

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

## **Zusammenfassung**

# **Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Strassenbrücken**

## **Vorfabrizierte Spannbetontträger als einfache Balken**

**Evaluation de la sécurité structurale des ponts-routes existants  
Poutres simples préfabriquées en béton précontraint**

**Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich  
Institut für Baustatik und Konstruktion**

**Dr. D. Zwicky**

**Prof. T. Vogel**

**Forschungsauftrag AGB 1999/163 (93/99) auf Antrag der Arbeitsgruppe  
Brückenforschung (AGB)**

**März 2003**

## Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht leistet einen Beitrag zur Anwendung verfeinerter Untersuchungen auf der Basis der Plastizitätstheorie in der rechnerischen Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Betontragwerke. Er soll ein Leitfaden sein für die rechnerische Überprüfung, insbesondere von zusammengesetzten Brücken unter besonderer Berücksichtigung kleiner Lagerüberstände und hoher Vorspanngrade. Die Überlegungen werden hauptsächlich auf im Spannbett vorgefabrizierte und zusätzlich nachträglich mit Spanngliedern vorgespannte einfache Balken mit T-Querschnitt angewendet. Vereinzelt werden auch Hinweise zu Durchlaufträgern gegeben.

Die Arbeit beschränkt sich auf die deterministische Beurteilung der Tragsicherheit stark vorgespannter, minimal verbügelter Betonbalken konstanter Bauhöhe. Unter minimal verbügelt Bauteilen werden Tragelemente verstanden, die aufgrund der bei der Bemessung verwendeten Norm lediglich eine konstruktive Bügelbewehrung enthalten. Als stark vorgespannte Bauteile werden solche aufgefasst, die als Längsbewehrung im wesentlichen Spannbewehrung und daher entsprechend hohe Vorspanngrade aufweisen. Die angewandten Methoden werden jeweils an einem ausgewählten Tragwerk illustriert.

Nach einer Einleitung werden in einem ersten Teil der Arbeit Rechenwerte der verschiedenen Materialgrössen bereitgestellt, die in einer rechnerischen Überprüfung zur Anwendung kommen können. Bei den Angaben für verschiedene Beanspruchungszustände von Beton wird insbesondere ein Vorschlag für die effektive Betondruckfestigkeit im ebenen Spannungszustand eingeführt, der an Resultaten aus Zug-Druck-Versuchen kalibriert ist. Anhand des Vorschlags wird gezeigt, dass im Bereich von Zwischenauflagern in der Regel von einem Mindestwert der effektiven Betondruckfestigkeit ausgegangen werden kann, während diese Festigkeit im Bereich von Endauflagern stark vom Verzerrungszustand abhängt.

In bestehenden Tragwerken ist die Übertragungslänge von grösserer Bedeutung als die Verankerungslänge, da bei Endauflagern in der Regel nur die Spannkraft nach Abzug aller Verluste verankert werden muss. Für die mittlere Verbundspannung auf dieser Übertragungslänge von Spannbettbewehrung wird im Bericht ebenfalls ein Wert vorgeschlagen. Eine Parameterstudie untersucht den Einfluss von Querdruck auf die Übertragungslänge. Es wird gezeigt, dass bereits ein geringer Querdruck die erforderliche Übertragungslänge erheblich reduziert. Die entscheidenden Grössen im vorausgesetzten Reibungsansatz sind die Betonfestigkeit und insbesondere der von der Formgebung des Betonquerschnitts abhängige Querdruck.

In einem zweiten Teil der Arbeit werden nähere Angaben zur verbliebenen Vorspannung in bestehenden Tragwerken und zur formalen Modellierung der Spanngliedgeometrie gemacht, bevor Bruchmechanismen und Spannungsfelder als verfeinerte Berechnungsmethoden vorgestellt werden. Verschiedene Grundfälle von Bruchmechanismen werden dabei eingehend erläutert und am Beispiel diskutiert. Besonderes Gewicht wird auf die massgebende Anordnung von Einzellasten gelegt. Die zugehörigen Formeln sind in einer Tabellenkalkulation aufbereitet, die auf der beigelegten CD-ROM zu finden ist. Am ausgewählten Tragwerk werden insbesondere auch so genannte Teilmechanismen beispielhaft behandelt, bei denen nur einzelne Tragelemente versagen.

Verschiedene Grundfälle von Spannungsfeldern für Tragelemente konstanter Bauhöhe mit gerader und gekrümmt geführter Bewehrung werden ebenfalls ausführlich erläutert. Die zugehörigen Formeln sind zur erleichterten Anwendung ebenfalls in einer Tabellenkalkulation auf der beigelegten CD-ROM enthalten. Die Anwendung der behandelten Grundfälle wird anhand des meist beanspruchten Längsträgers des gewählten Tragwerks illustriert. Die Aufteilung der Einwirkungen in Querrichtung anhand der in der Fahrbahnplatte vorhandenen Biegegrössen wird dabei vorgängig beispielhaft gezeigt.

Durch die Verknüpfung der im ersten Teil gegebenen Grundlagen wird anhand einer Parameterstudie der Bereich kritischer Neigungen der Betondruckdiagonalen im Bruchzustand diskutiert. Es kann gezeigt werden, dass die übliche Vernachlässigung des Verbundversagens zwischen Diagonale und Zugbewehrung in den meisten Fällen gerechtfertigt ist. Es wird auch gezeigt, dass in den meisten Fällen sehr flache Diagonalenneigungen möglich sind, bei denen das gleichzeitige Versagen von Bügelbewehrung und Druckdiagonalen massgebend wird.

Die Tragwirkung im Bereich eines Endauflagers eines Trägers wird anhand von Spannungsfeldern untersucht. Anhand zweier Parameterstudien am einfachen Balken werden die Einflüsse von Lagerüberstand, Spanngliedgeometrie, Spannkraftverlusten und der Aufteilung der Spannkkräfte auf verschiedene Bewehrungen sowie der vorhandenen Bügelwiderstände auf die Ausdehnung der dekomprimierten Bereiche und die Aufteilung der Kräfte im Auflagerbereich ausführlich diskutiert. Die Anwendung in einer rechnerischen Überprüfung und die Erweiterung auf Verankerungslängen der Bewehrung werden ebenfalls kurz erläutert.

Der zweite Teil der Arbeit schliesst mit einem Kriterienkatalog zur Beurteilung der Tragsicherheit, der verschiedene Parameter wie Biege- und Querkraftwiderstände, aber auch Verankerungszonen bei Auflagern und andere Kräfteinleitungsprobleme berücksichtigt. Die Anwendung des Kriterienkatalogs auf das ausgewählte Tragwerk wird mit einer Beurteilung der vorgefundenen Verhältnisse abgeschlossen.

In einem Anhang werden Bruchversuche im Massstab 1:1 an ausgebauten Brückenträgern behandelt. Nach einer Zusammenfassung des experimentellen Programms und der Versuchsergebnisse werden die vorgestellten Grundfälle von Bruchmechanismen und Spannungsfeldern auf die experimentell ermittelten Bruchlasten angewendet und Folgerungen dazu gezogen. Dabei wird insbesondere auch auf Plausibilitätsüberlegungen zu den angestellten Berechnungen und deren Beurteilung eingegangen.

## Résumé

Ce rapport présente l'application de modèles d'analyse basés sur la théorie de la plasticité dans l'évaluation approfondie de la sécurité structurale de structures existantes en béton armé. Il est conçu en tant que guide pour l'évaluation, en particulier pour les ponts composés d'éléments préfabriqués qui disposent d'une forte précontrainte et ne dépassent que peu les appuis. Les modèles sont surtout appliqués aux poutres simples à section en T qui sont armées par fils adhérents et ainsi que par des câbles de précontrainte. Quelques indications pour des poutres continues sont également fournies.

Le travail se limite à l'évaluation déterministe de la sécurité structurale de poutres fortement précontraintes avec une hauteur constante et un minimum d'étriers. On parle d'un minimum d'étriers si la quantité d'étriers de l'élément structural correspond à l'armature minimale selon la norme de dimensionnement. Un élément de construction est considéré fortement précontraint si l'armature longitudinale est constituée essentiellement d'acier précontraint, ce qui provoque un degré de précontrainte très élevé. Les méthodes sont illustrées par l'application à une structure choisie.

Après une introduction, des valeurs de calcul pour les matériaux applicables lors d'une évaluation sont présentées. Parmi les valeurs caractéristiques pour les différents états de sollicitations du béton, on introduit en particulier une relation pour la résistance à la compression en état de déformations planes qui a été calibrée sur des résultats d'essais traction-compression. Cette relation montre qu'à l'endroit des supports intermédiaires une valeur minimale peut en générale être admise pour la résistance effective du béton tandis qu'elle dépend fortement de l'état de déformations aux appuis de bord.

Pour les structures existantes, la longueur de transfert des fils adhérents a en règle générale plus d'importance que leur longueur d'ancrage parce que seule la force de précontrainte diminuée par toutes les pertes doit être ancrée. Une valeur des contraintes d'adhérence moyennes des fils adhérents est proposée dans le rapport. Dans une étude paramétrique, l'influence d'une compression latérale sur la longueur de transfert est illustrée. Il est montré qu'une compression latérale modeste suffit à réduire considérablement la longueur d'adhérence nécessaire. La résistance du béton ainsi que la forme de la section sont les paramètres déterminants pour le modèle de friction proposé.

Dans une deuxième partie du travail, les pertes de précontrainte dans les structures existantes et la modélisation de la forme des câbles sont discutées. Ensuite, un certain nombre de mécanismes de rupture et champs de contraintes sont présentés comme méthodes de calcul détaillées. Plusieurs mécanismes de rupture simples sont discutés en profondeur et illustrés à l'aide de l'exemple. La configuration déterminante des forces concentrées reçoit une attention particulière. Les formules correspondantes sont insérées dans des feuilles de calcul tabellaires contenues sur le CD accompagnant ce rapport. En particulier, les mécanismes conduisant à une rupture partielle de la structure sont également traités.

Différents cas génériques de champs de contraintes pour des éléments de structure à hauteur constante et avec une armature droite ou courbe sont expliqués en détail. Pour une application aisée, les formules correspondantes sont aussi employées dans des feuilles de calcul du CD en annexe. L'application est illustrée au moyen de la poutre maîtresse la plus sollicitée de la structure choisie. Auparavant, la répartition transversale des actions en fonction de la rigidité du tablier est expliquée.

Une étude paramétrique basée sur la combinaison des propriétés de matériaux issues de la première partie permet de discuter le spectre possible d'inclinaisons critiques des diagonales en compression à l'état ultime. On voit que la défaillance de l'adhérence entre la diagonale et l'armature longitudinale peut être négligée dans la plupart des cas. De très faibles inclinaisons de diagonales, résultant d'une rupture à la fois des étriers et des diagonales en compression, sont admissibles.

Le flux de forces dans les zones de support de bord est modélisé par des champs de contraintes. L'étendue des zones décomprimées et la répartition des forces à l'endroit des appuis sont discutées en détail dans deux études paramétriques qui mettent en évidence l'influence du dépassement des poutres au-delà des appuis, de la forme des câbles et des pertes de précontrainte, de la répartition des forces de précontrainte sur les différentes armatures et des résistances des étriers. L'application des modèles investigués pour l'évaluation de structures existantes est expliquée brièvement, y compris une extension aux longueurs d'ancrage des armatures.

---

La deuxième partie se termine avec un catalogue de critères pour l'évaluation de la sécurité structurale de structures existantes. Ce catalogue inclut les résistances à la flexion et à l'effort tranchant, les zones d'ancrage à l'endroit des appuis et d'autres problèmes liés à l'introduction de forces concentrées. L'application du catalogue de critères à l'exemple choisi est achevée par l'interprétation de l'état de la structure.

Dans une annexe, des essais à l'échelle 1:1 sont documentés. Ces derniers ont été effectués sur des poutres maîtresses obtenues suite à la démolition d'un pont. Le résumé du programme d'essais et des résultats est suivi d'une comparaison avec les résultats obtenus par la méthode des champs de contraintes et des mécanismes de rupture décrits dans le rapport. Les conclusions sont tirées en gardant une attention particulière à la plausibilité des calculs ainsi qu'à leur interprétation.

## Summary

This report presents the application of limit analysis models in the refined assessment of structural safety of existing concrete structures. It may serve as a guideline for the assessment of structures, in particular for bridges with minimum overhang at supports and high prestressing ratios and being composed of profiled concrete girders with in-situ concrete decks. The models are mainly applied to simply supported, prefabricated, pre-tensioned concrete T-beams provided with some additional post-tensioning. Remarks regarding continuous structures are also given.

The study is restricted to the deterministic evaluation of structural safety of highly prestressed concrete girders of constant height with minimum shear reinforcement. Structural concrete elements are considered to be minimally reinforced for shear forces in cases where earlier codes required secondary shear reinforcement only. Prestressing ratios are considered high for such elements where longitudinal reinforcement consists of prestressed reinforcement mainly or even only. The use of the models is illustrated using an actual girder bridge.

In the first part, values of the material properties of steel, concrete and bond relevant to the assessment of structures are given. In particular, an expression is proposed for the effective compressive strength of concrete in plain stress, calibrated from results of tension-compression tests on concrete panels. The evaluation of the expression shows that for the effective concrete strength at intermediate supports usually a minimum value may be assumed while this strength is highly depending on the state of strain at end supports.

In existing structures, the transfer length of pre-tensioned steel is generally more important than its anchorage length since only the prestressing force after all losses has to be anchored at end supports. A proposition for the value of the average bond strength in the transfer length is made in the report. Furthermore, the effect of transverse pressure on the reduction of the transfer length is discussed in a parametric study, leading to the conclusion that already a small transverse pressure leads to a considerable reduction of the transfer length. The concrete strength and especially the transverse pressure depending on the profile of the cross section of the concrete girders are the main parameters of the investigated friction approach.

In the second part, prestress losses in existing structures and the modelling of the shape of tendons are discussed. Failure mechanisms and stress fields are presented as refined models for the assessment of structural safety. Several basic failure mechanisms are thoroughly discussed and illustrated in the example of the chosen bridge. Special attention is given to the decisive arrangement of moving single loads. Corresponding formulae have been introduced in a spreadsheet on the enclosed CD-ROM. The treatment of failure mechanisms where only parts of the structure are failing is also shown.

Several basic stress fields for structural concrete elements with straight or curved reinforcement are explained in detail. The corresponding formulae also have been introduced in a spreadsheet on the enclosed CD-ROM. The application is illustrated with the development of a stress field for the most heavily loaded concrete girder of the chosen example. The transverse distribution of the loads in the road deck based on the bending resistance of the deck is illustrated exemplarily.

A parametric study based on the combination of the material properties given in the first part discusses the possible range of critical inclinations of the compression struts in the ultimate limit state. It is shown that failure of the bond between tension chord and compression struts can be neglected in most cases. Combined failure of the stirrups and of the compression struts is usually governing at rather flat inclinations of the struts.

The flow of forces at end supports is modelled using stress fields. Two parametric studies investigate the influence of support overhang, shape of the tendon and prestress losses as well as the distribution of the prestress forces to different reinforcement layers on the decompression of the structure and the distribution of forces in the area of the end support. The application of the investigated models in the assessment of existing structures as well as their extension to the consideration of the anchorage length of reinforcement is shortly treated.

---

The second part ends with a catalog of criteria for the assessment of structural safety of existing structures, considering bending and shear strength and anchorage of forces at supports amongst other criteria. The catalog is applied to the chosen example and the findings are discussed.

An appendix reports on full-scale tests on dismantled bridge girders. The experimental program and its main results are reported. The basic failure mechanisms and stress fields are applied to the experimental failure loads and conclusions are drawn, mainly focussing on plausibility considerations for the findings.