraft), bei vorliegender Normalkraft ist analog zu Stahlbeton vorzugehen
- Annahme eines vollständigen Verbunds der Materialien
- Nachweisführung im Zustand II, nur die Bewehrung kann Zugkräfte aufnehmen
- Beton und Stahl weisen bei gleichen Dehnungen den gleichen Abstand zur Nulllinie auf
- Die in DIN EN 1992-1-1 [4] geregelten Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton und Stahlbewehrung sind anzuwenden, d. h.:
  - Beton: Parabel-Rechteck-Diagramm
  - Stahlbewehrung: bilineare Spannungs-Dehnungs-Linie mit horizontalem oder ansteigendem Ast nach Überschreitung der Fließgrenze
- Spannungs-Dehnungs-Linie Carbonbewehrung: idealisiert linear abZ/aBG [1]

Eine Prinzipskizze zur iterativen Biegebemessung eines carbonbetonverstärkten Rechteckquerschnitts ist in Abbildung 1 dargestellt.



**Abbildung 1: Prinzipskizze zur iterativen Ermittlung der Biegetragfähigkeit eines carbonbetonverstärkten Rechteckquerschnitts (Quelle: CARBOCON GMBH)**

Das Ablaufschema für die Biegebemessung **ohne Einwirkung einer Normalkraft** ist im Folgenden dargestellt.

1.

Schätzen der Dehnungen des Betons  $\epsilon_c$  und der Carbonbewehrung  $\epsilon_{nm}$ , wobei entweder die Bruchstauchung des Betons oder die Bruchdehnung der Carbonbewehrung erreicht werden sollte (ein Versagen der Carbonbewehrung ist anzustreben, um die Materialien effizient auszunutzen).

2.

Bestimmung der bezogenen Druckzonenhöhe  $\xi$

$$\xi = \frac{-\epsilon_c}{-\epsilon_c + \epsilon_{nm,0} + \epsilon_{nm}}$$

3.

 Bestimmung des Völligkeitsbeiwertes  $\alpha_R$  und des Höhenbeiwertes  $k_a$  nach Abschnitt 2.1

4.

 Bestimmung des Angriffspunkts  $a$  der Betondruckkraft

$$a = k_a \cdot \xi \cdot d_{nm}$$

5.

Bestimmung des inneren Hebelarms der Bewehrungen

Stahlbewehrung:  $z_s = d_s - a$

Carbonbewehrung:  $z_{nm} = d_{nm} - a$

6.

Bestimmung der Betondruckkraft

Betondruckkraft:  $F_c = \alpha_R \cdot \eta \cdot b \cdot f_{cd} = \alpha_R \cdot \xi \cdot d_{nm} \cdot b \cdot f_{cd}$

7.

Bestimmung der Stahldehnung und der Stahlzugkraft

Stahldehnung:  $\varepsilon_s = \frac{(d_s - (\xi \cdot d_{nm})) \cdot \varepsilon_{nm}}{d_{nm} - (\xi \cdot d_{nm})}$

Stahlzugkraft:  $F_s = \varepsilon_s \cdot a_s \cdot E_s \quad (\varepsilon_s < \varepsilon_{yd})$

Stahlzugkraft:  $F_s = a_{sl} \cdot f_{yd} \quad (\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd}) \quad (\text{ohne Berücksichtigung des ansteigenden Astes})$

8.

Bestimmung der Zugkraft in der Carbonbewehrung aus Momentengleichgewicht

$$F_{nm} = \frac{M_{Ed} - F_s \cdot z_s}{z_{nm}}$$

9.

Überprüfen des Kräftegleichgewichts

$$F_c = F_s + F_{nm}$$

 Gleichgewichtsbedingung  
erfüllt

 Gleichgewichtsbedingung  
nicht erfüllt

10.

Ermittlung der erforderlichen Carbonbewehrungsfläche

$$a_{nm} = \frac{F_{nm}}{E_{nm,m} \cdot \varepsilon_{nm}}$$

Bei Querschnitten ohne Normalkrafteinwirkung und ohne erforderliche Druckbewehrung ist alternativ auch eine Berechnung mithilfe der Bemessungstabellen, entsprechende Angaben sind für den CARBOrefit®-Typ 1 in Tabelle 1 sowie für den CARBOrefit®-Typ 3 in Tabelle 2 dargestellt, möglich. Das bezogene Moment  $\mu_{\text{tex}}$  berechnet sich aus dem einwirkenden Moment  $M_{\text{ed}}$ , der Annahme, dass die Stahlzugfestigkeit erreicht ist, den Querschnittswerten und der Betondruckfestigkeit  $f_{\text{cd}}$  wie folgt:

$$\mu_{\text{nm}} = \frac{M_{\text{ed}} + \sigma_{\text{s1d}} \cdot A_{\text{s1}} \cdot (d_{\text{nm}} - d_{\text{s}})}{b \cdot d_{\text{nm}}^2 \cdot f_{\text{cd}}}$$

Anschließend kann der Wert  $\omega_{\text{nm}}$  abgelesen und interpoliert werden. Die erforderliche textile Bewehrungsfläche kann mit folgender Formel bestimmt werden:

$$A_{\text{nm}} = \frac{1}{\sigma_{\text{td,nm}}} \cdot (\omega_{\text{nm}} \cdot b \cdot d_{\text{nm}} \cdot f_{\text{cd}} - \sigma_{\text{s1d}} \cdot A_{\text{s1}})$$

Aus wirtschaftlichen Gründen, zur Ausnutzung der Streckgrenze, sollte immer ein Textil- und kein Betonversagen auftreten. Des Weiteren sollte die erforderliche Bewehrungsmenge 4 Lagen nicht überschreiten.

**Tabelle 1: Bemessungstafel für die Bemessung der Verstärkung mit dem CARBorefit® Typ 1**

$\varepsilon_{\text{utex}} = \varepsilon_{\text{utex}} / \nu_{\text{tex}}$		CARBorefit® Typ 1					
$\mu_{\text{tex}}$	$\omega_{\text{tex}}$	$\xi_{\text{tex}} = x/d_{\text{tex}}$	$\zeta_{\text{tex}} = z_{\text{tex}}/d_{\text{tex}}$	$\varepsilon_{c2}$	$\varepsilon_{\text{tex}}$ [‰]	$\sigma_{\text{tex}}$ [N/mm²]	
0,01	0,01025	0,073	0,975	-0,29	3,72	768,54	Textilverstärken
0,02	0,02073	0,104	0,965	-0,43	3,72	768,54	
0,03	0,03137	0,127	0,956	-0,54	3,72	768,54	
0,04	0,04213	0,147	0,949	-0,64	3,72	768,54	
0,05	0,05301	0,165	0,943	-0,73	3,72	768,54	
0,06	0,06401	0,181	0,937	-0,82	3,72	768,54	
0,07	0,07512	0,196	0,932	-0,90	3,72	768,54	
0,08	0,08633	0,210	0,927	-0,99	3,72	768,54	
0,09	0,09764	0,223	0,922	-1,07	3,72	768,54	
0,10	0,10907	0,236	0,917	-1,15	3,72	768,54	
0,11	0,12059	0,248	0,912	-1,22	3,72	768,54	
0,12	0,13223	0,259	0,908	-1,30	3,72	768,54	
0,13	0,14398	0,271	0,903	-1,38	3,72	768,54	
0,14	0,15583	0,282	0,898	-1,46	3,72	768,54	
0,15	0,16781	0,293	0,894	-1,54	3,72	768,54	
0,16	0,17992	0,304	0,889	-1,62	3,72	768,54	
0,17	0,19217	0,315	0,885	-1,71	3,72	768,54	
0,18	0,20456	0,325	0,880	-1,79	3,72	768,54	
0,19	0,21711	0,336	0,875	-1,88	3,72	768,54	
0,20	0,22985	0,347	0,870	-1,98	3,72	768,54	
0,21	0,24279	0,358	0,865	-2,07	3,72	768,54	Betonverstärken
0,22	0,25597	0,369	0,859	-2,18	3,72	768,54	
0,23	0,26937	0,380	0,854	-2,28	3,72	768,54	
0,24	0,28302	0,392	0,848	-2,40	3,72	768,54	
0,25	0,29695	0,404	0,842	-2,52	3,72	768,54	
0,26	0,31116	0,416	0,836	-2,65	3,72	768,54	
0,27	0,32566	0,428	0,829	-2,78	3,72	768,54	
0,28	0,34048	0,441	0,822	-2,93	3,72	768,54	
0,29	0,35565	0,454	0,815	-3,09	3,72	768,54	
0,30	0,37118	0,467	0,808	-3,26	3,72	768,54	
0,31	0,3871	0,480	0,801	-3,44	3,72	768,54	
0,32	0,40378	0,499	0,793	-3,50	3,52	726,80	
0,33	0,42113	0,520	0,784	-3,50	3,23	667,08	
0,34	0,43906	0,542	0,774	-3,50	2,95	610,25	
0,35	0,45762	0,565	0,765	-3,50	2,69	556,10	
0,36	0,47684	0,589	0,755	-3,50	2,44	504,65	
0,37	0,49687	0,614	0,745	-3,50	2,20	455,05	
0,38	0,51776	0,640	0,734	-3,50	1,97	407,52	
0,39	0,53966	0,667	0,723	-3,50	1,75	361,64	
0,40	0,56272	0,695	0,711	-3,50	1,54	317,20	

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

**Tabelle 2: Bemessungstafel für die Bemessung der Verstärkung mit dem CARBorefit® Typ 3**

$\epsilon_{\text{utex}} = \epsilon_{\text{utex}} / \gamma_{\text{tex}}$		CARBorefit® Typ 3					
$\mu_{\text{tex}}$	$\omega_{\text{tex}}$	$\xi_{\text{tex}} = x/d_{\text{tex}}$	$\zeta_{\text{tex}} = z_{\text{tex}} / d_{\text{tex}}$	$\epsilon_{c2}$	$\epsilon_{\text{tex}}$ [‰]	$\sigma_{\text{tex}}$ [N/mm²]	
0,01	0,0102	0,057	0,981	-0,38	6,29	1300,00	Textilverstärken
0,02	0,0213	0,083	0,972	-0,57	6,29	1300,00	
0,03	0,0310	0,100	0,966	-0,70	6,29	1300,00	
0,04	0,0410	0,116	0,960	-0,82	6,29	1300,00	
0,05	0,0525	0,131	0,954	-0,95	6,29	1300,00	
0,06	0,0636	0,145	0,949	-1,07	6,29	1300,00	
0,07	0,0740	0,157	0,944	-1,17	6,29	1300,00	
0,08	0,0852	0,169	0,940	-1,28	6,29	1300,00	
0,09	0,0952	0,180	0,936	-1,38	6,29	1300,00	
0,10	0,1079	0,192	0,931	-1,50	6,29	1300,00	
0,11	0,1187	0,203	0,926	-1,60	6,29	1300,00	
0,12	0,1302	0,213	0,922	-1,71	6,29	1300,00	
0,13	0,1424	0,225	0,917	-1,82	6,29	1300,00	
0,14	0,1528	0,234	0,913	-1,92	6,29	1300,00	
0,15	0,1656	0,246	0,908	-2,05	6,29	1300,00	
0,16	0,1778	0,257	0,902	-2,17	6,29	1300,00	
0,17	0,1896	0,267	0,897	-2,29	6,29	1300,00	
0,18	0,2019	0,278	0,892	-2,43	6,29	1300,00	
0,19	0,2147	0,290	0,886	-2,57	6,29	1300,00	
0,20	0,2274	0,302	0,880	-2,72	6,29	1300,00	
0,21	0,2407	0,314	0,874	-2,87	6,29	1300,00	Betonverstärken
0,22	0,2530	0,325	0,868	-3,02	6,29	1300,00	
0,23	0,2675	0,338	0,862	-3,21	6,29	1300,00	
0,24	0,2810	0,350	0,855	-3,39	6,29	1300,00	
0,25	0,2949	0,364	0,848	-3,50	6,11	1262,26	
0,26	0,3097	0,383	0,841	-3,50	5,65	1167,25	
0,27	0,3242	0,401	0,833	-3,50	5,24	1082,49	
0,28	0,3398	0,420	0,825	-3,50	4,84	999,84	
0,29	0,3554	0,439	0,817	-3,50	4,47	924,21	
0,30	0,3717	0,459	0,809	-3,50	4,12	852,25	
0,31	0,3879	0,479	0,801	-3,50	3,80	786,19	
0,32	0,4047	0,500	0,792	-3,50	3,50	723,38	
0,33	0,4213	0,520	0,784	-3,50	3,22	666,51	
0,34	0,4394	0,543	0,774	-3,50	2,95	609,08	
0,35	0,4592	0,567	0,764	-3,50	2,67	551,77	
0,36	0,4764	0,589	0,755	-3,50	2,45	505,72	
0,37	0,4972	0,614	0,745	-3,50	2,20	454,41	
0,38	0,5198	0,642	0,733	-3,50	1,95	403,24	
0,39	0,5411	0,668	0,722	-3,50	1,74	358,87	
0,40	0,5618	0,694	0,711	-3,50	1,54	319,02	

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



### 3.2 Nachweis der Querkrafttragfähigkeit

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit der carbonbetonverstärkten Konstruktion ist nach abZ/aBG [1] für Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung<sup>1</sup> ohne Ansatz der Carbonbewehrung zu führen. Dementsprechend darf für die Ermittlung des Querkraftwiderstandes die Carbonbewehrung nicht bei der Fläche der Zugbewehrung angerechnet werden. Die Nachweisführung entspricht dem Nachweis für Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung nach DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 6.2.1 [4] und wird an dieser Stelle nicht explizit erläutert.

### 3.3 Nachweis der Verbundfuge

Der Nachweis der Verbundfuge setzt sich aus den folgenden zwei Nachweisen zusammen:

- Nachweis der Schubkraftübertragung in der Verbundfuge nach DIN EN 1992-1-1 [4]
- Nachweis gegen Versatzbruch

#### 3.3.1 Nachweis der Schubkraftübertragung in der Verbundfuge

Die Einwirkungen auf die Schubfuge sind abhängig von der einwirkenden Querkraft. Ab dem Fließen der Bestandsbewehrung kommt es zur überproportionalen Zunahme der Zugkräfte innerhalb der Carbonbewehrung. Um beim Nachweis der Schubkraftübertragung in der Verbundfuge auf der sicheren Seite zu liegen, muss dieser für die Einwirkungskombination nach der Verstärkungsmaßnahme geführt werden. Zu berücksichtigen sind das Eigengewicht des Bestands und der Verstärkungsschicht sowie Ausbau- und Nutzlasten. Widerstandsseitig wird zwischen Altbeton und Carbonbetonverstärkungsschicht von einer rauen Fuge ausgegangen. Weiterhin wird bei der Nachweisführung nach abZ/aBG [1] zwischen ebenen bzw. konvex gekrümmten und konkav gekrümmten Bauteiloberflächen unterschieden. Der Nachweis der Schubkraftübertragung in der Verbundfuge ist erfüllt, wenn gilt:

$$v_{\text{Edi}} \leq v_{\text{Rdi}}$$

#### Ebene und konvex gekrümmte Bauteiloberflächen

Die Nachweisführung für ebene und konvex gekrümmte Altbetonoberflächen erfolgt nach DIN EN 1992-1-1, Absatz 6.2.5 [4]. Die auf die Fuge einwirkende Bemessungsschubkraft  $v_{\text{Edi}}$  wird aus der Zugkraftänderung der Carbonbewehrung wie folgt bestimmt:

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

Mit  $\beta$  Verhältnis der Zugkraft in der Verstärkungsschicht zu der Gesamtzugkraft in der Zugzone

$$= \frac{F_{\text{nm}}}{F_s + F_{\text{nm}}}$$

Der Bemessungswert der Zugkraft in der Carbonbewehrung  $F_{\text{nm}}$  sowie der Stahlbewehrung  $F_s$  kann der iterativen Biegebemessung unter den Einwirkungen nach der Verstärkungsmaßnahme entnommen werden.

$z_{\text{ges}}$  Innerer Hebelarm des Gesamtquerschnitts

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

$b_i$  Breite der Verbundfuge

<sup>1</sup> Im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) ist es möglich, Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung mit Carbonbeton zu verstärken.

Der für die Ermittlung der Schubfugentragfähigkeit  $v_{Rdi}$  benötigte charakteristische Wert der Haftzugfestigkeit  $f_{ctk,0,05}$  ist nach DIN EN 1990 [5], Tabelle D.1 ( $V_x$  unbekannt) zu bestimmen.

Die Schubfugentragfähigkeit  $v_{Rdi}$  zwischen Bestandsbeton und Carbonbetonverstärkungsschicht kann dann nach Gleichung (6.25) der DIN EN 1992-1-1 [4] bestimmt werden.

### Konkav gekrümmte Bauteiloberflächen

Bauteile mit konkav gekrümmter Oberfläche dürfen mit Carbonbeton verstärkt werden, wenn die folgenden beiden Bedingungen eingehalten sind:

#### 1. Bedingung 1:

$$1 \frac{N}{mm^2} + 5 \cdot \rho_{konkav} \leq f_{ctm,surf}$$

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

$a_{Kf,nm}$  Fläche der Carbonfasern in Kettrichtung bezogen auf 1 m Breite quer zur Kettrichtung

$r$  Krümmungsradius der konkav gekrümmten Fläche ( $r > 5 \text{ m}$ )

$f_{Kf,nm,k}$  Zugfestigkeit der Carbonbewehrung

$f_{ctm,surf}$  Erwartungswert des Mittelwertes (95 % Zuverlässigkeit) der Oberflächenzugfestigkeit des Betons

#### 2. Bedingung 2:

Der Nachweis der Schubfugentragfähigkeit mit  $v_{Rdi}$  nach DIN EN 1992-1-1 Gleichung 6.25 muss erfüllt sein für:

$$\sigma_n = a_{Kf,nm} \cdot \frac{\sigma_{Kf,nm,k}}{r} \text{ und } f_{ctk,0,05} = f_{ctk,0,05,surf} - \sigma_n$$

Mit  $\sigma_{Kf,nm,k}$  Zugspannung in den Fasersträngen des Carbongitters an der Stelle der konkaven Krümmung der Carbonbetonschicht unter der seltenen Einwirkungskombination

$f_{ctk,0,05,surf}$  Charakteristischer Wert der Oberflächenzug- bzw. Haftzugfestigkeit des Altbetons

### 3.3.2 Nachweis gegen Versatzbruch

Die am Endauflager senkrecht zur Ebene der Carbonbetonverstärkung wirkende Zugspannung muss berücksichtigt werden. In diesem Bereich kann es andernfalls infolge dieser abhebenden Kräfte zur Ausbildung eines Versatzbruchs (siehe Abbildung 2) kommen, bei dem sich der Beton von der Bestandsbewehrung ablöst.

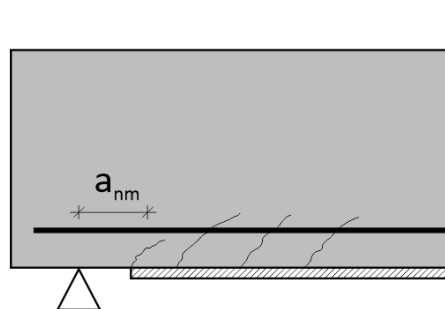


Abbildung 2: Schematische Darstellung eines Versatzbruchs

Es muss nachgewiesen werden, dass die einwirkende Querkraft  $V_{Ed}$  den Bemessungswert des Querkraftwiderstands  $V_{Rd,c,nm}$  nicht übersteigt. Der Bemessungswert  $V_{Rd,c,nm}$  wird wie folgt bestimmt:

$$V_{Rd,c,nm} = 0,75 \cdot \left( 1 + 19,6 \cdot \frac{(100 \cdot \rho_{s1})^{0,15}}{a_{nm}^{0,36}} \right) \cdot V_{Rd,ct}$$

Mit	$\rho_{s1}$	Längsbewehrungsgrad der Bestandsbewehrung ohne Carbonbewehrung
	$a_{nm}$	Abstand des Endes der Carbongitter von der Mitte des Endauflagers bzw. des Trägerendes (siehe Abbildung 2)
	$V_{Rd,ct}$	Bemessungswert des Querkraftwiderstands nach DIN EN 1992-1-1, Absatz 6.2.2 [4]

### 3.4 Nachweis der Endverankerung der Carbonbewehrung

Die Verankerung der Carbonbewehrung erfolgt ab jenem Punkt  $x_A$ , ab welchem keine zusätzliche Carbonbewehrung mehr zur Aufnahme des vorhandenen Biegemomentes benötigt wird.

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

Grundlegend gibt es zwei Möglichkeiten die Verankerungslänge der Carbonbewehrung zu berechnen. Maßgebend sind hierfür die Spannung und somit auch die Dehnung der Bewehrung. Wie auch in den anderen Berechnungen kann die Dehnung  $\epsilon_{nm}$  geschätzt und anschließend iterativ bestimmt oder genau berechnet werden.

#### Bemessung durch Iteration

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

$$a_l = d_{nm}$$

Stelle, an der das Bemessungsmoment bestimmt wird:

$$x_1 = x_{\text{Auflager}} + a_l$$

1.

Schätzen der Dehnungen des Betons  $\epsilon_c$  und der Carbonbewehrung  $\epsilon_{nm}$

2.

Bestimmung der bezogenen Druckzonenhöhe  $\xi$

$$\xi = \frac{-\epsilon_c}{-\epsilon_c + \epsilon_{nm,0} + \epsilon_{nm}}$$

3.

Bestimmung des Völligkeitsbeiwertes  $\alpha_R$  für Betone  $\geq C12/15$  und  $\leq C50/60$

$$\alpha_R = \begin{cases} \frac{-\epsilon_c}{2} - \frac{\epsilon_c^2}{12}, & 0 \geq \epsilon_{c,0} \geq -2 \text{ ‰} \\ 1 + \frac{2}{3 \cdot \epsilon_c}, & -2 \text{ ‰} \geq \epsilon_{c,0} \geq -3,5 \text{ ‰} \end{cases}$$

4.

 Bestimmung des Höhenbeiwerts  $k_a$  für Betone  $\geq C12/15$  und  $\leq C50/60$ 

$$k_a = \begin{cases} \frac{8 + \varepsilon_c}{24 + 4 \cdot \varepsilon_c}, & 0 \geq \varepsilon_{c,0} \geq -2 \text{ ‰} \\ \frac{3 \cdot \varepsilon_c^2 + 4 \cdot \varepsilon_c + 2}{6 \cdot \varepsilon_c^2 + 4 \cdot \varepsilon_c}, & -2 \text{ ‰} \geq \varepsilon_{c,0} \geq -3,5 \text{ ‰} \end{cases}$$

5.

 Bestimmung des Angriffspunkts  $a$  der Betondruckkraft

$$a = k_a \cdot \xi \cdot d_{nm}$$

6.

Bestimmung des inneren Hebelarms der Bewehrungen

Stahlbewehrung:  $z_s = d_s - a$

Carbonbewehrung:  $z_{nm} = d_{nm} - a$

7.

Bestimmung der Betondruckkraft

Betondruckkraft:  $F_c = \alpha_R \cdot x_{nm} \cdot b \cdot f_{cd} = \alpha_R \cdot \xi \cdot d_{nm} \cdot b \cdot f_{cd}$

8.

Bestimmung der Stahldehnung und der Stahlzugkraft

Stahldehnung:  $\varepsilon_s = \frac{(d_{sl} - (\xi \cdot d_{nm})) \cdot \varepsilon_{nm}}{d_{nm} - (\xi \cdot d_{nm})}$

Stahlzugkraft:  $F_s = \varepsilon_s \cdot a_{sl} \cdot E_s \quad (\varepsilon_s < \varepsilon_{yd})$

Stahlzugkraft:  $F_s = a_{sl} \cdot f_{yd} \quad (\varepsilon_s \geq \varepsilon_{yd})$

9.

Bestimmung der Zugkraft in der Carbonbewehrung aus Momentengleichgewicht

$$F_{nm} = E_{nm} \cdot \varepsilon_{nm} \cdot a_{Kf,nm}$$

10.

Überprüfen der Gleichgewichtsbedingungen

$$F_c = F_s + F_{nm} ?$$

Momentengleichgewicht:  $m_x = F_s \cdot z_s + F_{nm} \cdot z_{nm}$

 Gleichgewichtsbedingung  
erfüllt

 Gleichgewichtsbedingung  
nicht erfüllt

11.

Zu verankernde Spannung im Carbongitter:

$$\sigma_{nm} = E_{nm} \cdot \varepsilon_{nm}$$

12.

Notwendige Verankerungslänge

$$l_{b, nm, rqd} = \frac{\sigma_{nm} \cdot A_{nm,k}}{T_{nm,bd}}$$

### Bemessung durch direkte Lösung

$$x = \frac{\alpha_s \cdot A_s + \alpha_{nm} \cdot A_{nm}}{b} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \cdot b \cdot (\alpha_s \cdot A_s \cdot d_s + \alpha_{nm} \cdot A_{nm} \cdot d_{nm})}{(\alpha_s \cdot A_s + \alpha_{nm} \cdot A_{nm})^2}} \right)$$

$$z_s = d_s - \frac{x}{3}$$

$$z_{nm} = d_{nm} - d_s$$

$$A_c = \frac{b \cdot x}{2}$$

$$\varepsilon_c = \frac{M_{ed}}{E_c \cdot A_c \cdot z_s + \left( \frac{d_{nm}}{x} - 1 \right) \cdot E_{nm} \cdot A_{nm} \cdot z_{nm}}$$

$$\varepsilon_s = -\varepsilon_c \cdot \left( \frac{d_s}{x} - 1 \right)$$

$$\varepsilon_{nm} = -\varepsilon_c \cdot \left( \frac{d_{nm}}{x} - 1 \right)$$

Die Berechnung der Spannung sowie der Endverankerung verläuft analog zur Iteration.

Der Bemessungswert der Verankerungslänge berechnet sich wie im Eurocode unter Punkt 8.4.4 beschrieben

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

Nachweis:

$$\frac{l_{bd}}{l_{vorh}} \leq 1 \text{ wenn Bewehrung bis Auflager: } l_{vorh} = x - \frac{a}{2}$$

Weiterhin ist hinsichtlich der Bewehrungs- und Konstruktionsregeln anzumerken, dass ein Einschneiden der Zugkraftdeckungsline nicht zulässig ist. Der Abstand bis zum Auflagerbereich muss ausreichend sein, da die Verstärkungsschicht nicht um die Ecke gelegt werden darf.

### 3.5 Nachweis zur Verankerung der Bestandsbewehrung

Der Nachweis zur Verankerung der Bestandsbewehrung am Endauflager ist identisch zu DIN EN 1992-1-1 [4] Abschnitt 8.4 zu führen und wird daher an dieser Stelle nicht explizit aufgeführt.

### 4 Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

#### 4.1 Nachweis der Verformung

Die Grenzwerte der Verformung nach DIN EN 1992 1-1 [4] Abschnitt 7.4.1 sollten auch nach den Verstärkungsmaßnahmen eingehalten werden. Maßgebend ist die quasi-ständige Einwirkungskombination.

Im Regelfall ist der Nachweis der Verformung immer mit direkter Berechnung durchzuführen!

Die Wirkungsweise der Carbongitter im Feinbeton darf in dem Durchbiegungsparameter  $\alpha$  berücksichtigt werden. Zur Berechnung der Durchbiegung dürfen die Querschnittswerte des verstärkten Bauteils verwendet sowie der Widerstand  $EI_{nm}$  zu  $EI_s$  addiert werden.

Die Querschnittswerte in Zustand II für die nichtmetallisch Bewehrung kann wie folgt berechnet werden:

$$EI_{nm}^{II} = E_{nm} \cdot A_{nm} \cdot z^{II} \cdot (d - x^{II})$$

$$x^{II} = \xi \cdot d$$

$$\xi = -\alpha_{nm} \cdot \varrho_{nm,l} + \sqrt{(\alpha_{nm} \cdot \varrho_{nm,l})^2 + 2 \cdot \alpha_{nm} \cdot \varrho_{nm,l}}$$

$$z^{II} = d - \frac{x^{II}}{3}$$

$$\text{Mit } \alpha_{nm} = \frac{E_{nm}}{E_c}; \varrho_{nm,l} = \frac{A_{nm}}{b_w \cdot d_{nm}}$$

#### Nachweis

$$w \leq w_{\min}$$

#### 4.2 Nachweis der Stahlspannungen

Durch die abZ/aBG [1], Anlage 5, Absatz 7.2 ist die Dehnung des Bestandsstahls unter der seltenen Einwirkungskombination auf folgenden Wert zu begrenzen:

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

Die vorhandene Dehnung wird analog zu Abschnitt 2.2 ermittelt.

$$\varepsilon_s = \frac{\frac{m_{d,LF1}}{E_s}}{z \cdot A_{s1}} \leq \frac{f_{yk}}{E_s}$$

#### 4.3 Begrenzung der Rissbreite

Laut abZ/aBG ist der Nachweis zur Rissbreite identisch zur DIN EN 1992-1-1[4] Abschnitt 7.3 zu führen und wird daher an dieser Stelle nicht explizit aufgeführt. Die Carbonbewehrung wird nicht berücksichtigt.

### 5 Konstruktive Durchbildung

#### 5.1 Mindestbewehrung

Analog zum Stahlbeton ist die Mindestbewehrung nachzuweisen (Hinweis: durch die Verstärkung und Erhöhung der Last wird diese i. d. R. nicht maßgebend). Aufgrund des linear-elastischen Materialverhaltens muss bei der Carbonbewehrung die Bemessungsfestigkeit, anstelle der im Stahlbetonbau üblichen charakteristischen Festigkeit, angesetzt werden.

$$A_{nm,min} = \frac{M_{cr} - A_s \cdot f_{yk} \cdot z_s^{II}}{z_{nm}^{II} \cdot f_{nm,d}}$$

#### 5.2 Querbewehrung

Auch bei verstärkten Bauteilen sind bei einachsig gespannten Platten 20 % der Bestandsstahlbewehrung als Querbewehrung ausreichend. DIN EN 1992-1-1 [4] Abs. 9.3.1.1 gilt entsprechend. Fehlende Querbewehrung darf mit zusätzlicher Carbonbewehrung ergänzt werden. Maßgebend ist hierbei nicht die Querschnittsfläche, sondern die Zugfestigkeit. In den zur Verstärkung verwendeten Matten sind bereits über 20% der Längsbewehrung in Querrichtung vorhanden.

$$a_{sq,vorh} \geq a_{sq,erf} = 0,2 \cdot a_{sl}$$

### 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, Dezember 2021 (Geltungsdauer 23. Dezember 2021 bis 1. Juni 2026).
- [2] M. Curbach, F. Schladitz, J. Weselek und R. Zobel, „Eine Vision wird Realität: Der Betonbau der Zukunft ist nachhaltig, leicht, flexibel und formbar - dank Carbon,“ Der Prüfenieur, Nr. 51, pp. 20-34, November 2017.
- [3] Curbach, M.; Schumann, A.; May, S.; Müller, E.; Schütze, E.; Wagner, J.: *Verstärken mit Carbonbeton* in: Betonkalender 2022, S. 761-804, Ernst & Sohn.
- [4] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahl- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, 2011.
- [5] DIN EN 1990 (2021-10): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung