

Dynamische Versuche an einer Brücke im Tessin

Dr. Tadeusz Szczesiak, Passera & Pedretti Consulting Engineers
CH-6916 Lugano-Grancia, Via al Molino 6

1 Problemstellung

Die untersuchte Brücke bei der Gemeinde Mezzovico (weiter Mezzovico Brücke genannt) ist eine im Jahre 1970 erbaute zweispurige 9 m breite Strassenbrücke aus Spannbeton. Sie hat eine Länge von ca. 180 m und ist in 5 Felder unterteilt. Die Randfelder haben eine Spannweite von ca. 32.8 m, die Mittelfelder ca. 36.1 m. Die Brücke hat im Feld einen offenen Querschnitt (Plattenbalken), im Bereich der Zwischenaufleger ist hingegen eine Druckplatte angeordnet.

Im Jahre 1998 wurde eine Untersuchung der Mezzovico Brücke durchgeführt. Dabei wurde die Tragsicherheit unter Berücksichtigung der Normen SIA 160 (Einwirkungen), SIA 162 (Stahlbetonbauten) und der Richtlinie SIA 462 beurteilt. Für den Auflagerbereich ergab die Untersuchung eine ungenügende Tragsicherheit infolge Schub, trotz bereits erfolgter Reduzierung der Lastfaktoren für die Eigenlasten. Ein Teil der Schubbeanspruchung wurde dabei durch das Lastmodell 1 verursacht. Diese Einwirkung wird gemäss SIA 160 (4 09 52) mit einem dynamischen Beiwert Φ von 1.8 multipliziert. Dabei stellt Φ das Verhältnis zwischen der totalen und der statischen Durchbiegung der untersuchten Brücke in einem Referenzpunkt dar (siehe [6]).

Um die Möglichkeit der Verwendung eines dynamischen Beiwerts kleiner als 1.8 in der statischen Berechnung verwenden zu können, wurde von IMM (Istituto Meccanica dei Materiali, Lugano-Grancia) und dem Ingenieurbüro Passera & Pedretti (Lugano-Grancia) vorgeschlagen, an der Brücke umfangreiche dynamische Untersuchungen durchzuführen. Es wurden neben Versuche mit einem Lastwagen auch Versuche mit einem an der Ingenieurschule Yverdon entwickelten Impulsgenerator geplant.

Das aus dieser Zielsetzung resultierende Forschungsprojekt wurde vom Dipartimento del Territorio del Canton Ticino – Ufficio dei Ponti della Divisione Construzioni unterstützt und mitfinanziert.

In diesem Beitrag wird unter anderem die direkte Bestimmung der dynamischen Beanspruchung dieser Brücke sowie die Anwendung des dynamischen Beiwerts gemäss der Norm SIA 160 diskutiert. Eine ausführliche Beschreibung der Versuche und der theoretischen Untersuchungen ist in [1] wiedergegeben.

2 Versuche an der Mezzovico Brücke

2.1 Dynamische Versuche mit einem Lastwagen

Die Versuche mit einem Lastwagen fanden am 31.08.1998 statt. Es wurden insgesamt ca. 30 Fahrten mit verschiedenen vorab festgelegten Geschwindigkeiten zwischen 10 und 50 km/h durchgeführt. Die Geschwindigkeit wurde dabei von der Verkehrspolizei mit einem Radargerät gemessen.



Bild 1 Versuche mit dem Lastwagen.

2.2 Dynamische Versuche mit dem Impulsgenerator

Impulsgenerator

Der Impulsgenerator, der vereinfachend als eine Heisswasserrakete beschrieben werden kann, wurde von A. Hool in Rahmen seiner Forschungsarbeiten im Bereich der Luftfahrt und an der Ingenieurschule Yverdon weiterentwickelt. Das Gerät erzeugt während einer Dauer von maximal 0.2 Sek. eine Kraft von bis zu 100 kN und wurde bereits bei dynamischen Untersuchungen grösserer Strassenbrücken (Schaffhausen) eingesetzt. Seine Konstruktion und Wirkungsweise ist im Aufsatz von Prof. Chappuis [10] näher beschrieben.

Die insgesamt 10 Versuche mit dem Impulsgenerator fanden am 01.09.1998 statt. Ein Ziel dieser Versuche war die Untersuchung des Verhaltens der Brücke unter einer genau definierten dynamischen Einwirkung (Systemidentifikation). Der dynamische Beiwert konnte natürlich mit Hilfe des Impulsgenerators nicht bestimmt werden, da ohne Fahrzeug auf der Brücke keine dynamische Interaktion stattfindet. Die Anordnung der Messstellen zeigt Bild 2, ein typischer Versuch mit einem Impulsgenerator ist hingegen in Bild 3 dargestellt.

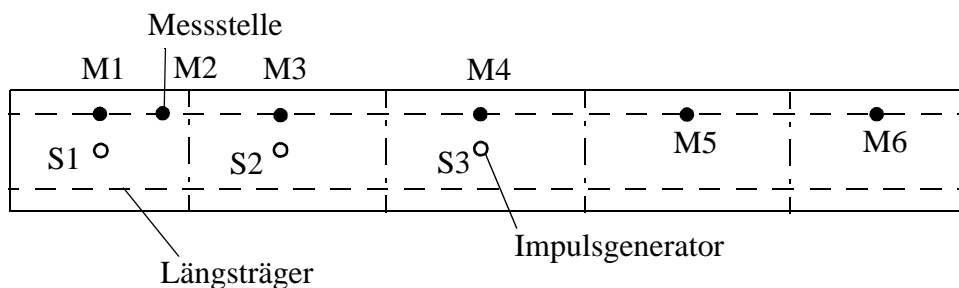


Bild 2 Anordnung der Messstellen bei den Versuchen mit dem Impulsgenerator

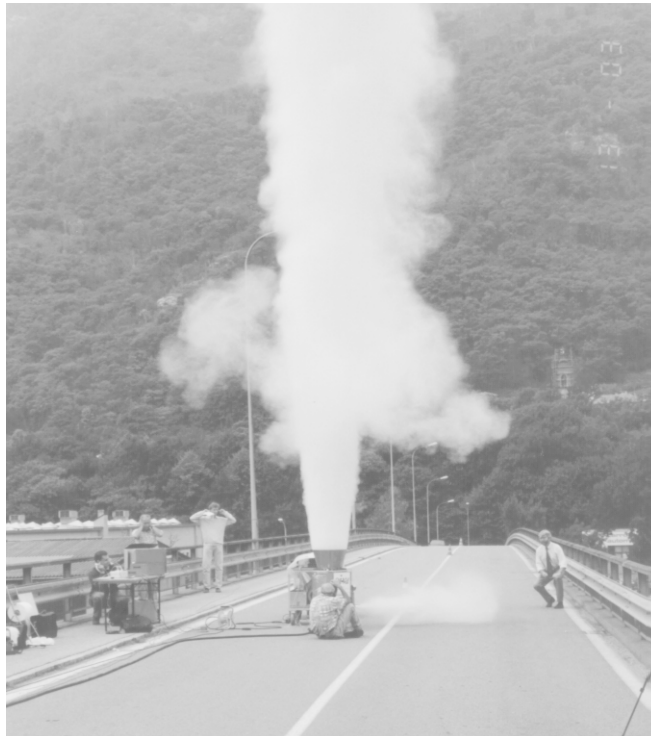


Bild 3 Versuche mit dem Impulsgenerator

Auswertung einiger ausgewählten Versuche

Bild 4 zeigt das Frequenzspektrum der vertikalen Geschwindigkeit der Brücke an der Messstelle M1 infolge eines Impulses an der Stelle S1 (Mitte des ersten Feldes), die ersten vier Eigenfrequenzen der Biegeschwingung sind dabei deutlich zu erkennen.

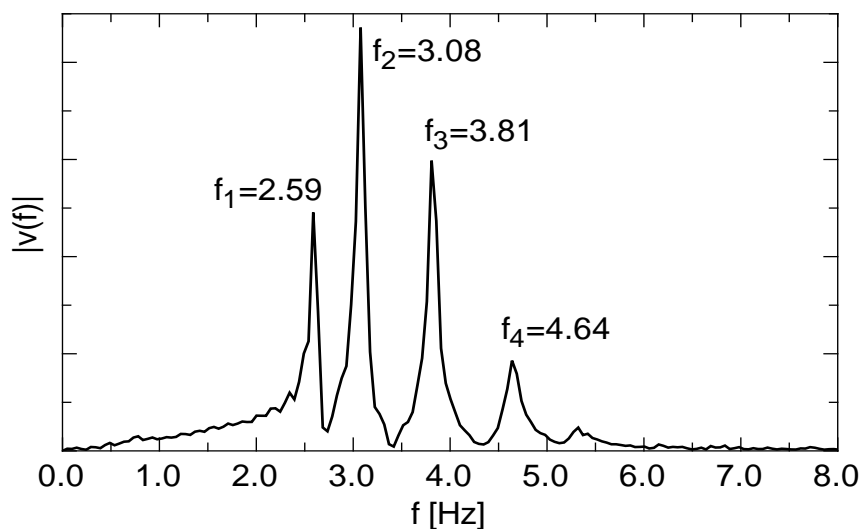


Bild 4 Bestimmung der Eigenfrequenzen der Mezzovico Brücke. Frequenzspektrum der Geschwindigkeit im Punkt M1 infolge eines Impulses an der Stelle S2

Bei einem weiteren Versuch wirkte der Impuls an der Stelle S2 in der Mitte des zweiten Feldes. Das Frequenzspektrum der vertikalen Brückengeschwindigkeit (Bild 5) zeigt, dass sich in Brückenmitte praktisch nur die erste Eigenschwingung bemerkbar macht. Der Grund dafür ist, dass die modale Amplitude der dritten Eigenschwingung an der Stelle S2 verschwindet und deshalb nicht angeregt werden kann. An der Messstelle M4 (Brückenmitte) hingegen verschwinden alle antimetrischen Eigenschwingungen. In der Folge kann an dieser Stelle nur die erste Eigenschwingung gemessen werden. Die Dämpfung dieser Eigenschwingung ist aus dem Zeitverlauf der vertikalen Brückengeschwindigkeit leicht berechenbar (siehe Bild 6).

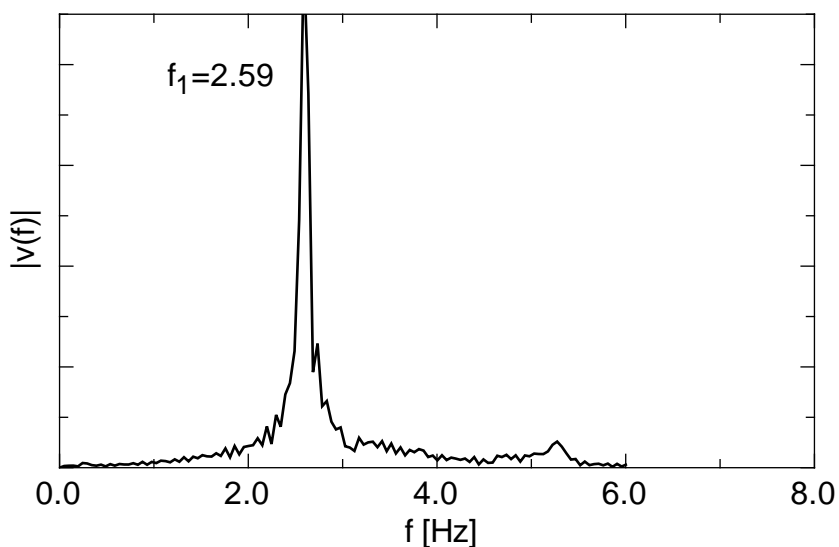


Bild 5 Frequenzspektrum der vertikalen Brückengeschwindigkeit im Punkt M4 infolge eines Impulses an der Stelle S2

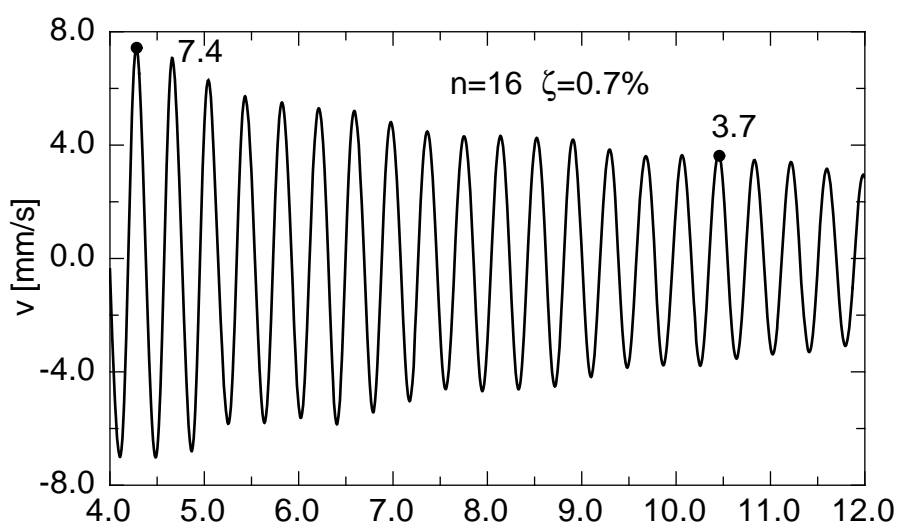


Bild 6 Ausschwingkurve der ersten Eigenschwingung mit Berechnung der Dämpfung

2.3 Statische Versuche mit Lastwagen

Für die Auswertung der dynamischen Versuche mit dem Lastwagen war es notwendig, die statische Durchbiegung der Brücke unter der Last eines Lastwagens zusätzlich zu messen, da man mit Hilfe den durchgeführten Geschwindigkeitsmessungen den quasi-statischen (tieffrequen- ten) Teil der Brückenbewegung leider nicht bestimmen kann. Die statische Messung führte die Firma Smartec SA (Lugano-Grancia) durch am 31.08.1998. Es wurden dabei SOFO Sensoren verwendet.

Die Durchbiegung in der Mitte des ersten Feldes unter einer Last von ca. 180 kN (Lastwa- gen) beträgt an der gleichen Stelle ca. 1.6 mm.

3 Theoretische Untersuchungen

Die totale Bewegung der Brücke unter einem fahrenden Lastwagen kann in jedem Punkt in einen langsamen quasi-statischen und in einen dynamischen Anteil zerlegt werden. Der erste Anteil der Bewegung hängt nur von der Lage des Lastwagens ab und hat eine quasi-statische Beanspruchung zur Folge. Der zweite Anteil der Bewegung ist hingegen von der Lage des Last- wagens unabhängig. Sie setzt sich aus sogenannten Eigenschwingungen zusammen, wobei jeder Eigenschwingung eine bestimmte Durchbiegung und in Folge auch eine bestimmte Biege- und Querkraftbeanspruchung zugeordnet werden kann. Diese hängt vor allem von der Verteilung der Masse der Brücke ab.

In Rahmen der theoretischen Arbeiten (siehe [1]) wurde ein FEM Modell der Mezzovico Brücke erstellt und untersucht. Im Anhang A sind die ersten Eigenschwingungsformen mit ent- sprechender Verteilung der Biegemomente und Querkräfte aufgezeigt. In der Tabelle 1 sind die Formeln für die Vergrößerung der Biegung und Schubbeanspruchung im ersten Feld der Brücke, in Bezug auf das Verhältnis der dynamischen und statischen Durchbiegung (w_d/w_s) in einem Referenzpunkt in der Mitte des ersten Feldes, dargestellt.

Mezzovico Brücke	Biegung Feldmitte	Biegung Stütze 1	Querkraft Stütze 1 -	Querkraft Stütze 1 +
Erste Eigenschwingung	$1 + 0.69 \frac{w_d}{w_s}$	$1 + 0.58 \frac{w_d}{w_s}$	$1 + 0.29 \frac{w_d}{w_s}$	$1 + 0.56 \frac{w_d}{w_s}$
Zweite Eigenschwingung	$1 + 0.73 \frac{w_d}{w_s}$	$1 + 0.25 \frac{w_d}{w_s}$	$1 + 0.52 \frac{w_d}{w_s}$	$1 + 0.33 \frac{w_d}{w_s}$
Dritte Eigenschwingung	$1 + 0.86 \frac{w_d}{w_s}$	$1 + 1.62 \frac{w_d}{w_s}$	$1 + 0.92 \frac{w_d}{w_s}$	$1 + 0.44 \frac{w_d}{w_s}$

Tabelle 1 Der dynamische Vergrößerungsfaktor für die Mezzovico Brücke für verschiedene Eigenformen und verschiedene Arten der Beanspruchung

4 Versuchsresultate und Folgerungen

4.1 Dynamische Eigenschaften der Mezzovico Brücke

Die ersten Eigenfrequenzen liegen nicht weit auseinander, was typisch für lange mehrfeldrige Brücken ist. Die Tabelle 2 zeigt die berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen. Die letzten wurden mit Hilfe des Impulsgenerators bestimmt. Die ersten Eigenschwingungsformen und dazugehörige dynamische Beanspruchungen sind im Anhang A dargestellt.

n	1	2	3	4
f_n [Hz] berechnet	2.54	3.21	3.94	4.98
f_n [Hz] gemessen	2.59	3.08	3.81	4.61

Tabelle 2 Die ersten vier berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen (Längsbiegung) der Mezzovico Brücke

Die erste Eigenschwingung weist ein für ungerissene Spannbetonstrukturen typisches Dämpfungsmass von $\zeta_1 = 0.7\%$ der kritischen Dämpfung auf, die zweite Eigenschwingung ist hingegen stärker gedämpft ($\zeta_2 = 2.0\%$). Die erste Eigenfrequenz einer Torsionsschwingung liegt bei 6.6 Hz

4.2 Der dynamische Beiwert

Aus den Messungen resultiert bei der Mezzovico Brücke ein dynamischer Beiwert Φ von ca. 1.15 bis 1.2 also deutlich kleiner als 1.8, obwohl die ersten drei Eigenschwingungen der Brücke im kritischen Bereich zwischen 2.0 und 4.0 Hz liegen, in welchem normalerweise eine verstärkte Interaktion zwischen der Brücke und dem Fahrzeug stattfindet. Es ist anzunehmen, dass die Energie, die in das System Fahrzeug-Brücke eingeführt wird, sich auf mehrere Eigenschwingungsformen verteilt. Bei einer Brücke mit nur einer Eigenfrequenz im kritischen Bereich, könnte deshalb ein grössere dynamische Beiwert erwartet werden.

4.3 Die Bestimmung der wirklichen dynamischen Beanspruchung einer Brücke

Die Betrachtung der Frequenzspektren der Brückenbewegung beim Versuch 1 zeigt, dass vor allem die zwei ersten Eigenschwingungen relevant sind (Bild 7). Für ein gemessenes Verhältnis der dynamischen und statischen Durchbiegung w_d/w_s von ca. 0.15 ($\Phi = 1.15$) sollte der effektive Vergrößerungsfaktor der Beanspruchung gemäss der Tabelle 1 bei ca. 0.10 für Biegung in der Feldmitte und bei ca. 0.04 bis 0.08 für die Schubbeanspruchung liegen.

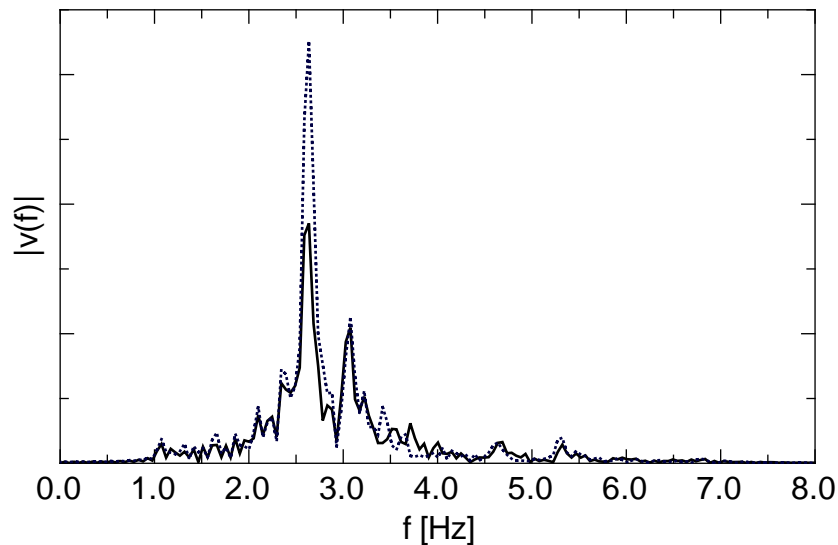


Bild 7 Frequenzspektrum der vertikalen Brückengeschwindigkeit bei dem Versuch 1 (Fahrt mit 40 km/h) in der Mitte des ersten und des zweiten Feldes (ausgezogene bzw. punktierte Linie)

Um diese Resultate zu bestätigen, wurde eine direkte Berechnung der dynamischen Beanspruchung der Brücke durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde zuerst die Bewegung der Brücke in zwei Eigenschwingungen zerlegt. Anschliessend wurden die Beanspruchungen beider Eigenschwingungen (siehe Anhang A) superponiert. Die Resultate in Bild 8 zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Werten in der Tabelle 1. Wir erkennen, dass das Verhältniss der dynamischen und statischen Beanspruchung beim betrachteten Versuch deutlich grösser ist als der Vergrösserungsfaktor der Biege- bzw. Schubbeanspruchung.

Die Unterschiede zwischen den "wirklichen" Vergrösserungsfaktoren der Beanspruchung und dem gemessenen dynamischen Beiwert Φ sind im betrachteten Fall nicht gross. Für eine schwingungsanfällige Brücke wären aber viel grössere Unterschiede zu erwarten. In jedem Fall zeigt sich, dass der dynamische Beiwert, gemäss SIA-Definition, nicht in einem direkten Zusammenhang mit der wirklichen Beanspruchung einer Brücke steht und sollte daher bei Nachrechnungen von Brücken sehr vorsichtig angewendet werden.

Bei der Nachrechnungen alten Brücken ist eine differenziertere Vorgehensweise als die bisher praktizierte notwendig. Wir erachten es als notwendig, den Zeitverlauf der Durchbiegung der ganzen Brücke unter der Last eines vorbeifahrenden Lastwagens zu bestimmen. Aus dieser Durchbiegung kann dann sowohl die statische als auch die dynamische Beanspruchung errechnet werden. Eine direkte Bestimmung des Vergrösserungsfaktors einer Beanspruchung an einer beliebigen Stelle ist somit möglich.

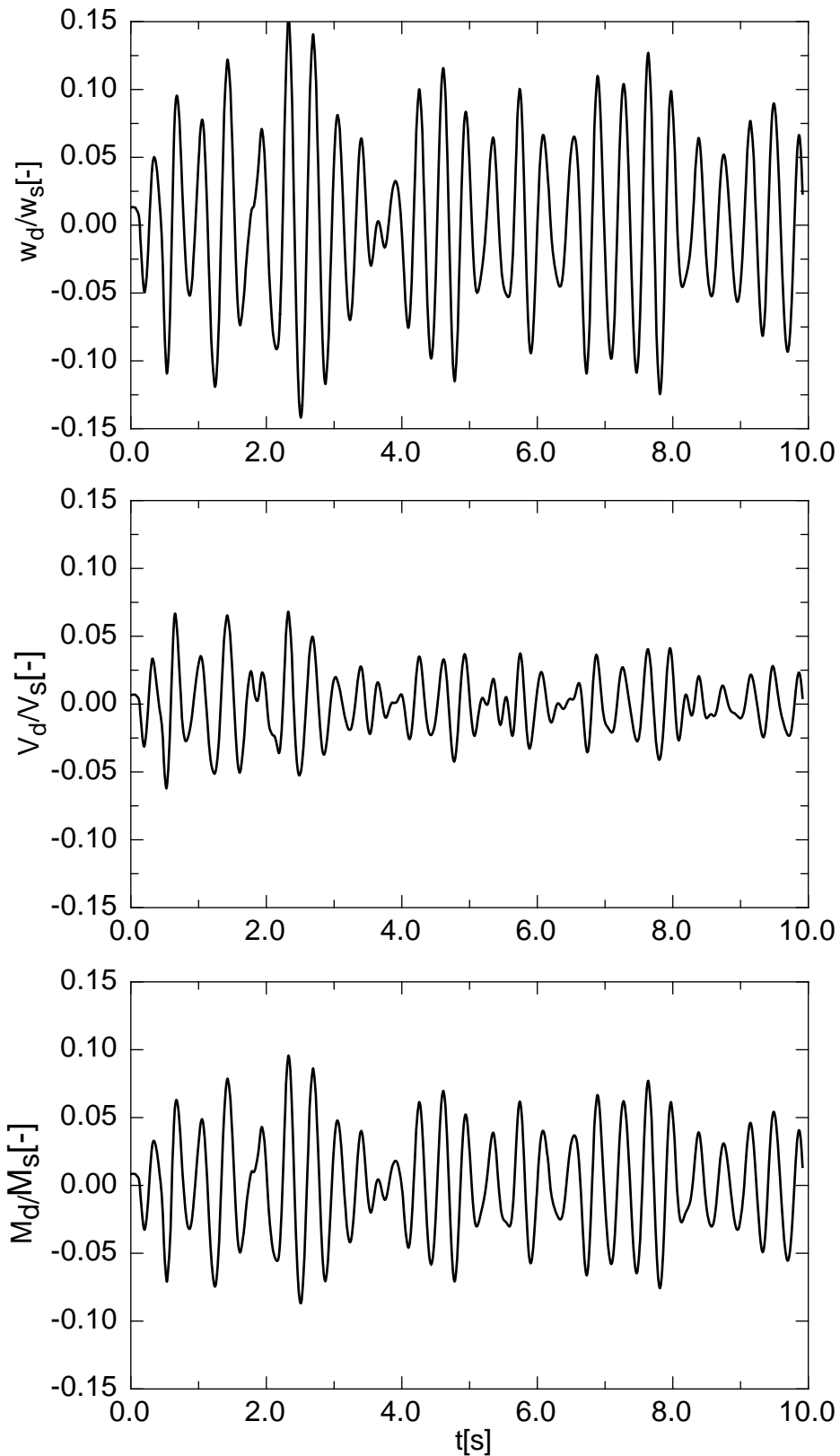


Bild 8 Zeitverlauf der dynamischen Durchbiegung in der Mitte des ersten Feldes bezogen auf die statische Durchbiegung (oben), Zeitverläufe der Vergrößerungsfaktoren für die Schubbeanspruchung beim ersten Zwischenauflager bzw. Biegebeanspruchung in der Mitte des ersten Feldes (Versuch 1 Fahrt mit 40 km/h)

4.4 Erfahrungen mit dem Impulsgenerator

Bei den 10 nacheinander durchgeführten Versuchen sind keine technische Probleme aufgetreten. Die Bedienung des Impulsgenerators ist einfach, die Zuverlässigkeit sehr gross.

Die mögliche Frequenz der Versuche liegt zur Zeit je nach Grösse des Impulses bei ca. zwei Versuchen pro Stunde. (Intervall ca. 0.5 h). Der Frequenzinhalt des Impulses ist immer gleich, eine zusätzliche Messung der Kraft ist jedoch zu Empfehlen (Kontrolle). Wichtig ist, dass nach einem Impulsstoss keine weiteren störenden Einflüsse vorhanden sind. Somit kann z.B die freie Ausschwingung einer Brücke untersucht werden, was für eine genauere Systemidentifikation von grosser Bedeutung ist. Im Gegensatz zur einer Pulverrakete ist der Impulsgenerator ungefährlich. Es ist somit keine spezielle Bewilligung für Anwendung bzw. Transport des Impulsgenerators erforderlich.

Wie schon früher erwähnt, können die Versuche mit dem Impulsgenerator die Versuche mit einem Lastwagen nicht ersetzen. Wenn wir aber die wirkliche dynamische Beanspruchung einer Brücke bestimmen wollen, ist eine genaue Untersuchung der dynamischen Eigenschaften der Brücke unerlässlich. Dabei kann der Impulsgenerator sehr hilfreich sein.

5 Zusammenfassung

In diesem Aufsatz sind die dynamischen Versuche an der Mezzovico Brücke beschrieben, die an 31.08.1999 und am 01.09.1999 durchgeführt wurden. Die Resultate der Versuche zeigen, dass die Mezzovico Brücke nicht schwingungsanfällig ist. Der gemessene dynamische Beiwert Φ liegt unter 1.2 also deutlich tiefer als der in der Norm SIA 160 festgelegte Wert von 1.8. Wir schlagen daher für die Berechnung der Beanspruchung infolge des Lastmodells 1 bei dieser Brücke einen dynamischen Beiwert Φ von 1.2 vor.

Um die effektive Vergrösserung der Beanspruchung der Brücke abzuschätzen wurden parallel zu den Versuchen auch theoretische Untersuchungen durchgeführt. Die Resultate zeigen, dass der bisher benutzte dynamische Beiwert Φ nicht in einem direkten Zusammenhang mit der wirklichen Beanspruchung einer Brücke steht und sollte deshalb bei der Nachrechnung einer Brücke sehr vorsichtig angewendet werden. Im Fall der Mezzovico Brücke liegt die effektive Vergrösserung der statischen Beanspruchung zwischen 4 und 10%.

Die Vergrösserung der Beanspruchung hängt nicht nur von der Frequenz der Brücke und der Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche sondern auch von der Art der Beanspruchung, von der Anzahl Eigenfrequenzen im kritischen Bereich zwischen 2 Hz und 4 Hz sowie von der Verteilung der Beanspruchung der einzelnen Eigenschwingungsformen ab.

Bei den Versuchen an der Mezzovico Brücke wurde neben dem Lastwagen auch ein Impulsgenerator eingesetzt. Die Erfahrungen mit diesem neuartigen Gerät waren sehr gut. Die Versuche mit der Impulsgenerator waren sehr nützlich vor allem bei der Bestimmung der dynamischen Eigenschaften der Brücke (Systemidentifikation).

6 Danksagung

Der Verfasser dieses Berichts möchte sich bei dem Dipartimento del Territorio del Canton Ticino – Ufficio dei Ponti della Divisione Construzioni für die Unterstützung dieses Projektes ganz herzlich bedanken. Dieser Dank gilt auch allen beteiligten Firmen und Personen die dazu

beigetragen haben, dass die sehr komplexen Versuche plangemäss und in einer sehr guten Atmosphäre durchgeführt werden konnten.

7 Literatur

- [1] Szczesiak T., Colombo P., "Dynamische Versuche an Mezzovico Brücke", Versuchsraport IMM (Lugano - Grancia), März 1999.
- [2] Muttoni A., "Mezzovico-Cavalcavia Autostradale-Misurazioni Dinamiche", Versuchsraport der Firma Muttoni & Beffa (Faido), März 1999.
- [3] Bachmann H., Amman W., "Schwingungsprobleme bei Bauwerken", IABSE, ETH Hönggerberg, CH-8093 Zürich, Switzerland, 1987.
- [4] Bachmann H... (et al.), "Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines", Birkhäuser Verlag Basel, 1995.
- [5] Leisi R., Szczesiak T., "Schwingungsprobleme bei einer Fuss-und Radwegbrücke", Dynamische Probleme bei Brücken- und Hochbauten, Dokumentation SIA D 0138, SIA, 1996.
- [6] Cantieni R., "Dynamische Systemidentifikation", Dynamische Probleme bei Brücken- und Hochbauten, Dokumentation SIA D 0138, SIA, 1996.
- [7] Burdet O. L., "Propriétés dynamiques du pont hubané de Schaffhouse", Dynamische Probleme bei Brücken- und Hochbauten, Dokumentation SIA D 0138, SIA, 1996.
- [8] Cantieni R., "Dynamik der Strassenbrücken", EMPA Bericht Nr. 220, 1992.
- [9] Inaudi D., Conte J.P., Perregaux N., Vurpillot S., "Statistical Analysis of under-sampled Dynamic Displacement Measurment", SPIE 5th Symposium on Smart Structures and Materials 98, San Diego.
- [10] Chappuis J. D., "Développement d'un propulseur à eau surchauffée"

Dynamische Beanspruchung für die ersten drei Eigenschwingungsformen

M_i Biegemoment der i-ten Eigenschwingung

V_i Querkraft der i-ten Eigenschwingung

(Schwingungsamplitude im Referenzpunkt in der Mitte des ersten Feldes rechts

$w_d=1$ mm)

