Statische und dynamische Verschiebungsmessungen am freistehenden Pfeiler S3 der Ganterbrücke

Autor(en): **Cantieni, Reto / Grob, Josef**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **99 (1981)**

Heft 4

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74416

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Statische und dynamische Verschiebungsmessungen am freistehenden Pfeiler S3 der Ganterbrücke

Von Reto Cantieni, Dübendorf, und Josef Grob, Naters

Am freistehenden Pfeiler S3 der Ganterbrücke wurden mit Hilfe eines Laser-Systems statische und dynamische Verschiebungsmessungen durchgeführt. Die Versuchsresultate dienten zur Überprüfung der getroffenen Berechnungsannahmen und geben allgemein nützliche Informationen über massgebende statische und dynamische Kennwerte von Tragwerken in Stahl- und Spannbeton.

Allgemeines

Im Auftrag des Baudepartementes des Kantons Wallis führte die Eidg. Materialprüfungsanstalt EMPA, Dübendorf, in Zusammenarbeit mit der Firma Jenzer AG, Messtechnik, Geroldswil, am 16. November 1979 statische und dynamische Verschiebungsmessungen am freistehenden Pfeiler S3 der Ganterbrücke durch. Die Ganterbrücke führt die neue Simplonstrasse N9 etwa 15 km oberhalb von Brig über das Gantertal.

Im Zusammenhang mit der *Dimensionierung auf Wind* während der verschiedenen Bauzustände war die Frage nach *Eigenfrequenz* und *Dämpfung* der freistehenden Pfeiler aufgetreten. Von besonderem Interesse war dabei der höchste Pfeiler S3 nach Abschluss des beidseitigen Freivorbaus, aber noch vor dem Fugenschluss gegen den Vorbau S2.

Der Pfeiler S3 weist eine freie Höhe bis O.K. Pylon von etwa 148 m auf. Bild 1 zeigt den Bauzustand der Ganterbrücke zur Zeit der Versuchsdurchführung. Im Moment der Messungen war der Freivorbau des Überbaus, je 86 m auf beiden Seiten des Pfeilers, abgeschlossen. Die Betonsegel, welche die Schrägkabel umhüllen, waren ebenfalls fertig betoniert. Gegen den Überbau beim Pfeiler S2 war eine 2 m breite Fuge offen. Ausserdem sind auf Bild 1 die ersten Etappen des Überbaus beidseitig des Pfeilers S4 sichtbar.

Die Bemessung auf Wind basiert in der Regel auf einer fiktiven *statischen Ersatzwindlast*, die gleichen Maximalwerte der Tragwerkbeanspruchung liefert wie ein möglicher Extremwind innerhalb einer gewissen Wiederkehrperiode. Rechnerisch kann dabei von einer mittleren Windgeschwindigkeit, z.B. vom Stundenmittel [1], oder von den maximalen Böenspitzen [2], ausgegangen werden. Die statische Ersatzwindlast hängt nicht nur vom Wind und der Formgebung des Bauwerkes ab, sondern auch von dessen Schwingungsverhalten, das durch Eigenfrequenz und Dämpfung charakterisiert ist.

Die Norm SIA 160/1970 weist im Artikel 26.7 auf diese Tatsache hin. Dort wird von einer dynamischen Zusatzbelastung infolge Schwingungsanfachung gesprochen, Hinweise über die Berechnung derselben fehlen jedoch. Aus diesem Grunde erfolgte die Bestimmung der statischen Ersatzwindlast nach dem in [1] angegebenen Berechnungsverfahren. Es basiert auf statistischen Methoden, die in der Publikation [3] näher beschrieben sind.

Eigenfrequenz und Dämpfung eines Tragwerkes werden unter anderem von den Eigenschaften der verwendeten Baustoffe beeinflusst. Für den Bau des Pfeilers S3 wurde ein *Spezialbeton BS* mit einer Dosierung von 350 kg hochwertigem Zement pro Kubikmeter Fertigbeton verwendet. Er weist unter statischer Belastung von der Norm SIA 162/1968 *abweichende Eigenschaften* auf. Bei einem Mittelwert der Würfeldruckfestigkeit von

$\bar{\beta}_w = 50\ \mathrm{N/mm^2}$

wurden in Vorversuchen folgende Verformungseigenschaften festgestellt:

Elastizitätsmodul:
$E_{b,stat} = 2{,}5 \cdot 10^7\ \mathrm{kN/m^2}$

Endkriechmass:
$\varphi_n = 2{,}0$ (bei Belastung nach 28 Tagen)



Bild 1. Bauzustand der Ganterbrücke während der Versuche am 16. November 1979

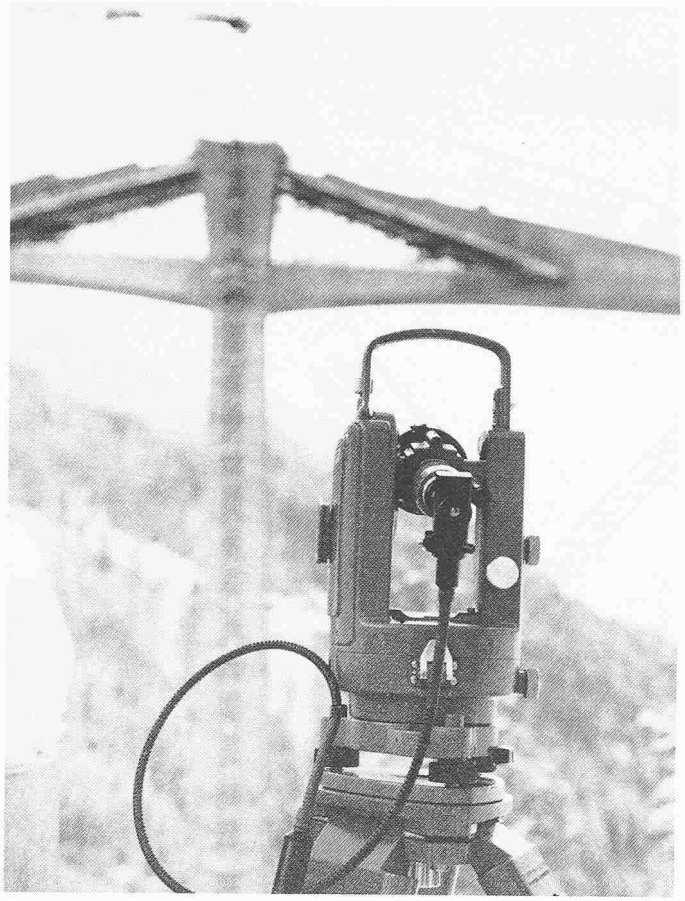


Bild 2. Der Laser-Sender. Sichtbar sind die biegsame 2 µm-Lichtfaser, das aufgesteckte Laserokular und der Theodolit

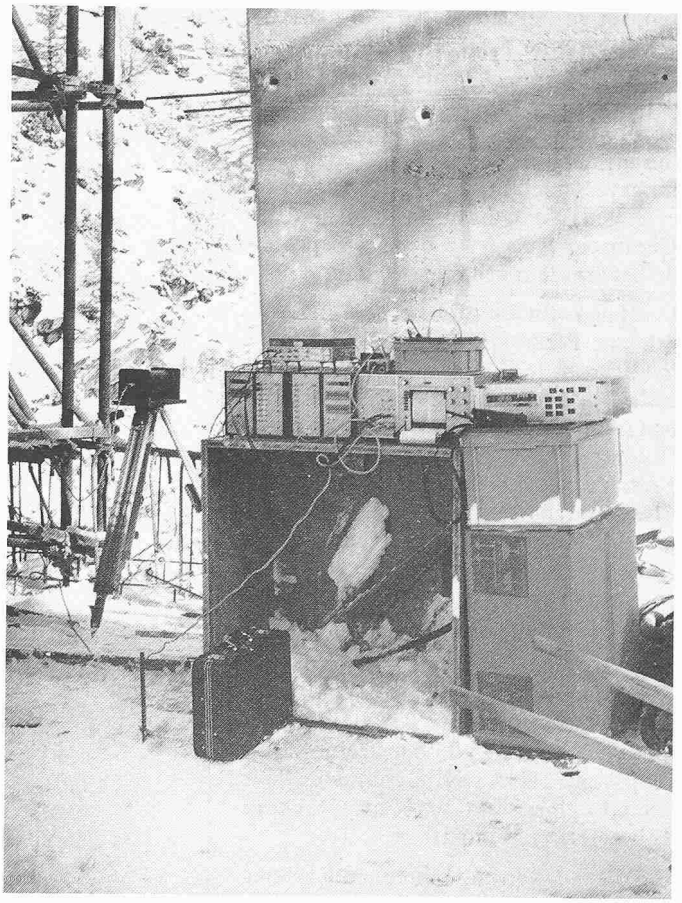


Bild 3. Die Messgeräte auf der Fahrbahnplatte beim Pfeilerkopf S3: Links auf dem Stativ die Empfangskamera des Laser-Systems, auf der Kiste die zugehörige Elektronik und die PCM-Datenerfassungsanlage

Endschwindmass:
$\varepsilon_{sn} = -0{,}60$ ‰ (für dm = 20 cm)

Die statische Ersatzwindlast wurde unter Annahme folgender *dynamischer* Kennwerte festgelegt:

Periode der Grundschwingung:
$T_1 = 6$ s bis 7 s

Anteil an kritischer Dämpfung:
$p_1 = 1$ %

Bei der rechnerischen Abschätzung der Eigenfrequenz bzw. Periode der Grundschwingung anhand eines einfachen Modelles wurde der dynamische *E*-Modul dem statischen Wert gleichgesetzt. Was die Dämpfung betrifft, war man bei dem verwendeten Beton auf Schätzungen angewiesen. Innerhalb eines bekannten Erfahrungsbereiches wurde daher ein eher vorsichtiger Wert angenommen. Erst die durchgeführten Ausschwingversuche brachten eine Klärung des Dämpfungsverhaltens.

Messtechnische Angaben

Das Problem, die horizontalen dynamischen Verschiebungen des Pfeilerkopfes S3 zu messen, kann unter den gegebenen Umständen mit konventionellen Messmethoden nicht gelöst werden. Deshalb wurde ein *Wegmesssystem* verwendet, das als *Messbasis einen Laserstrahl* verwendet. Da die Abteilung Massivbau der EMPA nicht über ein solches System verfügt, stellte die Firma Jenzer AG, Messtechnik, Geroldswil, die entsprechenden Geräte leihweise zur Verfügung und übernahm auch deren Installation und Bedienung.

Die Messeinrichtung besteht aus:

- Lasersender,
- Empfangskamera und
- Elektronikeinheit.

Der *Sender* erzeugt einen Laserstrahl von 632 nm Wellenlänge. Eingekoppelt in eine biegsame Lichtfaser (Durchmesser 2 µm) gelangt der Strahl zu einem Laserokular und wird von dort durch die Optik eines Theodoliten hindurch gesendet (Bild 2). Mit Hilfe dieser Optik kann der Laserstrahl auf einfache Weise auf den Empfänger zentriert und fokussiert werden. Um die Messeinrichtung, die im Bereich des sichtbaren Lichtes arbeitet, von Fremdlichteinflüssen unabhängig zu machen, wird der Laserstrahl mit einer Taktfrequenz von 8 kHz moduliert.

Der Kern des *Empfängers* ist ein zweidimensional lichtempfindicher, linearer Photodetektor mit den Abmessungen 24 × 24 mm. Mit der Wahl der vorgeschalteten Optik wird der Messbereich bestimmt. Es kann irgendein handelsübliches photographisches Objektiv verwendet werden. Durch Einstellen der Blende an diesem Objektiv wird die Intensität des auf den Photodetektor auftreffenden Lichtes optimiert. Der Photodetektor erzeugt Ströme, welche die Lage des Lichtflecks auf dem Detektor wiedergeben.

In der *Elektronikeinheit* werden diese Ströme so umgewandelt, dass für beide Lagekoordinaten eine separate Spannung im Bereich ± 5 Volt zur Verfügung steht.

Da das Lasersystem seine Messbasis selbst produziert, kann es praktisch unabhängig von den topographischen Randbedingungen verwendet werden. Es ist sehr mobil und leicht bedienbar.

Wie bei allen auf optischer Basis arbeitenden Messgeräten wird auch beim Lasersystem die Genauigkeit, bzw. das Auflösungsvermögen, von den optischen Eigenschaften der durchstrahlten Luftschichten beeinflusst. Da diese Eigenschaften, z.B. der Brechungsindex, nicht konstant sind, flimmert der Laserstrahl immer mehr oder weniger stark, je nach Intensität der Thermik und Sendedistanz. Dies hat zur Folge, dass das Messsignal von einem Rauschen überlagert ist. Sind nur kleine Nutzsignale zu erwarten, müssen spezielle Massnahmen getroffen werden, damit diese Signale nicht im Rauschen untergehen [4]. Eine der wirkungsvollsten Massnahmen ist es, mit dem Lasersystem nur während der Nacht zu mes-

sen. Im vorliegenden Fall war der Aufwand für eine Nachtmessung zu gross. Ausserdem war die Möglichkeit gegeben, das Messsignal dem Messsystem anzupassen, d.h. ein grosses Nutzsignal durch entsprechende Wahl der Anfangsverschiebung des Pfeilerkopfes zu erzeugen. So konnte der Einfluss des Geräuschpegels trotz der grossen Sendedistanz klein gehalten werden.

Die Lage von Empfänger und Elektronik am Pfeilerkopf war gegeben, der Sender wurde in einer Entfernung von etwa 200 m quer zur Brückenachse neben der alten Simplonstrasse aufgestellt (Bilder 2, 3, 4). Der Signalbereich der Kamera von ± 5 Volt entsprach einem Messbereich von ± 50 mm. Während der Messungen war meist eine dichte Wolkendecke vorhanden. Entsprechend betrug die Standardabweichung des Messsignals nicht mehr als 20 - 50 mV.

Für die unmittelbare Überwachung der Signale wurden ein 2-Kanal-Papierschreiber, ein Kathodenstrahloszilloskop und ein Digitalvoltmeter mit Schleppzeigerfunktion (Gay Tracking Voltmeter) verwendet.

Um die Auswertung mit einem Rechner durchführen zu können, wurden die Messsignale auf Magnetband gespeichert. Die an der EMPA vorhandene PCM-Anlage (*P*uls-*C*ode-*M*odulation, Typ 8K13, Johne und Reilhofer, München) digitalisierte die Signale mit 12 bit Auflösung, d.h. in Stufen von etwa 2.5 mV. Die Abtastrate betrug 185 Messwerte je Sekunde. Als Speichergerät diente eine Stellavox-Magnetbandstation, die mit handelsüblichen ¼"-Bändern arbeitet (Bandgeschwindigkeit 15/8 ips). Die Anlage kann maximal 32 Kanäle simultan verarbeiten. Bei der grössten Bandgeschwindigkeit von 30 ips beträgt die Abtastrate rund 3 kHz je Kanal.

Die Stromversorgung des Senders erfolgte mit einem 300-W-Honda-Aggregat, die Empfangsanlage auf der Brükke wurde ans Baustellennetz angeschlossen.

Sämtliche Messapparaturen funktionierten trotz der extremen klimatischen Verhältnisse mit Temperaturen um minus 5°C einwandfrei.

Versuchsdurchführung

Statt der ursprünglich vorgesehenen Verschiebungsmessungen unter natürlicher Anregung durch Wind wurden einfache Ausschwingversuche, ausgehend von statisch erzwungenen Anfangsverschiebungen des Tragwerkes, durchgeführt.

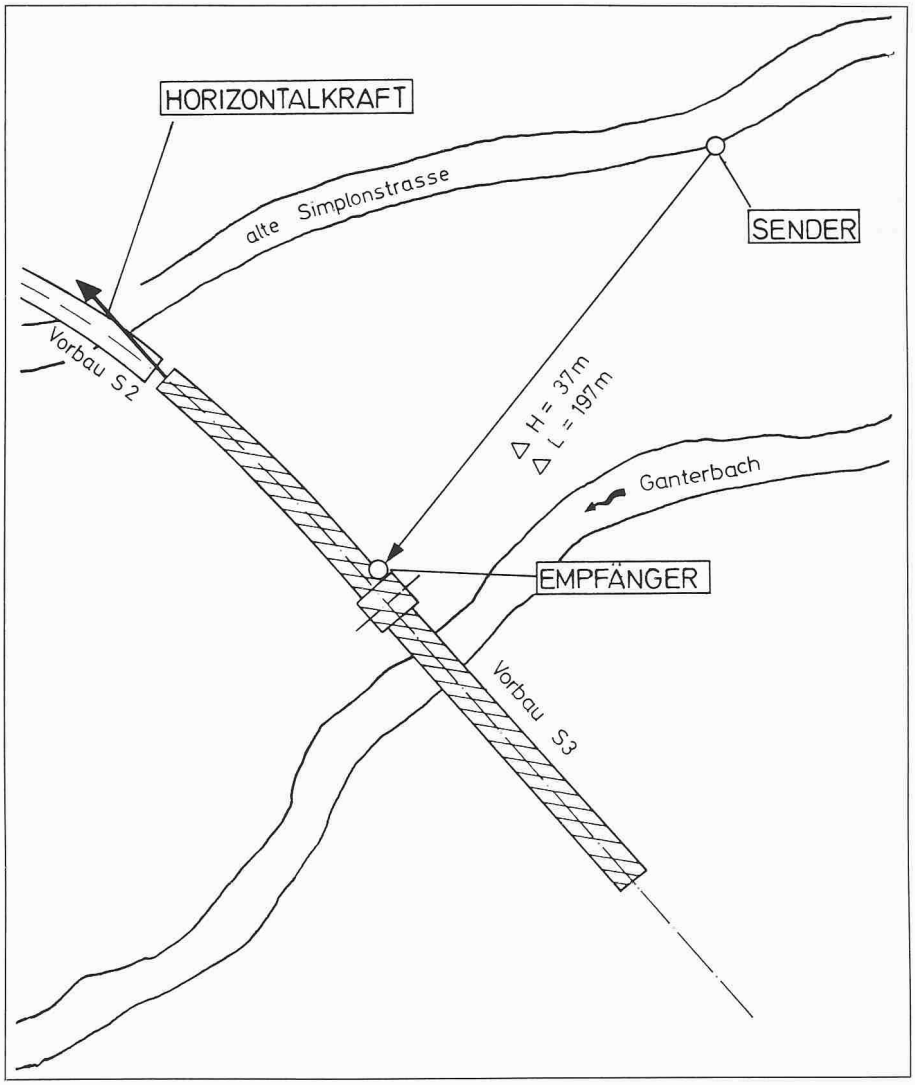


Bild 4. Anordnung der Messinstrumente in der Situation. Sendedistanz des Lasers: 200 m

Das Tragsystem «Pfeiler S3 plus Freivorbau», wurde mittels einer Dywidag-Stange und einer Spannpresse in Brükkenlängsrichtung gegen den Vorbau S2 aus der Ruhelage gezogen. Der Ausschwingvorgang begann jeweils nach dem Durchbrennen der Dywidag-Stange.

Beim ersten statisch-dynamischen Versuch steigerte man zunächst die Zugkraft in sechs Stufen von 25 kN auf 300 kN (Versuche S1/0 bis S1/6) und registrierte die entsprechenden statischen Horizontalverschiebungen des Pfeilerkopfes während je 20 Sekunden. Dann erfolgte der Ausschwingversuch D 1 aus einer aufgezwungenen Anfangsverschiebung von 34,0 mm.

Beim zweiten und dritten Versuch wurde die Horizontalkraft in einem Schritt von 25 kN auf den Grösstwert gesteigert (Versuche S2/0, S2/6, bzw. S3/0, S3/8). Nach Erreichen der Maximalkraft von 305 kN, bzw. 350 kN wurden die Ausschwingversuche D 2, bzw. D 3 bei Auslenkungen von 34,6 mm bzw. 39,4 mm gestartet.

Ein Ausschwingversuch dauerte zwischen 4 und 5 Minuten.

Auswertung

Die Auswertung der Messsignale erfolgte auf dem Data General Eclipse S 130-Computer der Abteilung Akustik der EMPA.

Die Daten wurden vom Magnetband via PCM-Demodulator, Spur-Multiplexer (max. vier Bandspuren) und DMA-

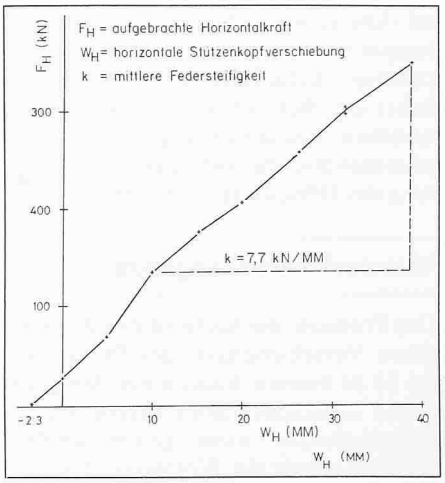


Bild 5. Resultate der statischen Versuche: Federkennlinie des freistehenden Pfeilers S3

Interface auf den Disk übertragen. Die grösste mögliche Übertragungsrate liegt bei 70 – 80 kHz.

Die Auswerteprogramme sind so aufgebaut, dass zunächst die Messsignale auf eine Bildschirm-Konsole vom Typ Tektronix 4012 ausgegeben werden. Die gewünschten Auswertebereiche können dann mit einem Crosshair-Cursor ab Bildschirm eingegeben werden. Dadurch ist es auf einfache Weise möglich, gestörte oder übersteuerte Bereiche gezielt von der Auswertung auszuschliessen.

Beim Abspielen des Magnetbandes stehen die Signale am PCM-Demodulator nicht nur digital sondern auch analog zur Verfügung. Sie können, beliebig verstärkt und gefiltert, auf einen Papierschreiber ausgegeben werden (Bild 6).

Resultate der statischen Versuche

Die Federkennlinie des Systems (Bild 5) ist das Resultat der Kraft-Verschiebungsmessungen S1/0 bis S3/8. Die Linearität ist im untersuchten Bereich gut.

Es ergibt sich folgende mittlere Federsteifigkeit:

$k \cong 7{,}7$ kN/mm

Dieser Wert lässt einen Rückschluss auf den statischen Elastizitätsmodul des verwendeten Betons zu. Er beträgt:

$E_{b,stat} \cong 2{,}5 \cdot 10^7$ kN/m²

Damit konnte der ausserordentlich tiefe Elastizitätsmodul von $2{,}5 \cdot 10^7$ kN/m², wie er schon vor Baubeginn an Betonprismen festgestellt worden war, auch im Grossversuch am Bauwerk verifiziert werden.

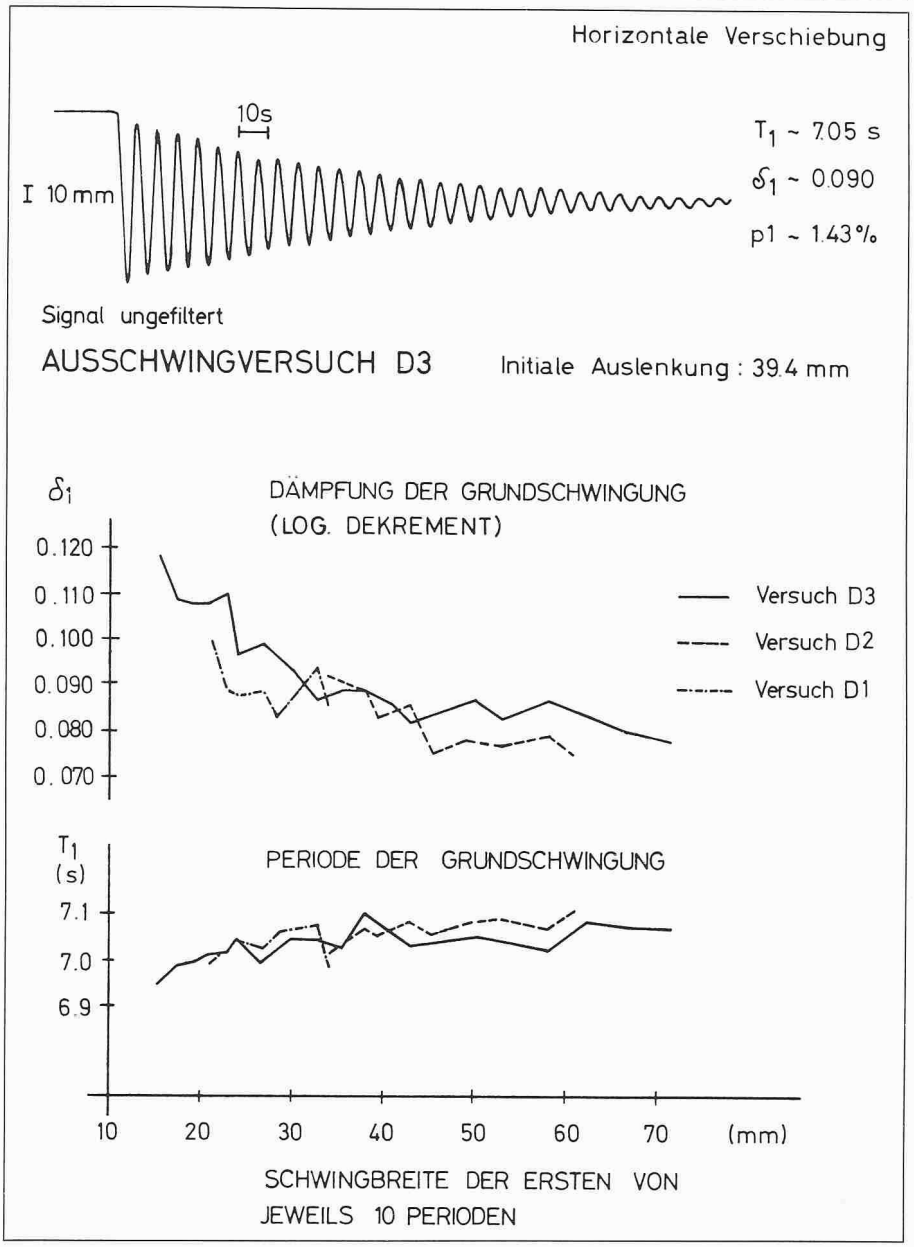


Bild 6. Resultate der Ausschwingversuche: Periode und Dämpfung der Grundschwingung in Funktion der Schwingbreite

Resultate der dynamischen Versuche

Beim Ausschwingversuch D 1 war die Nullage des Messsystems unzweckmässig gewählt worden, so dass die ersten sieben Perioden des Ausschwingens nicht ausgewertet werden konnten (Übersteuerung).

Eine kurzzeitige Sonneneinstrahlung während des Ausschwingversuches D 2 hatte Verschiebungen des Signalpegels zur Folge, so dass nur die ersten 18 Perioden bei der Auswertung berücksichtigt wurden.

Der Ausschwingversuch D 3 lieferte 28 auswertbare Perioden (Bild 6).

Die Grundschwingung des angeregten Systems kann durch die folgenden mittleren Werte charakterisiert werden:

Schwingfrequenz:	$f_1 = 0{,}142$ Hz
Schwingdauer (Periode):	$T_1 = 7{,}05$ s
log. Dämpfungsdekrement:	$\delta_1 = 0{,}090$
Anteil an kritischer Dämpfung:	$p_1 = 1{,}43\,\%$

Die im Ausschwingversuch beobachtete Periode der Grundschwingung stimmt im wesentlichen mit dem theoretisch ermittelten Wert überein. Nähere Angaben sind in der nachfolgenden Vergleichsrechnung enthalten. Als Dämpfungsmass wurde ein Anteil zwischen 1,0% und 1,5% der kritischen Dämpfung erwartet. Der durchgeführte Versuch zeigte, dass die effektive Dämpfung in diesem Rahmen liegt und zwar im oberen Bereich der erwarteten Werte.

Zusätzlich wurde untersucht, wie stark Dämpfung und Frequenz von der Schwingungsamplitude abhängen. Dazu wurde ein Auswertebereich von zehn Perioden schrittweise über die Messsignale verschoben. Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt.

Die Periode der Grundschwingung bleibt im wesentlichen über den beobachteten Amplitudenbereich konstant. Mit abnehmender Schwingbreite ist lediglich ein leichtes Absinken der Periode T_1 von etwa 7,05 s auf etwa 6,95 s festzustellen.

Die Dämpfung nimmt mit wachsender Amplitude ab.

Das klassische Modell des viskos gedämpften Ein-Massen-Schwingers erfasst diese Veränderungen von Periode und Dämpfung in Funktion der Amplitude nicht. Immerhin ist es beruhigend zu wissen, dass andernorts ähnliche Resultate gefunden worden sind [5].

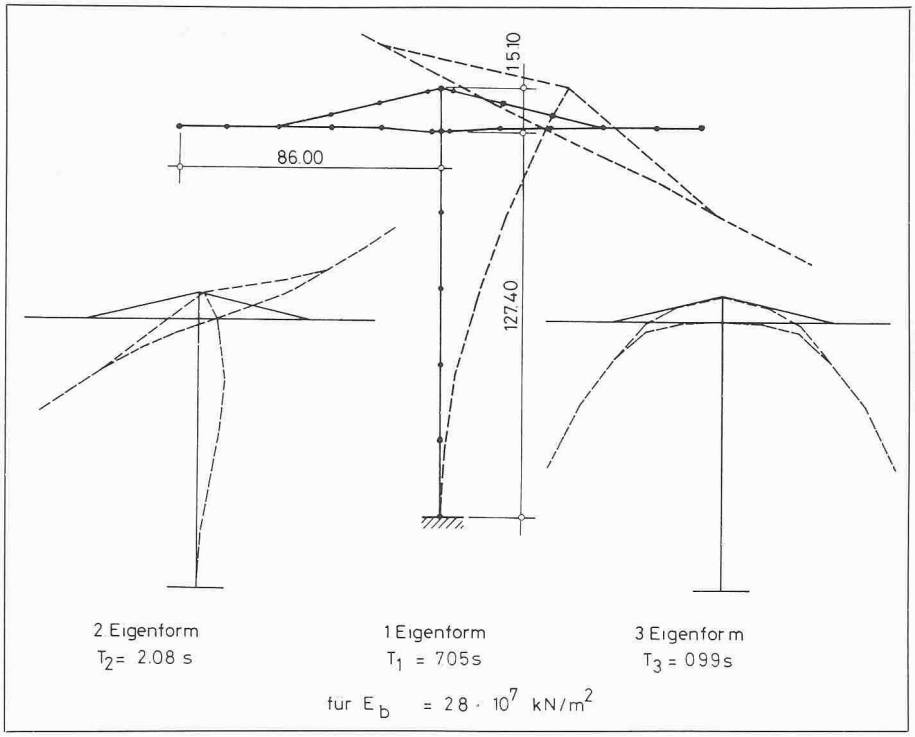


Bild 7. Vergleichsrechnung mit SMIS-2: Dynamisches Modell, Formen und Perioden der ersten drei Eigenschwingungen

Vergleichsrechnung

Bei der rechnerischen Untersuchung der Eigenschwingungen eines Tragwerkes sind die Querschnittabmessungen und die Massenverteilung im allgemeinen gut bekannt.

Eine erste Unsicherheit liegt in der Annahme der Randbedingungen z.B. bei Gelenken oder Einspannungen, wo die für das dynamische Verhalten massgebenden Grössen meist nicht mit den idealisierten, statischen Werten (z.B. «völlig frei drehbar», «starr eingespannt») übereinstimmen. Beim Pfeiler S3 bestehen in dieser Hinsicht keine Probleme, da der Einspannquerschnitt recht gut definiert ist.

Eine zweite Unsicherheit betrifft die Annahme des Elastizitätsmoduls für den Beton. Bei zeitlich langsam ablaufenden Vorgängen begeht man in der Regel keinen grossen Fehler, wenn man den statischen *E*-Modul auch für die dynamische Untersuchung verwendet [6].

Geht man davon aus, dass die im Modell angenommenen Randbedingungen den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen, kann durch Vergleich von berechneter und gemessener Eigenfrequenz der dynamische *E*-Modul bestimmt werden.

Für die Berechnung der Eigenschwingungen des Pfeilers S3 wurde das Computer-Programm SMIS-2 benützt, das am Rechenzentrum der ETH Zürich installiert ist. Es arbeitet mit Balkenelementen, die kontinuierlich mit Masse und Steifigkeit belegt sind. Über ein Element sind diese Grössen jeweils konstant.

Die theoretischen Eigenfrequenzen und -formen wurden an einem Modell mit 26 Stäben und 75 Freiheitsgraden berechnet (Bild 7).

Bei einer gemessenen Periode der Grundschwingung von $T_I \sim 7{,}05$ s ergaben die Berechnungen folgende Resultate:

$T_I^* = 7{,}72$ s mit $E_{b,dyn} = 2{,}3 \cdot 10^7$ kN/m²
$T_I^* = 7{,}05$ s mit $E_{b,dyn} = 2{,}8 \cdot 10^7$ kN/m²
$T_I^* = 6{,}53$ s mit $E_{b,dyn} = 3{,}3 \cdot 10^7$ kN/m²

Daraus kann der tatsächliche dynamische Elastizitätsmodul des Betons zu

$E_{b,dyn} \cong 2{,}8 \cdot 10^7$ kN/m²

geschätzt werden. Dieser Wert weicht erwartungsgemäss für langsam verlaufende Schwingungen nicht stark vom statischen Elastizitätsmodul ab. Das Verhältnis von dynamischem zu statischem Elastizitätsmodul beträgt im untersuchten Fall:

$$\lambda = \frac{E_{b,dyn}}{E_{b,stat}} = \frac{2{,}8 \cdot 10^7}{2{,}5 \cdot 10^7} = 1{,}12$$

Aus Versuchen an der Glattbrücke in Opfikon [6] wurde bei Frequenzen von 2 bis 4 Hz und bei einem statischen Elastizitätsmodul von $5{,}0 \cdot 10^7$ kN/m² ein Vergleichswert $\lambda = 0{,}92$ gefunden. Er ist in Übereinstimmung mit den in [7] angegebenen Versuchsresultaten kleiner als 1. Die Versuche [7] an Spannbetonbalken mit statischen Elastizitätsmoduln des Betons zwischen 3,0 und $4{,}0 \cdot 10^7$ kN/m² zeigen eine eindeutige Zunahme des Wertes λ mit Abnahme des Elastizitätsmoduls. Diese Tendenz wird hier im Falle eines ausserordentlich weichen Betons bestätigt.

Literaturverzeichnis

[1] National Research Council of Canada, Ottawa: Canadian Structural Design Manual 1970, Suppl. No. 4 to the National Building Code of Canada

[2] Norm SIA 160/1970 für die Belastungsannahmen, die Inbetriebnahme und die Überwachung der Bauten, vom 1. Mai 1970. Herausgegeben vom Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich

[3] *Davenport, A.:* The Application of Statistical Concepts to Wind Loading of Structures. Inst. of Civ. Eng., Vol 19, 1961

[4] *Cantieni, R.:* Durchbiegungsmessung von Brücken - ein laserstrahlgestütztes System im Vergleich mit konventionellen Methoden. Material und Technik, Vol 7, 1979, Nr. 3

[5] *Baumann, M., Dieterle, R., Bachmann, H.:* Neuartige Belastungs- und Messeinrichtungen für Schwingungsversuche an armierten und vorgespannten Betonprüfkörpern. Schw. Bauzeitung, Vol 96, 1978, Heft 48

[6] *Rösli, A.:* Die Versuche an der Glattbrücke in Opfikon. EMPA-Bericht Nr. 192, 1963

[7] *Müller, F.P.:* Über den dynamischen *E*-Modul von Spannbeton. Beton- und Stahlbetonbau, Vol 54, 1959, Nr. 8

Adressen der Verfasser: *R. Cantieni*, dipl. Ing. ETH, EMPA, Abteilung Massivbau, 8600 Dübendorf. *J. Grob*, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH/SIA, Ingenieurbüro Schneller Schmidhalter Ritz, Nordstr. 11 a, 3900 Brig