

**Bewehren von Stahlbeton  
mit kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzen**

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

Vorgelegt von:

Kaiser Hanspeter  
Dipl. Bauing. ETH  
geboren am 7.1.1960  
von Au-Fischingen/TG

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. A. Rösli, Referent  
Prof. U. Meier, Korreferent, EMPA Dübendorf  
Dr. M. Ladner, Korreferent, EMPA Dübendorf

12.9.89.

A. Rösli

Zürich, ETH

1989

## KURZFASSUNG

Seit rund 20 Jahren können bestehende Stahlbetonkonstruktionen nachträglich durch Aufkleben von Stahllamellen verstärkt werden. Gewisse Nachteile dieses Systems, wie umständliche Handhabung der schweren Stahllamellen auf der Baustelle, die Problematik einer möglichen Korrosion an der Grenzfläche Stahl/Klebstoff, sowie die Schwierigkeit, bei geklebten Stahllamellen, die wegen der begrenzten Lieferlänge erforderlich werdenden Stösse befriedigend auszubilden, führten zur vorliegenden Forschungsarbeit. Ziel der Arbeit war es abzuklären, ob die Stahllamellen durch kohlenstoffaserverstärkte Epoxidharzlamellen ersetzt werden könnten. Lamellen aus diesem Werkstoff zeichnen sich durch eine geringe Rohdichte, sehr hohe Festigkeit, ausgezeichnete Ermüdungseigenschaften und eine hervorragende Korrosionsbeständigkeit aus.

Nach anwendungstechnischen Vorversuchen wurde erstmals der erfolgreiche Einsatz kohlenstoffaserverstärkter Epoxidharze für die nachträgliche Verstärkung in Belastungsversuchen an 26 Biegeträgern von zwei und einem Träger von sieben Metern Spannweite nachgewiesen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigten, dass nachträglich mit kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzen verstärkte Stahlbetonbauteile auf Biegung analog wie herkömmlicher Stahlbeton berechnet werden dürfen. Besondere Beachtung muss allerdings der Schubrissbildung im Beton geschenkt werden. Auftretende Schubrisse führen zu einem Versatz an der verstärkten Oberfläche. Dieser bewirkt in der Regel ein Abschälen der Verstärkungslamelle. Die Schubrissbildung wird somit zu einem Bemessungskriterium. Biegerisse werden von der Lamelle überbrückt und beeinflussen die Traglast nicht. Die Verstärkungslamellen führen gegenüber den nicht nachträglich verstärkten Trägern zu einer feineren Rissverteilung. Das für die Lamellenverankerung entwickelte Rechenmodell zeigt in weiten Bereichen eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten. Für kurze Verankerungslängen unterschätzt das Modell die Traglasten von dicken Lamellen und überschätzt jene dünner Lamellen.

Die unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten von Beton und kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzen bewirken bei Temperaturänderungen Verbundspannungen in der Klebschicht. Nach hundert Frostzyklen von + 20 °C bis - 25 °C wurde kein negativer Einfluss auf die Traglast nachträglich verstärkter Balken festgestellt. Die Verträglichkeit der beiden Materialien konnte für diesen Temperaturbereich auch anhand einer theoretischen Betrachtung bestätigt werden.

## SUMMARY

For about 20 years, existing reinforced concrete structures have been post-strengthened through the bonding of steel plates. This system has some disadvantages such as the difficulty in manipulating the heavy steel plates at the construction site, possible corrosion at the joint surface steel-adhesive as well as the problem of the proper formation of joints, which comes about due to the limited delivery lengths of the steel plates. The difficulties led to the present research project, with the goal of investigating whether steel plates could be replaced by carbon-fibre reinforced epoxy-resin plates. Such plates are lightweight, very strong, have excellent fatigue properties and outstanding corrosion resistance.

Following preliminary tests, carbon fibre reinforced epoxy-resin plates were successfully employed for the first time in loading tests for post-strengthening of beams. 26 flexural beams with a span of 2 m and one with a span of 7 m were investigated.

The results of the project show that the calculation of flexure in reinforced concrete elements post-strengthened with carbon-fibre reinforced epoxy-resin plates can be performed analogous to conventional reinforced concrete elements. Nevertheless, special attention must be given to the development of shear cracks in the concrete. The occurrence of shear cracks results in an offset on the reinforcement surface. This generally leads to a peeling off of the strengthening plate. Thus, the shear crack development represents a dimensioning criterion. Flexural cracks are spanned by the plate and do not influence the loading capacity. In comparison to the unstrengthened beams, the strengthening plates lead to a finer crack distribution. A calculation model, developed for the plate anchoring agrees well with experimental results over a wide range. For short anchoring lengths, the model underestimates the loading capacity of thick plates and overestimates that of thin plates.

The difference in temperature expansion coefficients of concrete and carbon-fibre reinforced epoxy-resin results in stresses at the joint with changes of temperature. After one hundred frost cycles ranging from + 20 °C to - 25 °C, no negative influence on the loading capacity of the post-strengthened beams was observed.