

# Zuverlässigkeit von dynamischen FE-Berechnungen bei Fussgängerbrücken

## 1 Einführung und Problemstellung

Fussgängerbrücken stellen wegen ihres dynamischen Verhaltens eine grosse Herausforderung an den Bauingenieur. Mit ihrer geringen Nutzlast können sie – aus Sicht der Statik – relativ leicht und schlank gebaut werden. Dies ermöglicht auch besonders elegante Konstruktionen. Für das dynamische Verhalten hingegen kann sich dies jedoch – wie verschiedene Beispiele aus der jüngsten Vergangenheit gezeigt haben – recht verhängnisvoll auswirken. Die besondere Art der rhythmischen Beanspruchung durch gehende oder laufende Personen kann eine Brücke so stark in Schwingung versetzen, dass ihre Gebrauchstauglichkeit ernsthaft in Frage gestellt wird.

Der Bauingenieur versucht diesem Problem durch entsprechende Berechnungen in der Projektierungsphase zu begegnen. Durch einfache Handrechnungen zur Bestimmung der Grundfrequenzen oder durch aufwändige FE-Berechnungen zur Simulation der Brückenschwingungen unter Personenanregung wird er sich Gewissheit verschaffen, dass die projektierte Brücke nicht bereits am Tag der Eröffnung gesperrt werden muss.

Dabei stellt sich natürlich immer die Frage, ob solche Berechnungen wirklich zuverlässig genug sind oder - besser formuliert - wie solche Berechnungshilfsmittel einzusetzen sind, damit sie die von ihnen erwartete Unterstützung beim Projektieren einer Fussgängerbrücke auch bieten. Man darf nicht vergessen, dass bei diesen schlanken Konstruktionen bereits eine kleine Verschiebung der Eigenfrequenz den Unterschied ausmachen kann zwischen einem Erfolg und einem Desaster.

Der Autor hat für eine grosse Anzahl von Fussgängerbrücken teils die dynamischen Berechnungen in der Projektierungsphase, teils die Kontrollmessungen nach Fertigstellung des Bauwerkes durchgeführt. Bei einigen Projekten hat er auch beide Aufgaben übernommen. Anhand von sechs Beispielen soll nun die Übereinstimmung bzw. die Diskrepanz zwischen Berechnung und tatsächlichem Verhalten aufgezeigt und es sollen – soweit möglich – Empfehlungen für den sinnvollen Einsatz von Berechnungshilfsmitteln für das dynamische Verhalten formuliert werden.

## 2 Fussgängerbrücken: Elegant aber dynamisch!

Die ausgewählten Objekte sind Fussgänger- und Radwegbrücken unterschiedlicher Konstruktionsart mit Spannweiten zwischen 20 und 62 m. Die wichtigsten der für das Schwingverhalten relevanten Kenngrössen sind nachstehend zusammengestellt.



### Passerelle LEB Lausanne

- Stahlfachwerk-Beton-Verbundkonstruktion
- Spannweiten: 53 m und 21 m
- Eigenfrequenzen vertikal: 2.5 Hz und 7.8 Hz
- Dämpfung: 0.9 %
- Eigenfrequenz quer: 1.7 Hz
- 3 Personen laufen im Takt:  $0.65 \text{ m/s}^2$



### Wylandbrücke Winterthur

- Stahlfachwerk-Beton-Verbundkonstruktion
- Spannweiten: 62 m und 45 m
- Eigenfrequenzen vertikal: 1.5 Hz und 2.8 Hz
- Dämpfung: 0.7 %
- Eigenfrequenzen quer: 2.3 Hz und 3.5 Hz
- 4 Personen laufen im Takt:  $0.1 \text{ m/s}^2$  und  $0.4 \text{ m/s}^2$



### Schanzengrabenbrücke Zürich

- Stahlfachwerk-Brücke
- Spannweite: 24 m
- Eigenfrequenz: 3.6 Hz
- Dämpfung: 1.4 %
- 3 Personen laufen im Takt:  $0.54 \text{ m/s}^2$



### Fussgängerbrücke über die Via Grevas – St. Moritz

- Zwei-Feld-Träger in Spannbeton
- Spannweiten: 20 m und 13 m
- Eigenfrequenz vertikal: 6.1 Hz
- Dämpfung: 1.4 %
- Eigenfrequenz quer: 5.2 Hz



### Fussgängerbrücke Parkhaus Serletta – St. Moritz

- Rahmentragwerk in Spannbeton.
- Spannweiten: 25 m
- Eigenfrequenz vertikal: 5.4 Hz
- Dämpfung: 1.1 %
- Eigenfrequenz quer: 10.1 Hz



### Passerella sulla Verzasca - Tessin

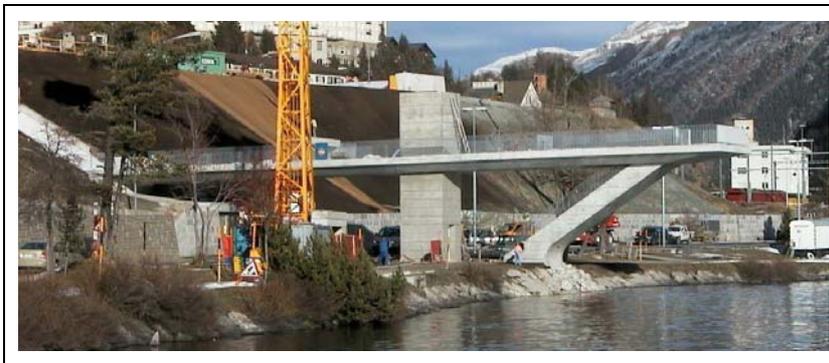
- Stahlrohr-Bogenbrücke mit abgehängter Fahrbahn
- Spannweiten: 2 x 60 m
- Eigenfrequenzen vertikal: 1.71 Hz und 2.64 Hz
- Dämpfung: 0.3 %
- Eigenfrequenz quer: 1.37 Hz
- 4 Personen laufen im Takt:  $0.78 \text{ m/s}^2$

### 3 Dynamische FE-Berechnung

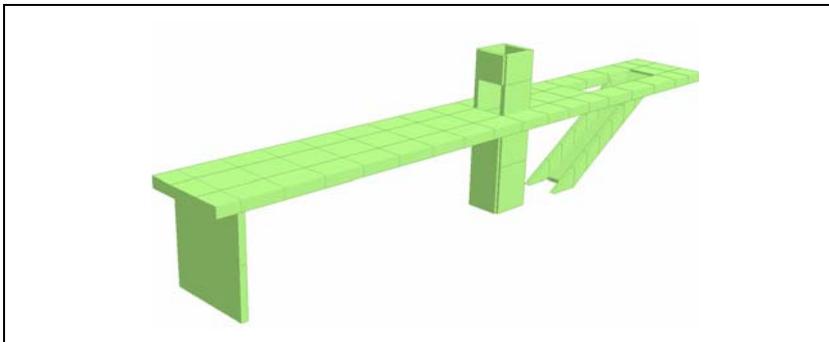
Für die dynamische Berechnung von Bauwerken stehen heute sehr leistungsfähige Computerprogramme zu Verfügung. Die Wahl des Programms wird primär durch den beabsichtigten Anwendungsbereich bestimmt. Von den zahlreichen erhältlichen Programmen sei hier nur dasjenige erwähnt, das für die Bearbeitung der hier aufgeführten Projekte verwendet wurde: das Programm STARDYNE/STAADPRO [3], das eine sehr komfortable Bearbeitung von dynamischen Fragestellungen erlaubt.

#### 3.1 Modellbildung

Die Modellbildung und insbesondere der dabei verwendete Detaillierungsgrad ist der Aufgabenstellung anzupassen. Bei der Fussgängerbrücke über die Via Grevas zum Beispiel ging es primär um die zuverlässige Bestimmung der Grundfrequenz. Höhere Eigenfrequenzen waren, da diese von Personen nicht angeregt werden können, nicht von Bedeutung. Eine Einteilung der Hauptspannweite in 8 x 3 Plattenelemente war somit mehr als ausreichend.



**Bild 3.1**  
 Fussgängerbrücke über die Via Grevas – St. Moritz



**Bild 3.2**  
 FE-Modelle für die Fussgängerbrücke über die Via Grevas – St. Moritz

Von der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Elemente kommen für die Modellierung von Fussgängerbrücken zumeist nur zwei in Frage: die Balkenelemente und die Plattenelemente. Mit diesen beiden Elementtypen lassen sich praktisch alle in der Praxis auftretenden Fälle bearbeiten. Besondere Aufmerksamkeit ist den Auflagerbedingungen zukommen zu lassen. Brückenlager sind oft keine idealen Rollenlager und Fundamente sind in Wirklichkeit auch keine festen Einspannungen. Trotzdem werden sie als solche modelliert. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist dies jedoch zu berücksichtigen.

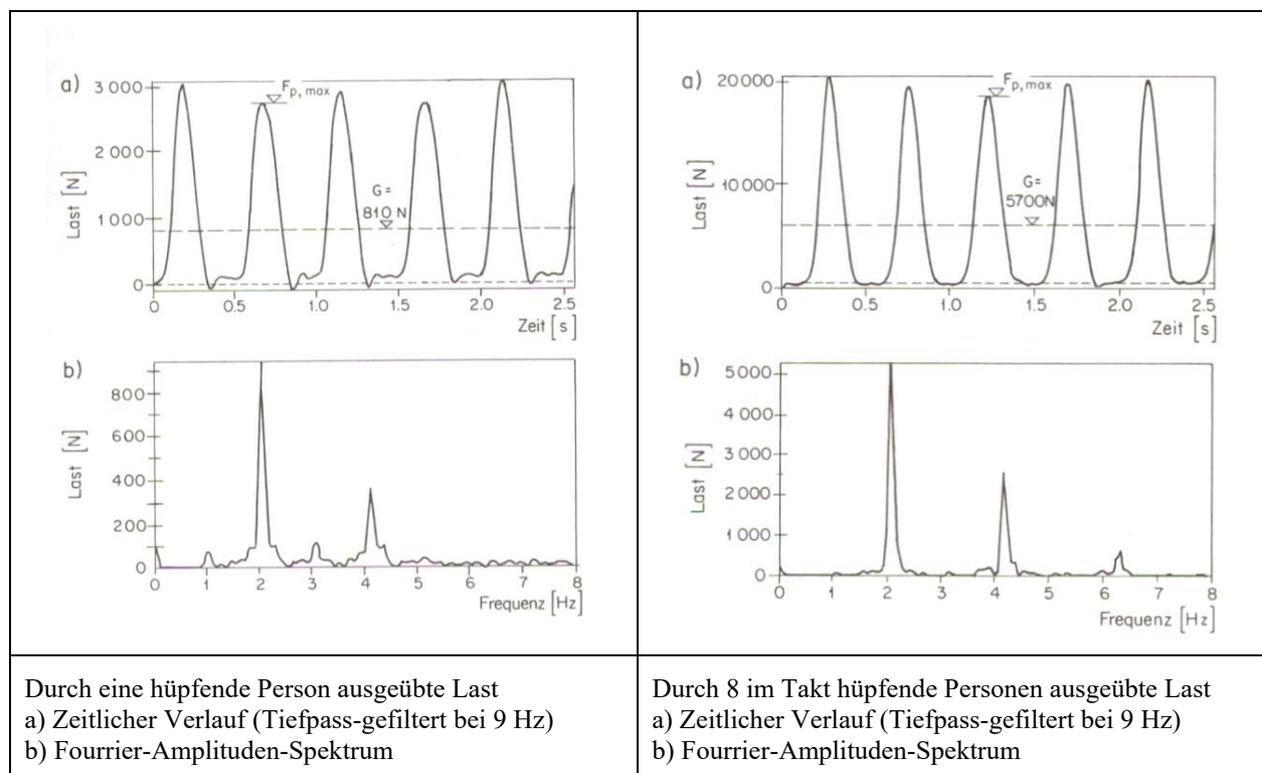
Im Rahmen einer dynamischen Berechnung kommt der Wahl der Materialeigenschaften, insbesondere des E-Moduls und der Dämpfung, besondere grosse Bedeutung zu. Während beim Stahl ohne weiteres mit dem statischen E-Modul gerechnet werden kann, würde beim Beton die Verwendung des statischen E-Moduls von  $3.5 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$  in der Regel zu tiefe Eigenfrequenzen ergeben. Realistischere Ergebnisse erreicht man mit einem E-Modul von  $4.2 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$  für schlaff armierten Beton und  $4.6 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$  für vorgespannten Beton. Dabei ist zu beachten, dass die Steifigkeit eines Beton-Tragelementes recht stark von der Dehnungsamplitude abhängig sein kann.

Das Hauptproblem bei der dynamischen Berechnung von Fussgängerbrücken stellt die richtige Wahl der Dämpfungsgrösse dar. In den Beispielen von Kapitel 2 sehen wir, dass die (relativ kurzen) Brücken in Vorspannbeton Dämpfungswerte von 1.1 % und 1.4 % aufweisen, die Stahl-Beton-Verbundbrücken (mit Spannweiten von 53 m und 62 m) weisen Dämpfungswerte zwischen 0.7 % und 0.9 % auf und die Stahlrohr-Bogenbrücke mit abgehängter Fahrbahn hat eine Dämpfung von sogar nur 0.3 %. Die grosse Bedeutung der Dämpfung ergibt sich dadurch, dass bei harmonischer Anregung die Schwingungsamplitude bei Resonanz umgekehrt proportional zur Dämpfung ist.

Weniger Schwierigkeiten bietet die Bestimmung der wirksamen Masse und ihrer räumlichen Verteilung. Durch die Abmessungen und die verwendeten Materialien lassen sich diese Werte meist zuverlässig bestimmen. Problematisch wird es bei der Festlegung der mitwirkenden Masse bei grossen Menschenansammlungen. Welcher Anteil ist als starre mitschwingende Masse zu betrachten und welcher Anteil ist der Erzeugung der dynamischen Anregung zuzurechnen?

### 3.2 Anregungskräfte

Die durch gehende, laufende oder hüpfende Personen ausgeübten Kräfte sind bis zu einem gewissen Grad bekannt. Bild 3.3 zeigt zwei Darstellungen aus [1] mit Angaben zu den Kräften, die von einer Person bzw. von acht Personen erzeugt werden. Für eine umfassende Beschreibung der Anregung müssten allerdings die Kraftgrössen und deren Frequenzgehalt für das gesamte Spektrum vom ganz langsamen Gehen bis zum extrem schnellen Laufen inklusive Anregen durch Hüpfen an Ort bekannt sein. Diese Angaben müssten sowohl für die vertikale als auch für die horizontale Richtung gegeben sein. Darüber hinaus müsste auch die kumulative Wirkung von mehreren Personen berücksichtigt sein.

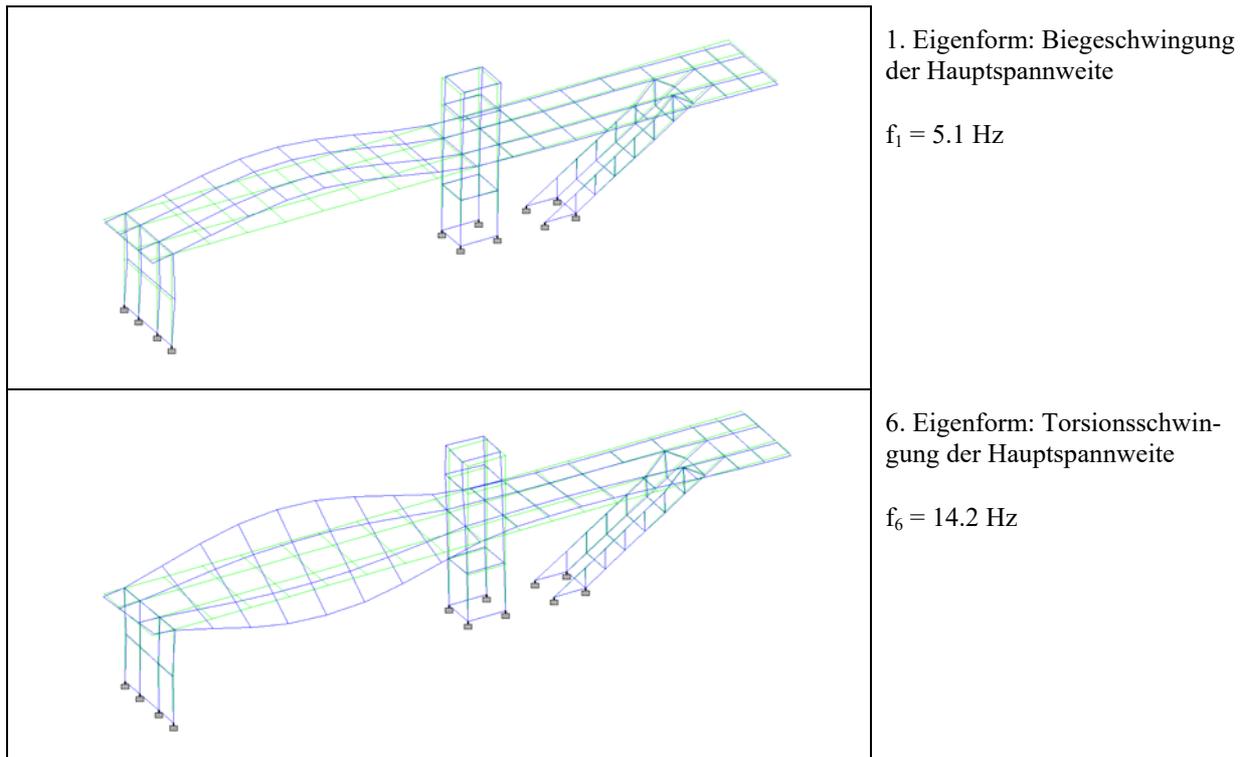


**Bild 3.3** Angaben zu den Kräften, die von einer Person bzw. von acht Personen erzeugt werden

Bei diesen Überlegungen zu den Anregungskräften darf nicht vergessen werden, dass die grosse Unsicherheit bei der Berechnung der Schwingungsamplituden von Fussgängerbrücken in der Regel nicht in der Definition der Anregung liegt, sondern in der Definition der Dämpfung.

### 3.3 Haupt-Ergebnisse einer dyn. FE-Berechnung

Die wichtigsten Ergebnisse einer dynamischen FE-Berechnung für Fussgängerbrücken sind die **Eigenfrequenzen** und die **Eigenformen** (siehe Bild 3.4). Anhand dieser beiden Informationen erkennen wir, ob und wie eine Fussgängerbrücke durch Personen angeregt werden kann. Lassen sich die Eigenfrequenzen nicht mit grosser Zuverlässigkeit bestimmen, so nützt uns die FE-Berechnung nicht viel. Die Berechnung der Schwingungsamplitude hingegen hat nicht den gleich hohen Stellenwert, denn erstens ist die Grösse der Anregungskraft nicht genau bekannt und zweitens sind wir bei der Wahl der Dämpfungswerte auf Schätzungen angewiesen. Und gerade die Dämpfung hat einen entscheidenden Einfluss auf die Grösse der Schwingungsamplitude. Sobald sich die Eigenfrequenzen im kritischen Bereich befinden, müssen wir Vorkehrungen treffen, um Resonanzphänomene zu verhindern.



**Bild 3.4** Eigenfrequenzen und Eigenformen

### 3.4 Kontrolle mit Handrechnung

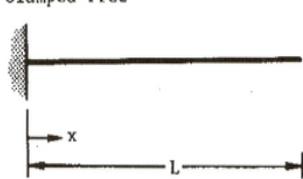
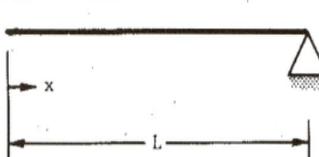
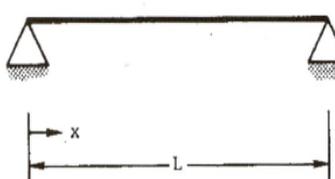
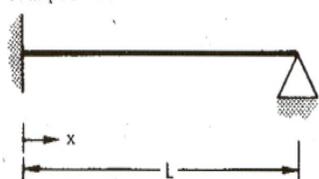
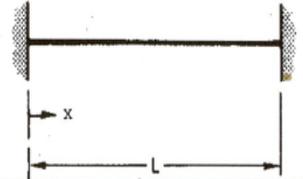
Jede FE-Berechnung ist mit einer Handrechnung zu kontrollieren. Zumeist genügen die einfachen Ansätze des 1-Massen-Schwingers oder des einfachen Balkens, um eine FE-Berechnung für eine Fussgängerbrücke zu prüfen. Komplizierte Auflager- oder Einspannverhältnisse lassen sich oft durch Grenzwertbetrachtungen erfassen. Für Handrechnungen leisten die Tabellen von [2] immer nützliche Dienste (siehe Bild 3.5).

**Table 8-1. Single-Span Beams.**

Notation:  $x$  = distance along span of beam;  $m$  = mass per unit length of beam;

$E$  = modulus of elasticity;

$I$  = area moment of inertia of beam about neutral axis (Table 5-1);  $L$  = span of beam; see Table 3-1 for consistent sets of units

Natural Frequency (hertz); $f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi L^2} \left( \frac{EI}{m} \right)^{1/2}$ ; $i=1,2,3,\dots$			
Description <sup>(a)</sup>	$\lambda_i$ ; $i=1,2,3,\dots$	Mode Shape, $\tilde{y}_i \left( \frac{x}{L} \right)$	$\sigma_i$ ; $i=1,2,3,\dots$
<p>3. Clamped-Free</p> 	<p>1.87510407 4.69409113 7.85475744 10.99554073 14.13716839 <math>(2i - 1)\frac{\pi}{2}</math>; <math>i &gt; 5</math></p>	<p><math>\cosh \frac{\lambda_i x}{L} - \cos \frac{\lambda_i x}{L}</math>  <math>-\sigma_i \left( \sinh \frac{\lambda_i x}{L} - \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)</math></p>	<p>0.734095514 1.018467319 0.999224497 1.000033553 0.999998550 <math>\approx 1.0</math>; <math>i &gt; 5</math> See Ref. 8-2</p>
<p>4. Free-Pinned</p> 	<p>3.92660231 7.06858275 10.21017612 13.35176878 16.49336143 <math>(4i + 1)\frac{\pi}{4}</math>; <math>i &gt; 5</math></p>	<p><math>\cosh \frac{\lambda_i x}{L} + \cos \frac{\lambda_i x}{L}</math>  <math>-\sigma_i \left( \sinh \frac{\lambda_i x}{L} + \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)</math></p>	<p>1.000777304 1.000001445 1.000000000 1.000000000 1.000000000 1.000000000 1.0; <math>i &gt; 5</math></p>
<p>5. Pinned-Pinned</p> 	<p><math>i\pi</math></p>	<p><math>\sin \frac{i\pi x}{L}</math></p>	<p>--</p>
<p>6. Clamped-Pinned</p> 	<p>3.92660231 7.06858275 10.21017612 13.35176878 16.49336143 <math>(4i + 1)\frac{\pi}{4}</math>; <math>i &gt; 5</math></p>	<p><math>\cosh \frac{\lambda_i x}{L} - \cos \frac{\lambda_i x}{L}</math>  <math>-\sigma_i \left( \sinh \frac{\lambda_i x}{L} - \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)</math></p>	<p>1.000777304 1.000001445 1.000000000 1.000000000 1.000000000 1.000000000 1.0; <math>i &gt; 5</math></p>
<p>7. Clamped-Clamped</p> 	<p>4.73004074 7.85320462 10.9956079 14.1371655 17.2787597 <math>(2i + 1)\frac{\pi}{2}</math>; <math>i &gt; 5</math></p>	<p><math>\cosh \frac{\lambda_i x}{L} - \cos \frac{\lambda_i x}{L}</math>  <math>-\sigma_i \left( \sinh \frac{\lambda_i x}{L} - \sin \frac{\lambda_i x}{L} \right)</math></p>	<p>0.982502215 1.000777312 0.999966450 1.000001450 0.999999937 1.0; <math>i &gt; 5</math> See Ref. 8-2</p>

**Bild 3.5** Eigenfrequenzen und Eigenformen für einfache Balken (aus [2])

## 4 Fussgängerbrücke in Lausanne

Die Fussgängerbrücke in Lausanne (Bild 4.1a, b und 4.2) wurde durch das Ingenieurbüro Monod / Piguet + Associés / CSD als Stahlfachwerk-Beton-Verbundkonstruktion projektiert. Die dynamischen Berechnungen ergaben Eigenfrequenzen von 2.56 Hz für die Hauptspannweite und 3.24 Hz für die Nebenspannweite. Es war klar, dass für die Hauptspannweite Aussparungen für Schwingungstilger vorzusehen waren. Sinnvollerweise wartete man jedoch mit dem Einbau der Tilger, bis die Schwingungsmessungen vorlagen.



Bild 4.1a Fussgängerbrücke mit Unterspannung



Bild 4.1b Fussgängerbrücke (Gehweg)

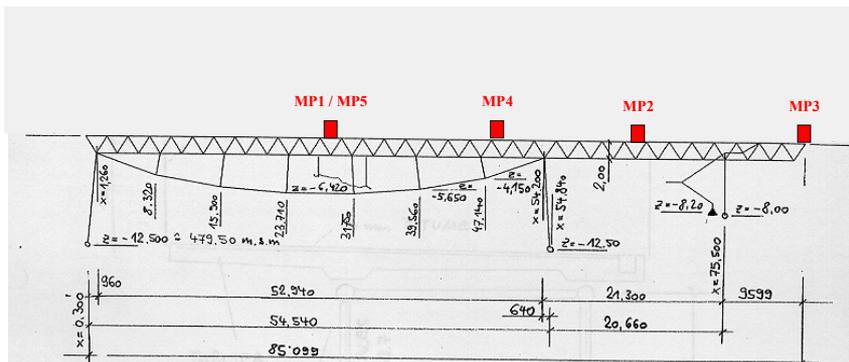


Bild 4.2 Systemskizze: Längsschnitt und Querschnitt

Die Messungen ergaben für die Hauptspannweite vertikale Eigenfrequenzen von 2.5 Hz und 1.7 Hz in Querrichtung. Die Dämpfung lag bei 0.9 %. Bei einer Anregung durch 3 Personen, die im Takt über die Brücke liefen, wurden maximale Beschleunigungen von  $0.65 \text{ m/s}^2$  erreicht. Nach den Messungen beschloss der Bauherr, auf den Einbau von Schwingungstilgern zu verzichten.

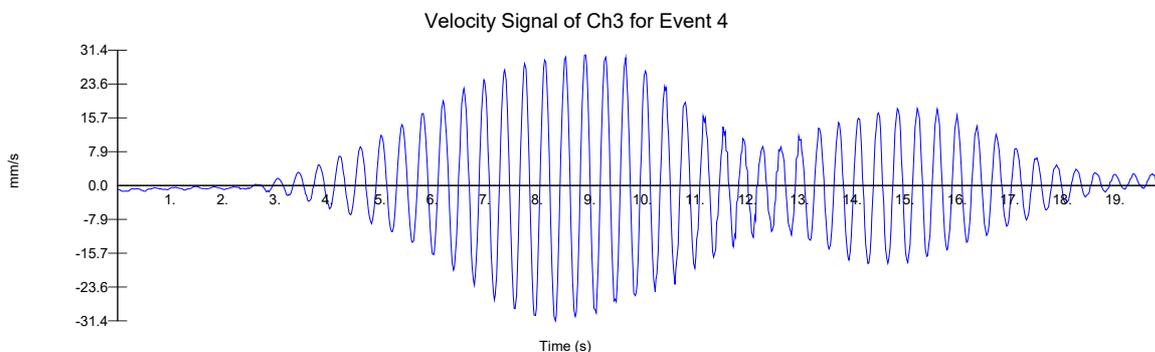


Bild 4.3 Geschwindigkeitsverlauf mit  $v_{\text{max}} = 31 \text{ mm/s}$  (Anregung: 3 Personen laufen im Takt über die Brücke).

Die Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Eigenfrequenz (2.56 Hz und 2.5 Hz) ist offensichtlich sehr gut.

## 5 Wylandbrücke Winterthur

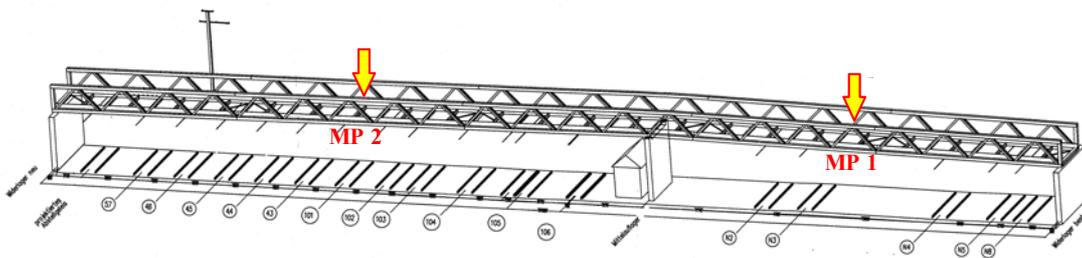
Die Wylandbrücke in Winterthur (Bild 5.1a, b und 5.2) wurde durch das Ingenieurbüro Dr. Deuring + Oehninger AG als Stahlfachwerk-Beton-Verbundkonstruktion mit Spannweiten von 62 m und 45 m projektiert. Die durch den Autor erstellten Handrechnungen ergaben eine Eigenfrequenz von 1.87 Hz für die grössere Spannweite (als 1-Feld-Träger berechnet). Auch hier war klar, dass Aussparungen für Schwingungstilger vorzusehen waren.



**Bild 5.1a** Wylandbrücke in Winterthur

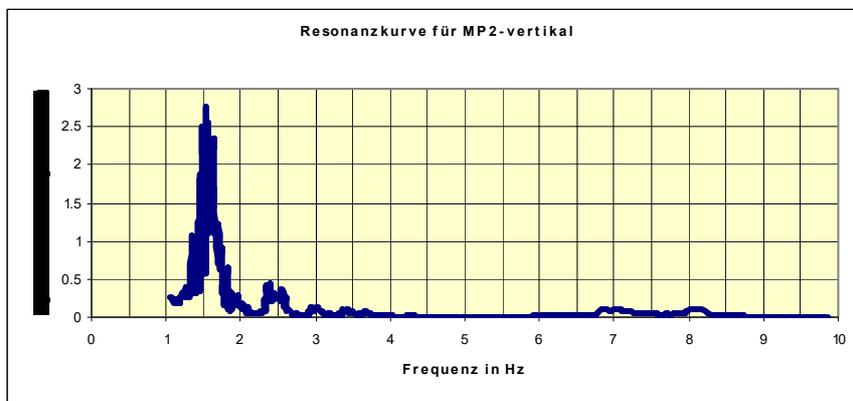


**Bild 5.1b** Schwingungsmessung



**Bild 5.2** Systemskizze

Die Messungen ergaben für die grössere Spannweite eine vertikale Eigenfrequenz von 1.5 Hz und für die kleinere Spannweite 2.8 Hz. Die Dämpfung lag bei 0.7 %. Bei einer Anregung durch 4 Personen, die im Takt über die Brücke liefen, wurden bei der grösseren Spannweite maximale Beschleunigungen von  $0.1 \text{ m/s}^2$  und bei der kleineren Spannweite  $0.5 \text{ m/s}^2$  erreicht. Auf den Einbau von Schwingungstilgern wurde verzichtet.



**Bild 5.3** Resonanzkurve für MP2 (vertikale Richtung)

Die Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Eigenfrequenz (1.87 Hz und 1.5 Hz) ist nicht schlecht. Erwähnenswert bei dieser Brücke ist, dass die grosse Spannweite mit 1.5 Hz durch Personen nur wenig angeregt werden konnte, während die kleine Spannweite viel leichter in Schwingung versetzt werden konnte.

## 6 Schanzengrabenbrücke Zürich

Die Schanzengrabenbrücke in Zürich (Bild 6.1a, b und 6.2) wurde als Stahlfachwerk mit einer Spannweite von 24 m projiziert. Die Berechnungen des projektierenden Ingenieurbüros ergaben eine Eigenfrequenz von 3.3 Hz. Der Einbau von Schwingungstilgern war nicht vorgesehen.



Bild 6.1a Schanzengrabenbrücke



Bild 6.1b Schwingungsmessung

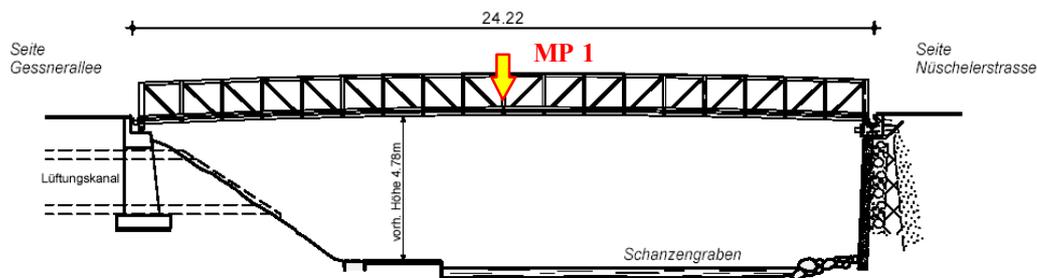


Bild 6.2 Systemskizze

Die Messungen ergaben eine vertikale Eigenfrequenz von 3.6 Hz und eine Dämpfung von 1.4 %. Bei einer Anregung durch 3 Personen, die im Takt über die Brücke liefen, wurden maximale Beschleunigungen von  $0.54 \text{ m/s}^2$  erreicht.

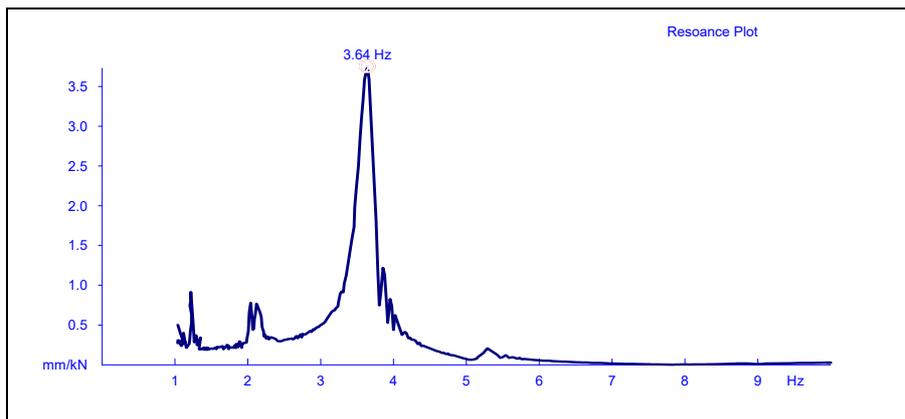


Bild 6.3 Resonanzkurve für MP1 (vertikale Richtung)

Die Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Eigenfrequenz (3.3 Hz und 3.6 Hz) ist recht gut. Resonanz-Phänomene infolge Anregung durch Personen traten erwartungsgemäss nicht auf.

## 7 Fussgängerbrücke Via Grevas St. Moritz

Die Fussgängerbrücke über die Via Grevas wurde durch das Ingenieurbüro Edy Toscano AG als Zwei-Feld-Träger in Spannbeton mit Spannweiten von 20 m und 13 m projektiert. Für diese Brücke wurden vom Autor sowohl die dynamischen Berechnungen als auch die Messungen durchgeführt. Die Bilder 7.1a bis d zeigen die Brücke und einen Schnitt, das verwendete FE-Modell und die 1. Eigenform.



Bild 7.1a Fussgängerbrücke Via Grevas

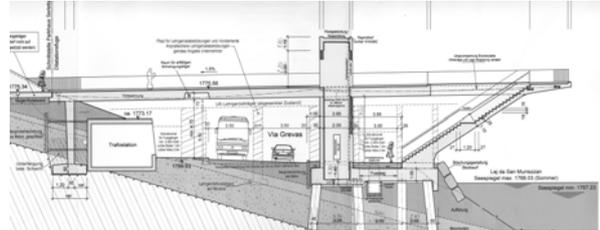


Bild 7.1b Längsschnitt

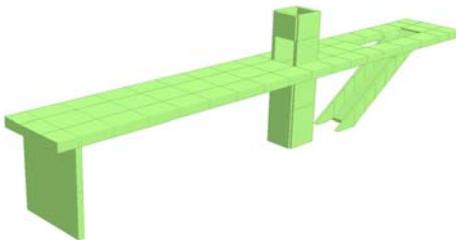


Bild 7.1c FE-Modell

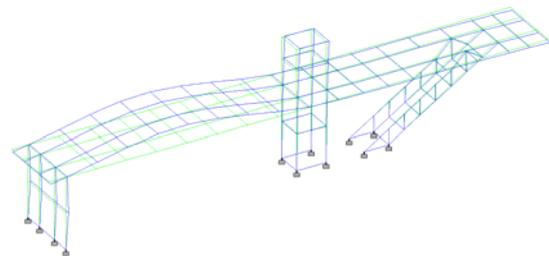


Bild 7.1d 1. Eigenform

Die dynamische Berechnung (mit einem E-Modul von  $4.6 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ ) ergab eine Grundfrequenz von 5.1 Hz. Bei der Kontrolle mittels Handrechnung wurden zwei Fälle berücksichtigt: Der untere Grenzwert wurde als Schwingung eines einfachen, frei aufgelegten Balkens berechnet und ergab eine Eigenfrequenz von 2.96 Hz. Der obere Grenzwert wurde mit der Annahme „beidseitig eingespannt“ berechnet und ergab eine Eigenfrequenz von 6.72 Hz. Die FE-Berechnung - mit einer Eigenfrequenz von 5.1 Hz - lag somit ziemlich in der Mitte.

Die Schwingungsmessungen (Bild 7.2a und b) ergaben eine Grundfrequenz von 6.15 Hz und eine Dämpfung von 1.4 %.

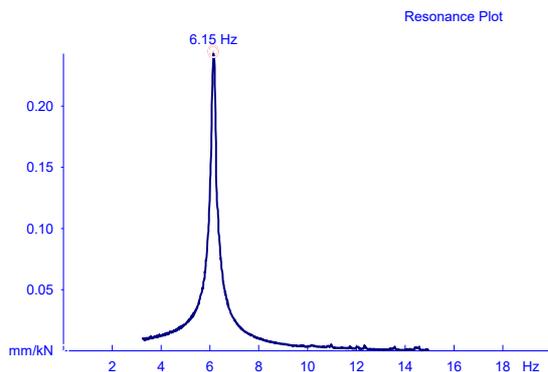


Bild 7.2a Resonanzkurve; vertikale Richtung

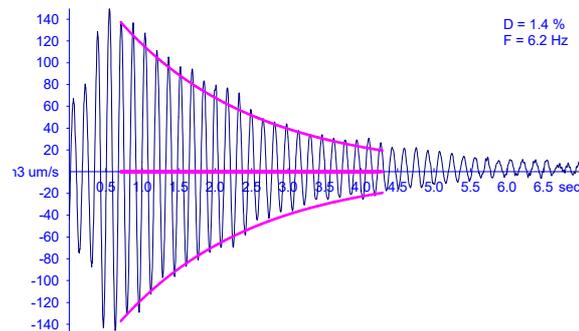


Bild 7.2b Ausschwingversuch

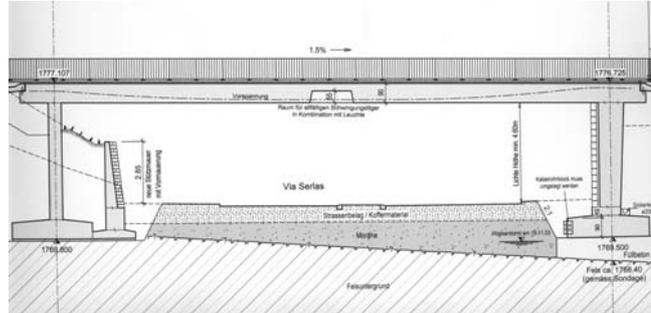
Die Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Eigenfrequenz (5.1 Hz und 6.15 Hz) ist recht gut. Resonanz-Phänomene infolge Anregung durch Personen traten erwartungsgemäss nicht auf.

## 8 Passerelle Parkhaus Serletta – Bahnhof (St. Moritz)

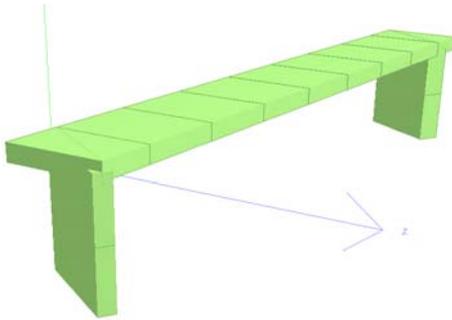
Die Passerelle zwischen dem Parkhaus Serletta und dem Bahnhof St. Moritz wurde ebenfalls durch das Ingenieurbüro Edy Toscano AG projektiert. Auch hier wurden vom Autor sowohl die dynamischen Berechnungen als auch die Messungen durchgeführt. Die Bilder 8.1a bis d zeigen die Brücke und einen Schnitt, das verwendete FE-Modell und die 1. Eigenform.



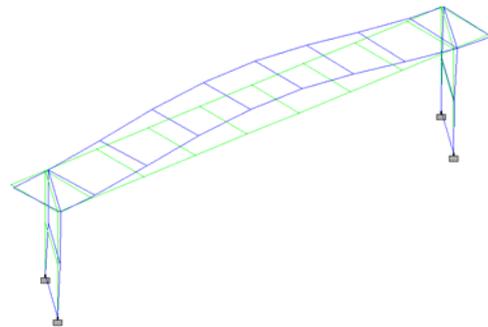
**Bild 8.1a** Fussgängerbrücke Via Grevas



**Bild 8.1b** Längsschnitt



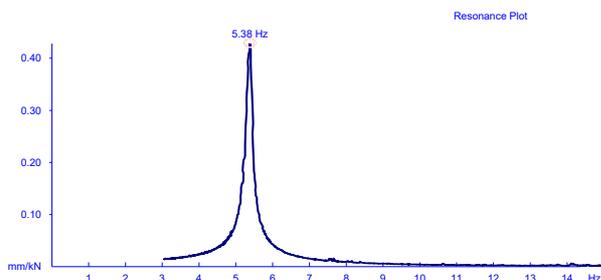
**Bild 8.1c** FE-Modell



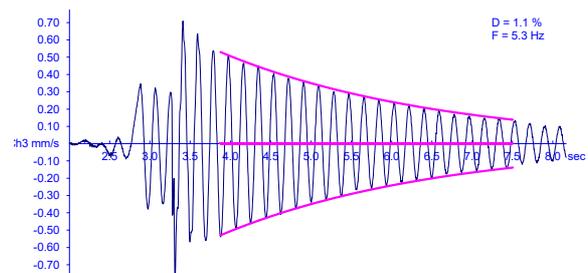
**Bild 8.1d** 1. Eigenform

Die dynamische Berechnung (mit einem E-Modul von  $4.6 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ ) ergab eine Grundfrequenz von 5.0 Hz. Bei der Kontrolle mittels Handrechnung wurden zwei Fälle berücksichtigt: Der untere Grenzwert wurde als Schwingung eines einfachen, frei aufgelegten Balkens berechnet und ergab eine Eigenfrequenz von 2.52 Hz. Der obere Grenzwert wurde mit der Annahme „beidseitig eingespannt“ berechnet und ergab eine Eigenfrequenz von 5.71 Hz. Die FE-Berechnung - mit einer Eigenfrequenz von 5.0 Hz - lag somit näher beim Fall „beidseitig eingespannt“. Dies lässt sich auch gut erklären, da die schiefe Anordnung der Widerlagermauern eine Art Einspannung bewirken.

Die Schwingungsmessungen (Bild 8.2a und b) ergaben eine Grundfrequenz von 5.4 Hz und eine Dämpfung von 1.1 %.



**Bild 8.2a** Resonanzkurve (vertikale Richtung)



**Bild 8.2b** Ausschwingversuch

Die Übereinstimmung zwischen berechneter und gemessener Eigenfrequenz (5.0 Hz und 5.4 Hz) ist somit sehr gut.

## 9 Passerella sulla Verzasca

Die Passerella sulla Verzasca zwischen Gordola und Tenero (Kanton Tessin) wurde durch das Ingenieurbüro Giorgio Masotti (Bellinzona) projektiert. Auch hier wurden vom Autor sowohl die dynamischen Berechnungen als auch die Messungen durchgeführt. Die Bilder 9.1a und b zeigen die Brücke im Bau und das verwendete FE-Modell.



Bild 9.1a Passerella sulla Verzasca

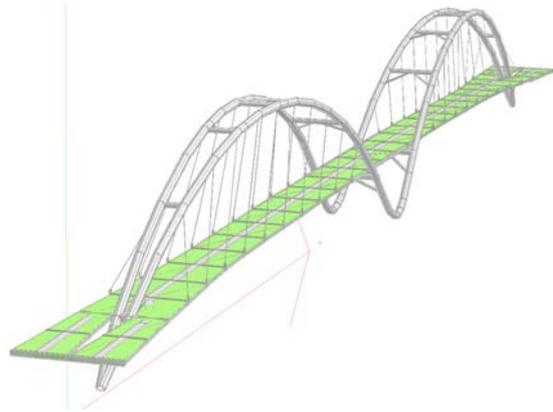
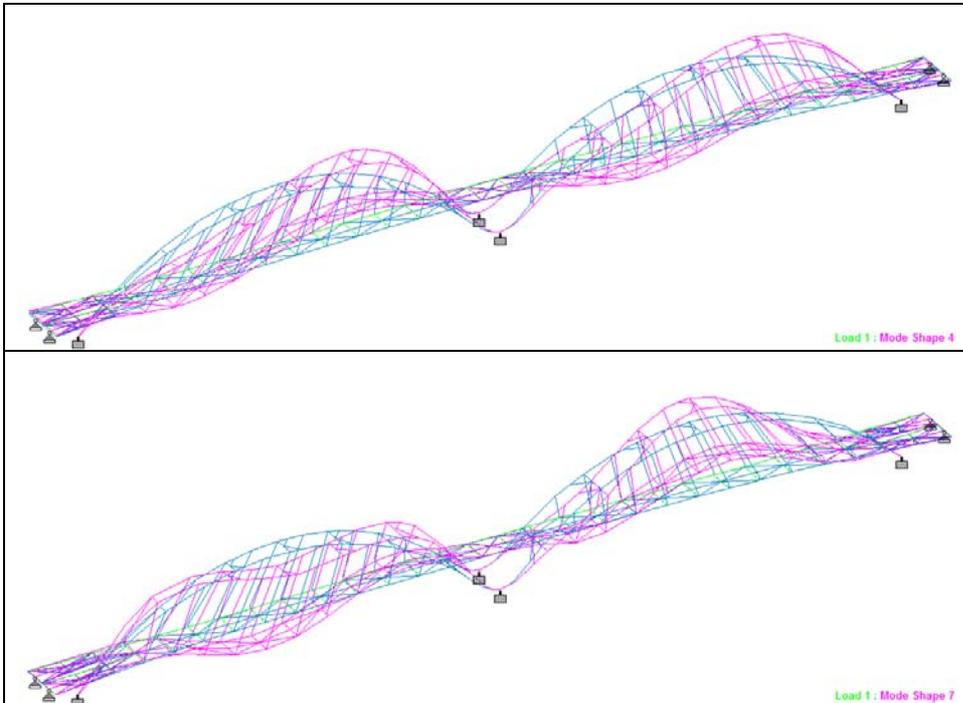


Bild 9.1b FE-Modell

### 9.1 Dynamische Berechnungen

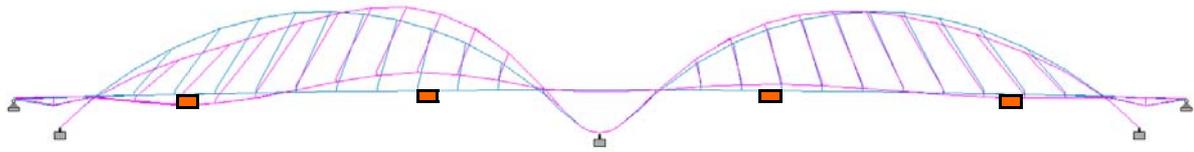
Die dynamischen Berechnungen für dieses Bauwerk bildeten die Grundlage für die optimale Wahl der Ausführungsvariante. Die Ausführung ohne Verbund hat eine geringere Steifigkeit, ihre Hauptfrequenzen liegen bei 1.6 Hz und 2.5 Hz. Die Ausführung mit festem Verbund zwischen Betonplatten und Stahlkonstruktion ist einiges steifer und hat die Grundfrequenzen bei 2 Hz und bei 2.9 Hz. Die Bilder 9.2a und b zeigen die ersten beiden Schwingformen.



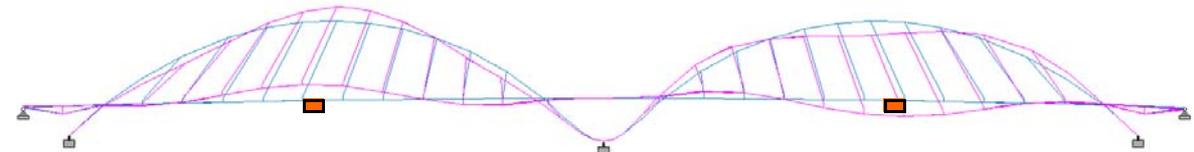
**Bild 9.2a**  
1. Eigenform (vertikal);  
ohne Verbund: 1.6 Hz  
mit Verbund: 2.0 Hz

**Bild 9.2a**  
2. Eigenform (vertikal)  
ohne Verbund: 2.5 Hz  
mit Verbund: 2.9 Hz

Für die 1. Eigenform sind 4 Tilger in den Viertelspunkten, für die 2. Eigenform 2 Tilger in der Mitte der Spannweite erforderlich (Bild 9.3a und b).



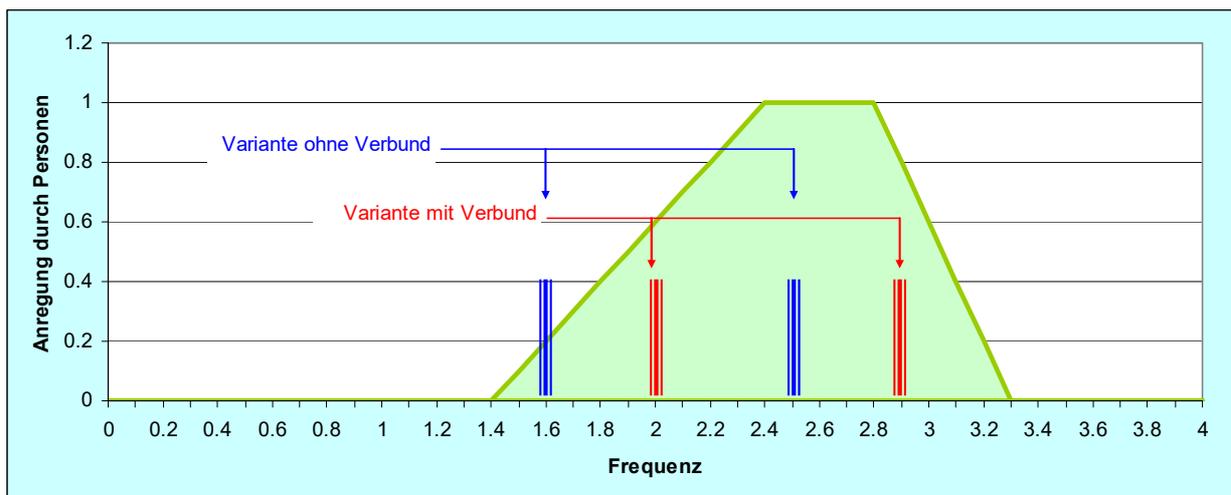
**Bild 9.3a** Anordnung der Tilger für die 1. Eigenform



**Bild 9.3b** Anordnung der Tilger für die 2. Eigenform

Es ist klar, dass sich das Schwingungsproblem dieser Brücke mit einer genügenden Anzahl Schwingungstilger lösen lässt, doch Schwingungstilger sind sehr kostspielig. Es ging also darum, die Variante zu wählen, die mit der kleinsten Anzahl Tilger auskommen konnte.

In Bild 9.4 sind die Eigenfrequenzen der beiden Varianten mit der Anregungsstärke verglichen: die Variante *ohne* Verbund hat die 1. Eigenfrequenz bei 1.6 Hz, d.h. in einem Frequenzbereich, in dem die Anregungsstärke noch relativ gering ist. Die Variante *mit* Verbund hat beide Eigenfrequenzen im Bereich mit starker Anregung. Mit der Wahl der Variante *ohne* Verbund besteht somit die Chance, dass für die 1. Eigenform auf Tilger verzichtet werden kann, womit sich die Anzahl Tilger von 6 auf 2 reduzieren würde. Aufgrund dieser Überlegungen wurde schliesslich die weichere Variante gewählt und Aussparungen für Tilger in den beiden Brückenmitten angebracht.



**Bild 9.4** Eigenfrequenzen der beiden Varianten im Vergleich mit der Anregungsstärke. Anmerkung: Die hier eingezeichnete Anregungsstärke ist rein qualitativ. Sie basiert auf einer Abschätzung und nicht auf Kraftmessungen.

Auch für diese FE-Berechnung wurde eine Kontrolle mit einer Handrechnung durchgeführt. Die 1. Eigenschwingung lässt sich als eine Schwingung von zwei gekoppelten Balken approximieren. Die Schwingung ist antimetrisch, sodass ein Modell für die Hälfte der Spannweite gewählt

wird. Die beiden Balken wirken unabhängig, d.h. die Trägheitsmomente des oberen und des unteren Balkens werden addiert. Auf diese Weise erhält man mit der Annahme „aufgelegt – aufgelegt“ eine Eigenfrequenz von 1.11 Hz und mit der Annahme „eingespannt – aufgelegt“ eine Eigenfrequenz von 1.73 Hz. Die FE-Berechnung ergibt 1.58 Hz.

Die 2. Eigenschwingung lässt sich als eine Schwingung eines einfachen Balkens approximieren. Die Rohre bilden den Obergurt, die Fahrbahn den Untergurt. Auf diese Weise erhält man mit der Annahme „eingespannt – eingespannt“ eine Eigenfrequenz von 3.32 Hz und mit der Annahme „eingespannt – aufgelegt“ eine Eigenfrequenz von 2.28 Hz. Die FE-Berechnung ergibt 2.43 Hz.

## 9.2 Messungen

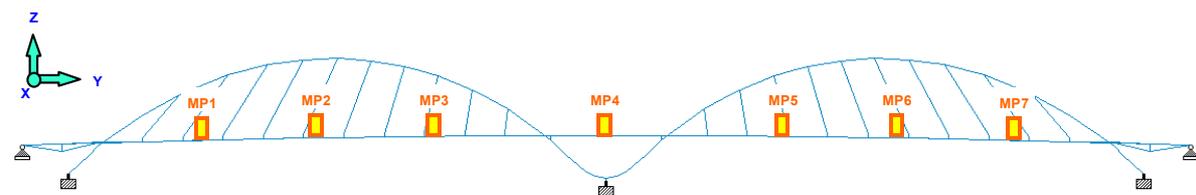
Vor der Übergabe des Bauwerkes an die Gemeinden wurden umfangreiche Schwingungsmessungen unter verschiedenen Belastungen durchgeführt. Bilder 9.5a und b zeigen die Messungen kurz vor Vollendung (d.h. noch ohne Brückengeländer) und nach Vollendung. Die Messpunkte waren in Brückenmitte, in den Viertelpunkten und über dem Mittelaufleger angeordnet (Bild 9.6).



**Bild 9.5a** Schwingungsmessung ohne Geländer

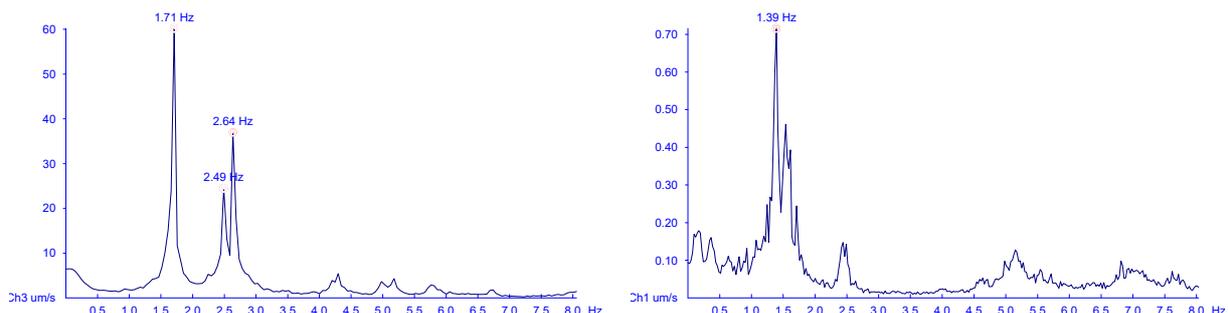


**Bild 9.5b** Schwingungsmessung mit Geländer



**Bild 9.6** Anordnung der Messpunkte

Bild 9.7 zeigt die Amplitudenspektren für die Messung bei Hintergrundanregung (ambient vibration) beim Messpunkt MP2 (nach Anbringen des Geländers). Die Übereinstimmung mit den Werten aus der FE-Berechnung ist sehr gut (vgl. Tabelle 9.1).



**Bild 9.7** Amplitudenspektrum für MP2 aus „ambient vibration“; links: Vertikal; rechts: Horizontal-quer

**Tabelle 9.1** Vergleich der Eigenfrequenzen

	FE-Berechnung	Messung (ohne Geländer)	Messung (mit Geländer)
1. Eigenfrequenz vertikal	1.58	1.64	1.71
2. Eigenfrequenz vertikal	2.43	2.56	2.64
1. Eigenfrequenz horizontal	1.44	1.12	1.39

Nach dem Vorliegen der Messergebnisse hat der Bauherr beschlossen, dass auf den Einbau von Tilgern verzichtet werden kann.

## 10 Zusammenfassung

In nachstehender Tabelle sind die berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen für alle sechs Brücken zusammengestellt. Die Abweichung liegt in der Regel unter 10 %. Bei der Wylandbrücke waren die Ergebnisse der FE-Berechnung nicht mehr greifbar, sodass nur ein Vergleich mit der Handrechnung möglich war. Bei der Grevas-Brücke liegt der berechnete Wert 14 % tiefer als der gemessene Wert. Diese Abweichung lässt sich durch die doch recht komplizierte Geometrie im Bereich der Treppe und des Lifts, die im Modell etwas vereinfacht abgebildet wird, erklären.

**Tabelle 10.1** Berechnete und gemessene Eigenfrequenzen für alle 6 Brücken

Brücke	Typ	Schwingform	Berechnung	Messung	Abweichung
Lausanne	Stahl-Beton-Verbund	vertikal	2.56 Hz	2.5 Hz	2 %
Wyland	Stahl-Beton-Verbund	vertikal	1.87 Hz	1.5 Hz	25 %
Schanzengraben	Stahfachwerk	vertikal	3.3 Hz	3.6 Hz	9 %
Grevas	Spannbeton	vertikal	5.1 Hz	6.1 Hz	14 %
Serletta	Spannbeton	vertikal	5.0 Hz	5.4 Hz	8 %
Verzasca	Stahlrohr-Bogenbrücke mit abgehängter Fahrbahn	vertikal	1.58 Hz	1.71 Hz	8 %
		vertikal	2.43 Hz	2.64 Hz	8 %
		horizontal	1.44 Hz	1.39 Hz	4 %

## 11 Schlussfolgerungen

Aufgrund der Berechnungen und Messungen für die sechs beschriebenen Fussgängerbrücken lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- FE-Berechnungen – sofern richtig durchgeführt und sinnvoll eingesetzt – bilden ein zuverlässiges Hilfsmittel für die Projektierung von Fussgängerbrücken. Es ist mit Abweichungen von 10 bis 15 % zwischen den berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen zu rechnen.
- Die Ergebnisse von FE-Berechnungen sind stets mit gebührender Vorsicht zu interpretieren. Eine Kontrolle mit Handrechnungen ist unerlässlich.
- Die Unsicherheit in der Bestimmung der Eigenfrequenzen ist bei der Projektierung explizit zu berücksichtigen.
- Projekte für Fussgängerbrücken können – auch wenn ihre Eigenfrequenzen im kritischen Bereich liegen – ohne weiteres ausgeführt werden, sofern Gegenmassnahmen (z.B. Schwingungstilger) eingeplant werden.
- Ob Schwingungstilger wirklich erforderlich sind, lässt sich in der Projektierungsphase oft nur schwer abschätzen. Die Unsicherheiten über die Anregungskräfte und über die Dämpfung sind zu gross.
- Für alle möglicherweise auftretenden Resonanzfälle sind Gegenmassnahmen vorzusehen, d.h. es sind Aussparungen und Befestigungen für Schwingungstilger einzuplanen.
- Die definitive Entscheidung, ob Tilger eingebaut werden müssen, kann zumeist auf einen Zeitpunkt nach Fertigstellung der Fussgängerbrücke verschoben werden. Aufgrund von Schwingungsmessungen lässt sich dann zweifelsfrei festlegen, ob Tilger erforderlich sind oder nicht.

### Literatur

- [1] Bachmann, H. und W. Ammann: *Schwingungsprobleme bei Bauwerken*; International Association for Bridge and Structural Engineering; 1987
- [2] Blevins, R.D.; *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*; Van Nostrand Reinhold Company, New York,
- [3] STAAD.Pro; Software for structural analysis and design; Research Engineers International; ([www.reig.de](http://www.reig.de))