

Aufnahme und Auswirkungen von Druckbeanspruchungen auf Beton

Von Gerd Wischers, Düsseldorf

Übersicht

Wird ein Betonprüfkörper auf Druck beansprucht, so verformt er sich dabei. Aus der aufgetragenen Kraft und der Verformung in Kraftrichtung kann man die Energie errechnen, die dem Prüfkörper zugeführt wird. Ideal-elastische Stoffe speichern die zugeführte Energie elastisch, bis ihre Speicherkapazität erschöpft ist; dann zerbrechen sie schlagartig, sie sind spröde. Dagegen brechen elasto-plastische Stoffe nicht, wenn ihre Speicherkapazität an elastischer Energie erschöpft ist, sondern sie verformen sich dann plastisch und verzehren damit die weiter zugeführte Energie. Dieses Verhalten bezeichnet man als zäh.

Die Bestandteile des Betons – sowohl die Zuschlagkörner als auch die für die Festigkeit maßgebenden Calciumsilicathydrat-Kristalle im Zementstein – sind ihrer Natur nach spröde. Beton ist hingegen nicht spröde, weil sich bei der Druckbeanspruchung im Betonkörper lokal begrenzte Spannungsspitzen ausbilden, die dann zu örtlich begrenzten Mikrorissen führen. Ein großer Teil der zugeführten Energie wird durch diese Mikrorisse und das Zerkleinern einzelner Partikelchen aufgezehrt; durch die Mikrorisse vermindert sich allerdings die Tragfähigkeit.

Durch Stahlfasern im Beton werden diese Mikrorisse überbrückt, Stahlfaserbeton weist dadurch ein besonders zähes Verhalten auf, d. h. er kann sehr große Anteile der zugeführten Energie aufzehren, ohne daß seine Tragfähigkeit stark herabgesetzt wird.

1. Allgemeines

Wird ein Körper durch eine Kraft beansprucht, so verformt er sich. Bei diesem Vorgang wird dem Körper Energie zugeführt; denn mechanische Energie ist gleichbedeutend mit einer Kraft, die längs eines Weges einwirkt. Der Weg entspricht im vorliegenden Fall der in Richtung der Kraft hervorgerufenen Verformung.

Bei Betrachtungen über das Tragverhalten und insbesondere die Tragfähigkeit eines Stoffes sind vor allem die Grenzbedingungen von Bedeutung, die den Bruch hervorrufen. Hierzu sind verschiedene Hypothesen aufgestellt worden [1], die als Grenzbedingungen für das Eintreten eines Bruches unterschiedliche Kriterien benutzen, und zwar

- 1) die Spannungshypothese, bei der ein Grenzwert für die maximal aufnehmbare Normal- oder Schubspannung vorgegeben ist,
- 2) die Dehnungshypothese, bei der ein Grenzwert für die maximal ertragbare Dehnung vorgegeben ist, und
- 3) die Energiehypothese, bei der ein Grenzwert für die maximal aufnehmbare Gesamt- oder Gestaltänderungsenergie vorgegeben ist.

Für eine zusammenfassende Darstellung des Tragverhaltens und des Bruchs eignen sich insbesondere Energiebetrachtungen, weil dabei sowohl Spannungen als auch Verformungen berücksichtigt werden. In dem nachfolgenden Beitrag ist das Tragverhalten von Beton, der einachsrig auf Druck beansprucht wurde, anhand der dabei stattfindenden Energieaufnahme dargestellt. Dabei wurde mehr Wert auf die Erklärung der sich dabei abspielenden Vorgänge als auf quantitative Angaben gelegt. Den Ausführungen über Beton sind einige allgemeine Ausführungen über das Prüfen und das Tragverhalten idealer Stoffe vorangestellt.

2. Arbeitslinien und Energieaufnahme

Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau einer Druck-Prüfmaschine. In einen sehr steifen Prüfrahm ist ein Arbeitszylinder eingebaut, dessen eingeschliffener Arbeitskolben K durch Einpressen von Öl herausgedrückt werden kann. Diesem Herauspressen des Kolbens setzt ein Prüfkörper B Widerstand entgegen; dadurch wird er einachsrig auf Druck beansprucht. Die auf den Prüfkörper wirkende Kraft ist proportional zum Flüssigkeitsdruck im Arbeitszylinder. Durch Regelung der Pumpenleistung läßt sich der Prüfvorgang steuern.

Ob nun das Öl von Hand in den Arbeitszylinder gepumpt wird (wie in Bild 1) oder ob diese Arbeit von einer elektrischen Pumpe aus-

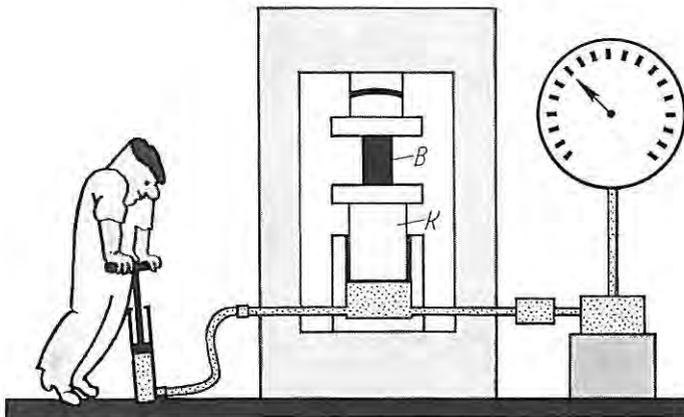


Bild 1 Schematische Darstellung einer Prüfmaschine für einachsige Druckversuche. B = Betonprüfkörper; K = Arbeitskolben

geführt wird, in jedem Fall muß Arbeit – oder anders ausgedrückt Energie – aufgewendet werden, um den Arbeitskolben gegen den Widerstand des Prüfkörpers herauszudrücken (Arbeit = Kraft mal Weg). Das Hineinpumpen von Öl in den Arbeitszylinder bedeutet, daß in das gesamte Prüfsystem im wahrsten Sinn des Wortes Energie hineingepumpt wird, die zunächst weitgehend als mechanische Energie im gesamten System gespeichert wird. So werden beispielsweise die vertikalen Säulen des Prüfrahmens auf Zug beansprucht, das Querhaupt auf Biegung und der Prüfkörper sowie der Arbeitskolben auf Druck. Alle Teile des Prüfsystems verformen sich unter diesen Kräften und nehmen dabei einen entsprechenden Anteil der zugeführten Energie durch elastische Formänderung auf. Bei Entlastung können sie die in ihnen so gespeicherte Arbeit (Energie) durch Rückverformung wieder abgeben. Man kann z. B. die vertikalen Säulen des Prüfrahmens mit sehr steifen Federn vergleichen, die bei Belastung gedehnt werden und die sich bei Entlastung wieder zusammenziehen.

Prüftechnisch ist es zweckmäßig, die Bauteile der Prüfeinrichtung möglichst dick und damit steif auszubilden, weil sich dann der Prüfrahmen im Vergleich zum Prüfkörper nur sehr wenig verformt. Das ist besonders wichtig beim Studium des Bruchvorganges. Wenn sich nämlich der Prüfkörper zu Beginn des Bruchvorganges stärker verformt, dann tritt eine Rückverformung der Prüfeinrichtung ein, und die in der Prüfeinrichtung gespeicherte Energie wird dadurch noch während des Bruchvorgangs dem Prüfkörper zugeführt. Das kann zu einem schlagartigen Bruch führen, während der Prüfkörper sonst durch die von ihm aufgenommene Energie nur langsam zerstört würde. Dieser Sachverhalt ist auch zu beachten, wenn mit der gleichen Prüfmaschine Betonkörper gleicher Abmessung, jedoch unterschiedlicher Festigkeit untersucht werden. Bis zum Bruch hochfester Betone verformt sich die Prüfeinrichtung dabei mehr als bei weniger festen Betonen; folglich erfährt der hochfeste Betonprobekörper auch mehr Energiezufuhr aus der Rückverformung.

Wenn man mit einer sehr steifen Prüfmaschine und einer sehr schnell ansprechenden Regeleinrichtung die Voraussetzungen dafür geschaffen hat, daß der Einfluß der Prüfeinrichtung auf den Bruchvorgang des Prüfkörpers relativ klein ist, dann interessiert bei Baustoffuntersuchungen nur noch, mit welcher Energie der Prüfkörper beaufschlagt wird, wie er diese Energie aufnehmen, speichern oder verarbeiten kann und welche Auswirkungen dies auf sein Tragverhalten hat.

Aufschluß darüber, wieviel Energie dem Prüfkörper zugeführt wird, erhält man durch gleichzeitiges Messen der aufgebrachtten Kraft und der Verformung des Prüfkörpers in Kraftrichtung. Trägt man in einem Diagramm auf der Abszisse die Verformung – bei einer Druckbeanspruchung somit die Stauchung – und auf der Ordinate die auf die Prüffläche bezogene Druckkraft – also die Druckspannung – auf, so erhält man eine Kurve, die man als Arbeitslinie bezeichnet.

Energie bedeutet, eine entsprechende gespeicherte Arbeit zur Verfügung zu haben. Da Arbeit physikalisch gleich dem Produkt aus Kraft und Weg ist, läßt sich die dem Betonkörper zugeführte Ener-

gie aus der Arbeitslinie errechnen. Sie ist gleich dem Integral der Kraft über den Weg, d. h. sie entspricht der Fläche unter der Arbeitslinie. Die Gleichung zur Berechnung der aufgebrauchten Energie je Volumeneinheit lautet

$$H_{\varepsilon} = \int_0^{\varepsilon} \sigma \, d\varepsilon$$

Dabei ist H_{ε} die Verformungsenergie (Arbeit), σ die Druckspannung und ε die Stauchung. Streng genommen ist die so errechnete Verformungsenergie nicht die gesamte Energie, die dem Prüfkörper zugeführt wird. Ein für die nachfolgenden Betrachtungen vernachlässigbar kleiner Anteil der zugeführten Energie wird in andere Energieformen umgewandelt, gespeichert oder an die Umwelt abgegeben, beispielsweise durch ein geringes Erwärmen des Prüfkörpers durch die Verformung.

3. Verformungsverhalten verschiedener Stoffe

Das Verformungsverhalten verschiedener Baustoffe bei Zug- oder Druckbeanspruchungen ist sehr unterschiedlich; meist liegen Mischformen von zeitlich unabhängigen und zeitabhängigen Verformungscharakteristiken vor. Läßt man die zeitabhängigen Verformungen, beispielsweise das Fließen oder Kriechen, außer Betracht, dann kann man grundsätzlich zwischen „ideal-elastischen“ und „elastoplastischen“ Stoffen unterscheiden.

Bei ideal-elastischen Stoffen kann man sich vorstellen, daß der Probekörper praktisch aus einer Spiralfeder besteht. Die Arbeitslinie eines solchen Probekörpers ist in Bild 2 dargestellt. Belastet man den Prüfkörper bis zu einer Stauchung ε_1 , so gibt die schraffierte Fläche die bis dahin gespeicherte Arbeit, d. h. Energie, an; die zusammengedrückte Feder ist in der Lage, diese elastisch ge-

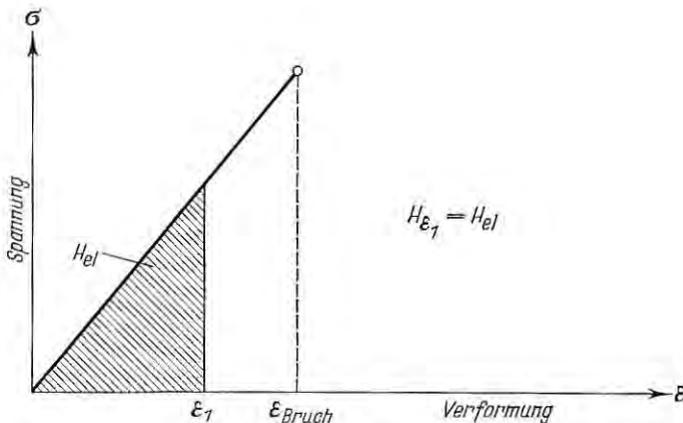


Bild 2 Arbeitslinie eines ideal-elastischen Stoffes. H_{ε_1} = elastisch gespeicherte Energie

speicherte Energie als Arbeit wieder abzugeben. Wird die Belastung weiter gesteigert, so tritt bei der maximalen Lastaufnahme der Bruch schlagartig ein, d. h. die Feder springt schlagartig entzwei. Dieses Verhalten zeigt an, daß es sich um einen spröden Werkstoff handelt. Für ideal-elastische Stoffe ist es charakteristisch, daß bei zunehmender Belastung die gesamte, von außen aufgebraachte Energie so lange gespeichert wird, bis die Speicherkapazität erschöpft ist, und daß dann die Tragfähigkeit schlagartig verlorengeht.

Ob sich Stoffe bei mechanischer Belastung weitgehend elastisch verhalten, hängt von zahlreichen Parametern ab, z. B. von ihrer chemischen Zusammensetzung, ihrem Gefüge und ihrer Temperatur. Bei Raumtemperatur verhalten sich viele anorganische nicht-metallische Stoffe quasielastisch, so beispielsweise Glas, viele keramische Erzeugnisse und viele Gesteine. Auch Beton gehört zur Gruppe der anorganischen nichtmetallischen Werkstoffe, jedoch weicht sein Verformungs- und Tragverhalten von dem der vorgenannten Stoffe erheblich ab, siehe Abschnitt 4.

In Bild 3 ist die Arbeitslinie eines elasto-plastischen Stoffes aufgetragen. Mit zunehmender Belastung verhält er sich zunächst wie ein rein elastischer Stoff. Nach Erreichen einer bestimmten Spannung, die man als Fließgrenze bezeichnet, nimmt bei weiterer, aufgezwingener Verformung durch den Kolben der Prüfmaschine (vgl. Bild 1) die Spannung nicht mehr zu; es tritt jedoch auch kein schlagartiger Bruch ein, sondern der Prüfkörper verformt sich in gleichem Maße wie der durch das hineingepumpte Öl herausgedrückte Arbeitskolben, ohne daß sich die Spannung im Prüfkörper wesentlich ändert. Erst bei einer sehr großen Verformung tritt der Bruch ein. Die für diesen Bruch erforderliche Energie entspricht wiederum der Fläche unter der Arbeitslinie. Diese Fläche ist wesentlich größer als die eines elastischen Stoffes gleicher Festigkeit, d. h. für den Bruch muß wesentlich mehr Energie aufgewendet werden. Die Fähigkeit, sich plastisch zu verformen, ist Voraussetzung für ein zähes Verhalten des Werkstoffes. Viele me-

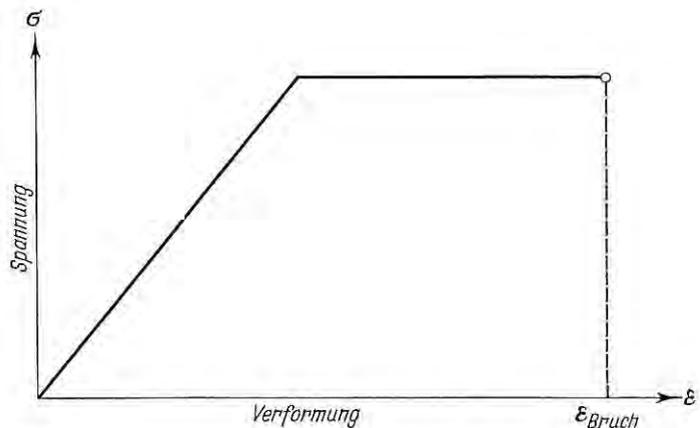


Bild 3 Arbeitslinie eines idealen elasto-plastischen Stoffes

tallische Werkstoffe weisen bei Raumtemperatur annähernd ein elasto-plastisches Verformungsverhalten auf, jedoch hängt dies auch wiederum von ihrer Zusammensetzung (Legierung) und ihrem Gefüge (Härten) ab. Bei tiefen Temperaturen kann ein Werkstoff, der bei Raumtemperatur zäh ist, spröde sein.

Wenn man die Energiezuführung bei elasto-plastischen Stoffen nicht bis zum Bruch vorantreibt, sondern vorher entlastet, dann erhält man die in Bild 4 dargestellte Arbeitslinie. Bei einer Belastung, die eine Stauchung ϵ_2 zur Folge hat, entspricht die dafür aufgebrauchte Energie H_{ϵ_2} der gesamten schraffierten Fläche unter der Arbeitslinie. Wird der Prüfkörper dann entlastet, dann geht die Spannung zwar auf Null zurück, es verbleibt jedoch eine bleibende Verformung. Bei dieser Entlastung wird nur die elastisch gespeicherte Energie H_{el} — also das schraffierte Dreieck in Bild 4 — wieder freigesetzt. Der größere, hier als H_{pl} bezeichnete Anteil der aufgebrauchten Energie wurde nicht gespeichert, sondern gewissermaßen aufgezehrt.

Da Energie nicht verlorengehen kann, muß sie in andere Formen überführt oder für andere Zustände verbraucht worden sein. Stoffe, die aufgrund ihrer chemisch-kristallographischen Beschaffenheit plastisch verformbar sind, verbrauchen für diese plastische Verformung Energie. Ferner kann bei einer Erwärmung des Prüfkörpers durch die Belastung mechanische Energie in Wärme umgewandelt werden. Für das Emittieren von Geräuschen ist ebenfalls Energie erforderlich, wenn auch nur sehr wenig.

Schließlich können in einem Stoff unter hoher Belastung feine Risse auftreten, oder einzelne Partikelchen können zermörsert werden, wozu erhebliche Mengen an Energie erforderlich sind. Im Vergleich zu einer plastischen Verformung bedeutet ein Entstehen von Rissen oder das Zerkleinern einzelner Partikelchen zwar eine graduelle Minderung der Güteeigenschaften dieses Stoffes, aber

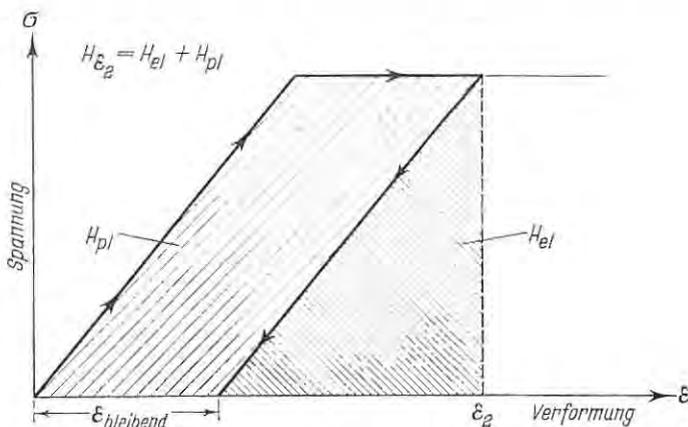


Bild 4 Arbeitslinie eines elasto-plastischen Stoffes, der bis zur Verformung ϵ_2 belastet und dann entlastet worden ist. H_{pl} = durch plastische Verformung aufgezehrte Energie; H_{el} = elastisch gespeicherte Energie

der dafür erforderliche Verbrauch an Energie verhindert ein sprödes Verhalten und damit ein schlagartiges Zerspringen. Sicherheitstechnisch ist das Verhindern eines spröden Verhaltens wichtiger als eine partielle strukturelle Schädigung eines Stoffes in hochbeanspruchten Bereichen.

4. Arbeitslinien von Normalbeton

Bild 5 zeigt eine Gesamtansicht der Prüfeinrichtung, mit der die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen durchgeführt wurden. Sie besteht aus einer sehr steifen 4 Säulen-Prüfmaschine mit einer maximalen Druckkraft von 6000 kN (600 Mp). Die besonders groß ausgelegte Förderpumpe wird servo-hydraulisch mit der in Bild 5 links abgebildeten elektronischen Ausrüstung geregelt. Mit der gleichen Ausrüstung werden auch die anfallenden Meßdaten (Kraft und Verformungen) aufgenommen und für verschiedene Ausgänge umgewandelt. Neben einer digitalen Anzeige können die Meßwerte ausgedruckt und mit x-y-Schreiber erfaßt werden. Da Druckwerk und Schreiber bei schnellen Bruchvorgängen für eine ausreichende

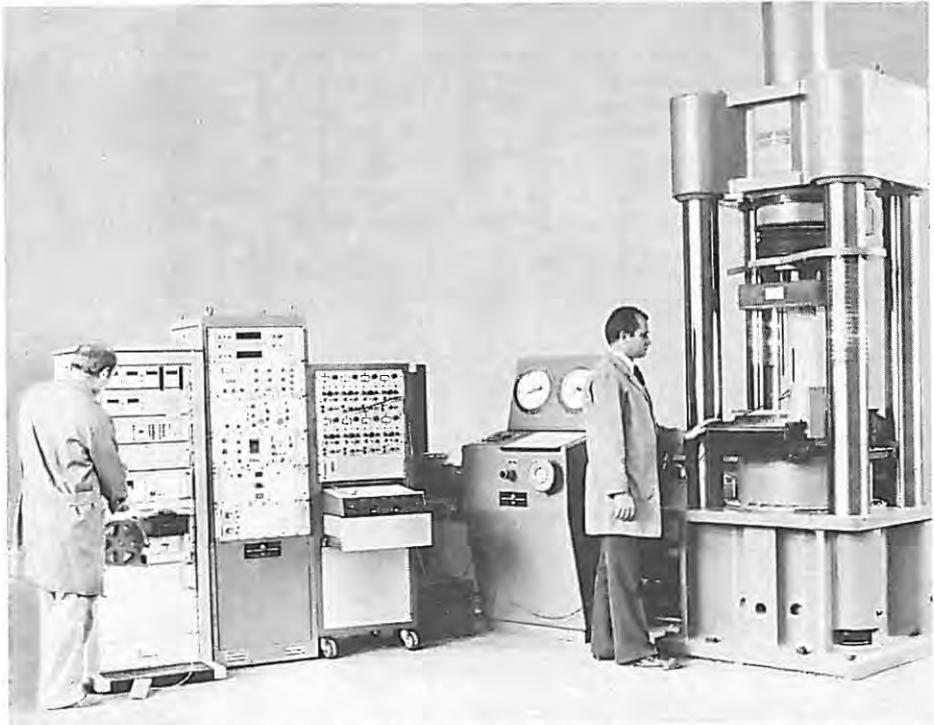


Bild 5 4 Säulen-Druckprüfeinrichtung im Forschungsinstitut der Zementindustrie. Maximale Druckkraft 6000 kN; servo-hydraulische Regelung für konstante Belastungs- oder Verformungsgeschwindigkeit; elektronische Erfassung der Meßwerte

Erfassung zu träge sind, können die Meßwerte auch durch einen Puffer-Speicher aufgenommen und dann auf Lochstreifen für die weitere Auswertung registriert werden.

Die Arbeitslinien wurden an 28 Tage alten Betonzylindern von 15 cm Durchmesser und 30 cm Länge ermittelt. Die Zylinder waren nach DIN 1048 gelagert, ebenso von jeder Betonsorte ein Würfelsatz, mit dem die Betonfestigkeitsklasse bestimmt wurde. Gemäß DIN 1048 wurden die Würfel mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit, die Zylinder hingegen mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit (Stauchung) von 2‰ je Minute geprüft. Eine um den Faktor 10 größere oder kleinere Verformungsgeschwindigkeit lieferte praktisch gleiche Ergebnisse. Die Verformung der Betonzylinder wurde indirekt durch den Abstand der Druckplatten bestimmt; hierzu dienten drei induktive Geber, deren Ergebnisse elektronisch gemittelt wurden.

Diese Meßmethode kann zu gewissen Fehlschlüssen verleiten [2], weil der Bruch häufig nur in einem Teil des Betonzylinders stattfindet, während die Verformung über die gesamte Länge des Zylinders gemittelt wird. Trotz der dadurch bedingten Unsicherheit geben solche Untersuchungen doch zumindest einen qualitativen Anhalt für die Bruchvorgänge nach Überschreiten der Höchstspannung.

In Bild 6 ist die Arbeitslinie eines Normalbetons der Festigkeitsklasse B 25 (Bn 250) aufgetragen, der einachsrig auf Druck beansprucht wurde. Mit Beginn der Belastung stiegen Spannung und Verformung zunächst an. Sobald das Maximum der Spannung bei einer Stauchung von etwa 2‰ — also nach rd. 1 Minute — erreicht war, nahm bei weiterhin gleichbleibender Stauchungsgeschwindigkeit die Spannung wieder ab. Der abfallende Ast war flacher geneigt als der ansteigende Ast.

Anhand dieser Arbeitslinie läßt sich bereits erkennen, daß Beton entgegen weit verbreiteter Auffassung kein spröder Stoff ist; denn dann dürfte es den abfallenden Ast nicht geben. Allerdings tritt auch keine ausgeprägte plastische Verformung — also zunehmende

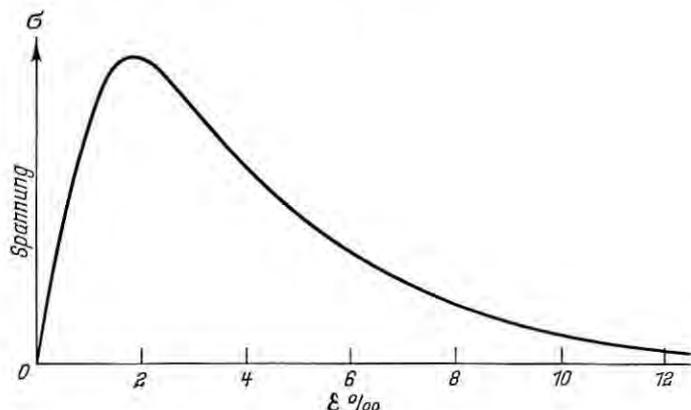


Bild 6 Arbeitslinie eines druckbeanspruchten Normalbetons B 25

Verformung bei etwa gleicher Spannungshöhe – auf, sondern mit zunehmender Verformung nimmt die vom Beton aufnehmbare Druckspannung ab, z. B. beträgt sie bei einer Stauchung von 5‰ nur noch knapp 50‰ der maximal aufnehmbaren Spannung.

In Bild 7 sind die Arbeitslinien von 28 Tage alten Normalbetonen verschiedener Festigkeitsklassen aufgetragen. Die Würfelfestigkeit des als B 80 (Bn 800) bezeichneten Betons betrug knapp 90 N/mm². Mit zunehmender Betonfestigkeit verlief der ansteigende Ast steiler, was durch den höheren E-Modul bedingt ist. Die Zunahme der zugehörigen E-Moduln war jedoch nicht so groß, daß das Maximum der Spannung stets bei rd. 2‰ Stauchung erreicht wurde, sondern mit höherer Betonfestigkeit nahm die Stauchung, bei der das Spannungsmaximum erreicht wurde, von etwa 2 auf etwa 3‰ zu.

Bemerkenswerter ist jedoch, daß der abfallende Ast mit zunehmender Betonfestigkeit immer steiler wird. Das liegt zum kleineren Teil daran, daß mit höherer Betonfestigkeit die in der Prüfmaschine gespeicherte mechanische Energie größer wird; im wesentlichen ist das darauf zurückzuführen, daß mit zunehmender Festigkeit eine Tendenz zum Verspröden gegeben ist. Alle untersuchten Betone waren jedoch im eigentlichen Sinn nicht – oder in diesem

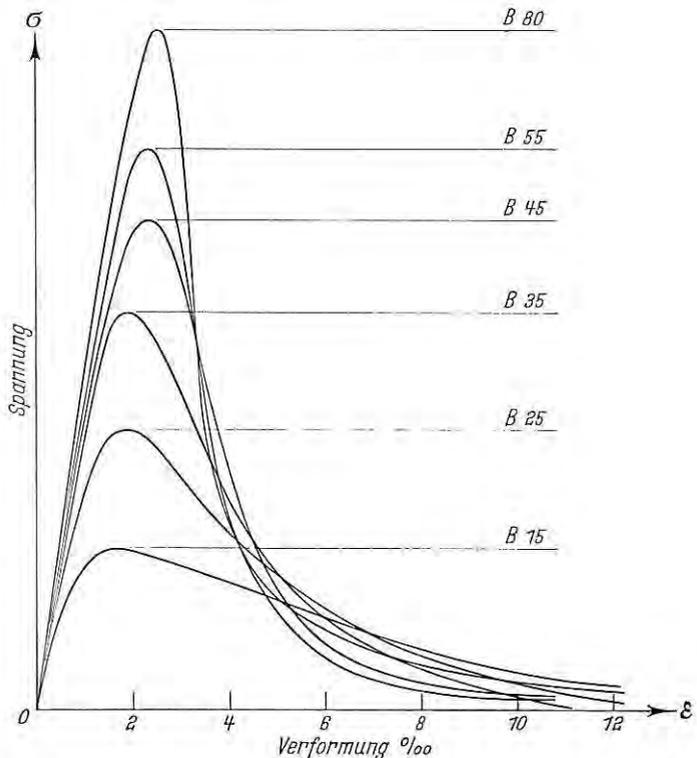


Bild 7 Arbeitslinien von druckbeanspruchten Normalbetonen B 15 bis B 80

Festigkeitsbereich noch nicht — spröde, sondern wiesen eine für baupraktische Belange ausreichende Zähigkeit auf.

Demgegenüber sind im Labor unter sehr speziellen Bedingungen hergestellte Zementsteine und Betone mit 150 bis 200 N/mm² Druckfestigkeit schlagartig zersprungen. In gewisser Weise trägt DIN 1045, Ausgabe Januar 1972, der Tendenz zum Verspröden mit höherer Betonfestigkeit dadurch Rechnung, daß die Rechenwerte β_R oberhalb B 25 (Bn 250) mit zunehmender Betonfestigkeit stärker abgemindert worden sind, wenngleich diese Überlegungen seinerzeit nicht der Anlaß für diese Abminderung waren.

5. Energieaufnahme

Die Fläche unter den Arbeitslinien ist ein Maß für die gesamte Energie, die bis zum Verlust der Tragfähigkeit des Betonprobekörpers aufgebracht werden muß. In Bild 8 ist die gesamte Bruchenergie je Volumeneinheit Beton über der Beton-Zylinderfestigkeit für die Betone aufgetragen, deren Arbeitslinien in Bild 7 wiedergegeben sind. Mit zunehmender Betonfestigkeit flacht die Kurve in Bild 8 ab, d. h. die für den Verlust der Tragfähigkeit des Betons erforderliche Bruchenergie steigt weniger an als die Festigkeit. Auch darin spiegelt sich die Tendenz einer Versprödung mit zunehmender Betonfestigkeit wider.

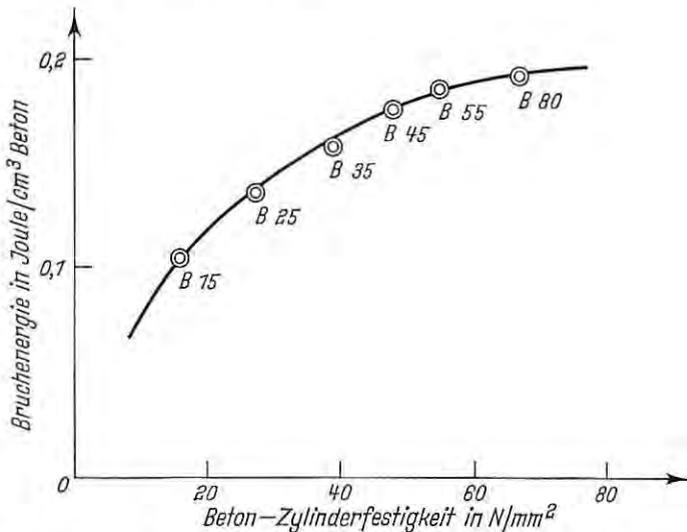


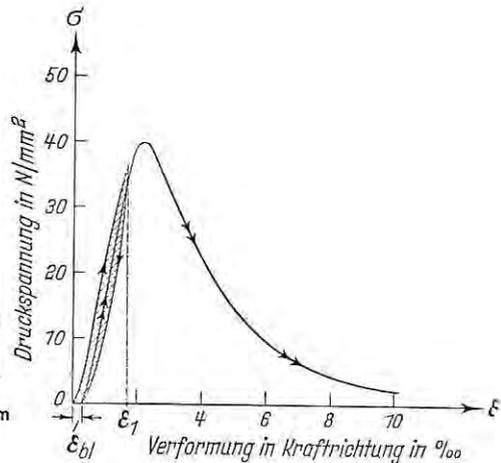
Bild 8 Für den Bruch erforderliche Gesamtenergie (je Volumeneinheit) von druckbeanspruchten Normalbetonen unterschiedlicher Festigkeit

Aus den Arbeitslinien in Bild 7 läßt sich nicht ermitteln, welcher Anteil der gesamten Bruchenergie bei verschiedenen Belastungszuständen elastisch gespeichert war und ob und gegebenenfalls welcher Anteil an aufgebrauchter Energie in irgendeiner Form um-

gewandelt oder für irgendwelche Vorgänge im Beton verbraucht worden war.

Einen Aufschluß hierüber gibt Bild 9. Bei diesen Untersuchungen wurde ein Betonzylinder aus B 35 bis zu einer Bruchstauchung ε_1 belastet, was einer Spannung von rd. 90 % der Kurzzeitfestigkeit entsprach. Dann wurde der Prüfkörper mit gleicher Geschwindigkeit entlastet, so daß der zusammengedrückte Körper die noch elastisch gespeicherte Energie wie eine Feder durch Rückverformung wieder freisetzen konnte. Die bei der Belastung aufgebrauchte Energie entspricht der Fläche unter der ersten Belastungskurve bis zur Stauchung ε_1 , die elastisch gespeicherte Energie entspricht der Fläche unter der Entlastungskurve. Demnach war der überwiegende Teil der aufgebrauchten Energie bei einer Belastung bis zu 90 % der Kurzzeitfestigkeit elastisch gespeichert. Belastete man den Körper erneut, so erreichte er praktisch die gleiche Festigkeit wie ohne Vorbelastung; er verhielt sich auch sonst gleich, wie aus dem Verlauf der Arbeitslinie bei der zweiten Belastung zu sehen ist.

Bild 9
Arbeitslinie eines druckbeanspruchten Normalbetons B 35, der bis zur Verformung ε_1 belastet, dann entlastet und anschließend bis zum Bruch belastet worden ist



Die Hysterese zwischen Entlastungskurve und zweiter Belastungskurve wird durch die sogenannte Dämpfung im Beton hervorgerufen [3]. Die schmale Fläche dieser Hysterese entspricht dem Energieinhalt, der durch die Dämpfung aus mechanischer Energie in Wärme umgewandelt worden ist.

Bei den Untersuchungen, die in Bild 10 wiedergegeben sind, wurde der Prüfkörper bis zu einer Betonstauchung ε_2 belastet; dabei betrug die Spannung auf dem abfallenden Ast der Arbeitslinie nur noch rd. 75 % der Höchstlast. Die aufgebrauchte Energie entspricht wiederum der Fläche unter der ersten Belastungskurve bis zur Stauchung ε_2 , die elastisch gespeicherte Energie der Fläche unter der Entlastungskurve. Im Gegensatz zu den Verhältnissen, die in Bild 9 dargestellt sind, ist bei einer Belastung bis zur Stauchung ε_2 ein erheblicher Teil der Energie aufgezehrt worden; die schraffierte Fläche H_{p1} in Bild 10 gibt die aufgebrauchte Energiemenge an.

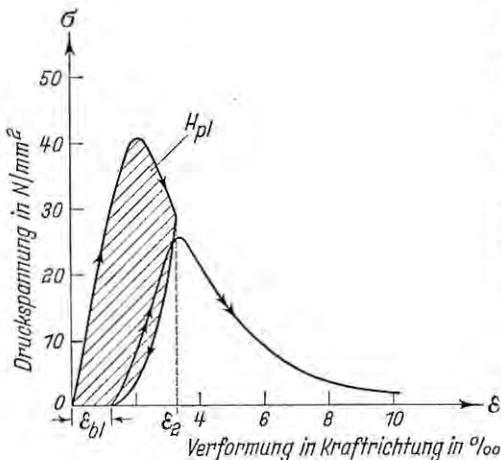


Bild 10

Arbeitslinie eines druckbeanspruchten Normalbetons B 35, der bis zur Verformung ϵ_2 belastet, dann entlastet und anschließend bis zum Bruch belastet worden ist. H_{pl} = durch Ausbilden innerer Risse und Zerkleinern einzelner Partikelchen aufgezehrte Energie

6. Tragverhalten und Bruchmechanismen von Zementstein und Beton

Zur Erklärung bestimmter Eigenschaften kann es zweckmäßig sein, Beton als Zweiphasensystem darzustellen; dabei sind in einer Matrix (Phase I) die groben Zuschlagkörner (Phase II) eingebettet. Meist rechnet man nicht nur den Zementstein, sondern auch die feinen Anteile des Zuschlags zur Matrix; allerdings ist die Grenzziehung, bis zu welcher Korngröße die Zuschlagkörner noch zur Matrix zu rechnen sind, z. B. bis zu 2 mm, mehr oder weniger willkürlich. Die Eigenschaften der Matrix werden jedoch unabhängig von dieser Grenzziehung weitestgehend von denen des Zementsteins bestimmt.

6.1 Tragverhalten von Zementstein

Über die physikalischen Eigenschaften, das Tragverhalten und den Bruchmechanismus von einachsigt auf Druck beanspruchtem Zementstein ist in den letzten Jahren mehrfach berichtet worden [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Bild 11, das aus [4] entnommen ist, gibt die Arbeitslinien von Zementsteinen mit unterschiedlichem Wasserzementwert (0,35 bis 0,59) und nach unterschiedlich langer Wasserlagerung (1 bis 2 Wochen) wieder. Die Zementsteine sind im wassersatten Zustand mit einer relativ langsamen, konstanten Stauchungsgeschwindigkeit von 3 ‰ je Stunde geprüft worden. Zunächst ist auffallend, daß alle Arbeitslinien nur einen aufsteigenden Ast — und keinen abfallenden Ast — aufweisen. Daraus ist zu schließen, daß energieverzehrende Vorgänge größeren Ausmaßes bei einer einachsigen Druckbeanspruchung nicht stattfinden und daß Zementstein unter Druckbeanspruchung einem spröden Verhalten sehr nahe kommt. Andererseits ist die Arbeitslinie nicht linear, sondern zur Stauchungsachse hin gekrümmt, um zwar um so mehr, je höher der Wasserzementwert und je kürzer die Erhärnungszeiten waren. Ferner ist zu beachten, daß die Zementsteinprobekörper bei der Prüfung wassersatt waren und daß dadurch bei der Druck-

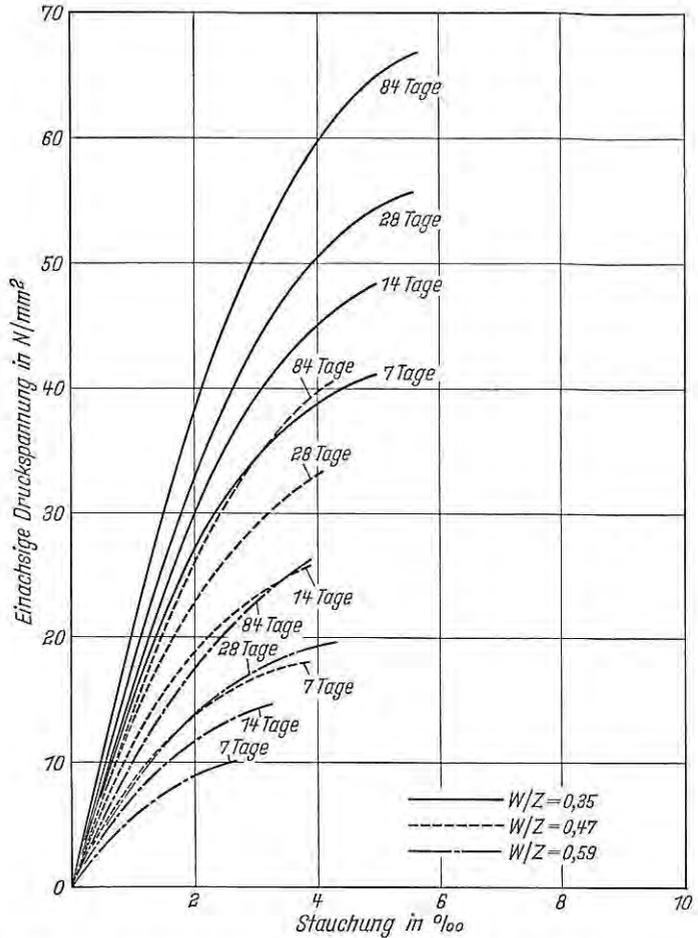


Bild 11 Arbeitslinien von 7 bis 84 Tage altem Zementstein aus Portlandzement mit unterschiedlichem Wasserzementwert, nach [4]

beanspruchung und der dabei aufgezwungenen Stauchung und Volumenverminderung ein Porenwasserüberdruck entstanden ist.

In einer sehr viel weitergehenden Untersuchung haben Spooner und Mitautoren [9] denn auch festgestellt, daß Zementstein kein wirklich spröder Stoff ist, sondern daß ein Teil der aufgebrachten Energie vor dem endgültigen Versagen verzehrt wird. Hierfür kommen im wesentlichen drei Vorgänge in Betracht, nämlich erstens das Kriechen, das selbst bei Kurzzeitprüfung zu einem gewissen Verzehr an Energie führt, zweitens die innere Dämpfung und drittens ein Verzehr an Energie durch die Bildung innerer Oberflächen in Form von Mikrorissen und Zerquetschen einzelner Partikelchen.

Wird ein fester Körper geteilt, so entsteht dadurch eine neue Oberfläche. Hierfür ist Energie erforderlich, die man auf die neu ge-

geschaffene Oberfläche beziehen kann und die dann als Oberflächenenergie bezeichnet wird. Entsprechend der von A. A. Griffith für ideal-elastische Stoffe bereits 1920 entwickelten Bruchtheorie versteht man unter bezogener Oberflächenenergie diejenige Energiemenge, die zur Schaffung der bei ideal sprödem Bruch neu entstandenen zwei Oberflächen notwendig ist [7].

Griffith hat seine Theorie für dichte, quasihomogene Stoffe, wie z. B. Glas, aufgestellt. Demgegenüber besteht Zementstein aus zahlreichen, ineinander verfilzten oder verwachsenen Kristallfasern oder -plättchen mit dazwischenliegenden Poren unterschiedlicher Form und Größe, siehe Bild 12. Für die Festigkeit dieses Kristallgeflechts sind verschiedene Mechanismen maßgebend, u. a. vander-Waals-Kräfte. Wenn auch die einzelnen Calciumsilicathydrat-Kristalle dem von Griffith vorausgesetzten ideal-spröden Stoff näherungsweise entsprechen mögen, so gilt das nicht für das Kristallgeflecht. Die der klassischen Bruchmechanik zugrunde gelegten Voraussetzungen sind daher bei Zementstein nicht gegeben. Man kann die Bruchmechanik daher allenfalls rein formalistisch auf Zementstein übertragen, indem man – unabhängig vom Wirkungsmechanismus – die statistisch gemittelte Trennenergie auf die im Innern des Zementsteins neu geschaffene Oberfläche bezieht.

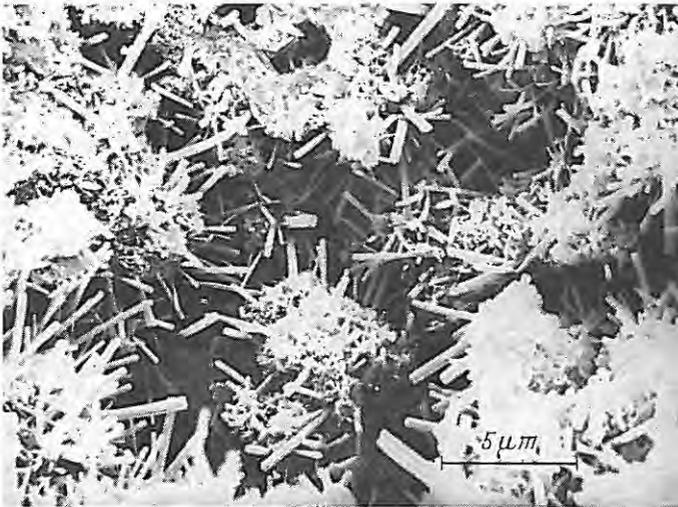


Bild 12 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von 1 Tag altem Zementstein; Wasserzementwert 0,40 (Aufnahme von W. Richartz)

Wenn im Innern eines Stoffes Oberfläche durch Trennen vorher miteinander verbundener Teilchen geschaffen wird, so bedeutet dies eine partielle Schädigung des Werkstoffes. In Bild 13 ist die von Spooner und Mitarbeitern [9] durch partielle Schädigung des Zementsteins aufgezeigte Energie über der Stauchung aufgetra-

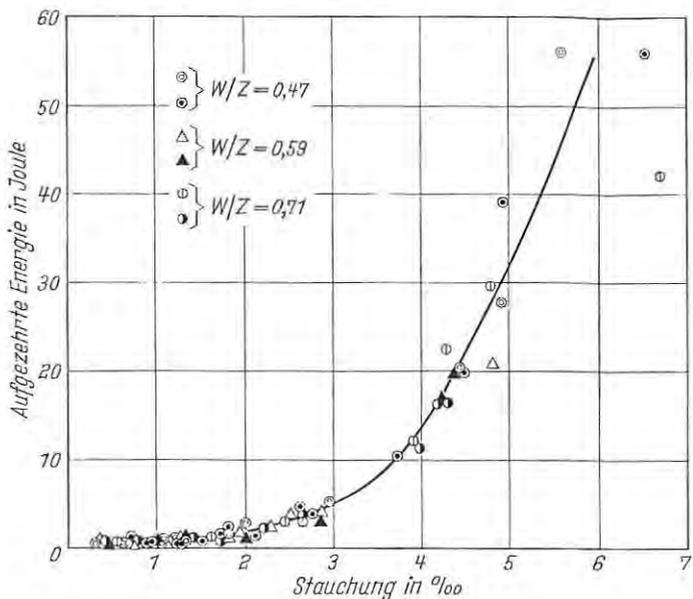


Bild 13 Durch innere Risse aufgezehrte Energie in verschieden altem Zementstein, der einachsrig auf Druck beansprucht wurde, nach [9]

gen. Bis zu einer Stauchung von 2 ‰ ist die partielle Schädigung und damit auch die hierfür aufgezehrte Energie relativ gering. Erst bei einer Stauchung über 4 ‰ werden größere Energiemengen bei der erstmaligen Belastung aufgezehrt.

Das Entstehen innerer Oberflächen durch Mikrorisse und Zerquetschen einzelner Partikelchen macht sich auch in der äußeren Volumenänderung bemerkbar. Die Querdehnung steigt dabei überproportional an, d. h. die Poissonsche Zahl wird mit zunehmender Stauchung scheinbar immer größer. In Bild 14 ist die Volumenverminderung $\Delta V/V$ in Abhängigkeit von der achsialen Stauchung aufgetragen. Zum Vergleich ist eine Gerade eingezeichnet, die sich bei gleichbleibender Poissonscher Zahl einstellen würde. Die Meßwerte ergaben jedoch mit zunehmender Stauchung eine kleiner werdende Volumenverminderung, weil die Querdehnung mit zunehmender Stauchung überproportional zunahm. Dies ist ein Indiz dafür, daß mit der Stauchung im Innern Mikrorisse entstanden sind. Allerdings ist dieser Effekt bei Beton wesentlich stärker ausgeprägt, vgl. Bild 18.

6.2 Tragverhalten von Normalbeton

Im Normalbeton ist die Matrix aus Zementstein oder Feinmörtel mit groben Zuschlagkörnern durchsetzt, die einen wesentlich höheren E-Modul als die Matrix aufweisen. Wenn auch bei einer einachsigen Druckbeanspruchung eine gleichmäßige Stauchung des Betonprüfkörpers erzwungen wird, so treten im Innern des Körpers wegen der unterschiedlichen Steifigkeiten von Matrix und Zu-

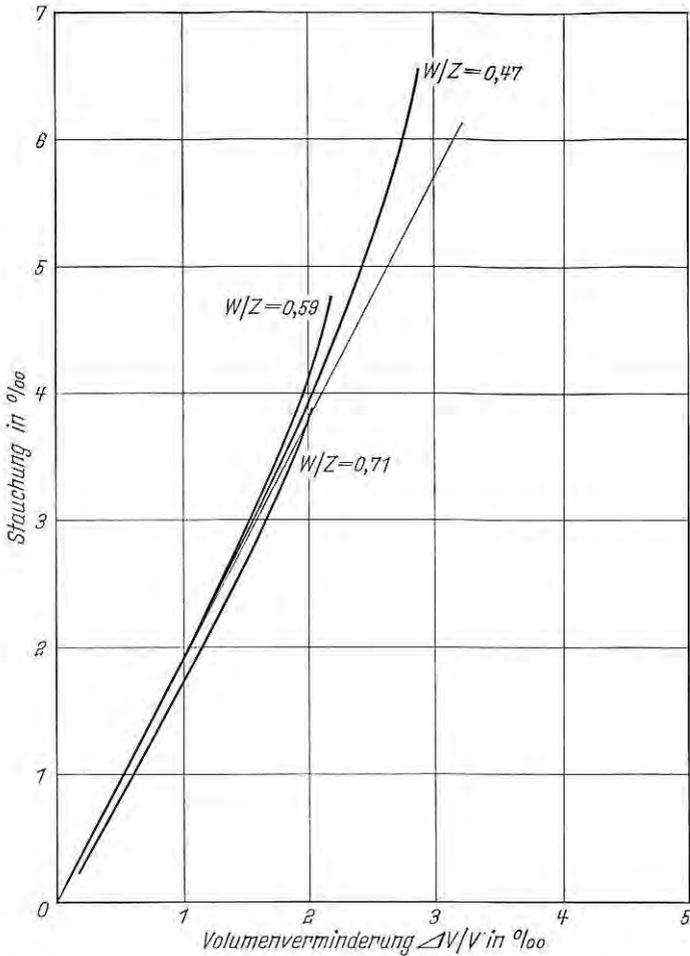


Bild 14 Volumenänderung von 7 Tage altem Zementstein, der einachsigt auf Druck beansprucht wurde, nach [9]

schlagkorn sehr unterschiedliche Spannungen auf. Das geht u. a. aus spannungsoptischen Untersuchungen an Modellbetonen hervor [10, 11, 12].

Bild 15 zeigt links ein spannungsoptisches Isochromatenbild und rechts den damit und mit Hilfe von Dickenmessungen des ebenen Modells konstruierten Verlauf der Hauptspannungslinien. Daraus ist zu erkennen, daß bei äußerlich gleicher Stauchung im Innern des Betons ein konzentrierter Kräftefluß von Zuschlagkorn zu Zuschlagkorn erfolgt (Konzentration der Hauptspannungslinien). An anderen Stellen des Modells sind die Hauptspannungslinien gespreizt, was nur durch Zugspannungen senkrecht zur äußeren Druckrichtung bewirkt sein kann.

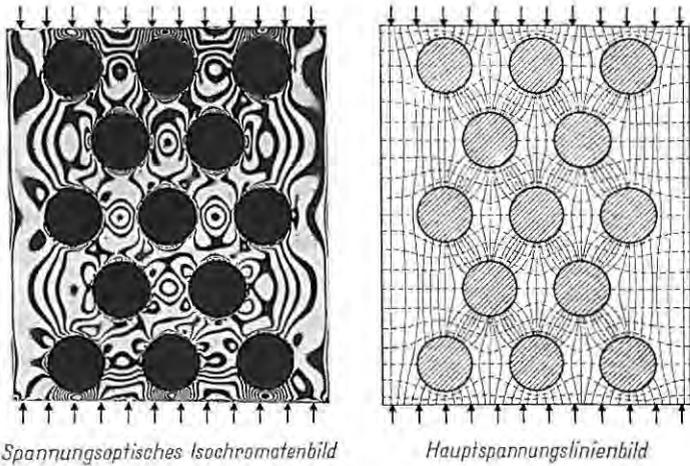


Bild 15 Spannungsverteilung in einem einachsig auf Druck beanspruchten Normalbeton, nach [12]

Das geht noch deutlicher aus Bild 16 hervor, bei dem links die radialen Spannungen in der Kontaktfläche eines Zuschlagkorns in einer auf Druck beanspruchten Matrix wiedergegeben sind. Die Anordnung und die Länge der eingezeichneten Pfeile sind dabei ein Maß für die Richtung und Größe der Spannungen. Senkrecht zur äußeren Krafrichtung treten Zugspannungen auf, deren absolute Größe etwa der der äußeren Druckspannungen entspricht.

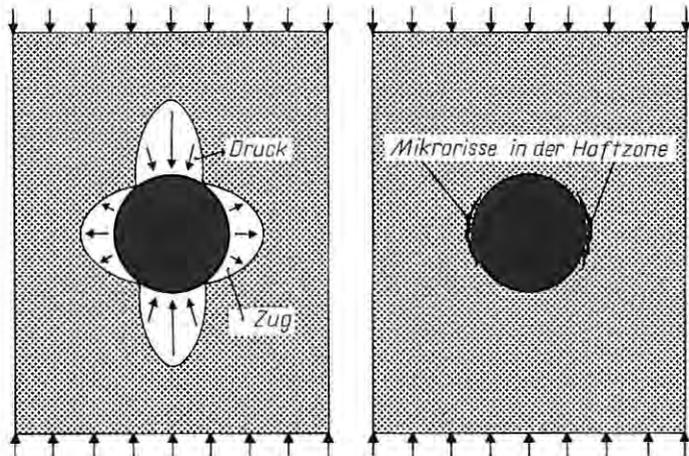


Bild 16 Spannungsverteilung und Mikrorißbildung in der Haftzone eines einzelnen groben Zuschlagkorns in einer einachsig auf Druck beanspruchten Matrix, nach [12]

G. Rehm, P. Diem und R. Zimbelmann haben dargelegt [13], daß zwischen der Oberfläche des Zuschlagkorns und der Matrix eine etwa 10 bis 20 µm dicke Kontaktzone entsteht, deren Festigkeit offensichtlich niedriger ist als die der ungestörten Matrix. Das dürfte sich insbesondere in denjenigen Bereichen der Kontaktzone auf das Tragverhalten des Betons auswirken, in denen bei äußerer Druckspannung hohe Zugspannungen auftreten. In diesen Bereichen der Kontaktzone (Bild 16, links) sind daher schon bei relativ niedriger äußerer Druckbeanspruchung Mikro-Haftrisse zu erwarten, wie sie in Bild 16, rechts, angedeutet sind. Sowohl akustische Messungen [8, 14] als auch röntgenographische Untersuchungen [15] an auf Druck beanspruchten Betonen haben die Vermutung bestätigt, daß die Ausbildung solcher Mikro-Haftrisse bereits bei relativ niedriger Druckbeanspruchung (weniger als die Hälfte der Kurzzeitfestigkeit) beginnt.

Für die Ausbildung dieser Haftrisse wird Energie aufgezehrt. Da die Festigkeit in der Kontaktzone der Matrix relativ klein ist [13], wird die dafür aufzuwendende Energie ebenfalls relativ klein sein. Die in Bild 9 wiedergegebenen Untersuchungen bestätigen dies; dabei wurde ein Betonzylinder auf dem ansteigenden Ast der Arbeitslinie bis zu 90 % seiner Kurzzeitfestigkeit belastet und dann entlastet. Bei dieser hohen Druckbeanspruchung sind Mikro-Haft- risse in der auf Zug beanspruchten Kontaktzone mit Sicherheit entstanden. Dennoch ist die dafür verzehrte Energie (schraffierte Fläche zwischen dem ersten und dem zweiten Belastungsast in Bild 9) relativ klein.

Bei weitergehender Belastung wachsen die zunächst in der Kontaktzone entstandenen Haftrisse in die Matrix hinein [11, 12], wie

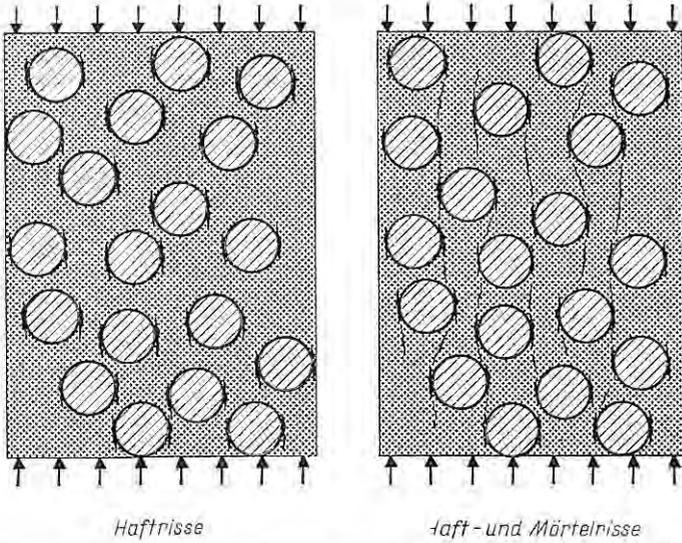


Bild 17 Haftrisse (links) und Fortsetzung der Haftrisse in die Matrix (rechts) in einem einachsrig auf Druck beanspruchten Normalbetonmodell, nach [12]

dies qualitativ in Bild 17 dargestellt ist. Diese Matrixrisse bilden sich bevorzugt in Richtung der äußeren Druckbeanspruchung aus, jedoch ist – insbesondere bei behinderter Querdehnung durch Reibung an den Druckplatten der Prüfmaschine – auch eine andere Orientierung dieser Matrixrisse möglich. Wie auch immer diese Matrixrisse verlaufen mögen, sie bedingen ein Trennen der ungeschädigten Matrix und benötigen dafür eine entsprechend große Oberflächenenergie. Das bestätigen die in Bild 10 wiedergegebenen Untersuchungen, bei denen ein Betonzylinder über die maximale Spannung hinaus bis zu einer Restfestigkeit von 75 % belastet und dann entlastet wurde. Im Gegensatz zu den Untersuchungen in Bild 9 wurde dabei ein erheblicher Anteil an Energie für die Ausbildung der Matrixrisse verzehrt (schraffierte Fläche zwischen erstem und zweitem Belastungsast).

In Bild 18 ist die Volumenänderung von Zementstein und den daraus hergestellten Betonen in Abhängigkeit von der einachsig wirkenden Druckspannung aufgetragen. Die Volumenänderung errechnet sich aus der Stauchung in Druckrichtung und der Querdehnung senkrecht zur Druckbeanspruchung. Während das Volumen des Zementsteins bis zum Bruch ständig abnimmt, nimmt das Volumen des Betons nur bis zu einer Belastung von 70 bis 80 % der Kurzzeitfestigkeit ab und dann in starkem Maße zu. Da die

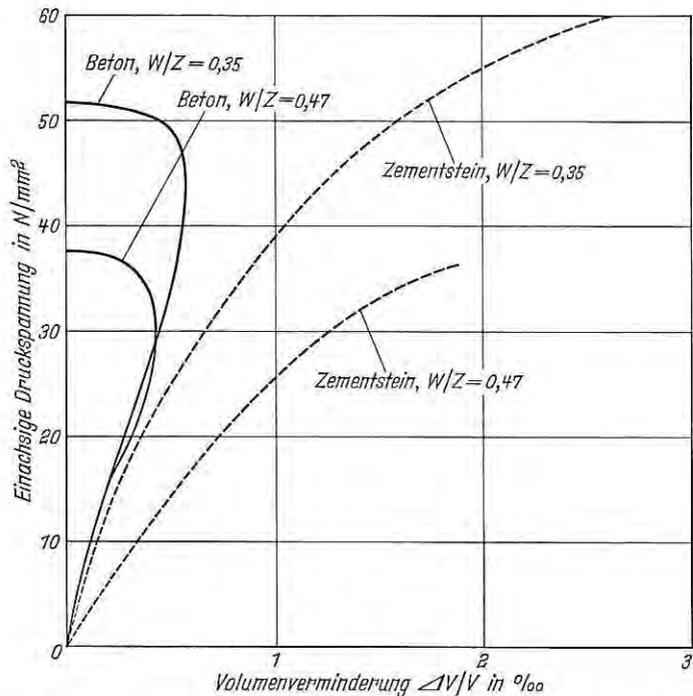


Bild 18 Volumenänderung von Zementstein und daraus hergestelltem Beton, die einachsig auf Druck beansprucht wurden, nach [4]

Stauchung bei zunehmender Belastung fortwährend zunimmt (vgl. die Arbeitslinien in Bild 7), kann eine Volumenzunahme nur dadurch bewirkt werden, daß die Querdehnung überproportional zunimmt. Das geschieht in begrenztem Maße durch die Haftrisse und in starkem Maße durch die Risse in der Matrix. Die Volumenänderungen von einachsiger auf Druck beanspruchtem Beton sind somit ebenfalls ein Indiz dafür, daß sich vor dem endgültigen Versagen des Betons Haft- und Matrixrisse ausbilden, die energieverzehrend sind und dadurch einen spröden Bruch des Betons verhindern.

7. Tragverhalten von faserbewehrtem Beton

Gibt man Beton geeignete Faserabschnitte zu, so kann man dadurch zwar die Haftrisse an den groben Zuschlagkörnern nicht verhindern, aber das Entstehen und Fortpflanzen von Rissen in der Matrix wird wirkungsvoll behindert und das Tragverhalten dadurch sehr günstig beeinflusst. Je nachdem, aus welchem Werkstoff die Fasern bestehen, und je nachdem, ob die Fasern eine unter- oder eine überkritische Länge aufweisen, kann man drei verschiedene Wirkungsmechanismen unterscheiden [16], die in Bild 19 dargestellt sind.

In dem in Bild 19 oben dargestellten Fall a haben die Fasern eine unterkritische Länge, d. h. sie werden aus der Matrix herausgezogen, bevor ihre Zugfestigkeit erschöpft ist. Das trifft im allgemeinen bei den heute gebräuchlichen Stahl- und Glasfasern zu. In dem in der Mitte dargestellten Fall b haben die Fasern zwar eine überkritische Länge, sie bestehen jedoch aus einem spröden Werkstoff. Das bedeutet, daß sie bis zu ihrer Zugfestigkeit beansprucht werden, dann jedoch schlagartig reißen. Dieses Verhalten tritt überwiegend bei Asbestzement auf. Der in Bild 19 unten dargestellte Fall c, bei dem die Fasern eine überkritische Länge aufweisen und außerdem aus einem elasto-plastischen Werkstoff bestehen, wäre technisch sehr günstig; er läßt sich mit den heute üblichen Technologien jedoch nicht verwirklichen.

In den auf Zug beanspruchten Bereichen der faserbewehrten Matrix liegt zunächst ein Zustand vor, der dem des Zustands I im Stahlbeton entspricht, d. h. die Matrix ist zwar gedehnt, jedoch nicht gerissen, und die Fasern beteiligen sich entsprechend ihrem Anteil und dem Verhältnis der E-Moduln an der Aufnahme der Zugbeanspruchung. Wird die äußere Beanspruchung so groß, daß die Dehnfähigkeit der Matrix erschöpft ist, dann treten in der Matrix Risse auf, die jedoch von den Fasern überbrückt werden. Somit liegt ein Zustand vor, der dem des Zustands II im Stahlbeton entspricht, bei dem die Aufnahme der Zugbeanspruchung ausschließlich durch die Fasern erfolgt. Die Fasern wirken also zunächst in der Matrix als „Rißbremse“, und sie gewährleisten darüber hinaus noch eine hohe Tragfähigkeit, auch wenn die Matrix von Rissen durchzogen ist [17].

Die verbesserte Tragfähigkeit geht aus Bild 20 hervor, in dem die Arbeitslinie eines Normalbetons B 35 und zum Vergleich die Arbeitslinie des gleichen Betons B 35 aufgetragen sind, dem jedoch zusätzlich 2 Vol.-% Stahlfasern von 0,4 mm Durchmesser und 25 mm Länge zugesetzt worden waren. Während der Normalbeton

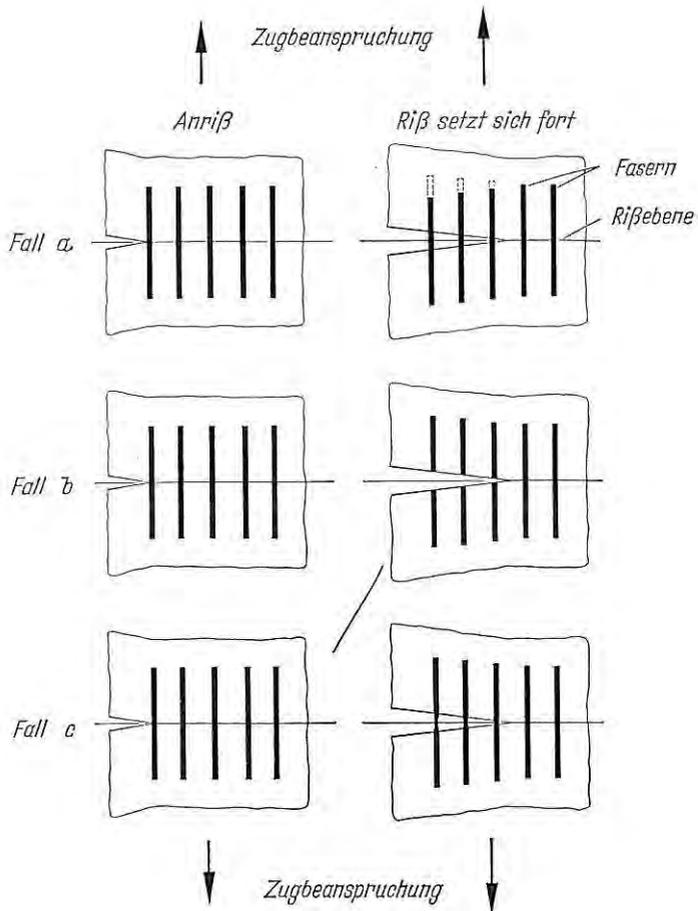


Bild 19 Wirkungsmechanismen einer Bewehrung aus kurzen Fasern in einer auf Zug beanspruchten Matrix, nach [16]

Fall a: Mangelnder Verbund, Fasern werden herausgezogen

Fall b: Guter Verbund, spröde Fasern reißen ohne plastische Verformung

Fall c: Guter Verbund, plastische Fasern reißen erst nach großer Verformung

ohne Fasern die höchste Druckspannung bei einer Stauchung von rd. 2‰ aufnahm, stieg die aufnehmbare Druckspannung des Stahlfaserbetons bis zu einer Stauchung von rd. 4‰ an; sie war zudem rd. 20% höher als die des Normalbetons ohne Fasern. Bereits bei einer Stauchung von 10‰ war eine Tragfähigkeit des Normalbetons ohne Fasern praktisch nicht mehr gegeben. Demgegenüber wies der Stahlfaserbeton selbst bei einer so großen Stauchung noch eine Tragfähigkeit wie der ungeschädigte Normalbeton (Stauchung 2‰) auf.

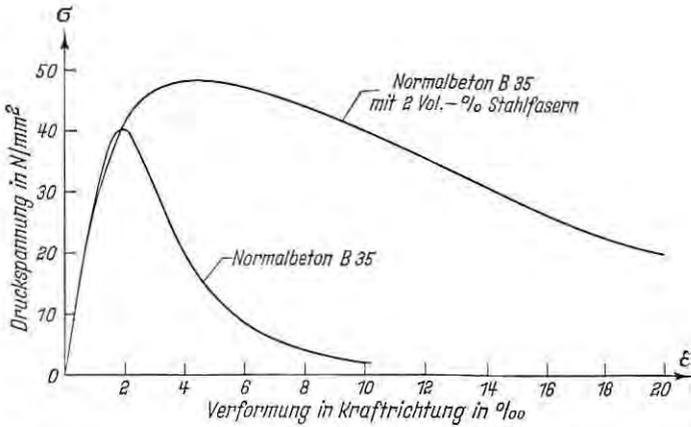


Bild 20 Arbeitslinien von druckbeanspruchtem Normalbeton B 35 ohne und mit 2 Vol.-% Stahlfasern

Besonders bemerkenswert ist, daß die für den Bruch des Stahlfaserbetons erforderliche Energie um ein Vielfaches größer ist als die des Normalbetons ohne Fasern; das ist aus einem Vergleich der Flächen unter den Arbeitslinien der Betone mit und ohne Fasern ersichtlich. Aufschluß darüber, ob die dem Stahlfaserbeton zugeführte Energie elastisch gespeichert oder weitgehend aufgezehrt wurde, gibt Bild 21. Zunächst war der Stahlfaserbeton mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit bis zu einer Stauchung von rd. 6‰ belastet und dann entlastet worden. Aus dem Verlauf der Entlastungskurve und der großen bleibenden Verformung von über 3‰ geht hervor, daß der größte Teil der aufgebrauchten Energie verzehrt worden ist. Wie die zweite Belastungskurve war der Stahlfaserbeton durch die große Stauchung von zunächst

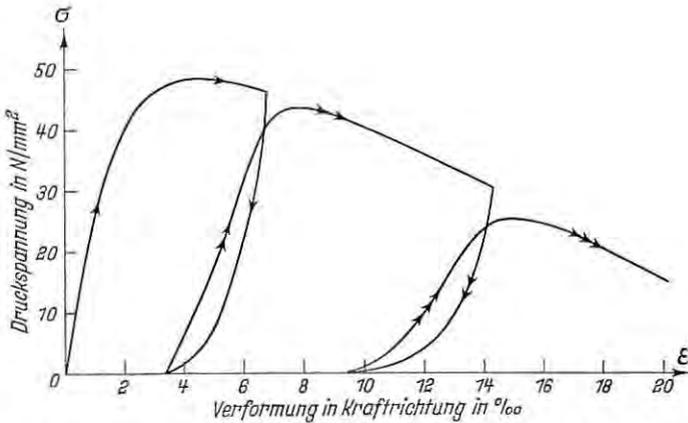


Bild 21 Arbeitslinie eines druckbeanspruchten Normalbetons B 35 mit 2 Vol.-% Stahlfasern, der mehrfach be- und entlastet worden ist

6‰ in seiner Tragfähigkeit nur wenig beeinträchtigt worden. Die zweite Entlastung und die dritte Belastung bestätigen, daß Stahl-faserbeton den überwiegenden Teil der aufgebrachtten Energie verzehrt und daß selbst bei großer Stauchung eine beachtliche Tragfähigkeit erhalten bleibt. Weitergehende Untersuchungen an anderen Stahlfaserbetonen ergaben, daß ein vollständiger Verlust der Tragfähigkeit erst bei Stauchungen zwischen 30 und 50‰, also 3 bis 5 cm je Meter, eintritt. Phänomenologisch kann man somit feststellen, daß sich Stahlfaserbeton zumindest bis zu einer Stauchung von 10‰ wie ein „echter“ elasto-plastischer Stoff verhält.

Das Reststück eines Stahlfaserbeton-Zylinders, der mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet worden ist, zeigt Bild 22. Es ist zu erkennen, daß alle Stahlfasern aus der Matrix herausgezogen worden sind, was zugleich belegt, daß die bei der Belastung zugeführte Energie vor allem durch das Herausziehen der Fasern aus der Matrix aufgezehrt worden ist.

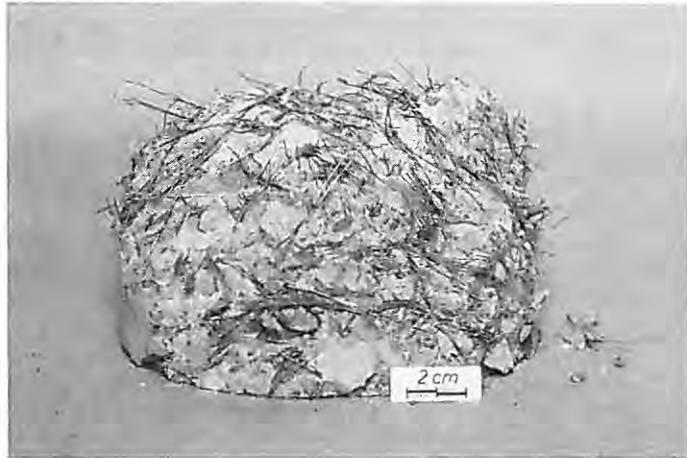


Bild 22 Reststück eines Zylinders aus Stahlfaserbeton, der auf Druck bis zum völligen Verlust seiner Tragfähigkeit belastet wurde. Die Stahlfasern sind nicht gerissen, sondern aus der Matrix herausgezogen worden.

Die Stoffkosten steigen durch Zugabe von 2 Vol.-% Stahlfasern um größenordnungsmäßig DM 300 je m^3 Beton an, also etwa um das Vierfache der Kosten des Ausgangsbetons. Eine Anwendung dürfte bei Normalbeton der jetzt gebräuchlichen Festigkeitsklassen daher nur wirtschaftlich sein, wenn außergewöhnlich große Verformungsenergien aufgenommen werden müssen, z. B. im Tunnelbau, für erdbebensichere Bauten, für Tresorbeton, für Schutzbauten und für dynamisch stark beanspruchte Bauteile, wie beispielsweise die Köpfe von Rammpfählen. Auch bei einer Entwicklung von Betonen mit außergewöhnlich hoher Festigkeit über 100 N/mm^2 dürfte eine Zugabe von entsprechenden Fasern notwendig sein, um die sonst auftretende Tendenz zur Versprödung zu kompensieren.

8. Folgerungen und Zusammenfassung

Aus den allgemeinen Betrachtungen über das Tragverhalten druckbeanspruchter Werkstoffe und aus den mitgeteilten Untersuchungsergebnissen an Beton lassen sich die nachstehenden, zusammenfassenden Schlußfolgerungen ziehen.

8.1 Bei einer Belastung wird dem Prüfkörper Energie zugeführt, die sich aus der einwirkenden Kraft und der Verformung in Kraft-richtung errechnet. Es hängt von den speziellen Eigenschaften des Werkstoffs und den umgebenden Bedingungen ab, wie diese Energie aufgenommen, gespeichert oder verzehrt wird.

8.2 Ideal-elastische Stoffe speichern die gesamte zugeführte Energie elastisch, bis ihre Speicherfähigkeit erschöpft ist; dann brechen sie schlagartig; sie sind spröde. Andere Stoffe speichern ebenfalls die zugeführte Energie zunächst elastisch; sie sind nach Erschöpfen ihrer Speicherfähigkeit jedoch in der Lage, gewisse Beträge weiter zugeführter Energie zu verzehren, und zwar durch plastische Verformungen, durch zeitabhängiges Fließen sowie durch Ausbilden innerer Risse. Solche Stoffe brechen nicht schlagartig; sie sind zäh. Wird die Energie durch Ausbilden innerer Risse verzehrt, dann wird der Werkstoff in seinen sonstigen Eigenschaften, wie z. B. der Tragfähigkeit, geschädigt.

8.3 Die für den Bruch erforderliche Energie ist gleich dem Integral der zugeführten Kraft über die Verformung in Krafrichtung, d. h. sie entspricht der Fläche unter der Arbeitslinie. Bei gleicher Festigkeit ist für den Bruch zäher Stoffe eine größere Energie erforderlich als für spröde Stoffe.

8.4 Einachsig auf Druck beanspruchter Zementstein bricht zwar nicht ausgesprochen spröde, aber seine Fähigkeit, Energie zu verzehren, ist sehr gering.

8.5 Demgegenüber kann auf Druck beanspruchter Normalbeton einen wesentlich größeren Anteil der aufgebrachten Energie verzehren. Die Energie wird allerdings durch Ausbilden innerer Risse aufgezehrt, die schon ab 50 % der Kurzzeitfestigkeit in der Kontaktzone von grobem Zuschlag und Matrix entstehen und die sich bei weitergehender Belastung dann in die Matrix hinein fortpflanzen.

8.6 Während bei einem spröden Stoff eine ungewollte Spannungsspitze zum Versagen der gesamten Konstruktion führen kann, ruft eine über die Festigkeit hinausgehende Spannungsspitze im Beton nur in einem lokal begrenzten Bereich energieverzehrende Mikrorisse hervor; die dadurch bedingte lokale Gefügeschädigung hat in der Regel keinen Einfluß auf die Tragfähigkeit der gesamten Konstruktion.

8.7 Mit zunehmender Festigkeit des Normalbetons ist eine Tendenz zum Verspröden erkennbar, d. h. der Beton kann zunächst aufgrund seiner hohen Festigkeit eine beträchtliche Energie ohne Ausbilden innerer Risse elastisch speichern, die dann jedoch bei weiterer Belastung das Ausbilden von Rissen und den Bruch beschleunigt.

8.8 Durch Zugabe von geeigneten Stahl- und Glasfasern läßt sich die für den Bruch von Normalbeton erforderliche Energie um ein

Vielfaches steigern. Die Fasern wirken in der Matrix zunächst als „Rißbremse“, und sie überbrücken dann die in der Matrix bei zu großer Dehnung entstehenden Risse, so daß auch dann noch eine hohe Tragfähigkeit vorhanden ist, wenn die Matrix von Rissen durchzogen ist. Die aufgebrauchte Energie wird bei der Belastung dadurch verzehrt, daß die Stahlfasern langsam aus der Matrix herausgezogen werden.

8.9 Die Stoffkosten für den Beton steigen durch einen ausreichenden Zusatz von Stahlfasern beträchtlich an, so daß derzeit eine Anwendung von Stahlfaserbeton nur dann wirtschaftlich ist, wenn außergewöhnlich große Verformungsenergien aufgenommen werden müssen, z. B. im Tunnelbau, für erdbebensichere Bauten, für Tresorbeton, für Schutzbauten und für dynamisch stark beanspruchte Bauteile, wie beispielsweise die Köpfe von Rammpfählen.

SCHRIFTTUM

- [1] Eibl, J., und G. Iványi: Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton, Teil A: Verhalten der einzelnen Komponenten. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 260, Berlin 1976 (Vertrieb durch Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn).
- [2] Cordes, H.: Über die Spannungs-Dehnungs-Linie der Werkstoffe Stahl und Beton im Bereich der Höchstlast. *beton* 24 (1974) H. 9, S. 338/341.
- [3] Teichen, K. T.: Über die innere Dämpfung von Beton. Schriftenreihe Otto-Graf-Institut, Amtliche Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen, Universität Stuttgart, Heft 38, Stuttgart 1968.
- [4] Spooner, D. C.: The stress-strain relationship for hardened cement pastes in compression. *Mag. of Concr. Res.* 24 (1972) Nr. 79, S. 85/92.
- [5] Swamy, R. N., und C. V. S. Kameswara Rao: Fracture mechanism in concrete systems under uniaxial loading. *Cem. and Concr. Res.* 3 (1973) Nr. 4, S. 413/427.
- [6] Spooner, D. C., und C. D. Pomeroy: Energy dissipating processes in the compression of cement paste and concrete. *Cem. and Concr. Res.* 3 (1973) Nr. 4, S. 481/486.
- [7] Wittmann, F. H., und J. Zaitsev: Verformung und Bruchvorgang poröser Baustoffe bei kurzzeitiger Belastung und Dauerlast. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 232, Berlin 1974, S. 65/141 (Vertrieb durch Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn).
- [8] Spooner, D. C., und J. W. Dougill: A quantitative assessment of damage sustained in concrete during compressive loading. *Mag. of Concr. Res.* 27 (1975) Nr. 92, S. 151/160.
- [9] Spooner, D. C., C. D. Pomeroy und J. W. Dougill: Damage and energy dissipation in cement pastes in compression. *Mag. of Concr. Res.* 28 (1976) Nr. 94, S. 21/29.
- [10] Wischers, G.: Aufnahme von Druckkräften in Schwerbeton und in Leichtbeton. *beton* 17 (1967) H. 5, S. 183/186; ebenso *Betontechnische Berichte* 1967, Beton-Verlag, Düsseldorf 1968, S. 53/62.
- [11] Lusche, M.: Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 1971; ebenso *Schriftenreihe der Zementindustrie*, H. 39, Beton-Verlag, Düsseldorf 1972.

- [12] Wischers, G., und M. Lusche: Einfluß der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal- und Leichtbeton. beton 22 (1972) H. 8, S. 343/347, und H. 9, S. 397/403; ebenso Betontechnische Berichte 1972, Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 135/163.
- [13] Rehm, G., P. Diem und R. Zimbelmann: Technische Möglichkeiten zur Erhöhung der Zugfestigkeit von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 283, Berlin 1977 (Vertrieb durch Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn).
- [14] Rüsck, H.: Physikalische Fragen der Betonprüfung. Zement-Kalk-Gips 12 (1959) H. 1, S. 1/9.
- [15] Hsu, T. T. G., F. O. State, G. M. Stuman und G. Winter: Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve. Proc. Amer. Concr. Inst. 60 (1963) Nr. 2, S. 209/224.
- [16] Wischers, G.: Faserbewehrter Beton. beton 24 (1974), H. 3, S. 95/99, und H. 4, S. 137/141; ebenso Betontechnische Berichte 1974, Beton-Verlag, Düsseldorf 1975, S. 45/70.
- [17] Swamy, R. N., und P. S. Mangat: The onset of cracking and ductility of steel fiber concrete. Cem. and Concr. Res. 5 (1975) Nr. 1, S. 37/53.