

# Bemessungssoftware "FRP Lamella" für die Biegezugverstärkung mit CFK Lamellen

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

## 1 Einführung

**FRP Lamella** ist ein Bemessungsprogramm für die Verstärkung von Stahlbetonplatten und –balken unter einachsiger Biegung mit *CFK Lamellen*. Das Programm läßt sich sowohl für den Entwurf von Verstärkungsmaßnahmen als auch für die Erstellung prüffähiger Nachweise im Rahmen einer Statischen Berechnung nutzen. Es liefert dem Anwender den erforderlichen Lamellenquerschnitt und führt die notwendigen rechnerischen Nachweise zur Verankerung der Lamellen und Verstärkung der Querkrafttragfähigkeit.

Das Programm wurde unter Microsoft Visual Basic 6.0 für Betriebssysteme Windows 95, Windows 98, Windows NT 4.0 und Windows 2000 entwickelt. Es nutzt die maskenorientierten Möglichkeiten von Windows sowohl bei der Eingabe als auch bei der Ausgabe der Daten. Die Berechnungsergebnisse lassen sich direkt vom Programm aus auf einem unter Windows installierten Standarddrucker ausgeben. Die CD mit der Bemessungssoftware enthält Routinen für die automatische Installation. Das Programm passt sich automatisch an die jeweilige Ländereinstellungen an.

## 2 Berechnungsgrundlagen

Das Bemessungsprogramm **FRP Lamella** wurde für die Biegezugverstärkung mit angeklebten CFK Lamellen entwickelt und wird inzwischen, angepaßt an verschiedene Normen und Zulassungen, in über 10 Ländern eingesetzt. Für internationale Anwendungen sind derzeit Versionen nach **Eurocode 2 (EC 2)**, **DIN 1045**, **British Standard (BS 8110)**, **American Concrete Institute (ACI 318)**, **Norme Française (BAEL 91)** und **Korean Concrete Institute (KCI)** verfügbar. Die Berechnungsgrundlagen der Software basieren zusätzlich auf der deutschen *Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstoffaserverstärkten Kunststofflamellen, Fassung Sept. 1998* und den jeweiligen landesspezifischen Zulassungen.

Für den deutschsprachigen Raum steht derzeit eine Version nach DIN 1045 (07/88) und EC 2 zur Verfügung (Bild 1).

Die Software wurde als reines Bemessungsprogramm für die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen konzipiert. Im Vorfeld der Bemessungsaufgabe muß die Beanspruchung des statischen Systems bekannt sein. Der Biegemomentenverlauf für das zu verstärkende System ist daher zuvor vom Anwender z.B. mit Hilfe eines Statikprogramms oder in Form einer Handrechnung zu ermitteln. Den implementierten Bemessungsroutinen liegen die bekannten mechanischen Grundlagen der Stahlbetonbemessung zugrunde:

- Bei der Biegebemessung wird in allen Fällen von einem ebenen Dehnungszustand über die Querschnittshöhe ausgegangen (Bernoulli-Hypothese).

- Ein Mitwirken des Betons auf Zug wird nicht berücksichtigt. Alle zum inneren Gleichgewicht erforderlichen Zugkräfte werden durch die innere Bewehrung und über die zusätzlichen CFK-Lamellen übertragen.
- Es wird vollständiger unverschieblicher Verbund vorausgesetzt. Alle Querschnittselemente, die in Fasern mit gleichem Abstand von der Dehnungsnulllinie liegen, erfahren die gleiche Dehnung.



Bild 1 Ausgangsfenster der Dateneingabe

### 3 Sicherheitskonzept

Das Programm folgt dem Sicherheitskonzept der jeweiligen nationalen Vorschrift und den Bestimmungen der deutschen *Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstoffaserverstärkten Kunststofflamellen, Fassung Sept. 1998*.

Nach DIN 1045 erfolgt die Bemessung im Bruchzustand mit einer globalen Sicherheit von 1,75.

$$M_{uv} \geq 1,75 \cdot M_v .$$

$M_v$  kennzeichnet dabei das einwirkende Gebrauchsmoment und das aufnehmbare Bruchmoment  $M_{uv}$  des betreffenden Querschnitts.

Grundlage für die Bemessung im EC 2 ist die Nachweisbedingung im Grenzzustand der Tragfähigkeit:

$$M_{Sdf} \leq M_{Rdf} .$$

$M_{Sdf}$  kennzeichnet in diesem Fall den Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes und  $M_{Rdf}$  den Bemessungswert des aufnehmbaren Momentes des betreffenden Querschnitts. Die Ermittlung der Bemessungswerte erfolgt unter Berücksichtigung der jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen und für die Baustoffeigenschaften. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über verschiedene Normen die auf einem Teilsicherheitskonzept basieren.

Tabelle 1: Teilsicherheitsbeiwerte für verschiedene Normen

Norm	Einwirkungen		Tragwiderstand	
	Eigengewicht	Verkehrslasten	Beton	Betonstahl
	$\gamma_G$	$\gamma_Q$	$\gamma_c$	$\gamma_s$
EC 2 / DIN 1045-1	1,35	1,5	1,5	1,15
BS 8110	1,4	1,6	1,5	1,15
BAEL 91	1,35	1,5	1,5	1,15
ACI 318	1,4	1,7	1 / 0,9	
KCI	1,4	1,7	1 / 0,85	

Die Gebrauchstauglichkeit, wie z.B. die zulässige Durchbiegung des zu verstärkenden Systems oder die Kontrolle der zulässigen Rissbreiten **muß** im Einzelfall vom Anwender zusätzlich überprüft werden !

#### 4 Bemessung nach DIN 1045 (07/88)

Zu Beginn einer Bemessungsaufgabe muß der Anwender die Beanspruchung des zu verstärkenden Stahlbetonbauteils ermitteln. Der einfachste Weg ist die Einsichtnahme in vorhandene Bestandsunterlagen eines Bauwerks, wie z.B. statische Berechnungen, Positionspläne etc. Sofern diese Möglichkeit nicht besteht, müssen Bauteilgeometrie, statische Systeme und Lasten durch Aufmaß erfaßt und der Biegemomentenverlauf des zu verstärkenden Bauteils unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Lasteinwirkungen rechnerisch ermittelt werden.

Weiterhin muß der Anwender festlegen, welches eingprägtes Biegemoment  $M_o$  zum Zeitpunkt des Klebens auf das Betonbauteil einwirkt. In der Regel wird es das Moment infolge Eigengewicht des Bauteils sein. Diese Angabe dient zur Ermittlung des vorhandenen Vordehnungszustandes. Danach muß die zu erwartende Biegebeanspruchung  $M_v$  für den verstärkten Zustand angegeben werden. Bild 2 zeigt schematisch die Vorgehensweise.

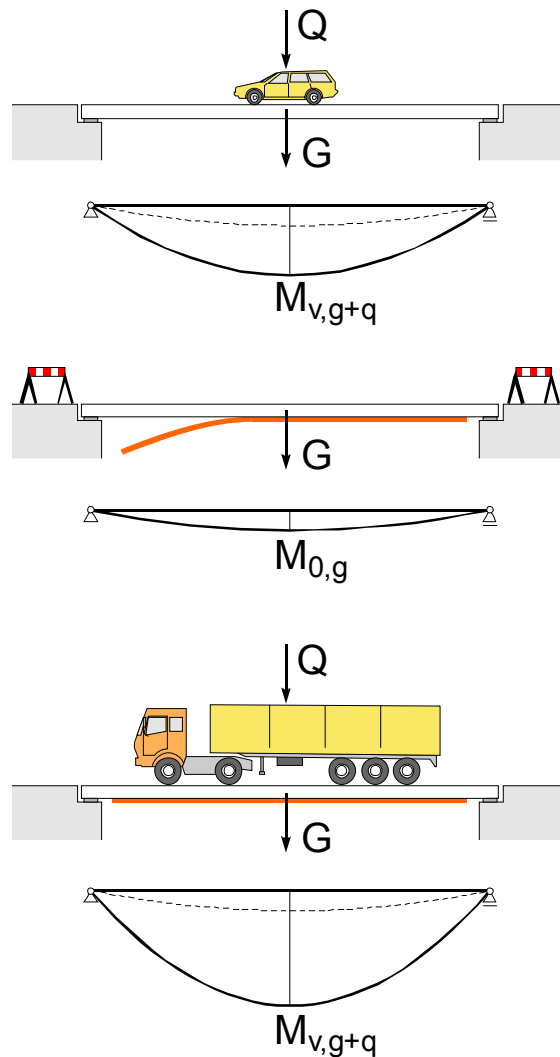


Bild 2 Beanspruchung vor, während und nach der Verstärkung mit CFK Lamellen

Zur Überprüfung des zulässigen Biegeverstärkungsgrades  $\eta_B \leq 2$  gemäß der deutschen Richtlinie werden die Bruchmomente im verstärkten ( $M_{uv}$ ) und unverstärkten Zustand ( $M_{u0}$ ) einander gegenübergestellt. Die Ermittlung des eingepprägten Vordehnungszustandes  $\varepsilon_0$ , der Tragwiderstände des unverstärkten und verstärkten Querschnitts sowie die Berechnung des erforderlichen Lamellenquerschnittes  $A_{f,eff}$  ergibt sich aus den Gleichgewichtsbedingungen  $\Sigma H = 0$  und  $\Sigma M = 0$  unter Berücksichtigung der jeweiligen Materialgesetze und der linearen Dehnungsverteilung (Bild 3).

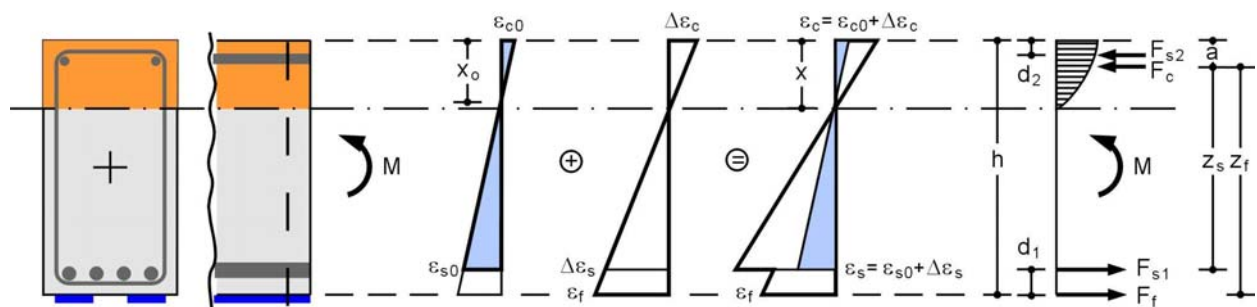


Bild 3 Überlagerung der Dehnungszustände und Gleichgewicht der Kräfte

Nach der Wahl eines ausreichenden Lamellenquerschnitts hat der Anwender die Möglichkeit, die Dehnungszustände sowohl für den Bruchzustand als auch für den Gebrauchszustand zu überprüfen. Anschließend kann der erforderliche Nachweis für die Verankerung der Lamellen geführt werden und bei Bedarf eine Querkraftverstärkung des Querschnitts bemessen werden.

## 5 Eingabedaten

### 5.1 Allgemeines

Bei der Eingabe der Daten wird der Anwender durch erläuternde Grafiken unterstützt. Die Querschnittswerte, die vorhandene Bewehrung, die Materialeigenschaften und die Beanspruchung lassen sich jeweils auf gesonderten Bildschirmmasken eingeben. Bei der Neueingabe eines Bauteils sind die Felder für die Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der jeweiligen Norm vorbelegt. Durch einen Freigabe-Schalter (Schlüssel) in der Symbolleiste können die voreingestellten Werte nach Bedarf geändert werden. Bei Änderungen ist die Abweichung von der jeweiligen Norm zu beachten. Die Eingabe muss nicht in der vorgegebenen Reihenfolge der Bildschirmmasken erfolgen. Um schnelle Änderungen vornehmen zu können, kann der Anwender die einzelnen Bildschirmmasken direkt anwählen. Die EC 2 Version bietet zusätzlich die Möglichkeit, in der Ausgangsmaske der Dateneingabe die landesspezifischen Stahlgüten auszuwählen.

### 5.2 Geometrie

Zur Auswahl stehen drei Querschnittstypen: *Rechteck-*, *Plattenbalken* und *Plattenquerschnitt* (Bild 4). Diese 3 Möglichkeiten decken üblicherweise alle in der Praxis vorkommenden Stahlbetonbauteile ab. Nach Eingabe der Querschnittsabmessungen muß angegeben werden, ob ein Feld- oder Stützmoment verstärkt werden soll. Die Unterscheidung zwischen Innen- und Außenbauteil ist für den Verankerungsnachweis erforderlich.

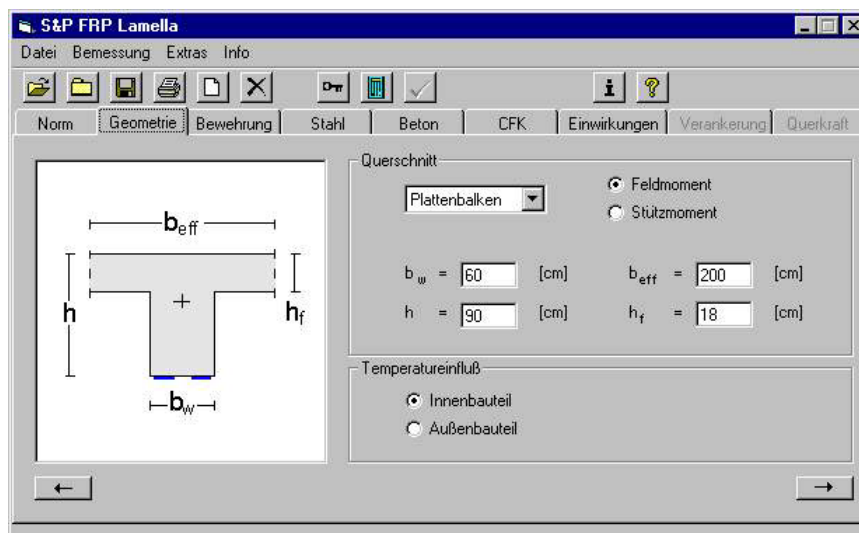


Bild 4 Eingabemaske Bauteilgeometrie

### 5.3 Bewehrung

In der Bildschirmmaske *Bewehrung* (Bild 5) werden die Querschnittsflächen der innenliegenden Bewehrung und die zugehörigen Randabstände eingegeben. Das Programm unterstützt drei Bewehrungslagen. Neben einer 2-lagigen Zugbewehrung  $A_{s10}$  und  $A_{s11}$  besteht auch die Möglichkeit eine Druckbewehrung  $A_{s2}$  zu berücksichtigen. Für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit wird an dieser Stelle auch die vorhandene Schubbewehrung angegeben.

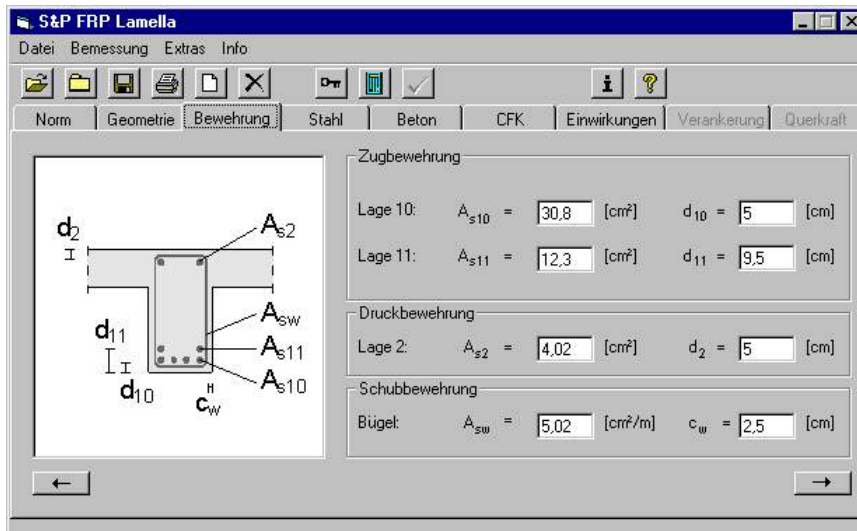


Bild 5 Eingabemaske vorhandene Bewehrung

### 5.4 Stahl – Materialeigenschaften

In der Bildschirmmaske *Stahl* (Bild 6) können die voreingestellten Materialdaten des innenliegenden Betonstahls bearbeitet werden. Es besteht die Möglichkeit, unterschiedliche Stahlsorten für Zug- und Druckbewehrung zu definieren. Für den Stahl wird elastisch-plastisches Werkstoffverhalten vorausgesetzt. Mit Hilfe des Freigabe-Schlüssels in der Symbolleiste lassen sich E-Modul, Festigkeit, Grenzdehnung und auch der Teilsicherheitsbeiwert im EC2 bei Bedarf ändern.

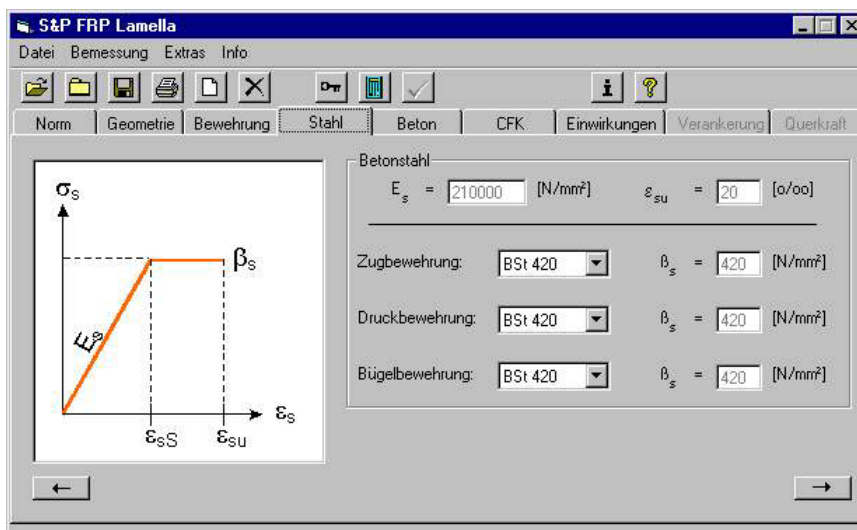


Bild 6 Eingabemaske Bewehrungsstahl

## 5.5 Beton – Materialeigenschaften

Die Materialkennwerte des Betons können in der Bildschirmmaske *Beton* (Bild 7) angepasst werden. Nach DIN 1045 wird für die Spannungs-Dehnungs-Linie des Beton das Parabel-Rechteck-Diagramm verwendet. Die genormten Betongüten, die zugehörigen Betondruckfestigkeiten und die Dehnungskennwerte sind in Abhängigkeit von der jeweiligen Norm voreingestellt. Wie beim Stahl können diese Parameter und auch der Teilsicherheitsbeiwert für Beton mit Hilfe des Freigabe-Schlüssels verändert werden.

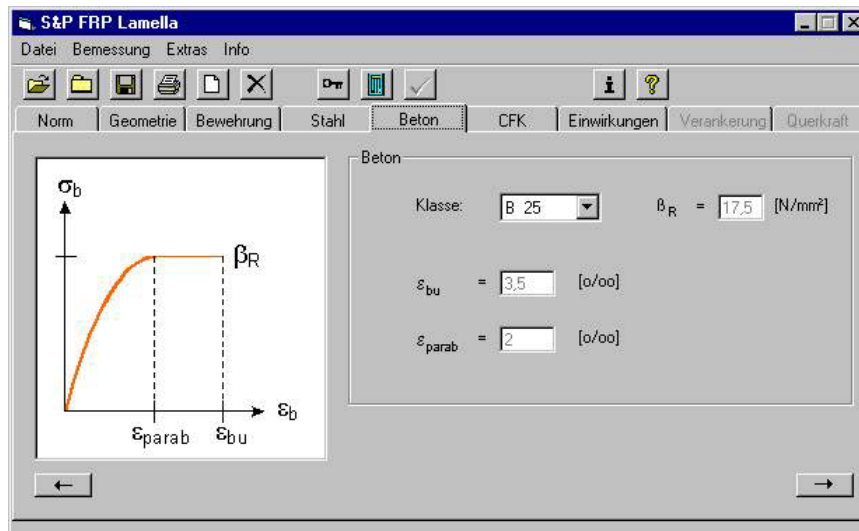


Bild 7 Eingabemaske Betoneigenschaften

## 5.6 FRP – Materialeigenschaften

Nach Eingabe der Querschnitts- und Materialdaten muß der gewünschte Lamellentyp in der Bildschirmmaske *CFK* ausgewählt werden (Bild 8). Zur Auswahl stehen zwei Typen: Die niedrigmodulige Lamelle CFK 150/2000 und die hochmodulige Lamelle CFK 200/2000. Für die Lamellen wird linear-elastisches Werkstoffverhalten vorausgesetzt. Das Programm wählt in Abhängigkeit vom Lamellentyp den zugehörigen E-Modul. Die Grenzdehnung der Lamellen richtet sich nach der deutschen *allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung für die Verstärkung von Stahlbetonbauteilen für aufgelebte S&P Kohlenfaserlamellen*:

$$\varepsilon_{f \text{ limit}} = 5 f_{\text{syk}}/E_s$$

$$\varepsilon_{f \text{ limit}} = 0.0075 \quad \text{für S\&P Lamellen 150/2000}$$

$$\varepsilon_{f \text{ limit}} = 0.0065 \quad \text{für S\&P Lamellen 200/2000}$$

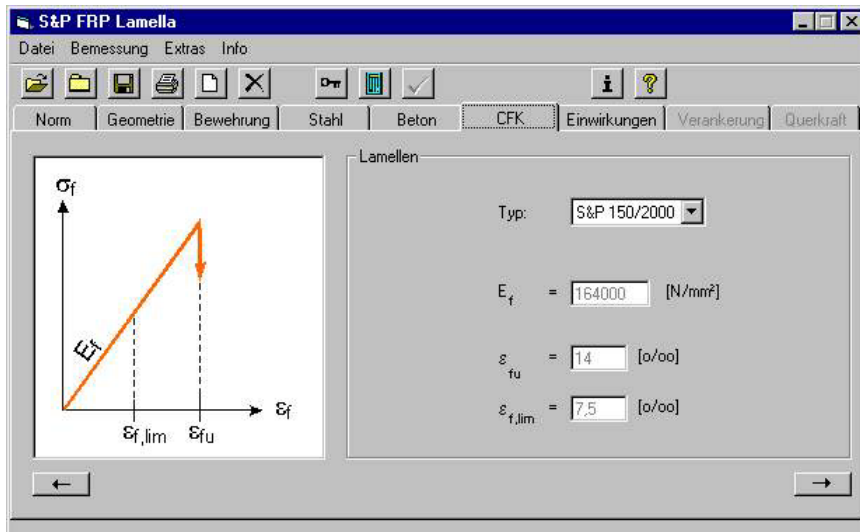


Bild 8 Eingabemaske CFK Lamellen

## 5.7 Einwirkungen

Zur Bestimmung des vorhandenen Vordehnungszustandes ist das eingeprägte Biegemoment  $M_0$ , daß zum Zeitpunkt des Klebens der CFK Lamellen auf das zu verstärkende Betonbauteil wirkt, einzugeben. In der Regel handelt es sich hierbei um das Moment infolge Eigengewicht des Bauteils. Die Ermittlung des Biegemomentenverlaufs für den Vordehnungszustand erfolgt unter Gebrauchslasten.

Im weiteren ist das Gebrauchsmoment  $M_v$  für die zukünftig zu erwartenden Einwirkungen zu ermitteln. Das Programm bestimmt daraus das erforderliche Bruchmoment *erf*  $M_{uv}$ , für die Bemessung des Lamellenquerschnitts. Anschließend werden die Gebrauchsdehnungen und -spannungen im verstärkten Zustand berechnet. Bild 9 zeigt die Eingabemaske für die Beanspruchung.

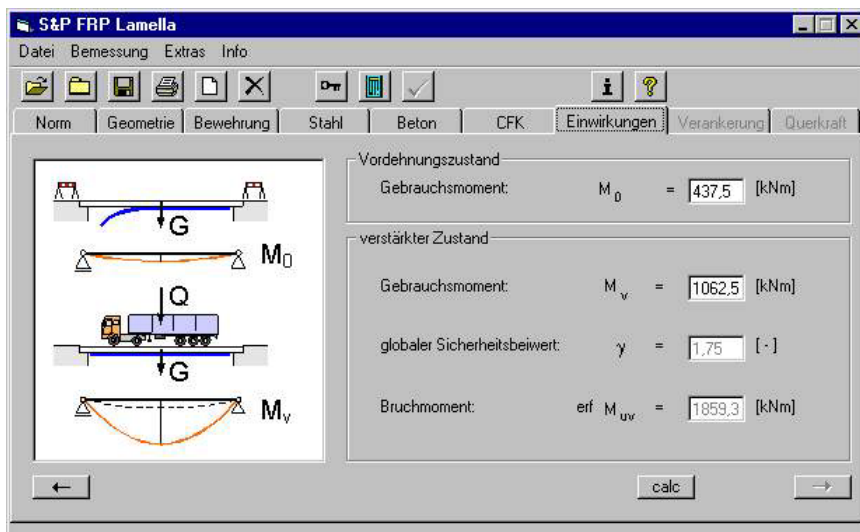


Bild 9 Eingabemaske Einwirkungen

## 6 Bemessungsroutine und Wahl des Lamellenquerschnitts

Nach Eingabe aller Daten wird die Bemessung über den *calc* Befehl gestartet. Das sehr genaue iterative Lösungsverfahren sowie die Verwendung nichtlinearer Spannungsdehnungslinien für Beton und Betonstahl führen zu einer besonders wirtschaftlichen Bemessung der CFK-Lamellen. Die Ermittlung des eingepprägten Vordehnungszustandes  $\varepsilon_0$ , der Bruchmomente des unverstärkten und verstärkten Querschnitts sowie die Berechnung des erforderlichen Lamellenquerschnittes *erf*  $A_f$  ergeben sich aus den Gleichgewichtsbedingungen  $\Sigma H = 0$  und  $\Sigma M = 0$  durch Variation der Dehnungszustände und unter Berücksichtigung der jeweiligen Materialgesetze.

In der Ergebnismaske *Dimensionierung* (Bild 10) hat der Anwender die Möglichkeit, Querschnitt und Anzahl der Lamelle oder bei Platten den Lamellenabstand auszuwählen. Ist der gewählte Lamellenquerschnitt ausreichend, werden die weiteren Bildschirmmasken freigegeben. Weiterhin ermittelt das Programm den Verstärkungsgrad  $\eta$ , der das Verhältnis des aufzunehmenden Bruchmoments *erf*  $M_{uv}$  zum Bauteilwiderstand des unverstärkten Querschnitts  $M_{u0}$  darstellt und bestimmt die verbleibende globale Sicherheit  $\theta$  bei Verlust der Lamellen.

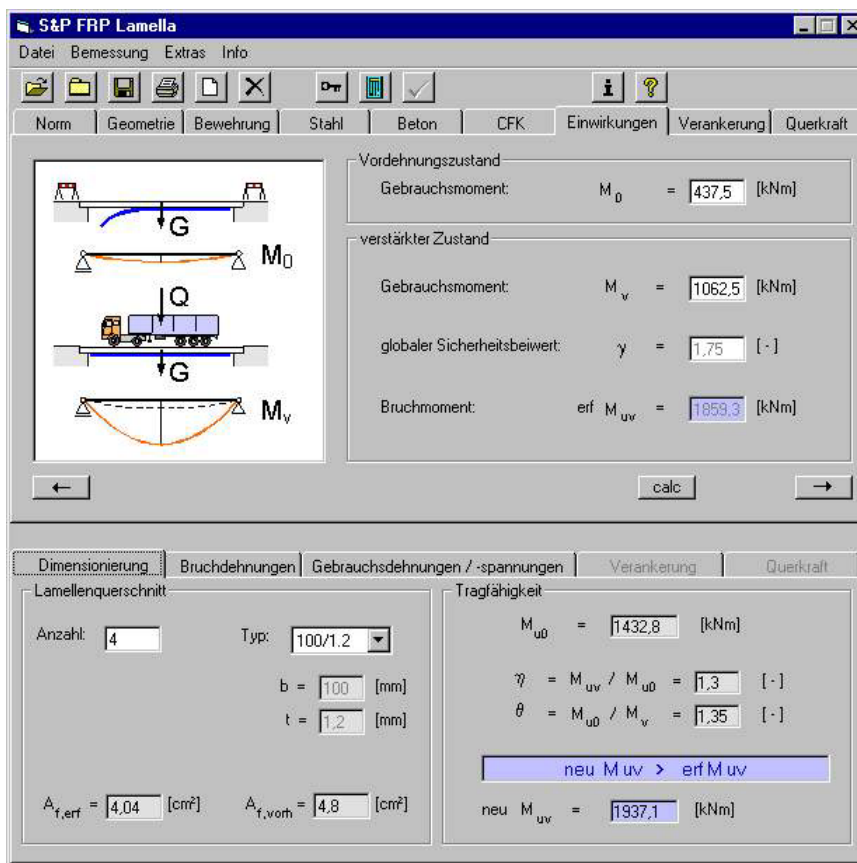


Bild 10 Ergebnismaske Dimensionierung der Lamellen

Über zusätzliche Bildschirmmasken können der Vordehnungszustand, die Dehnungen im Bruchzustand sowie die Dehnungen und Spannungen im Gebrauchszustand kontrolliert werden (Bild 11 und 12).

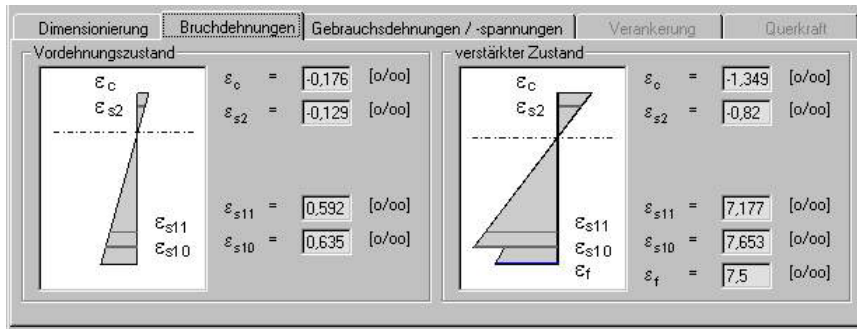


Bild 11 Ergebnismaske Dehnungsverteilung im Bruchzustand



Bild 12 Ergebnismaske Dehnungen und Spannungen im Gebrauchszustand

## 7 Weitere Nachweise

### 7.1 Verankerungsnachweis

Der Nachweis der Verankerung wird in einer weiteren Bildschirmmaske geführt (Bild 13). Dieser Nachweis erfolgt in Anlehnung an die deutsche *Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstoffaserverstärkten Kunststofflamellen (CFK-Lamellen)*, Fassung Sept. 1998. Nach der Richtlinie ist im Rahmen der Zugkraftdeckung nachzuweisen, daß die im rechnerischen Bruchzustand vorhandene Lamellenzugkraft  $F_f$  kleiner gleich der verankerbaren Verbundbruchkraft  $T_k$  ist. Die rechnerische Lamellenzugkraft  $F_f$  wird analog zur Vorgehensweise im klassischen Stahlbetonbau aus der Momentenlinie bestimmt. Für die Widerstandsseite wird die maximale Verbundbruchkraft  $T_{k,max}$  mit Hilfe der Oberflächenzugfestigkeit  $f_{ctm}$  des Betons ermittelt. Das Programm gibt für die verschiedenen Verankerungsfälle Hinweise zur Verankerungslänge der Lamelle.

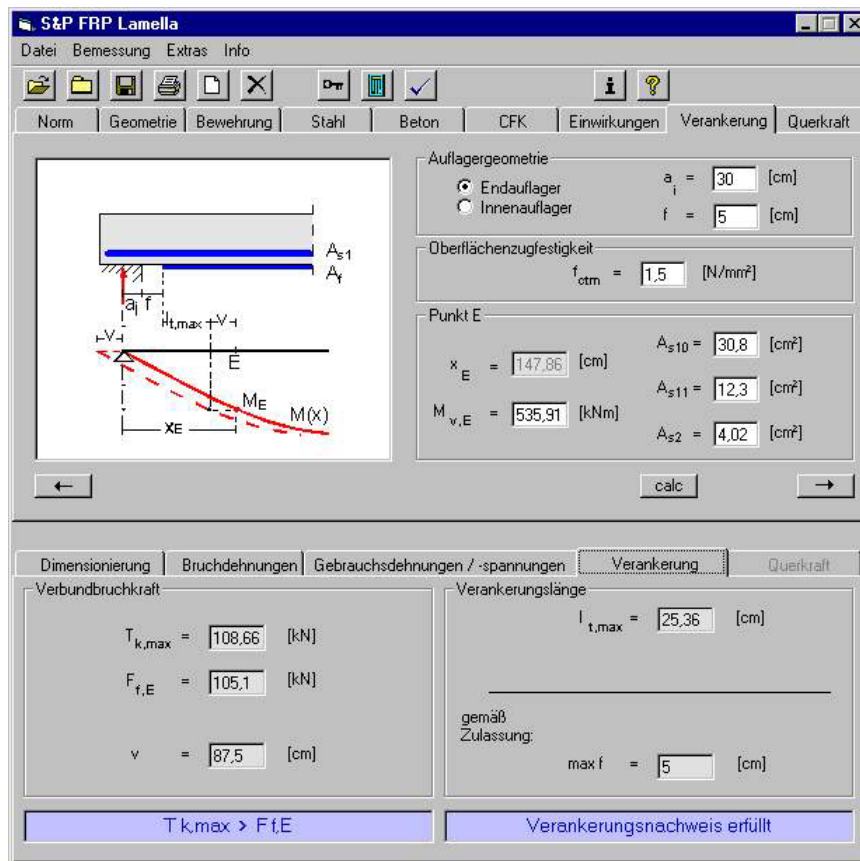


Bild 13 Eingabe- und Ergebnismaske Verankerungsnachweis

## 7.2 Querkraftnachweis

Der Querkraftnachweis wird nach den jeweiligen nationalen Vorschriften geführt (Bild 14). Beim Nachweis nach DIN 1045 wird gemäß der *Richtlinie für das Verstärken von Betonbauteilen durch Ankleben von unidirektionalen kohlenstoffaserverstärkten Kunststofflamellen (CFK-Lamellen)*, Fassung Sept. 1998 die aufzunehmende Querkraft  $Q_v$  der durch die innere Bewehrung gedeckten Querkraft gegenübergestellt. In Abhängigkeit von der vorhandenen Schubspannung  $\tau_{0v}$  kann in bestimmten Fällen auf eine Schubverstärkung verzichtet werden. Reicht die vorhandene Schubbewehrung nicht aus, kann die zusätzliche externe Schubbewehrung mit Hilfe des Programms ermittelt werden. Diese Schubbewehrung wird in Form von Stahllaschen oder S&P C Sheets 640 für die Differenzkraft  $Q_{vL}$  bemessen. Das Programm gibt zusätzlich Hinweise zur Verankerung der externen Schubbewehrung.

Beim Nachweis nach EC 2 kann die aufzunehmende Querkraft  $V_{sdf}$  entweder allein vom Beton übertragen werden oder gemeinsam mit der Schubbewehrung. Reicht die vorhandene Schubbewehrung nicht aus, kann die zusätzliche externe Schubbewehrung mit Hilfe des Programms ermittelt werden. Diese Schubbewehrung wird in Form von Stahllaschen oder S&P C Sheets 640 für die Differenzkraft  $\Delta V$  bemessen. Das Programm gibt zusätzlich Hinweise zur Verankerung der externen Schubbewehrung.

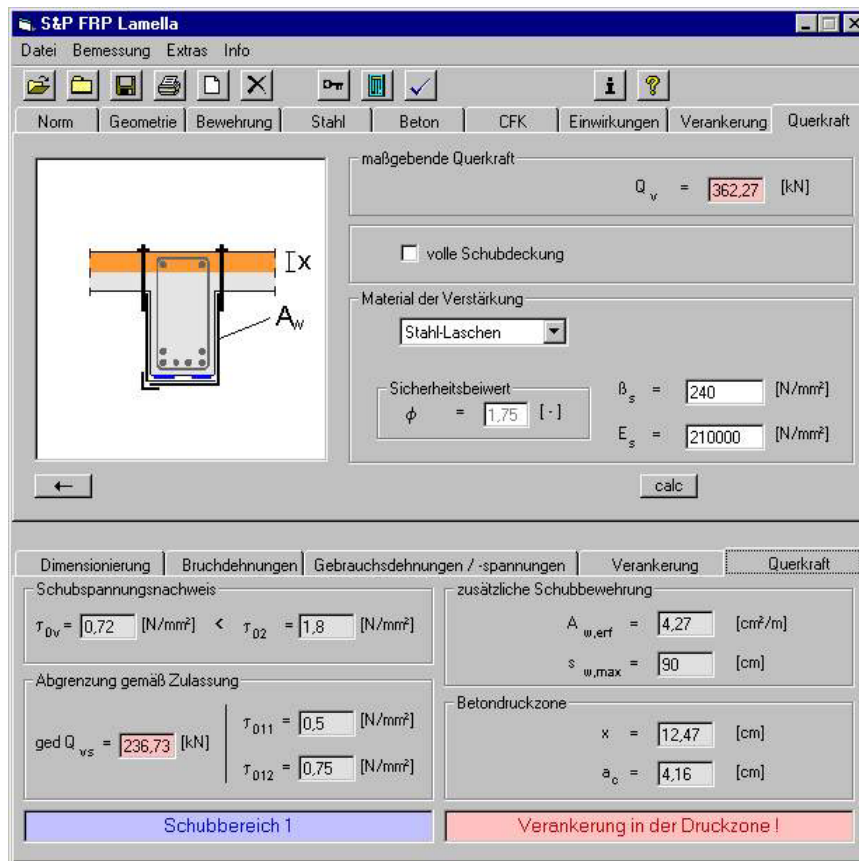


Bild 14 Eingabe- und Ergebnismaske Querkraftnachweis

## 8 Sonstiges

Die Eingabedateien können bei Bedarf abgespeichert und wieder geladen werden. Das Bemessungsprogramm bietet weiterhin die Möglichkeit, allgemeine Angaben zum Projekt bzw. zur jeweiligen Berechnungsposition einzugeben. Ferner kann der Anwender seinen eigenen Firmenkopf definieren, der dann jeweils beim Ausdruck als erste Zeile auf den Ergebnisseiten erscheint. Das Programm liefert dem Anwender ein vollständiges Ergebnisprotokoll, das auf einem unter Windows installierten Standarddrucker ausgegeben werden kann.