

Neues Bemessungsprogramm für CFK-Lamellen

Peter Onken, Wiebke vom Berg, Dirk Matzdorff, Tobias Nolte; bow ingenieure, Braunschweig

1. Mechanische und programmtechnische Grundlagen

Mit der zunehmenden Anwendung von CFK-Lamellen für die Biegezugverstärkung von Stahlbetonbauteilen vergrößert sich auch gleichzeitig der Aufwand für die technische Bearbeitung bei den beteiligten Planungsbüros und den ausführenden Firmen. Während für die statische Berechnung von klassischen Stahlbetonbauteilen bereits seit Jahrzehnten ausgereifte Bemessungsprogramme zur Verfügung stehen, suchten Tragwerksplaner für die Berechnung von Verstärkungsmaßnahmen mittels CFK-Lamellen bis vor kurzem vergebens nach brauchbaren Bemessungshilfen. In der Regel wurden solche Maßnahmen daher in Form einer aufwendigen Handrechnung nachgewiesen. Nicht selten erreichten die Kosten für die technische Bearbeitung dadurch die gleiche Größenordnung wie die Kosten für die Ausführung der Verstärkungsmaßnahme selbst. Hinzu kommt das Problem, dass eine Bemessung von Hand vergleichsweise ungenau ist und somit kaum eine Optimierung der Verstärkungsmaßnahme ermöglicht.

Seit etwa einem Jahr steht nun ein Bemessungsprogramm für die Verstärkung von Stahlbetonplatten und -balken unter einachsiger Biegung mit Hilfe von CFK-Lamellen zur Verfügung [4]. Es wurde unter Microsoft Visual Basic 6.0 entwickelt und ist lauffähig unter Windows 95, 98 und NT sowie unter Windows 2000. Das Programm ist sowohl für die Planung von Verstärkungsmaßnahmen als auch für die Erstellung prüffähiger Nachweise im Rahmen einer statischen Berechnung nutzbar. Es liefert dem Anwender die erforderlichen Lamellenquerschnitte und führt die notwendigen Nachweise entsprechend der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung [1]. Es handelt sich um ein reines Bemessungsprogramm, die Schnittkraftermittlung für das zu verstärkende System erfolgt im Vorfeld durch den Anwender, z.B. mit Hilfe eines Durchlaufträgerprogramms oder auch in Form einer Handrechnung.

Das Bemessungsprogramm basiert auf den Berechnungsgrundlagen der DIN 1045 Ausgabe 7/88, der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung [1], der Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstoffaserverstärkten Kunststofflamellen, Fassung Sept. 1998 [2] sowie auf der Veröffentlichung im Betonkalender 1996 über geklebte Bewehrung für die Verstärkung von Betonbauteilen [3].

Das Programm folgt dem Sicherheitskonzept der DIN 1045, d.h. zwischen Gebrauchslast und rechnerischer Bruchlast beträgt der globale Sicherheitsabstand bei reiner Biegebeanspruchung $\gamma = 1,75$. Die Berechnung der rechnerischen Bruchmomente für den unverstärkten und verstärkten Zustand erfolgt iterativ unter Ausnutzung der Gleichgewichtsbedingungen für die inneren Kräfte des Betonquerschnittes. Bei der Biegebemessung wird ein ebener Dehnungszustand über die Querschnittshöhe vorausgesetzt. Für Beton und Betonstahl gelten die nichtlinearen Spannungsdehnungslinien nach DIN 1045 17.2.1. Das sehr genaue iterative Lösungsverfahren sowie die Verwendung nichtlinearer Spannungsdehnungslinien für Beton und Betonstahl führen zu einer besonders wirtschaftlichen Bemessung der CFK-Lamellen. Die erforderlichen Nachweise zur Endverankerung der Lamellen und zur Schubtragfähigkeit des Bauteils erfolgen nach den Bemessungsvorschriften der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung. Die Gebrauchstauglichkeit des verstärkten Systems ist im Einzelfall vom Anwender zu überprüfen.

Bild 1 Eingabemaske des Bemessungsprogramms

2. Eingabedaten und Bemessung des Lamellenquerschnitts

Das Programm nutzt die maskenorientierten Möglichkeiten von Windows. Bild 1 zeigt die Eingabemaske des Bemessungsprogramms. Der Anwender wird bei der Dateneingabe zusätzlich durch entsprechende Graphikfenster unterstützt. Querschnitt, Betondruckfestigkeit, Bewehrung, Betonstahlgüte und Biegebeanspruchung des zu verstärkenden Systems müssen im Vorfeld durch eine Zustandserfassung bekannt sein. Der Anwender kann bei der Bemessung zwischen den drei Querschnittstypen Platte, Rechteck- und Plattenbalken wählen. Weiterhin können mehrere Bewehrungslagen einschließlich Druckbewehrung berücksichtigt werden. Es werden die Beton- und Betonstahlgüten nach DIN 1045 Tab.1 und 6 sowie die früher häufig verwendete Betonstahlsorte BSt 220 (Stahl I) unterstützt

Neben den Material- und Geometriedaten benötigt das Programm zusätzlich Angaben zur Beanspruchung des Stahlbetonquerschnitts. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen der zu erwartenden Biegemomentenbeanspruchung für den verstärkten Zustand (*erf. M_V*) und der eingepprägten Beanspruchung unter der das vorhandene Stahlbetonbauteil verstärkt wird (*vorh. M_0*). Dieser Vordehnungszustand zum Zeitpunkt des Klebens wird in der Regel vom Eigengewichtsanteil des Betonquerschnitts bestimmt. Die Bemessung erfolgt sowohl für positive (Feldmoment) als auch negative Biegemomente (Stützmoment). Die Momente werden jeweils für den Gebrauchszustand angegeben.

Das Bemessungsprogramm liefert als Ergebnis das rechnerische Bruchmoment M_{U0} des unverstärkten Querschnitts und unter Berücksichtigung des globalen Sicherheitsbeiwertes von 1,75 das erforderliche Bruchmoment M_{UV} für den verstärkten Zustand sowie den zugehörigen Verstärkungsgrad. Wird der zulässige Grenzwert des Biegeverstärkungsgrades $M_{UV}/M_{U0} \leq 2.0$ gemäß der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung überschritten, erfolgt eine Warnung.

Ausgehend vom eingepprägten Vordehnungszustand wird der erforderliche Lamellenquerschnitt durch Variation der Dehnungen zur Ermittlung des Kräftegleichgewichts berechnet. In einem weiteren Bildschirmfenster (Bild 2) kann der Anwender die Lamellengröße auswählen und je nach Querschnittsart entweder bei Balkenquerschnitten die Anzahl der Lamellen oder bei Plattenquerschnitten den Lamellenabstand eingegeben. Das Programm ermittelt automatisch die vorhandene Lamellenquerschnittsfläche. Bei zu geringer Querschnittswahl gibt das Programm eine Warnung.

The screenshot shows the 'Nachweise' software interface with the following data:

- Lamellenquerschnitt:**
 - b / t = 80/1.4 [mm/mm]
 - Balken: Anzahl = 2 [Stück]
 - Platten: Stütz / Kraglänge
 - Länge = 5 [m]
 - max. sL = [] [cm]
 - gew. sL = 20 [cm]
 - vorh. A_L = 2,24 [cm²] bzw [cm²/m]
 - erf. A_L = 2,18 [cm²] bzw [cm²/m]
- Verankerungsnachweis:**
 - f_{ctm} = 3 [N/mm²]
 - f = 5 [cm]
 - a = 8 [cm]
 - Innenbauteil / Außenbauteil
 - Bewehrung/Moment im Punkt E: x_E = 84,87 [cm]
 - As₂ = 1,57 [cm²]
 - As₁₂ = 0 [cm²]
 - As₁₁ = 9,42 [cm²]
 - M_v = 100 [kNm]
 - Nachweis: Tk_{max} = 34,34 [kN] > 1.0 x FL = 30,94 [kN]
 - Status: Nachweis erfüllt!!!
- Schubnachweis:**
 - Bewehrung/Querkraft im maßgebenden Punkt: Q_v = 122 [kN]
 - ASB_{vorh} = 4,02 [cm²/m] BSt 420/500
 - Nachweis: St37 / St52
 - Tau_{OV} = 1,14 [MN/m²]
 - Lim_{Tau0} = 2,4 [MN/m²]
 - ASB_{zus} = 2,28 [cm²/m]
 - Fall 1: Schubbewehrung erforderlich!
 - Status: Nachweis erfüllt!

Bild 2 Eingabemaske zur Auswahl der Lamellengröße

3. Dehnungskontrolle und weitere Nachweise

Über eine gesonderte Bildschirmmaske können die Dehnungsverteilungen des Vordehnungszustandes und des verstärkten Querschnitts im rechnerischen Bruchzustand kontrolliert werden (Bild 3). Dem Anwender wird dadurch die Möglichkeit gegeben, zu überprüfen, welcher Grenz- zustand für die Bemessung jeweils maßgebend ist. Außerdem kann er den ermittelten Gleichgewichtszustand durch eine Handrechnung kontrollieren. Das Programm überprüft darüber hinaus, ob die Dehnung der innenliegenden Betonstahlbewehrung im Gebrauchszustand unterhalb der Streckgrenze liegt. Ist dies nicht der Fall, wird der Anwender aufgefordert, den Lamellenquerschnitt zu erhöhen.

In Abhängigkeit von der Oberflächenzugfestigkeit und dem Lamellenendpunkt kann der Verankerungsnachweis mit Hilfe der charakteristischen Verbundbruchkraft gemäß der Richtlinie geführt werden. Die zu verankernde Lamellenzugkraft wird dabei in Abhängigkeit vom örtlichen Momentenverlauf gegebenenfalls auch bei gestaffelter Innenbewehrung ermittelt (Bild 2).

Der Schubnachweis erfolgt nach den Regeln der DIN 1045, wobei bei lamellenverstärkten Bauteilen der Schubbereich 3 nicht angewendet werden darf [2]. Die vorhandene Bügelbewehrung wird bei der Nachweisführung berücksichtigt. Je nach Höhe der Beanspruchung gibt das Programm an, ob eine zusätzliche Schubbewehrung (St 37) anzuordnen ist und bestimmt die erforderliche Querschnittsfläche der Laschenbügel (Bild 2).

| Vordehnung / unverstärkt | | Bruchdehnung / verstärkt | |
|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
| eps_c: | 0,115 [o/oo] | eps_c: | 0,635 [o/oo] |
| eps_s2: | 0,036 [o/oo] | eps_s2: | 0,071 [o/oo] |
| eps_s12: | 0,000 [o/oo] | eps_s12: | 0,000 [o/oo] |
| eps_s11: | 0,671 [o/oo] | eps_s11: | 4,996 [o/oo] |
| | | eps_L: | 4,810 [o/oo] |

Bild 3 Kontrolle der Dehnungszustände

4. Programm kostenlos erhältlich

Das Bemessungsprogramm kann kostenlos bei der ispo GmbH, Gutenbergstraße 6, 65830 Kriffel angefordert werden. Das zugehörige Handbuch [5] ist gegen eine Schutzgebühr von 30,- DM erhältlich.

Seit kurzem sind für internationale Anwendungen weitere Programmversionen in englischer Sprache verfügbar [6]. Neben der Bemessung nach EC 2 können auch Verstärkungsmaßnahmen nach den Bestimmungen des American Concrete Institute (ACI) und des British Standard (BS) berechnet werden. Eine deutsche Version nach EC 2 und DIN 1045-neu ist in Vorbereitung.

Literatur

- [1] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen durch schubfest aufgeklebte S&P Kohlenfaserlamellen (Z-36.12-54); ispo GmbH.
- [2] Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstoffaserverstärkten Kunststofflamellen (CFK-Lamellen), Fassung Sept. 1998.
- [3] Rostásy, F. S., Holzenkämpfer, P. und Hankers, C.: Geklebte Bewehrung für die Verstärkung von Betonbauteilen. Beton-Kalender 1996, T.II, Berlin: Ernst & Sohn 1996
- [4] Onken, P.; Nolte, T.: Einführung in das Bemessungsprogramm „Biegezugverstärkung mittels CFK-Lamellen“. Vortrag TFB-Fachveranstaltung, 17.03.1999, Wildegg, CH.
- [5] Onken, P.; Nolte, T.: Handbuch für das Bemessungsprogramm „Biegezugverstärkung mittels CFK-Lamellen“; bow ingenieure, Braunschweig, 1999.
- [6] Onken, P.; vom Berg, W.; Matzdorff, D.: Introduction to the Analysis Program “S&P FRP Lamella“, Flexural Strengthening with Externally Bonded CFRP Laminates; bow ingenieure, Braunschweig, June 2000.