



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Schriftenreihe
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden
Heft 48



Manfred Curbach, Heinz Opitz,
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**10. SYMPOSIUM
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

11. März 2019

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller

Institut für Massivbau
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: +49 351 463-3 65 68
Fax: +49 351 463-3 72 89

Titelbild:

Belastungsrahmen für die Prüfung von Geschossdecken im Jugendstil-Kaufhaus
Görlitz (Foto: Oliver Mosig, s. Beitrag Mosig et al. in diesem Tagungsband)

Redaktion und Layout: Silke Scheerer
Korrekturen: Petra Kahle, Angela Heller
Umschlag und Druckvorbereitung: Stefan Gröschel
Für die Inhalte der Beiträge sind die Autor*innen verantwortlich.

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz
Veröffentlicht: Dresden, März 2019

Der Tagungsband ist open access auf der Homepage des Instituts für Massiv-
bau verfügbar (<https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/das-institut/veranstaltungen/SEUB>).

ISSN: 1613-6934
ISBN: 978-3-86780-583-4

Inhalt

Vorwort	7
Steffen Marx, Jürgen Grünberg, Gregor Schacht Sicherheitskonzept für Belastungsversuche	9
Mai Häßler Experimentelle Bestimmung des Beanspruchungszustands in fachwerkartigen Eisen- und Stahltragwerken mit Hilfe von Schwingungsmessungen	23
Thilo Fröhlich, Veit Birtel, Dieter Lotze Zyklische Prüfung von Befestigungen in Beton mittels Schwingungsanregung	33
Oliver Mosig, Sabine Wellner, Jörg Rudolph Belastungsprüfung der Geschosdecken im Jugendstil-Kaufhaus Görlitz	45
Volker Wetzck, Claudia Pahlow Das Potenzial von Miniatur-Druckproben für die Werkstoffcharakterisierung von Stahlguss	59
Kerstin Speck, Fritz Vogdt, Manfred Curbach, Yuri Petryna Faseroptische Sensoren zur kontinuierlichen Dehnungsmessung im Beton	71
Jens Heinrich, Reinhard Maurer Rissmonitoring zur Untersuchung der Ermüdungsfestigkeit an bestehenden Brückenbauwerken	83
Max Käding, Gregor Schacht, Guido Bolle, Steffen Marx Überwachung von Brücken mit Gefährdung durch Spannungsrissskorrosion	97
Florian Schill, Milo Hirsch, Andreas Eichhorn Überwachung von Tragwerken mit Profilsclannern	109
Jörg Scheithauer, Chris Hobusch, Falk Steinigk, Torsten Hillig, Matthias Schramm UAV und BIM – neue Herausforderungen an die Bauüberwachung bei Infrastrukturmaßnahmen an Eisenbahnbrücken der Deutschen Bahn	123
Nico Steffens, Kay Degenhardt, Karsten Geißler Modifiziertes Ziellastniveau bei Straßenbrücken durch Bauwerksmonitoring	135
Marc Gutermann, Werner Malgut, Carsten Böhme Experimenteller Nachweis von Straßenbrücken kleiner Stützweite am Beispiel von Wegebrücken in der Eilenriede, Hannover	147
Oliver Fischer, Sebastian Gehrlein Weggesteuerte In-situ-Querkraftversuche (bis in den Nachbruchbereich) und innovative Messtechnik an einer 60 Jahre alten 7-feldrigen Spannbetonbrücke ...	161

Experimenteller Nachweis von Straßenbrücken kleiner Stützweite am Beispiel von Wegebrücken in der Eilenriede, Hannover

Marc Gutermann¹, Werner Malgut², Carsten Böhme³

Kurzfassung. Motoviert durch eine Anfrage zur Untersuchung von Durchlässen und Wegebrücken im Stadtwald Eilenriede, Landeshauptstadt Hannover, wurde eine neue Methode entwickelt und erprobt, mit der die Tragsicherheit von Bauwerken kleiner Stützweite wirtschaftlich nachgewiesen werden kann. Um Abriss und Neubau der Massivbauwerke zu vermeiden, wurde ein Konzept aufgestellt, um die Brücken kostengünstig mit einem Mobilkran und messtechnischer Überwachung risikoarm testen zu können. Dieser Bericht beschreibt die Randbedingungen und Überlegungen zur Lösung der Aufgabe und fasst die Ergebnisse der erfolgreichen Erprobung an 13 Stahlbetonbauwerken und einem Mauerwerksdurchlass in Hannover zusammen.

Vorab: Dieser Artikel wurde in Grundzügen bereits in der Zeitschrift BAUTECHNIK veröffentlicht [1] und erscheint hier in einer überarbeiteten Version mit dem Schwerpunkt auf die experimentellen Untersuchungen und Ergebnisse.

1 Einleitung

Der schlechte Erhaltungszustand deutscher Autobahn- und Bundesstraßenbrücken ist hinlänglich bekannt. Kleinere Straßen- und Wegebrücken stehen eher selten im Fokus der Öffentlichkeit, obwohl ihre Zustandsbewertungen oft ebenso schlecht ausfallen wie bei den Brücken im Fernstraßennetz. Auch hier kommt häufig noch erschwerend hinzu, dass über die Jahre sehr viele Informationen über die Bauausführung verlorengegangen sind und der Erhaltungszustand unbefriedigend ist. In solchen Fällen ist eine rechnerische Bewertung der Tragsicherheit oft unmöglich, insbesondere, wenn Teile des Bauwerks für Erkundungen unzugänglich sind oder die Gründungssituation unbekannt ist.

Ein alternatives Nachweisverfahren ist der Belastungsversuch, der bei Einhaltung gewisser Standards eine statische Berechnung ergänzen kann [2]. Hierzu werden hohe Prüflasten auf das Bauwerk aufgebracht, die fast das Doppelte der zulässigen Nutzlasten betragen.

¹ Prof. Dr.-Ing., Institut für Experimentelle Statik, Hochschule Bremen

² Dipl.-Ing., Institut für Experimentelle Statik, Hochschule Bremen

³ Dipl.-Ing., Landeshauptstadt Hannover

Dafür ist eine detaillierte Versuchsplanung obligatorisch, die geeignete Konzepte für eine regelbare Lasterzeugung und die messtechnische Überwachung enthalten muss [3], [4]. Zudem sind die Versagensmechanismen während der Versuche durch Vergleichsrechnungen bereits vorab zu bewerten, um eine risikoarme Versuchsdurchführung zu ermöglichen.

Bereits die erforderliche Belastungstechnik macht experimentelle Tragsicherheitsnachweise relativ aufwändig [5], sodass Straßen- und Wegebrücken mit Stützweiten $\leq 6,00$ m oftmals eher abgerissen und neu gebaut als getestet und saniert werden.

Eine Anfrage der Landeshauptstadt Hannover, Fachbereich Umwelt und Stadtgrün, vertreten durch Herrn Bettin, im Jahre 2016, ob Belastungsversuche von 14 Forstwegebrücken im Stadtwald Eilenriede eine Alternative zu Ersatzbauwerken sein könnten, ließ uns am Institut für Experimentelle Statik der Hochschule Bremen nach einer Methode suchen, mit der Belastungsversuche risikoarm und kostengünstig (< 10.000 €/Brücke) durchgeführt werden können.

2 Probelastung von Straßenbrücken kleinerer Stützweite

2.1 Stand der Technik

Die grundsätzlichen Verfahren zur Probelastung von Straßenbrücken wurden im vergangenen Jahrhundert stetig weiterentwickelt [2], [5] und [6]. Sie bestehen aus zwei Grundprinzipien, nämlich

- Lasterzeugung durch oder gegen Massenkräfte (LKW-Überfahrten, Belastungsfahrzeug BELFA [5], [6]) und
- Lasterzeugung im Kräftekreislauf (Belastungsrahmen [7]).

Die Vor- und Nachteile der eingesetzten Verfahren sind in der Literatur, z. B. [5], ausführlich beschrieben. Hier seien nur die wesentlichen Anforderungen an die Lasterzeugung aufgeführt, die wir für Belastungsversuche an Straßenbrücken kleinerer Stützweiten ($l_s \leq 6,00$ m) identifiziert haben:

- Fahrbare Belastungstechnik, um kurze Rüstzeiten zu ermöglichen und das Durchbohren von Dichtungsschichten zu vermeiden,
- Geringes Gewicht und kompakte Geometrien für die Anfahrt (keine Sondergenehmigungen),
- Risikoarme hydraulische Lasterzeugung bis zur Versuchszielast F_{Ziel} (inkl. Teilsicherheitsbeiwerten, hier $F_{Ziel} \leq 330$ kN).

Die Versuchstechnik wird durch eine geeignete messtechnische Ausstattung des Bauwerks komplettiert. Sensorpositionen und -typen werden nach vorheriger Analyse des Tragsystems individuell festgelegt. Geeignete Konzepte wurden z. B. in [2], [4] bis [7] veröffentlicht.

2.2 System und Verfahren

Bei der Systementwicklung lag unser Fokus sowohl auf der technischen Durchführbarkeit als auch auf der Kostensenkung. Das erforderte ein einfaches, flexibel einsetzbares Belastungsgerät, das einfach verfügbar ist, Lasten oberhalb des Gebrauchslastniveaus erzeugen kann und eine regelbare Laststeuerung ermöglicht. Unsere erste Wahl war ein handelsüblicher Mobilkran, der nahezu überall angemietet werden kann. Dieser kann jedoch anders als z. B. das Belastungsfahrzeug BELFA ([5], [6]) das Gewicht seiner Achsen nicht reduzieren, so dass er das ungetestete Bauwerk nicht überfahren darf. Ein Abstützen und Hochheben wäre wie beim BELFA zwar möglich, jedoch können die Lasten beim Mobilkran anschließend nicht flexibel und regelbar an unterschiedlichen Positionen auf dem Bauwerk eingeleitet werden. Unser Lösungsansatz war, das Bauwerk bereits mit dem Überfahren zu testen, also ein schrittweises Verfahren. Dazu wird an der hinteren Kranabstützung mit Hilfe einer Adapterplatte eine Vorrichtung mit einer integrierten Prüfhydraulik angebracht. Diese ermöglicht mit ihren Verstellmöglichkeiten den Einsatz an verschiedenen Krantypen und die Erzeugung unterschiedlicher Lastbilder an beliebigen Orten, Bild 1.

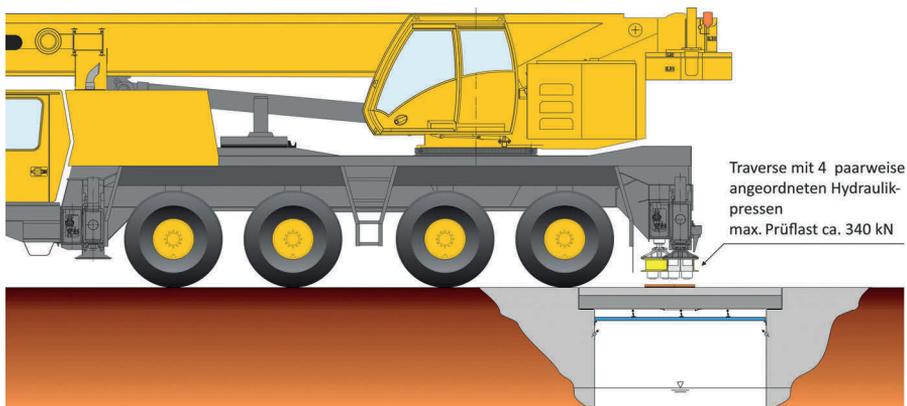


Bild 1 Prinzipskizze der Lasterzeugung durch Mobilkran mit externer Prüfhydraulik

Das Verfahren zur Durchführung von Belastungsversuchen an Straßenbrücken kleinerer Stützweite mit einem Mobilkran gliedert sich in mehrere Schritte (Bild 2) und ist in [1] ausführlich beschrieben. Die schrittweise und geregelte Erzeugung von Prüflasten ist somit bei kleinen Brücken uneingeschränkt möglich und damit auch der Nachweis von Lasten oberhalb der Gebrauchslast. Ein Einsatz von zwei Mobilkränen ermöglicht bei Zuhilfenahme von Belastungsrahmen auch den Tragsicherheitsnachweis von Brücken größerer Stützweiten gegen die Masse beider Fahrzeuge, die dann jeweils vor den Widerlagern stehen bleiben würden.

Der Einsatz eines so genannten All-Terrain-Krans ermöglicht dank der Allradlenkung auch Zufahrten mit engen Kurven. So sind auch Brücken im Zuge von Wirtschafts- und Forstwegen gut erreichbar. Dabei entfallen meist das Einholen von Sondergenehmigungen und

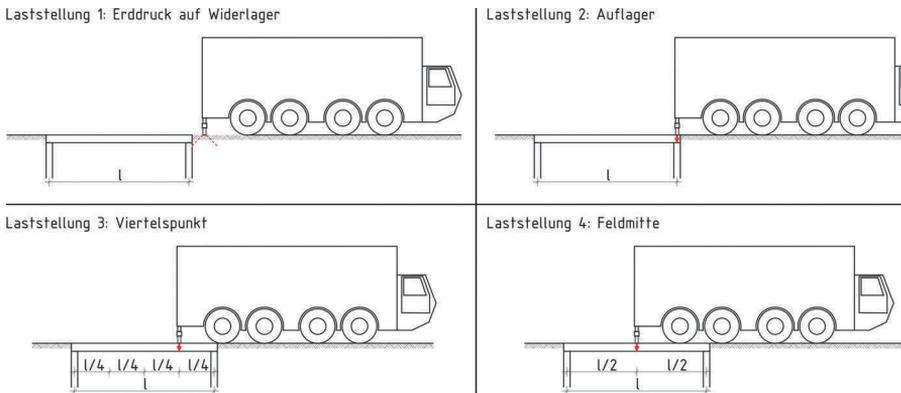


Bild 2 Prinzipskizze: Minimale Anzahl der Laststellungen

der Einsatz von Begleitfahrzeugen. Das Verfahren ermöglicht Belastungsversuche auch an Brücken, die aufgrund ihrer Größe und/oder Lage bisher nicht wirtschaftlich und regelkonform experimentell nachgewiesen werden konnten.

3 Wegebrücken in der Eilenriede, Landeshauptstadt Hannover

3.1 Aufgabenstellung

In der Eilenriede befinden sich diverse Wegebrücken und Durchlässe mit Stützweiten bis 6,00 m, deren Original-Unterlagen nicht mehr vorliegen und bei denen statische Berechnungen keine zufriedenstellenden Ergebnisse lieferten. Für die Bewirtschaftung des Forstes müssen die Brücken jedoch mit schweren Fahrzeugen befahren werden können. Es bot sich als alternative Nachweismethode an, Belastungsversuche durchzuführen. Aufgrund der unbefestigten, engen und zum Teil verschlungenen Wege wurde das oben beschriebene Konzept entwickelt, um auch unter diesen Randbedingungen Versuchslasten über 300 kN wirtschaftlich und vor allem risikoarm zu erzeugen. Letzteres bedeutet für den Bauherrn, dass trotz geeigneter Versuchstechnik und gewissenhafter Durchführung eine Restwahrscheinlichkeit des Tragwerksversagens verbleibt – wie bei Berechnungen auch.

3.2 Tastversuche

Die Planung von Tragsicherheitsnachweisen für die Brückenklasse BK 30 nach DIN 1072 [8] erfordert einen hohen Aufwand, der in keinem Verhältnis zu einem Belastungsversuch steht, der möglicherweise gleich bei der ersten Brücke wegen schlechter Ergebnisse abgebrochen werden muss. Wir haben daher zunächst Tastversuche an drei Bauwerken kleinerer Stützweite ($l_s \leq 2,60$ m) im Stadtwald Eilenriede durchgeführt (Kampagne 1), um so die Erfolgsaussichten und das Risiko einer einzelnen Überfahrt eines Holztransporters abschätzen zu können.

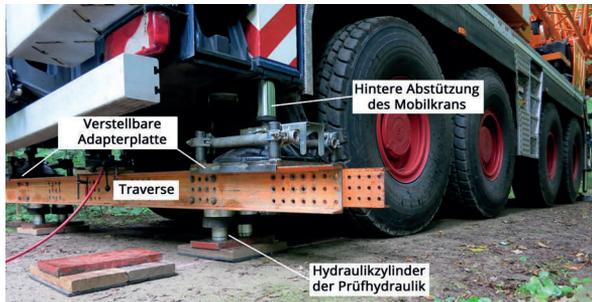


Bild 3 Prototyp: Traverse mit integrierter Hydraulikzylindern und verstellbarer Adapterplatte

Zur Aufwandsminimierung wurde die Versuchslast durch die Hydraulikanlage des Mobilkranes erzeugt, indem die Radachsen fixiert und das gesamte Fahrzeug durch die hintere Abstützung auf der Lasttraverse angehoben wurde. Die Erfahrung zeigte aber, dass die Steuerung für Belastungsversuche zu grob ist. Das Verfahren wurde deshalb optimiert, indem in die Lasttraverse neben der Kraftmesseinrichtung auch eine externe hydraulische Lasterzeugung integriert und eine Adapterplatte entwickelt wurde, die diese Prüfeinheit für die Dauer der Versuche mit dem Mobilkran flexibel koppeln kann (Bild 3).

3.3 Auswahl der Versuchsorte

Mit dem verbesserten Verfahren wurden anschließend elf weitere Bauwerke einem Belastungsversuch zum Nachweis der Tragsicherheit unterzogen (Kampagne 2). Die Untersuchungen umfassten vier Durchlässe mit einer lichten Weite von ca. 1,00 m; weitere fünf Bauwerke wiesen eine lichte Weite von ca. 2,50 m auf. Darüber hinaus wurden ein gemauerter Durchlass mit ca. 1,60 m lichter Weite und eine Stahlbetonbrücke mit ca. 5,60 m lichter Weite untersucht (Tabelle 1). Das gesamte Versuchs-konzept wurde vom Prüffingenieur begleitet und freigegeben.

4 Versuchstechnik

4.1 Versuchslasten und Belastungstechnik

Das Ziellastniveau war die Nachrechnungs-Brückenklasse 30 nach DIN 1072 [8]. In Tabelle 2 sind die zugehörigen Lastannahmen zusammengestellt. Lediglich für eine Stahlbetonbrücke (Kampagne 2) mit ca. 5,60 m lichter Weite war die Brückenklasse 9 das angestrebte Ziel (vgl. Tabelle 1).

Aus den maßgebenden Lastbildern ergeben sich maximale Beanspruchungen (z. B. Querkkräfte und Biegemomente), die im Versuch durch ein äquivalentes Lastbild nachgebildet werden mussten. Die Gebrauchslast ext F_Q und die Versuchsziellast ext $F_{Ziel} \leq 330$ kN wurden auf der Grundlage des Ansatzes aus der Richtlinie für Belastungsversuche [3] ermittelt (Tabelle 3), in der g für ständige Lasten, P für die Achslast des Bemessungsfahrzeuges und φ für den Schwingbeiwert stehen, s. Gl. (1) und (2).

Tabelle 1 Versuchsplan der Tast- und Belastungsversuche (2016)

Brücken-Nr. Bw	Nachweis	Typ	Lichte Weite l_w	Besonderheiten
Kampagne 1 (Tastversuche)				
9	BK 9	Rohrdurchlass	1,00 m	Stirnwand Verblendmauerwerk
13	BK 9	Durchlass	1,00 m	Stirnwand Waschbeton
16	BK 9	Rahmen	2,50 m	
Kampagne 2 (Belastungsversuche)				
10	BK 30	Durchlass	1,00 m	Stirnwand Waschbeton
11	BK 30	Durchlass	1,00 m	Stirnwand Waschbeton
7	BK 30	Durchlass	1,00 m	Stirnwand Verblendmauerwerk
14	BK 30	Durchlass	1,00 m	Stirnwand Waschbeton
6	BK 30	Rahmen	2,50 m	
5	BK 30	Rahmen	2,50 m	
2	BK 30	Rahmen	2,50 m	
4	BK 30	Rahmen	2,50 m	sehr schiefwinklig
3	BK 9	Plattenbalken	5,60 m	BW mit größerer Stützweite
15	BK 30	Rahmen	2,50 m	
18	BK 30	Durchlass	1,60 m	Historisches Mauerwerksgewölbe

Tabelle 2 Lastannahmen nach DIN 1072 [8], Brückenklassen BK 9 und BK 30

BK	Bemessungsfahrzeug				Umgebende Flächenlast	
	Gesamtlast P [kN]	Achslasten [kN]	Achsab- stand [m]	Schwere Einzelachse [kN]	Hauptspur p_1 [kN/m ²]	Nebenspur p_2 [kN/m ²]
9	90	30 + 60	3,0	90	4,0	3,0
30	300	3 × 100	1,5	130	5,0	3,0

$$\text{ext } F_Q = g_2 + \varphi \cdot P \quad (1)$$

$$\text{ext } F_{Ziel} = \gamma_R \cdot (\gamma_{g1} \cdot g_1 + \gamma_{g2} \cdot g_2 + \gamma_p \cdot \varphi \cdot P - g_1) \quad (2)$$

Die Sicherheitsfaktoren wurden anhand der entsprechenden Normenwerke, Richtlinien und Empfehlungen gewählt (DIN EN 1991 [9], [3] und [7]):

- für die veränderlichen Einwirkungen (Achslast P): $\gamma_p = 1,50$ [9] und
- für den Bauteilwiderstand (je nach Nachweisformat):
 - $\gamma_R = 1,10$ (stahlseitig [3]) oder
 - $\gamma_R = 1,15$ (Pfahlprobelastung [7]).

Um eine Durchfeuchtung der direkt befahrenen Überbauten abzubilden, wurde der Teilsicherheitsbeiwert des Eigengewichts des Tragwerks auf der sicheren Seite zu $\gamma_{g1} = 1,05$ festgelegt, abweichend zur aktuell gültigen Richtlinie [3]. Die sich aus diesen Annahmen ergebenden Versuchslasten sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3 Versuchslasten für die 11 untersuchten Brückenbauwerke (Kampagne 2)

Bauwerk Nr.	BK	Stützweite	Breite	Schwingbeiwert	Gebrauchslast		Versuchsziellast	
					Überbau	Widerlager	Überbau	Widerlager
BW		l_s [m]	b [m]	φ [-]	ext F_Q [kN]	ext F_Q [kN]	ext F_{Ziel} [kN]	ext F_{Ziel} [kN]
3	9	5,70	4,45	1,35	150	115	260	215
7, 10, 11, 14	30	1,125	≤ 6,50	1,39	195	145	330	255
2, 4, 5, 6, 15	30	2,60	≤ 5,00	1,38	195	170	330	285
18	30	1,60	6,20	1,4	140	100	225	165

Es kam das in Abschnitt 2.2 und [1] beschriebene neue Verfahren mit Einsatz eines Mobilkranes zur Anwendung. Aufgrund der ermittelten Versuchslasten und der Geometrien von Bauwerken und Mobilkran wurde das 4-achsige Modell GMK 4100 (G ~ 50 t) des Herstellers Grove ausgewählt.

4.2 Belastungsprogramm

Der Versuchsablauf war an jedem Bauwerk in mehrere Schritte gegliedert. Bild 4 enthält exemplarisch die Lastpositionen für ein Bauwerk mit einer Stützweite von 2,60 m. Die versetzte Anordnung der Lasteinleitungsflächen, hervorgerufen durch den Kran und die leicht schiefwinklige Brücke, erzeugte nur in einem Teilbereich extreme Beanspruchungen, so dass die Auswahl der Messausstattung und die Online-Analyse vereinfacht wurden. Für die anderen Stützweiten oder Tragwerkstypen (Gewölbe) wurden die Laststellungen entsprechend angepasst. Bei größeren Straßenbreiten wurde die Untersuchung seitenversetzt wiederholt. In jeder Laststellung wurden mindestens drei Laststufen bis zur Versuchsziellast F_{Ziel} angefahren und die Gebrauchslast F_Q mehrfach erzeugt, um die Reproduzierbarkeit und Reversibilität der Messkurven nachweisen zu können.

4.3 Messtechnik

Die messtechnische Ausstattung der Bauteile erfolgte so, dass alle notwendigen Informationen zur Zustandsbewertung – z. B. Dehnung, Durchbiegung, Setzung und Verschiebung, s. Bild 5 – gewonnen werden konnten. Neben den obligatorischen Messungen der Überbaudurchbiegung und der Widerlagersetzung (Bild 6) zur Erfassung des Gesamtverformungsverhaltens des Tragwerks wurden je nach Brückentyp weitere Sensoren installiert, die die zu erwartenden Versagensmechanismen überwachen sollten [10]. So wurden bei den Durchlässen zusätzlich die Horizontalverschiebung der Widerlagerwände gemessen

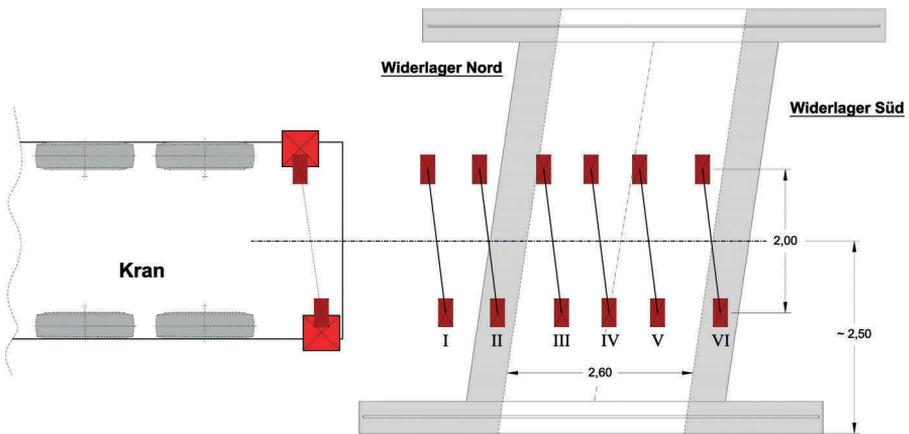


Bild 4 Beispiel der Laststellungen I-VI für Brückenbauwerke mit Stützweiten $l \leq 2,60$ m

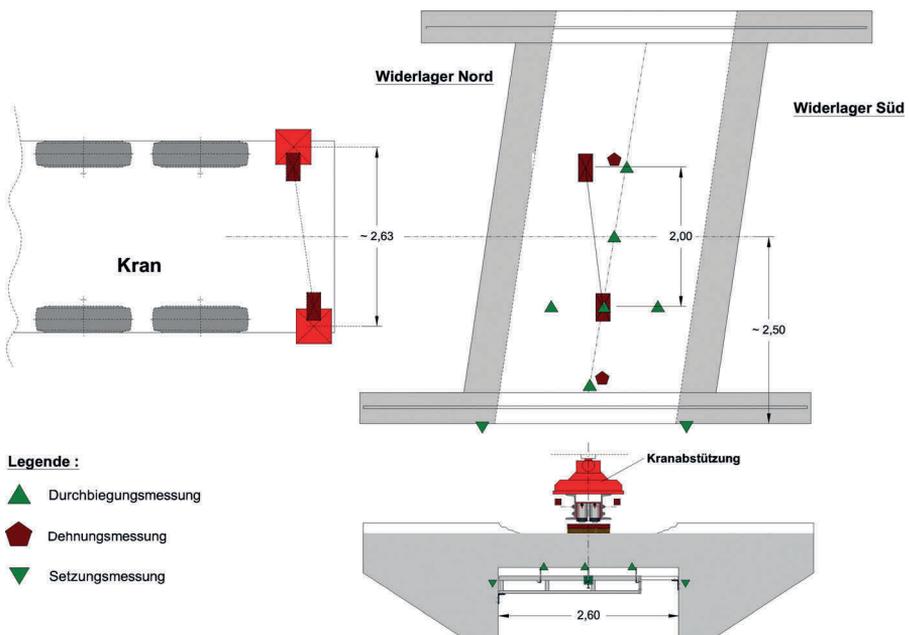


Bild 5 Messausstattung am Beispiel eines Rahmenbauwerks mit Stützweiten $l \leq 2,60$ m (Bw 2)

und bei Rahmentragwerken sowie Gewölben die Biegedehnungen. Letztere geben zwar grundsätzlich nur Informationen aus einem örtlich begrenzten Bereich, bei richtiger Positionierung kann daraus jedoch auch auf Systemveränderungen geschlossen werden,



Bild 6 Lasteinleitung und Setzungsmessung (Pfeile)



Bild 7 Dehnungs- und Durchbiegungsmessung im Gewölbe

im Rahmentragwerk z. B. die Umlagerung von Stütz- zu Feldmomenten, beim Gewölbe das Durchschlagen der Stützlinie – sowohl im Scheitel als auch im Viertelpunkt (Bild 7).

Kraftmessung: Zur Kraftmessung kam ein Druckaufnehmer mit einem Messbereich bis 1000 bar und einer Anzeigegenauigkeit von ± 2 bar zum Einsatz, was bei dem eingesetzten Hydrauliksystem einer Anzeigegenauigkeit von etwa ± 3 kN entspricht.

Wegmessung (Durchbiegungen, Verschiebungen und Setzungen): Die Vertikal- und Horizontalverformungen wurden durch induktive Wegaufnehmer WT 10 gemessen (Messbereich von ± 10 mm, reproduzierbare Auflösung unter Baustellenbedingungen ca. 0,01 mm). Die Durchbiegungen des Überbaus wurden relativ zu den Widerlagern bestimmt, die Horizontalverschiebung der Widerlager relativ zur Brückenstirnwand, ihre Setzung relativ zur Geländeoberkante etwa 2–3 m vom Bauwerk entfernt (Bild 6). Ausnahme war das Bauwerk Nr. 3 (Plattenbalken), bei dem die Verformung der Plattenpiegel relativ zu den Plattenbalken gemessen wurde.

Integrale Dehnungsmessungen: An den Überbauten wurden die Dehnungen mit induktiven Wegaufnehmern WT 5 integral gemessen (Bild 7). Durch die Wegänderungen Δl kann bei bekannter Basislänge l über die Beziehung $\epsilon = \Delta l/l$ eine integrierte Dehnung ϵ errechnet werden.

Umweltbedingungen: Die Umweltbedingungen wurden ebenfalls bestimmt und in die Messprotokolle aufgenommen (Temperatur etwa 12 bis 24 °C; relative Luftfeuchte etwa 45 bis 95 %).

5 Messwterergebnisse

5.1 Messwertanalyse

Während der Versuche wurden die maßgebenden Bauteilreaktionen in Abhängigkeit der Versuchslast grafisch auf dem Monitor dargestellt und zeitgleich nach den folgenden Abbruchkriterien analysiert:

- Reproduzierbarkeit (gleiche Bauwerksreaktion bei wiederholter Belastung),
- Reversibilität (keine bzw. geringe bleibende Verformung),
- Grenzwertkriterien (Einzelmesswerte: Rissweiten, Durchbiegung, Schubverformungen, ... [3]).

5.2 Globales Tragverhalten

Aus den Kraft-Reaktionskurven ließ sich entnehmen, dass die Überbauten ein annähernd linear-elastisches Last-Durchbiegungsverhalten aufwiesen. Die maximale Überbauverformung unter Ziellast (inkl. Teilsicherheitsbeiwerten) betrug weniger als 2,0 mm. Größere bleibende Verformungen wurden nur bei den Widerlagersetzungen beobachtet, die bei Wiederholungsmessungen jedoch einen reproduzierbaren und reversiblen Kurvenverlauf zeigten und daher unkritisch waren. Biegerisse konnten visuell nicht identifiziert werden.

Die Durchbiegungen f_v blieben selbst unter der Versuchsziellast F_{Ziel} unter dem Kriterium $f_v < l_s/1000$ (Tabelle 4), so dass die Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen war.

- Durchlässe mit Stützweite $l_s = 1,125$ m (Stahlbetonplattenfertigteile, Bw 7, 10, 11, 14):
 $f_Q \leq 0,40$ mm < zulässig $f_Q = l_s/1000 = 1,125$ mm
- Wegebrücken mit Stützweite $l_s \leq 2,60$ m (Stahlbetonplatten, Bw 2, 4, 5, 6, 15):
 $f_Q \leq 0,28$ mm < $l_s/1000 = 2,6$ mm
- Wegebrücke mit Stützweite $l_s = 5,70$ m (Stahlbetonplatte, Bw 3):
 $f_Q \leq 0,70$ mm < $l_s/1000 = 5,7$ mm
- Gemauerter Gewölbedurchlass mit Stützweite $l_s = 1,60$ m (Bw 18):
 $f_Q \leq 0,05$ mm < $l_s/1000 = 1,6$ mm

Tabelle 4 Maximale Verschiebungen in vertikaler (f_v) und horizontaler (f_H) Richtung

Bauwerk Nr. BW	Nachweis- klasse BK	Stützweite l_s [m]	Lastfall F_{\max} [kN]	Maximale Verschiebungen		
				Überbau f_v [mm]	Widerlager f_v [mm]	f_H [mm]
10	30	1,125	337	0,13	0,09	-0,008
			Kranüberfahrt	0,22	0,19	-0,025
11	30	1,125	338	0,25	0,22	-0,04
			Kranüberfahrt	0,38	0,30	0,08
7	30	1,125	341	0,32	0,22	-0,05
			Kranüberfahrt	0,29	0,27	-0,10
14	9	1,125	308	0,72	0,18	-0,03
6	30	2,60	341	0,05	0,02	-
			Kranüberfahrt	0,06	0,22	-
5	30	2,60	341	0,40	0,02	-
			Kranüberfahrt	0,34	0,19	-
2	30	2,60	341	0,09	0,05	-
			Kranüberfahrt	0,09	0,27	-
4	30	2,60	343	0,17	0,07	-
			Kranüberfahrt	0,13	0,23	-
3	9	5,70	337	1,60	0,24	-
15	30	2,60	343	0,10	0,05	-
			Kranüberfahrt	0,09	0,22	-
18	30	1,60	342	0,11	-	-0,04
			Kranüberfahrt	0,08	-	-0,01

5.3 Schlussfolgerung

Die Tragfähigkeit der getesteten Bauwerke, definiert durch das statische System und den Bauteilwiderstand (Geometrie und Material), war so groß, dass die Lasten bei allen Versuchen ohne Erreichen eines Grenzwertkriteriums bis zur Versuchsziellast $F_{\text{Ziel}} \leq 330$ kN (und teilweise darüber hinaus) gesteigert werden konnten. Die Brücken wurden daher für die gewünschte Nutzlast BK 30 bzw. BK 9 als gebrauchstauglich und tragsicher eingestuft.

Das verwendete Belastungsverfahren, bestehend aus einem Mobilkran GMK 4100 ($G \sim 50$ t) mit externer Prüfhydraulik, eignete sich ohne Einschränkungen, um die Beanspruchungen aus dem maßgebenden Lastbild einer schweren Einzelachse regelbar im Bauwerk zu erzeugen. Es muss jedoch beachtet werden, dass der Mobilkran bei Lasten über $F > 250$ kN ausgehoben wird. Im Falle einer plötzlichen Verformungszunahme können die Totmassen

durch den Kolbenweg des Hydrauliksystems ggf. nicht schnell genug reduziert werden. Durch die großen Verformungen entstehen zudem Horizontalkräfte, die durch die Hydraulikzylinder abgetragen werden müssen.

Die getesteten Bauwerke zeigten allesamt ein sehr gutmütiges Verformungsverhalten. Größere nichtlineare Verformungszunahmen oder plötzlich auftretende Systemveränderungen traten nicht ein. Es ist daher noch nicht erprobt, wie das Belastungssystem auf derartige Ereignisse reagiert und wie schnell sich dann die extern eingetragene Last reduzieren lässt. Deshalb muss vor Probelastungen mit dem beschriebenen System kritisch beachtet werden, dass ein Restrisiko eines Bauwerksschadens während der Versuche nicht vollständig ausgeschlossen werden kann. Dazu muss letztendlich ein größerer technischer und damit auch finanzieller Aufwand betrieben werden und es ist zu empfehlen, auf bewährte Systeme, wie das Belastungsfahrzeug BELFA [5] zurückzugreifen. Gleiches gilt für den Einsatz bei Brücken mittlerer und größerer Spannweite. Die technische Anwendungsgrenze des vorgestellten Systems liegt bei Brücken von Stützweiten $l_s < 9,0$ m, bei denen nach DIN 1072 [8] der Lastfall „Schwere Einzelachse“ maßgebend ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Nach einer Anfrage zur Untersuchung von Durchlässen und Wegebrücken im Stadtwald Eilenriede, Landeshauptstadt Hannover, wurde eine kostengünstige Methode entwickelt, wie die Tragsicherheit von Brücken kleiner Stützweite wirtschaftlich und risikoarm nachgewiesen werden kann. Das entwickelte Belastungssystem kann schnell und flexibel eingesetzt werden und ermöglicht den risikoarmen Tragsicherheitsnachweis, wenn im Versuchsablauf und bei der messtechnischen Ausstattung die zuvor beschriebenen Voraussetzungen beachtet werden. Das Verfahren wurde an 13 Stahlbetonbauwerken und einem Mauerwerksgewölbe erfolgreich erprobt, so dass die Wegebrücken in die gewünschten Nutzungsklassen BK 30 bzw. 9 eingestuft werden konnten.

Für weitere Einsätze muss jedoch kritisch erwähnt werden, dass bei Probelastungen mit dem beschriebenen Belastungssystem ein gewisses Restrisiko eines Bauwerksschadens verbleibt. Um dieses deutlich zu reduzieren, muss ein größerer technischer und damit auch finanzieller Aufwand betrieben werden.

Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt allen Projektbeteiligten, die mit ihrem Engagement und der konstruktiven Zusammenarbeit wesentlich zum Gelingen der komplexen Aufgabe beigetragen haben. Ebenso danken wir der Hochschule Bremen und der InnoWi GmbH, die uns bei der Anmeldung des Verfahrens zum Patent Nr. 10 2017 118 041.9 [11] unterstützt haben.

Literatur

- [1] Gutermann, M.; Schröder, C.; Böhme, C.: Nachweis von Straßenbrücken kleiner Stützweite am Beispiel von Wegebrücken in der Eilenriede, Hannover. Bautechnik 95 (2018), S. 477–484 – doi:10.1002/bate.201800018
- [2] Bolle, G.; Schacht, G.; Marx, S.: Geschichtliche Entwicklung und aktuelle Praxis der Probelastung, Teil 1 und 2. Bautechnik 87 (2010) 11|12, S. 700-707|784–789
- [3] Marx, S.; Schacht, G.; Maas, H.-G.; Liebold, F.; Bolle, G.: Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen II. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Zukunft Bau“, Dresden: TU Dresden, 2013, 80 S. – URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-130176>
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb, Hrsg.): Richtlinie für Belastungsversuche an Betonbauwerken. Berlin: Beuth, Ausgabe 9/2000.
- [5] Gutermann, M.; Schröder, C.: 10 Jahre Belastungsfahrzeug BELFA. Bautechnik 88 (2011) 3, S. 199–204
- [6] Bretschneider, N.; Fiedler, L.; Kapphahn, G.; Slowik, V.: Technische Möglichkeiten der Probelastung von Massivbrücken. Bautechnik 89 (2012) 2, S. 102–110
- [7] Steffens, K.; Bucher, Ch.; Opitz, H.; Quade, J.; Schwesinger, P.: Experimentelle Trag-sicherheitsbewertung von Massivbrücken. Bautechnik 76 (1999) 1, S. 1–15
- [8] DIN 1072:1985-12: Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen.
- [9] DIN EN 1991-1-1:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009.
- [10] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.): EA-Pfähle. Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“. Berlin: Ernst & Sohn, 2012
- [11] Schröder, C. Gutermann, M.; Hochschule Bremen; System zur Verwendung von Mobilkränen für die Durchführung von Belastungsversuchen an Straßenbrücken kleinerer Stützweite. Patent Nr. 10 2017 118 041.9. Anmeldetag: 8.8.2017

Bildnachweise

- Bilder 1, 2 Carsten Schröder
 Bilder 3, 6, 7 Marc Gutermann
 Bilder 4, 5 Dennis Kahl

Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden Heft 48

Das 10. Symposium „Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen“ fand am 11. März 2019 an der TU Dresden statt. Im vorliegenden Buch sind die schriftlichen Beiträge zusammengestellt.

Das Symposium wurde mit einem Vortrag über Analogieübertragungen und Sicherheitsaspekte bei experimentellen Bauwerksuntersuchungen eröffnet. Zum Thema Messtechnik wurden in diesem Jahr vor allem faseroptische Systeme und deren Anwendung sowie die Möglichkeiten digitaler bildgebender Verfahren diskutiert. Zwei Vortragende stellten Messmethoden vor, die auf Schwingungsanregungen beruhen, einmal zur Bestimmung von Stabkräften und einmal für die Prüfung von Befestigungen. Als Fortsetzung eines Beitrags zum 9. SEUB wurde das Potential von Miniaturproben zur Kennwertermittlung dargelegt.

Berichte über Projekte zur Thematik Bauwerksbeprobung und Monitoring rundeten das Vortragsprogramm ab. Neben einem Beispiel aus dem Hochbau nahmen beim 10. SEUB vor allem Projekte aus dem Brückenbau eine dominierende Rolle ein. Die Spanne reichte von der Anwendung faseroptischer Messmethoden bei 1:1-Versuchen über die realitätsnahe Bestimmung von Ziellastniveaus bis zu In-situ-Tests an Brückenbauwerken.