B2 – CARBOrefit® Verstärken von Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton

In Zusammenarbeit mit der Firma CARBOCON GMBH wurde im FRILO Programm B2 für die Bemessung und Nachweisführung von Stahlbetonbauteilen auf Querschnittsebene die Verstärkung mit Carbonbeton – CARBOrefit® – implementiert.

Inhaltsverzeichnis

Anwendung 2
Biegetragfähigkeit 3
Querkrafttragfähigkeit 4
Schubfugentragfähigkeit 4
Bemessungswert der Schubkraft in der Fuge 4
Bemessungswert der Schubfugentragfähigkeit 4
Zusätzliche Nachweise 5
Eingabe 5
Bestandsquerschnitt und Beanspruchung 5
Verstärkung mit CARBOrefit® Z-31.10-182 6
Bestandsquerschnitt 7
Zulassung 7
Bemessungsergebnis 9
Version der Zulassung 9
Literatur 10

Die Zulassung sowie weitere Informationen finden Sie unter folgendem Link: CARBOrefit®

Die Hauptdokumentation des Programms B2 finden Sie unter folgendem Link: B2 Stahlbetonbemessung

Anwendung

In B2 ist nun die Bemessung von Verstärkungen mit CARBOrefit® möglich.

CARBOrefit® bezeichnet die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) / allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) zum Verstärken von biegebeanspruchten Stahlbetonbauteilen mit Carbonbeton (siehe [1]). Der Verbundwerkstoff setzt sich aus CARBOrefit®-Feinbeton und getränkten CARBOrefit®-Carbongittern zusammen und wird auf die zugbeanspruchte Oberfläche des Stahlbetonbauteils aufgebracht.

Die extrem feine und korrosionsbeständige Carbonbewehrung ermöglicht sehr dünne Verstärkungsschichten, wodurch das Eigengewicht des Bestandsbauteiles nur unwesentlich erhöht wird. Zudem sind die Carbongitter sehr leistungsstark – sie weisen eine deutlich höhere Zugfestigkeit als üblicher Bewehrungsstahl auf. Damit kann die Bauteiltragfähigkeit bereits mit einer geringen Querschnittsfläche maßgeblich gesteigert werden.

Weitere positive Eigenschaften, wie das gute Verbundverhalten mit Stahlbeton ohne eine zusätzliche Verdübelung und minimale Rissbreiten, wodurch zusätzlich die Bauteildauerhaftigkeit verbessert wird, zeichnen Carbonbeton als Verstärkung aus.

Die Bemessung der CARBOrefit®-Verstärkung ist nur in Verbindung mit DIN EN 1992-1-1 + NA möglich.

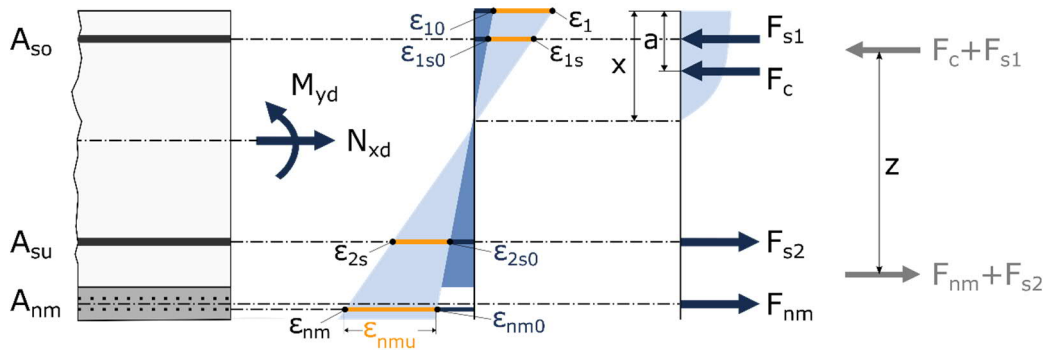
Biegetragfähigkeit

Die abZ/aBG [1] regelt die Verstärkung von einaxial auf Biegung beanspruchten Bauteilen unter vorwiegend ruhender Belastung.

Die Biegebemessung erfolgt iterativ, analog zur Bemessung des unverstärkten Querschnitts (Bernoulli Hypothese, Bemessung im gerissenen Zustand). Dabei gehen in die Gleichgewichtsbedingungen der inneren und äußeren Kräfte und Momente die zusätzliche Komponente aus der Carbonbewehrung mit ein. Gemäß abZ/aBG dürfen der Carbonbewehrung ausschließlich Zugkräfte zugewiesen werden.

Für eine wirklichkeitsnähere Bemessung wird die Vordehnung des Bestandsquerschnitts berücksichtigt. Diese wirkt sich auf die Versagensart, Dehnungsverteilung und Fläche der benötigten Carbonverstärkung aus.

Eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise bei der Biegebemessung eines carbonbetonverstärkten Stahlbetonquerschnitts befindet sich im Betonkalender 2022 [2].



A_{so}, A_{su}	*obere und untere Stahlbewehrung*
A_{nm}	*Bewehrungsfläche der gesamten Carbonbewehrung*
N_{xd}, M_{yd}	*Beanspruchung aus Normalkraft und Moment*
ε_{10}	*Vordehnung des Altquerschnitts am gedrückten Rand (Betonvordehnung)*
ε_{1}	*Betondehnung nach der Verstärkung am gedrückten Rand*
ε_{1s0}	*Vordehnung der Druckbewehrung A_{so}*
ε_{1s}	*Dehnung der oberen Bewehrung A_{so} nach der Verstärkung*
ε_{2s0}	*Vordehnung der Zugbewehrung A_{su}*
ε_{2s}	*Dehnung der unteren Bewehrung A_{su} nach der Verstärkung*
ε_{nm0}	*fiktive Vordehnung der äußersten Carbonbewehrungslage*
ε_{nmu}	*Dehnung der äußersten Carbonbewehrungslage*
ε_{nm}	*Summe aus fiktiver Vordehnung und Dehnung der äußersten Carbonbewehrungslage (= ε_{nm0} + ε_{nmu})*
F_{s1}	*Stahlbewehrungsdruckkraft*
F_{c}	*Betondruckkraft*
F_{s2}	*Stahlbewehrungszugkraft*
F_{nm}	*Carbonbewehrungszugkraft*
a	*Abstand der Betondruckkraft vom maximal gedrückten Rand*
x	*Druckzonenhöhe*
z	*Hebelarm zwischen der Summe aus inneren Druckkräften und der Summe aus inneren Zugkräften*

Abbildung 1 *Biegebeanspruchtes Stahlbetonbauteil mit Carbonbetonverstärkung: Dehnungsverlauf und innere Kräfte*

Querkrafttragfähigkeit

Nach abZ/aBG [1] ist die Anordnung des CARBOrefit®-Systems zur Verstärkung der Biegetragfähigkeit nur in Bereichen zulässig, in denen rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich ist ($V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$). Für den Querkraftwiderstand ohne Querkraftbewehrung darf die Carbonbewehrung zudem nicht bei der Fläche der Zugbewehrung A_{sz} angerechnet werden.

Der Querkraftnachweis erfolgt in B2 deshalb für den Bestandsquerschnitt ohne Ansatz der Carbonbetonverstärkung und wird nach DIN EN 1992-1-1, 6.2.2 geführt.

Da für Balkenquerschnitte (Abmessungen b/h < 5) nach DIN EN 1992-1-1/NA, 9.3.2 immer eine Mindestschubbewehrung gefordert wird, wird informativ diese und der maximal zulässige Längsabstand für Bügel $s_{l,max}$ nach Tabelle NA.9.1 ausgegeben.

Schubfugentragfähigkeit

Der Nachweis des Verbundes der Carbonbetonschicht zum Altbeton zwischen den Verankerungen basiert auf der Grundlage von DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 6.2.5:

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

Bemessungswert der Schubkraft in der Fuge

Der Bemessungswert der Schubkraft in der Fuge ergibt sich wie folgt:

$$v_{Edi} = \beta \cdot V_{Ed} / (z \cdot b_i)$$

Der Beiwert β beschreibt, abweichend von DIN EN 1992-1-1, Gl. (6.24), das Verhältnis der Zugkraft in der Verstärkungsschicht zu der Gesamtzugkraft in der Zugzone und ist auf einen Maximalwert von 1,0 begrenzt.

Erläuterungen V_{Ed}, z, b_i siehe B2-Stahlbetonbemessung, Kapitel Ortbetonergänzung.

Bemessungswert der Schubfugentragfähigkeit

Maßgebend für das Versagen der Schubfuge ist die Betonzugfestigkeit. Nach abZ/abG [1] wird für den Verbundnachweis eine Prüfung der tatsächlich am Bauwerk vorliegenden Zugfestigkeit im Rahmen einer qualifizierten Bestandsaufnahme gefordert. Die Oberflächenzugfestigkeit im Altbeton ist anhand einer Bauteilbeprobung nach abZ/abG, Abschnitt 3.4.7.2 [1] zu bestimmen. Aus den Messwerten ist der charakteristische Wert der Oberflächenzug- bzw. Haftzugfestigkeit $f_{ctk,0,05}$ nach DIN EN 1990, Tabelle D.1 (für V_x unbekannt) zu ermitteln. Der so bestimmte Wert $f_{ctk,0,05}$ wird im B2-Verstärkungsdialog abgefragt (siehe Verstärkung mit CARBOrefit).

Der Bemessungswert der Zugfestigkeit f_{ctd} wird dann programmintern nach DIN EN 1992-1-1, Gleichung (3.16) bestimmt:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk,0,05} / \gamma_c$$

γ_C Teilsicherheitsbeiwert Beton

α_{ct} Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betonzugfestigkeit und von ungünstigen Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung

Nach abZ/aBG muss die Fuge zwischen Altbeton und Verstärkung rau ausgeführt werden. Dementsprechend werden für die Ermittlung der Schubfugentragfähigkeit die Beiwerte c mit 0,4 und υ mit 0,7 angesetzt.

$v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} \leq 0{,}5 \cdot \upsilon \cdot f_{cd}$ c = 0,4, υ = 0,7 nach DIN EN 1992-1-1, 6.2.5

Zusätzliche Nachweise

In B2 werden die zuvor beschrieben Nachweise für einen definierten Querschnitt unter Belastung geführt. Folgende weitere Nachweise, die für die Bemessung des CARBOrefit®-Systems erforderlich sind, sind außerhalb von B2 zu führen:

- Versatzbruchnachweis
- Gebrauchstauglichkeitsnachweise
- Nachweis der Mindest- und Querbewehrung
- Nachweise über die Verankerung der Carbon- und Bestandsbewehrung
- ggf. Nachweise für Brand und Ermüdung

Eingabe

Bestandsquerschnitt und Beanspruchung

Im Hauptdialog werden die Geometrie und das Material des Bestandsquerschnitts und die Beanspruchungen nach der Verstärkung definiert.

Beachte: Die Beanspruchung ist mit der für den Nachweis maßgebenden Lastkombination inklusive Eigengewicht des Stahlbetonquerschnitts und der Verstärkungsschicht zu definieren.

Hinweis: Oftmals ist die Verstärkung historischer Bauteile erforderlich. Für diese kann aus der Materialbibliothek „historisches Material“ der Beton und der Bewehrungsstahl gewählt werden oder die Definition der Beton- und Betonstahlparameter erfolgt über die freie Eingabe.

Verstärkung mit CARBOrefit® Z-31.10-182

Im B2-Hauptdialog gelangen Sie durch Aktivierung der Option „Verstärkung“ in den Dialog zur Verstärkung mit CARBOrefit® (siehe Abbildung 2). In diesem ist die Eingabe der für die Bemessung relevanten Eigenschaften des Bestandsquerschnitts, der Nutzungstemperatur und der Carbonbewehrung möglich. Zudem erfolgt im Dialog die Prüfung der Anwendungsgrenzen der abZ/aBG.

Die abZ/aBG ist auf bestimmte Eigenschaften hinsichtlich des Bestandsquerschnitts und der Umgebungsbedingungen beschränkt. Da in der Praxis Projekte schnell von der Anwendung nach abZ/aBG abweichen, erlaubt B2 unter bestimmten Randbedingungen auch eine Bemessung außerhalb der Zulassung. Für die Umsetzung ist dann allerdings eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) zu erlangen. Ein entsprechender Hinweis erscheint dann im Dialog.

In Abhängigkeit vom gewählten Gittertyp und der Bemessung inner- bzw. außerhalb der abZ/aBG werden die maßgebenden Materialparameter der Carbongitterbewehrung ausgegeben.

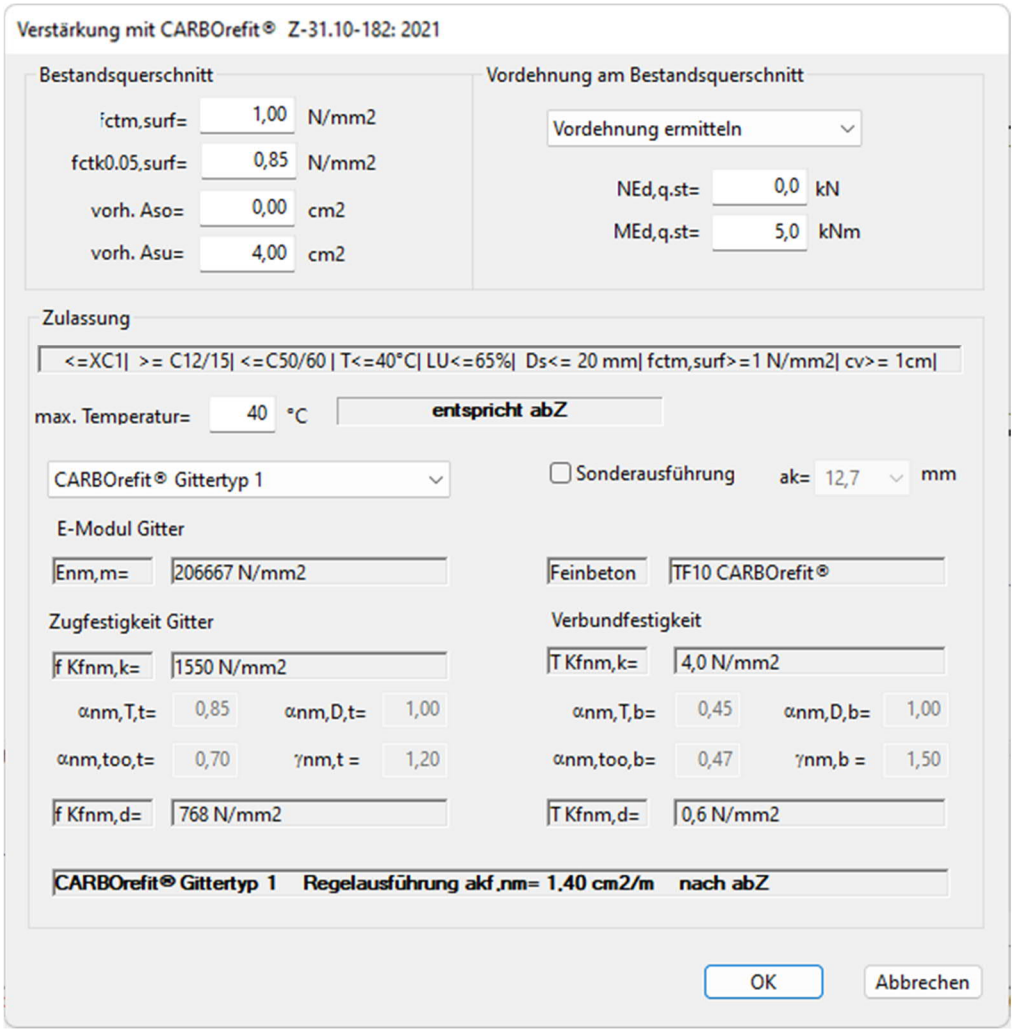


Abbildung 2 Verstärkungsdialog in B2

Im nachfolgenden werden die für die Bemessung der CARBOrefit® relevanten Eingabewerte erläutert.

Bestandsquerschnitt

Haftzugfestigkeit

Am Stahlbetonbauteil muss für die Applikation des Carbonbetons nach abZ/aBG eine Oberflächenzugfestigkeit $f_{ctm,surf} \geq 1{,}0$ N/mm² nachgewiesen sein.

Mit einer geringeren Oberflächenzugfestigkeit ist in B2 eine Bemessung im Rahmen einer ZiE möglich.

Für den Nachweis der Tragfähigkeit der Schubfuge zwischen dem Altbeton und der Carbonbetonverstärkung wird der charakteristische Wert der Oberflächenzug- bzw. Haftzugfestigkeit $f_{ctk0.05,surf}$ abgefragt. (Erläuterung zur Ermittlung von $f_{ctk,0,05}$ siehe Kapitel Schubfugentragfähigkeit.

Hinweis: *In Praxisprojekten kann der charakteristische Wert der Haftzugfestigkeit nach der Verstärkung unterhalb des Wertes der Oberflächenzugfestigkeit des Altbetons $f_{ctk0.05,surf}$ aus der Erprobung liegen. In solchen Fällen müsste die Bemessung nach der Ausführung der Verstärkung geprüft und angepasst werden. Um das zu vermeiden, wird seitens CARBOCON GMBH empfohlen, für den Nachweis auf der sicheren Seite liegend maximal $f_{ctk0.05,surf}$ = 1,0 N/mm² anzusetzen.*

Bewehrungsvorgaben vorh. A_{so}/A_{su}

Für den Bestandsquerschnitt ist die vorhandene obere und untere Längsbewehrung (vorh. A_{so} / vorh. A_{su}) zu definieren.

Da die abZ/aBG Stahlbetonbauteile behandelt, ist in B2 eine Bemessung nur für vorh. $A_{su} > 0{,}5$ cm² möglich.

Vordehnung

Die Ermittlung der Vordehnung erfolgt programmintern. Hierfür sind die zum Zeitpunkt der Verstärkung vorhandenen Schnittkräfte $M_{Ed,q.st}$ und $N_{Ed,q.st}$ unter der quasi-ständigen Belastungskombination vorzugeben.

Alternativ kann durch Auswahl de nutzerdefinierten Vordehnung die vorhandene Bauteilvordehnung auch direkt vorgegeben werden. In diesem Fall sind die Vordehnungen am gedrückten Querschnittsrand $\boldsymbol{\varepsilon}_{1,0}$ und in Höhe der Bestandsbewehrung in der Zugzone $\boldsymbol{\varepsilon}_{2s,0}$ einzugeben.

Soll keine Vordehnung berücksichtigt werden, kann Vordehnung vernachlässigen angewählt werden.

Zulassung

Die Verstärkung mit Carbonbeton nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ/aBG) ist auf nachfolgende Anwendungen begrenzt. Werden diese nicht eingehalten, ist in B2 dennoch bedingt eine Bemessung möglich.

Es erscheint in dann der Hinweis, dass die Bemessung außerhalb der abZ/aBG und im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erfolgt.

Zudem wird dann die Bemessung nur noch ausschließlich für die CARBOrefit®-Typ 3 Carbongitter zugelassen.

Bedingungen nach abZ/aBG

- Expositionsklasse XC1 und XM1 auf der zu verstärkenden Bauteilseite

  Für abweichende Expositionsklassen sind die nach abZ/aBG definierten Abminderungsbeiwerte für die Zug- und Verbundfestigkeit des Gittertyp 3 nicht pauschal ansetzbar. In B2 werden deshalb für bestimmte Konstellationen die Abminderungsfaktoren auf vordefinierte, konservative Werte angepasst. Die empfohlenen Werte und deren Gültigkeitsbereich basieren auf Angaben der CARBOCON GMBH und werden auf Grundlage bereits erlangter ZiE vorgeschlagen (siehe Tabelle 1).

  Die Expositionsklassen XA1–3 mit einem Sulfatangriff >1.500 mg/l und die Expositionsklasse XA3 ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen nach DIN 1045-2 sind durch die empfohlenen Werte nicht abgedeckt!

  Die manuelle Eingabe der Beiwerte ist zusätzlich in B2 möglich.

Werden die Abminderungsfaktoren angepasst, sind diese im Rahmen einer ZiE nachzuweisen.

Für XM2 und XM3 wird die Bemessung generell nicht zugelassen.

Abminderungsfaktor ...		*Gittertyp 1*	*Gittertyp 3*	
		nach abZ/aBG		*nach CARBOCON GMBH für ZiE*
... der Zugfestigkeit für Temperatureinwirkung	$\alpha_{nm,T,t}$	*0,85*	*1,00*	*0,85*
... der Zugfestigkeit bei Dauerlast	$\alpha_{nm,t\infty,t}$	*0,70*	*0,70*	*0,70*
... für die dauerhafte Zugfestigkeit	$\alpha_{nm,D,t}$	*1,00*	*1,00*	*0,90*
... der Verbundfestigkeit für Temperatureinwirkung	$\alpha_{nm,T,b}$	*0,45*	*1,00*	*0,70*
... der Verbundfestigkeit bei Dauerlast	$\alpha_{nm,t\infty,b}$	*0,47*	*0,70*	*0,70*
... für die dauerhafte Verbundfestigkeit	$\alpha_{nm,D,b}$	*1,00*	*1,00*	*0,90*

Tabelle 1 Abminderungsfaktoren der Zug- und Verbundfestigkeit nach abZ/aBG und empfohlene Faktoren nach CARBOCON GMBH für eine von der abZ/aBG aweichende Expositionsklasse, Luftfeuchtigkeit und/oder Nutzungstemperatur

- Normalbeton mit Festigkeitsklasse **≤** C50/60
  Bei Festigkeitsklassen > C50/60 und Leichtbeton erscheint in B2 der Hinweis, dass eine ZiE erforderlich ist. Die Abminderungsbeiwerte für die Zug- und Verbundfestigkeit können manuell vorgegeben werden.

- Relative Luftfeuchtigkeit von 65 % in der Nutzungsphase
  In B2 wird die Bemessung bei einer Luftfeuchte über 65 % zugelassen. Analog zu den Expositionsklassen werden die Abminderungsbeiwerte der Zug- und Verbundfestigkeit angepasst (siehe Tabelle 1).

- Durchmesser der Betonstahlbewehrung in der Biegezugzone **≤** 20 mm
  Bei größeren Durchmessern der Betonstahlbewehrung erscheint in B2 der Hinweis, dass eine ZiE erforderlich ist. Die Abminderungsbeiwerte für die Zug- und Verbundfestigkeit können manuell vorgegeben werden.

  Hinweis: Alle zuvor aufgeführten Eigenschaften können im Dialog „Dauerhaftigkeit, Kriechen und Schwinden“ definiert werden.

- Betondeckung **≥** 10 mm
  Es ist mindestens eine Betondeckung der Stahlbewehrung im Bestandsquerschnitt auf der zu verstärkenden Seite von 10 mm vorzuweisen. Ist diese unterschritten, ist im Rahmen der Betoninstandsetzung diese herzustellen.

- Maximaltemperatur von 40 °C
  In B2 wird die Bemessung bei Nutzungstemperaturen über 40 °C bis 80 °C im Rahmen einer ZiE zugelassen. Analog zu den Expositionsklassen werden die Abminderungsbeiwerte der Zug- und Verbundfestigkeit angepasst (siehe Tabelle 1).

Gittertyp und Ausführung

Bei der Herstellung einer textilen Bewehrung können in Abhängigkeit von der Beanspruchung Fasermaterialien, Garnstärken, -gehalte und -abstände sowie die Anzahl der Lagen auf die Beanspruchung effektiv angepasst werden.

Momentan sind 2 Gittertypen (Typ 1 und Typ 3) in der abZ/aBG geregelt, wobei Typ 3 hinsichtlich der Eigenschaften Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Verbundfestigkeit Typ 1 übertrifft, dafür aber etwas starrer und daher bei der Verlegung unflexibler ist. Beide Gittertypen sind als Regelausführung mit einer festen Gitterweite verfügbar. Als Sonderausführung können in B2 eine Reihe größerer Gitterweiten gewählt werden.

Bemessungsergebnis

Abbildung 3 Bemessungsergebnis in B2

Programmintern wird die statisch erforderliche Carbonbewehrungsmenge erf. A_{nm} sowie die daraus resultierende erforderliche Anzahl der Carbongitterlagen ermittelt (nach abZ/aBG max. 4 Lagen). Daraus ergibt sich die Gesamtdicke der Verstärkungsschicht, wobei die jeweils erforderlichen Feinbetonschichten zum Altbeton, zwischen den Carbongelegen und zur Oberfläche 3 mm für den Typ 1 und 5 mm für den Typ 3 betragen.

Zudem wird die in der Carbonbewehrung auftretende Zugkraft F_{nm} ausgegeben. Diese ist gemäß abZ/aBG auf maxF_{nm} = 430 kN/m beschränkt.

Die jeweiligen Auslastungsgrade der Carbonbewehrung (Ausn = erf. A_{nm} / vorh. A_{nm}) und Carbonbeanspruchung (Ausn = F_{nm} / Max F_{nm}) werden ebenfalls ausgegeben.

Als Auswertung des Querkraftnachweises und Schubfugennachweises erscheinen die Auslastungsgrade V_{Ed} / V_{Rdc} und v_{Edi} / v_{Rdi}. Informativ wird, falls nach DIN EN 1992-1-1/NA erforderlich, die Mindestquerkraftbewehrung ermittelt.

Version der Zulassung

Implementierung	Zulassung	Anmerkungen
Release 2023-1	DIBt Z-31.10-182, Geltungsdauer 23.12.2021 – 01.06.2023	
Release 2024-1	DIBt Z-31.10-182, Geltungsdauer 31.08.2023 – 31.08.2028	Keine bemessungsrelevanten Änderungen zur vorherigen Version

Literatur

[1] DIBt (31.08.2023):
Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Allgemeine Bauartgenehmigung CARBOrefit® - Verfahren zur Verstärkung von Stahlbeton mit Carbonbeton (Z-31.10-182)
verfügbar auf der Webseite des DIBt (zuletzt geprüft am 26.10.2023).

[2] Betonkalender 2022 Teil 2: Verstärken mit Carbonbeton (M. Curbach, S. May, E. Müller, A. Schumann, E. Schütze, J. Wagner), Berlin: Ernst & Sohn, 2021, 1. Auflage, S.761-804