

Zeitschrift: Tec21
Herausgeber: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Band: 129 (2003)
Heft: 44: Brücke Siggenthal

Artikel: Statisch-dynamische Belastungsversuche: warum Belastungsversuche an neu erstellten Brücken auch heute nützlich sein können
Autor: Egger, Gottfried
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-108837>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>



1

Dynamische Belastungsversuche: Zweiachsiger Lastwagen mit insgesamt 157 kN Bruttolast während einer zentrischen Versuchsfahrt. Im Bildvordergrund das beidseitig angerampte «Brett» von 50 × 300 mm Querschnittsfläche für die gewaltsame Schwingungsanregung der Brücke (Bilder: Empa Dübendorf)

Gottfried Egger

Statisch-dynamische Belastungsversuche

Warum Belastungsversuche an neu erstellten Brücken auch heute nützlich sein können

Zwischen den Fertigstellungsarbeiten und der Einweihungsfeier grösserer Brücken werden auch heute, im Zeitalter der Simulationen und Modellrechnungen, vielfach noch abschliessende Versuche im Massstab 1:1 durchgeführt. Dabei werden mit angepassten statisch-dynamischen Belastungsversuchen das regelkonforme Verhalten des Tragwerks verifiziert und objektspezifische Kennwerte experimentell gewonnen. Am aktuellen Beispiel der Siggenthalerbrücke wird gezeigt, wie eine derartige Überprüfung im Detail ablaufen kann.

Probebelastungen sind eine eher teure Angelegenheit (die Aufwendungen für die Belastungsversuche betragen gegen ein Prozent der auf ca. 15 Mio. Franken bezifferten Baukosten) und in der üblichen Fertigstellungshektik bei einer neuen Brücke manchmal auch schwierig zu terminieren. Vorzugsweise sollten An-

strengungen dieser Art nämlich erst nach Einbau des Feinbelages und der Montage der beidseitigen Leitplanken oder Geländer anberaumt werden. Zudem muss das Bauwerk während der Messungen für jeden Verkehr, insbesondere auch Baustellentransporte, grundsätzlich gesperrt bleiben. Es stellt sich deshalb durchaus die Frage, ob Belastungsversuche in Zeiten elektronischer Rechenmittel und qualitätsgesicherter Herstellungsweise überhaupt noch Sinn machen. Von den (SIA-)Normen her wird eine derartige Überprüfung jedenfalls nicht explizit gefordert.

Warum Belastungsversuche

Trotzdem gibt es gute Gründe für die Durchführung von Belastungsversuchen, vor allem dann, wenn es sich beim Prüfobjekt um eine grössere oder unkonventionelle Konstruktion handelt. So lässt sich durch Vergleich von Berechnungsergebnissen und entsprechenden Messwerten die «Qualität» des gewählten Rechenmodells sowohl statisch als auch dynamisch überprüfen. Beim mehrmaligen Aufbringen grösserer Lasten auf ausgewählte Tragwerksabschnitte oder durch Superposition von Lastfällen kann das elastische Verhalten kontrolliert

werden. Durch die Zwischenschaltung von regelmässigen Nullablesungen (Brücke unbelastet) werden mögliche bleibende Verformungen erfasst. Besonders wertvoll sind auch die Resultate von dynamischen Untersuchungen. Eigenfrequenzen und Eigenformen von aktuellen Brückenschwingungen, zugehörige Dämpfungswerte sowie Stosszuschläge (dynamische Inkremente) mit und ohne forcierte Anregung können hergeleitet und mit statistischen Erhebungen der Empa verglichen werden. Die generelle Berechtigung von Belastungsversuchen kann nicht abschliessend beurteilt werden. Das Thema ist von Fall zu Fall neu aufzugreifen und durch die zuständigen Instanzen im Rahmen des Wünsch- und Machbaren jedesmal neu zu entscheiden, so wie dies auch bei der im vorhergehenden Beitrag beschriebenen Siggenthalerbrücke (mit hier positivem Ergebnis) geschehen ist.

Statische Untersuchungen

Bei den statischen Belastungsversuchen gelangten bis zu sechs vierachsige Lastwagen mit einer Bruttolast von je ca. 275 kN zum Einsatz (Bild 2). Total ergab sich so eine grösste Feldbelastung von 1645 kN oder rund 168 Tonnen, die in ausgewählten Stellungen hauptsächlich auf dem Bogen und zum Teil auch im Bereich der Vorlandbrücken zentrisch und exzentrisch platziert wurde. Zur Durchbiegungsmessung erfolgte die Montage von insgesamt 12 Messdraht-Abspannungen (Bild 4) und sechs Schlauchwasserwaagen (Bild 5, Details zur Durchbiegungsmessung siehe Kasten). Jeder Lastfall wurde je dreimal wiederholt. Die eigentlichen Messwerte ergaben sich dann aus der Differenz der Lastablesungen und dem Mittel der Nullablesungen vorher und nachher.

Die auf diese Weise hergeleiteten Durchbiegungswerte streuten bei Wiederholungen der Lastfälle im Allgemeinen nur um wenige $\frac{1}{100}$ mm; die Mittelwerte der grössten gemessenen Durchbiegungen sind in der Tabelle aufgelistet (in Klammern die vorgängig berechneten Werte bei einem Rechnungs-E-Modul von 36 kN/mm^2).

Zusammengefasst ergab sich ein eher steifes und grundsätzlich elastisches Tragverhalten im Rahmen der vorausgerechneten Werte (die Brücke liegt an einer Schwertransportroute). Infolge Temperaturzunahme von ca. 20 auf 27 °C und intensiver Sonneneinstrahlung während der ganztägigen Messdauer waren zudem im Bogenscheitel maximal bleibende Hebungen von 6,3 mm sonnenseitig und 2,8 mm im Schlagschattenbereich zu beobachten.

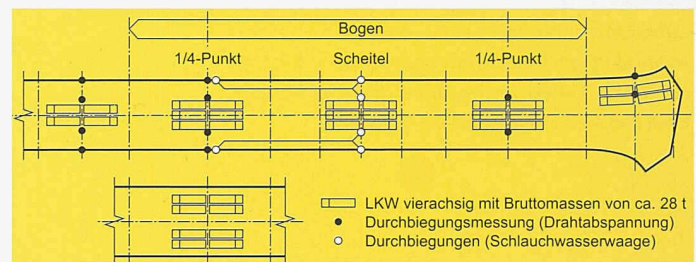
Dynamische Untersuchungen

Mit Hilfe eines zweiachsigen Lastwagens untersuchte die Empa das Verhalten des Bauwerks unter dynamisch wirkenden Beanspruchungen. Hierzu fuhr der 157 kN schwere LKW in insgesamt acht Fahrtenserien zentrisch und exzentrisch sowie ohne und mit Brett in drei ausgewählten Querschnitten in Richtung Baden über die Brücke (Bild 1). Die stufenweise erhöhte, pro Fahrt mittels Schlepprad möglichst konstant gehaltene Geschwindigkeit betrug zwischen ca. 3 km/h

Messposition	Belastung	max. Mittelwerte der Durchbiegung	
Bogenscheitel zentrisch	direkte Last 6 LKW	Vert. Verformung 4,8 mm	(5,2 mm)
Bogenviertelpunkt	direkte Last 6 LKW	Vert. Verformung 7,7 mm	(8,1 mm)
Normalfeld Vorlandbrücke	direkte Last 4 LKW	Vert. Verformung 1,4 mm	(1,3 mm)
Endfeld Vorlandbrücke	direkte Last 4 LKW exz.	Vert. Verformung 2,1 mm	(1,9 mm)

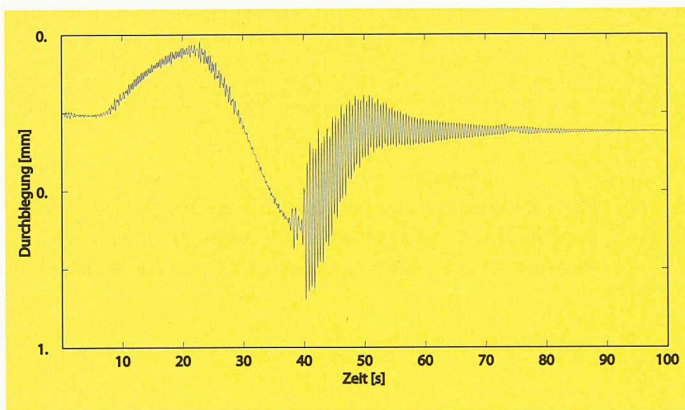
Tabelle

Maximale Mittelwerte der grössten gemessenen Durchbiegungen bei den statischen Belastungsversuchen. In Klammern die vorgängig berechneten Werte bei einem Rechnungs-E-Modul von 36 kN/mm^2



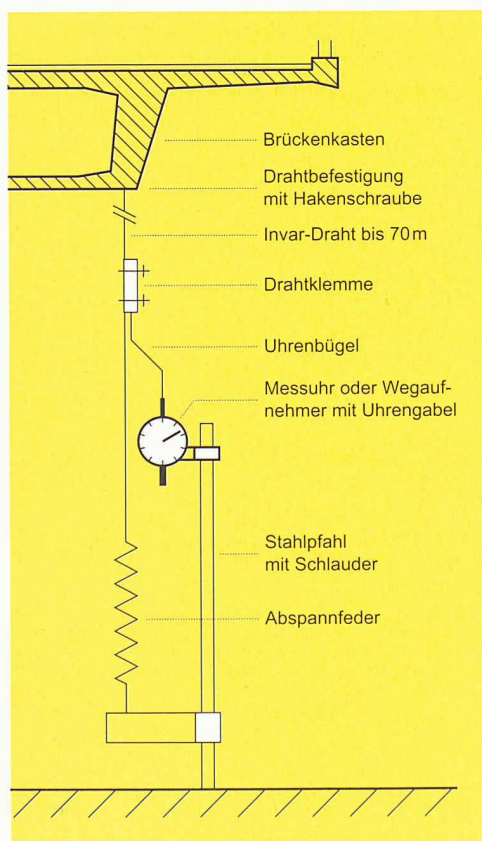
2

Schematische Darstellung der Laststellungen für die statischen Belastungsversuche mit vierachsigen LKW von ca. 28 t Bruttomasse. Sieben zentrische und exzentrische Laststellungen wurden je 3-mal wiederholt



3

Zeitverlauf der Durchbiegung im Bogen-Viertelpunkt während der zentrischen Fahrt des Versuchsfahrzeugs mit 157 kN Bruttolast mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h und Brettanregung bei der Messstelle



4

Schema der Durchbiegungsmessung mit Drahtabspannung (Details siehe Kasten)

bei quasistatischen Fahrten und den maximal möglichen ca. 40 km/h. Die Wirkung von starken Schlägen, wie sie sich beispielsweise bei Fahrbahnunebenheiten ergeben können, wurde durch ein quer über die Fahrbahn gelegtes Brett simuliert. Dessen (angerampte) Querschnittsabmessungen betragen 50×300 mm, Einsatzorte waren einerseits der Bogenscheitel und der eine Viertelpunkt sowie andererseits das Normalfeld der Vorlandbrücke.

Die durch die Überfahrt des Fahrzeuges hervorgerufenen Tragwerksschwingungen wurden mit insgesamt acht induktiven Weg- und zwanzig Beschleunigungsaufnehmern erfasst. Ein zugehöriger Messverstärker sowie ein Fourier-Analyse-Gerät mit 32 Eingangskanälen und ein Laptop-Computer erlaubten die Steuerung und die Speicherung der anfallenden Messdaten. Die Bestimmung der tiefsten Eigenfrequenzen der Brücke erfolgten anhand der Signale vor allem der Beschleunigungsaufnehmer. Diese ermöglichen es infolge der hohen Empfindlichkeit, auch kleinste Tragwerksschwingungen zu beobachten, die sich durch so genannte ambiente Einwirkungen wie Wind, Mikroseismizität und indirekte Verkehrserschütterungen etc. ergeben.

Zwischen den Frequenzen von 1,18 und 5,65 Hz konnten total acht Eigenschwingungen, nämlich zwei Transversal- und je eine antimetrische bzw. symmetrische Biegeschwingung sowie je zwei weitere Biege- und Torsionsschwingungen, identifiziert werden. Die Messergebnisse stimmten wiederum sehr gut mit den Berechnungen überein. So wurde die dritte symmetrische (Bogen-)Biegeschwingung zu 2,17 Hz gemessen, der Rechnungswert lag bei 2,09 Hz. Hingegen konnte die absolut tiefste antimetrische Biege-Eigenschwingung von rechnerisch 0,87 Hz durch die Fahrversuche nicht nachgewiesen werden (möglicherweise zufolge zu geringer Anregung oder/und beschränkt behinderter Längverschieblichkeit der Brücke).

Die Dämpfung ausgewählter Eigenschwingungen wurde anhand des Ausschwingvorganges der Durchbiegungen und der Beschleunigungen zufolge Stossbelastung beim Überfahren des Brettes bestimmt. Es ergaben sich dabei Werte zwischen 3,0 und 4,2% für das logarithmische Dekrement, was aufgrund der Erfahrungswerte der Empa als schwach gedämpft bezeichnet werden kann. Die dynamischen Inkremente bzw. Stosszuschläge berechnen sich wiederum aus dem Vergleich der maximalen dynamischen Amplituden mit den entsprechend schwingungsfreien, rein statischen Durchbiegungen. Bild 3 zeigt den Zeitverlauf der Durchbiegung bei einer Messstelle des Bogenviertelpunktes bei einer Geschwindigkeit des LKW von 10 km/h und Brettanregung.

Zusammengefasst resultierten maximale dynamische Inkremente ohne Brett bis 23% bei den zentrischen und bis 40% bei den exzentrischen Fahrten mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h im Bogenscheitel. Bei gewaltsamer Anregung mit Brett konnte gleichenorts der absolute Grösstwert von 196% bei einer zentrischen Fahrt mit einer Geschwindigkeit von 10 km/h festgestellt werden. All die genannten Stosszuschläge und weitere Werte im Bogen- und Normalfeldbereich liegen innerhalb der langjährigen Erfahrungswerte der Ab-

Durchbiegungsmessung mit Drahtabspannung (Bild 4)

Sofern der gewünschte Messpunkt an der Brücke und der lotrecht darunter liegende Punkt in Höhe OK Terrain zugänglich sind, können vertikale Verformungen mit einer Drahtabspannung gemäss der nebenstehenden Skizze gemessen werden. Durch die Verwendung von Invar-Draht ergeben sich nur geringe Temperaturverformungen. Bei Hebungen und Senkungen müssen aber zufolge Änderung der Abspannkraft die Messwerte mit einem Korrekturfaktor berichtigt werden (plus ca. 3,1% pro 10 m Draht).

Es sind sowohl statische als auch dynamische Messungen möglich, je nachdem kommen mechanische Messuhren oder induktive Wegaufnehmer zum Einsatz. Bei Lastfall-Wiederholungen betragen die Messwert-Streuungen im Allgemeinen nur wenige $\frac{1}{100}$ mm. Die Messunsicherheit beläuft sich auf ca. $\pm \frac{2}{10}$ mm.

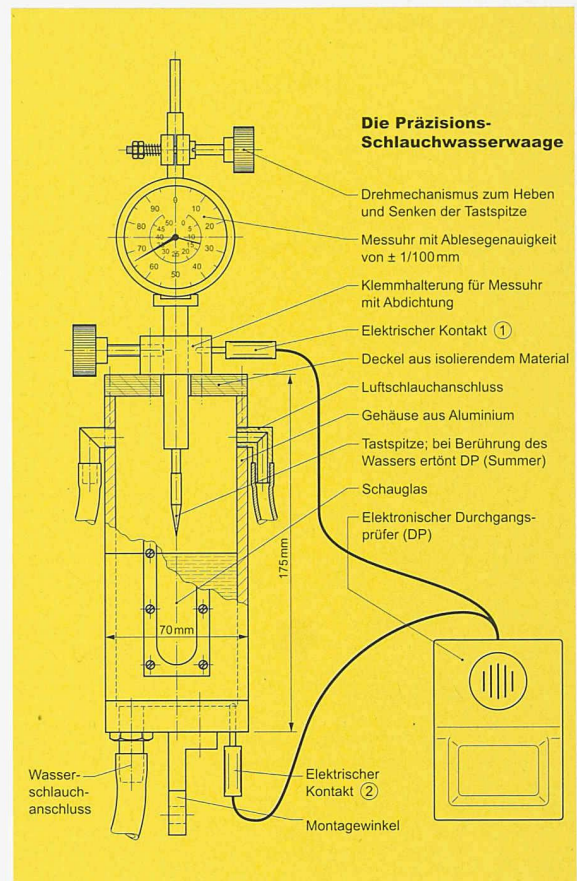
Nebst Durchbiegungen können noch Dehnungen, Rissbewegungen und Neigungsänderungen sowohl statisch als auch dynamisch erfasst werden.

Durchbiegungsmessung mit Schlauchwasserwaage (Bild 5)

Ist der Brückenuntergrund nicht zugänglich, z. B. bei einem strömenden Flusslauf, kann für Durchbiegungsmessungen ein Netz von Schlauchwasserwaagen benützt werden. Mindestens ein oder zwei Messgeräte, gemäss nebenstehender Skizze, müssen dabei im horizontalen Umfeld auf einem relativen Fixpunkt stehen (Widerlager, Pfeiler etc.).

Beim üblichen Messnetz von bis zu 20 Geräten handelt es sich um ein geschlossenes System, das bei jedem Wetter eingesetzt werden kann, da sowohl die Wasser- als auch die Luft-halbräume mit Kunststoffschläuchen verbunden sind. Allerdings sind nur statische Messungen möglich. Das Messprinzip beruht auf dem physikalischen Gesetz der kommunizierenden Gefässe.

Bei Lastfall-Wiederholungen betragen die Messwert-Streuungen im Allgemeinen nur wenige $\frac{1}{100}$ mm (!). Die übliche Messunsicherheit beläuft sich auf ca. $\pm \frac{4}{10}$ mm.



5

Schema der Durchbiegungsmessung mit Schlauchwasserwaage (Details siehe Kasten)

teilung Ingenieur-Strukturen der Empa Dübendorf. Die Siggenthalerbrücke kann damit gegenüber dynamischen Anregungen, wie sie durch schwere Fahrzeuge verursacht werden, als grundsätzlich wenig schwingungsaktiv eingestuft werden. Bei grösseren Belagsunebenheiten reagiert das neu errichtete Bauwerk allerdings eher empfindlich.

Gottfried Egger, dipl. Bauing. ETHZ, Mülibachstrasse 47a, 8617 Mönchaltorf (ehem. Empa Dübendorf, Abteilung Ingenieur-Strukturen)

gottfried.egger@bluewin.ch

Weitere Informationen durch:

Dr. sc. techn. Glauco Feltrin, dipl. Bauing. ETHZ, Empa Abteilung Ingenieur-Strukturen, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, glauco.feltrin@empa.ch

Literatur

G. Egger, G. Feltrin und M. Motavalli: Siggenthalerbrücke Kt. AG, Baden-Obersiggenthal, Probelastung statisch/dynamisch, Prüfbericht Nr. 424 171 vom 14. Januar 2003, Empa Dübendorf.