Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 105 (1987)

Heft: 37

Artikel: Zur Versagenswahrscheinlichkeit einer Stahlbetonplatte unter Stossbelastung

Autor: Wittmann, Folker H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76703

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: 13.07.2025

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

Zur Versagenswahrscheinlichkeit einer Stahlbetonplatte unter Stossbelastung

Herrn Prof. Dr.-Ing. *Herbert Kupfer*, Technische Universität München, zum 60. Geburtstag gewidmet.

Von Folker H. Wittmann, Lausanne

Das Verhalten von Tragwerken aus Stahlbeton und Spannbeton unter stossartiger Belastung wurde in den vergangenen Jahren intensiv untersucht. Parallel wurden theoretische, numerische und experimentelle Studien durchgeführt. Mit grossem Aufwand wurde der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf den Mittelwert und die Streuung bei unbewehrtem Beton bestimmt. An bewehrten Bauteilen wurden bisher aus verständlichen Gründen in erster Linie Messungen an einem einzelnen oder an wenigen vergleichbaren Elementen durchgeführt.
Für eine realistische Zuverlässigkeitsanalyse fehlten also die notwendigen Werkstoffdaten. In diesem Beitrag werden Versuche beschrieben, mit denen das Verhalten einer Stahlbetonplatte unter Stossbelastung bis zum Versagen ermittelt werden sollte. Die Platten hatten eine Dicke von 50 mm und einen Durchmesser von 2 m. Die Bewehrung bestand aus zwei orthogonalen Bewehrungsnetzen mit einer Maschenweite von 30 mm. Die Bewehrungsstähle hatten einen Durchmesser von 4 mm. Der Bruch wurde durch eine frei fallende und in der Mitte auftreffende Stahlbombe erzeugt. Registriert wurden der Kraftverlauf über Beschleunigungsaufnehmer sowie die Verformungen der Platte. Nach etwa 0,5 Millisekunden (msec) wurde ein Kegelstumpf aus der Platte gestanzt, der in den Bewehrungsnetzen hängenblieb. Insgesamt wurden 23 vergleichbare Platten unter Stossbelastung und zusätzlich noch einige unter quasistatischer Belastung getestet.
Es zeigte sich, dass die mittlere Festigkeit der Platten bei hoher Belastungsgeschwindigkeit grösser ist. Der Variationskoeffizient der Streuung der Festigkeit bleibt im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Diese Ergebnisse stimmen ausgezeichnet mit Vorhersagen eines stochastischen Modells überein. Die angegebenen Daten können im Rahmen einer realistischen Zuverlässigkeitsanalyse weiter verwendet werden.

Einleitung

Das Verhalten von Stahlbetontragwerken unter stossartiger Belastung wurde bereits von vielen Autoren experimentell und theoretisch untersucht. Zunächst stand das Verhalten von Bauteilen beim Aufprall von Fahrzeugen im Mittelpunkt des Interesses. Später erhielt dieses Gebiet neue Impulse durch die Fragestellung nach der Sicherheit empfindlicher und gefährdeter Anlagen. Wie verhält sich ein Sicherheitseinschluss aus Stahlbeton unter einer Druckwelle oder beim Aufprall eines weichen oder harten Projektils? Insbesondere der nicht mit Sicherheit auszuschliessende Fall eines Flugzeugabsturzes leitete weltweit detaillierte Untersuchungen ein.

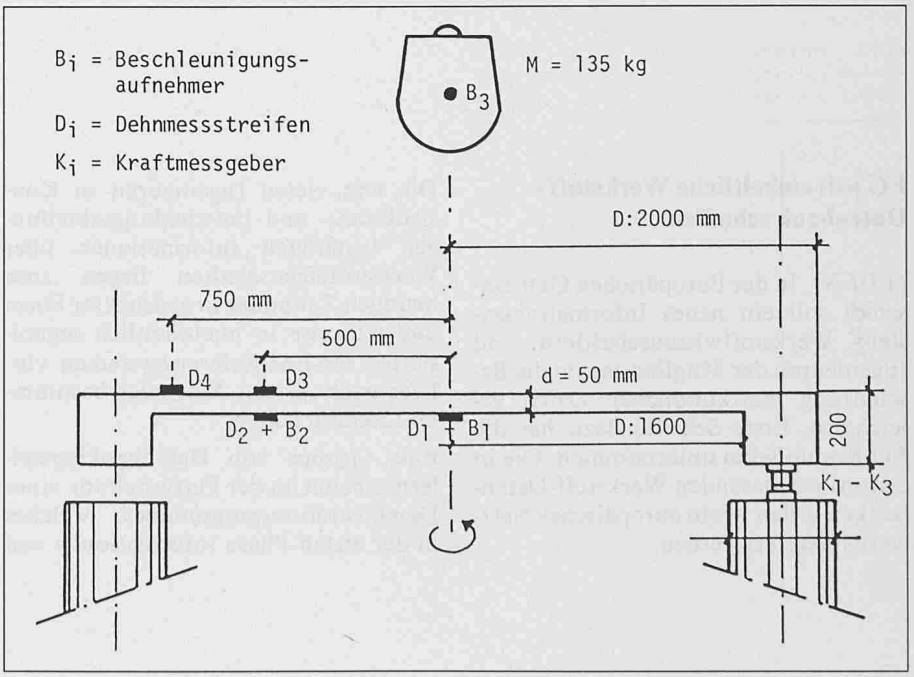
Für die Durchführung einer realistischen Sicherheitsanalyse muss man einerseits über zuverlässige Angaben bezüglich der Wahrscheinlichkeitsverteilung zu erwartender Belastungen verfügen, und anderseits muss man zusätzlich die Streuung der relevanten Werkstoffparameter kennen. Das Verhalten des unbewehrten Betons unter stossartiger Belastung ist bereits eingehend untersucht worden. Man weiss, dass der Mittelwert der Festigkeit bis zu einer kritischen Grenzgeschwindigkeit nach einem Potenzgesetz mit der Belastungsgeschwindigkeit steigt [1]. Mit Hilfe eines stochastischen Modells war es möglich, auch die Streuung der Werkstoffestigkeit als Funktion der Belastungsgeschwindigkeit anzugeben [1, 2].

Beim Stahlbeton ist die Betonfestigkeit eine Komponente, die das Tragvermögen beeinflusst. Zusätzlich spielen aber die Eigenschaften des Bewehrungsstahles und insbesondere der Verbund eine entscheidende Rolle. Das Verhalten des Verbundwerkstoffes ist aufgrund der Eigenschaften der einzelnen Komponenten im Prinzip vorhersagbar. Derzeit sind wir aber noch nicht in der Lage, die einzelnen Teilprozesse, die in ihrer Summe das Werkstoffverhalten bestimmen, hinreichend genau zu beschreiben. Deshalb wurde eine Anzahl identischer Stahlbetonplatten hergestellt und sodann unter einer fallenden Masse zerstört. Das dynamische Verhalten vor und nach dem Bruch wurde registriert und analysiert. Auf diese Weise sollte es möglich werden, das mittlere Verhalten, aber gleichzeitig auch die Streubreite des Verhaltens einer Stahlbetonplatte unter Stossbelastung bis zum Versagen zu untersuchen.

Herstellen der Platten und Versuchsaufbau

Nehmen wir an, das Verhalten einer Stahlbetonkuppel mit einem Durchmesser von 50 m und einer Schalendikke von 1,25 m unter einem aufprallen-

Bild 1. Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Die kreisrunde Platte ist auf drei Kraftmessgebern ($K_1 - K_3$) gelagert. An den Stellen B_i wird die Beschleunigung und an den Stellen D_i die Dehnung gemessen



den Projektil soll bis zum Versagen abgeschätzt werden. Dieses Problem kann experimentell kaum an Modellen in wahrer Grösse untersucht werden. Nach einer Reihe von Vorversuchen wurde eine Stahlbetonplatte mit einem Durchmesser von 2 m und einer Dicke von 50 mm als Modell gewählt. Es zeigte sich, dass Mikrobeton mit folgender Zusammensetzung brauchbare mechanische Eigenschaften aufweist:

- Zementgehalt 400 kg/m³
- Wasserzugabe 170 l/m³
- Zuschläge 1805 kg/m³
- Verflüssiger 5 kg/m³

Dies entspricht einem W/Z-Wert von 0,425. Um diese Mischung noch verdichten zu können, war es notwendig, 5 kg/m³ eines Verflüssigers zuzugeben. Die Zuschläge wurden aus drei Fraktionen (0 bis 1 mm, 0 bis 3 mm und 3 bis 8 mm) so zusammengesetzt, dass die Sieblinie nach SIA 162 erhalten wurde. Nähere Einzelheiten zur Betontechnologie sind in der Dissertation von *Boulahdour* zu finden [3].

Der Beton hatte nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von etwa 48 N/mm², einen Elastizitätsmodul von etwa 32 kN/mm² und eine Biegezugfestigkeit von etwa 8,5 N/mm².

Die Platten waren unten und oben mit einer Matte aus handelsüblichen Bewehrungsstählen (Zugfestigkeit 740 N/mm²) mit einem Durchmesser von 4 mm und einer Maschenweite von 30 mm bewehrt. Zur Lagerung wurde am Rand der Platten ein bewehrter Ring mit einer Höhe von 200 mm und einer Breite von ebenfalls 200 mm anbetoniert.

Die Platten wurden auf drei jeweils um 120° versetzte Kraftmessgeber gelagert.

Insgesamt wurde ausser der Kraft in den Auflagern die Dehnung und die Beschleunigung an der Unterseite in der Mitte der Platte, die Beschleunigung und die Dehnung an der Unterseite in einem Abstand von 500 mm von der Mitte sowie die Dehnung an der Oberseite in einem Abstand von 500 mm und 750 mm gemessen. Ausserdem wurde die Beschleunigung in der herabfallenden Masse registriert. Die fallende Masse von 135 kg bestand aus Stahl, und ihre Geometrie wurde so gewählt, dass Eigenschwingungen vermieden wurden. Schematisch sind der Versuchsaufbau und die einzelnen Messstellen im Bild 1 dargestellt.

Zuerst wurden jeweils eine Reihe zerstörungsfreier Versuche an jeder Platte durchgeführt. Eine Masse von etwa 1,5 kg wurde zentrisch auf die Platte fallengelassen. Dabei wurde in erster Linie das Schwingungsverhalten und die Dämpfung der Platte untersucht. Gleichzeitig konnte überprüft werden, ob alle Messgeber einwandfrei funktionierten.

Alle Messdaten wurden zunächst in einem Transientenrecorder gespeichert. Von dort wurden sie nach dem Versuch zur weiteren Auswertung auf einen Tischrechner übertragen.

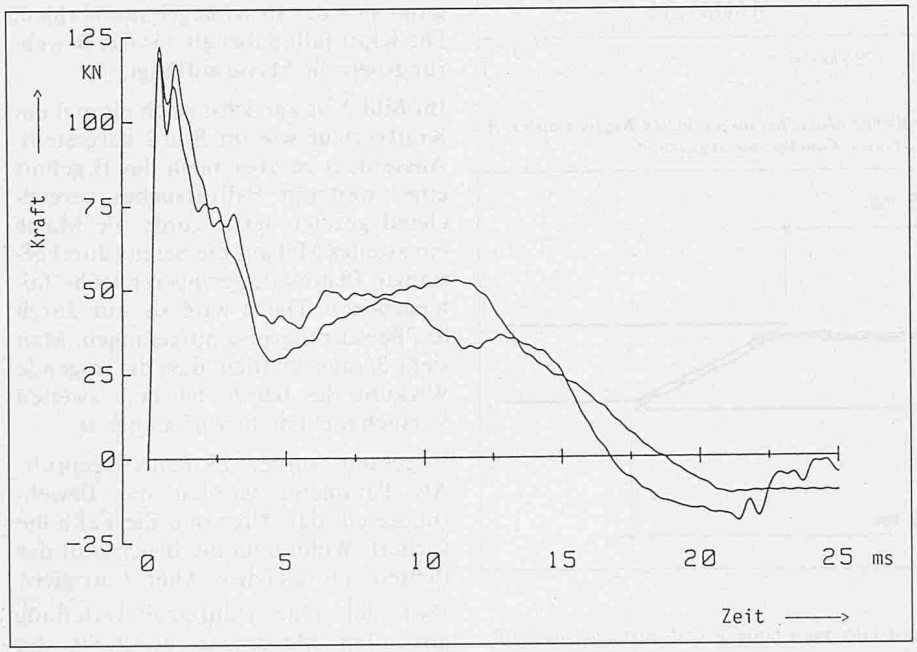
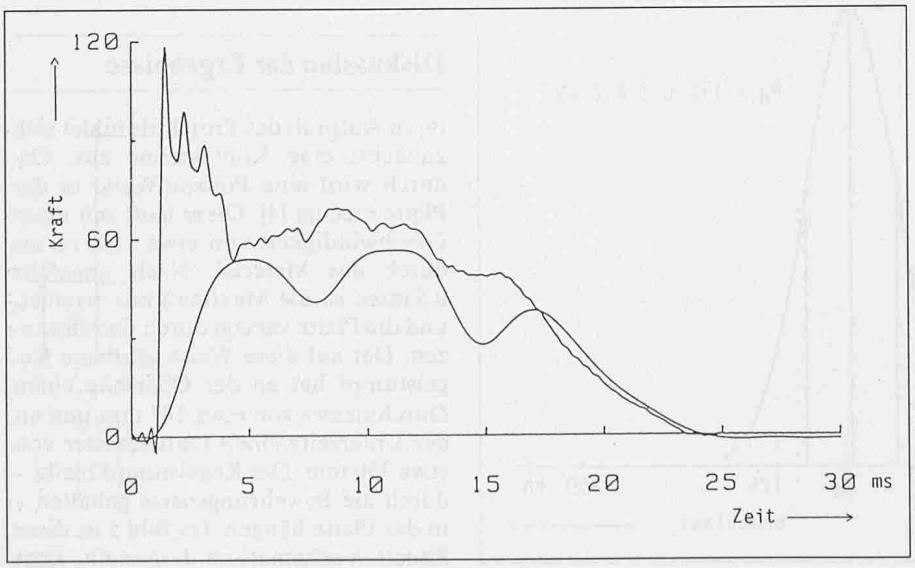


Bild 2. Kraftverlauf beim zerstörenden Stossversuch. Vergleichend sind die Ergebnisse von zwei gleichartigen Platten dargestellt

Bild 3. Ein weiterer Kraftverlauf eines zerstörenden Stossversuches wie im Bild 2 dargestellt. Zusätzlich ist hier vergleichend der Kraftverlauf eines zweiten Fallversuches auf die bereits zerstörte Platte gezeigt. In diesem Fall wird die fallende Masse allein durch das Bewehrungsnetz aufgefangen



Versuchsergebnisse

Zerstörungsfreie Messungen

Wie bereits erwähnt, wurden zunächst zerstörungsfreie Schwingungsversuche durchgeführt. Dabei wurde die Reaktion der Platte beim Aufprall einer Masse M1 von 1,52 kg aus einer Höhe von 30 mm registriert. Das Messsignal wurde nach Fourier analysiert und die

Tabelle 1. Vergleichende Zusammenstellung der Frequenzen der unterschiedlichen Schwingungsmoden der Platte in Hz

Modus	Frequenz [Hz]	
	Numerische Simulation	Messung
1	136	140
2	450	450
3	740	740
4	1020	1030
5	1310	1300
6		2000
7		2950

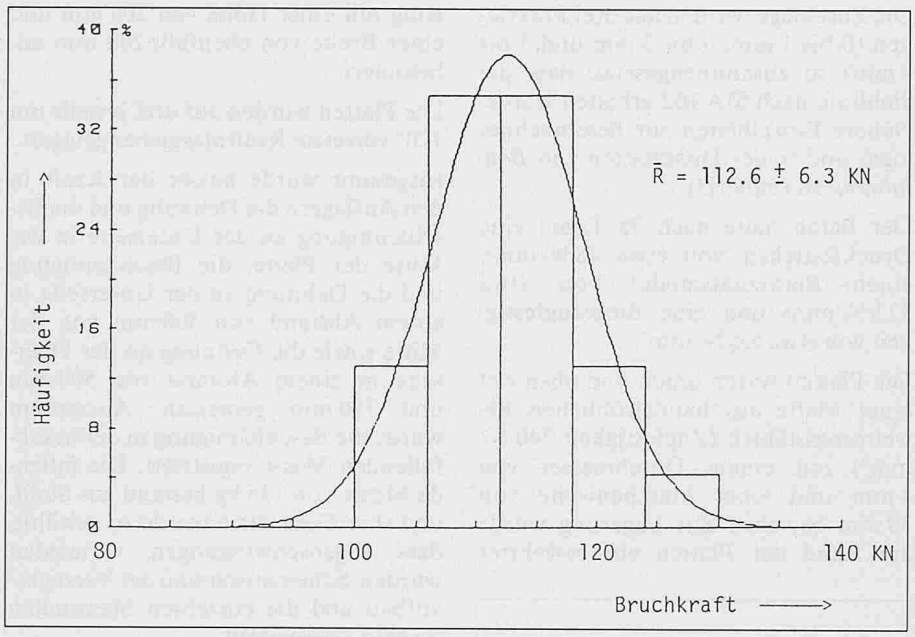


Bild 4. Häufigkeitsverteilung der Bruchkraft, gemessen an 23 Platten

Bild 5. Schematische Darstellung des durch die aufprallende Masse herausgestanzten Kegelstumpfes. An der Oberfläche ist die durch den Aufprall des Projektils zerstörte Kontaktzone angedeutet

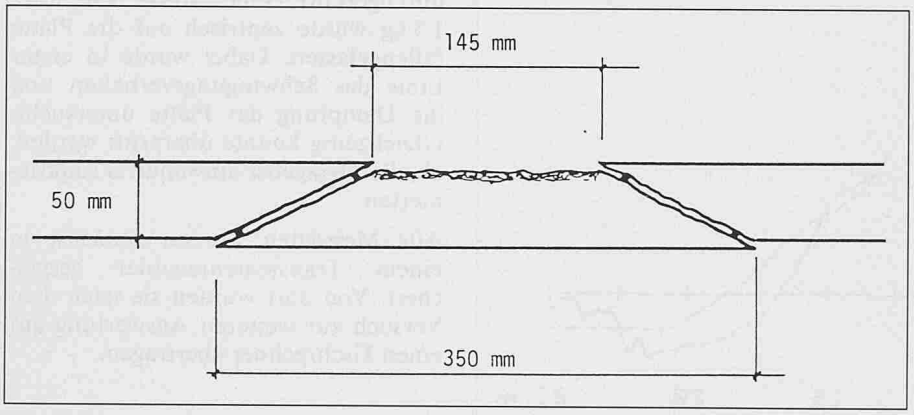
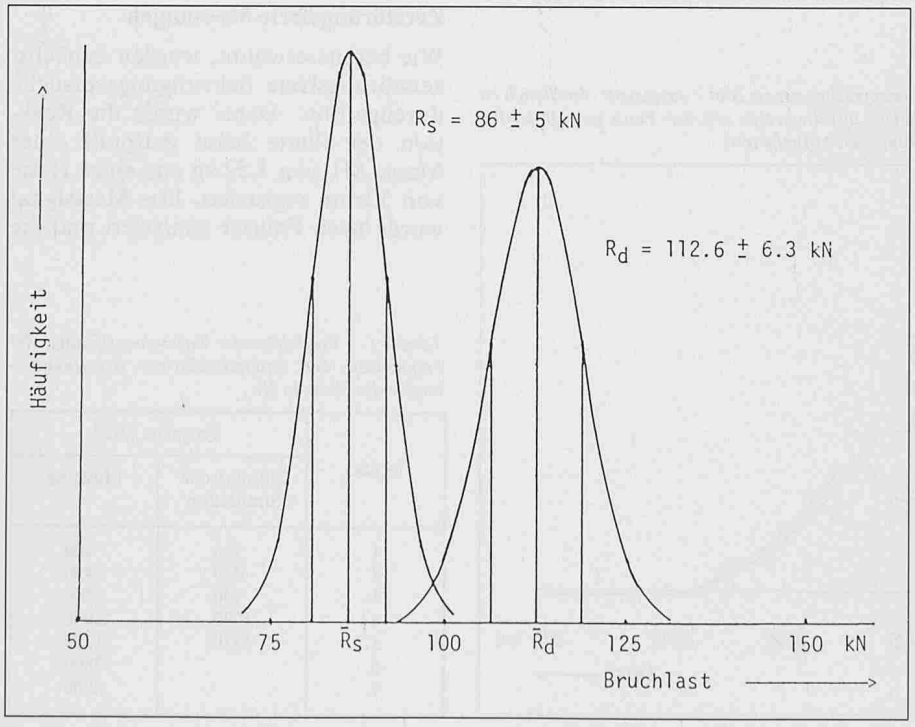


Bild 6. Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Bruchlast unter quasistatischer und unter dynamischer Belastung



angeregten Frequenzen bestimmt. Unabhängig davon wurde mit Hilfe der Methode der finiten Elemente das Schwingungsverhalten einer Platte simuliert. In der Tabelle 1 sind die gemessenen und die rechnerisch erhaltenen Frequenzen der unterschiedlichen Schwingungsmoden vergleichend zusammengestellt. Dabei lässt sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung feststellen.

Bruchverhalten

Im Bild 2 ist der Kraftverlauf eines zerstörenden Stossversuches in Funktion der Zeit aufgetragen. Vergleichend sind die an zwei gleichartigen Platten gemessenen Funktionen gezeigt. Die Last steigt näherungsweise linear bis zum Maximum. Zu diesem Zeitpunkt beginnt sich der Bruchkegel auszubilden. Die Kraft fällt dabei ab, bis das Bewehrungsnetz die Masse auffängt.

Im Bild 3 ist zunächst noch einmal ein Kraftverlauf wie im Bild 2 dargestellt. Ausserdem ist aber noch das Ergebnis eines weiteren Fallversuches vergleichend gezeigt. Jetzt wurde die Masse ein zweites Mal auf die bereits durchgestanzte Platte aus geringerer Höhe fallengelassen. Dabei wird sie nur durch das Bewehrungsnetz aufgefangen. Man sieht daraus deutlich, dass die tragende Wirkung des Betons bei dem zweiten Versuch nicht mehr vorhanden ist.

Insgesamt wurden 23 Platten geprüft. Als Parameter wurden der Bewehrungsgrad, das Alter und die Fallhöhe variiert. Wenn man die Bruchkraft der Platten auf gleiches Alter korrigiert, lässt sich eine Häufigkeitsverteilung aus allen Messungen ermitteln. Im Bild 4 ist das entsprechende Histogramm dargestellt. Die Maximalkraft beim Versagen der Platte betrug demnach im Mittel 112,6 kN und die Standardabweichung 6,3 kN.

Diskussion der Ergebnisse

Beim Aufprall des Projektils bildet sich zunächst eine Kontaktzone aus. Dadurch wird eine Poisson-Welle in der Platte erzeugt [4]. Diese läuft mit einer Geschwindigkeit von etwa 1500 m/sec durch das Material. Nach ungefähr 0,5 msec ist die Maximalkraft erreicht, und die Platte versagt durch Durchstanzen. Der auf diese Weise gebildete Kegelstumpf hat an der Oberseite einen Durchmesser von etwa 145 mm und an der Unterseite einen Durchmesser von etwa 350 mm. Der Kegelstumpf bleibt – durch die Bewehrungsnetze gehalten – in der Platte hängen. Im Bild 5 ist diese Situation schematisch dargestellt. Zum

Zeitpunkt des Durchstanzens sind die unterschiedlichen Belastungswellen noch nicht am Rand der Platte und damit an den Auflagern angekommen. Die gewählte Platte reagiert also wie eine sehr grosse Platte.

Zum Vergleich wurden noch einige gleichartige Platten unter quasistatischen Bedingungen bis zum Bruch belastet. Für die Maximalkraft, die zum Durchstanzen führte, wurde folgender Wert gefunden: Rs = 86 ± 5 kN. Im Bild 6 sind die Häufigkeitsverteilungen für die quasistatische und für die dynamische Bruchlast gezeigt.

In jüngster Zeit werden mehrere Methoden zum Studium des Verhaltens von Beton unter stossartiger Belastung in der Literatur beschrieben [5, 6]. Der Wissensstand im Jahre 1982 wurde in den Berichtsbänden eines internationalen Symposiums umfassend dokumentiert [7].

Eine hervorragende Studie zum Verhalten von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken unter stossartiger Belastung wurde von *Ammann* [8] veröffentlicht. In allen Fällen wird ein Ansteigen der mittleren Festigkeit mit wachsender Belastungsgeschwindigkeit beobachtet. Diese Beziehung wird zwanglos mit Hilfe des stochastischen Konzeptes [1, 2] erklärt.

Dasselbe stochastische Konzept sagt ausserdem vorher, dass der Variationskoeffizient von der Belastungsgeschwindigkeit unabhängig ist. Das bedeutet, dass die Standardabweichung der streuenden Festigkeit mit zunehmender Geschwindigkeit und damit bei zunehmender mittlerer Festigkeit grösser wird. Dies wurde im Experiment bestätigt.

Zorn und *Schuëller* [9] haben sehr detailliert den Aufprall und den dabei ablaufenden Zerstörungsprozess eines Flugzeugs auf einen Sicherheitseinschluss analysiert. Dabei zeigte sich, dass sich beim Aufprall das Triebwerk vom Rumpf der Maschine trennt. Das Triebwerk führt zu einem harten Impakt, während die Versagenswahrscheinlichkeit des Sicherheitseinschlusses unter der Belastungsgeschichte des auftreffenden Rumpfes vernachlässigbar ist. In [9] wurde die Belastungsgeschichte als nichtstationärer Zufallsprozess modelliert. Die Belastungsgeschichte der hier beschriebenen Versuche ist mit dem harten Aufprall eines Triebwerkes durchaus vergleichbar. Die in diesem Beitrag angegebene Verteilungsfunktion kann also für eine realistische Zuverlässigkeitsanalyse verwendet werden.

Beton ist ein zusammengesezter Werkstoff. Allerdings wird sein heterogenes Gefüge in den meisten Fällen als quasihomogen betrachtet. *Astill, Nosseir* und *Shinozuka* haben die Fortpflanzung eines Spannungsstosses durch einen Werkstoff mit räumlich statistisch veränderlichen Eigenschaften untersucht [10]. Mit Hilfe einer Monte Carlo-Simulation haben sie insbesondere das Verhalten eines Betonzylinders unter einer Stossbelastung untersucht. Diese Betrachtungsweise ist besonders interessant, weil es damit gelingen sollte, die experimentell ermittelte Verteilungsfunktion mit der Betonzusammensetzung und sogar mit der Probengeometrie in Verbindung zu bringen.

Weitergehende, sich gegenseitig ergänzende, numerische und experimentelle Studien werden in Zukunft mit Sicherheit notwendig sein, um die Beschreibung des Materialverhaltens für eine realistische Zuverlässigkeitsanalyse im konstruktiven Ingenieurbau auf eine probabilistische Basis zu stellen.

Folgerungen

1. Beim Aufprall eines Projektils auf eine Stahlbetonplatte bildet sich zunächst eine Kontaktzone aus. Der Beton in der Kontaktzone wird völlig zerstört. Danach versagt die Platte unter Ausbildung eines Bruchkegels. Die restliche Energie des Projektils wird von dem Bewehrungsnetz aufgefangen.
2. Die Maximalkraft, die aufgenommen werden kann, hängt in erster Linie von der Betonfestigkeit ab.
3. Die mittlere Festigkeit einer Stahlbetonplatte ist unter Stossbelastung höher als unter quasistatischer Belastung. Die Festigkeitssteigerung wird durch ein stochastisches Konzept korrekt vorhergesagt.
4. In Übereinstimmung mit theoretischen Vorhersagen bleibt der Variationskoeffizient unabhängig von der Belastungsgeschwindigkeit.

Literatur

[1] *Mihashi, H.*, und *Wittmann, F.H.*, Stochastic Approach to Study the Influence of Rate of Loading on Strength of Concrete. Heron (The Netherlands) 25 (1980) No. 3.

[2] *Mihashi, H.* und *Wittmann, F.H.* Probabilistic Concept to Describe the Influence of Rate of Loading on Strength of Concrete. Transactions 6th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT) Vol. J(b), Paper J6/4 (1981).

[3] *Boulahdour, T.*, Dalles en béton armé sous charge d'impact. Thèse No 584, Departement für Werkstoffwissenschaften, ETH Lausanne (1985).

[4] *Zech, B.*, und *Wittmann, F.H.*, Dynamisches Verhalten einer Platte unter stossartiger Belastung. Cement and Concrete Research, 9 (1979) 115–126.

[5] *Bentur, A.*, *Mindess, S.*, und *Nanthia, N.*, The Behaviour of Concrete Under Impact Loading: Experimental Procedures and Method of Analysis. Matériaux et Constructions 19 (1986) 371–378.

[6] *John, R.*, und *Shah, S.P.*, Fracture of Concrete Subjected to Impact Loading. Cement Concrete Aggregates, CCAGDP 8 (1986) No 1.

[7] Concrete Structures Under Impact and Impulsive Loading. Berichtsband zu einem RILEM-CEB-IABSE-IASS Symposium, Bundesanstalt für Materialprüfung Berlin, 2.–4. Juni 1982.

[8] *Ammann, W.*, Stahlbeton- und Spannbetontragwerke unter stossartiger Belastung. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht 142, Birkhäuser-Verlag, Juni 1983.

[9] *Zorn N.F.*, und *Schuëller, G.I.*, On the Failure Probability of the Containment Under Accidental Aircraft Impact. Nucl. Eng. Des. 91 (1986) 277–286.

[10] *Astill, C.J.*, *Nosseir, S.B.*, und *Shinozuka, M.* Impact Loading on Structures with Random Properties. J. Struct. Mech. 1 (1972) 63–77.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *Folker H. Wittmann*, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne (EPFL), 32, chemin de Bellerive, CH-1007 Lausanne.