Zeitschrift: IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte
Band: 57/1/57/2 (1989)

Artikel: Verstärken von Stahlbetonbauten mit aufgeklebten CFK-Lamellen
Autor: Ladner, Marc / Holtgreve, Klaus
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-44283

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

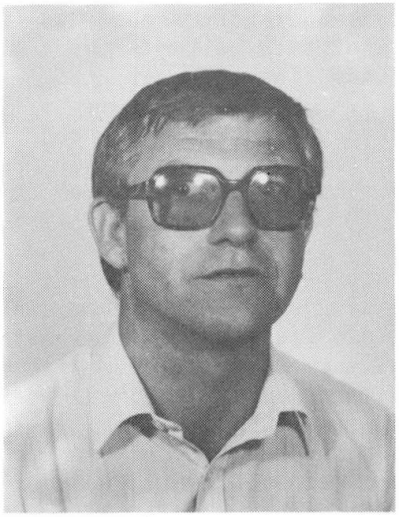
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Verstärken von Stahlbetonbauten mit aufgeklebten CFK-Lamellen

Strengthening of Reinforced Concrete Structures Using Bonded Carbon Fibre Sheets

Renforcement d'ouvrages en béton armé avec des lamelles en fibre de carbone

Marc LADNER
Dr. sc. techn.
EMPA
Dübendorf, Schweiz



Marc Ladner, geboren 1939, erwarb 1962 das Diplom als Bauingenieur an der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich (ETH), wo er 1968 auch zum Dr. sc. techn. promovierte. Nach einem Studienaufenthalt an der University of Texas at Austin TX, USA, leitet er seit 1971 die Abteilung Massivbau der Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) in Dübendorf.

Klaus HOLTGREVE
Dipl.-Ing.
Strabag Bau AG,
Köln, Bundesrep. Deutschland

Klaus Holtgreve, geboren 1938, erwarb 1966 das Diplom als Bauingenieur an der Rhein.-Westf. Techn. Hochschule in Aachen. Tätigkeit als konstruktiver Bauingenieur seit 1963 in Ingenieurbüro und Bauunternehmen. Wurde 1982 Mitarbeiter in der Hauptabteilung Technik und Projektbearbeitung in der HV der Strabag Bau-AG in Köln, wo er seitdem mehrere bauliche Verstärkungen durch schubfeste Klebeverbindungen in Planung und Ausführung begleitet hat.

ZUSAMMENFASSUNG

Es werden die Ergebnisse eines statischen Bruchversuches an einem Stahlbetonbalken mit wirklichkeitsgetreuen Abmessungen beschrieben, der mit einer aufgeklebten Kohlestoff-Faserlamelle (CFK) verstärkt worden ist. Die bisher vorliegenden Ergebnisse ermutigen, den eingeschlagenen Weg weiter zu verfolgen.

SUMMARY

In this paper the results of a static loading test on a reinforced concrete beam are reported. The beam was strengthened by means of externally bonded carbon-fibres. The results obtained in this test encourage carrying out further investigations in the field of this new technique of strengthening.

RÉSUMÉ

Les résultats d'un essai de charge jusqu'à la rupture d'une poutre en béton armé sont présentés. La poutre a été renforcée par une lamelle composée de fibre de carbone collée à l'extérieur de la poutre. Les résultats obtenus encouragent de continuer à expérimenter avec cette nouvelle technique de renforcement.

1. DIE ENTWICKLUNG DER KLEBETECHNIK

Die Möglichkeit, bestehende Stahlbetonbauwerke von aussen her durch Ankleben von Stahllamellen als zusätzliche Bewehrung zu verstärken, hat schon manchem dieser Bauten dazu verholfen, noch für viele weitere Jahre seinen Dienst zur Zufriedenheit seiner Benützer bei gleichzeitiger Einhaltung der geforderten Sicherheit zu versehen. Dabei wirkt sich günstig aus, dass das Verfahren unter Berücksichtigung aller Umstände wirtschaftlich interessant ist. Es kann daher nicht überraschen, dass die seit 1967 [1] angewandte Methode im Laufe der Zeit immer mehr Verbreitung gefunden hat und dabei auch weiter entwickelt worden ist [2]. Hierbei wird heute vor allem auch dem Einsatz neuer Materialien besondere Beachtung geschenkt, da auf diese Weise dem Verfahren weitere Einsatzmöglichkeiten erschlossen werden können. Allerdings wird man dabei sehr sorgfältig vorgehen müssen, um nicht Gefahr zu laufen, einerseits bestehende Mängel zwar zu eliminieren, andererseits aber neue, unbekannte und daher mit grösseren Risiken behaftete Schwächen einzuführen.

Gerade um dieser zuletzt genannten Gefahr zu begegnen, sind schon seit 1985 an der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA (Schweiz) Untersuchungen im Gange, welche die Abklärung der Einsatzmöglichkeit von Kohlestoff-Faserlamellen (CFK-Lamellen) anstelle der bisher üblichen Stahllamellen als Zusatzbewehrung zum Gegenstand haben. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen darf erwartet werden, dass bei Einhaltung gewisser Regeln bei Bemessung und Ausführung dieser Erweiterung der Methode der Klebebewehrung durchaus reale Chancen zukommen [3]. Bevor aber schon an einen Einsatz in grösserem Stil gedacht werden kann, müssen noch etliche Fragen sowohl bezüglich des Ermüdungs- und des Langzeitverhaltens als auch bezüglich der Ausführung sorgfältig abgeklärt werden.

Im Rahmen dieser Abklärungen wurde kürzlich an der EMPA ein erster statischer Belastungsversuch an einem Balken mit bauwerksähnlichen Abmessungen getestet, um daran das Trag- und Verformungsverhalten unter wirklichkeitsnahen Bedingungen zu untersuchen; über die dabei erzielten Ergebnisse wird nachfolgend berichtet.

2. DER CFK-BELASTUNGSVERSUCH

2.1. Versuchsbedingungen und -vorbereitungen

Für die Versuche stand ein Stahlbeton-Plattenbalken mit einer Gesamtlänge von 8.40 m, einer Höhe von 0.60 m, einer Plattenbreite von 1.25 m und einer Stegbreite von 0.35 m zur Verfügung. Für die statischen Belastungsversuche wurde dieser Versuchsbalken auf zwei Stützen im Abstand von 7.00 m frei drehbar aufgelagert und symmetrisch zur Mitte im Abstand von 2.00 m mit zwei Einzelkräften belastet. Als Hauptbewehrung enthielt der Träger auf der Zugseite vier Bewehrungsstäbe ø 28 mm; als Schubbewehrung waren Bügel ø 10 mm mit einem mittleren Abstand von 190 mm über die ganze Balkenlänge verteilt angeordnet. Die weiteren Details bezüglich der Bewehrung, Abmessungen, Anordnung der Messinstrumente und der Belastung sind in Fig. 1 angegeben.

Die unterseitige Verstärkung des Balkens durch schubfeste Klebeverbindung erfolgte mit einer CFK-Lamelle der Querschnittsabmessungen 300·1 mm. Vorgabe der statischen Berechnungen war, im Versagensfall nur den Bruch der CFK-Lamelle herbeizuführen und andere Versagensarten für den Balken auszuschliessen.

Vor dem Aufkleben der CFK-Lamelle wurde der Balken, zusätzlich zu seinem Eigengewicht, mit den zwei in Fig. 1 angegebenen Einzellasten stufenweise bis auf 100 kN je Zylinder belastet, um Risse zu erzeugen; dabei traten die ersten Anrisse bei einer Kraft von F = 30 kN je Zylinder auf; daraus lässt sich, unter Berücksichtigung des Eigengewichts des Balkens und der Versuchseinrichtung, eine Betonbiegezugfestigkeit von f_{cb} = 4.5 N/mm² berechnen.

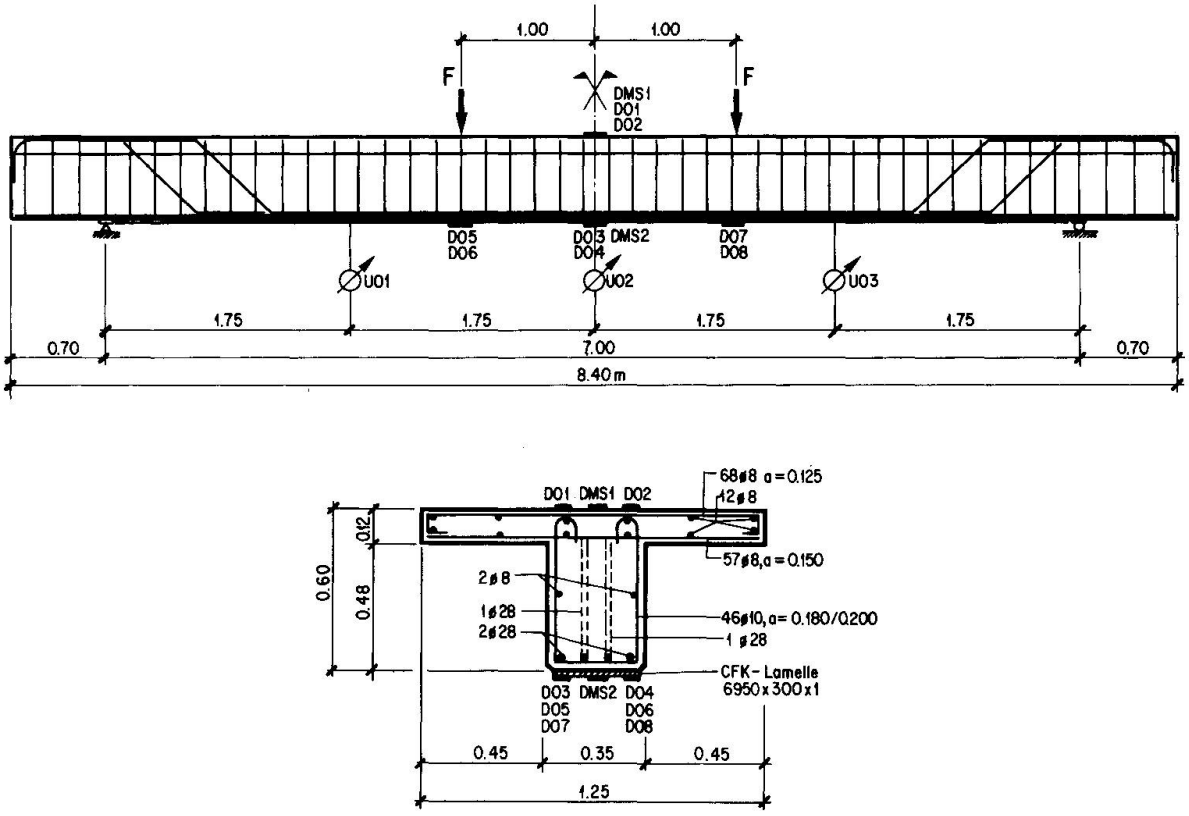


Fig. 1: Versuchsbalken: Abmessungen, Bewehrung, Lastanordnung sowie Art und Lage der verwendeten Messinstrumente

2.2. Materialeigenschaften und -verarbeitung

Der Beton entsprach der Güte B25 nach DIN 1045 mit einem Grösstkorn von 32 mm. Die Zementdosierung betrug 280 kg/m³, wobei ein Portlandzement zum Einsatz kam; der W/Z-Wert wurde zu 0.57 gewählt. Damit ergab sich eine Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen Abbindezeit von f_{cw28} = 36.6 N/mm². Zum Zeitpunkt der Versuche hatte der Balken ein Alter von 1733 Tagen; die unmittelbar nach dem Versuch an Bohrkernen bestimmte Betonfestigkeit ergab Werte zwischen f_{cw} = 43.4 und 61.8 N/mm², im Mittel von f_{cw} = 49.8 N/mm², die Zugfestigkeit solche zwischen f_{ct} = 2.45 und 4.68 N/mm².

Die Streckgrenze der Stahlbewehrung ø 28 mm (Stahl III) betrug f_{sy} = 464 N/mm², ihre Bruchdehnung (Gleichmassdehnung) A_g = 9.4 %.

Hersteller der CFK-Lamelle mit der Bezeichnung HM 35 war die Akzo, Unternehmensbereich Fasern und Polymere, in Wuppertal (D). Die Lamelle wurde unter Druck und Temperatur im Autoklaven aus insgesamt neun UD-Prepreg Lagen der Einzeldicke 0.12 mm gefertigt und erhielt eine Blieder-Release-Oberflächenstruktur. Das verwendete Epoxidharz härtet bei Temperaturen von 130° C.

Die statische Berechnung des verstärkten Balkens erfolgte mit den folgenden, vom Hersteller angegebenen Werten: E-Modul der Lamelle E_{Lz} = 184'000 N/mm², Zugfestigkeit f_{cfkr} = 1'220 N/mm², Bruchdehnung ε_r = 0.65 %.

Als Haftkleber zum Aufkleben der CFK-Lamelle auf den Beton wurde ein Epoxidharz verwendet, das von CIBA-GEIGY AG in Wehr (D) hergestellt worden war und die Bezeichnung XB 3074 A (Harzkomponente) bzw. XB 3074 B (Härterkomponente) trug. Die an Probeprismen (40x40x160 mm) gemessenen Druckfestigkeiten betrugen im Alter von 7 Tagen f_{ew} = 84.1 N/mm², die Biegezugfestigkeit f_{ebt} = 33.4 N/mm².

Vor dem Aufkleben der CFK-Lamelle wurde der Beton auf der Unterseite des Steges sorgfältig mit einer Nadelpistole aufgerauht und nachher entstaubt, so dass eine innige Verbindung des Klebers mit dem Korngerüst des Betons gewährleistet war. Auch die Lamellenoberfläche wurde mit Schmirgeltuch aufgerauht und unmittelbar vor dem Verkleben mit einem Lösungsmittel entfettet, um auch hier eine gute Haftung mit den Fasern zu erhalten.

Das Aufkleben erfolgte in der von Stahlverklebungen her gewohnten Art und Weise, indem der Kleber auf die Lamelle aufgebracht wurde; dabei lag die Lamelle auf einem Holzbrett. Zusammen mit diesem wurde sie anschliessend von unten her gegen die rauhe Betonfläche gepresst, so dass ein sich auf der frischen Kleberoberfläche im Luftkontakt gebildeter "Film" beim Anpressvorgang unweigerlich aufgerissen werden musste. Damit war ein guter Verbund mit dem Beton gewährleistet.

2.3. Sensor-Messtechnik

An die Überwachung und Kontrolle des Verformungsverhaltens von Tragwerken werden zunehmend höhere Anforderungen gestellt. Das in Zusammenarbeit der Firmen Strabag Bau-AG, Köln (D) sowie Felten und Guilleaume Energietechnik AG, Köln (D) entwickelte Überwachungssystem mit Hilfe von Lichtwellenleiter-(LWL)-Dehnungs-Sensoren [4] wurde während des Versuches für die Demonstration der Leistungsfähigkeit neuer und bewährter LWL unterschiedlicher Empfindlichkeit genutzt.

Die Sensoren wurden in Höhe der inneren Zugbewehrung des Balkens nach Einfräsen einer Nut und durch Kunstharzvermörtelung in den Stegflächen appliziert, nachdem sich dieser schon im Zustand II befand. So konnte die nachfolgende Rissbildung im Mörtel durch Messungen über den gesamten Versuchszeitraum verfolgt werden; es ist vorgesehen, die diesbezüglichen Ergebnisse noch zu veröffentlichen.

3. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

3.1. Rechnerische Werte

Im unverstärkten Zustand beträgt die rechnerische Bruchlast des Versuchsbalkens unter Berücksichtigung seiner Eigenlast F_{ro} = 236 kN. Wird angenommen, dass die Lamelle bis zum Erreichen ihrer Zugfestigkeit am Beton haften bleibt, dann ergibt sich eine theoretische Bruchlast von F_{rth} = 303 kN, so dass, wenn gegenüber Bruch mit einer Sicherheit von γ = 1.8 gerechnet wird, die Nutz- oder Gebrauchslast F_{adm} ungefähr zu 160 kN eingesetzt werden kann.

3.2. Versuchsablauf

Der Versuchsablauf gliederte sich in drei Phasen: Eine erste Phase betraf die Belastung des unverstärkten Balkens, um ihn in den gerissenen Zustand (Zustand II) überzuführen. Dabei wurde die mittlere Durchbiegung des Balkens erfasst (Fig. 2). In diesem Zustand erfolgte dann nach seiner vollständigen Entlastung das Aufkleben der CFK-Lamelle auf der Balkenunterseite.

Die nächste Phase umfasste sodann die Belastung im Bereich der Nutzlast. Hierzu wurden die beiden Einzelkräfte in Stufen von je 40 kN von F = 0 bis F = 160 kN erhöht. Dabei wurden in Balkenmitte und im Bereich der Lasteinleitungspunkte sowohl die Durchbiegungen als auch die Lamellendehnungen und die Betonstauchungen gemessen.

Nachdem die Nutzlast von F_{adm} = 160 kN je Lasteintragungspunkt erreicht worden war, wurde fünfmal auf eine Grundlast von F = 5 kN entlastet und wieder auf die

Nutzlast belastet, um so das Verhalten des Balkens im Gebrauchszustand verfolgen zu können; bei der letzten Entlastung und Wiederbelastung wurden deshalb sämtliche Verformungsmessungen sowohl bei Oberlast als auch bei F = 80 kN und F = 5 kN ausgeführt.

Die letzte Belastungsphase lag schliesslich im Bereich zwischen Nutz- und Bruchlast. Um auch hier die Verformungsmessungen korrekt ausführen zu können, wurde das Kriechen des Betons kompensiert, indem die Belastung für die Zeit der Messungen abgemindert wurde, so dass sich die Durchbiegung in Balkenmitte während der gesamten Messzeit nicht veränderte.

3.3. Verformungen

Die Fig. 2 und 3 zeigen als Beispiele der Verformungsmessungen den Verlauf der Durchbiegungen sowie die Lamellendehnung bzw. die Betonstauchung in Balkenmitte.

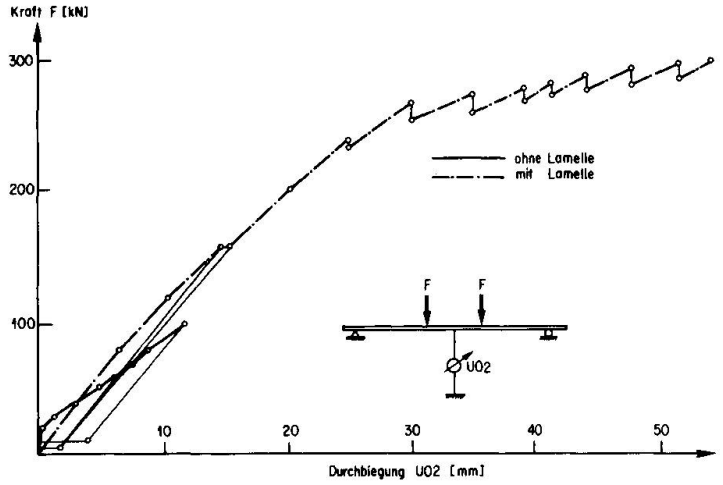


Fig. 2: Verlauf der Durchbiegung in Balkenmitte in Abhängigkeit der aufgebrachten Belastung F.

3.4. Bruchlast und Bruchart

Der Bruch trat bei einer Belastung von F_r = 302 kN je Lasteintragungspunkt auf und lag somit erstaunlich nahe beim im voraus berechneten Wert von F_{rth} = 303kN. Der Bruch selber erfolgte, indem sich die oberste Schicht der Lamelle vom übrigen Teil der Lamelle löste (Trennbruch innerhalb der Lamelle), nachdem vorgängig im Bereich der Lasteintragungspunkte einzelne CFK-Fasern gerissen waren (Zugbruch in den Fasern). Die gemessenen grössten Verformungen in Balkenmitte erreichten Werte von $\delta \approx 52$ mm für die Durchbiegung und $\varepsilon_c = -1.1$ °/oo für die Betonstauchung bzw. $\varepsilon_L = 5.7$ °/oo für die Lamellendehnung.

4. DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Bis zur Nutzlast von F = 160 kN konnte ein beinahe linear-elastisches Verformungsverhalten des Balkens festgestellt werden. Dabei war nur eine unbedeutende Zunahme der Biegesteifigkeit des verstärkten Balkens gegenüber dem unverstärkten, aber gerissenen Balken zu beobachten (vgl. Fig. 2).

Bei einer äusseren Belastung von $F_{By} \approx 240$ kN trat Fliessen der innen liegenden Stahlbewehrung auf, so dass diese bei der weiteren Laststeigerung keinen wesentlichen Beitrag zum Widerstand mehr leisten konnte; die festgestellte Belastungssteigerung bei zunehmenden Verformungen ist somit fast ausschliesslich auf das linear-elastische Verformungsverhalten der CFK-Lamelle bis zum Bruch zurückzuführen. Die Verformungen bildeten sich denn auch bei der Entlastung fast vollständig wieder zurück, wodurch sich dieser Balken gegenüber einem mit einer aufgeklebten Stahllamelle verstärkten wesentlich unterschied [5].

Damit konnte anhand eines ersten Versuchs an einem Bauteil mit wirklichkeitsnahen Abmessungen gezeigt werden, dass auch diese neuartige Technologie für Verstärkungen bestehender Bauwerke in Betracht gezogen werden kann, wobei allerdings dem gegenüber Stahl anderen Verformungsverhalten die notwendige Beachtung geschenkt werden muss. Bis zur Anwendungsreife in bestehenden Bauwerken sind die Bemessungs- und Ausführungsbedingungen in Theorie und Praxis jedoch noch sorgfältig abzusichern und weiter zu entwickeln. Hierbei ermöglichen die modernen Sensortechniken eine permanente Überwachung der Gebrauchstauglichkeit.

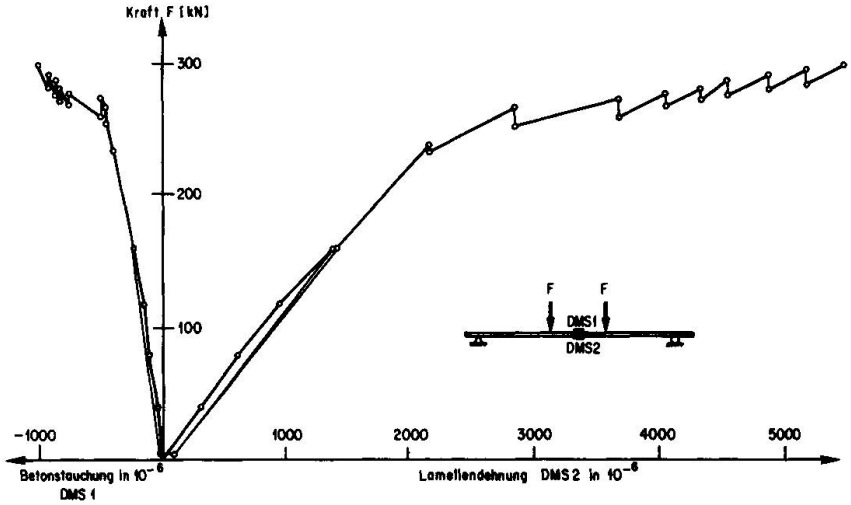


Fig. 3: Verlauf der Lamellendehnung bzw. der Betonstauchung in Balkenmitte in Abhängigkeit der aufgebrachten Belastung F.

6. LITERATUR

[1] L'HERMITE, R.; BRESSON, J.: "Béton armé d'armatures collées." Colloque RILEM "Recherches expérimentales sur les nouveaux développements apportés par les résines synthéthiques aux techniques de construction." Paris U.T.I. (1967) Vol. II.

[2] LADNER, M.; WEDER, C.: "Concrete Structures with Bonded External Reinforcement." EMPA Dübendorf (Switzerland) Report Nr. 206 (1981).

[3] KAISER, H.P.: "Verstärken von Stahlbetonbauteilen mit aufgeklebten CFK-Lamellen (Arbeitstitel)." Dissertation ETH (Zürich). In Vorbereitung.

[4] LEVACHER, K.; MIESSELER, H.-J.: "Spannkraftmessungen mit integrierten Lichtwellenleitersensoren." Bericht zum IABSE Kongress, Helsinki 1988, p.313/318.

[5] HOLTGREVE, K.: "Contribution in Regard to Behaviour of Reinforced Tee-Beams with Bonded Flat-steel Components Under Fatigue Loads." Adhesion Between Polymers and Concrete. Proc. Internat. Symposium ISAP '86, RILEM RAC 52, Aix-en-Provence 1986, p.528/533.