

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 106 (1988)  
**Heft:** 22

**Artikel:** Beton unter Stossbelastung  
**Autor:** Reinhardt, Hans W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-85740>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.03.2025

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

men kann. Die Analysenzeit beträgt 18 Minuten je Probe. Die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Analysenergebnisse sind bei solchem Autosampling sehr gross. Ein weiterer entscheidender Faktor zur Wahl dieser Methode ist die Entlastung von geschultem Personal mit Routineanalysen sowie deren Kosteneinsparung.

**Konsequenzen für das Bauwerk**

Ein für jedes Bauwerk verbindlicher Grenzwert für die tolerierbare Chloridmenge im Beton kann nicht angegeben werden. Der Grenzwert ist abhängig von der Bindekapazität des Zementes (hauptsächlich des Tricalciumaluminates C<sub>3</sub>A) und somit also von dessen chemischer Zusammensetzung. Die in der meisten Literatur angegebenen Grenzwerte von 0,4-Massen-% für schlaff armierten Beton, resp. 0,2-Massen-% für Spannbeton, bezogen auf das Zementgewicht, können deshalb nicht als absolut betrachtet werden. Höheres Bindevermögen der Zementbestandteile können den Wert nach oben verschieben, die durch Carbonatisierung freigesetzten, anfänglich gebundenen Chloridionen, bewirken eine Korrektur nach un-

ten. Zudem ist den klimatischen Bedingungen Rechnung zu tragen. So können bei unzureichender Feuchtigkeitzufuhr durchaus höhere Chloridkonzentrationen toleriert werden.

Bei Stahlbetonbauteilen mit erhöhtem Chloridgehalt besteht eine grosse Korrosionswahrscheinlichkeit. Wegen der hygroskopischen (wasserbindenden) Eigenschaft der Chloride sind korrodierte Bereiche besonders sorgsam instandzustellen. Die Vermeidung von Armierungskorrosion durch Chloride kann nur durch Abtrag der betroffenen Betonschichten oder durch Aufbringen einer wasserdichten Schutzschicht erfolgen. Bleibt der Cl<sup>-</sup>-Gehalt im Beton, wird sich dabei aufgrund der Diffusionsmechanismen die Chloridkonzentration mit der Zeit einheitlich über den gesamten Querschnitt verteilen. Fehlende Langzeiterfahrung lassen jedoch das Entfernen des Betons mit erhöhtem Chloridgehalt als sichere Massnahme erscheinen.

**Integrierter Bestandteil einer Schadenanalyse**

Wie bereits eingangs erwähnt, bilden die Schäden, infolge starker Chlorid-

versalzung, einen wichtigen Teilaspekt in der Gesamtbeurteilung von Bauwerken. Weitere Kriterien sind:

- Betonüberdeckung der Armierungseisen
- Carbonatisierungstiefen
- Physikalische Prüfungen der Betonqualität (Druckfestigkeit, Stempelabreissfestigkeit, Wasseraufnahme usw.).
- Rissaufnahmen, Gefügebeurteilungen
- Weitere Schadstoffe wie SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> usw.
- Potentialfeldmessung (Armierungskorrosion)

Oftmals erfolgt die Schadendiagnose im Zusammenhang mit einer Gesamtuntersuchung. Dabei werden konstruktive Begebenheiten, eine statische Nachprüfung, Planungs- und Nutzungsänderungen usw. durch einen Ingenieur bearbeitet und die betontechnologische Zustandsanalyse von Experten durchgeführt (Bild 6).

Adresse der Verfasser: U. Hüssy, Diagnostik-Center Beton, Gerhard Leu, Forschung + Entwicklung, Abt. Analytik, SIKA AG, 8048 Zürich.

# Beton unter Stossbelastung

**Der Beitrag befasst sich mit Berechnungsarten für die Dimensionierung, Versuchsergebnissen sowie mit einfachen, für die Praxis anwendbaren Beziehungen, die den Einfluss der Dehngeschwindigkeit der mechanischen Grössen darlegen.**

**Stossbelastungen**

Belastungen von kurzer Dauer, aber meist grosser Intensität, treten beabsichtigt oder unbeabsichtigt auf. Das Rammen von Gründungspfählen ist ein Beispiel für beabsichtigte Stossbelastungen; Explosionen, das Auftreten von Gegenständen auf eine Konstruktion (Auto, Flugzeug, Felsbrocken) und Sabotageakte erzeugen unbeabsichtigte

VON HANS W. REINHARDT,  
DARMSTADT

Stossbelastungen. Der zeitliche Spannungs- oder Dehnungsanstieg im Material der Konstruktion ist von der Art

der Belastung abhängig, aber auch von der Steifigkeit und Härte der Konstruktion. Beim Auftreten von Gegenständen bestimmen Masse, Geschwindigkeit und Steifigkeit des stossenden Körpers und der angestossenen Konstruktion deren Belastung. Wenn die Kontaktzone beim Aufprall leicht verformt, wird ein schneller Stoss abgebremst und die Dehngeschwindigkeit wird geringer. Tabelle 1 zeigt die Grössenordnung der Dehngeschwindigkeit für einige typische Stossbelastungen.

Zum Vergleich: Die statische Druckprüfung von Beton (genauer: monoton zunehmende Dehnung bis zur Höchstlast) wird mit einer Dehngeschwindigkeit von etwa 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup> ausgeführt. Die für Beton interessanten Belastungen hören etwa bei 10<sup>2</sup> s<sup>-1</sup> auf, da sehr

schnelle Stösse aufgrund der (relativ geringen) Härte und Steifigkeit des Betons gedämpft werden.

**Berechnungsarten**

Je nach der Bedeutung der Stossbelastung auf die Dimensionierung einer Konstruktion werden verschiedene Berechnungsarten angewandt [1]. Am einfachsten ist die Festlegung eines Stossfaktors, der theoretisch bestimmt oder experimentell an Modellen oder wirklichen Konstruktionen gemessen wird und mit dem man die statische Bela-

Tabelle 1. Dehngeschwindigkeit typischer Stossbelastungen

Ursache der Belastung	Dehngeschwindigkeit, s <sup>-1</sup>
Verkehr	10 <sup>-6</sup> ... 10 <sup>-4</sup>
Gasexplosion	5 · 10 <sup>-5</sup> ... 5 · 10 <sup>-4</sup>
Erdbeben	5 · 10 <sup>-3</sup> ... 5 · 10 <sup>-1</sup>
Rammen von Pfählen	10 <sup>-2</sup> ... 10 <sup>0</sup>
Flugzeugaufprall	5 · 10 <sup>-2</sup> ... 2 · 10 <sup>0</sup>
Harter Stoss	10 <sup>0</sup> ... 5 · 10 <sup>-1</sup>
Höchstgeschwindigkeitsstoss	10 <sup>2</sup> ... 10 <sup>6</sup>



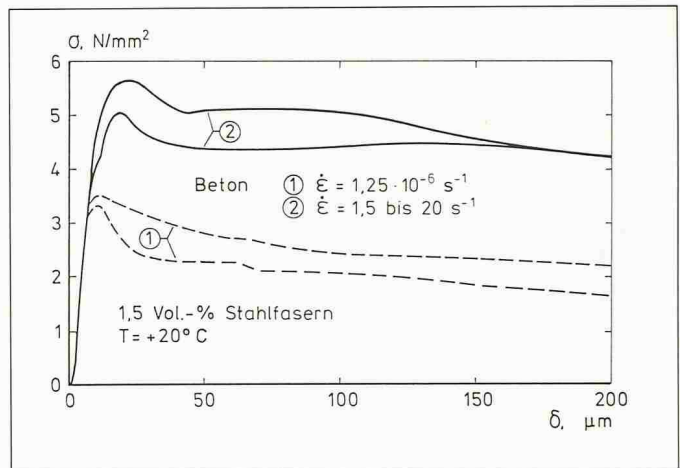
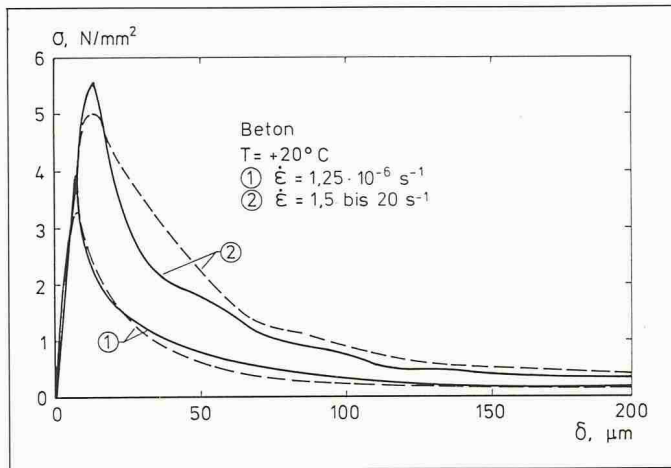


Bild 1. Vollständige Spannungs-Verformungs-Linie von Beton bei Zugbelastung [2]

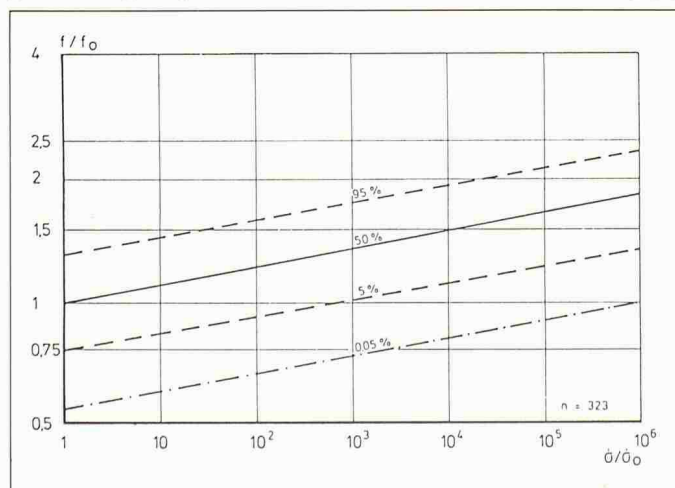
Bild 2. Spannungs-Verformungs-Linie von Stahlfaserbeton bei Zugbelastung [2]

stung multipliziert. Die Berechnung wird dann quasistatisch ausgeführt. Die nächste Stufe ist die Simulation einer Konstruktion durch Masse-Feder-Dämpfer-Modelle, die man analytisch oder numerisch behandelt. Im Gegensatz zur ersten Methode werden hier Trägheitskräfte ausdrücklich berücksichtigt. Bei komplizierten Geometrien und stark nichtlinearem Materialverhalten wird heute vielfach die Finite-Element-Methode eingesetzt. Damit können Rissbildung des Betons, Verbund zwischen Stahl und Beton und örtliches Versagen des Betons auf Druck berücksichtigt werden. Alle Materialkennwerte wie Elastizitätsmodul, Druck- und Zugfestigkeit, Entfestigung, Rissausbreitungsgeschwindigkeit, mehrachsiges Verhalten und Verbund müssen dann für eine wirklichkeitsnahe Berechnung als Funktion der Spannungs- oder Dehngeschwindigkeit bekannt sein.

**Versuchs- und Messtechnik**

Die genannten Materialkennwerte werden in Versuchen bestimmt, die objektiv und reproduzierbar sein müssen.

Bild 3. Fraktilwerte der Zugfestigkeit als Funktion der Spannungsgeschwindigkeit (Index 0 bezieht sich auf die statische Prüfung) [3]



Objektivität bedeutet, dass der Versuch physikalisch eindeutig ist, dass die Randbedingungen definiert sind und dass die Dehnungs- oder Spannungsgeschwindigkeit definiert und kontrolliert sind. Viele Versuche an Beton gehorchen diesem Prinzip nicht, z.B. der Biegeversuch, in dem jede Faser des Probekörpers eine andere Dehngeschwindigkeit hat, oder der Spaltversuch, in dem die Spannungsverteilung nach der linearen Elastizitätstheorie berechnet wird. Ergebnisse solcher Versuche sind nicht allgemein anwendbar, da sie u.a. von der Probekörpergröße abhängig sind. Daher ist der dehnungskontrollierte, einachsige Versuch ohne Querdehnungsbehinderung (soweit realisierbar) vorzuziehen, in dem die gesamte Spannungs-Dehnungs-Linie unter Druck- oder Zugbelastung bestimmt wird. Allerdings muss man auch hier deutlich sehen, dass Objektivität nur bis zum Erreichen der Höchstspannung erzielt wird, da örtliche Brucherscheinungen wie Risse und Schubzonen (shear band) die oben geforderten Voraussetzungen verletzen.

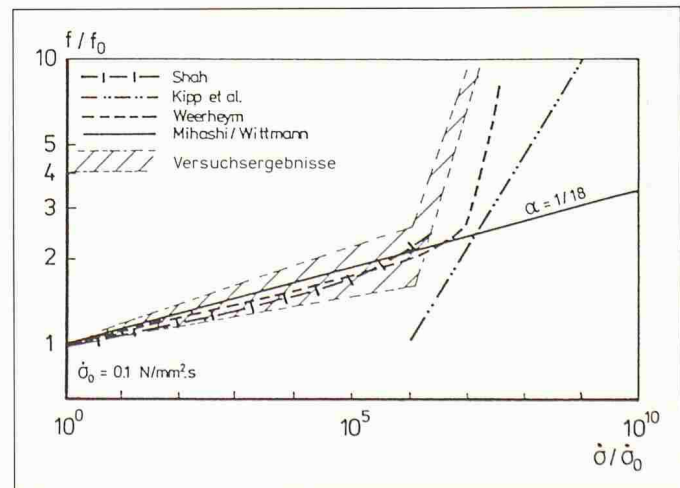
Versuche zur Ermittlung des Verbundes zwischen Stahl und Beton sind alle

mehr oder weniger nicht-objektiv, da weder Spannungs- noch Dehnungsverteilung in der Verbundzone gleichmässig sind. Der Ausziehversuch mit kurzer Einbettungslänge ist ein annehmbarer Kompromiss.

Versuche an Beton mit hoher Dehngeschwindigkeit können auf verschiedene Art ausgeführt werden: mit servohydraulischen Maschinen ist theoretisch eine Dehngeschwindigkeit von 100 s<sup>-1</sup> erreichbar; praktisch ausgeführt wurde etwa 1 s<sup>-1</sup>. Fallgewichte und Pendel reichen bis 20 s<sup>-1</sup>, mit Hilfe von durch Druckluft oder Sprengstoff beschleunigten Massen können 120 s<sup>-1</sup> erreicht werden. Die letztgenannten Verfahren lassen sich mit einem Split-Hopkinson-Bar (zylindrische Stäbe mit dazwischengelegtem Probekörper) kombinieren, wodurch Kraft- und Dehnungsmessung vereinfacht werden. Für höchste Dehngeschwindigkeiten eignen sich Kontaktladungen und magnetische Felder.

Die Messtechnik ist herausgefordert, da alle Größen in kurzer Zeit gemessen und gespeichert werden müssen. Bei Druckversuchen ist dies innerhalb von 0,1 bis 10 ms, bei Zugversuchen noch

Bild 5. Vergleich theoretischer Vorhersagen mit Versuchsergebnissen am Beispiel der Zugfestigkeit [5]





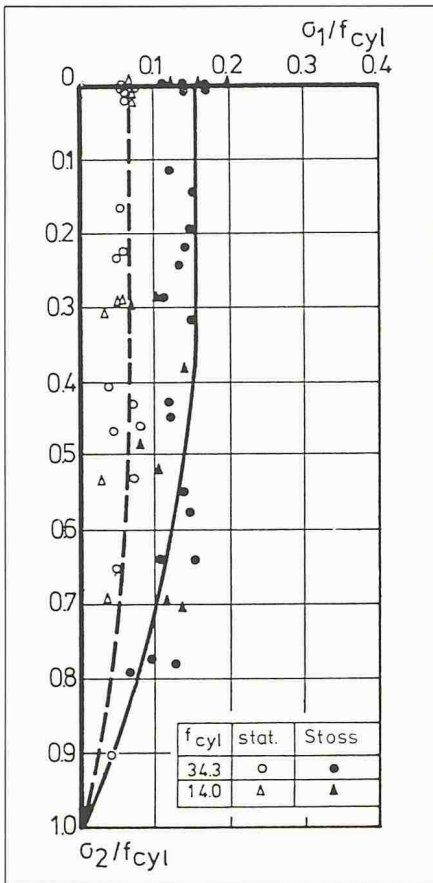
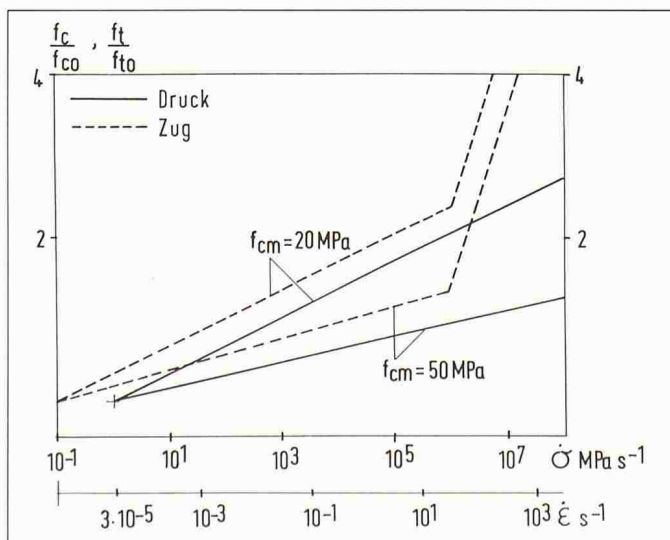


Bild 4. Zweiaxiale Festigkeit von Beton im statischen Versuch und im Stossversuch [4]

darunter. Es hat sich gezeigt, dass eine minimale Messfrequenz von 10 kHz nötig ist; Transientenrecorder mit höherer Messfrequenz sind hierfür ideale Hilfsmittel. Die Befestigung von Messwertaufnehmern (für Verschiebung, Kraft, Beschleunigung) verdient besondere Aufmerksamkeit, um niedrige Eigenfrequenzen zu vermeiden. Die niedrigste Eigenfrequenz der gesamten Messkette sollte immer höher sein als die höchste Frequenz der zu messenden Signale.

Bild 6. Beziehung zwischen Festigkeit und Belastungsgeschwindigkeit für die praktische Anwendung [6]



**Versuchsergebnisse**

In den letzten 20 Jahren wurden in verschiedenen Laboratorien zahlreiche Versuche mit hoher Dehnungsgeschwindigkeit durchgeführt. Alle Ergebnisse zeigen, dass Druck- und Zugfestigkeit mit der Dehnungsgeschwindigkeit zunehmen. Auch die Bruchdehnung (Dehnung bei höchster Spannung) nimmt zu, und die Bruchenergie wird ebenfalls grösser mit wachsender Dehnungsgeschwindigkeit.

Zur Illustration sollen die folgenden Diagramme dienen. Bild 1 zeigt die vollständige Spannungs-Verformungsline von unbewehrtem Beton unter Zugbelastung bei niedriger und bei hoher Dehnungsgeschwindigkeit. Für beide Geschwindigkeiten sind je zwei Einzelergebnisse gezeichnet. Die Zunahme der Festigkeit, der Bruchdehnung und der Bruchenergie ist deutlich zu sehen. Bild 2 ist das Ergebnis von Versuchen an Stahlfaserbeton. Auch hier nehmen Festigkeit, Anrissdehnung und Bruchenergie zu. Die Kurven erstrecken sich hier allerdings noch bis 20 mm Verformung, d.h. bis alle Fasern ausgezogen sind. Wertet man eine grosse Anzahl von Ergebnissen statistisch aus im Hinblick auf die Zugfestigkeit, erhält man Bild 3, worin Fraktilwerte von 0,05, 5, 50 und 95% aller Werte eingezeichnet sind. Man erkennt, dass alle Werte mit wachsender Dehnungsgeschwindigkeit zunehmen und dass der Mittelwert bei einer millionenfach schnelleren Belastung zwischen 1,5- und 2mal der statischen Festigkeit entspricht.

In zweiaxialen Versuchen, bei denen eine Querdruckspannung aufgebracht wurde und mit hoher Geschwindigkeit in Längsrichtung gezogen wurde, lieferten die Ergebnisse von Bild 4. Die offenen Punkte beziehen sich auf die statischen Versuche, während die vollen

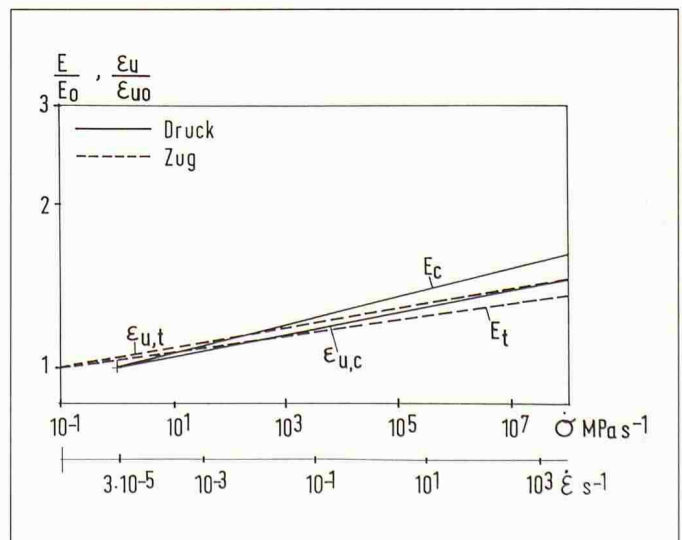
Punkte zu einer Spannungsgeschwindigkeit von etwa 10 000 MPa/s gehören. Beide Achsen des Diagramms sind bezogen auf die einachsige Druckfestigkeit des Betons. Die Linien entsprechen den Grenzlinien nach der modifizierten Bruchhypothese von Mohr-Coulomb und wurden durch curve-fitting bestimmt. Trotz der erheblichen Streuung der Einzelwerte lässt sich ablesen, dass die Interpolationslinie der Stossversuche für den ganzen Bereich affin zu den statischen Versuchen verläuft.

In einem Rechenprogramm kann man also dieselbe Grenzlinie (oder Bruchhypothese) verwenden mit der Massgabe, dass der Einfluss der Dehnungsgeschwindigkeit im gleichen Verhältnis wie im einachsigen Versuch berücksichtigt werden muss.

**Auswertung der Versuchsergebnisse für die Praxis**

Neben experimentellen Ergebnissen wurden in den letzten Jahren einige Theorien entwickelt oder so weiterentwickelt, dass sie den Einfluss der Dehnungsgeschwindigkeit auf mechanische Grössen vorhersagen können. In einer Übersicht wurden einmal theoretische Ansätze der Bruchmechanik, der Reaktionskinetik unter Berücksichtigung der Heterogenität des Betons verglichen. Das Ergebnis ist in Bild 5 dargestellt und den Versuchsergebnissen gegenübergestellt. Man sieht eine zufriedenstellende Übereinstimmung, die es erlaubt, einfachere Beziehungen für die Praxis abzuleiten. Die Beziehungen beruhen im wesentlichen auf theoretischen Ableitungen, während die Koeffizienten aus Versuchsergebnissen bestimmt sind.

Bild 7. Bruchdehnung und Elastizitätsmodul als Funktion der Belastungsgeschwindigkeit [6]





Die Festigkeit folgt einer Potenzfunktion mit der Potenz  $\alpha$

$$f_c/f_{c0} = (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^\alpha \quad (1)$$

mit  $\dot{\epsilon}_0 = 30 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$  bei Druck und  $3 \cdot 10^{-6} \text{s}^{-1}$  bei Zug

$\alpha = (5 + 3 f_{cm}/4)^{-1}$  für Druck und  $\alpha = (10 + f_{cm}/2)^{-1}$  für Zug.

$f_{cm}$  ist die statische Würfel Festigkeit des Betons. Für  $\dot{\epsilon} > 30 \text{s}^{-1}$  tritt die Potenz  $\alpha = 1/3$  auf, die mit Hilfe der linearen Bruchmechanik abgeleitet wurde. Diese Beziehungen sind in Bild 6 dargestellt. Je geringer die Betonfestigkeit, um so empfindlicher reagiert der Beton also auf eine hohe Dehngeschwindigkeit.

Die Bruchdehnung und der Elastizitätsmodul werden weniger beeinflusst als die Festigkeit, wie Bild 7 zeigt. Die zugehörigen Funktionen lauten:

$$E/E_0 = (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)^\beta$$

mit  $\beta = 0,026$  für Druck und  $0,016$  für Zug. Für die Bruchdehnung gilt die Potenz  $0,02$  in beiden Fällen.

Die Bruchenergie im Zugversuch kann mit Gl. (1) und der Potenz  $\alpha$  für Zugbelastung abgeschätzt werden. Die Poissonzahl kann gleich wie im statischen Fall verwendet werden.

#### Literatur

- [1] *Ammann, W.*: Stahlbeton- und Spannbetontragwerke unter stossartiger Belastung. Bericht Nr. 142, Inst. für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, Birkhäuser-Verlag Basel, Boston, Stuttgart 1983, 285 pp.
- [2] *Körmeling, H.A., Reinhardt, H.W.*: Strain rate effects on steel fibre concrete in uniaxial tension. Inter. J. Cement Composites and Lightweight Concrete 9 (1987), Nr. 4
- [3] *Reinhardt, H.W.*: Concrete under impact loading—Tensile strength and bond. Heron 27 (1982), No. 3, 48 pp.
- [4] *Zielinski, A.J.*: Concrete under biaxial compressive—impact tensile loading. Preprints Intern. Conf. Fracture Mechanics of Concrete, Lausanne, Oct. 1985, Vol. I, pp. 399–409
- [5] *Reinhardt, H.W.*: Strain rate effects on the tensile strength of concrete as predicted by thermodynamics and fracture mechanics models. MRS Proc. Vol. 64, eds. S. Mindess, S.P. Shah, Boston 1985, pp. 1–13
- [6] Report CEB General Task Group «Concrete structures under impact and impulsive loading». Erscheint voraussichtlich 1988

Nach einem Referat des Verfassers anlässlich des ETH-Kolloquiums für Materialwissenschaften vom 2. Dez. 1987 (Prof. Dr. A. Rösli)

#### Zusammenfassung

Stossbelastungen können planmässig oder unbeabsichtigt auftreten. Wenn sie bei der Dimensionierung von Betonkonstruktionen berücksichtigt werden müssen, müssen die Materialkennwerte als Funktion der Dehn- oder Spannungsgeschwindigkeit bekannt sein. Objektive Verfahren sollten verwendet werden, wenn die Kennwerte experimentell bestimmt werden. Es wurde erläutert, dass dies erhebliche Forderungen an Prüf- und Messtechnik stellt.

Versuchsergebnisse bestätigen die theoretisch vorausgesagte Zunahme von Festigkeit, Elastizitätsmodul, Bruchdehnung und Bruchenergie. Für die Anwendung in der Praxis wurden einfache Beziehungen abgeleitet, die den Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf die mechanischen Grössen zeigen.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr.-Ing. H.W. Reinhardt, Institut für Massivbau, TH Darmstadt, Alexanderstrasse 5, D-6100 Darmstadt.

## Bücher

### Winkelplatten

Der um eine Ecke geführte Plattenvollstreifen mit sämtlichen Randbedingungen. Von *Helmut Bruckner*, Verlag Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden.

Als Winkelplatten werden in diesem Buch über Eck auskragende Plattenvollstreifen bezeichnet, die in den Tragsystemen des Hochbaus häufig vorkommen.

Zur Bemessung solcher Winkelplatten stehen dem Ingenieur zwei Möglichkeiten offen: eine relativ aufwendige Berechnung der Schnittgrössen mit Hilfe finiter Elemente oder eine oft ungenügende Abschätzung aufgrund von Ersatzsystemen.

Das vorliegende Tabellenwerk erlaubt mit geringem Aufwand ein zuverlässiges Abschätzen der Beanspruchungen (Biege- und Drillmomente, Querkkräfte) für die unterschiedlichsten Randbedingungen (freier Rand, frei drehbare Auflagerung, Einspannung) und Lasttypen (Volllasten, Einzellasten, Linienlasten). Zur Ermittlung der Tabellenwerte wurden Einflussfelder ausge-

wertet, deren Berechnung mit Hilfe des FE-Programms «FEAPS 2» und «FLASH» erfolgte. Die Berechnung stützt sich auf die lineare E-Theorie; die Querdehnungszahl wurde mit  $\nu = 0$  angenommen.

Die Tabellen sind gut und übersichtlich gegliedert und können dem in der Praxis tätigen Ingenieur, trotz eines heute wesentlich leichteren Zugangs zu FE-Programmen auf Kleinrechnern, gute Dienste leisten.

Dr. René Suter, EPF Lausanne

### Lehrbuch der gesamten Tunnelbaukunst

Von Franz von Rziha; Band 2; Faksimile der Originalausgabe von 1872. 868 Seiten  $10,6 \times 29$  cm mit 297 Holzschnitten, 191 Tabellen und 345 Quellen. Fester, farbiger Schmuckeinband, DM 178.-. Verlag Glückauf GmbH, Postfach 103 945, D-4300 Essen 1. ISBN 3-7739-0485-1.

Dieses zweibändige Lehrbuch gilt heute als Klassiker, das den Tunnelbau als technische

Disziplin begründet hat, denn der Autor hatte erkannt, dass die Kunst, grossen Gebirgsdruck fernzuhalten, d. h. nicht entstehen zu lassen, weit grösser ist, als einmal vorhandenen Gebirgsdruck zu bewältigen. Dies gilt auch heute für die modernen Tunnelbauweisen (NATM). Aufgrund umfangreicher Erfahrungen beim Bau grosser Alpentunnel und von Eisenbahnstrecken sowie im Bergbau und seiner Tätigkeit als Unternehmer, Sachverständiger und Wissenschaftler hat er annähernd alle Grundlagen des neuzeitlichen Tunnelbaus bereits erkannt und beschrieben.

Der erste Band (1986) umfasst die Arbeiten der bergmännischen Gewinnung, die verschiedenen Arten der Bergförderung und Holzsicherungssysteme (vgl. SIA H. 51-52/86, S. 1351). Der soeben erschienene zweite Band befasst sich mit Tunnelbausystemen, Tunnelmauerwerk und stählernem Ausbau, Verbrüchen, sowie Entwurf und Ausführung von Tunnelbauten einschliesslich Baukosten. Zahlreiche detailgetreue Bilder damaliger Bauweisen, Maschinen und Geräte sowie Tabellen mit technischen Daten und Kosten machen dieses Werk zu einem faszinierenden Dokument der Geschichte des Tunnelbaus.

G. Brux