Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 123 (1997)
Heft: 6

Artikel: Des perfectionnements apportés aux lamelles en fibres de carbone
Autor: Scherer, Josef
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79108

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: 04.08.2025

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

Des perfectionnements apportés aux lamelles en fibres de carbone

Josef Scherer, ingénieur ETS/UTS, Scherer & Partner, systèmes de construction, Dammstrasse 2, 6440 Brunnen

Pour procéder après coup à un renforcement de structures porteuses, on utilisait jusqu'à maintenant – dans la plupart des cas – des lamelles synthétiques renforcées par des fibres de carbone présentant un module d'élasticité de 160 GPa (160 000 N/mm²)[1]. Comme des fibres de carbone à haut module d'élasticité sont extrêmement coûteuses, on a jusqu'ici utilisé ce type de lamelles uniquement dans des cas exceptionnels. Grâce à une technique de fabrication améliorée, il est depuis peu possible d'ajuster le module d'élasticité de lamelles en fibres de carbone en fonction des besoins effectifs.

La combinaison optimale de fibres de carbone présentant des modules d'élasticité différents améliore considérablement le rapport qualité/prix de lamelles en fibres de carbone. En 1996, on a renforcé en Suisse plus de vingt ouvrages en béton armé avec des lamelles en fibres de carbone hybrides ayant fait l'objet de nouveaux perfectionnements. Grâce à la technique des fibres hybrides, il est désormais possible de proposer des lamelles avec module d'élasticité de 160 GPa à un prix sensiblement plus avantageux. Il en résulte que le renforcement ultérieur d'un ouvrage avec des lamelles en fibres de carbone est devenu une alternative financièrement intéressante. Nous présentons ci-après ces nouvelles fibres de carbone hybrides.

[1] Sur les principes de base régissant ce type d'intervention, voir l'article de J.-D. Berset dans *IAS* N° 20/1996 : « Renforcement de structures – Collage de lamelles en fibres de carbone ».

Lamelles en fibres de carbone conventionnelles 160 GPa

Les lamelles en fibres de carbone sont produites selon la technique de l'extrusion. Les fibres de carbone sont imprégnées en continu de résine époxy et durcies sous l'action de la chaleur. Techniquement, les lamelles peuvent comporter une proportion maximale de fibres de 70 % environ. A partir des caractéristiques des fibres et de la matrice, il est possible de déterminer théoriquement les constantes d'élasticité d'une couche unidirectionnelle (lamelle en fibres de carbone). Comme le module d'élasticité et la résistance à la traction de la matrice sont négligeables pour le calcul de la lamelle, le module d'élasticité et la résistance à la traction se chiffrent approximativement à 70 % de la valeur des fibres de carbone. Des séries d'essais réalisées par le LFEM/EMPA de Dübendorf et le TGM de Vienne révèlent qu'une proportion de fibres de 70 % dans les lamelles permet normalement d'atteindre un module d'élasticité de 160 GPa. La résistance à la traction varie en fonction des fibres de carbone utilisées, respectivement en fonction de leur résistance à la traction (fig. 1).

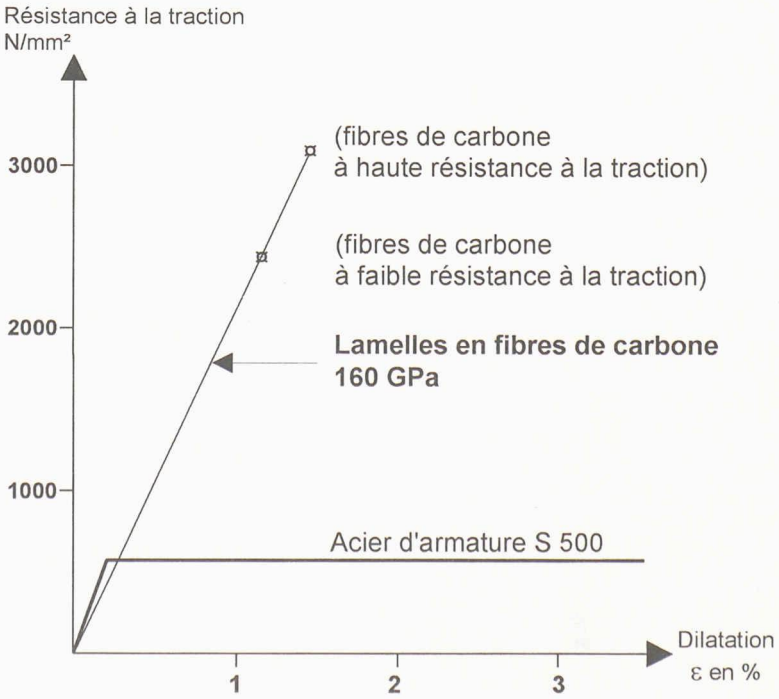

Fig. 1.- Diagramme idéalisé de tension et de dilatation pour lamelle en fibres de carbone avec 160 GPa

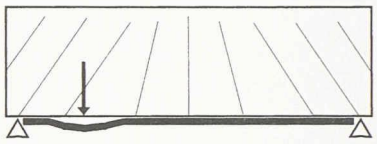

Fig. 2.- Décollement de la lamelle par suite de déport et de fissuration de cisaillement

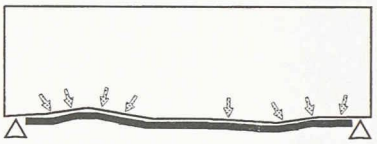

Fig. 3.- Arrachement de la lamelle sous l'action d'efforts de renvoi

Pour le calcul, la résistance à la traction est habituellement diminuée de 20 %. Des lamelles en fibres de carbone à haute résistance à la traction peuvent rarement être utilisées dans la pratique, car le décollement des lamelles par suite de déport et de fissuration de cisaillement (fig. 2) est normalement déterminant pour le calcul de lamelles en fibres de carbone.

Des lamelles en fibres de carbone à haute résistance mathématique à la traction peuvent induire le spécialiste en statique à réaliser de mauvais dimensionnements. C'est la raison pour laquelle les fournisseurs de lamelles proposent des produits à plus faible résistance

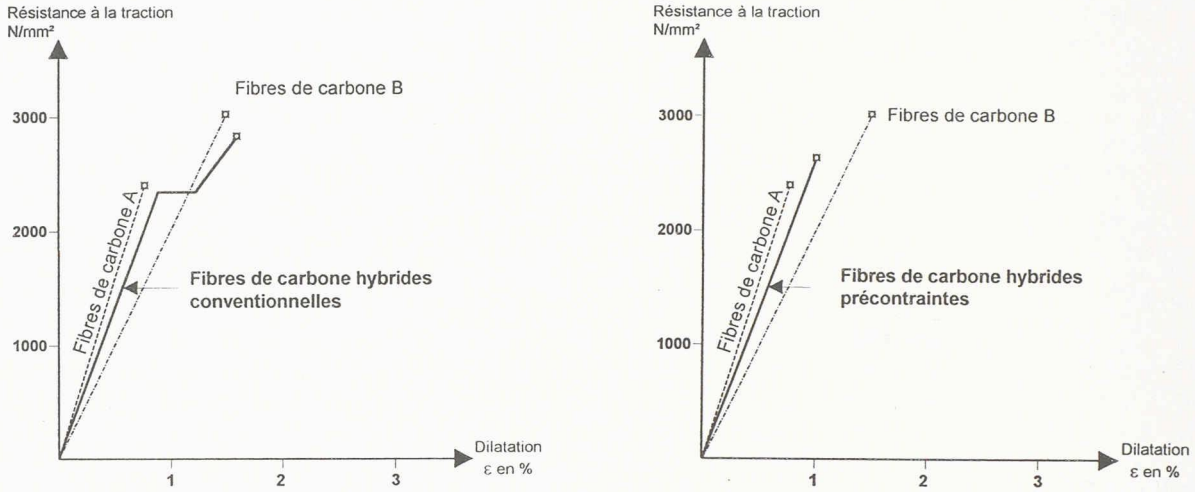

Fig. 4.- Diagrammes idéalisés de tension et de dilatation pour fibres de carbone hybrides. À gauche: fibres hybrides conventionnelles. À droite: nouvelles fibres hybrides précontraintes

mathématique à la traction, mais de plus forte épaisseur. En majorant l'épaisseur des lamelles, leur force de traction reste identique. Avec des lamelles plus épaisses, le collage dans l'axe de traction principal de la lamelle est en outre mieux garanti. Le risque d'arrachement de la lamelle sous l'action d'efforts de renvoi est ainsi amenuisé (fig. 3).

Fibres de carbone hybrides

Pour produire des fibres de carbone hybrides, on utilise différentes fibres de carbone présentant différents modules d'élasticité et différentes résistances à la traction. Normalement, le module d'élasticité d'une lamelle en fibres de carbone hybrides n'est pas linéaire. Les fibres à haut module d'élasticité et faible allongement à la rupture se rompent plus tôt que des fibres à faible module d'élasticité (fig. 4).

Avec la technique des fibres hybrides nouvellement mise au point, les fibres de carbone à faible module d'élasticité sont précontraintes à l'aide de freins au moment de leur extrusion, les freins étant réglés de telle sorte que l'allongement à la rupture soit identique pour toutes les fibres de départ utilisées. La mise au point de ces nouvelles fibres de carbone hybrides a fait apparaître différents problèmes. Si la force de précontrainte nécessaire est par exemple trop élevée, les fibres de carbone hybrides se replient sur elles-mêmes parallèlement à l'axe des fibres. Il convient donc d'assortir les fibres de départ entre elles en fonction de leur module d'élasticité, de leur emplacement, de leur disposition et de la force de précontrainte appliquée. Depuis cette année, on produit avec succès des lamelles selon la nouvelle technique des fibres hybrides après avoir procédé à tous les essais nécessaires. L'image de la rupture obtenue dans le cadre d'un essai de traction fait clairement apparaître si la lamelle appartient à la catégorie des fibres hybrides ou des fibres uniformes conventionnelles (fig. 5).

Le TGM de Vienne et le LFEM de Dübendorf ont attesté les valeurs d'essai suivantes pour la lamelle en fibres de carbone hybrides avec

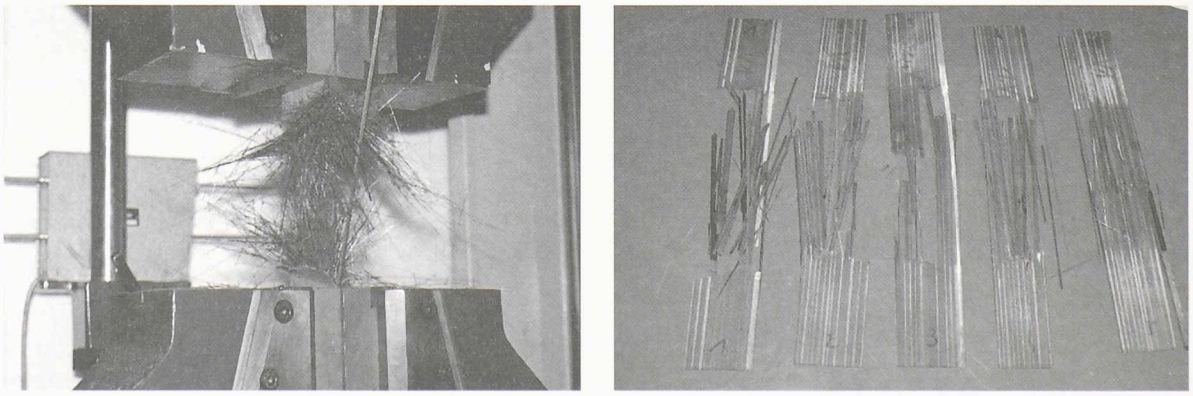

Fig. 5.- Formation de fissures en cas de traction défaillante. À gauche: des lamelles à fibres uniformes se rompent comme des fibres individuelles. À droite: des fibres hybrides précontraintes se rompent comme des faisceaux fibreux.

module d'élasticité équivalent à celui de l'acier:

Module d'élasticité des fibres de carbone hybrides
210-230 GPa
Résistance à la traction
2400-2500 N/mm²
Résistance mathématique à la traction
2000 N/mm²

Lamelles en fibres de carbone en comparaison

La figure 6 établit une comparaison de la dilatation déterminante pour l'utilisation mathématique de différents types de lamelles en fibres de carbone. La dilatation déterminante des nouvelles lamelles en fibres hybrides avec module d'élasticité équivalent à celui de l'acier est de 25 % plus fiable que la dilatation de lamelles conventionnelles 160 GPa avec haute exploitation de la résistance à la traction. L'aptitude fonctionnelle de l'élément porteur renforcé est améliorée grâce à la dilatation réduite des lamelles. La largeur des fissures et la flexion sont réduites. Aujourd'hui, on trouve différents types de lamelles avec différentes valeurs caractéristiques. La force de traction des lamelles est le critère de comparaison déterminant. Des lamelles de même largeur et de même force de traction nécessitent une longueur d'ancrage identique. Si, pour une largeur identique des lamelles, la force de traction de celles-ci est majorée, il est nécessaire de prévoir une longueur d'ancrage correspondante plus importante. L'ingénieur planificateur doit tenir compte de ces circonstances pour réaliser sa calculation et établir sa soumission (fig. 6).

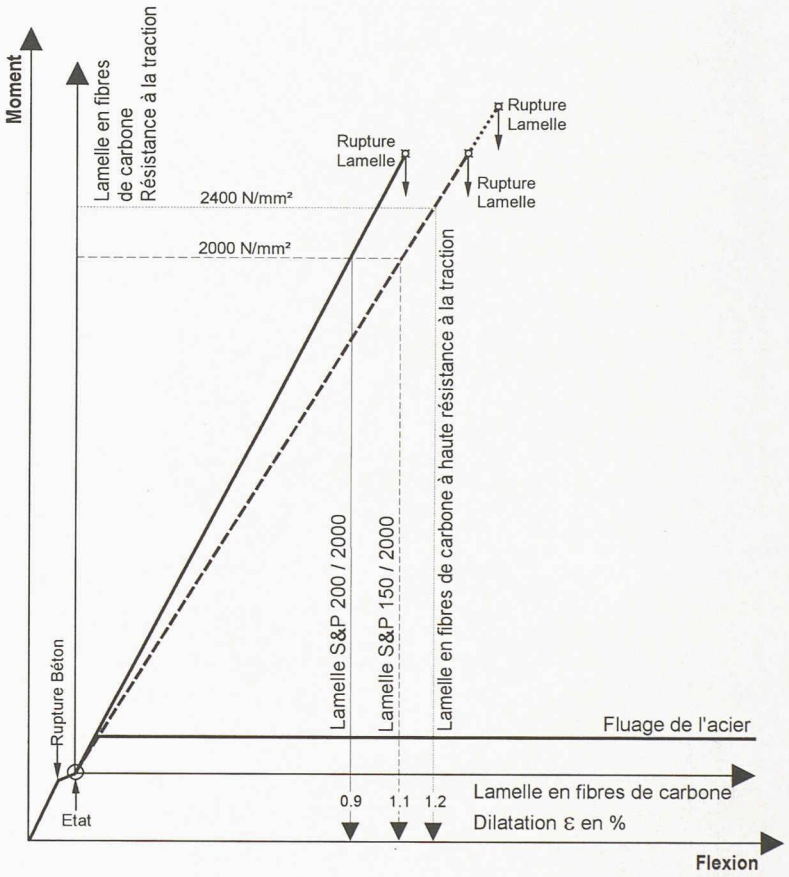

Fig. 6.- Influence d'un renforcement ultérieur par des lamelles en fibres de carbone sur la flexion d'un élément de construction

Pour terminer et en prenant pour exemple des lamelles en fibres de carbone de 100 mm de largeur, nous dressons la liste de tous les produits disponibles sur le marché et nous les comparons (fig. 7). Tous les produits comparés sont certifiés ISO 9001 et ont été testés avec les colles à deux composants à base de résine époxy correspondantes.

Des armatures collées en lamelles de fibres de carbone se prêtent à différentes possibilités d'utilisation. La dilatation des lamelles et donc la déformation de l'ouvrage sont cependant plus importantes qu'en cas de renforcement ultérieur avec des lamelles d'acier. Il faut en outre tenir compte du fait que des éléments de construction renforcés par des lamelles en fibres de carbone ne se prêtent plus à une déformation plastique (fig. 8).

Type	Module d'élasticité [GPa]	Epaisseur [mm]	Résistance à la traction [N/mm²]	Résistance à la traction pour le calcul [N/mm²]	Force de traction de la lamelle [N]	Dilatation pour force de traction mathématique [%]
1	160-170	1.2	~ 3000	2400	280 x 10³	1.2
2	160-170	1.4	~ 3000	2400	336 x 10³	1.2
3	160-170	1.2	~ 2500	2000	240 x 10³	1.1
4	160-170	1.4	~ 2500	2000	280 x 10³	1.1
5	210-230	1.4	~ 2500	2000	280 x 10³	0.9

Fig. 7.- Lamelles de fibres de carbone livrables en 100 mm de largeur

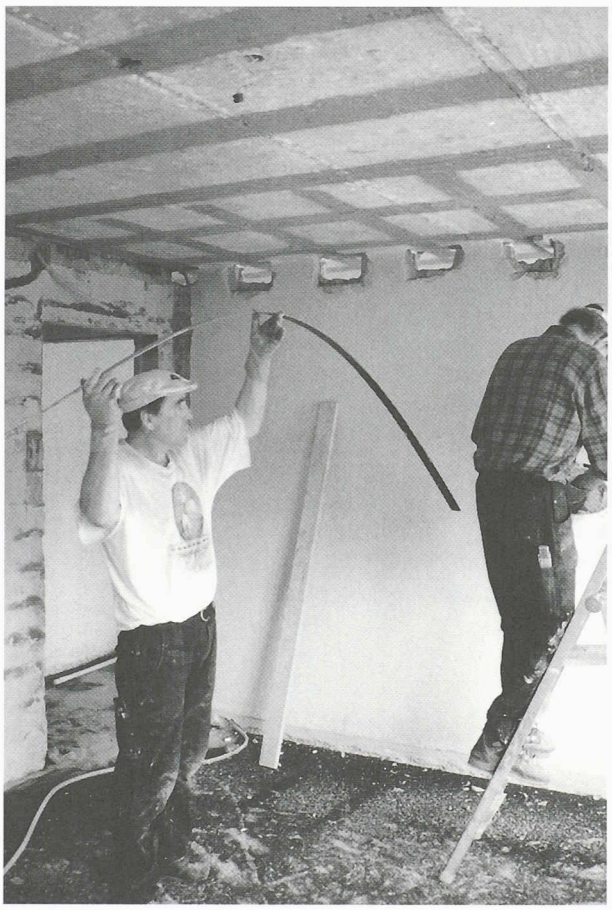

Fig. 8.- Montage de lamelles en fibres de carbone

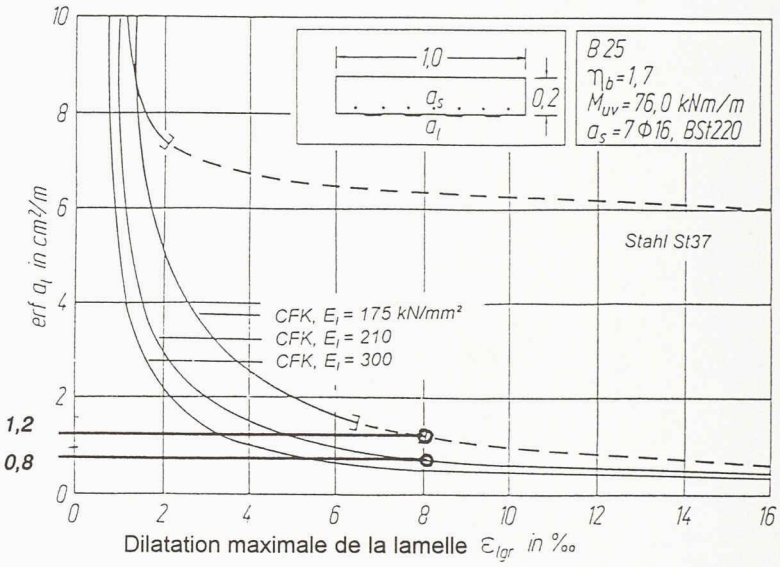

Fig. 9.- Section nécessaire de la lamelle en fonction de sa dilatation maximale

La dilatation maximale admissible de la lamelle en fibres de carbone est déterminante en ce qui concerne son utilisation et donc sa rentabilité.

Dilatation maximale des lamelles en fibres de carbone

La figure 9 présente de manière exemplaire, pour une bande sélectionnée avec moment de rupture prédéfini, la section nécessaire de la lamelle en fonction de sa dilatation maximale. Lorsque la dilatation maximale croît, la section nécessaire de la lamelle diminue fortement. Un module d'élasticité élevé de la lamelle entraîne une économie supplémentaire sur sa section. Pour comparaison, l'illustration présente la section nécessaire pour une lamelle en acier de type couramment commercialisé. Après dépassement de la limite d'allongement, il y a influence de la dilatation maximale uniquement par accroissement de la hauteur statique utile consécutivement à une meilleure exploitation de la zone de compression du béton.

Ces dilatations maximales élevées des lamelles en fibres de carbone peuvent rarement se réaliser sur un élément de construction sans que la lamelle se dissocie de son support. Des essais effectués par l'Université technique de Braunschweig ont révélé que le début et la poursuite de la dilatation de la lamelle par rapport à son support dépendent aussi bien de la dilatation élastique de la lamelle que de la dilatation plastique de l'acier (fig. 10). Pour une armature intérieure, de premiers décollements se sont manifestés pour une dilatation de la lamelle d'environ 0,65 % correspondant à une dilatation maximale de l'armature in-

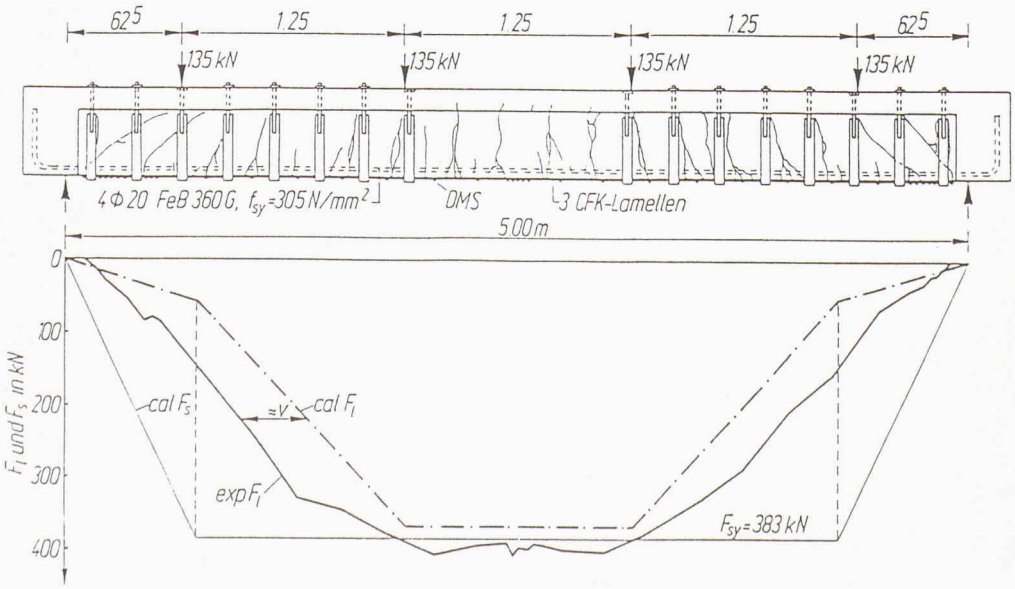

Fig. 10.- Essai sur poutre (efforts de traction mesurés et calculés pour état de rupture)

térieure de 5,7 fois. Au moment de la défaillance de l'élément de construction, la dilatation de la lamelle était d'environ 1,3 %.
Jusqu'à ce que nous disposions de connaissances plus approfondies, il a donc fallu limiter la dilatation maximale de l'armature intérieure à 0,8 %, ce qui équivaut à un facteur 6.
Pour la bande sélectionnée, nous obtenons pour une dilatation maximale de 0,8 % la section de lamelle nécessaire suivante:
lamelle 175 Gpa: 1,2 cm²/m;
lamelle 210 Gpa: 0,8 cm²/m.
Dans l'exemple choisi, l'exploitation de la lamelle en fibres de carbone à haut module peut être améliorée de plus de 50 %.
Pour la bande sélectionnée, on peut procéder à une comparaison coût/usage pour une lamelle en fibres de carbone 100/1.4 avec des prix indicatifs ordinairement appliqués dans la pratique (tableau).

Lamelles Module d'élasticité	Prix indicatif lamelle	Prix indicatif collage	Besoins en lamelles	Comparaison coût/usage	**Economie**
165 GPa	40.– DM/m	60.– DM/m	150 %	150.– DM	-
210 GPa	75.– DM/m	60.– DM/m	100 %	135.– DM	**./. 10%**

L'exemple fait typiquement ressortir que l'utilisation de lamelles en fibres de carbone à haut module (210 GPa) est économiquement intéressante malgré un prix plus élevé du matériel.

Bibliographie

HANKERS, CH.: « Verstärken von Tragwerken mit CFK Lamellen », TFB Kurs 965700

ROSTASY, F.S., RANISCH E.-H.: « Sanierung von Betontragwerken durch Aufkleben von Faserverbundwerkstoffen », Forsch.-Bericht IBMB, TU Braunschweig, 1984

KAISER, H.: « Bewehren von Stahlbeton mit kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzen », Diss. EPFZ, Zurich, 1989

HANKERS, CH.: « Zum Verbundtragverhalten laschenverstärkter Betonbauteile unter nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung », Diss. TU Braunschweig, 1996

Rapports d'essais:
- TGM Wien, K 16554
- EMPA Dübendorf CH, 163911/163537