Tragfähigkeits- und Restnutzungsdaueranalyse stählerner Straßenbrücken unter detaillierter Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Ivanka Topurova-Todorova
geb.in Sofia (Bulgarien)

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
-Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna
Gutachter: Prof. Dr.-Ing Karsten Geißler
Gutachter: Prof. Dr.-Ing Ursula Freundt (Univ. Weimar)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18. Dezember 2014

Berlin 2015

Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen
Book Series of the Department of Civil Engineering
Technische Universität Berlin

Band 19

Ivanka Topurova-Todorova

Tragfähigkeits- und Restnutzungsdaueranalyse stählerner Straßenbrücken unter detaillierter Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2014

Tragfähigkeits- und Restnutzungsdaueranalyse stählerner Straßenbrücken unter detaillierter Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung

Dissertationsschrift von Ivanka Topurova-Todorova
Fakultät VI – Planen, Bauen, Umwelt
der Technischen Universität Berlin

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler
Prof. Dr.-Ing. Ursula Freundt (Universität Weimar)

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 18. Dezember 2014

Copyright Shaker Verlag 2015
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3619-0
ISSN 1868-8357

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Ein großer Teil des Brückenbestandes wurde im Zeitraum von 1950-1985 gebaut. Diese Bauwerke wurden für deutlich geringere Lasten bemessen, als heute erforderlich sind. Dazu kommt der ständige Zuwachs des Transportvolumens. Diese Tatsachen zeigen die Notwendigkeit einer Beurteilung bestehender Tragwerke unter möglichst realistischer Belastung. Diese Beurteilung soll ein Werkzeug für die Festlegung von Prioritäten bei der Brückenerneuerung liefern. Mit der „Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand“ wurde ein Regelwerk zur Nachweisführung von bestehenden Bauwerken entwickelt. Dabei bleibt die Auswirkung von verkehrsflussspezifischen Parametern wie Stauwahrscheinlichkeit, Überholverkehr und Stauclusterlänge außer Betracht. Diesbezüglich wurde im Rahmen dieser Arbeit besonderes Augenmerk auf eine realitätsnahe Modellierung der Verkehrsbeanspruchung unter Beachtung abweichender Einflussgrößen gelegt. Es wurde durch die Simulation verschiedener Verkehrssituationen und deren Auswertung mittels probabilistischer Methoden ein Beitrag zur Beurteilung der Tragfähigkeit und Ermüdungssicherheit bestehender stählerner Straßenbrücken unter detaillierter Berücksichtigung der Verkehrsbeanspruchung angestrebt. Als zusätzlicher Schwerpunkt wurden die Auswirkungen der eventuellen Zulassung der neuen modularen 60t-Fahrzeugkonzepte untersucht.

Auf dem Gebiet der Tragfähigkeitsproblematik wurde ein probabilistisches Verfahren zur Tragsicherheitsabschätzung bestehender stählerner Brückenkonstruktionen entwickelt. Die Auswertungen basieren auf der Simulation eines gemessenen Extremverkehrs. Die Auswirkung einzelner Verkehrsflussfaktoren hinsichtlich der Tragfähigkeit wurde ausführlich charakterisiert und ausgewertet. Die dabei zugrunde gelegte differenzierte Betrachtung dieser Einflussgrößen ermöglicht den Nachweis einer Verlängerung der Nutzungsdauer durch die eventuelle Einführung verkehrsbeeinflussender Maßnahmen. Die Schlussfolgerungen bezüglich der Sicherheitsreserven der Brücken, bemessen nach verschiedenen Regelwerken, konnten durch eine Gegenüberstellung unter variierenden Normlastmodellen gezogen werden.

Angesichts der Ermüdungsproblematik wurde ein praxisorientiertes Verfahren zur Ermüdungsabschätzung bestehender stählerner Brückenkonstruktionen vorgeschlagen und unter variierenden Randbedingungen detailliert ausgearbeitet. Entsprechend wurde mit dem Hilfswert α_{Str} ein einziges Beurteilungskriterium in Verbindung mit der Auslastung sowie der konstruktiven Ausbildung (Kerbfall) der Brücke eingeführt. Zudem wurde die Wichtung des Einflusses verkehrsflussspezifischer Parameter wie Stau, Fahrzeugabstand, Stauclusterlänge und gleichzeitige Wirkung aus beiden Fahrstreifen auf die Ermüdungsnachweise abgeleitet. Eine weiterführende Verknüpfung mit den Algorithmen zur Berücksichtigung abweichender Randbedingungen wie Korrosionsrate, Querverteilungsfaktor und Verkehr in der Nebenspur erlauben zusätzlich eine umfassende Anwendbarkeit der erarbeiteten Vorgehensweise.

Abstract

A large number of bridges were built in the period 1950-1985. These structures were designed for different load models in comparison with the ones required in present design standards. Furthermore, there is a continuous growth in freight volumes. As a result, there is a need to assess existing structures under realistic load, which can provide a tool for the prioritization of the bridge refurbishment or replacement. A regulation for the assessment of these structures was developed with the "Guideline for assessment of existing road bridges". However, the influence of traffic flow parameters such as traffic jam probability, heavy traffic in the secondary lane and traffic jam clusters are not directly taken into consideration. To address this deficiency, this thesis focuses on simulating different traffic situations and their analysis using probabilistic methods to assess the load-bearing capacity and fatigue safety of existing steel road bridges under detailed consideration of traffic load. In addition, the impact of the potential authorization of the new modular 60t vehicle concepts is estimated.

In the field of load-bearing capacity, a probabilistic method for the assessment of existing steel bridges is developed. The analysis is based on simulation in accordance with data from measured extreme traffic. The impact of individual traffic flow factors regarding the load-bearing capacity is characterized and evaluated in detail. Based on the differentiated consideration of this parameter, it is possible to extend the life of the structure with the implementation of traffic limitations. Conclusions regarding the safety levels of the bridges, designed according to different design standards are drawn.

In the field of fatigue problems this thesis proposes a method for fatigue live assessment of existing steel bridge structures. This algorithm is elaborated in detail under various conditions. An $\alpha_{Str.}$ value is established that allows the fatigue assessment in connection with the utilization ratio and the structural design (notch detail). In addition, the influence on the fatigue life of specific traffic flow parameters such as traffic jam probability, distance between the vehicles, heavy traffic in both lanes and traffic jam clusters is derived.This method is further refined with procedures witch can take in to account different conditions such as the corrosion rate, the distribution factor and traffic in the second lane.

Danksagung

Eine wissenschaftliche Arbeit ist nie das Werk einer einzelnen Person, deshalb möchte ich mich bei den Menschen bedanken, die mir dies ermöglicht haben.

Mein größter Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Geißler, Fachgebiet „Entwerfen und Konstruieren - Stahlbau“ des Institutes für Bauingenieurwesen der TU-Berlin, welcher mir mit seinem Fachwissen zur Seite stand. Bedanken möchte ich mich bei Ihm besonders für das stets entgegengebrachte Vertrauen, seine Unterstützung und sein Engagement bei der Anfertigung der Arbeit sowie für die Übernahme des Erstgutachtens.

Frau Prof. Dr.-Ing U. Freundt bin ich sehr dankbar für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Y. Petryna möchte ich mich für die Bereitschaft, den Prüfungsvorsitz zu übernehmen, bedanken.

Des Weiteren bedanke ich mich auch bei der Friedrich-Naumann-Stiftung für die finanzielle sowie ideelle Förderung.

Ich möchte mich außerdem bei Prof. Dr.-Ing. habil. W. Graße von der Technischen Universität Dresden bedanken, der mir die Möglichkeit und die notwendigen Rahmenbedingungen gab, um eine wissenschaftliche Arbeit in Deutschland zu verfolgen.

Prof. Dr.-Ing. J. Stritzke bin ich ebenfalls für die Unterstützung am Anfang meiner Arbeit dankbar. Außerdem für die Gelegenheit, alljährlich an dem größten Brückenbauforum Deutschlands teilzunehmen.

Mein spezieller Dank geht ans Dipl.-Ing. Susanne Reichel für die sorgfältiger Durchsicht des Manuskriptes und die Hilfe bei der Bewältigung der schwierigen deutschen Sprache. Bei Herrn Dipl.-Ing. Josef Karl Kraus möchte ich mich ebenfalls für das Korrekturlesen bedanken.

Herrn Dipl.-Math. Rolf Kaschner aus der Bundesanstalt für Straßenwesen bin ich für die Hilfe bei den Literaturrecherchen dankbar.

Ein sehr herzlicher Dank gilt meiner Familie - insbesondere meinem Mann, meiner Tochter und meinen Eltern. Ihre Unterstützung, ihr Zuspruch und ihr Verständnis waren mir immer sicher.

Sofia, den 01.03.2015 Ivanka Topurova

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Bezeichnungen, Indizes V

Einleitung und Zielstellung 1

1. Grundlagen zur Abbildung und Auswertung der Beanspruchungen infolge des Straßenverkehrs 5

1.1. Einleitung 6

1.2. Normlasten für Neubauten 6
1.2.1. Nachweise der Tragfähigkeit 7
1.2.2. Ermüdungsnachweise 8

1.3. Normlasten für die Nachrechnung bestehender Brückenkonstruktionen 9

1.4. Probabilistische Abbildung der Verkehrslasten zur Nachrechnung 11
1.4.1. Fahrzeuglasten 13
1.4.2. Fahrzeuglastkollektive. Verkehrszusammensetzung 27
1.4.3. Verkehrsstärke 29
1.4.4. Verkehrsfluss 32

1.5. Grundlagen für statistische Auswertungen zur Erfassung der Extremwerte der Beanspruchungen 43
1.5.1. Klassierte Häufigkeiten 43
1.5.2. Typ der Verteilungsfunktion 45
1.5.3. Multimodalverteilungen aus inhomogenen Stichproben 46
1.5.4. Prüfung der Approximationsgüte 48

1.6. Schlussfolgerungen 49

2. Kapitel: Modellansätze zur Erfassung des Ermüdungsschadens 51

2.1. Einleitung 52

2.2. Konzepte zur Ermüdungsberechnung 52
2.2.1. Rein experimentelle Ermittlung 53
2.2.2. Das Nennspannungskonzept (Nominal Stress Approach) 54
2.2.3. Konzept der örtlichen Beanspruchungen (Örtliches Konzept, Kerbgrundkonzept, Kerbdehnungskonzept - Local Strain Approach) 54
2.2.4. Strukturspannungskonzept (Structural Hot-spot Stress Approach) 57

2.2.5. Konzept der örtlich elastischen Beanspruchungen (Kerbspannungskonzept, Notch Stress Approach) ... 59
2.2.6. Das Rissfortschrittskonzept (Crack Propagation Approach) ... 62
2.2.7. Kontinuumstheorie der Schädigung (Kontinuumsschädigungsmechanik, Continuum Damage Mechanics-CDM) ... 64

2.3. Ermüdungsberechnung mit dem Nennspannungskonzept ... 68
2.3.1. Lineare Schadensakkumulations-Hypothese ... 68
2.3.2. Ermüdungsfestigkeitskurven ... 74

2.4. Schlussfolgerungen ... 76

3. Kapitel: Extremwerte der Beanspruchungen mit ihrem Einfluss auf die Tragfähigkeit ... 77

3.1. Problemstellung ... 78

3.2. Prinzipielle Vorgehensweise zur Ermittlung der Extremwerte ... 78

3.3. Annahmen für die Basisvariablen, spezielle Vorgaben für die Simulationen ... 80
3.3.1. Untersuchte statische Systeme ... 80
3.3.2. Verkehrslastmodell ... 82
3.3.3. Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts ... 83
3.3.4. Stauwahrscheinlichkeit ... 83
3.3.5. Umfang der Simulationen und Datenmengenerhebung ... 84

3.4. Vorgehensweise zur Ermittlung der charakteristischen Beanspruchungen auf Grundlage der Simulationen ... 84
3.4.1. Unterteilung in Intervalle ... 84
3.4.2. Kontrolle der Approximationsgüte ... 86
3.4.3. Ermittlung der Jahresextremwertverteilung ... 88
3.4.4. Charakteristischer Wert und Wiederkehrperiode ... 89
3.4.5. Berücksichtigung von Überholverkehr ... 91
3.4.6. Plausibilität des eingesetzten statistischen Algorithmus ... 93
3.4.7. Kontrolle des Simulationsumfangs ... 94

3.5. Ergebnisse der statistischen Auswertung ... 94
3.5.1. Parameter und Fehlerquadratsummen der Approximationsfunktionen ... 95
3.5.2. Variierender Verkehrsfluss ... 97

3.6. Einfluss verschiedener Verkehrsparameter auf die Extremwerte der Beanspruchungen ... 99
3.6.1. Stauwahrscheinlichkeit ... 99
3.6.2. Anteil der Stauwahrscheinlichkeit ... 101

3.6.3. Überholverkehr 102
3.6.4. Neue Schwerfahrzeugkonzepte 104
3.6.5. Anteil der neuen Schwerfahrzeugkonzepte 106

3.7. Vergleich mit den nach Norm ermittelten Beanspruchungen 107
3.7.1. Ermittlung der normativen charakteristischen Beanspruchungen 107
3.7.2. Gegenwärtiger Schwerverkehr 107
3.7.3. Verkehr unter Zulassung neuer modularer Fahrzeugkonzepte 112
3.7.4. Zusammenfassung des Vergleichs mit den Normmomenten 117

3.8. Kommentar der Ergebnisse im Bezug mit anderen Untersuchungen 120

3.9. Schlussfolgerungen 122
3.9.1. Stauwahrscheinlichkeit 122
3.9.2. Überholverkehr 122
3.9.3. Verkehrszusammensetzung 123

4. Kapitel: Ermüdungsnachweise und Restnutzungsdauer 125

4.1. Problemstellung 126

4.2. Entwicklung der Vorgehensweise zur Ermüdungsbeurteilung bestehender Straßenbrücken 126
4.2.1. Herleitung der Berechnungsmethode 126
4.2.2. Annahmen. Spezielle Vorgaben für die Simulationen 130
4.2.3. Simulationsstruktur 132
4.2.4. Möglichkeit zur Implementierung abweichender Randbedingungen 134

4.3. Zusammenfassung der maximalen α_{Str}-Werte 145
4.3.1. Genietete Konstruktionen - Verkehr nur in der Hauptspur 146
4.3.2. Genietete Konstruktionen – Überholverkehr 147
4.3.3. Geschweißte Konstruktionen - Verkehr nur in der Hauptspur 148
4.3.4. Geschweißte Konstruktionen - Überholverkehr 149
4.3.5. Anwendungsbeispiel für die überschlägige Schadensberechnung 150

4.4. Wertung des Einflusses verschiedener Faktoren im Hinblick auf den vorgeschlagenen Ermüdungsnachweis 153
4.4.1. Bezugslastmodell 153
4.4.2. Querverteilungsfaktor 156
4.4.3. Spurbelegung 157
4.4.4. Anteil des Schwerverkehrs in der Nebenspur 158
4.4.5. Zunahme der Verkehrsintensität 159
4.4.6. Veränderungen in der Zusammensetzung der Fahrzeugkollektive 161
4.4.7. Gesamtgewicht aller LKWs 164

4.4.8. Gesamtgewicht einzelner LKWs - Zulassung der 60t-LKWs 166
4.4.9. Stauwahrscheinlichkeit 169

4.5. Vergleich der ermittelten α_{Str}-Werte und λ-Werte nach EN 1993-2 186

4.6. Schlussfolgerungen 190

Zusammenfassung und Ausblick 195

Literaturverzeichnis: 199

Anhang A: Verkehrslastmodelle nach Pohl [91] 209

Anhang B: Charakteristische Extremwerte der Beanspruchungen 213

Anhang C: Zusammenfassung der α_{Str}-Werte 217