

Dissertation Nr. 7285

Stahlbeton- und Spannbetontragwerke unter stossartiger
Belastung

Abhandlung
zur Erlangung

des Titels eines Doktors der technischen Wissenschaften

der

EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZUERICH

vorgelegt von

JAKOB WALTER AMMANN

Dipl. Bauingenieur ETH

geboren am 15. Juli 1949

von Alt St. Johann (Kt. St. Gallen)

25.5.83 *U Bachmann*

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. H. Bachmann, Referent

Dr. K. Brandes, Korreferent

Prof. Dr. F.H. Wittmann, Korreferent

Zürich, 1983

1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt einige Aspekte zur Problematik stossartiger Belastungen bzw. Beanspruchungen von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Als stossartige Belastung eines Tragwerkteiles oder des gesamten Tragwerks wird in der Regel eine sehr kurzzeitige und intensive, äussere Einwirkung verstanden. Eine Einteilung stossartiger Vorgänge kann in drei grundsätzlich verschiedene Gruppen, nämlich in die eigentlichen Stossbelastungen, in Explosionsbelastungen und in Sprungbelastungen, vorgenommen werden.

Die Auftretenswahrscheinlichkeit solcher extremer Ereignisse wird meist als derart gering eingestuft, dass als Folge dieser intensiven Beanspruchung eines Tragwerkes, bzw. der Gesamtstruktur, meist auch grosse nichtlineare plastische Verformungen bei nurmehr geringem Sicherheitsfaktor für die Tragfähigkeit zugelassen werden. Der zeitliche Verlauf der Lasteinwirkung und die damit verbundene Beanspruchung des betroffenen Tragwerkteiles, bzw. dessen Verformungsverhalten, sind vielfach sehr komplex und entweder nur noch näherungsweise und stark vereinfacht, oder nur mittels rechenzeitintensiver Computerberechnungen zu behandeln.

Anhand einer umfassenden Literatursichtung war zum Zeitpunkt der Initialisierung des vorliegenden Forschungsprojektes im Herbst 1977 aus zahlreichen Untersuchungen bekannt, dass Stahlbetonbauteile unter stossartiger Beanspruchung einen erhöhten Tragwiderstand aufweisen, der im wesentlichen auf eine wegen der erhöhten Dehngeschwindigkeit ebenfalls erhöhte Festigkeit des Bewehrungsstahles zurückgeführt werden konnte. Nur ansatzweise war hingegen die Tatsache bekannt, dass eine stossartige Beanspruchung von Stahlbetonbauteilen auch zu einer erhöhten Verformungsfähigkeit führt.

In Kapitel 3 ist eine umfassende Literatursichtung in bezug auf die Abhängigkeit der Festigkeits- und Dehnkennwerte bei Beton, Bewehrungsstahl und Spannstahl unter erhöhten Dehngeschwindigkeiten durchgeführt worden.

In Kapitel 4 wird der dynamisch recht komplizierte Vorgang des in den Versuchen getesteten, einseitig aufprallenden Balkens analytisch erfasst. Ausgangspunkt bildet die in der Stabstatik üblicherweise verwendete Bernoulli-Eulersche Formulierung für den Biegebalken. Unter Einbezug der Schubverformung und der Rotationsträgheit wird die nur selten angewendete Timoshenko-Gleichung erhalten.

Kernpunkt dieses Kapitels bildet aber eigentlich der abschliessend erbrachte analytische Nachweis des in den Versuchen mit den einfachen Balken erstmals beobachteten Phänomens des "wandernden plastischen Gelenkes". Dieses, bisher nur aus Versuchen mit metallischen Prüfkörpern bekannte Phänomen [Johnson, 1972], konnte hier in den durchgeführten Versuchen erstmals auch an Stahlbetonträgern experimentell beobachtet und anschliessend rechnerisch nachgewiesen werden.

In einem weiteren Abschnitt wird in Kapitel 4 gezeigt, dass anhand bestehender, dynamisch plastischer Grenzwertsätze die bei den einfachen Balkenversuchen erhaltenen Maximalwerte der Verformung ausgezeichnet ein-

gegabelt werden können.

In Kapitel 5 werden in erster Linie die unter einer stossartigen Belastung die Tragfähigkeit und die Verformungsfähigkeit (Rotationsfähigkeit) beeinflussenden Parameter diskutiert. Anhand einfacher Modelle kann gezeigt werden, dass ein Ansteigen der Tragfähigkeit infolge erhöhter Beanspruchungsgeschwindigkeit in erster Linie bedingt ist durch das Ansteigen der Festigkeit des Bewehrungsstahles, während das erhöhte Verformungsvermögen bedingt ist sowohl durch die Festigkeits- als auch durch die Dehnungszunahme von Beton und Bewehrungsstahl.

In Kapitel 6 werden nach einem kurzen Überblick über die mit Zweifeldträgern durchgeführten Versuche mit Sprungbelastungen Modelle zur näherungsweise Berechnung von Durchlaufträgern, bei denen ein End- oder Zwischenauflager schlagartig ausfällt, entwickelt. Die Modelle gehen davon aus - was in Versuchen und Computerberechnungen bestätigt werden konnte -, dass sich die gesamte Verformung in einzelne, eng begrenzte Bereiche (= plastische Gelenke) konzentriert und die übrigen Trägerteile Starrkörperdrehungen um diese Gelenkstellen ausführen. Diese Gelenkstellen können anhand statischer Überlegungen lokalisiert werden, allerdings muss stets kontrolliert werden, ob sich das Gelenk dann auch unter Einbezug der Tragheitskräfte immer noch ausbilden kann. Das komplexe dynamische Verhalten eines Durchlaufträgersystems kann somit näherungsweise auf Starrkörperverdrehungen mit maximal zwei Freiheitsgraden zurückgeführt werden. Die mit diesen Modellen erzielte Genauigkeit im Vergleich zum Versuch oder zur Nachrechnung mittels nichtlinearer Computerprogramme ist sehr gut, zumindest so lange, als keine seitliche Behinderung der Längsverschieblichkeit und somit keine Längszugkräfte mitberücksichtigt werden müssen.

In Kapitel 7 werden mit der Hilfe zweier Computerprogramme, welche beide sowohl geometrische als auch materialbedingte Nichtlinearitäten zu berücksichtigen vermögen, die Versuche mit den einfachen Balken und den Zweifeldträgern nachgerechnet. Beide Programme vermögen eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Nachrechnung zu erbringen. Wie in der vorliegenden Arbeit gezeigt wird, kann anhand eines einfachen Modells die Beanspruchungs-, bzw. Krümmungsgeschwindigkeit ansatzweise berücksichtigt werden, indem die mit einer elastisch-plastischen Momenten-Krümmungs-Charakteristik einzugebenden Tragfähigkeit nach Massgabe der vorhandenen Krümmungsgeschwindigkeit verändert wird.

In Kapitel 8 sind schliesslich am Anwendungsbeispiel einer Brücke, bei der angenommen wird, dass infolge eines Aufpralls, z.B. durch ein Auto, eine Unterstützung schlagartig ausfällt, die Nachrechnung mittels Computerprogramm (PIFF) bzw. mittels Näherungsmethoden dargestellt.

Summary

Several aspects for a more adequate design of shock loaded structures have been investigated. As a shock loading, one may understand either an impact by an aircraft or a car, for example, on a structure, blast waves due to nuclear explosions or step function loadings of structures due, for example, to a sudden removal of a support. Fortunately the probability of occurrence of such heavy events is rather small so that, as a consequence, the structures affected are normally not required to respond elastically and nonlinear plastic deformations, at least of parts of the structure, may be accepted. Hence, a thorough knowledge of their energy-dissipation capacity in the plastic range is of great importance for the design. In contrast to equivalent static loading conditions, this capacity is enlarged by an amount up to several 10 percents due to an increase of the bearing (plastic moment) and of the deformational capacity of the hidden structure.

Chapter 2 contains an extensive literature review, covering the period since 1940, of the experimental work on shock loaded, reinforced and prestressed concrete beams, columns, slabs and shells as well as of the development of analytical and numerical procedures for the calculation of structures and components struck by impact or blast waves.

In chapter 3 the influence of strain rate on the characteristic strength and strain values of concrete, normal reinforcing steel and prestressed steel is treated. A range of strain rate between $= 10^{-5}s^{-1}$ up to about $= 10s^{-1}$ is covered.

In chapter 4 the dynamic behaviour of the simply supported beams is treated, beams which were lifted to a specified drop-height, released and then made to fall onto a shock-absorbing element analytically. The normally used Bernoulli-Euler formulation is extended to the Timoshenko formulation by taking the additional components for shear deformation and rotational inertia into account. The main topic discussed in this chapter deals with the analytical formulation of the phenomenon of a travelling plastic hinge in reinforced concrete beams, observed in several tests with the simply supported beams. Up to now the existence of travelling plastic hinges was believed to be restricted to homogenous, isotropic media.

In addition the applicability of upper and lower bound theorems in dynamic plasticity for the maximum deflection of the impulsively loaded simple beams has been proven.

In chapter 5 the different parameters are discussed which affect the bearing and deformational (rotational) capacity of shock loaded reinforced concrete beams. The increase of the bearing capacity may primarily be explained by an increase of the strength value of the reinforcing steel due to higher strain rates. The increase of the deformational capacity is due to an increase of both strength and strain values of reinforcing steel and concrete.

In chapter 6 the test set-up for the double span beams is shortly described where one of the three supports was suddenly removed. The mechanisms of load transfer and the deformation characteristics of continuous R/C- beams in the event of support failure can be estimated to a certain degree with simple rigid- body models. Such models can be bar elements, joined by friction- endowed hinges, provided the approximate location of the plastic hinges constituting the failure mechanism is known. The complex dynamic behaviour of multi- span beams under sudden removal of support can thus be modelled by simple systems of one to two degrees of freedom. In the presence of membran effects, due to restrained longitudinal deformations, these models have to be complicated and the applicability to practical cases remains restricted.

In chapter 7 several tests with the simply supported beams and with the two span beams are recalculated by two different nonlinear dynamic computer programmes. One of them has been accomplished by a material model, enabling strain rate effects to take into account.

Finally, in chapter 8 a real problem, a bridge whose abutment, respectively one of the columns, has been suddenly removed, is calculated with one of the nonlinear computer programmes. The results are in good agreement with the simple rigid- body model calculation.