Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 104 (1986)

Heft: 14

Artikel: Zur Schwingungsdämpfung teilweise vorgespannter Leichtbeton- und Betontragwerke

Autor: Bachmann, Hugo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76122

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: 15.07.2025

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

Zur Schwingungsdämpfung teilweise vorgespannter Leichtbeton- und Betontragwerke

Von Hugo Bachmann, Zürich

Prof. Dr. Alfred Rösli hat in seiner früheren Eigenschaft als Vorsteher der Abteilung Massivbau an der EMPA wichtige Beiträge zur experimentellen Erforschung des Schwingungsverhaltens von Spannbetontragwerken geleistet [1]. Inzwischen ist der teilweise vorgespannte Beton in der Praxis eingeführt worden. Der nachfolgende Beitrag fasst einige Forschungsergebnisse des Institutes für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich zusammen. Sie zeigen, dass teilweise vorgespannte Konstruktionen ein erheblich günstigeres Dämpfungsverhalten als analoge voll vorgespannte Konstruktionen aufweisen können.

Einleitung

Auf das Verhalten schwingender Tragwerke hat die Dämpfung einen wesentlichen Einfluss. Sie bestimmt das Abklingen von Schwingungen, die durch Stösse oder vorgegebene Auslenkungen erregt werden, und sie beeinflusst in erheblichem Mass die Grösse der auftretenden Schwingungsamplituden bei Resonanzanregungen und erzwungenen Schwingungen.

Bei Konstruktionen im linear-elastischen Beanspruchungsbereich setzt sich die Dämpfung im allgemeinen aus der Materialdämpfung und der Systemdämpfung zusammen. Die Materialdämpfung entspricht der im Inneren einer Konstruktion durch das Material dissipierten Energie. Systemdämpfung ereignet sich vor allem an den Rändern der Konstruktion. Sie kann praktisch null sein (ideale Auflagerbedingungen) oder auch ein Vielfaches der Materialdämpfung betragen (z. B. grosse Reibungsflächen). Im Rahmen dieses Aufsatzes wird nur die Materialdämpfung betrachtet. Dabei wird als Kenngrösse das äquivalente viskose Dämpfungsmass ξ verwendet. Es entspricht dem Dämpfungsmass (Verhältnis Dämpfung/kritische Dämpfung) eines analogen Schwingers mit ideal viskoser, d. h. geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung. Die Beziehung zum häufig verwendeten logarithmischen Dekrement δ ist $\xi = \delta/2\pi$.

Übersicht

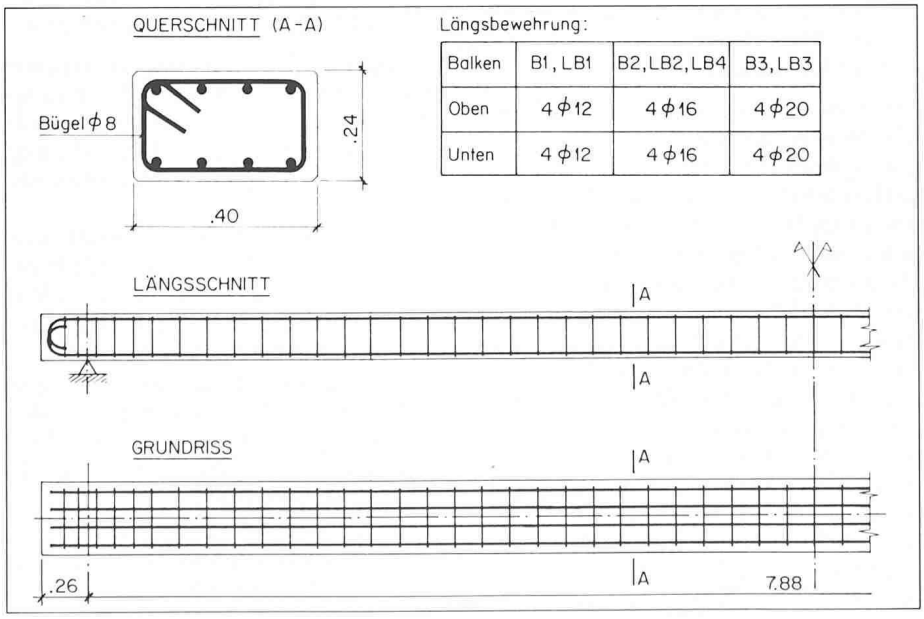
Bei voll vorgespannten Konstruktionen ist die Dämpfung verhältnismässig gering. Das Dämpfungsmass liegt in der Grössenordnung von 0,4% (Leichtbeton) bis 0,7% (Beton). Bei nur schlaff bewehrten Konstruktionen im Risszustand liegt das Dämpfungsmass höher, und es variiert in weiten Bereichen. Insbesondere die Beanspruchungshöhe und der Bewehrungsgehalt haben einen wesentlichen Einfluss. Es können Werte in der Grössenordnung von nur ~0,6% (grosse Beanspruchung, grosser Bewehrungsgehalt, Leichtbeton) bis zu ~5% (kleine Beanspruchung, kleiner Bewehrungsgehalt, Beton) festgestellt werden.

Teilweise vorgespannte Konstruktionen stellen gewissermassen ein Mittelding zwischen voll vorgespannten und nur schlaff bewehrten Konstruktionen dar. Je nach Vorspanngrad können bestimmte Eigenschaften der beiden herkömmlichen Konstruktionsarten kombiniert werden. Dies trifft auch für das Schwingungsverhalten zu. Insbesondere wird die bei voller Vorspannung sehr geringe Materialdämpfung durch teilweise Vorspannung unter Umständen erheblich vergrössert. Teilweise vorgespannte Konstruktionen erfahren häufig nach der Rissbildung eine verhältnismässig kleine zusätzliche Beanspruchung, und sie weisen einen eher kleinen Gehalt an schlaffer Bewehrung auf, was sich beides auf die Dämpfung günstig auswirkt. Da sich bei Resonanzanregung die Schwingungsamplituden im wesentlichen umgekehrt proportional zur Dämpfung verhalten, kann sich eine wesentliche Verringerung der Schwingungsbeanspruchung im Vergleich zur vollen Vorspannung ergeben.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurden am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Schwingungsverhalten schlaff bewehrter sowie voll und teilweise vorgespannter Konstruktionen aus Leichtbeton und Beton durchgeführt [2] [3] [4]. Nachfolgend werden einige wesentliche Ergebnisse kurz zusammengefasst. Im besonderen interessiert das dynamische Verhalten teilweise vorgespannter Konstruktionen, da hierüber fast keine Untersuchungen vorliegen. Dabei müssen auch die beiden «Grenzfälle», nur schlaff bewehrte sowie voll vorgespannte Konstruktionen, in die Betrachtung miteinbezogen werden.

In bezug auf die hier mitgeteilten absoluten Grössen für die Dämpfungswerte muss beachtet werden, dass diese an die im erwähnten Forschungsprojekt untersuchten Parameterkonstellationen gebunden sind und nicht verallgemeinert werden dürfen. Es zeichnen sich jedoch einige klare Tendenzen ab, die interessante Folgerungen erlauben.

Bild 1. Abmessungen und Bewehrungen der schlaff bewehrten Versuchsbalken



Schlaff bewehrte Konstruktionen

In einer ersten Versuchsreihe wurden insgesamt sieben schlaff bewehrte Bal-

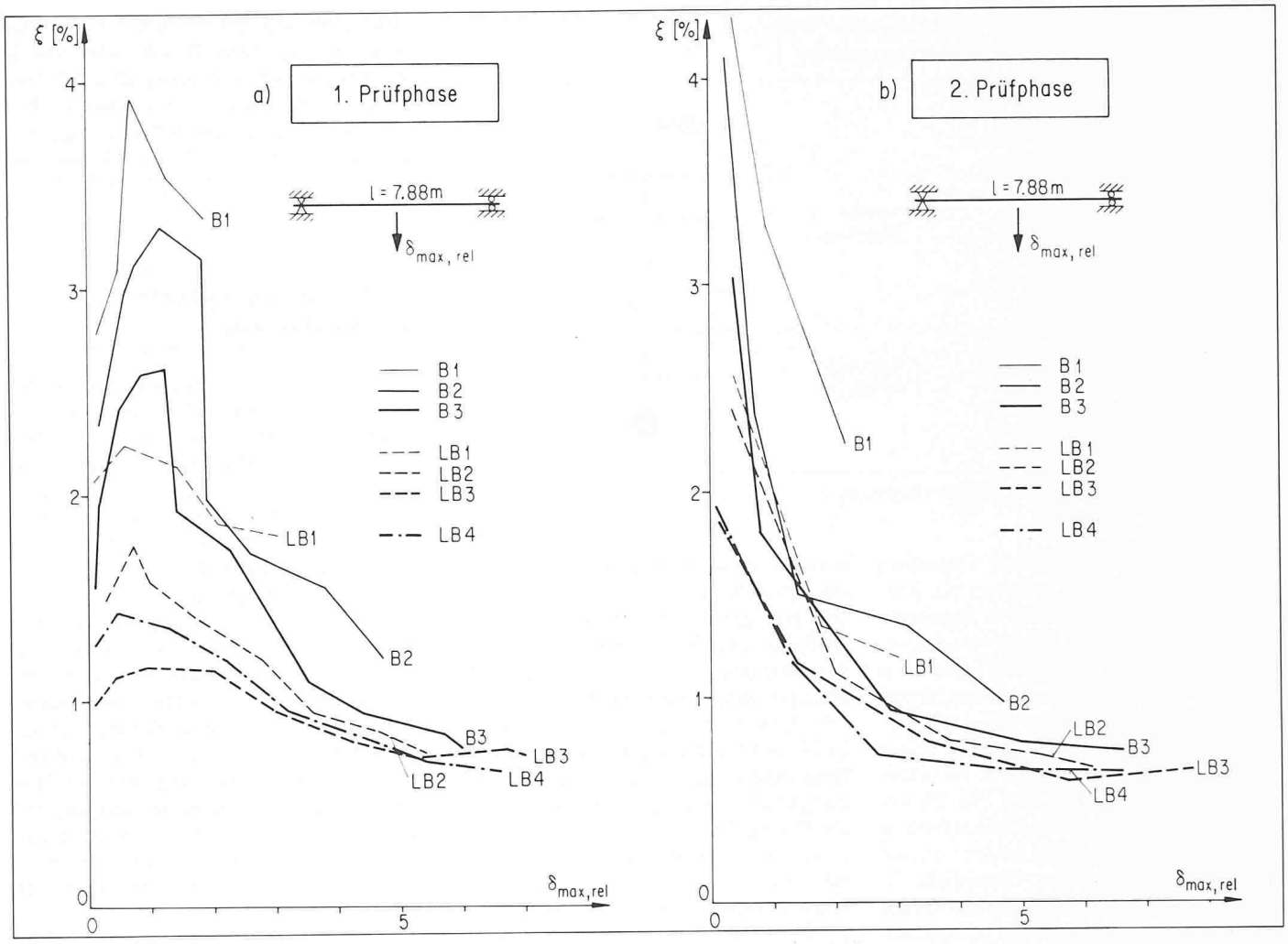


Bild 2. Abhängigkeit der Dämpfung der schlaff bewehrten Versuchsbalken von der dynamischen Beanspruchung

ken, vier Leichtbetonbalken mit der Bezeichnung LB1–LB4 und drei Betonbalken mit der Bezeichnung B1–B3, geprüft [2]. Bild 1 zeigt die Abmessungen und die Bewehrungen. Die Längsbewehrungsgehalte betrugen 0,57% (B1, LB1), 1,01% (B2, LB2, LB4) und 1,57% (B3, LB3). Bei der Herstellung des Leichtbetons wurden Zuschlagstoffe Blähton Leca-hade verwendet. Er wies eine Rohdichte (einschl. Bewehrung) von 1,76 t/m³ (LB1, LB2, LB3), bzw. 1,53 t/m³ (LB4) sowie Würfeldruckfestigkeiten von 35 bis 44 N/mm² bzw. 24 N/mm² auf. Die entsprechenden Werte des Betons waren 2,50 t/m³ und 30 bis 39 N/mm². Die Balken wurden hauptsächlich mit einer Spannweite von 7,88 m mit Hilfe eines servohydraulischen Schwingers in Resonanzversuchen sowie zusätzlich in Ausschwingversuchen geprüft.

Versuchsergebnisse

Aus Bild 2 können grundlegende Erkenntnisse zum Dämpfungsverhalten schlaff bewehrter Konstruktionen entnommen werden:

- In der Prüfphase 1 nahm die Dämpfung während fortschreitender Rissausbildung mit wachsender Relativdurchbiegung $\delta_{max,rel}$, d. h. mit steigender Beanspruchung, vorerst zu (Bild 2a).
- Dann wurde ein Zustand erreicht, bei dem die Dämpfung nicht mehr weiter anstieg.
- Sobald nahezu sämtliche Risse ausgebildet waren, nahm die Dämpfung mit weiter steigender Beanspruchung wieder ab. Bei grosser Beanspruchung, entsprechend einer Stahlspannung in der Biegebewehrung nahe bei der Proportionalitätsgrenze, wurden bei den mittel und stark bewehrten Balken (1,01% bzw. 1,57%) sehr kleine Dämpfungsmasse von grossenteils $\xi < 1\%$ festgestellt.
- Bei der Wiederholung des Prüfprogrammes in der 2. Prüfphase an den nun vollständig gerissenen Balken resultierte bei kleinen Beanspruchungen eine im Vergleich zur 1. Prüfphase höhere Dämpfung (Bild 2b). Bei den schwach bewehrten Balken (0,57%) wurden Dämpfungsmasse ξ von rund 4% beim Betonbalken und von rund 2,5% beim Leichtbetonbalken festgestellt.
- Bei grossen Beanspruchungen wurden hingegen wiederum dieselben oder aber sogar etwas kleinere Dämpfungsmasse ($\xi < 1\%$) als in der 1. Prüfphase festgestellt.

Das günstigste Dämpfungsverhalten nur schlaff bewehrter Konstruktionen ergibt sich somit
- nach abgeschlossener Rissbildung
- bei kleiner dynamischer Beanspruchung
- bei kleinen Längsbewehrungsgehalten.

Diese Erkenntnisse sind bedeutsam im Hinblick auf das Dämpfungsverhalten teilweise vorgespannter Konstruktionen. Diese weisen meist einen verhältnismässig kleinen Gehalt an schlaffer Längsbewehrung auf, der das Rissverhalten weitgehend bestimmt, und die Höhe der zusätzlichen Beanspruchungen nach der Rissbildung ist ebenfalls meistens klein.

Theoretisches Dämpfungsmodell

Die in diesen Versuchen an gerissenen Stahlbetonbalken festgestellte Abnahme der Dämpfung bei steigender dynamischer Beanspruchung und zunehmendem Bewehrungsgehalt sowie die festgestellten teilweise sehr niedrigen Dämpfungsmasse $\xi < 1\%$ sind auf den

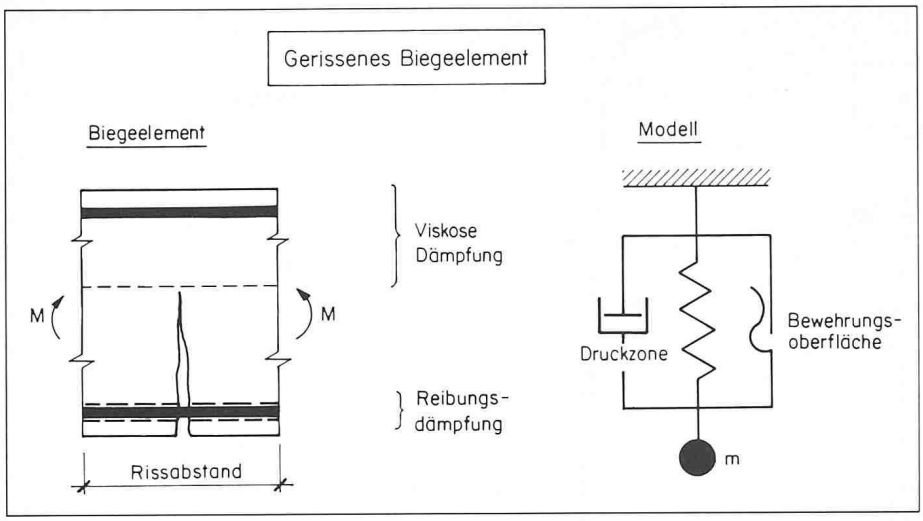


Bild 3. Dämpfungsmodell für ein gerissenes Biegeelement

ersten Blick überraschende Tatsachen und werden in der Literatur bis jetzt kaum erwähnt. Meist wird angenommen, der Stahlbeton weise im gerissenen Zustand eine Dämpfung ξ von 2 bis 5% auf. Anhand des in der Dissertation [4] dargestellten theoretischen Dämpfungsmodells gelingt es jedoch, diese Phänomene auf plausible Art zu erklären. Demzufolge setzt sich die Dämpfung in gerissenen Stahlbetonbalken aus zwei Anteilen zusammen: einem Anteil infolge viskoser Dämpfung in der Biegedruckzone und einem Anteil infolge Reibungsdämpfung (Coulomb-Dämpfung) in der Biegezugzone. Die Reibungsdämpfung entsteht im Bereich der Oberfläche der Längsbewehrung durch deren zyklische Relativverschiebung gegenüber dem Beton. Diese Erklärung ist inzwischen durch ähnliche Untersuchungen bestätigt worden [5].

Ein Stahlbetontragwerk lässt sich aus gerissenen und ungerissenen Biegeelementen zusammensetzen. Bild 3 zeigt das grundlegende Dämpfungsmodell für ein gerissenes Biegeelement. Im Bild 4 ist die Abhängigkeit des Dämpfungsmasses ξ von der Beanspruchungshöhe schematisch dargestellt. Der Anteil infolge viskoser Dämpfung ξ_V ist nicht abhängig von der Höhe der Beanspruchung, der Anteil infolge Reibungsdämpfung ξ_R fällt hyperbolisch ab. Die beiden Anteile zusammen, d. h. $\xi = \xi_V + \xi_R$, ergeben einen Verlauf, der sehr gut mit demjenigen von Bild 2b übereinstimmt.

Mathematisch lässt sich dies vereinfacht wie folgt erklären: Das Dämpfungsmass ist als Verhältnis der gesamten in einem Schwingungszyklus dissipierten Energie zur elastisch gespeicherten Energie desselben Schwingungszyklus definiert. Letztere ist proportional zum Quadrat der Beanspruchung. Die durch viskose Dämpfung dissipierte Energie ist ebenfalls proportional zum Quadrat der Beanspruchung, so dass sich im Anteil ξ_V die Beanspruchung herauskürzt. Die durch Reibungsdämpfung dissipierte Energie hingegen ist linear proportional zur Beanspruchung, so dass der Anteil ξ_R umgekehrt proportional zur Beanspruchung verläuft, d. h. hyperbolisch abfällt [4].

Teilweise vorgespannte Konstruktionen

In einer zweiten Versuchsreihe desselben Forschungsprojektes wurden Versuche an weiteren Leichtbeton- und Betonbalken durchgeführt [3]. Diese hatten dieselben äusseren Abmessungen wie die bereits beschriebenen Prüfkörper, und es wurden weitgehend die gleichen Versuchseinrichtungen und Prüfverfahren benützt. Die Balken wiesen die gleiche schlaffe Bewehrung auf wie die Balken LB1 und B1, d. h. der Gehalt an schlaffer Bewehrung betrug 0,51%. Zur Vorspannung wurden sowohl sechs insgesamt zentrisch wirkende gerade Spannstangen ∅ 12 mm ohne Verbund als auch ein in einem Hüllrohr geführtes parabolisch verlegtes Spannglied aus sieben kaltgezogenen Spanndrähten ∅ 7 mm verwendet. Das Hüllrohr wurde dann gegen Schluss der Versuche noch injiziert. Im Bild 6 ist der Querschnitt in Balkenmitte dargestellt. Der Leichtbeton mit Zuschlagstoffen Blähton Leca-hade wies eine Rohdichte (einschl. Bewehrung) von 1,73 t/m³ und eine Würfeldruckfestigkeit von 44 N/mm² auf. Die entsprechenden Werte des Betons waren 2,37 t/m³ und 42 N/mm².

Durch Hinzufügen oder Weglassen sowie durch unterschiedliches Spannen der erwähnten Spannstähle und durch

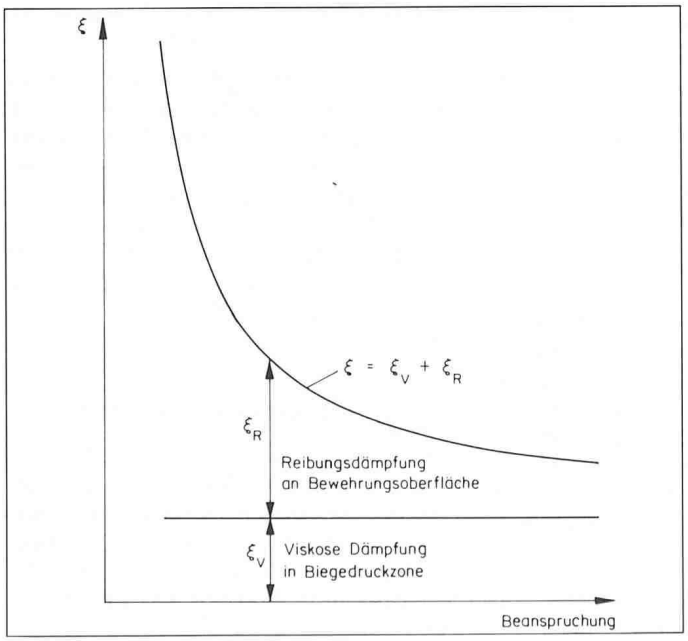
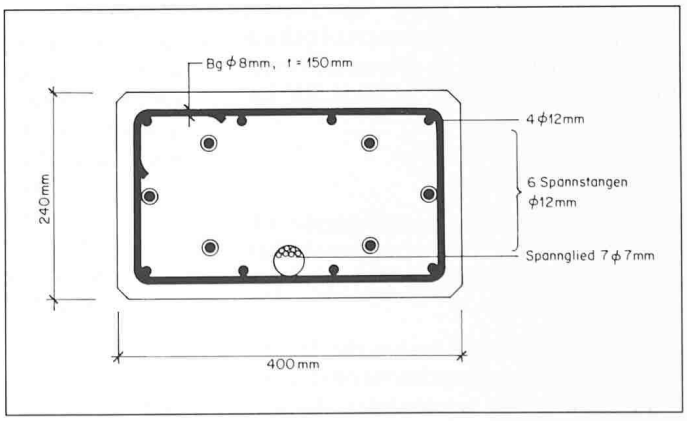


Bild 4 (links). Abhängigkeit der Dämpfung von der Beanspruchung gemäss Dämpfungsmodell von Bild 3 (schematisch)

Bild 5. Querschnitt der teilweise vorgespannten Versuchsbalken (Balkenmitte)



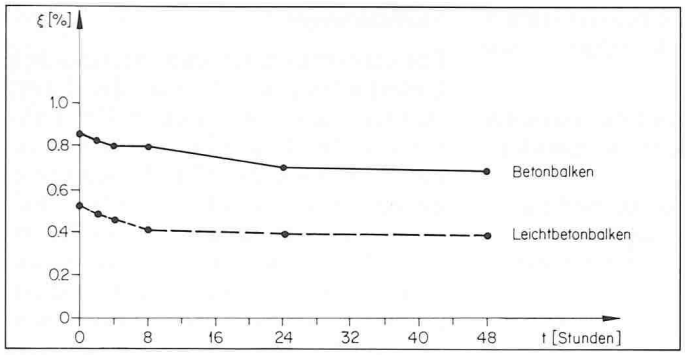


Bild 6. Abhängigkeit der Dämpfung der voll vorgespannten Versuchsbalken vom Zeitpunkt nach Aufbringen der Vorspannkraft

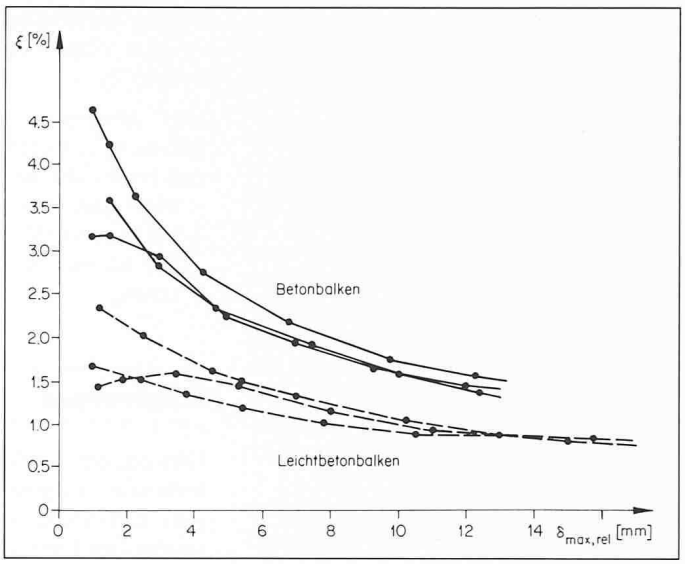


Bild 7. Abhängigkeit der Dämpfung der teilweise vorgespannten Versuchsbalken von der dynamischen Beanspruchung

Verändern der Balkenmasse konnten voll vorgespannte, nur schlaff bewehrte oder mit unterschiedlichem Vorspanngrad teilweise vorgespannte Träger erzeugt werden. Bei der Auswertung musste der Einfluss der Belastungsgeschichte berücksichtigt werden [3].

Vorspanngrade

Als wichtige Kenngrösse diente der Vorspanngrad des Querschnittes in Balkenmitte. In Anlehnung an [6] werden zwei Vorspanngrade unterschieden:

Vorspanngrad unter ständiger Last (Balkenruhelage):

$$\bar{\kappa} = \frac{M_{Dec}}{M_0}$$

Vorspanngrad unter dynamischer Last (maximale dynamische Relativdurchbiegung nach unten):

$$\kappa = \frac{M_{Dec}}{M_0 + M_{rel}}$$

Es bedeuten:

M_{Dec} = Dekompressionsmoment (Moment, das zusammen mit der Wirkung der Vorspannkraft am unteren Querschnittsrand die Spannung null erzeugt)

M_0 = Moment infolge ständiger Last (Balkenruhelage)

M_{rel} = Moment infolge dynamischer Last (maximale dynamische Relativdurchbiegung nach unten)

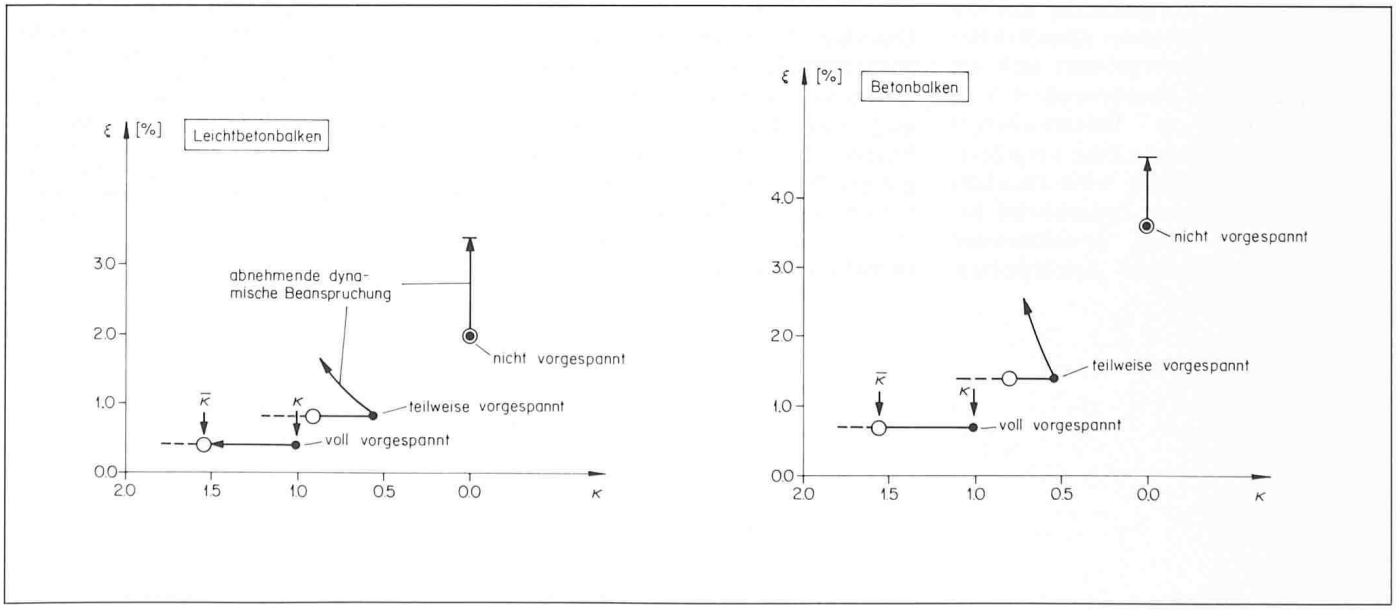
Durch die dynamische Belastung nimmt der Vorspanngrad ab, d. h. für gleiche Vorspannkraft ist stets $\kappa < \bar{\kappa}$. Für $\kappa \geqq 1$ treten am unteren Querschnittsrand keine Zugspannungen auf, d. h. der Querschnitt ist voll vorgespannt. Für $1{,}0 > \kappa > 0$ ist der Querschnitt teilweise vorgespannt. Der Vorspanngrad κ kann indessen nur als grober Anhaltspunkt dienen, da er sich lediglich auf die Verhältnisse am unteren Querschnittsrand in Balkenmitte zum Zeitpunkt maximaler dynamischer Relativdurchbiegung bezieht.

Versuchsergebnisse

Aus den Bildern 6, 7 und 8 gehen folgende wichtige Ergebnisse hervor:

- Bei den voll vorgespannten Balken war die Dämpfung sehr gering. Eine Stunde nach Aufbringen der Vorspannkraft betrug sie beim Leichtbetonbalken $\xi \simeq 0{,}5\%$ und beim Betonbalken $\xi \simeq 0{,}8\%$ (Bild 6).
- Mit zunehmender Zeitspanne zwischen dem Aufbringen der Vorspannkraft und der Versuchsdurchführung verringerte sich die Dämpfung bei den voll vorgespannten Balken. Nach 48 Stunden erreichte sie einen praktischen Endwert von rund $\xi \simeq 0{,}4\%$ beim Leichtbetonbalken und von rund $\xi \simeq 0{,}7\%$ beim Betonbalken (Bild 6).
- Im vollständig gerissenen, jedoch

Bild 8. Abhängigkeit der Dämpfung der Versuchsbalken vom Vorspanngrad (ausgewählte Resultate, z. T. schematisch)



wieder voll vorgespannten Zustand (Risse überdrückt) wiesen beide Balken eine rund 35% höhere Dämpfung auf als im ungerissenen Zustand.

- Im vollständig gerissenen und nicht vorgespannten Zustand wurden je nach dynamischer Beanspruchung Dämpfungsmasse von etwa 2 bis 3,5% beim Leichtbetonbalken und von rund 3,5 bis 4,5% beim Betonbalken festgestellt (Bild 8, vertikale Pfeile). Diese Ergebnisse stimmen gut mit denjenigen der nur schlaff bewehrten Balken der ersten Versuchsreihe mit gleichem Gehalt an schlaffer Längsbewehrung überein (LB1, B1).
- Bei den teilweise vorgespannten Balken mit vorgegebenem Vorspanngrad $\bar{\kappa}$ (Balkenruhelage) zeigte sich – ähnlich wie bei den nur schlaff bewehrten Balken der ersten Versuchsreihe – eine starke Abhängigkeit von der maximalen dynamischen Relativdurchbiegung $\delta_{max,rel}$, d. h. von der dynamischen Beanspruchung (Bild 7). Im wesentlichen zeigte sich der typische hyperbolische Verlauf, der auf die infolge Rissbildung aktivierte Reibungsdämpfung (Coulomb-Dämpfung) zwischen der schlaffen Längsbewehrung und dem sie umgebenden Beton zurückzuführen ist. Die in einem Hüllrohr verlegte vorgespannte Bewehrung leistet keinen wesentlichen Beitrag an die Dämpfung. Das Dämpfungsmass verringerte sich mit steigender Beanspruchung von rund $\xi = 2{,}5$ auf 1% beim Leichtbetonbalken und von rund $\xi = 4{,}5$ auf 1,5% beim Betonbalken.
- Bei teilweiser Vorspannung war das Dämpfungsmass der beschriebenen Versuche je nach Parameterkonstellation – vor allem je nach Beanspruchungshöhe – somit rund zwei- bis sechsmal grösser als bei völliger Vorspannung.
- Bei teilweiser Vorspannung mit ungefähr gleichbleibender dynamischer Beanspruchung vergrössert sich die Dämpfung mit abnehmendem Vorspanngrad $\bar{\kappa}$ in Balkenruhelage (Bild 8, leere Kreise). Eine Vergrösserung der Dämpfung wird ebenfalls durch abnehmende dynamische Beanspruchung bzw. abnehmenden Vorspanngrad κ bei gleichbleibendem Vorspanngrad $\bar{\kappa}$ bewirkt (Bild 8, nach oben weisende Pfeile, sowie Bild 7).

Das günstigste Dämpfungsverhalten teilweise vorgespannter Konstruktionen ergibt sich somit

- nach abgeschlossener Rissbildung
- bei kleinem Vorspanngrad $\bar{\kappa}$
- bei kleiner dynamischer Beanspruchung.

Folgerungen

Obwohl bei der Schwingungsdämpfung teilweise vorgespannter Konstruktionen zahlreiche Parameter eine Rolle spielen und verschiedene Fragen noch offen sind, können aufgrund der durchgeführten und hier beschriebenen Untersuchungen einige grundlegende Zusammenhänge erkannt werden.

Die Dämpfung (Materialdämpfung) teilweise vorgespannter Konstruktionen wird nach der Rissbildung weitgehend durch die schlaffe Längsbewehrung bestimmt. Die Dämpfung ist erheblich grösser als diejenige analoger voll vorgespannter Konstruktionen. Wie bei nur schlaff bewehrten Konstruktionen zeigt sich eine starke Abhängigkeit von der dynamischen Beanspruchung. Hohe Beanspruchungen bewirken eine erheblich kleinere Dämpfung als niedrige Beanspruchungen. Dies ist auf die durch Rissbildung aktivierte Reibungsdämpfung zwischen der schlaffen Längsbewehrung und dem sie umgebenden Beton zurückzuführen. Die in einem Hüllrohr verlegte vorgespannte Bewehrung leistet keinen wesentlichen Beitrag an die Dämpfung. Hingegen bewirkt eine Verringerung des Vorspanngrades in Balkenruhelage bei ungefähr gleichbleibender dynamischer Beanspruchung eine Zunahme der Dämpfung.

Das Dämpfungsverhalten teilweise vorgespannter Konstruktionen, das erheblich günstiger ist als dasjenige voll vorgespannter Konstruktionen, kann insbesondere im Fall von Resonanzanregungen bedeutsam sein. Dabei muss natürlich auch der Einfluss der teilweisen Vorspannung auf die Eigenfrequenzen berücksichtigt werden.

Verdankungen

Die experimentellen und theoretischen Untersuchungen sind von der Firma Hunziker & Cie AG, Zürich, Herstellerin der Zuschlagstoffe Blähton Lecahade, sowie von der ETH Zürich finanziell unterstützt worden. Den Mitarbeitern dieses Forschungsprojektes, Dr. *R. Dieterle* und dipl. Bauing. *W. Gisin*, und anderen Personen, die bei experimentellen Arbeiten mitgewirkt haben, möchte der Verfasser bestens danken. Ferner sei darauf hingewiesen, dass in der Zeitschrift «Beton- und Stahlbetonbau» demnächst in einem ähnlichen Beitrag auch die Einflüsse der Beanspruchungshöhe und des Vorspanngrades auf der Eigenfrequenzen behandelt werden.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *H. Bachmann*, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich-Hönggerberg.

Literatur

[1] *Rösli A.*: Über das dynamische Verhalten von vorgespannten Brücken. Vorbericht zum 6. Kongress der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau (IVBH) in Stockholm, Zürich 1960.

[2] *Dieterle R., Bachmann H.*: Versuche über den Einfluss der Rissbildung auf die dynamischen Eigenschaften von Leichtbeton- und Betonbalken, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 7501-1, Dezember 1979, Birkhäuser Verlag, Basel.

[3] *Gisin W., Bachmann H.*: Versuche zum dynamischen Verhalten teilweise vorgespannter Leichtbeton- und Betonbalken. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 7501-2, Sept. 1985, Birkhäuser Verlag, Basel.

[4] *Dieterle R.*: Modelle für das Dämpfungsverhalten von schwingenden Stahlbetonträgern im ungerissenen und gerissenen Zustand, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht Nr. 111, April 1981, Birkhäuser Verlag, Basel.

[5] *Oetes A.*: Zur werkstoffgerechten Berechnung der Erdbebenbeanspruchung in Stahlbetontragwerken. Mitteilungen aus dem Institut für Massivbau der Technischen Hochschule Darmstadt, Heft 25, 1985.

[6] *Bachmann H.*: Design of Partially Prestressed Concrete Structures Based on Swiss Experiences. «PCI-Journal», Prestressed Concrete Institute, Vol. 29, No. 4, July/August 1984.