

# Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Deuring, Martin

**Publication date:**

1993

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000897465>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

# **Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen**

**Abhandlung zur Erlangung des Titels  
Doktor der Technischen Wissenschaften  
der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich**

**vorgelegt von**

**Martin Deuring  
Dipl. Bauing. ETH  
geboren am 27. April 1962  
von Herisau AR und Winterthur ZH**

**Angenommen auf Antrag von:**

**Prof. Dr. H. Bachmann, Referent, ETH Zürich  
Prof. U. Meier, Korreferent, EMPA Dübendorf**

## Kurzfassung

Eine nachträgliche Verstärkung eines Tragwerkes drängt sich auf, wenn dessen Tragsicherheit und/oder Gebrauchstauglichkeit unter den vereinbarten Nutzungszuständen nicht mehr gewährleistet ist. Erhöhungen der Einwirkungen, Schäden an Tragwerksteilen sowie Unterlassungen oder Fehlhandlungen in der Projektierungs- und/oder Ausführungsphase erfordern eine Sanierung, falls das Tragwerk weiterhin nutzbar sein soll.

Seit 1967 kann der Biegezugwiderstand von Stahlbetontragwerken durch Aufkleben von Stahllamellen nachträglich erhöht werden. Doch weist diese Methode nebst vielen positiven Eigenschaften auch einige Mängel auf.

Dank intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an der EMPA Dübendorf ist es heute möglich, den schweren Stahl durch leichte Faserverbundwerkstoffe zu ersetzen. Hochfeste Lamellen aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) sind in beliebiger Länge erhältlich und aufgerollt transportierbar. Stahllamellen können durch Unterrostungen ausfallen, demgegenüber korrodieren CFK-Lamellen nicht.

Für einzelne Tragwerke kann es vorteilhaft sein, die CFK-Lamellen gespannt aufzukleben. In der vorliegenden Arbeit wird aufgezeigt, dass die Gebrauchstauglichkeit des verstärkten Tragwerks durch die Spannkraft verbessert wird. Diese entlastet die Stahlbewehrung und reduziert die Rissbreiten sowie die Durchbiegungen. Zusätzlich wird die Tragsicherheit erhöht, indem gegenseitige vertikale Verschiebungen von Rissuferm behindert werden. Dadurch wird die Abschergesfahr der Lamelle infolge von Umlenkkraften reduziert.

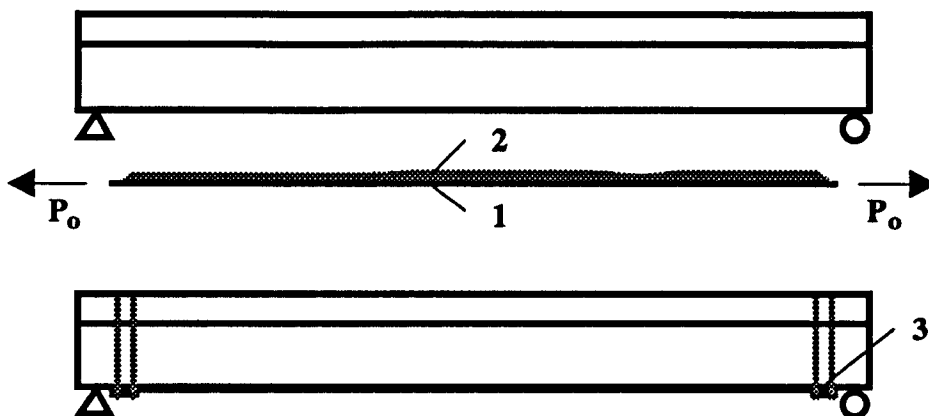


Abb. 1 Vorgehensweise für die Applikation einer gespannten Lamelle

Die Vorgehensweise der Applikation einer gespannten Lamelle ist in Abb. 1 schematisch dargestellt. Nach der Vorbehandlung von Lamellen- und Betonoberflächen wird die CFK-Lamelle (1 in Abb. 1) über spezielle Spannlaschen mit der Kraft  $P_0$  gespannt. Unmittelbar vor dem Anpressen der Lamelle an das Tragwerk wird der Klebstoff (2) aufgetragen. Nach dem Aushärten werden die Krafteinleitungszonen mit Anpressplatten (3) versehen, um die grossen Kräfte von der Lamelle in den Beton einzuleiten. Durch eine Anpresskraft senkrecht

auf die Lamellenfläche wird die Schubfestigkeit des Betons erhöht und beim Auftreten von Horizontalrissen durch eine wirksame Verzahnung die Lamelle weiterhin erfolgreich am Tragwerk verankert. Schliesslich wird die Spannkraft  $P_0$  abgelassen.

In der vorliegenden Arbeit werden Biege- und Verankerungsversuche von 14 Stahlbetonträgern mit einer Spannweite von  $l = 2$  m und 7 wirklichkeitsnahen Trägern mit  $l = 6$  m vorgestellt. Unter statischer und/oder schwingender Beanspruchung werden unverstärkte sowie schlaff und gespannt verstärkte Träger verschiedenen Spanngrades gegenseitig verglichen.

Mit den anschliessend beschriebenen Modellen und Berechnungsverfahren kann das Tragverhalten eines nachträglich verstärkten Tragwerkes und dessen Kraftfluss wirklichkeitsnah erfasst werden. Die CFK-Lamelle weist keine plastische Verformungsreserve auf. Daher wird der grösste Biege- und Schubwiderstand eines verstärkten Querschnittes dann erreicht, wenn ein Lamellenbruch während des Stahlfließens und vor Betonbruch eintritt. Jedoch können auch andere Kombinationen eintreten, die aber zu einem geringeren Biege- und Schubwiderstand führen. Die Bruchart kann insbesondere durch den Lamellenquerschnitt und die Spannkraft beeinflusst werden. Ein vorzeitiges Ausfallen der Lamelle infolge Abscherens des Betons in der Zugzone muss verhindert werden. Auftretende Schubkräfte bewirken in einem Rissquerschnitt einen vertikalen Versatz der Rissufer. Dadurch entstehen Umlenkkräfte, die zu diesem Abscheren führen können. Anhand eines Modells wird dargestellt, dass die Grösse der Betondruckzone, eine wirksame Verzahnung im Riss und der achsiale Dehnwiderstand der Bewehrungen den maximalen Widerstand gegen dieses Abscheren beeinflussen. Für vorgegebene Abmessungen wirkt sich ein hoher Spanngrad günstig aus.

Spannungs- und Verformungsberechnungen lassen sich mit den üblichen Methoden durchführen. Die Versuchsergebnisse bestätigen die Annahme, dass die von Bernoulli-Navier eingeführte Hypothese vom Ebenbleiben ursprünglich ebener Querschnitte für mittlere Dehnungen in nicht schubbeanspruchten Zonen auch hier gültig ist. Die bekannten Zustände, Beton ungerissen und in der Zugzone vollkommen gerissen, müssen für Abschätzungen von Grenzwerten erweitert werden. Neu wird der Zustand III eingeführt, der dadurch gekennzeichnet ist, dass die Stahlstäbe die Fließdehnungen überschritten haben. Allerdings soll unter den vereinbarten Nutzungszuständen kein Stahlfließen eintreten, damit Rissbreiten und Verformungen beschränkt bleiben.

Die Rissbildung wird durch die aufgeklebte CFK-Lamelle positiv beeinflusst. Die guten Verbundeigenschaften bewirken eine Reduktion der mittleren Rissbreiten, während die Spannkraft der Lamelle die Anzahl der Risse und damit die Gesamtsumme der Rissbreiten verringert. Das hervorragende Ermüdungsverhalten von zwei Trägern, die je mit einer schlaffen und einer gespannten CFK-Lamelle verstärkt sind, übertrifft alle Erwartungen.

Mit der Sanierung der Ibachbrücke wird 1991 weltweit erstmals ein Tragwerk mit schlaffen CFK-Lamellen verstärkt. Eine erste praktische Anwendung mit gespannt aufgeklebten Lamellen dürfte in den nächsten Jahren erfolgen.

## Abstract

The post-strengthening of a structure becomes necessary when its safety and/or its serviceability can no longer be guaranteed. An increase of external influences, damage to parts of the structure and deficiencies or errors during the design and/or construction phases necessitate a rehabilitation of the structure if it is to remain serviceable.

Since 1967 it has been possible to post-strengthen the flexural resistance of reinforced concrete structures by the adhesion of steel plates. This method, however, has drawbacks as well as positive features.

As a result of intensive research and development at the EMPA Dübendorf, it is now possible to replace the heavy steel by lightweight fibre composites. High-strength sheets composed of carbon fibre reinforced plastics (CFRP) are available in any desired length and may be transported in rolls. Steel plates may fail due to rusting, whereas CFRP sheets are not subject to corrosion.

In certain structures it may be of advantage to apply the CFRP sheets in a prestressed condition. In the present work it is shown that the serviceability of the strengthened structure is improved by prestressing. This relieves the load from the steel reinforcement and reduces the crack widths as well as the amount of bending. In addition the factor of safety is increased, since the mutual vertical displacements of crack boundaries are impeded. Thus the danger of delamination of the sheet due to shear forces is reduced.

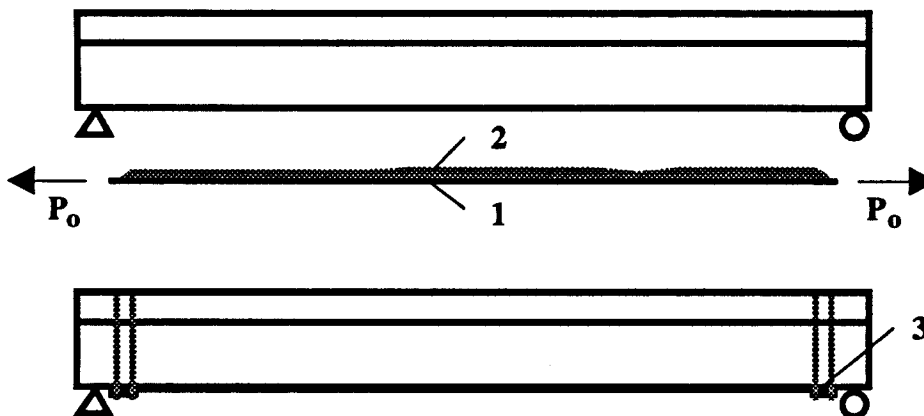


Fig. 1 Procedure for applying a prestressed sheet

The procedure for applying a prestressed sheet is shown schematically in Fig. 1. After pretreatment of the surfaces of the sheet and the concrete, the CFRP sheet (1 in Fig. 1) is prestressed with force  $P_0$  using special plates. The adhesive (2) is applied immediately before pressing the sheet onto the structure. After curing, the force transfer zones are provided with pressing plates (3) in order to transfer the large forces from the sheets into the concrete. As a result of a pressing force perpendicular to the sheet surface, the shear strength of the concrete is increased; upon occurrence of horizontal cracks, the sheet

continues to be anchored successfully to the supporting structure thanks to an effective interlocking system. Finally the prestressing force  $P_0$  is released.

The present work describes bending and anchorage tests on 14 reinforced concrete beams with a span of 2 m and on 7 "realistic" beams with a span of 6 m. Under static and/or dynamic loading, comparisons are made between beams in the non-post-strengthened condition and with non-prestressed and prestressed adhered sheets with different degrees of prestressing.

The bearing capacity of a post-strengthened structure and the respective force distribution may be determined realistically by means of the models and calculation procedures described. The CFRP sheet possesses no plastic deformation reserve. For this reason the maximum flexural strength of a reinforced section is obtained if rupture of the sheet occurs during plastic deformation of the steel and prior to concrete fracture. Other combinations may also occur, but these lead to a smaller flexural strength. The type of fracture can be especially influenced by the cross section of the sheet and the prestressing force. What must be avoided is a premature failure of the sheet as a result of shearing of the concrete in the tensile zone. Shear forces that arise cause a vertical displacement of the crack boundary in a crack cross section, creating shear forces which can lead to this delamination. Based on a model, it is shown that the size of the concrete compression zone, an effective interlocking system in the crack and the axial elongation resistance of the reinforcement all influence the maximum resistance to this delamination. For given dimensions, a higher degree of tensioning has favourable results.

Calculations of stress and deformation may be carried out by the usual methods. The test results confirm the hypothesis introduced by Bernoulli-Navier that cross sections which were originally planar remain so, for average elongations in zones not loaded by shear. The well known conditions, 1) concrete uncracked and 2) in the tensile zone completely cracked, must be augmented for estimations of limits.

Condition III is newly introduced, in which the steel rods have exceeded the yielding point. However, under service conditions no plastic deformation of steel should occur, in order that crack widths and deformations remain limited.

Crack formation is positively influenced by the adhered CFRP sheet. The good composite properties cause a reduction of the mean crack widths, whereas the tension in the sheet reduces the number of cracks and hence the total sum of crack widths. The excellent fatigue behaviour of two beams, one post-strengthened with a non-prestressed CFRP sheet and one with a prestressed CFRP sheet, exceeds all expectations. The rehabilitation of the Ibach bridge in 1991 represents the first structure in the world which has been post-strengthened with CFRP sheets. In the coming years the first practical application with prestressed, bonded sheets can be expected.