Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 6 (1960)

Artikel: Über das dynamische Verhalten von vorgespannten Brücken

Autor: Rösli, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-6994

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 02.10.2025

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

IV b 4

Über das dynamische Verhalten von vorgespannten Brücken

The Dynamic Behaviour of Prestressed Bridges

Sur le comportement dynamique des ponts précontraints

A. RÖSLI
Dr., dipl. Ing. ETH, Zürich

A. Einleitung

Beim Bau von Brücken aus vorgespanntem Beton erhebt sich immer wieder die Frage, wie sich solche Tragwerke unter dynamischer Belastung verhalten, d. h. unter den normalen — rollenden — und nicht nur statisch wirkenden Verkehrslasten.

Um einen Beitrag zur Beantwortung dieser Frage zu leisten, führte die Eidgenössische Materialprüfungsanstalt, Zürich, in den letzten drei Jahren an gegen 20 modernen Straßenbrücken aus vorgespanntem Beton sehr eingehende dynamische Untersuchungen durch. Die Versuche konnten in diesem größeren Rahmen durchgeführt werden dank der Gewährung eines Forschungskredites durch den Verein schweizerischer Zement-, Kalk- und Gipsfabrikanten, dem sehr regen Interesse verschiedener eidgenössischer, kantonaler und kommunaler Baubehörden sowie der tatkräftigen Förderung durch die Leitung der EMPA (Prof E. AMSTUTZ), speziell auch durch die Bereitstellung von modernsten elektrischen Meßapparaturen. Im weiteren war eine aus Meßtechnikern (besonders dipl. Ing. E. BEUSCH sowie J. P. MÜLLER u. a.) und Bauingenieuren (G. SPIRIG und K. GERZNER u. a.) zusammengesetzte Meßequipe maßgebend an diesen Versuchen und deren Auswertung beteiligt.

Der Verfasser möchte allen, die zum Gelingen dieser Versuche beigetragen haben, den besten Dank aussprechen.

Im nachfolgenden wird — ohne allzu stark in die Theorie einzugehen — ein Überblick über die wichtigsten Versuchsergebnisse gegeben. Dabei werden drei Begriffe verwendet, die aus Fig. 1 hervorgehen.

Diese Figur zeigt ein typisches Beispiel eines Dehnungsdiagrammes, das

bei einem sogenannten Sprungversuch an der Weinlandbrücke bei Andelfingen [1][1]) aufgenommen worden ist. Dabei fuhr ein 13-t-Lastwagen mit einer möglichst konstant gehaltenen Geschwindigkeit von 5 km/h über ein in der Mitte des 88-m-Feldes angeordnetes Brett von 4,5 cm Stärke. Das Diagramm zeigt nun mit der Zeit als Abszisse im wesentlichen einen Ausschnitt der in der Mitte des 88-m-Feldes aufgenommenen Einflußlinie für die Betondehnung mit den dazu überlagerten dynamischen Einwirkungen. In der linken Hälfte der Abbildung sind die Erschütterungen der Brücke, verursacht durch das gewöhnliche Fahren des Lastwagens, sichtbar. Beim Überfahren des Brettes

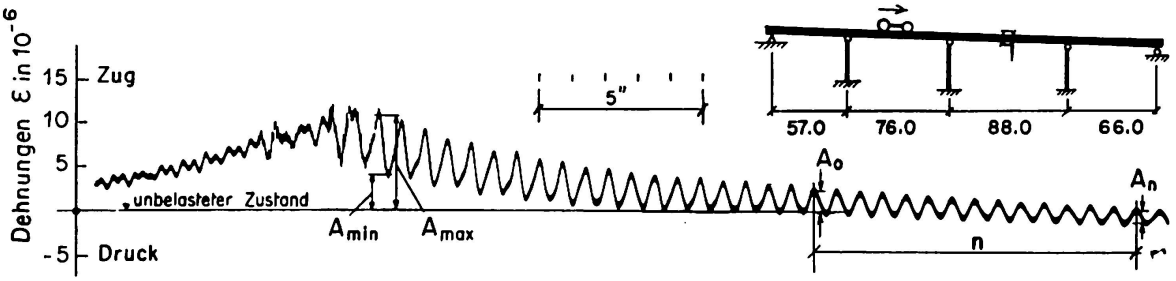


Fig. 1. Dynamische Dehnungen, verursacht durch das Fahren eines Lastwagens über ein 4,5-cm-Brett.

Stoßzuschlag (in Prozent) $\varphi = \frac{\Delta A_{dyn}}{A_{stat}} \cdot 100 = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} \cdot 100$; im Beispiel $\varphi = 45\%$,

Eigenfrequenz: $n = 14$ Schwingungen in 9,8 Sekunden, d.h. Eigenfrequenz $= 1{,}4$ Schwingungen pro Sekunde,

Dämpfung (logarithmisches Dekrement) $\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n} = 0{,}036$.

erzeugen Vorder- und Hinterachsen des Lastwagens Stöße, die die Brücke in Schwingung versetzen. Nach dem Abklingen einiger Störungen schwingt das Bauwerk mit seiner Eigenfrequenz, wobei die Amplituden stetig abnehmen.

Aus solchen Diagrammen können der Stoßzuschlag, die Eigenfrequenz und die Dämpfungseigenschaften der betreffenden Brücke bestimmt werden.

Der *Stoßzuschlag* gibt an, um wieviel Prozent die dynamischen Werte größer sind als die entsprechenden statischen Dehnungen oder Durchbiegungen. Mit der Annahme, daß die dynamischen Auslenkungen um die statischen Werte als Mittellage schwingen, ergibt sich der Stoßzuschlag aus einem oberen und dem darauf folgenden unteren dynamischen Ausschlag, oder

$$\text{Stoßzuschlag } \varphi = \frac{A_{max} - A_{min}}{A_{max} + A_{min}} \cdot 100 \text{ (in Prozent)}.$$

Für das dargestellte Beispiel ergibt sich ein experimenteller Stoßzuschlag bei der Fahrt über das Brett von 45%.

---

[1]) Die Zahlen in eckigen Klammern beziehen sich auf die Literaturangaben.

Bei einer gewöhnlichen Fahrt — d. h. ohne den Sprung über das Brett — ist natürlich eine geringere dynamische Wirkung und ein kleinerer Stoßzuschlag zu erwarten. Auch dürfte sehr verständlich sein, daß diese experimentell bestimmten Werte sehr stark von den Versuchsbedingungen abhangen, d. h. vom verwendeten Lastwagen, seiner Federung, seiner Geschwindigkeit, dem Zustand des Brückenbelages usw.

Wenn die Konstruktion durch die Fahr- oder Sprungversuche zu einfachen Schwingungen angeregt wird, so kann ihre *Eigenfrequenz*, d. h. die niedrigste Resonanzfrequenz durch Auszählen leicht bestimmt werden. Im Beispiel werden für $n = 14$ Schwingungen 9,8 Sekunden benötigt; dies entspricht einer Eigenfrequenz der Weinlandbrücke von 1,4 Schwingungen pro Sekunde oder 1,4 Hertz.

Nicht in allen Fällen werden die Brücken bei Fahr- und Sprungversuchen zu so typischen Schwingungen angeregt, wie es im Beispiel gezeigt ist.

In solchen Fällen werden eigentliche Schwingungsversuche mit einem speziellen Schwingungserreger durchgeführt, die eine Bestimmung der Eigenfrequenz und der Dämpfung mit der notwendigen Genauigkeit erlauben.

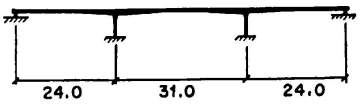
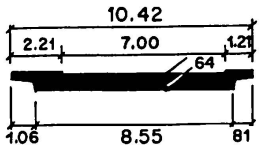
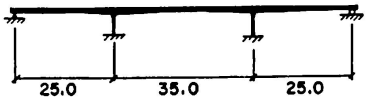
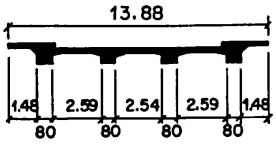
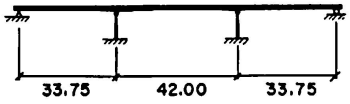
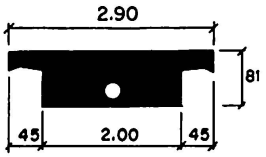
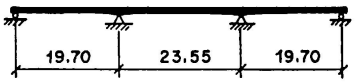
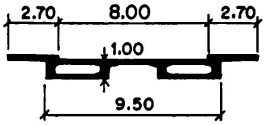
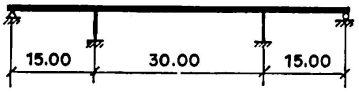
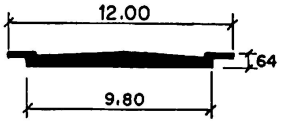
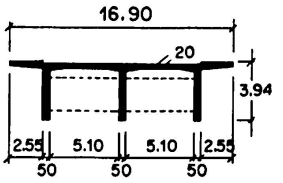
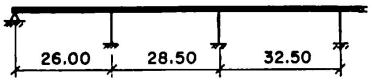
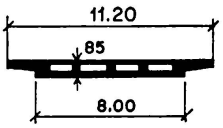
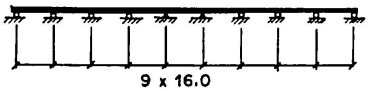
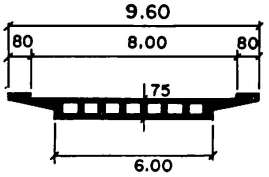
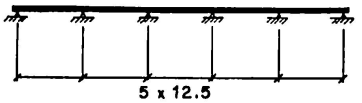
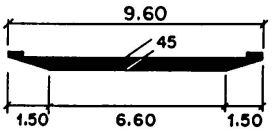
Von wesentlicher Bedeutung für das Beschreiben des dynamischen Verhaltens einer Konstruktion ist die Kenntnis ihrer Dämpfungseigenschaft. Von der *Dämpfung* hängt es ab, ob ein in Schwingung gebrachtes Bauwerk mehr oder weniger rasch wieder zur Ruhe kommt und ob eine mit der Eigenfrequenz der Konstruktion aufgebrachte periodische Störkraft gefährliche Schwingungen erzeugen kann. Im allgemeinen wird die Dämpfung charakterisiert durch das logarithmische Dekrement. Dabei wird angenommen, daß sich die Brücke wie ein einfacher Schwinger mit einem Freiheitsgrad und mit geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung verhalte. Mit diesen Annahmen ist das logarithmische Dekrement δ für die frei abklingende Schwingung mit den aufeinander folgenden Amplituden $A_0, A_1, \ldots . A_n$ definiert als

$$\delta = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad \text{oder} \quad \delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n},$$

wobei ln für den natürlichen Logarithmus steht. Aus dem Beispiel ergibt sich bei Betrachtung der abklingenden Schwingung über $n = 14$ Perioden ein logarithmisches Dekrement $\delta = 0{,}036$.

B. Eigenfrequenz und Dämpfung

Die Eigenfrequenz und die Dämpfung einer Konstruktion können durch die erwähnten physikalischen Maßzahlen eindeutig beschrieben werden. Diese experimentell bestimmten Werte sind für die untersuchten Brücken in den Fig. 2 und 3 zusammengestellt. Ebenfalls aufgeführt sind die aus der Literatur [2] entnommenen Angaben über zwei deutsche Brücken:

Brücke	statisches System	Querschnitt in Mitte Hauptfeld	Eigenfrequenz f (sec^{-1})	Dämpfung (log. Dekrement) δ	Stat. Durchbiegung für $P=1$ t in Mitte Hauptfeld d mm
Reußbrücke Ottenbach			1,8	0,044	0,181
Emmebrücke Biberist			2,3	0,058	0,186
Fußgängersteg über den Rhein bei Nohl			1,2	0,043	0,145
Dalmazibrücke Bern			5,2	0,100	0,036
Emmendingen Elz (Lit.)			3,14	0,050	0,119
Weinland-brücke Andelfingen			1,4	0,038	0,070
Zizers			2,3	0,075	0,120
Straßenbrücke Nr. 3 Murg			6,6	0,065	0,031
Straßenbrücke Nr. 5 Murg			6,2	0,080	0,051

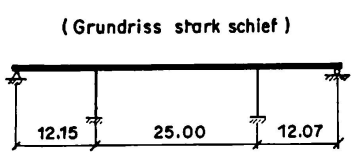
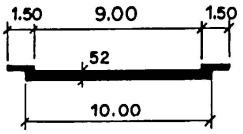
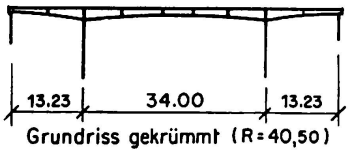
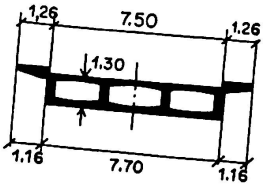
Brücke	Statisches System	Querschnitt in Mitte Hauptfeld	Eigenfrequenz f (sec^{-1})	Dämpfung (log. Dekrement) δ	Stat. Durchbiegung für P = 1 t in Mitte Hauptfeld d mm
Cilanderbrücke (Herisau)			4,4	0,057	0,065
Sihlbrücke bei Finstersee			4,9	0,052	0,046

Fig. 2. Zusammenstellung der wichtigsten dynamischen Eigenschaften einiger moderner Brücken aus vorgespanntem Beton.

Dreifeldbalken über die Elz bei Emmendingen.
Einfacher Balken bei Bleibach, ebenfalls über die Elz.

Ferner sind uns die Ergebnisse von zwei im nachfolgenden als Rahmenbrücke A und B bezeichnete Konstruktionen bekannt. Es handelt sich in beiden Fällen um Brücken mit etwa 20 m Spannweite und sehr steifen Rahmenstielen, so daß die Rahmenriegel praktisch als vollständig eingespannt gelten können. Beide Brücken weisen sehr ähnliche dynamische Verhältnisse auf, nämlich eine Eigenfrequenz von ca. 10 Hertz sowie ein logarithmisches Dekrement von 0,2. Im weiteren besitzen wir Eigenfrequenz und Dämpfung von einer vorgespannten Rippendecke in einem Fabrikbau.

In Fig. 4 sind die verschiedenen Werte für das logarithmische Dekrement als Funktion der Eigenfrequenz der Brücken aufgetragen. Aus dieser Darstellung können vorläufig etwa folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Bei den als durchlaufende Balken über drei Öffnungen mit gleichen Randfeldern ausgebildeten Brücken — in der Figur sind die entsprechenden Punkte durch die gestrichelte Linie verbunden — zeigt sich, daß mit steigender Eigenfrequenz auch die Dämpfung zunimmt.
2. Über dieser Verbindungslinie befinden sich die einfachen Balken sowie die durchlaufenden Balken mit Zwischengelenken, d. h. diese Konstruktionen weisen deutlich höhere Dämpfungen auf als die zuerst erwähnten. Unter sich betrachtet, steigt auch bei diesen Brückentypen die Dämpfung bei Zunahme der Eigenfrequenz.

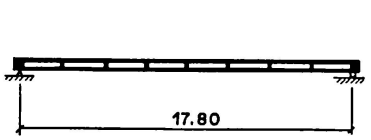
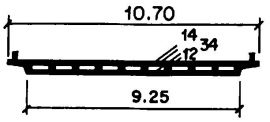
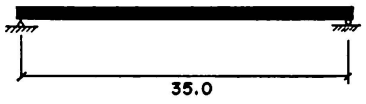
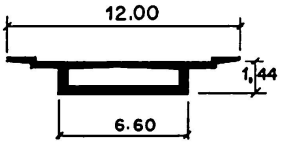
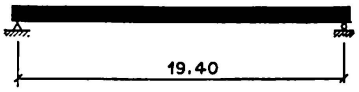
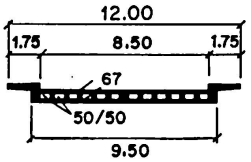
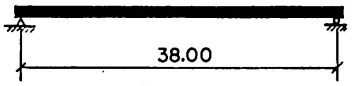
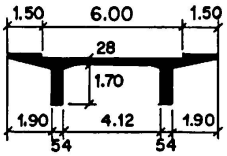
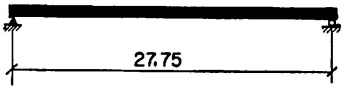
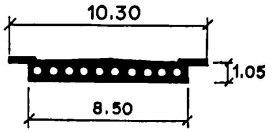
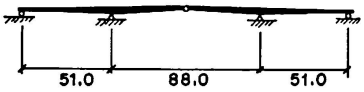
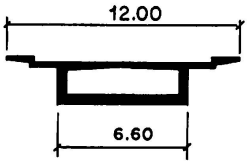
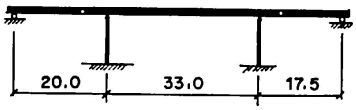
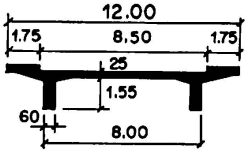
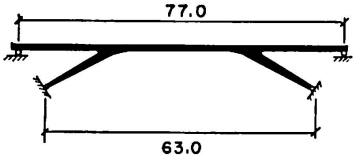
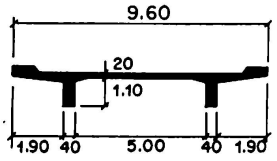
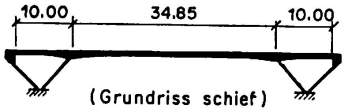
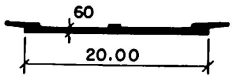
Brücke	statisches System	Querschnitt in Mitte Hauptfeld	Eigenfrequenz f (sec^{-1})	Dämpfung (log. Dekrement δ	Stat. Durchbiegung für $P=1$ t in Mitte Hauptfeld d mm
Saanebrücke (EMD) Saanen			4,4	0,099	0,154
Rheinbrücke Au-Lustenau (Vorland-brücke)			3,1	0,11	0,138
Unterführung Rheinstraße Au (Brücke V) Eisenbeton (gerissen)			5,0	0,190	0,128
Roßfallbrücke			4,5	0,198	0,083
Bleibach Elz (Lit.)			4,25	0,088	0,055
Rheinbrücke Au-Lustenau (Hauptbrücke)			1,0	0,077	0,64
Binnenkanal-brücke Au-Lustenau			2,4	0,088	0,165
Straßenbrücke Nr. 4 Murg			4,3	0,035	0,069
Zürich-Brunau			3,0	0,042	0,052

Fig. 3. Zusammenstellung der wichtigsten dynamischen Eigenschaften einiger moderner Brücken aus vorgespanntem Beton.

3. Unter der Bezugslinie befinden sich die rahmenartigen Brücken wie Brunau und Murg 4, die im Grundriß stark schiefen oder gekrümmten Brücken Cilander und Finstersee sowie die Balkenbrücken über mehr als 3 Öffnungen.
4. Erwartungsgemäß weisen die beiden Rahmenbrücken A und B entsprechend ihrer hohen Eigenfrequenz eine starke Dämpfung auf.
5. Die beiden Ergebnisse der deutschen Brücken liegen durchaus im Bereich der von uns bestimmten Werte. Damit werden unsere Versuche sichprobeweise bestätigt.
6. Die Versuchsergebnisse lassen erkennen, daß die Dämpfungseigenschaft einer Brücke im wesentlichen vom statischen System der Konstruktion (Zahl der Gelenke, Auflager usw.) sowie von der frequenzabhängigen inneren Dämpfung (Werkstoffdämpfung und Abmessung der Konstruktion) beeinflußt wird.

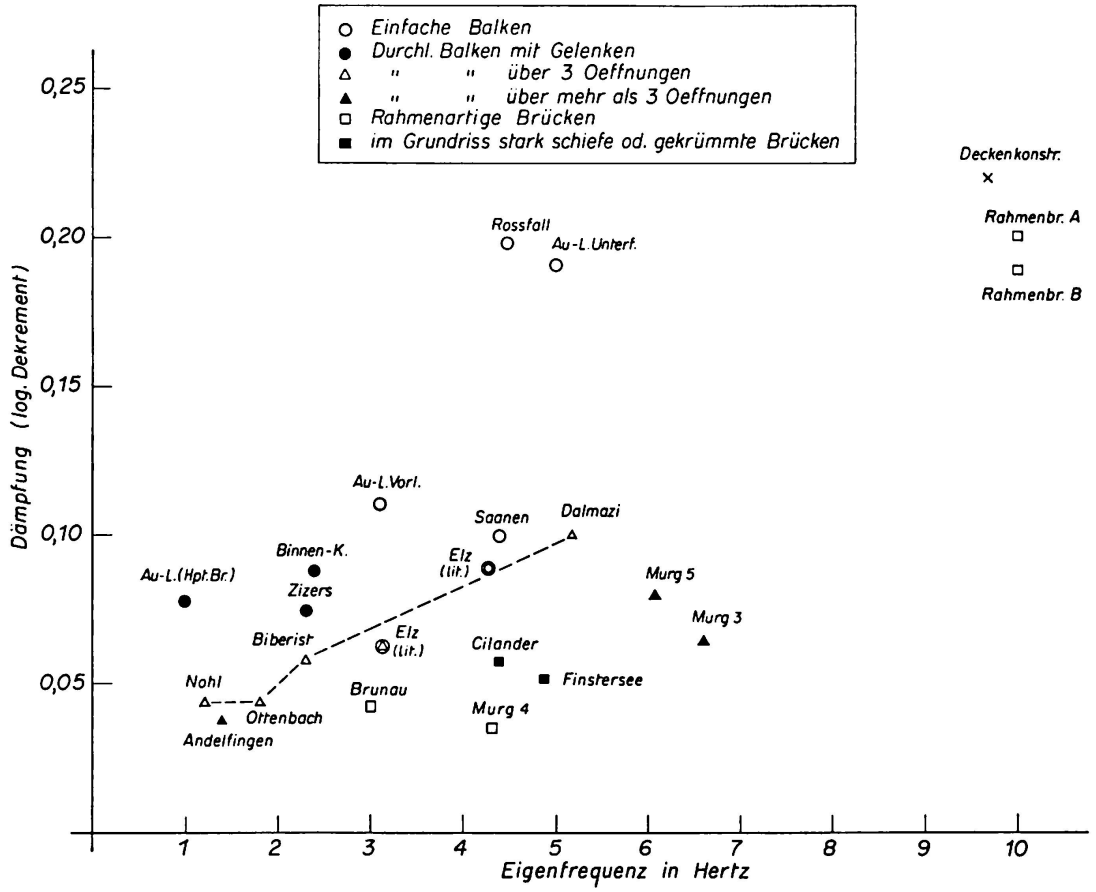


Fig. 4. Dämpfung als Funktion der Eigenfrequenz der Konstruktionen.

C. Verhalten von Brücken bei eigentlichen Stößen

Bei Brücken können durch den normalen Verkehr eigentliche Stöße entstehen, beispielsweise wenn der Belag Schlaglöcher aufweist, wenn der Übergang von Straßenkörper zur Brücke schlecht ausgebildet ist oder bei unsorg-

fältig versetzten Schachtdeckeln usw. Um die Beanspruchung der Brücken durch solche Stöße kennen zu lernen, werden bei den Messungen die vorher schon erwähnten Sprungversuche durchgeführt.

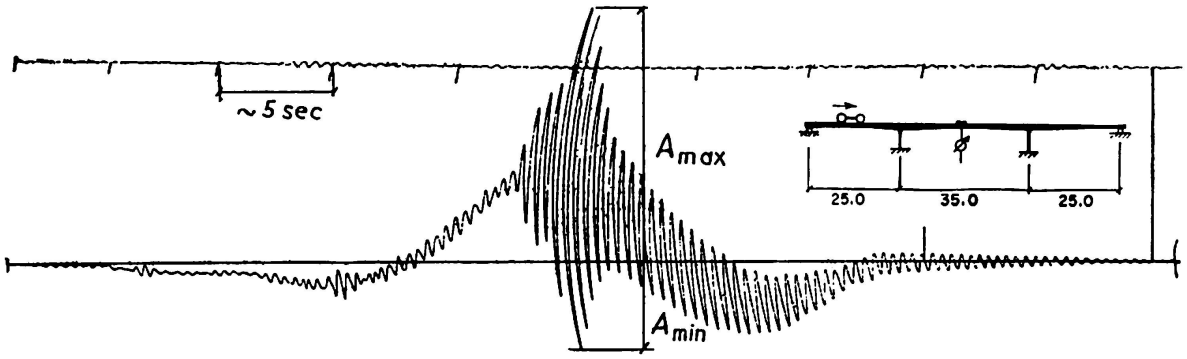


Fig. 5. Durchbiegungsdiagramm für Brückenmitte infolge Sprung eines Lastwagens über 4,2 cm starkes Brett.

Maßstab 20 : 1

$A_{max.} = 2{,}90$ mm — Eigenfrequenz: 2,3 Hertz

$A_{stat.} = 0{,}95$ mm — Logarithmisches Dekrement: 0,058

Stoßzuschlag $\varphi = \frac{1{,}95}{0{,}95} \cdot 100 = 205\%$,

Fig. 5 zeigt ein weiteres typisches Ergebnis eines Sprungversuches. Es stellt die mit einem mechanischen Schwingungszeichner in Brückenmitte aufgenommene dynamische Durchbiegung eines Dreifeld-Balkens dar, wobei wiederum ein Lastwagen über ein in Brückenmitte angeordnetes Brett fuhr.

Deutlich ist hier der Verlauf der entsprechenden statischen Einflußlinie erkennbar, die entstanden wäre, wenn der Lastwagen sehr langsam und ohne Hindernis über die Brücke gefahren wäre. Auch treten hier die beiden Stöße aus Vorder- und Hinterachse gut in Erscheinung.

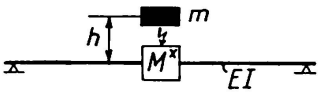
Die Auswertung des Versuches gibt hier eine Vergrößerung der maximalen dynamischen Ausbiegung gegenüber der entsprechenden statischen von rund 200%. Die größte Wirkung tritt dann auf, wenn der Stoß aus der Hinterachse genau in Phase mit der Schwingung infolge des Stoßes der Vorderachse verläuft, was natürlich nur von der Fahrgeschwindigkeit, dem Achsabstand und der Eigenfrequenz der Konstruktion abhängt. Immerhin ist es sehr oft nur ein Zufall, daß diese maximale Wirkung erzeugt werden kann. In diesem Fall kann aber der entstehende Stoßzuschlag grob abgeschätzt werden, und zwar unter der sehr vereinfachten Annahme, daß der Lastwagen als fallende Last aus einer Höhe gleich der Brettstärke aufgefaßt wird sowie unter der Voraussetzung, daß der Stoß vollständig elastisch verläuft.

Es kann dafür die allgemein bekannte und auf Grund der reduzierten Balkenmasse hergeleitete Näherungsformel für die Stoßwirkung einer fallenden Last auf einen Balken verwendet werden [3]. Ersetzt man dabei in der in

Fig. 6 etwas umgeformten Beziehung (1) den Ausdruck mit der reduzierten Masse durch einen gleichwertigen Ausdruck mit der Eigenfrequenz oder zur Vereinfachung der Schreibweise mit der Kreisfrequenz des Systems (2), so wird eine etwas übersichtlichere Beziehung (3) für φ als Funktion der Fallhöhe h, der statischen Durchbiegung $d_{stat.}$ und der Kreisfrequenz ω gewonnen.

Wird diese Beziehung nur für das Abschätzen der Stoßwirkung eines Lastwagens auf eine Brücke infolge einer Unebenheit (Fahrt über Brett) verwendet, so darf in Anbetracht der Vernachlässigung des relativ komplizierten und mit Dämpfung versehenen Schwingungsgebildes eines Lastwagens keine übertriebene Genauigkeit von dieser Näherungsformel gefordert werden.

Modell des Systems:



m = fallende Masse
M^* = reduzierte Masse der Konstruktion
k = Federkonstante = $1/\delta_0$

Für den einfachen Balken:

$M^* = {}^{17}/_{35}\, q\, l$

$k = 1 \Big/ \dfrac{l^3}{48\, E\, I}$

$$\varphi = \frac{\delta_{dyn} - \delta_{stat}}{\delta_{stat}} = \sqrt{1 + \frac{2h}{\frac{mg}{k} + \frac{M^* g}{k}}} \qquad (1)$$

$$\text{mit} \quad \omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{M^*}} \qquad (2)$$

$$\boxed{\varphi = \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_{stat} + \frac{g}{\omega^2}}}} \qquad (3)$$

wobei ω = Kreisfrequenz = $2\pi f$ (f = Eigenfrequenz der Konstruktion)

wenn $\delta_{stat} \ll \frac{g}{\omega^2}$: $\varphi \sim \sqrt{1 + \frac{2h\omega^2}{g}}$.

Fig. 6. Stoßwirkung einer fallenden Last (auf Grund der üblichen Näherungsformeln).

Bei der Berechnung praktischer Beispiele hat sich auch gezeigt, daß normalerweise bei Brücken die statische Durchbiegung in dieser Formel gegenüber g/ω^2 klein ist und vernachlässigt werden kann.

In der Fig. 7 sind nun die experimentell ermittelten, größten Stoßzuschläge zusammen mit den nach der Näherungsformel gerechneten Werten als Funktion der Frequenz aufgetragen. Dabei wurden 4,5 cm als mittlere Brettstärke oder Fallhöhe eingesetzt.

Wie aus der Darstellung entnommen werden kann, stimmen die extrem gemessenen Werte ganz brauchbar mit dieser Näherungsformel überein, die zeigt, daß auch die Stoßzuschläge mit steigender Eigenfrequenz zunehmen.

Auch passen die bei Brücken mit Eigenfrequenzen von über 6 Hertz festgestellten Stoßzuschläge von 300 und 600% durchaus in das Gesamtbild dieser Versuche.

In dieser Zusammenstellung ist ebenfalls ein extremer Wert aus den früheren EMPA-Berichten übernommen worden, nämlich jener Wert von der

Maillart-Brücke bei Garstatt im Simmental [4]. Dieser Wert liegt ebenfalls im Rahmen der vorliegenden Messungen.

Man mag nun der Meinung sein, daß die Untersuchung dieser großen Stoßzuschläge theoretisch sicher interessant sei, daß aber in Wirklichkeit solche großen Stöße praktisch nicht oder höchstens ganz ausnahmsweise auftreten.

Dem muß jedoch folgende Beobachtung[2]) entgegengehalten werden:

Bei einer der erwähnten Rahmenbrücken wurden gewöhnliche Fahrversuche durchgeführt, und zwar in einem Zeitpunkt, als sich auf der Fahrbahn eine festgefahrene Schneedecke befand, die wie folgt charakterisiert wurde:

«Die Oberfläche der Schneedecke auf der Fahrbahn konnte, obwohl Unebenheiten (Schlaglöcher und Wellen) vorhanden waren, als normal für solche Witterungsverhältnisse angesehen werden.»

Bei diesen gewöhnlichen Fahrversuchen wurden nun ebenfalls Stoßzuschläge von rund 300% gegenüber den beim Brettversuch gemessenen 600% beobachtet.

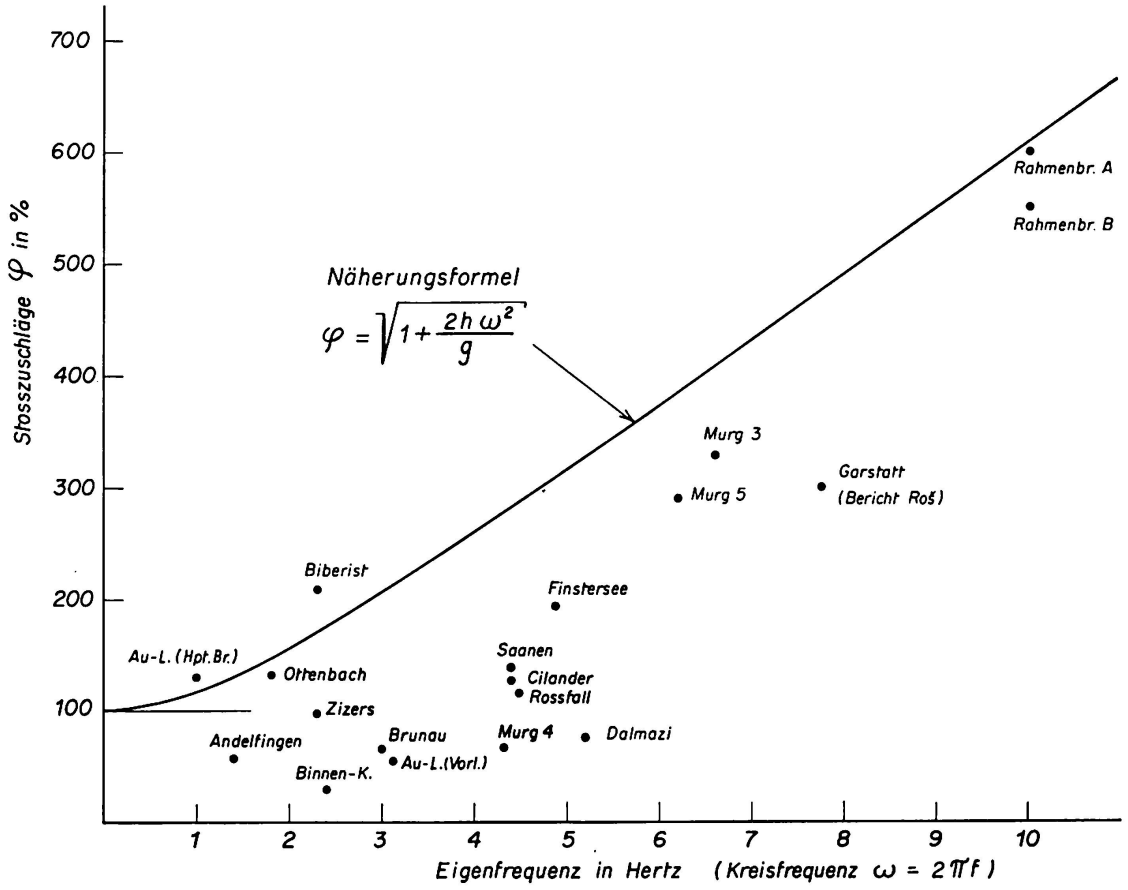


Fig. 7. Stoßzuschläge verursacht durch Sprung über 4,5-cm-Brett als Funktion der Eigenfrequenz.

---

[2]) Freundlicherweise mitgeteilt von Herrn Dr. A. VOELLMY, Abteilungsvorsteher der EMPA.

Falls es sich bei dieser Beobachtung nicht um eine Einzelerscheinung handelt, ist die Größenordnung der Stöße, wie sie bei den Sprungversuchen erzeugt werden, von sehr realer Bedeutung, die bei der Berechnung durchaus berücksichtigt werden muß.

Im Rahmen des durchgeführten Meßprogrammes war darum auch geplant, im Winter 1958/59 einige mit Schnee bedeckte Brücken gründlich zu untersuchen. Infolge Schneemangels in der vorgesehenen Gegend mißlangen diese Versuche jedoch weitgehend. Einzig zwei improvisierte Messungen — bei denen teilweise der Schnee herbeigeführt wurde — zeigten, daß bei Fahrten eines Lastwagens über eine mit Schnee bedeckte Brücke tatsächlich größere Stoßzuschläge entstehen können. Wie weit dies auch bei natürlichen Verhältnissen zutrifft, werden hoffentlich die Versuche im nächsten Winter zeigen.

D. Dynamische Einwirkungen durch das gewöhnliche Befahren der Brücken

Neben den erwähnten Stoßwirkungen treten auch — wie dies theoretisch nachgewiesen werden kann [5] — schon beim gewöhnlichen Befahren der Brücke ohne Hindernis gegenüber den statischen Durchbiegungen und Beanspruchungen vergrößerte Werte wie auch Schwingungen auf.

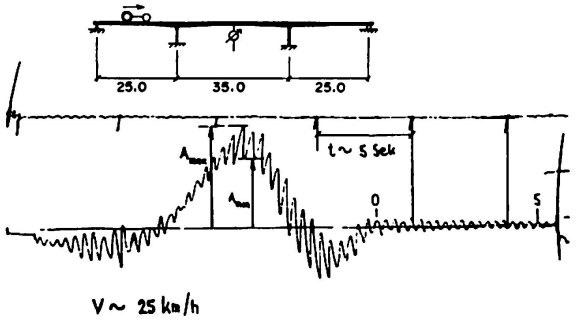


Fig. 8. Durchbiegungsdiagramm für Brückenmitte bei Fahrten eines Lastwagens mit 25 km/h Geschwindigkeit.
Stoßzuschlag $\varphi = 19\,\%$

Fig. 8 zeigt ein Durchbiegungsdiagramm, das bei einer gewöhnlichen Fahrt eines Lastwagens aufgenommen wurde. Allerdings war in diesem Zeitpunkt der fertige Fahrbahnbelag noch nicht aufgebracht, d. h. der Lastwagen rollte auf der rohen Betonoberfläche. Aus dem regelmäßigen Verlauf dieser Schwingungen muß aber auf eine eigentliche Aufschauklung geschlossen werden, die kaum den zufälligen Unebenheiten der Betonoberfläche zugeschrieben werden kann.

Aus diesem Diagramm kann ein Stoßzuschlag von rund 20% ermittelt werden, und zwar für den Zeitpunkt der Last in Brückenmitte.

Es ist noch interessant festzustellen, daß die größten Schwingungsamplituden auftreten, wenn der Lastwagen die Brückenmitte schon durchfahren hat.

In der Fig. 9 sind nun die Stoßzuschläge von sämtlichen gewöhnlichen Fahrversuchen als Funktion der Eigenfrequenz der Brücke aufgetragen. Aus der Figur geht hervor, daß sie im Maximum Werte von 40% erreichen. Es scheint, daß dieses Maximum besonders bei Brücken mit Eigenfrequenzen von 3 bis 5 Hertz erreicht wird. Dies dürfte damit zusammenhängen, daß nach deutschen Versuchen bei Lastwagen Erregerfrequenzen von 3,5—4,2 Hertz besonders häufig sind und deshalb besondere Auswirkungen auf Brücken ähnlicher Frequenz haben [6].

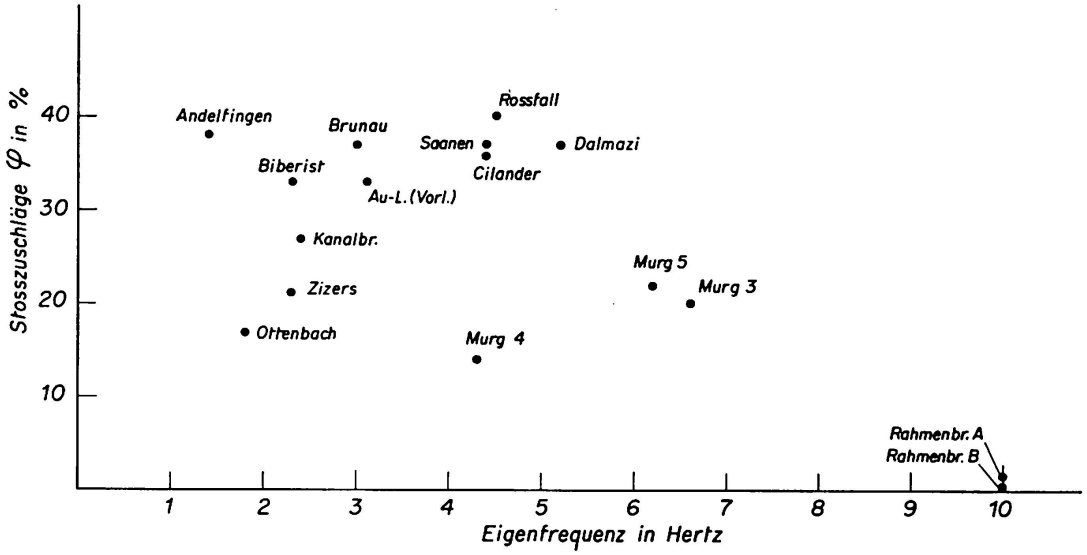


Fig. 9. Bei gewöhnlichen Fahrten beobachtete größte Stoßzuschläge φ.

Anscheinend nehmen diese Stoßzuschläge bei Brücken mit Eigenfrequenzen über 5 Hertz stark ab und verschwinden praktisch bei Brücken mit 10 Hertz.

Ein direkter Vergleich der bei den Fahr- und Sprungversuchen ermittelten Stoßzuschläge mit jenen, die bei der Berechnung der Straßenbrücken nach den Vorschriften zu berücksichtigen sind, ist nicht ohne weiteres angebracht. Beispielsweise müssen nach den schweizerischen Normen [7] die gesamten anzunehmenden Nutzlasten um einen von der Spannweite der Brücke abhängigen und als «Stoßziffer» bezeichneten Betrag erhöht werden, um so den dynamischen Einwirkungen des Verkehrs Rechnung zu tragen. Die experimentell ermittelten Werte hingegen beziehen sich auf die Stoßwirkung eines einzelnen Fahrzeuges. Bewegen sich nun mehrere Fahrzeuge gleichzeitig über eine Brücke, so ist normalerweise kaum mit einer ungünstigen Addition und Überlagerung der einzelnen Stöße zu rechnen. Hingegen kann erwartet werden, daß sich die dynamischen Einwirkungen der einzelnen Fahrzeuge auf die Brücke gegenseitig stören. Der resultierende Stoßzuschlag, bezogen auf die gesamte Nutzlast dürfte deshalb bei größeren Brücken meistens wesentlich geringer sein als jener, der für ein einzelnes Fahrzeug gemessen wird.

Für kleinere Brücken jedoch, bei denen das Gewicht eines Lastwagens ein wesentlicher Anteil der gesamten Nutzlast darstellt und die besonders relativ

hohe Eigenfrequenzen aufweisen, dürften die nach den Normen vorgeschriebenen Stoßziffern zu gering sein. Wenn hier nämlich Stoßzuschläge von der Größenordnung, wie sie bei den Sprungversuchen beobachtet werden, beispielsweise bei schneebedeckten Brücken auftreten, so können dabei sehr wohl höhere Beanspruchungen auftreten als gerechnet wurde. Eine Überprüfung dieser Normenvorschrift dürfte sich deshalb aufdrängen.

E. Schlußfolgerungen

Auf Grund der durchgeführten Versuche können folgende Erfahrungen vorläufig formuliert werden:

1. Moderne Brücken aus vorgespanntem Beton zeigen in der Mehrzahl Eigenfrequenzen von 1 bis etwa 6—7 Hertz und in einzelnen Fällen bis zu 10 Hertz.
2. Brücken mit niedriger Eigenfrequenz unterscheiden sich von solchen mit höherer Eigenfrequenz durch eine geringere Dämpfung sowie durch kleinere Stoßempfindlichkeit gegen eigentliche Stöße.
3. Brücken mit relativ hoher Eigenfrequenz zeigen wohl gute Dämpfungseigenschaft und Unempfindlichkeit gegen die Erschütterungen aus dem normalen Verkehr, hingegen weisen sie bedeutende Stoßzuschläge für eigentliche Stöße auf.
4. Es konnte bis jetzt nicht festgestellt werden, daß trotz oft sehr merkbaren Schwingungen Brücken mit niedriger Eigenfrequenz deswegen einen Nachteil in bezug auf ihre Sicherheit zeigen, sofern dafür gesorgt wird, daß sie nicht speziell aufgeschaukelt werden.
5. Für kleinere eingespannte Brücken sind wegen ihrer großen Stoßempfindlichkeit die schweizerischen Belastungsnormen sehr knapp.

Literaturverzeichnis

1. Gedenkschrift «Die Weinlandbrücke in der Umfahrungsstraße von Andelfingen». Direktion der öffentlichen Bauten des Kantons Zürich, Zürich 1958.
2. A. Lämmlein, «Schwingungsmessungen an Straßenbrücken verschiedener Bauart». Beton- und Stahlbetonbau. 46. Jahrgang, Heft 5, Mai 1951.
3. S. Timoshenko, "Vibration Problems in Engineering". New York 1937.
4. M. Roš, «Versuche und Erfahrungen an ausgeführten Eisenbeton-Bauwerken in der Schweiz». EMPA-Bericht Nr. 99, dritte Ergänzung.
5. F. Stüssi, «Grundlagen des Stahlbaues». Springerverlag, Berlin 1958.
6. Deutsche Reichsbahngesellschaft, «Mechanische Schwingungen bei Brücken». Berlin 1933.
7. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, «Technische Normen Nr. 160 (1956), Normen für die Belastungsannahmen, die Inbetriebnahme und die Überwachung der Bauten». Zürich 1956.

Zusammenfassung

Auf Grund von systematisch durchgeführten Versuchen werden Angaben über die dynamischen Eigenschaften, wie Eigenfrequenz, Dämpfung und Stoßzuschläge von gegen zwanzig modernen, vorgespannten Brücken gegeben. Dabei zeigt sich, daß die Dämpfung und besonders die Stoßziffer für eigentliche Stöße im wesentlichen von der Eigenfrequenz der Brücken abhangen und mit steigender Eigenfrequenz zunehmen.

Bei Brücken mit Eigenfrequenzen von ca. 10 Hertz konnten bei Fahrten eines Lastwagens über ein 4,5-cm-Brett Stoßzuschläge bis zu 600% beobachtet werden. Werte ähnlicher Größenordnung, wie sie bei diesen sogenannten Sprungversuchen entstehen, können vermutlich auch bei gewöhnlichen Fahrten über mit Schnee bedeckten Brücken auftreten. Bei normalen Fahrten eines Lastwagens konnten größte Stoßziffern bis zu 40% beobachtet werden.

Summary

Dynamic criteria, such as natural frequency, damping coefficient and impact factor, for about twenty recently constructed prestressed concrete bridges are presented. The results of this experimental investigation show that the damping coefficients and especially the impact factors for actual shocks depend primarily on the natural frequency of the bridges. Both factors increase with increasing natural frequencies.

The shocks of trucks running over a 4.5 cm plank gave impact factors up to 600% on bridges with a natural frequency of about 10 cycles per second. Similar values may probably be obtained by trucks travelling over snow-covered bridges. Trucks moving unobstructed over bridges produced impact factors up to 40%.

Résumé

Sur la base d'essais effectués systématiquement, des indications sont données sur les caractéristiques dynamiques, telles que la fréquence propre, l'amortissement et les majorations pour effets dynamiques au sujet d'une série d'env. vingt ponts modernes en béton précontraint. L'on relève à ce propos que l'amortissement et en particulier les coefficients pour les chocs proprement dits dépendent essentiellement de la fréquence propre des ponts et augmentent avec l'élévation de cette dernière.

Pour des ponts avec des fréquences propres d'env. 10 Hertz, des majorations pour effets dynamiques allant jusqu'à 600% ont pu être enregistrées lors de passages d'un camion par dessus une planche de 4,5 cm d'épaisseur. Des valeurs du même ordre de grandeur que celles résultant de ces dits essais de passage peuvent aussi principalement survenir dans le cas de circulation normale sur des ponts recouverts de neige. En marche normale d'un camion, les plus grandes majorations pour les actions dynamiques vont jusqu'à 40%.