

# **Berechnungsmodell zur vereinfachten Abschätzung des Ermüdungsverhaltens von Federplatten bei Fertigträgerbrücken**

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

DISSERTATION

von

**M.Sc. Ngoc Linh Tran**

aus  
Hanam / Vietnam

**D 17**

**Darmstadt 2011**

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue

Tag der Einreichung: 11. April 2011

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Mai 2011

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau  
Petersenstrasse 12  
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

Tran, Ngoc Linh:

Berechnungsmodell zur vereinfachten Abschätzung des Ermüdungsverhaltens von  
Federplatten bei Fertigträgerbrücken

1. Auflage, Darmstadt, Eigenverlag

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 20

ISBN 978-3-942886-01-7

Gedruckt mit Unterstützung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD)

Dr.-Ing. Ngoc Linh Tran

Geboren 1978 in Hanam/Vietnam. Von 1996 bis 2001 Studium des Bauingenieurwesens an der Hochschule für Verkehrswesen Hanoi (UTC). Seit 2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter und Dozent an der Hochschule für Verkehrswesen. Von 2003 bis 2006 Masterstudiengang in Bauingenieurwesen an der Hochschule für Verkehrswesen Hanoi. Von 2007 bis 2011 DAAD-Stipendiat zur Promotion in Deutschland und wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt (TUD).

# VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2007 bis 2011 während meiner Tätigkeit als Stipendiat des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD) und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich aufrichtig für seine Unterstützung, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir eröffneten Möglichkeiten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Nguyen Viet Tue danke ich ganz besonders für seine stete Diskussionsbereitschaft und für die Übernahme des Korreferates.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Martin Heimann, Herrn Dipl.-Ing. Achim Knauff und Herrn M.Sc. Björn Freund möchte ich mich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit bedanken.

Meinen Kollegen und Kolleginnen danke ich ganz besonders für die in beruflicher und privater Hinsicht ausgesprochen herzliche und angenehme Zeit am Institut, an die ich mich gerne erinnern werde. Meinen Zimmerkollegen Herrn Dipl.-Ing. Andreas Greck und Herrn Dr.-Ing. Tilo Proske danke ich für das stets vorhandene Interesse und die Diskussionsbereitschaft bezüglich meiner Forschungsarbeit.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern für ihre fortwährende Unterstützung, die mir insbesondere während meines Studiums eine große Hilfe war.

Der größte Dank gilt jedoch meiner lieben Frau Thu Thuy und meiner Töchter Ngoc An, die durch ihren Rückhalt, ihr Verständnis und die immer willkommene Ablenkung großen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten. Ihr seid das Wichtigste in meinem Leben.

Darmstadt, Mai 2011

Ngoc Linh Tran



## KURZFASSUNG

Federplatten, die oft aus Stahlbeton hergestellt und als Verbindungselemente zwischen Fahrbahnplatten von Fertigträgerbrücken verwendet werden, weisen ein kompliziertes Verhalten auf. Unter wiederholten Belastungen, vor allem durch Verkehr kann Ermüdungsversagen bei Federplatten während der geplanten Nutzungsdauer mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auftreten.

In der vorliegenden Arbeit wurde daher eine numerische Ermüdungsuntersuchung an Federplatten durchgeführt. Zur Bestimmung der Steifigkeit und der Spannungen von Federplatten wurde ein neues Berechnungsmodell für Stahlbetonbauteile unter Berücksichtigung von wiederholten Belastungen entwickelt. Das neue Modell wurde in einem eigens dafür entwickelten Berechnungsprogramm BMAP umgesetzt.

Mit Hilfe des neuen Berechnungsmodells konnten umfangreiche numerische Untersuchungen zum Verhalten von Federplatten durchgeführt werden, in denen die Spannungs- und Dehnungszustände der Tragwerkselemente, bei beliebiger Lastwechselzahl und unterschiedlichen Randbedingungen, bestimmt wurden. Die wesentlichen Einflussparameter auf die Querschnittsträgfähigkeit wurden ebenfalls untersucht.

Basierend auf den Ergebnissen der numerischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit konnte festgestellt werden, dass die Steifigkeit einer Federplatte eine große Auswirkung auf ihr Ermüdungsverhalten unter Verkehrslast hat. Dies wurde an zwei gängigen Federplattentypen untersucht. Ergebnis war, dass für einen Federplattentyp bei Brücken mit einer großen Lücke zwischen zwei benachbarten Trägern die Ermüdungsbeanspruchung am höchsten war. Da die Länge der Federplatte in diesem Fall durch die Stützenabmessungen begrenzt ist und der Bewehrungsgrad sehr hoch sein muss, sollte diese Ausführungsvariante in der Praxis vermieden werden.

Vorgestellt wird ein neu entwickelter Federplattentyp mit einer besseren Tragfähigkeit insbesondere gegen Ermüdung. Es wurde festgestellt, dass der neue Federplattentyp mit den optimierten Abmessungen ein erhöhtes Anwendungspotenzial hat, was für die Praxis abschließend als Empfehlung zum Vorzug dieses Typs zu nennen bleibt.

Die Dissertation schließt mit der Vorstellung eines neuen Ermüdungsbemessungskonzeptes für Federplatten ab. Das entwickelte Bemessungskonzept mit seinen vielen Hilfsformeln liefert ein einfaches, gleichzeitig aber auch sehr genaues Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Schnittgrößen, zur Führung des Ermüdungsnachweises und zur Formulierung Lebensdauervorhersage von beliebigen Federplatten.

## **SUMMARY**

Link slabs, which are often made of concrete and reinforcement and used as connecting elements between bridge decks in pre-cast beam bridges, show complicated load bearing behaviour. Under repeated loading, especially through traffic, link slabs may fail in fatigue during the service life with high probability.

Therefore, a numerical study of fatigue of link slabs was performed in this thesis. To determine the stiffness and stress of link slabs a new computational model for reinforced concrete elements under repeated loading was developed. The new model was implemented in a self-developed computational program BMAP.

Using the new calculation model many numerical studies of behaviour of link slabs were conducted, in which the stress and strain states of structural elements were determined in dependence of any number of load cycles and under different boundary conditions. The main influence parameters of cross sectional load bearing were also examined.

Based on these results it could be found that the stiffness of link slabs has a large effect on their fatigue behaviour under traffic load. This was investigated in two major link slab types. The results show that the fatigue load by the link slab in bridges, which has a large gap between two adjacent beam ends, is significant large. Since the length of the link slab in this case is limited by the dimensions of piers and the very high required reinforcement ratio, the use of this link slab type should be avoided in practice.

A newly developed link slab type with regard to a better load capacity especially to fatigue is presented. It could be shown that the new link slab type with the optimized dimensions has an increased potential for applications in practice.

The thesis is rounded off with the development of a new fatigue design concept for link slabs. This design concept provides an easy, but also accurate way of forces calculation, fatigue analysis and lifetime prediction of any link slab.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Formelzeichen und Variablen.....</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung .....	4
1.3 Vorgehensweise .....	4
<b>2 Federplatten bei Fertigteilbrücken - Stand der Technik.....</b>	<b>7</b>
2.1 Einführung .....	7
2.2 Konstruktion von Fertigteilbrücken mit Federplatten.....	7
2.2.1 Bauverfahren der Fertigteilbrücken mit Federplatten .....	7
2.2.2 Fertigteilträger .....	8
2.2.3 Fahrbahnplatte .....	10
2.2.4 Querträger .....	11
2.2.5 Federplatte .....	11
2.2.6 Lagerung .....	15
2.3 Beanspruchungen von Federplatten .....	15
2.4 Bemessung von Federplatten .....	16
2.4.1 Einführung.....	16
2.4.2 Schnittgrößenermittlung.....	17
2.4.3 Nachweise .....	19
2.5 Ermüdungsverhalten und Lebensdauer von Federplatten.....	20
2.5.1 Allgemeines.....	20
2.5.2 Bedeutung von Temperaturbeanspruchung.....	20
2.5.3 Ermüdung der Federplatte unter Verkehrsbelastung.....	20
2.6 Zusammenfassung.....	24
<b>3 Grundlagen des Ermüdungsverhaltens von Stahlbetonbauteilen .....</b>	<b>25</b>
3.1 Einführung .....	25
3.2 Ermüdungsverhalten von Stahlbetonbauteilen .....	25
3.2.1 Allgemeines.....	25
3.2.2 Betonstahl.....	25
3.2.3 Beton .....	27

3.2.4	Verbund .....	31
3.3	Betriebsfestigkeit.....	34
3.3.1	Allgemeines .....	34
3.3.2	Rainflow-Zählung .....	34
3.3.3	Lineare Schadensakkumulation.....	35
3.4	Zusammenfassung.....	37
<b>4</b>	<b>Entwicklung eines neuen Modells zur Berechnung des Brückentragverhaltens unter zyklischer Lasteinwirkung.....</b>	<b>39</b>
4.1	Einführung.....	39
4.2	Allgemeines zu dem neu entwickelten Berechnungsverfahren .....	40
4.3	Berechnungsverfahren auf Querschnittsebene.....	42
4.3.1	Allgemeines .....	42
4.3.2	Rechenmodelle für Stahlbeton .....	43
4.3.3	Spannungsintegration .....	50
4.3.4	Berechnung am Stahlbetonquerschnitt.....	54
4.3.5	Iteration zur Querschnittsberechnung .....	55
4.3.6	Ermittlung der Steifigkeitswerte eines Querschnittes .....	55
4.4	Berechnungsverfahren auf Elementebene.....	59
4.4.1	Einführung in das Übertragungsmatrizenverfahren .....	59
4.4.2	Übertragungsverfahren für ein dreidimensionales Modell.....	62
4.4.3	Berechnungsmodell für ein allgemeines Stabelement.....	65
4.4.4	Berechnungsmodell für elastische Bettung.....	68
4.4.5	Möglichkeiten zur Erweiterung des theoretischen Ansatzes.....	70
4.5	Berechnungsverfahren auf Systemebene .....	71
4.5.1	Die Finite Elemente Methode.....	71
4.5.2	Das Stabelementmodell in Verbindung mit Übertragungsmatrizen.....	73
4.6	Verifikation des Berechnungsmodells .....	75
4.6.1	Allgemeines.....	75
4.6.2	Validierung anhand der Versuche von Günther und Mehlhorn (1988).....	75
4.6.3	Validierung anhand des Versuches von Monnier (1970).....	77
4.6.4	Validierung anhand des Versuchs von Schläfli (1999).....	78
4.6.5	Vergleichsrechnung zum Berechnungsansatz von Grasser (1988).....	79
4.7	Zusammenfassung.....	80
<b>5</b>	<b>Wirksame Biegesteifigkeit der Federplatte infolge wechselnder Belastung .....</b>	<b>83</b>
5.1	Einführung.....	83



5.2	Wirksame Biegesteifigkeit der Federplatte.....	83
5.2.1	Einfluss der Lastwechselzahl .....	85
5.2.2	Einfluss der Lastgrößen.....	87
5.2.3	Einfluss des Bewehrungsgrades.....	92
5.2.4	Einfluss der Abmessungen der Federplatte.....	92
5.2.5	Einfluss der Längskraft .....	94
5.2.6	Einfluss des Kriechens .....	96
5.3	Verteilung der Steifigkeit der Federplatte in Brückenlängsrichtung.....	96
5.4	Zusammenfassung.....	101
<b>6</b>	<b>Ermüdung von Federplatten .....</b>	<b>103</b>
6.1	Einführung .....	103
6.2	Ermüdungslastmodell .....	103
6.3	Berechnungsmodell der Brücken zur Schnittgrößenermittlung.....	105
6.3.1	Allgemeines.....	105
6.3.2	Modellbildung einer zweifeldrigen Fertigträgerbrücke mit Federplatte ....	109
6.4	Ermüdungsberechnung .....	119
6.4.1	Allgemeines.....	119
6.4.2	Ablauf der Ermüdungsberechnung .....	121
6.5	Parameterstudie.....	124
6.5.1	Allgemeines.....	124
6.5.2	Auswertung der Ergebnisse.....	125
6.5.3	Diskussion der Ergebnisse der zwei untersuchten Federplattentypen .....	137
6.6	Zusammenfassung.....	139
<b>7</b>	<b>Vorschlag eines neuen Federplattentyps.....</b>	<b>141</b>
7.1	Einleitung.....	141
7.2	Beschreibung des Prinzips des neuen Federplattentyps.....	141
7.3	Optimierung der wesentlichen Abmessungen .....	142
7.3.1	Einfluss des Bewehrungsgrades.....	142
7.3.2	Länge und Bewehrungsgrad.....	143
7.3.3	Länge und Dicke .....	146
7.3.4	Breite des Auflagerbereichs zwischen Fahrbahnplatte und Querträger am Ende der Federplatte .....	147
7.4	Vergleich mit bestehenden Federplattentypen.....	148
7.5	Zusammenfassung.....	149

<b>8</b>	<b>Hilfsmittel zur Bemessung der Federplatte gegen Ermüdung.....</b>	<b>151</b>
8.1	Einleitung .....	151
8.2	Abschätzung der Querschnittssteifigkeiten unter wechselnder Belastung.....	152
8.2.1	Spannbetonquerschnitt .....	152
8.2.2	Stahlbetonquerschnitt .....	154
8.3	Schnittgrößenermittlung.....	156
8.3.1	Schnittgrößenermittlung infolge indirekter Beanspruchung .....	156
8.3.2	Schnittgrößen infolge lokaler Belastung .....	163
8.4	Abschätzung des Verhältnisses der Bewehrungsgrade .....	165
8.5	Bestimmung der Optimallänge der Federplatte .....	166
8.6	Bestimmung der erforderlichen Bewehrungsfläche.....	169
8.7	Beispiel.....	172
8.8	Zusammenfassung.....	177
<b>9</b>	<b>Resümee und Ausblick .....</b>	<b>179</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>185</b>
10.1	Fachliteratur .....	185
10.2	Technische Regelwerke .....	188
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>189</b>
A.	Konstruktion der Übertragungsmatrix .....	189
B.	Gauss-Legendre .....	199
C.	Lösungsansätze der kubischen Gleichung von Cardano.....	200
D.	Bezogene Zwangsverdrehung am Ende der Federplatte .....	201