

**Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und
Kommunikation (UVEK)
Bundesamt für Strassen (ASTRA)**

Résumé

Renforcement de piles de ponts contre l'impact de véhicules lourds

Verstärkung von Brückenpfeilern gegen den Aufprall von Lastfahrzeugen

Reinforcement of bridge piers to resist vehicle impact

Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg

R. Suter, ing. civil, dipl. ETH, Dr.sc.techn.

F. Conus, ing. civil dipl.HES, M.sc.A.

**Mandat de recherche ABG 2001/090 (90/01) effectué à la demande du
Groupe de travail Recherche en matière de ponts**

Septembre 2005

Résumé

Essais sur des colonnes en béton renforcées par des tissus en aramide (Kevlar®)

Durant les dernières décennies, le trafic de marchandises a fortement augmenté sur les autoroutes. Cette augmentation, qui se traduit par des véhicules plus lourds roulant à des vitesses élevées, accentue le danger d'accidents et, en particulier, le risque d'impact contre les piles de ponts situées à proximité des voies de roulement.

Suite à l'éroulement accidentel de plusieurs piles dans certains pays européens, les instances concernées ont procédé à l'analyse de la résistance à l'impact de toutes les piles en bordure des autoroutes. Il en résulte qu'un grand nombre de piles, dimensionnées selon d'anciennes normes, ne supporteraient pas l'impact d'un véhicule lourd défini par les normes en vigueur. Il parut donc nécessaire d'analyser plus en détail l'intensité d'un choc produit par un véhicule lourd, d'une part, et la résistance d'une pile en béton armé envers un tel choc, d'autre part. En outre, il s'agit de procéder au redimensionnement de ces piles et, le cas échéant, à l'évaluation des possibilités de renforcement.

Outre les techniques de renforcement conventionnelles on dispose, depuis quelques années, de nouvelles techniques qui font appel à des matériaux composites de hautes performances. L'augmentation de la résistance aux chocs peut en effet se réaliser par un confinement des éléments en béton au moyen de tissus en fibres synthétiques (verre, carbone ou aramide).

En ce qui concerne le choix du matériau de confinement, des essais de compression sur plus que cent éléments de colonnes rondes et carrées ont mis en évidence que la fibre d'aramide, un polymère très résistant et tenace, constitue le matériau adéquat pour des renforcements contre des sollicitations d'impact. Pour absorber l'énergie cinétique d'un choc, la fibre d'aramide est en effet mieux adaptée que la fibre de carbone, une céramique très résistante mais avec une rupture nettement plus fragile. Les fibres de verre n'ont pas donné de résultats satisfaisants, principalement en raison de leur module d'élasticité trop faible.

Le but de cette étude consiste à déterminer l'augmentation de la capacité portante et de la déformabilité de colonnes renforcées, en fonction du nombre et de la qualité des couches de tissus appliquées. Ceci permet d'évaluer la capacité d'une colonne à absorber l'énergie produite par l'impact d'un véhicule lourd.

Dans une première série, des essais de flexion sont effectués sur quatre colonnes en béton armé de 5.20 m de longueur, dont trois sont renforcées par deux, trois et quatre couches longitudinales de tissus en aramide (Kevlar®). Les résultats ont mis en évidence une importante augmentation de la résistance à la flexion et de la déformabilité des colonnes renforcées. La résistance à la flexion et la déformabilité déterminent en effet la faculté d'absorption de l'énergie cinétique et, de ce fait, l'augmentation de la résistance aux chocs.

Dans une deuxième série, des essais sont effectués sur quatre éléments de colonnes plus courtes afin de déterminer la résistance à l'effort tranchant (cisaillement). On a pu constater que la résistance au cisaillement d'une colonne renforcée par des tissus en aramide dans la direction transversale augmente dans une proportion encore plus forte que la résistance à la flexion. Malgré une disposition des charges défavorable au cisaillement, une rupture à l'effort tranchant n'a pu être atteinte pour les colonnes renforcées.

Enfin, dans une troisième série, des essais de compression centrée sont réalisés sur deux éléments de colonnes, l'une de référence et l'autre renforcée par deux couches de tissus dans les directions longitudinale et transversale. Dans ce cas, l'apport du renforcement est plus faible, en raison notamment de la section carrée des colonnes. Les résultats des essais correspondent néanmoins bien à ceux de la précédente étude menée sur une centaine de colonnes de dimensions plus petites.

L'utilisation de tissus en aramide pour le renforcement de piles de ponts présente les avantages suivants :

- le système de renforcement est léger et ne demande que peu de moyens, tant au niveau des matériaux qu'au niveau du personnel ; il est donc moins coûteux qu'un renforcement traditionnel par augmentation de la section de béton ou d'acier ;
- le degré de renforcement à la flexion et à l'effort tranchant est important; la faculté d'absorption de l'énergie cinétique et, de ce fait, la résistance aux chocs est augmentée d'un facteur de 2 à 4 en fonction du nombre de couches de tissus appliquées ;
- l'application des tissus est très rapide; la mise en place des différentes couches de tissus en aramide dans les directions longitudinale et transversale n'a duré qu'une journée. On peut donc admettre que le confinement d'une colonne en béton par des tissus de hautes performances puisse se réaliser en une ou deux journées voire nuits.

Le nombre restreint d'essais effectués ne permet pas d'établir des directives générales sur le dimensionnement de colonnes renforcées par des tissus en aramide. Nous avons néanmoins présenté, aux chapitres 6 et 7 de ce rapport, quelques recommandations pour le dimensionnement des éléments renforcés.

En conclusion on peut donc affirmer que le renforcement de piles de ponts par des tissus collés en aramide dans les directions longitudinale et transversale constitue une méthode de renforcement très prometteuse. Elle s'avère techniquement et économiquement intéressante également en raison de la rapidité d'intervention qui nécessite un délai de fermeture minimal des voies de circulation.

Des études complémentaires sont encore nécessaires afin de confirmer les règles de dimensionnement proposées. De telles études devraient inclure un projet de renforcement pilote sur des piles d'un pont existant afin de pouvoir se rendre compte des problèmes demeurant aux niveaux du dimensionnement et de l'exécution. Notons encore que des applications potentielles de tissus collés en aramide se situent également dans d'autres domaines, où les déformations imposées nécessitent une absorption conséquente de l'énergie cinétique tels les protections contre les séismes, les avalanches ou les chutes de roches

Zusammenfassung

Versuche an Stahlbeton-Stützen verstärkt durch Gelege aus Aramid (Kevlar®)

Der starke Zuwachs des Güterverkehrs auf Autobahnen und die erhöhte Geschwindigkeit der schweren Lastfahrzeuge führen zu einem grösseren Risiko von Aufprallunfällen gegen Brückenpfeiler, die sich in unmittelbarer Nähe der Fahrbahn befinden.

Nach dem Einsturz mehrerer Brückenpfeiler in verschiedenen Ländern Europas haben die betroffenen Behörden eine Nachrechnung des Widerstands dieser Pfeiler gegen Aufprall angeordnet. Es stellte sich heraus, dass eine grosse Anzahl von Pfeilern, die nach älteren Normen bemessen waren, der Beanspruchung nicht standhalten, wie sie in den derzeit gültigen Normen vorgeschrieben sind. Es wird geschätzt, dass mehrere hundert Brückenpfeiler keinen ausreichenden Widerstand gegen den Aufprall eines schweren Lastfahrzeugs aufweisen. Vor dieser Feststellung gilt es einerseits, die Intensität des Aufpralls eines Lastfahrzeugs und, andererseits, den Widerstand eines Stahlbetonpfeilers gegenüber eines solchen Aufpralls zu analysieren. In der Folge müssen die Pfeiler neu bemessen und mögliche Verstärkungsmethoden beurteilt werden.

Neben den konventionellen Methoden stehen seit einigen Jahren neue Verstärkungsmethoden zur Verfügung, die auf hochfeste Faserverbund-Werkstoffe zurückgreifen. Die Erhöhung des Aufprallwiderstands wird hier durch die Umschnürung der Pfeiler mittels Gelege aus hochfesten Fasern (Glas, Kohlenstoff, Aramid) erzielt.

Was die Auswahl der Faserverbund-Werkstoffe anbelangt, sind an der Hochschule für Technik und Architektur, Freiburg (HTA-FR) im Rahmen eines früheren Forschungsprojekts zahlreiche Vergleichsuntersuchungen durchgeführt worden. Durch Druckversuche an über hundert runden und quadratischen Stützelementen konnte nachgewiesen werden, dass die Aramidfaser, eine hochfeste und sehr zähe Polymerfaser, einen adäquaten Werkstoff für Verstärkungen gegen Aufprall darstellt. Zur Aufnahme der kinetischen Energie ist die Aramidfaser besser geeignet als die Kohlenstofffaser, eine hochfeste Keramikfaser mit einem hohen Elastizitätsmodul und einem deutlich spröderen Bruch. Die Glasfasern haben aufgrund des zu geringen Elastizitätsmoduls keine zufrieden stellenden Ergebnisse geliefert.

Um diese neuen Verstärkungstechniken beurteilen zu können, wurden experimentelle Untersuchungen an quadratischen Stahlbetonstützen in Angriff genommen. Diese Stützen mit einer Länge von 5.20 m sind durch Gelege aus Aramid (Kevlar®) in Längs- und Querrichtung verstärkt. Das Ziel der Untersuchungen besteht darin, die Erhöhung des Tragwiderstands und der Verformbarkeit der verstärkten Stützen in Abhängigkeit der applizierten Aramidlagen zu bestimmen. Diese beiden Eigenschaften, der Tragwiderstand und die Verformbarkeit, erlauben eine Beurteilung des verstärkten Brückenpfeilers, die kinetische Energie des Aufpralls zu absorbieren.

In einer ersten Versuchsserie wurden Biegeversuche an vier Stahlbetonstützen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten eine beeindruckende Steigerung des Biegewiderstands und der Verformbarkeit der mit Aramid-Gelegen verstärkten Stützen. Dies erlaubt, kinetische Energie zu absorbieren und hierdurch den Widerstand gegen Aufprall zu erhöhen.

In einer zweiten Serie wurden Querkraftversuche an vier kürzeren Stützelementen zur Bestimmung des Schubwiderstands durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche zeigten, dass der Schubwiderstand einer verstärkten Stütze noch stärker ansteigt als der Biegewiderstand. Es konnte für die verstärkten Stützen trotz einer entsprechenden Lastanordnung kein Schubbruch erzielt werden.

In einer dritten Versuchsserie wurden Druckversuche an zwei kürzeren Stützelementen durchgeführt. In diesem Fall erhöhte sich der Druckwiderstand weniger stark als die Biege- und Schubwiderstände. Dies ist zurückzuführen auf den quadratischen Querschnitt, für den Umschnürungen wesentlich weniger effizient sind als für einen Kreisquerschnitt. Die Versuchsergebnisse entsprechen jedoch den an kleinen Stützelementen beobachteten Werten.

Die Verstärkung von Brückenpfeilern durch geklebte Gelege aus Aramid zeigt folgende Vorteile auf :

- die Verstärkungsmethode ist leicht und verlangt relativ geringe Mittel an Material und Personal; sie ist deshalb günstiger im Vergleich zu den konventionellen Methoden;
- die Erhöhung des Biege- und Schubwiderstands und der Verformbarkeit ist erheblich; das Aufnahmevermögen der kinetischen Energie, und damit der Widerstand gegen einen Aufprall, wurde um einen Faktor 2 bis 4 erhöht, je nach Anzahl der applizierten Aramid-Gelege;
- das Aufbringen der Aramid-Gelege nimmt wenig Zeit in Anspruch; der Einbau einer vollständigen Stützenverstärkung konnte innerhalb eines Tages abgeschlossen werden.

Die beschränkte Anzahl der Versuche erlaubt es nicht, allgemein gültige Bemessungsmethoden für Stützenverstärkungen zu erstellen. Wir haben jedoch versucht, in den Abschnitten 6 und 7, einige Richtlinien für die Bemessung der verstärkten Stützenquerschnitte auszuarbeiten.

Aufgrund der an der HTA Freiburg durchgeführten Untersuchungen kann somit festgestellt werden, dass die Umschnürung von Brückenpfeilern durch geklebte Gelege aus Faserverbund-Werkstoffen eine viel versprechende Verstärkungsmethode darstellt. Sie erweist sich zudem als wirtschaftlich sehr interessant, da sie infolge der kurzen Einbauzeit eine minimale Sperrdauer der Fahrspuren erfordert.

Weitere Untersuchungen sind jedoch notwendig, um die vorgeschlagenen Bemessungsrichtlinien zu bestätigen. Es wäre auch wünschenswert, eine Stützenverstärkung an einer bestehenden Brücke als Pilotprojekt durchzuführen, um eventuell auftretende Probleme bezüglich Bemessung oder Ausführung zu erkennen. Des Weiteren sei noch erwähnt, dass die vorgeschlagenen Verstärkungsmethoden auch für andere Bereiche, in denen aufgezwungene Verformungen eine Aufnahme der kinetischen Energie erfordern, von Interesse sein könnten. Es sind dies insbesondere nachträgliche Verstärkungen gegen Erdbebeneinwirkungen, Lawinenverbauungen oder Schutzbauten gegen Stein- und Felschlag

Summary

Tests on large concrete columns strengthened by aramid sheets (Kevlar[®])

During the last few decades, freight traffic has increased significantly on highways. This increase is reflected by heavier vehicles running at higher speeds, an increased accident probability and, in particular, an increased risk of impact against bridge piers situated close to driving lanes.

After the accidental collapse of several bridge piers in European countries, the highway agencies proceeded with an analysis of the impact resistance of these piers. This study showed that a large number of piers designed under old standards did not withstand the impact forces defined by current standards. Therefore it seemed necessary on one hand to define the intensity of an impact produced by a heavy vehicle, and on the other hand, to define the resistance of a concrete pier under such an impact. Besides, the different opportunities for reinforcement, conventional solutions and new techniques, must be evaluated.

Since a few years new techniques based on the use of very high performance composite materials have been developed. With these techniques an increasing of the impact resistance can now be achieved by a confinement of the piers with synthetic fibre sheets (glass fibre, carbon, aramid).

Regarding the choice of confining material, a comparative study has been carried out by the University of Applied Sciences Fribourg (UAS-FR). Compression tests made on approximately hundred column elements, with square and circular cross sections, showed that aramid fibre, an extremely strong and durable polymer, was the material best suited for reinforcement against impact loads. To absorb the kinetic energy of an impact, aramid fibre is effectively superior to carbon fibre, a very strong ceramic with much more brittle rupture characteristics. Glass fibres did not give satisfactory results, mainly because their modulus of elasticity was found to be too weak.

In order to analyse these new reinforcing techniques in more details, UAS-FR undertook an experimental study on concrete columns with square cross sections. These columns were reinforced with aramid (Kevlar[®]) sheets, applied in different layers in the longitudinal and transverse directions. The goal of the study was to determine the load capacity and the deformability of the reinforced columns, as a function of the layers applied. These two characteristics, the load capacity and the deformability, effectively permit an evaluation of the ability of the bridge pier to absorb the kinetic energy produced by the impact of a heavy vehicle travelling at high speed.

In a first stage, bending tests were conducted on four concrete columns, 5.20 m in length, reinforced with aramid sheets in the longitudinal and transverse directions. The results showed an impressive increase of bending resistance and deformability of the reinforced columns. These two characteristics allows to determine the ability of the column to absorb kinetic energy and, in this case, the resistance to impacts due to heavy vehicles.

In a second stage, tests were carried out on four shorter column elements to determine their resistance to shear forces. The results of the tests showed that the column's shear resistance reinforced by aramid sheets in the transverse direction, increases even more than the bending resistance.

In a third stage, compression tests were conducted on two shorter column elements to determine the increase of normal forces due to the reinforcement by aramid sheets in the transverse direction. The results of these tests showed that the increase of compression resistance is reduced due to the square cross section of the columns. The test results correspond nevertheless with those obtained in the preliminary study on column elements with square and circular cross sections.

The use of high performance composite materials for the reinforcement of bridge piers presents several advantages:

- the reinforcing system is light and requires few material and workers; it is therefore less expensive than conventional solutions;
- the test results showed an impressive increase of the resistance to bending and shear forces of the reinforced columns; the ability to absorb kinetic energy and, in this case, to resist impacts by heavy vehicles, was increased by a factor of 2 to 4, depending on the number of reinforcing layers applied;
- the reinforcement of piers by bonded sheets requires a much shorter execution time than required by traditional techniques.

With the few tests carried out, we cannot establish general rules on the aramid reinforcement of columns. Nevertheless we have given some advices for the design of these reinforced elements in chapters 6 and 7.

Finally, we can affirm that reinforcing bridge piers with aramid sheets in the transversal and longitudinal directions constitutes a very promising method. It also proves technically and economically interesting because of their rapid application, which requires closing of lanes for only short times.

Complementary studies are needed to confirm the proposed design standards. These studies may include a reinforcement pilot project on an existing bridge pier in order to evaluate possible problems in design or execution of the new reinforcement technique. Potential applications can be found where imposed deformation needs to absorb kinetic energy for example, seismic protection design, avalanches or falling rocks