

Dissertation Nr. 11845

**Zur Ermüdung  
teilweise vorgespannter Betontragwerke**

ABHANDLUNG  
zur Erlangung des Titels  
DOKTORIN DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN  
der  
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

Leena Kaisa Elviira Eskola  
Dipl. Ing (TU Tampere)  
geboren am 23. Mai 1962  
von Finnland

Angenommen auf Antrag von:  
Prof. Dr. Peter Marti, Referent  
Prof. Dr. Alfonso Fernandez Canteli, Korreferent

1996

## Kurzfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wird versucht, zu einem besseren Verständnis des Ermüdungsverhaltens von teilweise vorgespannten Betontragwerken beizutragen. Die Problematik wird auf vier Ebenen erörtert, nämlich jenen des Werkstoffs, des Baumaterials, des Bauteils und des Tragwerks. Als praktisch direkt anwendbares Ergebnis wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, die Lebensdauer teilweise vorgespannter Bauteile vorauszusagen. Damit werden die Kenntnisse über das Ermüdungsverhalten vom Baumaterial auf Bauteile ausgedehnt.

Die Arbeit gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil (Kapitel 2 und 3) werden theoretische und materialtechnische Grundlagen zusammengestellt. Der zweite Teil (Kapitel 4) enthält eine detaillierte Beschreibung der eigenen Grossversuche. Im dritten Teil (Kapitel 5 und 6) wird das Ermüdungsverhalten von vorgespannten Tragwerken behandelt.

In Kapitel 2 steht die Beschreibung des Ermüdungsprozesses im Vordergrund. Die Bedeutung der Reibermüdung, der Einfluss der Mittelspannung auf die Ermüdungsfestigkeit und die Frage der Dauerfestigkeit werden auf dieser Grundlage erörtert. Schliesslich wird eine neue Schädigungshypothese formuliert, welche die in vielen Arbeiten experimentell belegte Palmgren-Miner-Regel impliziert und verschiedene bekannte theoretische Ansätze als Spezialfälle enthält.

Der aus den bisherigen Versuchen erreichte Wissensstand wird in Kapitel 3 eingehend behandelt. Es zeigt sich, dass eine quantitative Beurteilung der zahlreichen Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit aufgrund der bisherigen Versuche nicht möglich ist.

Der in Kapitel 4 beschriebene experimentelle Teil der vorliegenden Arbeit umfasste vier Grossversuche an vorgespannten Trägern sowie dazugehörige Versuche an freischwingenden Litzen und Bewehrungsstäben. Abmessungen und Bewehrung der Träger entsprachen einem typischen Brückentragwerk. Auch das Spannglied war von praxisüblicher Grösse. Lediglich ein Versuchsparameter wurde variiert, nämlich die Hüllrohrart (Stahl oder Plastik), während alle weiteren Parameter möglichst konstant gehalten wurden. Die Lasten wurden so gewählt, dass eine nominelle Spannungsdifferenz von 200 MPa im Spannstahl erzeugt wurde. Die Träger wurden jeweils einer zyklischen Belastung mit konstanten Lastgrenzen bis zum Trägerbruch unterworfen. Der Trägerbruch erfolgte duktil nach sehr grossen Verformungen. Die Träger mit Plastikhüllrohren erwiesen sich als wesentlich langlebiger als jene mit Stahlhüllrohren.

Die in Kapitel 5 dargestellte Auswertung der eigenen Versuche liefert die Grundlage für eine Belastungsdauerberechnung, welche Voraussagen der Lebensdauer ermüdungsbeanspruchter Bauteile ermöglicht. Auf der Grundlage der neuen Schädigungshypothese zur Berücksichtigung der sukzessiv zunehmenden Spannungsdifferenzen und unter Verwendung der durch Versuche an freischwingenden Litzen und Bewehrungsstäben gewonnenen Ermüdungsfestigkeitswerte wird mit Hilfe von Methoden der Ordnungsstatistik die Lastwechselzahl desjenigen Drahtbruchs bestimmt, der zum Trägerbruch führt.

In Kapitel 6 werden für die praktische Bemessung geeignete Empfehlungen für den Nachweis der Ermüdungssicherheit gemacht, wobei auch einige Fragen der Betriebsfe-

stigkeit diskutiert werden. Anhand eines Fallbeispiels werden die Anforderungen an die Ermüdungssicherheit mit jenen an die Gebrauchstauglichkeit verglichen. Die in den eigenen Versuchen klar festgestellte Bedeutung der schlaffen Bewehrung für das Verhalten des Tragwerks wird hervorgehoben. Zwei Arten von Bemessungsempfehlungen werden vorgestellt: Eine erste, auf dem ersten Drahtbruch basierende Empfehlung schliesst jegliche Schäden während der planmässigen Nutzungsdauer aus. Eine zweite, auf dem Trägerbruch basierende Empfehlung gestattet dagegen, die zwischen erstem Drahtbruch und Trägerbruch noch bestehende, beträchtliche Lebensspanne mittels höherer Spannungsdifferenzen auszunutzen.

## Summary

The present thesis attempts to contribute to a better understanding of the fatigue behaviour of partially prestressed (post-tensioned) concrete structures. The problem area is subdivided into four levels, i. e., microstructure, material, structural member and entire structure. As a practically applicable result a method capable of predicting the fatigue life of partially prestressed concrete members is presented. With this method, knowledge about the fatigue behaviour is extended from the level of materials to that of structural members.

The thesis is subdivided into three parts. Part 1 (Chapters 2 and 3) presents the theoretical background and summarises previous experiments. Part 2 (Chapter 4) describes the own large-scale tests. Part 3 (Chapters 5 and 6) analyses the experimental evidence and discusses the fatigue behaviour of partially prestressed concrete structures.

Chapter 2 focuses on the fatigue process. The discussion includes remarks on the significance of fretting fatigue, the influence of the mean stress on the fatigue strength and the problem of the endurance limit. In addition, a new damage hypothesis is formulated. This hypothesis implies the well-known Palmgren-Miner rule; also, the theoretical relationships proposed by Basquin and Paris and Erdogan can be derived on this basis.

Chapter 3 summarises the experimental evidence derived from previous tests. It is pointed out that at present, an accurate quantitative treatment of the different factors influencing the fatigue behaviour is impossible.

Chapter 4 describes the own fatigue tests on four large scale post-tensioned girders. Specimen dimensions and reinforcement corresponded to those of a typical bridge structure. Except for the duct material (steel or plastic) all test parameters were kept constant. Loads were varied such that a nominal stress range of 200 MPa in the post-tensioning steel was produced. Cyclic loading with constant lower and upper load limits was continued until ultimate failure of the girders. Failure was characterised by a remarkable ductility in all cases. The fatigue life of the two girders containing prestressing tendons with plastic ducts was significantly longer than that of the two companion girders with steel ducts.

Based on the analysis of the own experiments Chapter 5 presents a method for predicting the fatigue life of partially prestressed concrete members. Starting from an ordinary plane sections analysis of (cracked) partially prestressed concrete members this method accounts for the new damage hypothesis, uses data obtained from fatigue tests on individual prestressing strands and reinforcing bars and applies order statistics to compute the number of load cycles leading to the critical wire rupture that coincides with member failure.

Chapter 6 provides some recommendations for the fatigue design of structural concrete members. Using a design example provisions of fatigue and serviceability limit state design are compared. The significance of a sufficiently strong non-prestressed reinforcement complementing the post-tensioned reinforcement in partially prestressed concrete members is pointed out. Two different admissible stress ranges are recommended

## Summary

for the fatigue design of the prestressed reinforcement: while a lower limit aims at excluding any fatigue damage during the intended service life an upper limit allows to partly utilize the considerable life span after the occurrence of first wire breaks due to fatigue damage.

## Résumé

Ce travail de thèse tente de contribuer à une meilleure compréhension du comportement à la fatigue des structures en béton armé avec une précontrainte partielle. La problématique est subdivisée en quatre niveaux: microstructure, matériau, élément de structure et structure complète. Comme résultat pratique directement applicable, une méthode qui permet la prédiction de la durée de vie des structures avec une précontrainte partielle est présentée. Avec cette méthode, la connaissance du comportement à la fatigue est étendue du niveau des matériaux à celui des éléments structuraux.

Le travail se compose de trois parties. La première partie (chapitres 2 et 3) présente les bases théoriques et résume les essais antérieurs. La deuxième partie (chapitre 4) décrit les essais à grande échelle de l'auteur. La troisième partie (chapitres 5 et 6) analyse les résultats des essais et examine le comportement à la fatigue des structures en béton armé avec une précontrainte partielle.

Le chapitre 2 se concentre sur la description du processus de fatigue. La signification de la fatigue de frottement, l'influence de la contrainte moyenne sur la résistance à la fatigue et le problème de la limite de durabilité sont également examinés. Une nouvelle hypothèse de dommage est formulée. Cette hypothèse implique la règle bien connue de Palmgren-Miner; de même les relations théoriques proposées par Basquin et Paris et Erdogan peuvent en être déduites.

Le chapitre 3 résume les résultats expérimentaux des essais antérieurs. Il apparaît en outre qu'à ce jour un traitement quantitatif des différents facteurs influençant le comportement à la fatigue est impossible.

Le chapitre 4 décrit les essais de fatigue de quatre poutres à grande échelle avec une précontrainte partielle effectués par l'auteur. Les dimensions et l'armature correspondent à celles d'une structure typique de pont. A l'exception du matériau de la gaine (acier ou plastique), tous les paramètres d'essai ont été maintenus constants. Les charges ont été choisies de façon à produire une différence de contraintes nominales de 200 MPa dans l'acier de précontrainte. Les poutres ont été chargées de manière cyclique avec des limites de charge supérieure et inférieure constantes jusqu'à la rupture. La rupture a été caractérisée dans tous les cas par une remarquable ductilité. La résistance à la fatigue des deux poutres contenant des gaines en plastique a été plus grande que celle des deux autres contenant des gaines en acier.

Sur la base de l'analyse des essais de l'auteur, le chapitre 5 présente une méthode qui permet de prédire la durée de vie à la fatigue des structures en béton armé avec une précontrainte partielle. A partir d'une analyse habituelle des sections planes des éléments structuraux (fissurés) avec une précontrainte partielle, cette méthode se base sur la nouvelle hypothèse de dommage, sur les données obtenues lors d'essais de fatigue individuels des torons de précontrainte et des barres d'armature et sur une approche statistique pour obtenir le nombre de cycles de charge conduisant à la rupture d'un fil.

Le chapitre 6 contient quelques recommandations pour le dimensionnement à la fatigue des éléments structuraux en béton armé. Les exigences pour la sécurité à la

## Résumé

fatigue et pour l'état de service sont comparés sur la base d'un exemple. L'importance de l'armature passive sur le comportement de la structure, clairement constatée lors des essais de l'auteur, est mise en évidence. Deux recommandations de dimensionnement différentes sont proposées: Une limite inférieure qui exclut tout dommage de fatigue durant la durée de vie de l'ouvrage et une limite supérieure qui permet de tenir partiellement compte de la réserve considérable subsistant après la première rupture d'un fil.