



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN Institut für Massivbau www.massivbau.tu-dresden.de



29. DRESDNER BRÜCKENBAUSYMPOSIUM

PLANUNG, BAUAUSFÜHRUNG, INSTANDSETZUNG
UND ERTÜCHTIGUNG VON BRÜCKEN

11./12. MÄRZ 2019

© 2019 Technische Universität Dresden

Alle Rechte vorbehalten.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
Technische Universität Dresden
Institut für Massivbau
01062 Dresden

Redaktion: Silke Scheerer, Angela Heller

Layout: Ulrich van Stipriaan

Anzeigen: Harald Michler

Titelbild: Beyer, Kurt: Südthailand. Zweibogige Betonbrücke im Bau, 1912/1913
Foto: SLUB Dresden / Deutsche Fotothek / Kurt Beyer

Druck: addprint AG, Am Spitzberg 8a, 01728 Bannewitz / Possendorf

ISSN 1613-1169
ISBN 978-3-86780-585-8



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

Tagungsband

29. Dresdner Brückenbausymposium

Institut für Massivbau

Freunde des Bauingenieurwesens e.V.

TUDIAS GmbH

11. und 12. März 2019

Inhalt

Herzlich willkommen zum 29. Dresdner Brückenbausymposium	9
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. DEng/Auckland Hans Müller-Steinhagen, Rektor der TU Dresden</i>	
Verleihung der Wackerbarth-Medaille	13
Laudatio für Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stritzke aus Anlass der Verleihung der Wackerbarth-Medaille der Ingenieurkammer Sachsen	14
<i>Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
Christian Menn – Brückenbauer, Lehrer, Ästhet	17
<i>Dr.-Ing. Silke Scheerer, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach</i>	
Aktuelles zum Regelwerk des Bundes für den Ingenieurbau	25
<i>TRDir Prof. Dr.-Ing. Gero Marzahn</i>	
Die Maputo-Katembe-Brücke, das neue Wahrzeichen Mosambiks – Drei Bauverfahren bei der längsten Hängebrücke Afrikas	29
<i>Dipl.-Ing. Joern Seitz, Dipl.-Ing. (FH) Martin Pohl</i>	
Monitoring und Visualisierung im Infrastrukturbau.....	47
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Mark, Dr.-Ing. David Sanio, Dr.-Ing. Steffen Schindler</i>	
Verkehrsinfrastruktur für Hamburg – Neubau der Waltershofer Brücken im Hamburger Hafen.....	59
<i>Dr.-Ing. Christoph Vater</i>	
Erfahrungsbericht aus Österreich über die Anwendung von neuen Verfahren im Brückenbau	73
<i>o.Univ.Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Benjamin Kromoser, Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Eichwalder</i>	
Stahlverbund-Großbrücken mit oberliegender Fahrbahn als Querschnitte mit Teilfertigteilen und Schrägstreben bzw. Konsolen	85
<i>Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler, Dipl.-Ing. Gregor Gebert</i>	
Kurt Beyers Beitrag zur Baustatik	101
<i>Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Karl-Eugen Kurrer</i>	
Nachrechnungsdefizite bei Massivbrücken – Ein Problem der Tragfähigkeit oder [doch nur] der Modellvorstellung?	129
<i>Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer; Sebastian Gehrlein, M.Sc.; Nicholas Schramm, M.Sc.; Marcel Nowak, M.Sc.</i>	
Was tun, wenn Annahmen und Realität nicht zusammenpassen?	149
<i>Dr.-Ing. Hans-Gerd Lindlar, Dr.-Ing. Stefan Franz, Dipl.-Ing. Lars Dietz, Dr.-Ing. Bastian Jung, M. Eng. Tarik Tiyma</i>	
Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile von Brücken- und Tunnelbauwerken	161
<i>Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka, Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Anne Rausch, Dr.-Ing., MBA und Eng. Marc Zintel, Dipl.-Ing., MBA Luzern Christian Linden</i>	
Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken mit Halbfertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton	173
<i>Dr.-Ing. Frank Jesse, Dipl.-Ing. Andreas Apitz, Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich</i>	
Der 30-Jahre-Zyklus der Brückeneinstürze und seine Konsequenzen	185
<i>Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Proske</i>	
Chronik des Brückenbaus	197
<i>Zusammengestellt von Dipl.-Ing. (FH) Sabine Wellner</i>	
Inserentenverzeichnis	207

Nachrechnungsdefizite bei Massivbrücken – Ein Problem der Tragfähigkeit oder [doch nur] der Modellvorstellung?

*Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer; Sebastian Gehrlein, M.Sc.; Nicholas Schramm, M.Sc.; Marcel Nowak, M.Sc.
Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau*

1 Einleitung

Unsere reale Umwelt – sowohl die natürliche, als auch die vom Menschen geschaffene – ist geprägt von einer schier unbegrenzten Vielzahl unterschiedlicher Prozesse, Mechanismen und Systeme, häufig mit einem hohen Grad an Komplexität und einer Fülle von Attributen. Die Erforschung und Beschreibung dieser realen Umwelt ist die Aufgabe der Natur- und Ingenieurwissenschaften. In vielen Bereichen gelingt es jedoch nicht, die beobachteten Phänomene gemäß den tatsächlich ablaufenden Mechanismen und Prozessen „exakt“ zu beschreiben und so das jeweilige Verhalten der Systeme ohne jegliche Streuung und Fehler wirklichkeitsgetreu zu prognostizieren.

Die Gründe hierfür liegen meist in einem noch unzureichenden Kenntnisstand der jeweiligen Wissenschaften oder in der schieren Komplexität des betrachteten Problems. Häufig aber ist eine exakte, wirklichkeitsgetreue Beschreibung mit Blick auf die Handhabbarkeit in der praktischen Anwendung auch gar nicht wünschenswert. Hier ist es zielführend, Modelle zu verwenden, also ein vereinfachtes Abbild der Wirklichkeit, in dem lediglich die für einen bestimmten Anwendungsfall relevanten Attribute erfasst werden, um somit die Komplexität auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Die Beschreibung der einzelnen Systeme und Vorgänge, sowie auch deren Zusammenspiel, erfolgt nun nicht mehr „exakt“, sondern nur noch „näherungsweise“. Entsprechend ergeben sich Unschärfen in den Prognosen des tatsächlichen Verhaltens oder Zustands. Je nach Anwendungszweck sollte ein Modell daher einerseits so genau wie nötig, andererseits so einfach wie möglich gewählt werden.

Auch die statische Berechnung und der Nachweis einer ausreichenden Tragsicherheit (oder auch Gebrauchstauglichkeit) von Ingenieurbauwerken basiert auf einer Reihe von Abstraktionen, die – sofern allgemein anerkannt – in Empfehlungen, Regelwerken und Normen verankert werden. Wesentlich

ist dabei, dass die verwendeten Modelle möglichst allgemeingültig (nicht bauwerkspezifisch) und damit zur Nachweisführung bei einer Vielzahl von Bauwerken anwendbar sind. Es muss jedoch für alle Bauwerke zwingend ein ausreichendes (und gesellschaftlich akzeptiertes) Mindestsicherheitsniveau erreicht werden. Um dies nachzuweisen, werden die sich aus den Modellen ergebenden ungünstigsten (maximalen) Tragwerksbeanspruchungen mit den prognostizierten ungünstigsten (geringsten) Bauteilwiderständen verglichen. Dies führt dazu, dass allgemeingültige Modelle immer eine Art „Einhüllende“ darstellen müssen, welche durch die ungünstigsten Anwendungskonstellationen bestimmt wird und für die restlichen Anwendungsfälle auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefert. Dabei sind die im Regelfall für den Neubau entwickelten Modelle der Regelwerke auch dadurch gekennzeichnet, dass zusätzliche Reserven für zukünftige Entwicklungen häufig bereits in den Nachweisformaten mit integriert sind.

Während ein etwas konservativeres Modell und die Berücksichtigung zusätzlicher Reserven bei der Planung neuer Bauwerke im Regelfall zu nur unwesentlichen Mehrkosten bei der Herstellung führen (z. B. geringfügig vergrößerte Querschnitte und/oder zusätzliche Bewehrung und Vorspannung), ergeben sich damit bei Anwendung in der Beurteilung des Bauwerksbestands, z. B. bei der Nachrechnung bestehender Brücken, entsprechend große rechnerische Defizite. Um diese zu kompensieren, sind entweder verkehrliche Einschränkungen (z. B. Lastbegrenzung, Sperrung von Fahrstreifen) oder strukturelle Verstärkungsmaßnahmen erforderlich, die meist einen großen Aufwand und entsprechende Kosten nach sich ziehen. Um die rechnerischen Defizite zu reduzieren, die Lebens-/Nutzungsdauer der Bauwerke zu verlängern und erforderliche Ertüchtigungen auf das tatsächlich erforderliche Maß zu beschränken, kommt bei der Beurteilung des Bauwerksbestands möglichst wirklichkeitsnahen Modellen eine ganz entscheidende Bedeutung zu.

2 Brückennachrechnung, Modelle

In Deutschland existieren insgesamt über 130.000 Brücken, davon etwa 25.000 im Bereich der Eisenbahnen und rund 51.400 Einzelbauwerke im Netz der Bundesfernstraßen, von denen der größte Anteil in Stahlbeton- (ca. 17 %) und mit rund 70 % insbesondere in Spannbetonbauweise im Zeitraum zwischen 1965 und 1985 errichtet wurden [1]. Für die Bemessung von Straßenbrücken kam bis 1985 das Lastmodell SLW 60 nach DIN 1072 [2] für die Brückenklasse 60 zum Einsatz, wodurch sich bezogen auf das damalige Belastungsniveau hohe Reserven der Tragfähigkeit ergaben [3]. Durch stetige Zunahme der Verkehrsmengen und -belastung, insbesondere durch den überproportional ansteigenden Anteil an Schwerlastverkehr und genehmigungspflichtigen Schwertransporten, sowie die kontinuierliche Fortschreibung bzw. Anpassung der normativen Grundlagen zur Berechnung und Bemessung haben sich die gestellten Anforderungen an die Bauwerke stetig verändert und verschärft. Infolgedessen ergeben sich bei der Nachrechnung von bestehenden Brücken in vielen Fällen teilweise erhebliche rechnerische Defizite [4], [5], bei Massivbrücken insbesondere beim Nachweis der Querkrafttragfähigkeit. Dagegen zeigt sich jedoch in der Praxis, dass trotz der zum Teil deutlichen Überschreitung von Nachweisen oftmals keine entsprechenden Schadensbilder an den betroffenen Bauwerken zu erkennen sind. Es steht daher zu vermuten, dass viele der identifizierten Defizite rechnerischer Natur sind und die bestehenden Brücken entweder größere Tragreserven besitzen (die mit den aktuellen Modellen zur Beschreibung der Tragwerkswiderstände nicht hinreichend erfasst werden) oder/und die auf die konkreten Bauwerke wirkenden Verkehrsbelastungen deutlich geringer sind, als die allgemeinen Einwirkungsmodelle der Regelwerke vorhersagen.

Aus diesem Grund befassen sich derzeit viele Forschungsarbeiten zur Beurteilung bestehender Brücken mit der Erweiterung und Verbesserung der Modelle, so dass bei der Nachrechnung konkreter Bauwerke möglichst wirklichkeitsnahe Aussagen zur tatsächlichen Beanspruchung und Tragfähigkeit möglich sind. Die Arbeiten zielen dabei einerseits auf die Formulierung strecken- und objektbezogener Einwirkungen, andererseits auf die genauere Modellbildung zur Beschreibung der Tragwiderstände.

Zum Verständnis der Potentiale *objektspezifischer Verkehrslastansätze* ergibt sich ein wichti-

ger Aspekt aus der Tatsache, dass Verkehrslastmodelle in aktuellen Normen und Regelwerken (vgl. [6] oder [7]) nicht etwa die eigentliche Verkehrseinwirkung (beschrieben durch sich über die Brücke bewegende Achslasten) abbilden, sondern vielmehr die daraus resultierenden Verkehrsbeanspruchungen (d. h. die Tragwerksreaktionen aus der Verkehrseinwirkung). Letztere werden neben der Charakteristik des tatsächlichen Verkehrs auch durch das untersuchte Brückenbauwerk selbst maßgeblich beeinflusst. Verkehrsbeanspruchungen sind somit immer „objektspezifisch“. Im Gegensatz hierzu sind die normativen Lastmodelle, die diese Verkehrsbeanspruchungen abbilden, eher „universell“ konzipiert. Mit einem einzigen Modell sollen möglichst alle praktischen Anwendungsfälle abgedeckt und zudem pauschal auch zukünftige Entwicklungen berücksichtigt werden. Für die einfache Handhabung in der Praxis ist ein solcher universeller Lastansatz zweifelsohne von Vorteil. Jedoch entspricht er immer einer „Einhüllenden“, die selbst die ungünstigsten Anwendungsfälle abdecken muss, für einen Großteil der Fälle jedoch einen mehr oder minder konservativen Ansatz darstellt. Genau aus diesem Gegensatz der tatsächlichen Verkehrsbeanspruchung für einen spezifischen Anwendungsfall (spezifische Verkehrscharakteristik, spezifisches Tragwerk) und dem durch ein universelles Lastmodell abgebildeten Beanspruchungsniveau ergibt sich das grundsätzliche Potential für objektbezogene, realitätsnahe Verkehrslastansätze.

In ähnlicher Weise zielen auch die der Bemessung und dem Nachweis eines ausreichenden *Tragwiderstandes* zugrunde liegenden Modelle darauf ab, ein möglichst breites Spektrum an Parametern abzudecken und in der Handhabung einfach und verständlich zu sein, nicht zuletzt um eine Fehleranfälligkeit durch komplizierte Nachweisführungen zu vermeiden. Dabei sind die auf mechanischer oder semiempirischer Grundlage entwickelten Nachweisformate jeweils so ausgelegt, dass selbst für ungünstigste Parameterkonfigurationen ein ausreichendes Sicherheitsniveau gewährleistet ist. Für Neubauten ergeben sich damit eine robuste Bemessungsgrundlage und gewisse Reserven für zukünftige Entwicklungen. Um jedoch für den Nachweis bestehender Brücken geeignete Grundlagen für eine wirklichkeitsnahe Beurteilung der tatsächlichen Tragfähigkeit zu erhalten, sind verfeinerte Modelle erforderlich, die die sich einstellenden Trag- und Versagensmechanismen – für das jeweils konkret betrachtete Brückenbauwerk – möglichst zutreffend wiedergeben.

3 Objektbezogene Einwirkungen

3.1 Möglichkeiten und Potentiale objektspezifischer Verkehrs-lastansätze

Eine Möglichkeit zum Umgang mit theoretisch ermittelten, rechnerischen Defiziten im Rahmen der Beurteilung von Bestandsbauwerken besteht in der Aktivierung wertvoller Reserven in der Nachweisführung auf Seiten der Einwirkungen auf Brückentragwerke. Hier können realitätsnahe, objektspezifische Modelle einen Beitrag zur Reduktion der rechnerischen Defizite leisten. Mit den veränderlichen Beanspruchungen aus dem Straßenverkehr als häufig dominante Einwirkungsart für Straßenbrücken ergeben sich hier die größten Potentiale in Bezug auf objektspezifische Lastansätze für eine Anwendung in der Brückennachrechnung.

Die Potenziale von objektspezifischen Verkehrslastansätzen entspringen hauptsächlich dem Kontrast zwischen der Komplexität des tatsächlichen Belastungsprozesses eines Brückenbauwerks infolge Straßenverkehrs und den demgegenüber stark vereinfachten Modellansätzen aus Normen und Regelwerken zur Abbildung dieser Einwirkungen im Rahmen der Tragwerksberechnung zur Anwendung in der Ingenieurspraxis.

Auf Grundlage der in Abschnitt 2 erläuterten Zusammenhänge zwischen Lastmodellen aus Regelwerken und den tatsächlichen Beanspruchungen infolge Straßenverkehrs ergeben sich vielfältige Möglichkeiten für die Anwendung wirklichkeitsnaher Verkehrslastansätze im Rahmen der Nachrechnung von Bestandsbrücken. Hierfür wird der Begriff des „Objektbezugs“ eingeführt, der beschreibt, wie konkret ein Lastansatz auf die tatsächlichen Verhältnisse eines spezifischen Anwendungsfalls abgestimmt ist. Ein geringer Objektbezug bedeutet hierbei, dass ein Lastansatz eher als Einhüllende vieler verschiedener Anwendungsfälle betrachtet werden kann.

Normenlastmodelle haben geringen bis überhaupt keinen Objektbezug. Mit zunehmendem Objektbezug werden in der konkreten Anwendung immer mehr Informationen zur vorherrschenden Verkehrscharakteristik und dem untersuchten Tragwerk für die Ermittlung des Lastansatzes berücksichtigt, womit eine zunehmende Aktivierung tatsächlich vorhandener Reserven bezüglich der Verkehrseinwirkungen gelingen kann. Realitätsnahe Verkehrslastansätze können je nach zulässigem Aufwand und erhofftem Nutzen mit variablem Objektbezug definiert werden. Dieser Objektbezug kann über verschiedene, sogenannte Objektbezugsstufen (OBS) definiert und gesteuert werden (vgl. Bild 1).

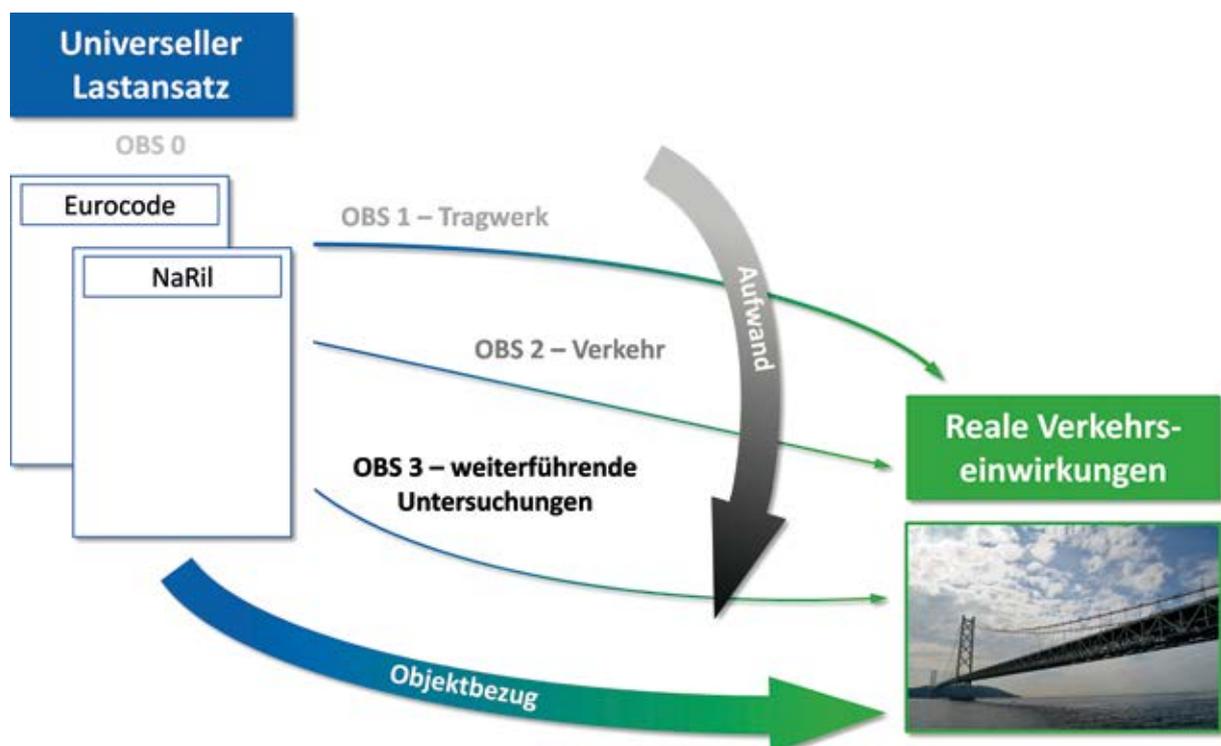


Bild 1 Konzept der Objektbezugsstufen für realitätsnahe Verkehrslastansätze Grafik: Marcel Nowak [8]

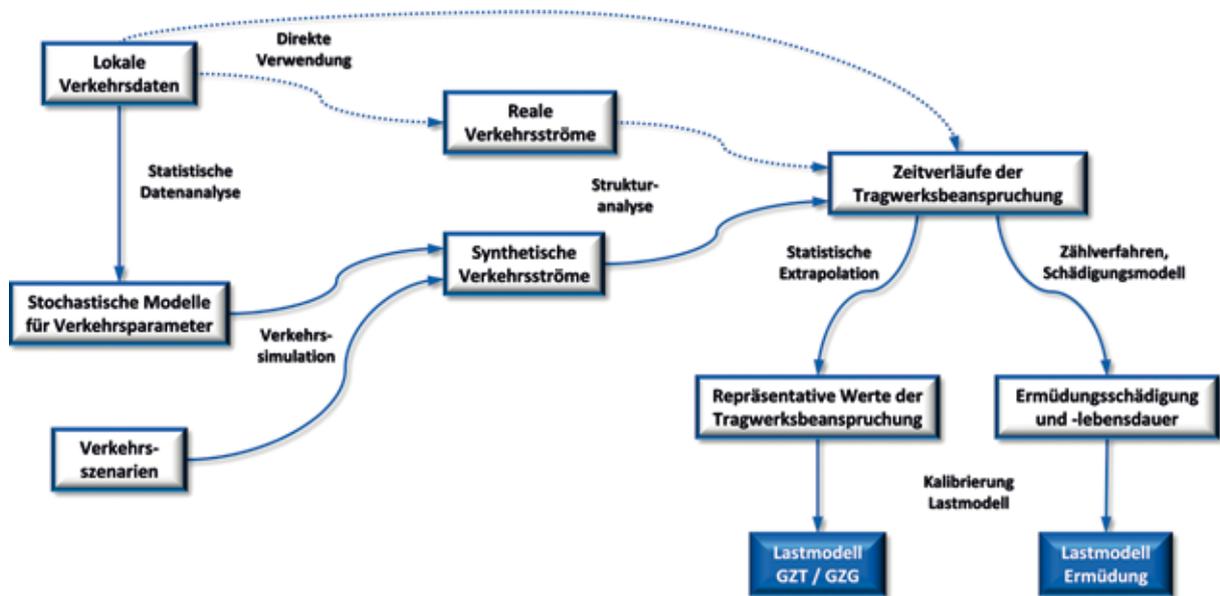


Bild 2 Allgemeine Vorgehensweise zur Ermittlung objektspezifischer Verkehrslastansätze

Grafik: Marcel Nowak [8]

Mit einer solchen differenzierten und flexiblen Vorgehensweise können der Detaillierungsgrad der verschiedenen Einflussgrößen eines Lastmodells hinsichtlich

- ❑ des Tragwerks (Gruppe von Bauwerken gleichen Typs, eines konkreten Bauwerks, der konkreten Nachweisstelle innerhalb des Bauwerks),
- ❑ des Verkehrs (lokale Zusammensetzung des Verkehrs, lokaler Verkehrsfluss, lokale Fahrzeugparameter, streckenbezogenes Staurisiko) und
- ❑ weiterer relevanter Aspekte (Schwingbeiwert, objektbezogene Sicherheitselemente, vollprobabilistische Analysen)

variabel definiert und so das Anwendungsspektrum des ermittelten Lastansatzes gesteuert werden. Es können somit Lastansätze entwickelt werden, die für einen ganzen Streckenzug (ein bestimmter Verkehrstyp, viele verschiedene Bauwerkstypen), für einen bestimmten Bauwerkstyp unabhängig von der Lage im Streckennetz (ein bestimmter Bauwerkstyp, viele unterschiedliche Verkehrstypen) oder für eine ganz konkrete Nachweisstelle in einer bestimmten Brücke gültig sind [8].

Für eine mögliche Praxisanwendung objektbezogener Verkehrslastansätze im Rahmen von Brückennachrechnungen bietet die Nachrechnungsrichtlinie [7] – mit der prinzipiellen Möglichkeit einer vertieften Nachweisführung

in Stufe 3 (Messungen am Bauwerk) und Stufe 4 (Anwendung wissenschaftlicher Methoden) – den grundsätzlichen Rahmen. Bei verbleibenden rechnerischen Defiziten in Stufe 2 (Anwendung der „universellen“ Lastmodelle des Regelwerks bei der Berechnung) kann die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, durch den zusätzlichen Objektbezug und eine realitätsnähere Beschreibung das am spezifischen Bauwerk anzusetzende Lastniveau weiter zu reduzieren, ohne dadurch das geforderte Sicherheitsniveau zu unterschreiten.

3.2 Vorgehensweise zur Ermittlung objektspezifischer Verkehrslastansätze

Das Vorgehen zur Entwicklung *objektbezogener Verkehrslastansätze* für Straßenbrücken [8] (vgl. Bild 2) orientiert sich an bereits existierenden Methoden, die im Rahmen der Entwicklung und Kalibrierung der normativen Lastmodelle verwendet wurden, siehe z. B. [9], [10].

Auf Grundlage von Messdaten zu der zu untersuchenden Verkehrscharakteristik werden zunächst numerische Verkehrsströme für die weiterführenden Untersuchungen abgebildet. Mit der flexiblen Methode der Verkehrssimulation ist neben der tatsächlich vorhandenen Verkehrsbeanspruchung zusätzlich eine Analyse von verschiedensten Verkehrsszenarien möglich. Dafür können synthetische Verkehrsströme generiert werden, die künftige Ver-

kehrsentwicklungen oder auch verkehrliche Kompensationsmaßnahmen zur Lastreduzierung abbilden können. Dies ermöglicht eine umfassende Untersuchung und Bewertung der Verkehrsbeanspruchung auf Brückenbauwerke.

Aus den resultierenden Tragwerksbeanspruchungen für maßgebende Strukturantwortparameter eines Bauwerks werden mit Methoden der statistischen Extrapolation repräsentative Werte mit definierter Auftretenswahrscheinlichkeit ermittelt. Diese Werte dienen dann zur Kalibrierung der objektspezifischen Verkehrslastmodelle für die maßgebenden Grenzzustände der Tragfähigkeit (GZT) und der Gebrauchstauglichkeit (GZG). Prinzipiell erlaubt die Vorgehensweise auch eine Analyse der Ermüdungsbeanspruchung der Brückenbauwerke, indem aus den Tragwerksreaktionen infolge des Straßenverkehrs die resultierenden Ermüdungsbeanspruchungen ermittelt werden und somit modifizierte Ermüdungslastmodelle abgeleitet werden können [8].

3.3 Anwendungsbeispiel – Grundsatzzuntersuchungen BAB 92

Im Rahmen eines gemeinsam mit der Autobahndirektion Südbayern initiierten und am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München (TUM) durchgeführten Forschungsvorhabens zur Nachrechnung und Beurteilung von Brückenbauwerken im Zuge

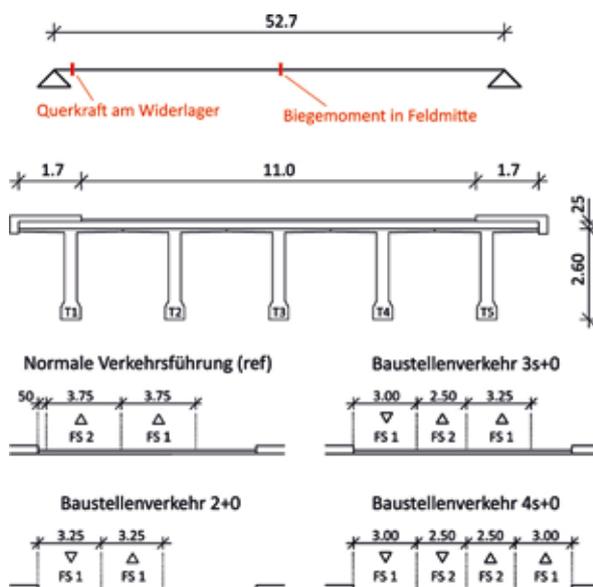


Bild 3 Beispielbauwerk der BAB 92: statisches System, Querschnitt und untersuchte Verkehrsführungen

Grafik: Marcel Nowak [11]

eines gesamten Streckenzugs (hier: der Bundesautobahn 92 zwischen München und Degendorf) wurden die Potentiale objektspezifischer Verkehrslastansätze für eine Gruppe repräsentativer Bauwerke näher untersucht. Nachfolgend werden an einem ausgewählten Beispielbauwerk ein Auszug der Ergebnisse dieser Untersuchungen präsentiert und die Auswirkungen eines zunehmenden Objektbezugs auf die resultierenden Lastansätze bewertet. System, relevante Antwortparameter und untersuchte Verkehrsführungen sind in Bild 3 dargestellt.

Referenz für die ermittelten Lastansätze sind die sich aus dem Grundmodell LM1 des Eurocodes [6] ($\alpha_{Qi} = \alpha_{qi} = 1,0$) als universelles Lastmodell ohne jeglichen Objektbezug bezüglich Tragwerk oder Verkehr ergebenden Beanspruchungen. Ausgehend hiervon wurden für die Kalibrierung der verschiedenen objektbezogenen Lastansätze (hier: charakteristischer Wert mit einer Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren) pauschale – für die Belastungskomponenten TS und UDL einheitliche – Anpassungsfaktoren α_{mod} ($\alpha_{Qi} = \alpha_{qi} = \alpha_{mod}$) ermittelt, die einen anschaulichen und einfachen Vergleich der resultierenden Lastniveaus erlauben.

Zur Untersuchung der Auswirkung eines zunehmenden Objektbezugs bezüglich des Tragwerks wurden die Anpassungsfaktoren für die einzelnen Antwortgrößen – sowohl separat je Träger als auch als ungünstigster Wert einer Einhüllenden – ermittelt. Bezüglich des Verkehrs wurden dabei verschiedene Verkehrsbedingungen simuliert. Neben dem Verkehr A61 mit sehr extremen Verkehrsbedingungen (gemäß [10]) wurde zusätzlich ein Verkehrstyp A92 auf Grundlage von lokalen Verkehrsdaten untersucht. Für weiterführende Informationen wird auf [11] verwiesen. Bild 4 zeigt die Auswertung der Simulationsergebnisse und den Vergleich zur Referenzbeanspruchung infolge LM1.

Tabelle 1 fasst die aus den Untersuchungen resultierenden pauschalen Anpassungsfaktoren α_{mod} zusammen. Der Einfluss des Objektbezugs „Tragwerk“ (variierende Werte für die Anpassungsfaktoren zwischen den beiden betrachteten Antwortparametern sowie zwischen den einzelnen Brückenträgern) sowie des Objektbezugs „Verkehr“ (variierende Werte für die Anpassungsfaktoren zwischen Verkehrstyp A61 und A92) ist offensichtlich. Die Ergebnisse lassen deutlich das Potential in Bezug auf eine mögliche Reduzierung des zu berücksichtigenden Verkehrslastniveaus durch

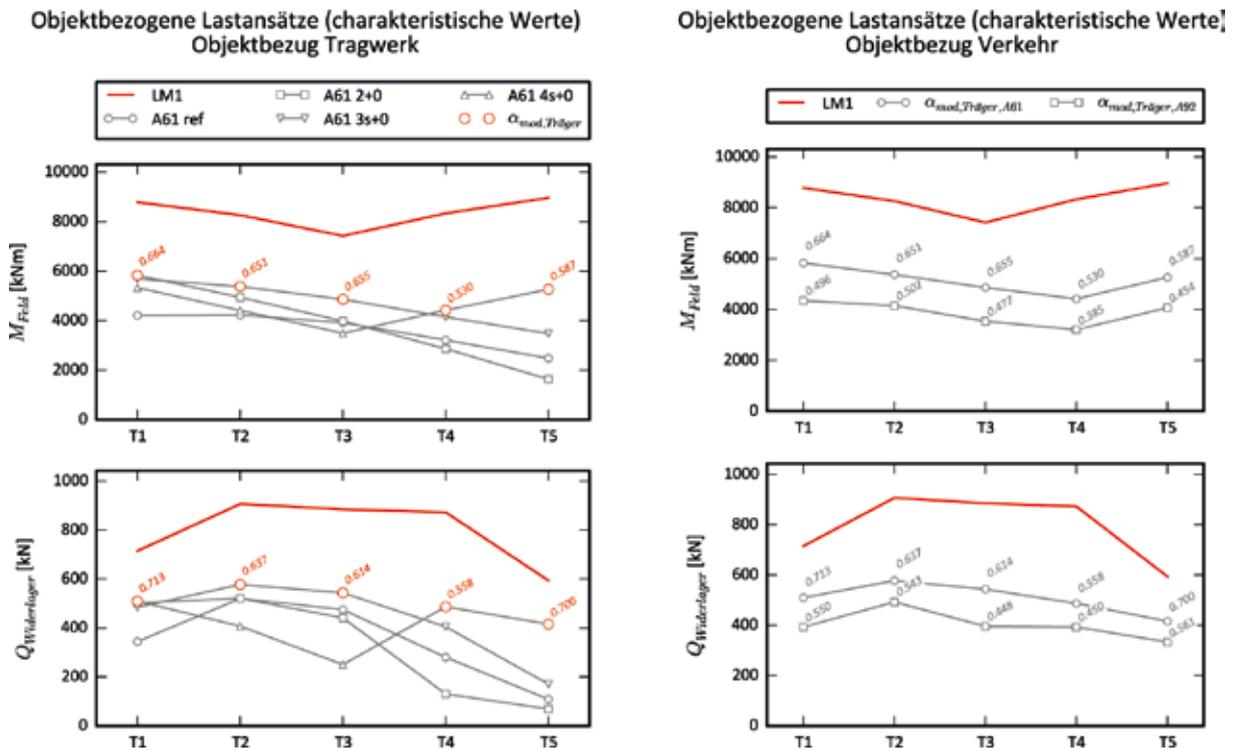


Bild 4 Charakteristische Werte der Tragwerksbeanspruchung – Auswirkung Objektbezug Tragwerk (links) und Verkehr (rechts) Grafik: Marcel Nowak [11]

den zusätzlichen Objektbezug des Lastansatzes erkennen. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass diese Ergebnisse spezifisch für das untersuchte Beispieltragwerk sind und nicht ohne Weiteres auf andere Bauwerke übertragen werden können.

3.4 Anwendungsbeispiel – Gänstorbrücke Ulm

Die Gänstorbrücke über die Donau, die die beiden Städte Ulm und Neu-Ulm verbindet, wurde im Jahr 1950 als gelenkloses Rahmentragwerk mit einer Spannweite von 82,4 m errichtet. Die Gesamtbreite des Bauwerks beträgt 18,6 m, der Überbau ist jedoch durch eine mittige Längsfuge in zwei Hälften geteilt. Je Überbauhälfte besteht der Querschnitt aus einem zweistufigen Plattenbalken mit über die Bauwerkslänge bogenförmig veränderlichen Kons-

truktionshöhen von 4,2 m (am Widerlager) bis 1,2 m (Feldmitte) [12].

Im Zuge der Brückennachrechnung und weiterer umfangreicher Zusatzbetrachtungen erfolgte u. a. eine Bewertung des Verkehrslastniveaus für verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Verkehrsführungen. Nachfolgend wird ein Auszug der Ergebnisse für das Szenario einer bauzeitlichen Verkehrsführung auf dem Bauwerk präsentiert. In diesem Szenario erfolgt ein Teilabbruch des Bestandsbauwerks und der Verkehr für beide Fahrrichtungen soll über die verbleibende Überbauhälfte als Begegnungsverkehr mit jeweils einer Fahrspur je Fahrrichtung geführt werden. Das Tragsystem der Gänstorbrücke, relevante Antwortparameter und untersuchte Verkehrsführungen sind in Bild 5 dargestellt. Bild 6 zeigt die Einflusslinien entlang der Längsachsen der Fahrspuren für die untersuchten Antwortparameter.

Tabelle 1 Anpassungsfaktoren α_{mod} für Beispielbauwerk BAB 92

Antwortparameter	Verkehrstyp	
	A61	A92
M_{Feld} (je Träger)	0,53 ... 0,66	0,39 ... 0,50
$Q_{Widerlager}$ (je Träger)	0,56 ... 0,71	0,45 ... 0,56
Einhüllende	0,71	0,56

Die objektbezogenen Verkehrslastansätze wurden als charakteristischer Wert mit einer Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren ermittelt. Referenz zur Bewertung des Verkehrslastniveaus sind die Beanspruchungen infolge Lastmodell BK 30/30 gemäß DIN 1072:1985 [2], das als Ziellastniveau für das Szenario

KOMPETENZ WEITERBILDUNG BAU

BERUFSBEGLEITEND · PRAXISNAH · ANERKANNT
QUALITÄT SEIT MEHR ALS 25 JAHREN

STATIK UND BAU KONSTRUKTION

Massivbau
Carbonbeton
Ingenieurbau

BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)

Grundlagen
Koordination
Implementierung

BRANDSCHUTZ

Brandschutzkonzepte
Gebäudetechnik
Fachbauleitung

VERKEHRSWEGE BAU

Straßen- und Wegebau
NEU! Radverkehr
Pflasterbau

ENERGIE EFFIZIENZ

Energieberatung
Effizienzhaus
Förderprogramme

ERHALTUNG UND SANIERUNG

Betonerhaltung
Bauschadensbewertung
Bautenschutz und Bausanierung

ANMELDUNG UND DETAILS
WWW.EIPOS.DE

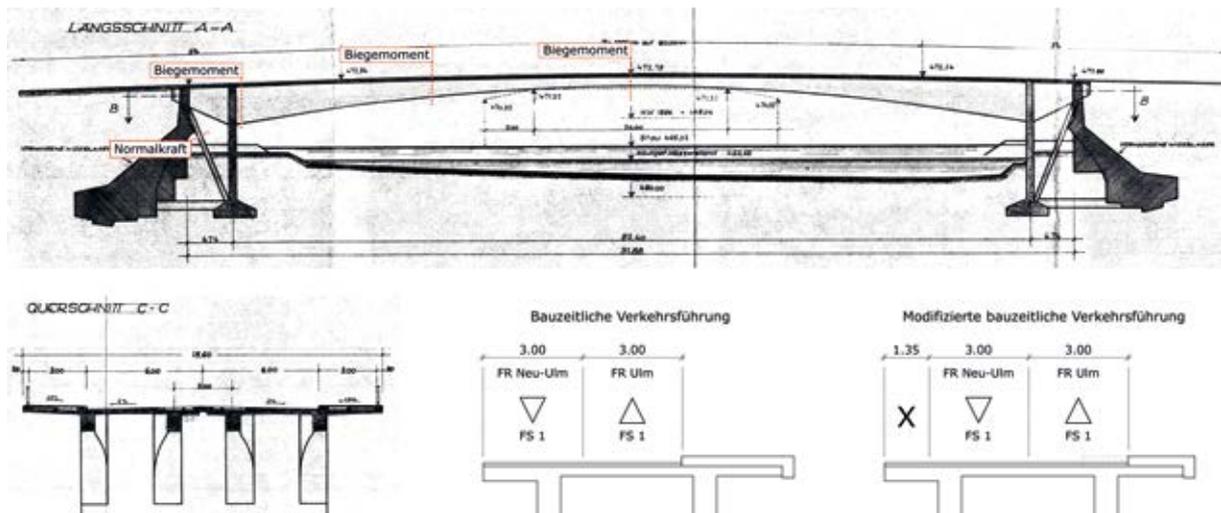


Bild 5 Gänstorbrücke Ulm: statisches System, Querschnitt und untersuchte Verkehrsführungen
 Grafik: Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München

rio einer bauzeitlichen Verkehrsführung vorgegeben wurde.

Die Abbildung des lokalen Verkehrs an der Gänstorbrücke erfolgt auf Grundlage von Messdaten aus einer Verkehrserfassung am Bauwerk. Hierfür wurde hinter dem Brückende auf Seite der Stadt Neu-Ulm eine Messeinheit bestehend aus Laserscanner und Webcam installiert, welche für knapp zwei Monate den die Brücke in beiden Fahrtrichtungen passierenden Verkehr erfasste. Die Auswertung der umfangreichen Messdaten erlaubte eine realitätsnahe Abbildung der lokalen Verkehrsscharakteristik hinsichtlich Verkehrsaufkommen, Verkehrsfluss und Verkehrszusammensetzung für die weiterführenden Untersuchungen.

In einem ersten Schritt erfolgte die Bewertung des Verkehrslastniveaus für die bauzeitliche Verkehrsführung unter Zugrundelegung des

ursprünglichen Fahrbahnverlaufes auf der verbleibenden Überbauhälfte (siehe hierzu Bild 5, „bauzeitliche Verkehrsführung“). Die resultierenden Tragwerksbeanspruchungen sind in Bild 7 dargestellt. Generell kann beobachtet werden, dass das Beanspruchungsniveau zur Feldmitte hin zunimmt. Aufgrund der außermittigen Lage der Fahrbahn zur Bauwerkslängsachse kommt es zudem zu einer stärkeren Beanspruchung des innenliegenden Brückenträgers. Das Biegemoment in Feldmitte überschreitet sogar das Beanspruchungsniveau infolge des Ziellastniveaus BK 30/30.

In einem zweiten Schritt erfolgte daher die Analyse einer angepassten Verkehrsführung für die Bauzeit (Bild 5, „modifizierte bauzeitliche Verkehrsführung“), in welcher der Fahrbahnverlauf so verändert wird, dass die Fahrbahnachse möglichst mittig auf dem Bauwerk liegt. Die in Bild 8 dargestellten resultierenden

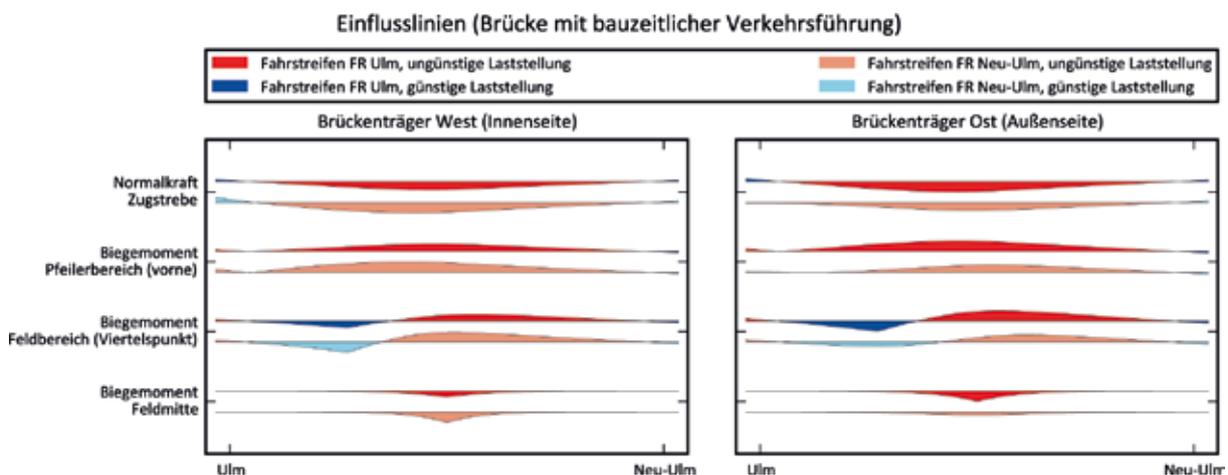


Bild 6 Einflusslinien entlang der Längsachsen der Fahrspuren für die untersuchten Antwortparameter
 Grafik: Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München

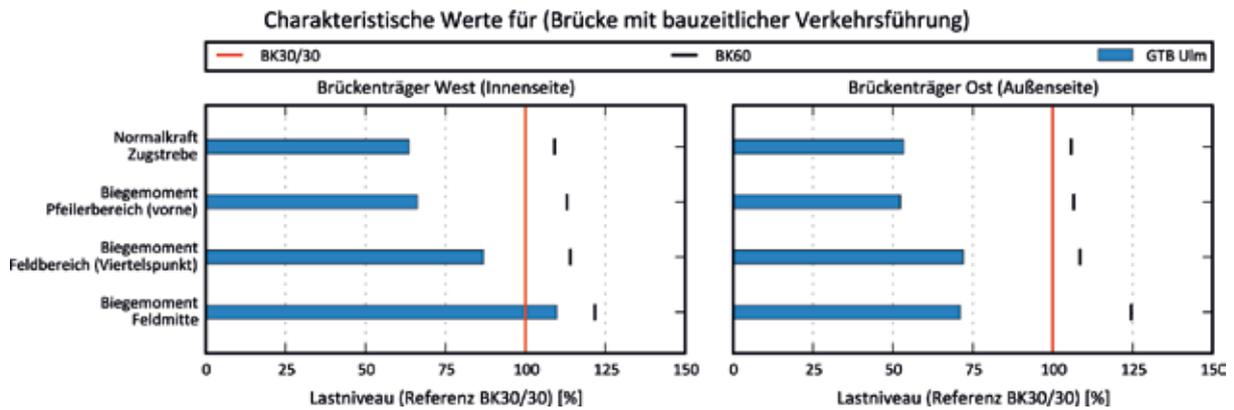


Bild 7 Charakteristische Werte der Tragwerksbeanspruchung für Brücke mit bauzeitlicher Verkehrsführung
Grafik: Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München

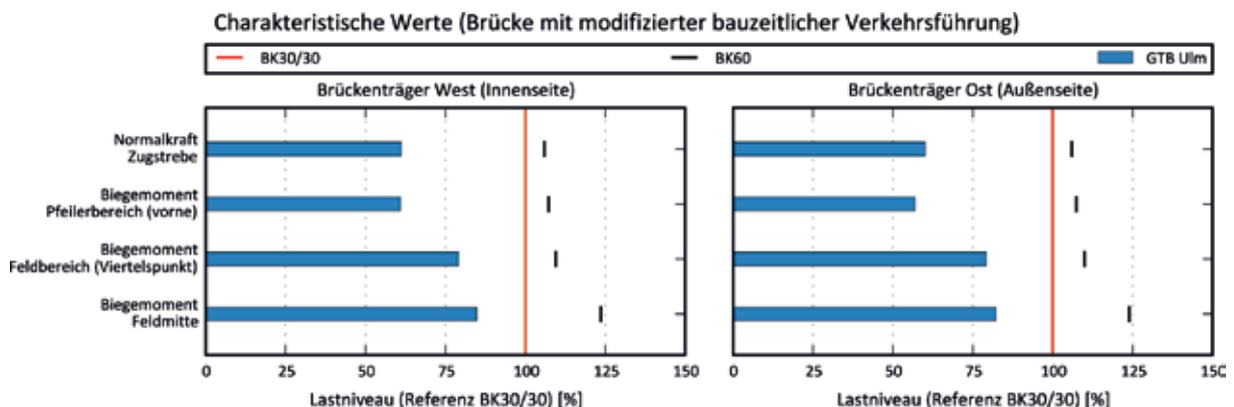


Bild 8 Charakteristische Werte der Tragwerksbeanspruchung für Brücke mit modifizierter bauzeitlicher Verkehrsführung
Grafik: Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München

Tragwerksbeanspruchungen zeigen, dass dadurch das Beanspruchungsniveau der beiden Brückenträger angeglichen werden kann. Die Tendenz eines zunehmenden Beanspruchungsniveaus zur Feldmitte hin ist weiterhin vorhanden, es kommt jedoch an keiner Stelle zu einer Überschreitung des Ziellastniveaus. Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse wurde eine entsprechende Empfehlung gegeben, die Fahrbahn für die bauzeitliche Verkehrsführung möglichst mittig auf dem Bauwerk anzuordnen.

4 Wirklichkeitsnahe Tragwiderstände

4.1 Allgemeines

Die Nachrechnung von Bestandsbrücken erfordert im Vergleich zur Planung neuer Brückenbauwerke ein angepasstes Vorgehen und auch ein verändertes Denken der planenden Ingenieure. Wesentliche Zielsetzung ist eine möglichst wirklichkeitsnahe Erfassung der tatsächlichen Tragwiderstände und damit eine

genauer zutreffende Nachweisführung. Kompliziertere und dadurch grundsätzlich fehleranfälliger bzw. ein vertieftes Verständnis erfordernde Nachweisformate können nicht zuletzt deshalb zugelassen werden, da die Nachrechnungsrichtlinie [7] die Nachrechnung eines Bestandsbauwerks durch einen „... in der Aufstellung von schwierigen Standsicherheitsnachweisen für Brückenbauwerke erfahrenen und kompetenten Ingenieur“ fordert.

Jede Modellvorstellung ist an gewisse Grenzen und Anwendungsbedingungen gebunden, wodurch die Erfassung aller Einflussparameter in einem einheitlichen, konsistenten Modell kaum bzw. nicht möglich ist. Somit ist eine Betrachtung entsprechend der vorhandenen Randbedingungen erforderlich. Für die Nachrechnung von Brücken beinhaltet dies eine detailliertere Berücksichtigung der Materialien und Querschnittsparametern sowie die Fortentwicklung der Bautechnik im Bereich des Brückenbaus. Beispielsweise sollten zu früheren Zeiten gängige (und damals auch in den Regelwerken entsprechend verankerte) Baupraktiken, wie z. B. ein sehr geringer Querkraftbewehrungsgehalt

oder eine abweichende konstruktive Durchbildung von Bewehrungsformen, Berücksichtigung in den entsprechenden Modellen zur Ermittlung von Tragwiderständen finden. So scheint es nicht verwunderlich, dass viele Bestandsbrücken teilweise erhebliche rechnerische Defizite aufweisen, aber in der Praxis keine entsprechenden Schadensbilder zu finden sind, vgl. z. B. [5].

4.2 Sonderstellung Querkrafttragfähigkeit

Eine Auswertung der Ergebnisse von nachgerechneten Brückenbauwerken (vgl. [4]) zeigt, dass neben der Ermüdung an Koppelfugen oder Nachweisdefiziten beim Gurtanschluss insbesondere erhebliche rechnerische Defizite bei der Querkrafttragfähigkeit in Brückenlängsrichtung vorliegen. Womöglich lässt sich dieser Umstand auch damit begründen, dass sich die umfassende Beschreibung des Querkraftwiderstands für den gerissenen Zustand II aufgrund von sehr vielen bauwerks- bzw. bauteilspezifischen Einflussfaktoren als äußerst komplex gestaltet. Die vorhandenen Modelle zur Beschreibung des Querkraftwiderstands gründen zudem auf Versuchsdaten, die die Charakteristika von bestehenden Brücken nur unzureichend erfassen. So liegen beispielsweise nur sehr wenige Versuche an Durchlaufträgern oder Versuchsträgern mit baupraktisch relevanten Querschnittsabmessungen vor. Die meisten Querkraftversuche wurden vielmehr an Einfeldträgern mit Punktlast und Querschnittshöhen im Bereich von meist ≤ 250 mm durchgeführt (vgl. [13], [14]). Die geringen Abmessungen der bisher hauptsächlich untersuchten Versuchsträger führen jedoch dazu, dass maßstabsabhängige Effekte, wie z. B. die Rissverzahnung, für baupraktische Querschnittshöhen oftmals nicht ausreichend quantifiziert werden können.

Um eine möglichst realitätsnahe Erfassung sämtlicher maßgebender Einflüsse zu erreichen, ist somit eine entsprechende Erweiterung der vorhandenen Versuchsdatenbanken zwingend erforderlich. Zudem sind weitere experimentelle Untersuchungen zu speziellen

Randbedingungen von Bestandsbrücken auf die Querkrafttragfähigkeit erforderlich. In diesem Zusammenhang sei der Einfluss des bei bestehenden Spannbetonbrücken oftmals sehr geringen Querkraftbewehrungsgrades erwähnt. Darüber hinaus stellt sich auch die Frage nach dem Einfluss sowie der Anrechenbarkeit von aktuell nicht mehr zugelassenen Bügelformen. Des Weiteren sind ergänzende Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten im Bereich der Innenstütze von Durchlaufsystemen (sowohl unter Einzel- als auch Gleichlasten) erforderlich.

Um die Prognose des tatsächlichen Verhaltens vorgespannter Bestandsbrücken zu verbessern und wirklichkeitsnähere Modelle zur Beurteilung der Tragfähigkeiten abzuleiten, werden derzeit am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München (TUM) umfangreiche theoretische und vor allem experimentelle Untersuchungen sowohl an einem neu entwickelten Versuchsstand im Labor („Substruktur-Technik“: Prüfung eines repräsentativen Ausschnitts des Gesamtbauwerks) als auch an realen Bestandsbrücken durchgeführt. Die beiden Untersuchungsansätze, ausgewählte Belastungsversuche sowie die erzielten Versuchsergebnisse sollen nachfolgend vorgestellt und diskutiert werden.

4.3 Experimentelle Untersuchungen im Labor

Im Rahmen eines größeren Verbundforschungsprojektes (vgl. [15]) wurden an der Technischen Universität München umfangrei-

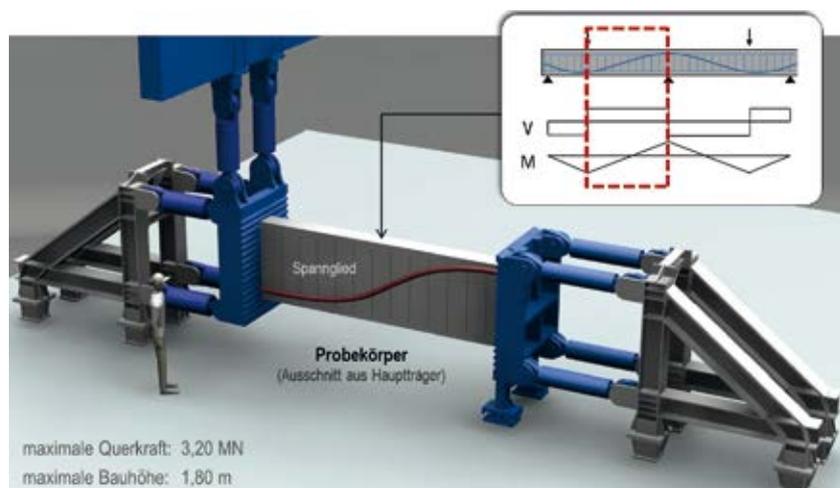


Bild 9 Versuchsaufbau für experimentelle Untersuchungen an vorgespannten Durchlaufträger-Teilsystemen nach dem Prinzip der Substrukturtechnik (simulierter Bereich der Innenstütze eines Durchlaufsystems)
Grafik:
Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München

che experimentelle Untersuchungen zum Einfluss nicht mehr zugelassener Bügelformen sowie generell von einem geringen Querkraftbewehrungsgehalt auf die Querkrafttragfähigkeit durchgeführt (für weiterführende Informationen und Details wird auf [16] verwiesen). Um möglichst viele Einzelversuche mit vergleichsweise geringem Aufwand durchführen und gleichzeitig die Beanspruchungsverhältnisse im Bereich der Innenstütze möglichst realitätsnah abbilden zu können, wurde ein neuartiges Versuchskonzept angewendet. Dabei wurden lediglich ausgewählte Ausschnitte von Spannbetontträgern (sogenannte Substrukturen) geprüft. Bild 9 zeigt eine Animation des Versuchsstands, mögliche maximale Kräfte/Abmessungen und eine Darstellung des Prüfbereichs.

Hauptaugenmerk der Versuche lag auf der Ermittlung des Einflusses von aktuell nicht mehr zugelassenen Bügelformen auf die Querkrafttragfähigkeit. So finden sich bei älteren Massivbrücken in der Praxis oftmals Bügelformen, welche die aktuellen Konstruktions- und Bewehrungsregeln für die bauliche Durchbildung nicht einhalten und damit rechnerisch nicht angesetzt werden dürfen. So wurden oftmals entweder einseitig offene Bügel mit geraden Stabenden oder zweiteilige Bügel, deren Schenkel mit geraden Stabenden eine sehr geringe Übergreifung aufweisen, verwendet. Ein weiteres häufiges Detail bei älteren Massivbrücken sind Steckbügel mit geraden Stabenden, die nicht über die gesamte Steghöhe reichen und meist nur im Stützbereich als Zulagen eingebaut wurden.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit solcher Bügelformen wurden im dargestellten Versuchsstand insgesamt 11 Versuche durchgeführt. Mithilfe faseroptischer Messungen konnten dabei die Dehnungen entlang der Bügelschenkel quasi-kontinuierlich gemessen und so die Tragmechanismen und der Einfluss der unterschiedlichen Bügelformen auf die Querkrafttragfähigkeit systematisch analysiert werden.

Bild 10 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der faseroptischen Messungen für einen oben offenen Bügel mit geraden Stabenden beim Erreichen der maximalen Querkraft. Es zeigt sich eine ungleichmäßige Dehnungsverteilung über die Bügelhöhe, die stark vom (zufälligen) Verlauf der die Bügelschenkel kreuzenden Schrägrisse abhängt, wobei sich dort Dehnungsspitzen ausbilden, wo die vertikalen Bügelschenkel von Schubrissen gekreuzt werden. Kreuzt ein schräger Riss ein gerades Stabende innerhalb

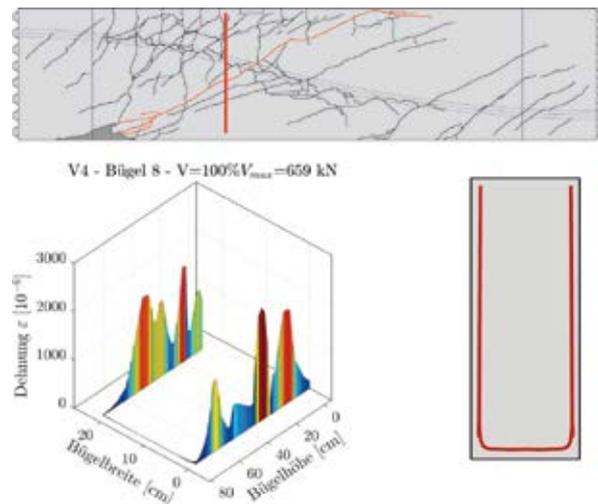


Bild 10 Ergebnisse der faseroptischen Messungen entlang eines oben offenen Bügels mit geraden Stabenden (bei Erreichen der Höchstlast) Grafik: Nicholas Schramm [16]

des Verankerungsbereiches, so kann sich in diesem Bügelabschnitt keine Beanspruchung bis zur Streckgrenze einstellen, da im Vergleich zu geschlossenen Bügeln keine Verankerung in einem horizontalen Schenkel möglich ist. In der Folge reduziert sich die Wirksamkeit dieses Bügels merklich. In den restlichen Bereichen stellt sich hingegen das gleiche Tragverhalten wie bei geschlossenen Bügeln ein. Trotz der reduzierten Wirksamkeit ergibt sich für diese Bügelform jedoch ein deutlicher Beitrag zum Querkraftwiderstand. Ähnliche Beobachtungen ergeben sich auch für die restlichen untersuchten Bügelformen (vgl. auch Abschnitt 4.5).

Neben unterschiedlichen Bügelformen wurde zudem auch der Einfluss des Querkraftbewehrungsgrads untersucht. Bild 11 zeigt einen Vergleich der Bruchquerkräfte für unterschiedliche Bewehrungsgrade sowie den Einfluss der Bügelform auf den Bügeltraganteil bei konstantem Querkraftbewehrungsgrad ($\varnothing 6/25$ cm). In der Auswertung wurde der Bügeltraganteil jeweils aus der Differenz zwischen den gemittelten Bruchlasten (zu den jeweiligen Bügelformen) und dem Mittelwert der Bruchlasten aus den Referenzversuchen ohne Querkraftbewehrung errechnet.

Aus dem Vergleich der Bruchlasten unterschiedlicher, für ältere Spannbetonbrücken typischer Querkraftbewehrungsgrade (siehe Bild 11, links) wird deutlich, dass die restlichen Traganteile sehr dominant sind. Neben der Mitwirkung der geneigten Spannglieder und sonstiger eher untergeordneter Mechanismen ergibt sich der Hauptanteil für die

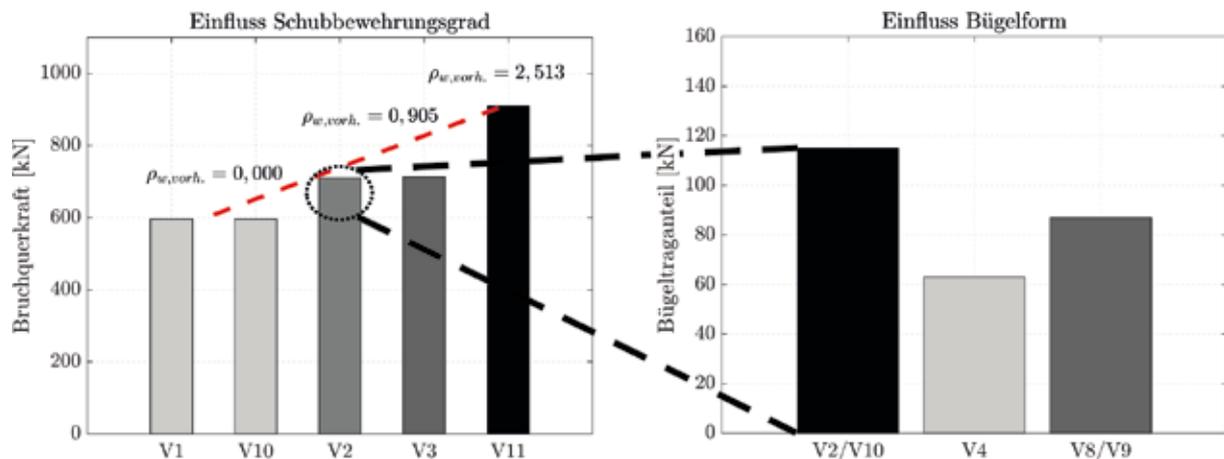


Bild 11: Einfluss des Querkraftbewehrungsgrads auf die Querkrafttragfähigkeit, für konventionelle geschlossene Bügel (linkes Teilbild); Einfluss der Bügelform auf den Traganteil der Bügelbewehrung bei konstantem Querkraftbewehrungsgrad (rechtes Teilbild) Grafik: Nicholas Schramm [16]

Abtragung von Querkräften aus dem Betontraganteil. Ein entsprechender Betontraganteil wird bei der Querkraftbemessung gemäß Fachwerkmodell nach EC 2 [17] aktuell jedoch nicht explizit, sondern lediglich indirekt und in geringerem Maße über einen (für geringe Querkraftbewehrungsgrade fraglichen) Anteil aus Rissreibung berücksichtigt. Dadurch können aktuellere Modellvorstellungen mit expliziter Berücksichtigung eines Betontraganteils die Querkrafttragfähigkeit von Bestandsbrücken zutreffender beschreiben. Der Betontraganteil wird in diesen Modellen entweder empirisch (vgl. [18]) angesetzt, über das Tragverhalten eines Druckbogens (vgl. [19]) beschrieben oder aber der Druckzone (vgl. z. B. [20]) zugesprochen.

4.4 In-situ-Großversuche (Beispiel Hammelburg)

Ergänzend zu den Laborversuchen und als weiteren Beitrag zur wirklichkeitsnahen Untersuchung und Beurteilung des Querkrafttragverhaltens von Bestandsbrücken konnte

der Lehrstuhl für Massivbau der TUM auf Initiative und mit Förderung des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Jahr 2017 umfangreiche In-situ-Versuche an der 1953 erbauten Saalebrücke in der Nähe der fränkischen Stadt Hammelburg durchführen. Im Rahmen dieser Großversuche am Bestandsbauwerk konnten u. a. der Einfluss aus den bereits erwähnten Maßstabseffekten bei kleinformatigen Laborversuchen sowie die Auswirkungen der natürlichen Alterung verwendeter Materialien auf die Querkrafttragfähigkeit überprüft werden. Zudem konnte gezielt und wirklichkeitsnah der bei älteren Bestandsbrücken mit geringem Querkraftbewehrungsgrad meist maßgebende Querkraftwiderstand im Bereich der Innenstützen an einer durchlaufenden Spannbetonbrücke betrachtet werden. Mit Hilfe der in dieser Hinsicht einzigartigen In-situ-Versuche können Laborversuche, wie z. B. die in Abschnitt 4.3 dargestellten Substrukturversuche, validiert und zusätzliche neue Erkenntnisse in Bezug auf das Querkrafttragverhalten und die Duktilität von Bestandsbrücken gewonnen werden.

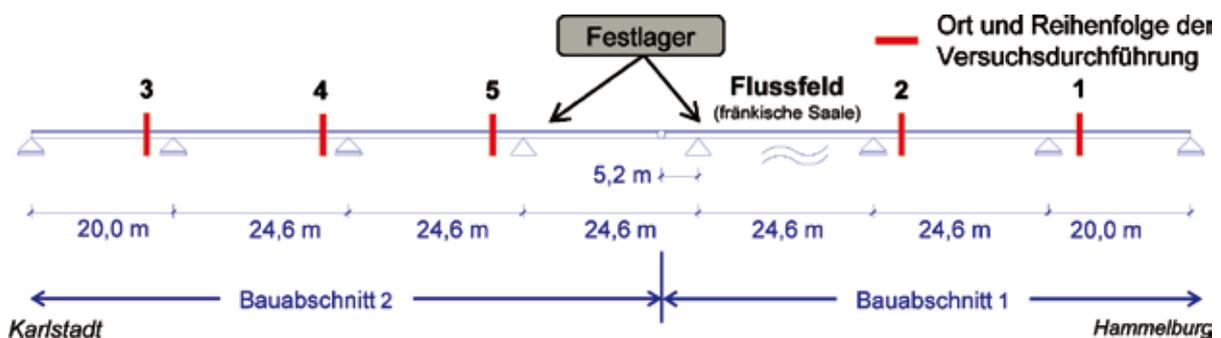


Bild 12 Statisches System der Saalebrücke Hammelburg sowie Ort und Reihenfolge der Versuchsdurchführung (Position der Hauptbelastung) Grafik: Sebastian Gehrlein [21]

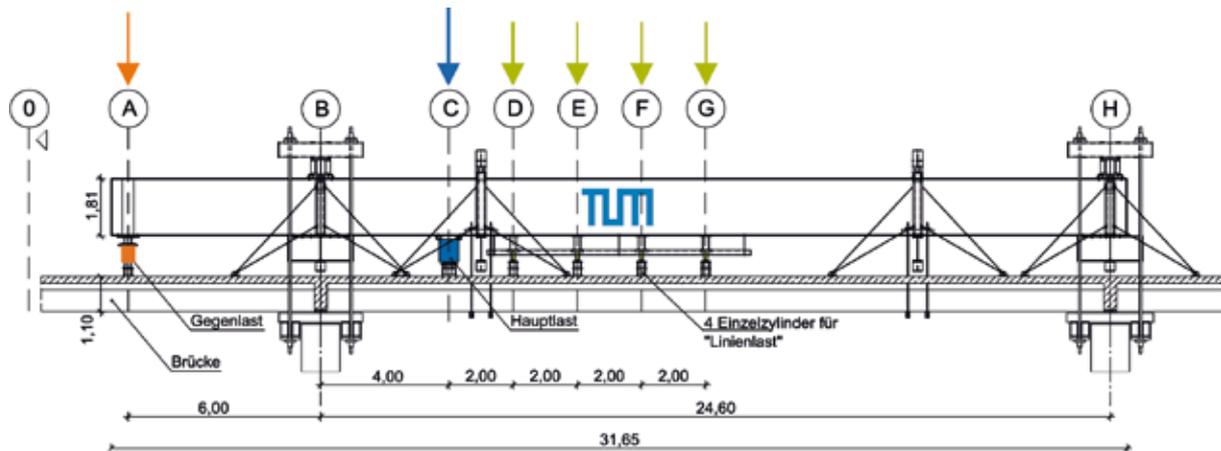


Bild 13 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus auf dem Brückenüberbau und der Position der einzelnen Belastungszylinder im Prüfzustand sowie der Verankerungs- und Aussteifungskonstruktion
 Grafik: Sebastian Gehrlein [22]

Zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung war der Verkehr bereits auf den parallel verlaufenden Ersatzneubau verlegt, so dass in fünf der sieben Brückenfelder (vgl. Bild 12) zerstörende Belastungsversuche (bis in den Nachbruchbereich) durchgeführt werden konnten. Darüber hinaus war die bestehende Saalebrücke bei Hammelburg, neben den gleichmäßigen Feldlängen (Randfelder: 20,0 m, Innenfelder: 24,6 m), dem im Grundriss nahezu geraden Überbau und der geringen Höhe über Grund (lichte Höhe zwischen 1,65 m und 2,25 m), vor allem wegen des für die Konstruktionszeit typischen sehr niedrigen Querkraftbewehrungsgrades für die Durchführung der Versuche ideal geeignet. Im relevanten Stützbereich waren als Querkraftbewehrung jeweils glatte, geschlossene Bügel der Betonstahlgruppe IIa mit einem Durchmesser von 8 mm in einem Abstand von 25 cm eingebaut. Das entspricht einem Querkraftbewehrungsgrad von 4,02 cm²/m und

damit, bezogen auf die gemessene Betonfestigkeit, etwa 36,5 % der nach Eurocode 2 [17] geforderten Mindestquerkraftbewehrung.

Wie in Bild 13 dargestellt, wurde die Versuchsbelastung über insgesamt sechs hydraulische Zylinder auf den (mittels Trennschnitten) isolierten Mittelsteg des dreistegigen Plattenbalkens aufgebracht und über einen 31,65 m langen stählernen Kastenträger in den jeweiligen Auflagerachsen des Überbaus kurzgeschlossen. Für eine detaillierte Beschreibung der Versuchsdurchführung und der weiteren Parameter der untersuchten Brücke sowie der Hintergründe zur gewählten Versuchskonzeption wird an dieser Stelle auf [21] verwiesen.

Weitere wesentliche Parameter der untersuchten Brückenfelder sowie einzelne Ergebnisse der durchgeführten Großversuche an der Saa-

Tabelle 2 Relevante Querschnittsparameter und Ergebnisse der Querkraftversuche an der Saalebrücke Hammelburg

Versuch und Versuchsort	Stegbreite (Achse C)	Spannweite	Anzahl Spannlieder	zusätzliche Schrägaufbiegen	vertikale Verformung (Achse C)	Versagensform	maximale Querkrafttragfähigkeit $V_{exp,max}$ (Achse C)
	[m]	[m]	[-]	[-]	[mm]	[-]	[kN]
1 Randfeld, BA 1	0,800	20,0	25	ja	37,99	duktil	2.277
2 Innenfeld, BA 1	0,875	24,6	25	ja	45,87	Umlagerung	2.194
3 Randfeld, BA 2	0,800	20,0	28	nein	38,87	duktil	2.012
4 Innenfeld, BA 2	0,875	24,6	24	nein	47,88	spröde	1.968
5 Innenfeld, BA 2	0,875	24,6	24	nein	45,54	spröde	2.082

lebrücke Hammelburg hinsichtlich der maximalen Vertikalverformung, der Versagensart und der Querkrafttragfähigkeit $V_{\text{exp,max}}$ werden zusammengefasst in Tabelle 2 wiedergegeben. Wie die dargestellten Ergebnisse zeigen, war die Versagensform von den statischen Randbedingungen (Rand- oder Innenfeld, Stützweite) abhängig. Die größeren Stützweiten (24,6 m) in den Innenfeldern führten zu höheren vertikalen Verformungen; in diesen Feldern war auch ein deutlich spröderes Versagen als in den Randfeldern zu beobachten. In den Randfeldern (Stützweite 20,0 m) konnten im Versuch geringere vertikale Verformungen und ein duktileres Querkraftversagen mit ausgeprägtem Verformungsplateau und geringem Lastabfall im Nachbruchbereich festgestellt werden. Versuch 2 kann dabei, aufgrund veränderter Lagerbedingungen und der daraus resultierenden Umlagerungen im Bruchzustand (vgl. hierzu [22]), hinsichtlich der Versagensform nicht zum Vergleich herangezogen werden. Weiterhin hatten die in Bauabschnitt 1 (BA 1) verbauten und im Bereich des auftretenden Schubrisses schräg aufgebogenen Längsbewehrungsstäbe einen signifikanten Einfluss auf die maximale Querkrafttragfähigkeit (höhere Traglasten in BA 1).

Grundsätzlich ist das erzielte Lastniveau, bei einer maximalen Abweichung von etwa 13,6 % (bezogen auf $V_{\text{exp,max,V1}}$) zwischen Versuch 1 und Versuch 4, jedoch für alle fünf weggesteuert gefahrenen Belastungsversuche vergleichbar hoch. Für eine ausführliche Auswertung der Versuchsergebnisse und Messdaten, die Darstellung der Versagensformen (einschließlich Begründung des unterschiedlichen Verhaltens) und die Aufzeichnung der aufgetretenen Risse wird auf [22] verwiesen.

In Bild 14 sind die im Rahmen der fünf durchgeführten In-situ-Versuche ermittelten maximalen Querkrafttragfähigkeiten der jeweils untersuchten Querschnitte den rechnerischen Ergebnissen der bisher hauptsächlich angewandten Verfahren (vgl. [23]) zur Nachrechnung bestehender Spannbetonwerke nach Stufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie gegenübergestellt. Um einen aussagekräftigen Vergleich zu erhalten, wurden bei der Nachrechnung gemäß den aufgeführten Ansätzen keine Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt und die charakteristischen Materialkennwerte, die in begleitenden Materialversuchen im Labor des MPA Bau der TUM ermittelt wurden (vgl. [21]), verwendet. Der Vergleich zeigt deutlich,

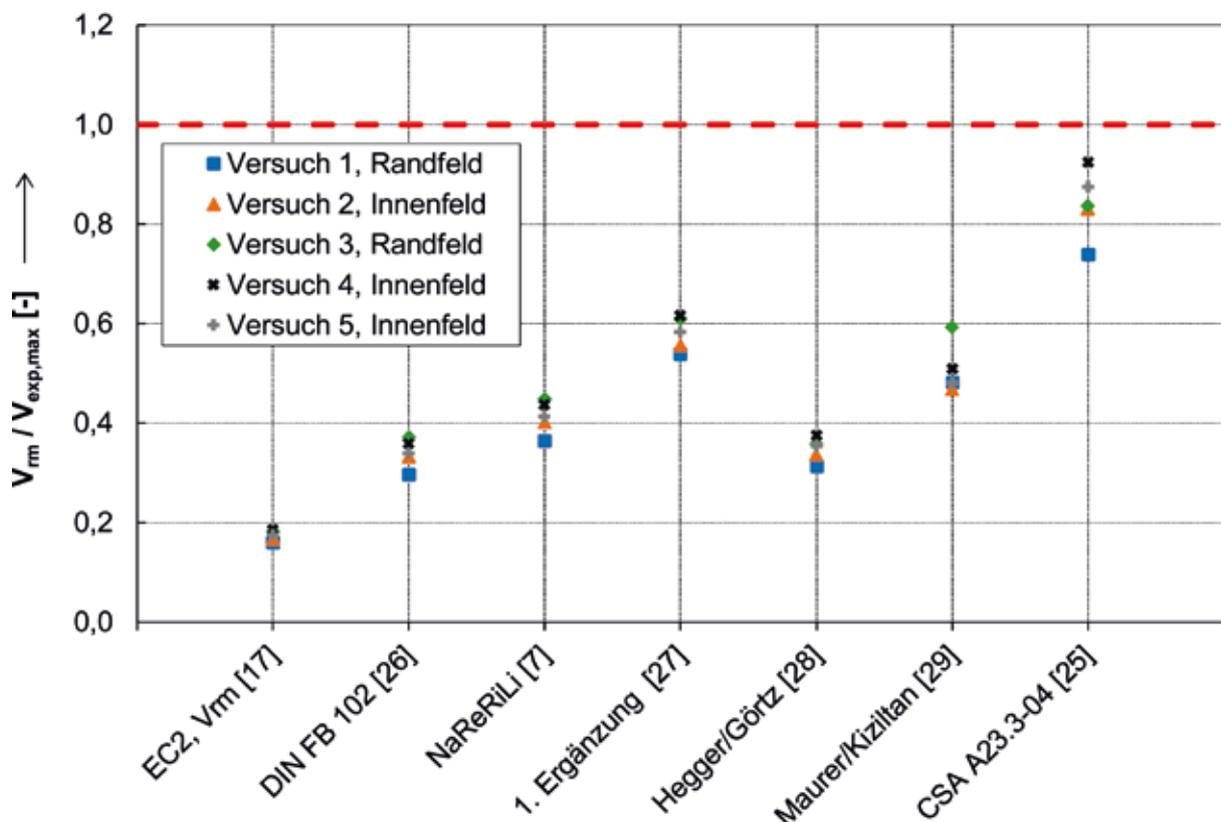


Bild 14 Vergleich der maximalen Versuchslasten $V_{\text{exp,max}}$ mit den rechnerischen Ergebnissen der bisher hauptsächlich angewandten Verfahren (vgl. [23]) zur Nachrechnung bestehender Brückenbauwerke entsprechend Stufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie [7]

Grafik: Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München



Bild 15 Vergleich der Rissbilder des ersten Substrukturversuchs (12/2018) zur Abbildung der In-situ-Versuche (oben) und der Rissbilder des Mittelsteiges der Brücke Hammelburg (unten, Versuch 3, Randfeld BA 1, Süd- und Nordansicht)

Foto: Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München

dass vor allem die Bemessung nach Eurocode 2 [17], die vor allem für robuste Neubauten konzipiert ist, die tatsächliche Tragfähigkeit der untersuchten Bestandsbrücke deutlich unterschätzt. Auch die anderen häufig angewandten Verfahren weisen zum Großteil noch deutliche Reserven auf; einzige Ausnahme bildet die auf der *modified compression field theory* [24] basierende Bemessung gemäß der kanadischen Norm [25], die zumindest für die untersuchte Saalebrücke bei Hammelburg eine gute Übereinstimmung mit der tatsächlichen Querkrafttragfähigkeit liefert.

4.5 Erkenntnisse und Empfehlungen

Die experimentellen Untersuchungen zum Einfluss nicht mehr zugelassener Bügelformen auf die Querkrafttragfähigkeit zeigen grundsätzlich, dass sowohl offene Bügel mit geraden Stabenden als auch nicht über die gesamte Querschnittshöhe reichende Steckbügel im Stützbereich merklich zum Abtrag von Querkraften beitragen können. Zudem lassen die Versuche darauf schließen, dass eine Querkraftbewehrung aus zweiteiligen (gestoßenen) Bügeln, bei ausreichender Übergreifungslänge der Stabenden, in gleicher Weise wie eine geschlossene Bügelbewehrung betrachtet werden kann. Selbst bei stark reduzierten Übergreifungslängen leisten die zweiteiligen Bügel einen deutlichen Beitrag zum Querkraftwider-

stand. Anhand der Versuche konnte zudem gezeigt werden, dass dem Betontraganteil für gering querkräftbewehrte Spannbetontträger der dominierende Lastabtrag zuzusprechen ist (vgl. [30], [31]). Ein Vergleich der Längsbewehrungsgehalte aus Laborversuchen und bei Bestandsbauwerken wirft zudem die Frage auf, ob bei Bestandsbrücken ein Biegeversagen im Vergleich zum Querkraftversagen in der Regel nicht ohnehin maßgebend ist. Um in den Laborversuchen sicher ein Querkraftversagen zu erhalten, sind im Vergleich zu typischen Bestandsbrücken zumeist weit höhere Längsbewehrungsgrade erforderlich.

Die im Bereich der Innenstützen der 1953 erbauten Spannbetonbrücke Hammelburg durchgeführten Großversuche zeigen zum einen, dass die experimentell ermittelten Querkrafttragfähigkeiten der untersuchten Brückenquerschnitte zum Teil deutlich über den rechnerisch ermittelten Werten der aktuellen Bemessungsmodelle liegen. Zum anderen trat speziell bei den Versuchen in den Innenfeldern der untersuchten Brücke ein sprödes Querkraftversagen des Mittelsteiges ohne Vorankündigung auf, während in den Randfeldern jeweils ein duktiler Versagen festgestellt wurde. Um ein unangekündigtes sprödes Versagen von bestehenden Brücken mit der notwendigen Sicherheit auszuschließen und die Einflussfaktoren auf die erzielbare Duktilität zutreffend bewerten zu können, muss das Querkrafttragverhalten

insbesondere von gering querkraftbewehrten Bestandsbrücken noch genauer beurteilt werden. Ein Baustein hierzu kann durch die derzeit an der TUM durchgeführten Substrukturversuche geliefert werden, in denen die an der Saalebrücke Hammelburg untersuchten plattenbalkenförmigen Querschnitte unter Laborbedingungen nachgebildet werden. Erste Ergebnisse dieser in den Monaten Dezember 2018 und Januar 2019 durchgeführten Versuche zeigen, dass diese zur Klärung weiterführender Fragestellungen grundsätzlich sehr gut geeignet sind (Bild 15). Bei Vergleich mit den vorangegangenen experimentellen Untersuchungen an Trägern mit rechteckigem Querschnitt zeigt sich beispielsweise eine deutliche Abhängigkeit der Querkrafttragfähigkeit von der Querschnittsform. So ergaben sich für die Versuche mit Plattenbalkenquerschnitt weitaus höhere bezogene Bruchlasten, was vermutlich auf eine Vergrößerung des Traganteils der Druckzone durch die Gurte zurückzuführen ist. Zudem lassen die Versuchsergebnisse vermuten, dass dem Spannkraftzuwachs unter bestimmten Randbedingungen ein wesentlicher Querkrafttraganteil zuzusprechen ist.

Eine weitere Erkenntnis aus den In-situ-Versuchen zur Saalebrücke Hammelburg ist, dass die am realen Bauwerk auftretenden, systembedingten Einflussfaktoren wie die Rotation, die auftretenden Verformungen und die tatsächliche Momentenbeanspruchung des betrachteten Längsträgers, aber auch z. B. die Lastgeschichte des konkreten Bauwerks einen deutlichen Einfluss auf die Querkrafttragfähigkeit aufweisen. Da diese Effekte bei bisherigen Bauteilversuchen unter Laborbedingungen jedoch nur teilweise abgebildet werden konnten, sind weiterführende Untersuchungen (auch z. B. mit FE-Simulationen) zur Quantifizierung der system- bzw. bauwerksspezifischen Einflussfaktoren auf die Querkrafttragfähigkeit notwendig.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Jede statische Berechnung von Ingenieurbauwerken und der Nachweis einer ausreichenden Standsicherheit, für den Neubau ebenso wie zur Beurteilung der bestehenden Bausubstanz, beruhen auf einer Reihe von Vereinfachungen und Modellvorstellungen. Da die entsprechenden Grundlagen der Regelwerke darauf abzielen, möglichst allgemeingültig und damit für eine Vielzahl von Bauwerken anwendbar zu sein, stellt die zugehörige Nachweisführung immer eine Einhüllende dar, die

sich aus der ungünstigsten Anwendungskonstellation bestimmt, für alle anderen Fälle werden auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse geliefert. Zudem sind in den im Allgemeinen für den Neubau formulierten Nachweisformaten meist zusätzliche Reserven für zukünftige Entwicklungen bereits mit integriert. Während ein solches Vorgehen bei der Planung neuer Bauwerke meist nur mit unwesentlichen Mehrkosten verbunden ist, ergeben sich dadurch bei der Beurteilung des Bauwerksbestands häufig größere rechnerische Defizite, die entweder zu Nutzungsbeschränkungen führen oder entsprechende bauliche Maßnahmen (Verstärkung oder sogar Ersatzneubau) nach sich ziehen. Mit Blick auf die damit verbundenen Kosten – und auch die entstehenden Behinderungen bei baulichen Eingriffen in die bestehende Bausubstanz – kommt daher bei der Beurteilung des Bauwerksbestands möglichst wirklichkeitsnahen Modellen eine ganz entscheidende Bedeutung zu.

Wie im vorliegenden Beitrag dargestellt, bietet sich hierzu sowohl auf der Widerstands- als auch auf der Einwirkungsseite entsprechendes Potential für verbesserte Modelle und damit zur Reduktion von rechnerischen „theoretischen“ Defiziten, zur Verlängerung der Nutzungs-/Lebensdauer der Bauwerke und eine Beschränkung von erforderlichen Ertüchtigungen und baulichen Maßnahmen im Bestand auf das tatsächlich erforderliche Maß.

6 Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Zahlen, Daten, Fakten zu Brücken. www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/bruecken-zahlen-daten-fakten.html [Zugriff am 18.01.2019]
- [2] DIN 1072:1985-12: Straßen- und Wegbrücken, Lastannahmen.
- [3] Naumann, J.: Brücken und Schwerverkehr – eine Bestandsaufnahme. *Bauingenieur* 85 (2010) 1, S. 1–9
- [4] Fischer, O.; Müller, A.; Lechner, T.; Wild, M.; Kessner, K.: Ergebnisse und Erkenntnisse zu durchgeführten Nachrechnungen von Betonbrücken in Deutschland. *Beton- und Stahlbetonbau* 109 (2014) 2, S. 107–127
- [5] Marzahn, G.; Maurer, R.; Zilch, K.; Dunkelberg, D.; Kolodziejczyk, A.; Teworte, F.: Kapitel IV: Die Nachrechnung von bestehenden Straßenbrücken aus Beton. In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): *Beton Kalender 2013*, Band 102, Berlin: Ernst & Sohn, 2013, S. 272–344

- [6] DIN EN 1991-2:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010.
- [7] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS, Hrsg.): Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Berlin, 05/2011.
- [8] Nowak, M.; Fischer, O.: Objektspezifische Verkehrslastansätze für Straßenbrücken – ein wichtiger Baustein für erweiterte Beurteilungskonzepte in der Brückennachrechnung. *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017) 12, S. 804–814
- [9] Merzenich, G.; Sedlacek, G.: Hintergrundbericht zum Eurocode 1 – Teil 3.2: „Verkehrslasten auf Straßenbrücken“. Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.): *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 711, 1995
- [10] Freundt, U.; Böning, S.: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes – Teil 1: DIN-FB 101: „Einwirkungen auf Brücken“. In: Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen*, Heft B 77, 2011
- [11] Nowak, M.; Fischer, O.: Potentiale objektspezifischer Verkehrslastansätze für die Nachrechnung bestehender Straßenbrücken. In: Krieger, J.; Isecke, B. (Hrsg.): *Proc. zum Brückenkolloquium Beurteilung, Ertüchtigung und Instandsetzung von Brücken: 3. Kolloquium, 19.–20.6.2018 / TAE, Ostfildern: Technische Akademie Esslingen*, 2018, S. 541–546
- [12] Müller, A.: Nachrechnung der Gänstorbrücke Ulm – Zusatzbetrachtungen zur Robustheit. In: Fischer, O. (Hrsg.): *Münchener Massivbau Seminar 2017*, München: Förderverein Massivbau der TU München e.V., 2017, S. 23–29
- [13] Reineck, K.-H.; Kuchma, D. A.; Fitik, B.: Erweiterte Datenbanken zur Überprüfung der Querkraftbemessung für Konstruktionsbetonbauteile mit und ohne Bügel. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Schriftenreihe des DAfStb*, Heft 597, Berlin: Beuth, 2012
- [14] Reineck, K.-H.; Dunkelberg, D. (Hrsg.): *ACI-DAfStb databases 2015 with shear tests for evaluating relationships for the shear design of structural concrete members without and with stirrups*. In: *Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb)*, Heft Nr. 617, Berlin: Beuth, 2017
- [15] Hegger, J.; Maurer, R.; Fischer, O.; Zilch, K.; Herbrand, M.; Adam, V.; Gleich, P.; Stupak, E.; Schramm, N.; Scheufler, W.; Tecusan, R.: *Beurteilung der Querkraft und der Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze*. Schlussbericht, BAST-Verbundforschungsprojekt FE 15.0591/2012/FRB, 2019 (im Druck)
- [16] Schramm, N.; Fischer, O.; Scheufler, W.: Experimentelle Untersuchungen an vorgespannten Durchlaufträger-Teilsystemen zum Einfluss nicht mehr zugelassener Bügelformen auf die Querkrafttragfähigkeit. *Bauingenieur* 94 (2019) 1, S. 9–20
- [17] DIN EN 1992-2:2010-12: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln. Deutsche Fassung EN 1992-2:2005 +AC:2008.
- [18] Herbrand M.; Kueres D.; Claßen M.; Hegger, J.: Einheitliches Querkraftmodell zur Bemessung von Stahl- und Spannbetonbrücken im Bestand. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 2, S. 58–67
- [19] Gleich, P.; Kattenstedt, S.; Maurer, R.: Erweitertes Druckbogenmodell für die Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit von Stahl- und Spannbetonbalken. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016) 5, S. 268–277
- [20] Huber, P.; Kromoser, B.; Huber, T., Kollegger, J.: Berechnungsansatz zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrückenträger mit geringem Querkraftbewehrungsgrad. *Bauingenieur* 91 (2016) 6, S. 227–237
- [21] Gehrlein, S.; Landler, J.; Oberndorfer, T.; Fischer, O.: Großversuche zur Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken an der Saalebrücke Hammelburg; Teil 1: Konzeption, Beurteilung des Bestands und Durchführung der Versuche. *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018) 9, S. 667–675
- [22] Gehrlein, S.; Fischer, O.: Großversuche zur Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken an der Saalebrücke Hammelburg; Teil 2: Messprogramm, Versuchsergebnisse, Vergleich mit verschiedenen Berechnungsansätzen. *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018) 10, S. 696–704
- [23] Marzahn, G.; Hegger, J.; Maurer, R.; Zilch, K.; Dunkelberg, D.; Kolodziejczyk, A.; Teworte, F.: Kapitel XIII: Die Nachrechnung von Betonbrücken – Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie. In: *Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton Kalender 2015, Bd. 104*, Berlin: Ernst & Sohn, 2015, S. S. 820–904

- [24] Collins, M.; Vecchio, F.: The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear. *ACI Journal* 83 (1986) 2, S. 219–231
- [25] CSA Standard A23.3-04: Design of Concrete Structures. Mississauga, Ontario: Canadian Standards Association, December 2004
- [26] DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken. Berlin: Beuth, Ausgabe 03/2003
- [27] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, Hrsg.): 1. Ergänzung zur Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). Berlin, Ausgabe 04/2015
- [28] Hegger, J.; Görtz, S.: Querkraftmodell für Bauteile aus Normalbeton und Hochleistungsbeton. *Beton- und Stahlbetonbau* 101 (2006) 9, S. 695–705
- [29] Maurer, R.; Kiziltan, H.: Zum Einfluss des Druckbogens auf den Querkraftwiderstand von Spannbetonbalken. *Bauingenieur* 88 (2013) 4, S. 165–176
- [30] Zink, M.: Zum Biegeschubversagen schlanker Bauteile aus Hochleistungsbeton mit und ohne Vorspannung. Diss., Universität Leipzig, 2000
- [31] Huber, P.; Kromoser, B.; Huber, T.; Kollegger, J.: Berechnungsansatz zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrückenträger mit geringem Querkraftbewehrungsgrad. *Bauingenieur* 91 (2016) 6, S. 227–237

Ihr Partner für Gerüstbau und Hebetchnik



- Arbeits- und Schutzgerüste
- Traggerüste
- Behelfsbrücken
- Stahl-Träger bis HE 1000 B
- Heben/Senken/Verschieben von Bauwerken
- Raum-/Deckengerüste
- Hallen/Zelte/Notüberdachungen
- Gebäudeeinhausungen
- Sonderkonstruktionen
- Treppentürme
- Aluminium-Fahrgerüste
- Baustelleneinrichtungen
- Industrieklettertechnik
- Bauaufzüge
- Personen-Lastaufzüge
- Transportbühnen
- Zahnstangen-Kletterbühnen
- Hubarbeitsbühnen
- Elektrisch betriebene Hängegerüste
- Fassadenbefahranlagen
- Befahranlagen für jede Aufgabenstellung
- Brückenbesichtigungswagen
- Permanentanlagen
- Objektbezogene Sonderanlagen
- Stahlbau bis EXC3
- Maschinenbau

Teupe & Söhne Gerüstbau GmbH

David-Roentgen-Straße 22-24 | 48703 Stadtlohn
Fon: +49 25 63 / 93 03 - 0 | info@geruestbau.com

Lösungen mit Qualität.

Wir sind für Sie da. 24 h täglich – 365 Tage im Jahr



geruestbau.com



-
- 9 Herzlich willkommen zum 29. Dresdner Brückenbausymposium
 - 13 Verleihung der Wackerbarth-Medaille
 - 14 Laudatio für Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stritzke aus Anlass
der Verleihung der Wackerbarth-Medaille der Ingenieurkammer Sachsen
 - 17 Christian Menn – Brückenbauer, Lehrer, Ästhet
 - 25 Aktuelles zum Regelwerk des Bundes für den Ingenieurbau
 - 29 Die Maputo-Katembe-Brücke, das neue Wahrzeichen Mosambiks –
Drei Bauverfahren bei der längsten Hängebrücke Afrikas
 - 47 Monitoring und Visualisierung im Infrastrukturbau
 - 59 Verkehrsinfrastruktur für Hamburg –
Neubau der Waltershofer Brücken im Hamburger Hafen
 - 73 Erfahrungsbericht aus Österreich über die Anwendung
von neuen Verfahren im Brückenbau
 - 85 Stahlverbund-Großbrücken mit oberliegender Fahrbahn
als Querschnitte mit Teilfertigteilen und Schrägstreben bzw. Konsolen
 - 101 Kurt Beyers Beitrag zur Baustatik
 - 129 Nachrechnungsdefizite bei Massivbrücken –
Ein Problem der Tragfähigkeit oder [doch nur] der Modellvorstellung?
 - 149 Was tun, wenn Annahmen und Wirklichkeit nicht übereinstimmen?
 - 161 Lebenszykluskostenbetrachtungen für chloridexponierte Bauteile
von Brücken- und Tunnelbauwerken
 - 173 Dauerhafte und wirtschaftliche Straßenbrücken
mit Halffertigteilen aus vorgespanntem Carbonbeton
 - 185 Der 30-Jahre-Zyklus der Brückeneinstürze und seine Konsequenzen
 - 197 Chronik des Brückenbaus
 - 209 Inserentenverzeichnis