

Einfluß der inneren Spannungsverteilung das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal- und Leichtbeton

Von Gerd Wischers und Manfred Lusche, Düsseldorf

Übersicht

Beton mit geschlossenem Gefüge ist ein Zweistoff-System aus den beiden Komponenten Zuschlag und Zementstein, bei dem die Zuschlagkörner in eine Matrix aus Zementstein eingebettet sind. Zuschlag und Zementstein können sehr unterschiedliche elastische und plastische Eigenschaften besitzen und von unterschiedlicher Festigkeit sein. Wird ein Beton durch äußere Kräfte gleichmäßig beansprucht, so stellt sich dennoch in seinem Inneren durch den verformungsmäßig inhomogenen Aufbau ein ungleichmäßiger Kraftfluß ein, der zudem für Normalbeton und Leichtbeton charakteristische Unterschiede aufweist. Bei gleichmäßiger äußerer Druckbeanspruchung entstehen im Beton sowohl Bereiche, in denen vorwiegend Druckspannungen auftreten, als auch Bereiche, in denen erhebliche Zugspannungen wirken. Nur diese Zugspannungen sind in der Lage, beim Überschreiten der örtlichen Festigkeiten Risse hervorzurufen. Das Auftreten der ersten Risse (Mikrorisse) kann man als Beginn des Bruchvorgangs auffassen.

Mit elektrischen und optischen Analogiemodellverfahren wurde die Verteilung und die Größe der Druck- und Zugspannungen in Modellbetonen gemessen. Aus den Ergebnissen wurde eine Bruchhypothese entwickelt, die sowohl für Normal- als auch für Leichtbetone gilt. Die Aussagen dieser Bruchhypothese konnten durch Untersuchungen der Spannungsverteilung an der Oberfläche von Betonkörpern, durch Untersuchungen des Verformungsverlaufs bis zum Bruch und durch Auswertungen von Riß- und Bruchbildern bestätigt werden. Aus der Bruchhypothese lassen sich darüber hinaus in allgemeiner Form die notwendigen Anforderungen an die Zusammensetzung für hochfeste Normal- und Leichtbetone ableiten.

1. Allgemeines

Allgemein versteht man heute unter Beton ein Zweistoff-System, bei dem in eine Matrix aus einem gleichmäßigen festen Stoff ein zweiter Stoff in gekörnter Form eingeführt ist. Für die Eigenschaften des Verbundstoffs sind die Eigenschaften der Matrix, die des gekörnten, festen Stoffs (des Zuschlags), die volumenmäßigen Anteile von Matrix und Zuschlag sowie die Wechselwirkung zwischen Matrix und Zuschlag in unterschiedlichem Maße bestimmend.

Bei zementgebundenem Beton mit geschlossenem Gefüge besteht die Matrix aus Zementstein bzw. Zementmörtel. Als Zuschlag finden für Normalbeton im allgemeinen dichte, natürlich gekörnte oder gebrochene Naturgesteine (Sand, Kies, Splitt, Schotter) und für Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge porige, meist künstlich hergestellte, anorganische Stoffe (Blähton, Blähschiefer, Hüttenbims) Verwendung.

In die rechnerische Ermittlung der Zusammensetzung von Normalbeton bestimmter Festigkeit gehen dominierend die beiden Einflußgrößen Wasserzementwert und Zementfestigkeit ein. Mit diesen beiden Kenngrößen, deren Einfluß auf die Druckfestigkeit von Normalbeton mit geschlossenem Gefüge auf empirischer Grundlage ermittelt und in Formeln oder Nomogrammen dargestellt wurde, sowie mit den ebenfalls empirisch gewonnenen Kenntnissen über die zweckmäßige Zuschlagkornzusammensetzung kann man Mischungen für Betone bis zu 600 kp/cm^2 Druckfestigkeit zuverlässig entwerfen. Bei höheren Festigkeiten machen sich weitere Einflußgrößen zunehmend bemerkbar, die bei niedrigen und mittleren Festigkeiten vernachlässigt werden können.

Die Zusammensetzung von Konstruktions-Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge läßt sich nicht ohne weiteres berechnen, sondern bedarf stets über die üblichen Eignungsprüfungen hinausgehender Betonversuche. Mit zunehmender Betondruckfestigkeit ist hier nicht mehr allein die Festigkeit des Zementsteins, die weitgehend durch den Wasserzementwert und die Zementfestigkeit bestimmt ist, maßgebend, sondern weitere Eigenschaften der Ausgangsstoffe sowie das durch die Betonstruktur beeinflusste Zusammenspiel der beiden Betonkomponenten gewinnen an Bedeutung.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden deshalb grundlegende Untersuchungen über die Aufnahme und Ableitung von Druckkräften in Normal- und Leichtbeton durchgeführt [1]. Besondere Beachtung wurde dabei dem Einfluß des inneren Aufbaus, d. h. der Struktur der Betone, auf die Druckfestigkeit gewidmet. Ziel dieser Grundlagenforschung war es, das Verhalten von Normalbeton wie auch von Leichtbeton unter steigender Druckbeanspruchung bis zum Bruch zu untersuchen und hieraus eine für beide Betone gültige Vorstellung über das Tragverhalten und den Bruch abzuleiten, die mit anderen bekannten Untersuchungsergebnissen in Einklang stehen sollte. Eine allgemeingültige Hypothese über das Trag- und Bruchverhalten des Betons sowie der verschiedenen quantitativ erfaßten Einflußgrößen erlaubt auch, Folgerungen für den Entwurf und den Aufbau hochfester Betone aus Normal- und Leichtzuschlag abzuleiten.

2. Auswertung des Schrifttums

Wird ein festes Zweistoff-System äußerlich gleichmäßig auf Druck beansprucht, dann treten auch im Inneren nur dann gleichgerichtete und gleich große Spannungen auf, wenn die durch die Belastung hervorgerufenen Verformungen von Matrix und Zuschlag gleich sind (dann wirken beide zusammen wie ein homo-

gener Körper). Im allgemeinen besitzen Matrix und Zuschlag jedoch recht unterschiedliche Eigenschaften, z. B. ist der Elastizitätsmodul des üblichen, dichten Zuschlags für Normalbeton mehrfach größer und der des porigen Zuschlags häufig mehrfach kleiner als der der Matrix. Trotz äußerlich gleichmäßiger Beanspruchung treten dann im Inneren des verfestigten Zweistoff-Systems Spannungen auf, die im Vergleich zur mittleren Druckspannung mehrfach größer oder kleiner sein können.

2.1 Mikrorisse

In Teilbereichen besonderer Spannungskonzentration muß daher bereits mit einem Überschreiten der Festigkeit und dadurch mit dem Entstehen von örtlich begrenzten Rissen gerechnet werden, wenn die mittlere Spannung noch weit unterhalb der Bruchspannung der beiden Stoffe liegt und auch die Tragfähigkeit des Zweistoff-Systems noch nicht erschöpft ist. Durch diese örtlich begrenzten Risse tritt eine Änderung des Tragsystems auf, die für die Bruchlast letztlich entscheidend sein kann.

Auf das Entstehen solcher örtlich begrenzten Risse kann auch die beobachtete Abweichung der Spannungsdehnungslinie der Betone von dem linearen Hookeschen Zusammenhang von Spannung und Dehnung zurückgeführt werden. Ebenfalls kann man das Entstehen der Krümmungsumkehr der Spannungsdehnungslinie der Betone bei mehrfachem Be- und Entlasten durch das Entstehen von Rissen in der Betonstruktur deuten.

Örtlich begrenzte, sehr kleine Risse, die als *Mikrorisse* bezeichnet werden, wurden zuerst mit Hilfe röntgenografischer Untersuchungsmethoden an Normalbetonscheiben, die aus auf Druck vorbelasteten Betonzylindern gesägt wurden, nachgewiesen [2]. Diese Risse gingen von Fehlstellen im Betongefüge aus, die schon vor der Belastung vorhanden waren. Sie wurden vorwiegend in der Haftzone von Zuschlag und Zementstein gefunden. Mit Hilfe von anderen Untersuchungsmethoden, z. B. mit Ultraschalldurchstrahlung, konnten erste Mikrorisse in Normalbetonkörpern bei 30 bis 60 % der Bruchlast festgestellt werden [3, 4, 5].

Die Untersuchung der ersten Risse im Beton zeigte, daß die Spannungsdehnungslinie und damit auch die Tragfähigkeit von auf Druck beanspruchtem Normalbeton maßgeblich vom Beginn der Mikrorißentstehung zwischen Zuschlag und Zementstein, d. h. von der Haftfestigkeit der Haftschrift zwischen Zuschlag und Zementstein, beeinflußt werden. Untersuchungen der Zugfestigkeit des Zementsteins und der Zugfestigkeit der Haftschrift zwischen Zuschlag und Zementstein wiesen nach, daß die Haftzugfestigkeit im allgemeinen nur etwa 70 % der Zugfestigkeit des reinen Zementsteins beträgt [6, 7]. Je nach Oberflächenbeschaffenheit des Zuschlags und seiner chemisch-mineralogischen Zusammensetzung kann dieser Prozentsatz auch etwas größer oder kleiner sein.

Der Einfluß der Haftfestigkeit zwischen Zementstein und Zuschlag auf die Festigkeit des Betons konnte auch dadurch abgeschätzt werden, daß die Haftung durch geeignete Beschichtung

der Zuschlagkörner unterbunden wurde [8, 9, 10]. Im Extremfall wurde ohne Haftung nur $\frac{1}{10}$ der Druckfestigkeit des Betons festgestellt, dessen Zuschlag nicht vorbehandelt war.

2.2 Spannungsverteilung

Die bei der Belastung von Betonkörpern auftretenden Mikrorisse müssen ihre Ursache in örtlichen Spannungskonzentrationen haben. Solche Spannungskonzentrationen treten in der Umgebung der Zuschlagkörner auf, wie es Berechnungen an sehr vereinfachten ebenen Betonmodellen mit nur einem Zuschlagkorn zeigten [11, 12, 13]. Bild 1 zeigt als Ergebnisse solcher Berechnungen die Spannungsverteilung um ein Zuschlagkorn in einem Normalbetonmodell. In Richtung des von außen wirkenden Druckes entstehen hohe Druckspannungen, die seitlich des Zuschlagkorns stark abfallen, so daß dort sogar Zugspannungen entstehen.

Für Leichtbetonmodelle sind solche Berechnungen bisher nicht durchgeführt worden. Der Extremfall der Spannungsverteilung um ein Leichtzuschlagkorn mit dem E-Modul Null, d. h. um ein Loch in einer Matrix, gestattet es jedoch, die Spannungsverteilung um Leichtbetonzuschlagkörner qualitativ darzustellen. Für diesen Fall liegen Berechnungen vor, die ebenfalls eine Druck- und Zugspannungsverteilung um das „Zuschlagkorn“ zeigen [11].

2.3 Betonmodelle

Über die Verformung unter Last und den Bruch von Normalbeton wurden von verschiedenen Autoren Hypothesen aufgestellt und durch die Untersuchung besonderer Betonmodelle ergänzt. Diese Betonmodelle wiesen übereinstimmend eine Gitterstruktur auf, in der den Gitterstäben unterschiedliche Verformungen und Festigkeiten zugeordnet wurden [14, 15, 16, 17]. Damit konnte die Modellstruktur so angelegt werden, daß die an üblichem Beton experimentell bestimmten Verformungen unter ein- oder mehr-

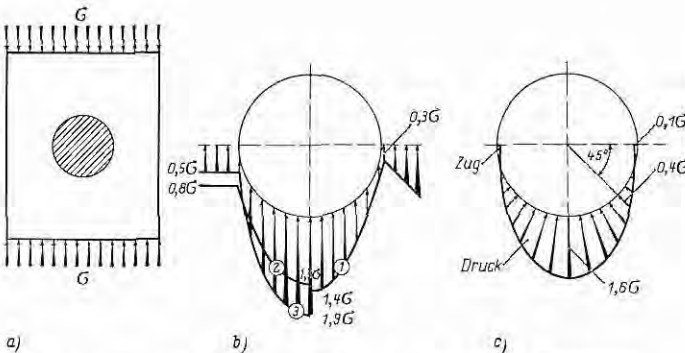


Bild 1 Spannungsverteilung um ein Zuschlagkorn in einem Betonmodell

- a) Betonmodell
- b) Spannungsverteilung nach Sawin [11] sowie Mehmel und Kern [12]
- c) Spannungsverteilung nach Franz [13]

achsigen Belastungen weitgehend vom Modell wiedergegeben wurden. Mit diesen Modellvorstellungen konnte das Entstehen von Rissen und ihre Lage im Beton, bezogen auf die äußere Druckkraftrichtung, durch das Versagen einzelner Stäbe und damit auch die Krümmung der Spannungsdehnungslinie gedeutet werden.

Da es mit Hilfe der Strukturmodelle jedoch nicht gelungen ist, durch Angabe von Kennwerten für den Zementstein und den Zuschlag Vorhersagen über die Festigkeit des Verbundsystems zu gewinnen, wurden andere, strukturorientierte Modelle entwickelt, die das Bruchverhalten des Betons mit Modellgleichungen beschreiben [18]. Diese strukturorientierten Modelle sind bisher experimentell nur an Betonen mit Zuschlag einer Korngröße überprüft und mathematisch entwickelt worden. Dazu mußten die einzelnen Parameter der Modellgleichung durch eine Vielzahl von Einzelversuchen mit anschließender statistischer Auswertung bestimmt werden.

2.4 Aufnahme von Druckkräften im Beton

Aus den Unterschieden im E-Modul und den Festigkeiten der Normalbeton- und Leichtbetonzuschläge können prinzipielle Vorstellungen über die Spannungsverteilung und die Kraftableitung bei äußerer Belastung in Normalbeton- und Leichtbetonkörpern hergeleitet werden [19]. Bei Normalbeton haben die groben Zuschläge einen wesentlich höheren E-Modul und eine höhere Festigkeit als der Zementmörtel. Durch den höheren E-Modul verlaufen die Druckspannungen im wesentlichen von Zuschlagkorn zu Zuschlagkorn und beanspruchen die dazwischenliegenden Mörtelschichten überwiegend rechtwinklig zur Schichtebene. Bei Leichtbeton findet eine Spannungskonzentration in den Mörtelstege zwischen den Zuschlägen statt, weil die Mörtelstege einen höheren E-Modul aufweisen. Während die Festigkeit des Normalbetons praktisch nur von der Festigkeit des Mörtels abhängt, wird die Festigkeit des Leichtbetons mit geschlossenem Gefüge außerdem von der Festigkeit, von dem Volumenanteil und zum Teil auch vom Größtkorn des Zuschlags mitbestimmt.

3. Untersuchungsverfahren

Die stark inhomogene, statistisch unterschiedliche Struktur des Betons macht es fast unmöglich, quantitative und aussagekräftige Messungen der Spannungsverteilung in seinem Inneren durchzuführen. Allgemeingültige Aussagen ließen dagegen Messungen an Betonmodellen erwarten. Dem Wesen des Betons entsprechend konnten die Modelle so aufgebaut werden, daß sie aus einer einheitlichen Matrix bestanden, in die dann beim Normalbeton Zuschläge oder Einschlüsse mit höherem E-Modul und beim Leichtbeton Zuschläge mit niedrigerem E-Modul eingebettet wurden. Für spannungsoptische Untersuchungen bestand der Modellbeton aus optisch aktivem Kunststoff mit eingebetteten Einschlüssen, für elektrische Untersuchungsverfahren wurde als Modellbeton eine Flüssigkeit definierter Leitfähigkeit mit eingetauchten Einschlüssen (Zuschlägen) anderer Leitfähigkeit bzw.

es wurden elektrisch leitfähige Papiere mit abgegrenzten Flächen anderer Leitfähigkeit als Zuschlagkörner verwendet. Alle Betonmodelle waren symmetrisch aufgebaut, und aus Symmetriegründen war es auch ausreichend, nur zweidimensionale Modelle zu verwenden.

Die Übertragung der mit Hilfe der Modelle gewonnenen Ergebnisse auf reale Betone wurde durch Messungen an geschliffenen Betonoberflächen überprüft. Dazu wurde die Spannungsverteilung an der angeschliffenen Oberfläche von einachsig belasteten Betonen qualitativ durch ein spannungsoptisches Oberflächenschichtverfahren und quantitativ mit Dehnungsmeßstreifen kurzer Meßlänge ermittelt.

3.1 Elektrische Modellmeßmethoden

In einem flüssigen Elektrolyten zwischen zwei Elektroden, die von einem Wechselstromgenerator gespeist werden, baut sich ein elektrisches Feld auf. Das stationäre elektrische Feld wird durch ähnliche Potentialgleichungen beschrieben wie ein mechanisches Spannungsfeld in einem durch gleichmäßigen Druck beanspruchten homogenen Körper. Diese formale Übereinstimmung gilt auch dann, wenn das elektrische Feld durch Einschlüsse höherer oder niedrigerer elektrischer Leitfähigkeit gestört wird – entsprechend Einschlüssen oder Zuschlägen mit höherem oder niedrigerem E-Modul in einem mechanischen Modell. Man kann an dem elektrischen Modell daher messen, wie die Einschlüsse das homogene Feld beeinflussen und wie groß die dadurch verursachte Spannungskonzentration in der Umgebung der Einschlüsse ist.

Als Elektrolyt diente Wasser in einem flachen Trog aus Plexiglas. Gemessen wurde mit Sonden, die zur Bestimmung der Lage der Linien gleichen Potentials im Modell und zur Bestimmung der Größe der Feldgradienten an einzelnen Modellpunkten dienten. Die Sonden bestanden aus feinen Drahtspitzen, die in den Elektrolyten eingetaucht und so beweglich angeordnet waren, daß jeder Punkt des Modells leicht erreicht werden konnte. Mit einer Brückenschaltung, zu der noch ein Potentiometer und ein Anzeigeelement gehörten, wurde die Lage der Äquipotentiallinien bestimmt und aus ihnen die darauf senkrecht stehenden Spannungslinien konstruiert. Die Größe der Feldgradienten wurde an einzelnen besonders interessierenden Modellpunkten mit einer Doppelsonde bestimmt.

Bild 2 zeigt die gesamte Meßeinrichtung mit dem Trog, der Sonde, dem Potentiometer, dem Wechselspannungsgenerator und den Anzeigeelementen.

Vorteile dieses Meßverfahrens sind die große Homogenität des Elektrolyten, die einfache Anordnung von Einschlüssen beliebiger Form und Leitfähigkeit sowie die leichte Meßbarkeit von elektrischen Strömen und Spannungen. Ein gewisser Nachteil hinsichtlich der Übertragbarkeit auf das mechanische Spannungsfeld besteht allerdings darin, daß die Spannungen ohne Verformungen des Modells auftreten und daß die Haftung zwischen Matrix und Einschlüssen nicht variiert werden kann. Die Messungen mit dem elektrolytischen Modell kann man daher nur für Aussagen über die Spannungen in der ersten Phase der Belastung heranziehen.

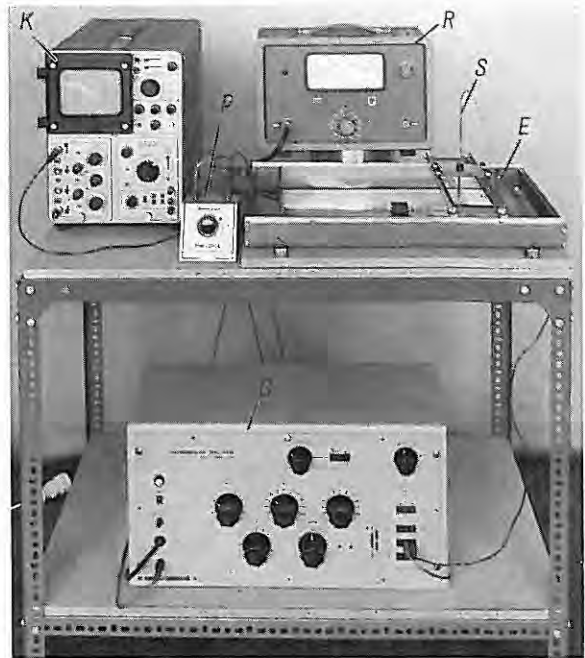


Bild 2 Meßeinrichtung für das elektrische Analogiemodell

E = Elektrode	G = Generator
S = Sonde	R = Röhrevollmeter
P = Potentiometer	K = Kathodenstrahloszillograph

Als Ergänzung und Bestätigung der Messungen mit dem elektrolytischen Trog wurden Untersuchungen an ebenen Modellen aus einem Spezialpapier mit geringer elektrischer Leitfähigkeit durchgeführt. Diese Modellmeßmethode hat den meßtechnischen Vorteil, daß im Gegensatz zum elektrolytischen Trog mit Gleichspannungsquellen gearbeitet werden kann; dadurch werden Fehlmessungen infolge von Kapazitätseinflüssen vermieden. Es ist mit dieser Meßmethode leicht möglich, beliebige Modellformen auszuschneiden und darin Einschlüsse einzuzichnen oder auszustanzen.

3.2 Spannungsoptische Modellmeßmethoden

Grundlage des spannungsoptischen Modellmeßverfahrens ist das Sichtbarmachen des Spannungszustandes in einem durch äußere Kräfte belasteten ebenen Modell aus optisch aktivem Stoff, wie z. B. einigen durchsichtigen Kunstharzen in polarisiertem Licht. In Bild 3 ist die Meßanordnung dargestellt. Das aus einem Lichtkasten austretende Licht wird durch einen Polarisator polarisiert und geht dann durch das Modell. Hinter dem Modell ist der Analysator angeordnet, der ebenso wie der Polarisator nur in einer Ebene schwingende Lichtwellen durchläßt. Wird das Modell belastet, dann sieht der Beobachter Interferenzlinien in dem Mo-

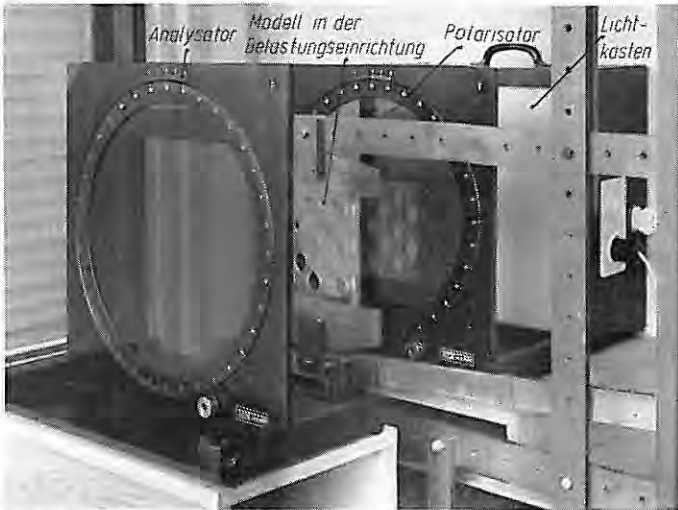


Bild 3 Meßeinrichtung für das spannungsoptische Modellverfahren

dell, die sogenannten Isochromaten und Isoklinen, die Linien gleicher Hauptspannungsdifferenz bzw. Linien gleicher Hauptspannungsrichtung darstellen.

Um den Spannungszustand im Kunststoffmodell punktweise quantitativ auswerten zu können, muß neben der Auszählung der Isochromatenordnung, die die Hauptspannungsdifferenz an dem betrachteten Modellpunkt liefert, als weitere Messung an der gleichen Stelle die Dickenänderung des Modells, die der Hauptspannungssumme proportional ist, gemessen werden. Die punktweise Dickenmessung wurde mit einem elektrischen Lateralextensometer durchgeführt, das an jedem Punkt des ebenen Modells angesetzt werden konnte.

3.3 Meßverfahren an Betonoberflächen

Am Beton selbst wurden ebenfalls spannungsoptische Untersuchungen durchgeführt, nur mußte hier das schon beschriebene spannungsoptische Meßverfahren abgewandelt werden in der Art, daß die aufgetragene optisch aktive Schicht im reflektierten polarisierten Licht betrachtet wurde. Hierzu wurde eine rd. 2 mm dicke, optisch aktive Kunststoffschicht auf einer Seite verspiegelt und mit dieser Seite auf die geschliffene Betonoberfläche geklebt. Während des Belastungsvorgangs überträgt sich die Verformung der Betonoberfläche auf die Kunststoffschicht und kann so im reflektierten polarisierten Licht der direkten Beobachtung zugänglich gemacht werden. Bei diesem Oberflächenschichtverfahren sind Polarisator und Analysator praktisch nebeneinander angeordnet, wie in Bild 4 schematisch dargestellt.

Zur quantitativen Erfassung des Spannungs-Verformungs-Zustandes der Oberfläche eines belasteten Betonkörpers wurden Deh-

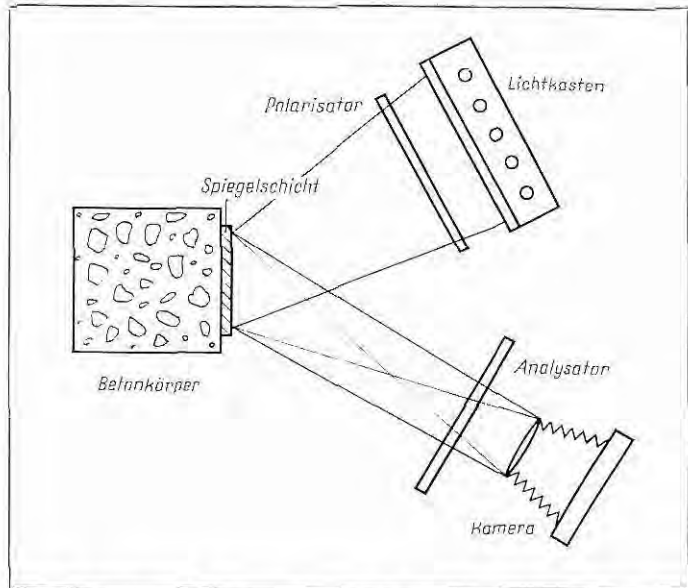


Bild 4 Meßaufbau für das spannungsoptische Oberflächenschichtverfahren

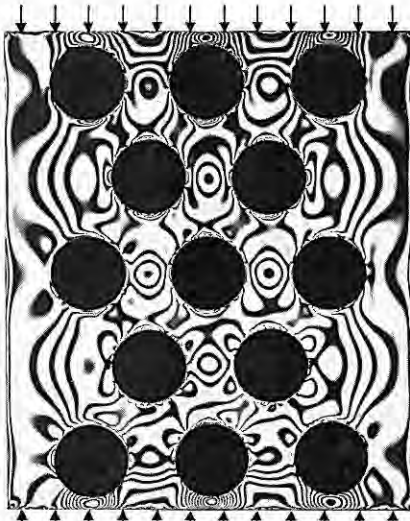
nungsmößstreifen verwendet, die nach dem Entfernen der optisch aktiven Spiegelschicht über die optisch qualitativ ermittelten Bereiche größter Verformung geklebt wurden. Als Dehnungsmößstreifen wurden Rosetten mit rd. 3 mm aktiver Länge und Dehnungsmößstreifenketten mit 10 Dehnungsmößstreifen von je 0,6 mm aktiver Länge verwendet. Dieses Meßverfahren liefert nur an einzelnen Stellen der Betonoberfläche Ergebnisse, die zudem über die aktive Meßstreifenlänge gemittelt sind.

4. Versuchsergebnisse

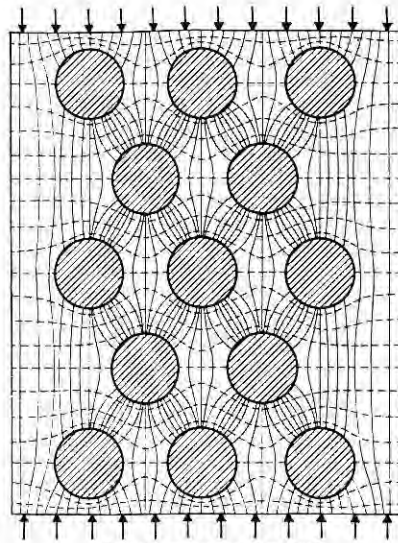
4.1 Hauptspannungslinien

Den charakteristischen Unterschied im Kräfteverlauf durch druckbeanspruchte Normal- und Leichtbetonmodelle, der sich aufgrund der unterschiedlichen Verhältnisse der E-Moduln von Matrix und Zuschlagmaterial einstellt, zeigt Bild 5. Es zeigt zwei durch einachsigen Druck beanspruchte Betonmodelle, oben das Normalbetonmodell und unten das Leichtbetonmodell. Links ist jeweils das spannungsoptische Isochromatenbild dargestellt und rechts das zugehörige aus den Isoklinen konstruierte Bild der Hauptspannungslinien. Aus den spannungsoptischen Bildern ist zu erkennen, daß sich im Normalbetonmodell die Spannungen vorwiegend auf die Zuschlagkörner konzentrieren und im Leichtbetonmodell vorwiegend auf die Matrixschichten zwischen den Zuschlagkörnern.

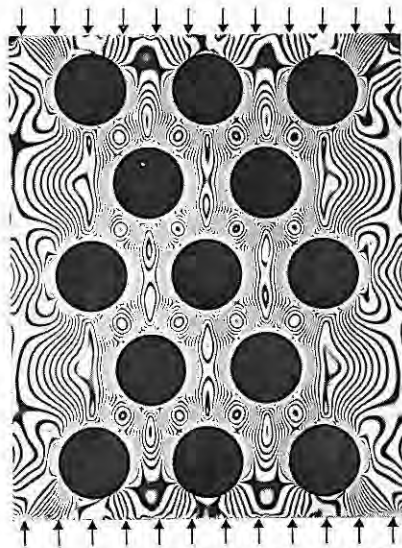
Den Verlauf der Druckspannungen geben die Hauptspannungslinien an. In einem homogenen Körper würden die Spannungs-



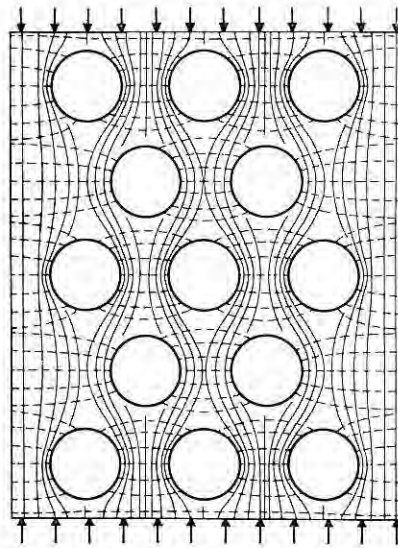
Spannungsoptisches Isochromatenbild



Hauptspannungslinienbild



Spannungsoptisches Isochromatenbild



Hauptspannungslinienbild

Bild 5 Spannungsverteilung im Normalbetonmodell (oben) und Leichtbetonmodell (unten)

linien parallel zur Richtung der äußeren Last und stets im gleichen Abstand voneinander verlaufen. Das bedeutet, daß in diesen Körpern in allen Punkten eine gleichgerichtete, gleich große Druckspannung herrschen würde. Im Normalbetonmodell hingegen werden die Hauptspannungslinien quasi durch die weniger

verformbaren Zuschläge angezogen. Sie verlaufen nicht mehr parallel zur äußeren Druckkraft, sondern konzentriert von Zuschlagkorn zu Zuschlagkorn. An bestimmten Stellen des Modells treten dadurch Zonen mit Spannungskonzentrationen und an anderen Stellen Zonen mit sehr geringer Spannung auf.

Im Leichtbetonmodell verlaufen die Hauptspannungslinien vorwiegend in der Matrix, sie weichen den leicht verformbaren Zuschlägen aus und bilden so im Modell ebenfalls Bereiche, in denen Spannungsspitzen und spannungsarme Bereiche erwartet werden können.

4.2 Mikrorisse

Der in dem inhomogenen Stoff Beton ungleichmäßige Verlauf der Hauptspannungslinien hat zur Folge, daß um die einzelnen Zuschlagkörner Bereiche mit vorwiegend Druck- und Bereiche mit vorwiegend Zugspannungen entstehen. In Bild 6 ist die Spannungsverteilung um ein einzelnes Normalbeton-Zuschlagkorn schematisch dargestellt, wie sie in elektrischen und spannungsoptischen Untersuchungen festgestellt wurde. In Richtung der äußeren Kraft entstehen Bereiche mit erhöhter Druckspannung und seitlich vom Zuschlagkorn Bereiche, in denen Zugspannungen auftreten, die ihr Maximum in der Haftzone von Zuschlagkorn und Matrix haben und mit der Entfernung vom Zuschlagkorn rasch abklingen. Diese Zugspannungen sind senkrecht zur äußeren Kraft-richtung gerichtet.

Wie grundlegende theoretische Untersuchungen gezeigt haben [20, 21], können nur Zugspannungen zu Rissen führen. Bei zunehmender äußerer Druckbeanspruchung entstehen deshalb mit Erreichen der Haftzugfestigkeit zwischen Zuschlagkorn und Matrix in der Haftzone die ersten Mikrorisse. Diese Mikrorisse müssen sich rechtwinklig zur dort herrschenden Zugspannungsrichtung ausbreiten; so ergibt sich aus dem schematischen Bild der Span-

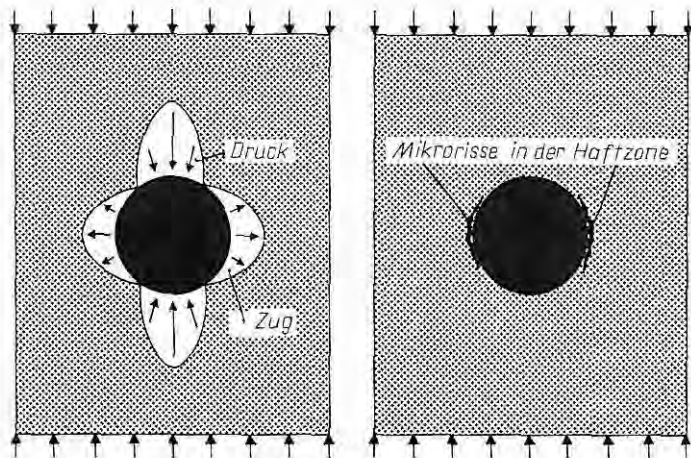


Bild 6 Spannungsverteilung und Mikrorißbildung im belasteten Normalbetonmodell mit einem Einschuß

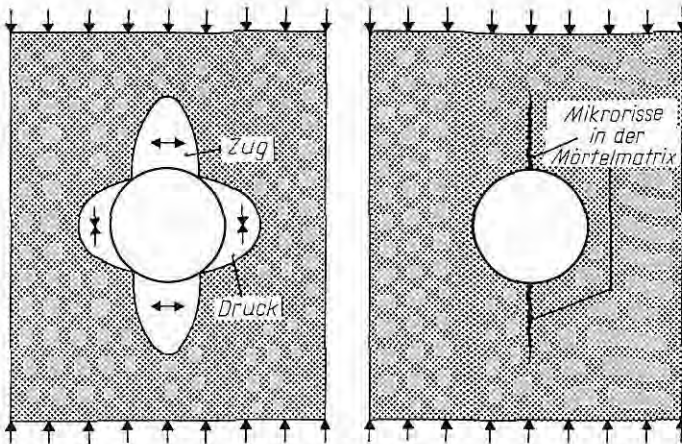


Bild 7 Spannungverteilung und Mikrorissbildung im belasteten Leichtbetonmodell mit einem Einschluss

nungsverteilung um ein Zuschlagkorn (Bild 6, links) das schematische Bild der Mikrorisse (Bild 6, rechts).

Die wesentlich andersartige Beanspruchung eines Leichtbetonzuschlagkorns wird durch Bild 7 deutlich. Die für die Ribbildung kritischen Zugspannungen entstehen oberhalb und unterhalb des Zuschlagkorns. Sie sind wieder rechtwinklig zur äußeren Druckkraft gerichtet. Seitlich vom Zuschlagkorn bilden sich Bereiche mit vorwiegend erhöhter Druckspannung. Die maximalen Zugspannungen entstehen wieder unmittelbar am Zuschlagkorn und nehmen mit der Entfernung vom Zuschlagkorn rasch ab.

Aus der Spannungsverteilung um das Leichtzuschlagkorn (Bild 7, links) folgt, wie beim Normalbeton schon beschrieben, zwangsläufig das Bild der Mikrorisse (Bild 7, rechts). Die Mikrorisse entstehen in der Berührungszone von Zuschlagkorn und Matrix beim Erreichen der Zugfestigkeit der Matrix und verlaufen wieder parallel zur äußeren Druckkraft, jedoch nicht wie beim Normalbeton in der Haftzone von Zuschlagkorn und Matrix, sondern radial zum Leichtbetonzuschlagkorn in der Matrix selbst. Bei höherer Belastung gehen die Mikrorisse meist durch das Zuschlagkorn hindurch (nicht eingezeichnet).

4.3 Form, Größe und Abstand der Zuschlagkörner

Die Größe der Zug- und Druckspannungen um Zuschlagkörner ist nicht allein von der Größe des äußeren Drucks abhängig, sondern wird wesentlich von der Geometrie der Zuschlagkörner und dem Kornaufbau des Betons bestimmt. So nimmt unter sonst gleichen Bedingungen die Spannungskonzentration erheblich mit der Abweichung der Kornform von der Kugelgestalt zu, also z. B. bei langgestreckten Zuschlagkörnern. Ebenso wirkt unter sonst gleichen Bedingungen eine zunehmende Größe des Zuschlagkorns spannungserhöhend. Die größten Spannungskonzentrationen entstehen an Ecken und Kanten von groben Zuschlagkörnern. Bild 8 zeigt als Beispiel Meßergebnisse an Normalbetonmodellen mit

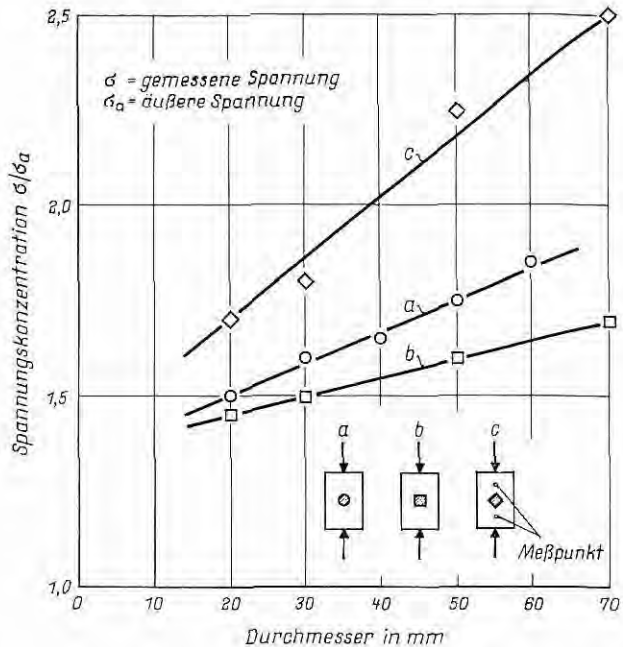


Bild 8 Einfluß der Einschußgröße auf die Spannungskonzentration

nur einem, jedoch unterschiedlich geformten und unterschiedlich großen Zuschlagkorn. Auf der Abszisse ist der Korndurchmesser bzw. die Kantenlänge aufgetragen und auf der Ordinate die Spannungskonzentration, d. h. das Verhältnis von der im Modell gemessenen Spannung zur „äußeren Spannung“). Die Spannungskonzentration nimmt mit dem Durchmesser bzw. der Kantenlänge der Zuschlagkörner zu; sie ist ferner bei einem auf einer Spitze belasteten quadratischen Zuschlagkorn beträchtlich größer als bei runden oder auf der Seitenfläche belasteten quadratischen Zuschlagkörnern.

Bild 9 zeigt entsprechend die Spannungskonzentration im Zementstein zwischen zwei Körnern, die in Druckrichtung angeordnet sind, in Abhängigkeit vom gegenseitigen Abstand und von der Größe der Körner. Die runden bzw. quadratischen Körner haben gleichen Durchmesser bzw. gleiche Kantenlänge. Die Anordnung der Einschlüsse in den Modellen (3 Normalbetonmodelle und 1 Leichtbetonmodell) ist in Bild 9 oben angegeben. Zwischen Normalbetonzuschlägen wurde die größte Spannungskonzentration gemessen, wenn sie in Richtung der äußeren Kraft angeordnet waren (Kurven a, b, c). Zwischen diesen Zuschlägen sind die Hauptspannungslinien auf kleine Flächen konzentriert und bewirken so den

*) Unter „äußerer Spannung“ wird die Spannung verstanden, die durch die gleiche Kraft in einem gleichartigen, jedoch homogenen Modell erzeugt würde.

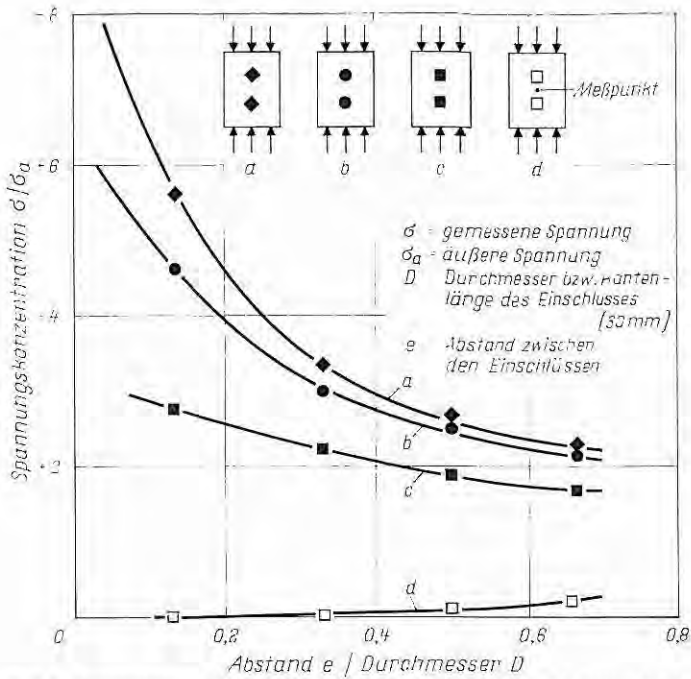


Bild 9 Spannungskonzentration zwischen zwei Einschlüssen bei unterschiedlichem Abstand und unterschiedlicher Einschlussform

Spannungsanstieg. Je kürzer der Abstand zwischen den Einschlüssen wird, um so kleiner wird diese Fläche und um so höher die Spannungsspitze. Waren die Normalbetonzuschläge nebeneinander angeordnet (diese Meßergebnisse sind hier nicht wiedergegeben), so verliefen die Hauptspannungslinien vorwiegend durch die Zuschlagkörner. Zwischen ihnen nahm dann die Spannung mit geringer werdendem Abstand ab, ebenso wie zwischen zwei Leichtzuschlagkörnern entsprechend dem Leichtbetonmodell d. Man erkennt aus Lage und Verlauf der Kurven a, b und c, inwieweit die Form der Zuschlagkörner und ihr gegenseitiger Abstand Einfluß nehmen. Die Kornform war dabei von deutlich geringerem Einfluß als der Abstand.

4.4 Kornzusammensetzung des Zuschlags

Von wesentlichem Einfluß auf die Größe der Spannungen um die Zuschlagkörner ist ferner die Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches. Die ungünstigste Spannungsverteilung (d. h. die größten örtlichen Spannungen) tritt dann im Beton auf, wenn nur Körner einer Größe vorhanden sind. Wird ein solcher Einkorn-Normalbeton durch eine weitere Zwischenkörnung mit kleinerem Korndurchmesser ergänzt, dann nehmen die Spannungen an den zuerst allein vorhandenen größeren Körnern ab, da die von außen aufgebraachte Druckspannung auf eine größere Zahl von

Zuschlägen verteilt wird. Der Kräfteverlauf von Zuschlagkorn zu Zuschlagkorn wird stärker aufgefächert, d. h. die Anzahl der durch ein Zuschlagkorn verlaufenden Hauptspannungslinien und damit der Druckanteil nehmen ab.

Experimentelle Untersuchungen [1] haben gezeigt, daß die Spannungen um ein Normalbetonzuschlagkorn eines Einkorn-Betonmodells schon um etwa 20 % abnehmen, wenn eine Zwischenkörnung mit der Korngröße von etwa der Hälfte des Durchmessers der ursprünglich vorhandenen Zuschlagkörner in die Matrixzwischen diesen Zuschlägen eingefügt wurde.

Die gleiche Auffächerung des Kräfteverlaufs tritt auch beim Leichtbeton ein, wenn man von einem Einkornbeton zu einem Leichtbeton mit stetigem Kornaufbau übergeht. Nur findet hier der Kräftefluß vorwiegend in den Matrixzwischenräumen zwischen den Leichtzuschlagkörnern statt.

Die Spannungsverteilung, die sich in der unmittelbaren Umgebung der Zuschlagkörner einstellt, besteht aus Gleichgewichts- und Verträglichkeitsgründen auch in den Zuschlägen. Die Normalbetonzuschläge sind deshalb einer gleichzeitigen Druckbeanspruchung in Richtung der äußeren Druckkraft bzw. in Richtung auf das benachbarte Zuschlagkorn und einer Zugbeanspruchung rechtwinklig zur Richtung der äußeren Druckkraft ausgesetzt. Leichtbetonzuschläge stehen demgegenüber weitgehend nur



Bild 10 Spannungsverteilung in den Zuschlagkörnern eines belasteten Normalbetonmodells ohne Matrix (Isochromatenbild)

unter Zugbeanspruchung rechtwinklig zur äußeren Druckkraft-
richtung.

Analog zu den Spannungen in der die Zuschlagkörner umgeben-
den Matrix nimmt die Druck- und Zugbeanspruchung in den Zu-
schlagkörnern mit zunehmender Größe der Zuschläge, mit der
Abweichung von der Kugelgestalt, mit zunehmender Kantigkeit,
mit abnehmendem Abstand untereinander und mit Übergang vom
stetigen Kornaufbau zur Ausfallkörnung zu. Einen qualitativen
Einblick in die Spannungsverteilung in einem Gemisch aus Nor-
malzuschlag (aus Versuchsgründen ohne Matrix) vermittelt Bild 10.

4.5 Spannungen in der Betonoberfläche

Die sehr starke Konzentration der Spannungen im Bereich der
Haftzone von Normalzuschlagkorn und Matrix geht auch aus Deh-
nungsmessungen an der Oberfläche einer angeschliffenen Scheibe
30 cm x 30 cm x 5 cm hervor, in die ein großes, prismenförmiges

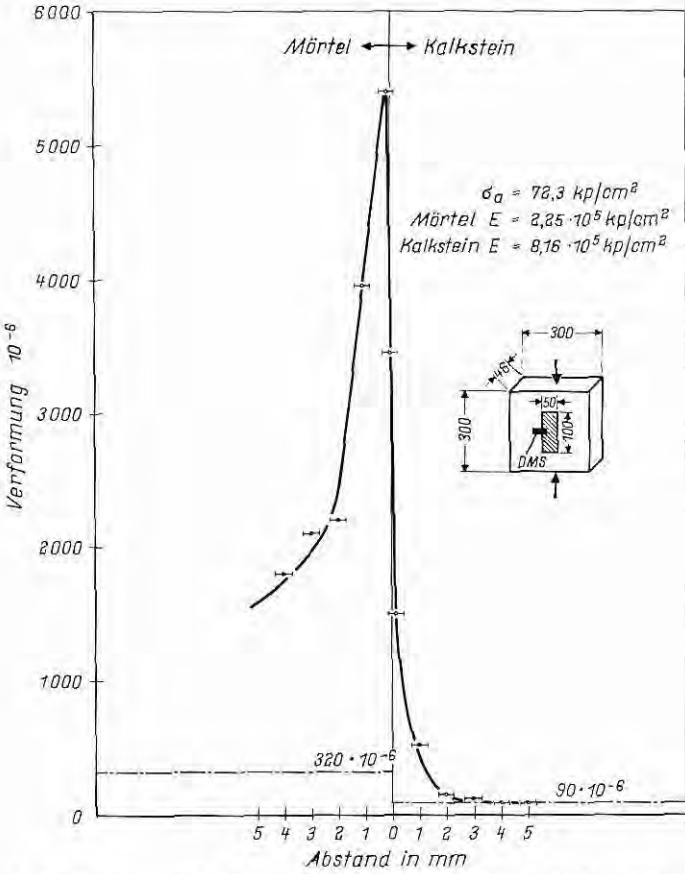


Bild 11 Verformung der Grenzschicht Mörtel—Kalkstein unter äußerer Last

Kalksteinzuschlagkorn mittig einbetoniert war; Bild 11. Rechtwinklig zur Haftzone wurde eine Dehnungsmeßstreifenkette (DMS) geklebt und die Scheibe einer einachsigen Druckbelastung ausgesetzt. Auf der Abszisse des Bildes 11 ist der Abstand von der Haftzone in Millimetern, auf der Ordinate die gemessene Verformung aufgetragen. In hinreichend weiter Entfernung von der Haftzone betrug bei einer Belastung von etwa einem Drittel der Bruchlast die Druckverformung des Mörtels $320 \cdot 10^{-6}$, die des Zuschlags nur $90 \cdot 10^{-6}$, also weniger als ein Drittel. In der unmittelbaren Umgebung der Haftzone wurde dabei eine eng begrenzte, schmale Verformungsspitze festgestellt, die den 17fachen Betrag der mittleren Mörtelverformung aufwies.

Die an den Modellversuchen festgestellten Spannungsspitzen sind also real und können mehr als eine Zehnerpotenz größer als die mittlere, von außen aufgebrachte Spannung sein. Qualitativ wurde die außerordentlich starke Konzentration der Spannungen im Bereich der Haftzone von Zuschlagkorn und Zementsteinmatrix auch bei den spannungsoptischen Oberflächenschichtaufnahmen festgestellt, von denen Bild 12 ein Beispiel gibt. Die

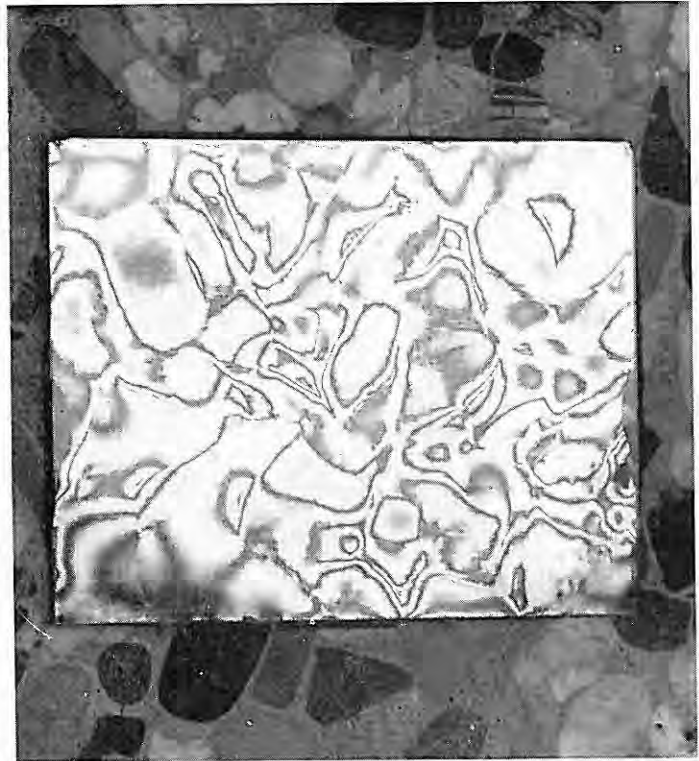


Bild 12 Ungleichmäßige Verformung der Oberfläche eines gleichmäßig belasteten Normalbetonkörpers; Isochromatenaufnahme mit dem spannungsoptischen Oberflächenschichtverfahren

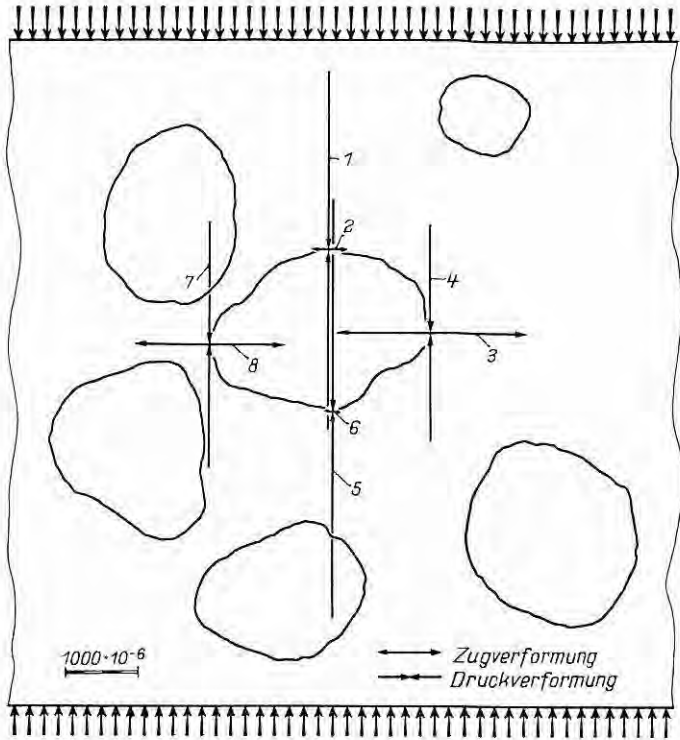


Bild 13 Verformung der Oberfläche eines druckbeanspruchten Normalbetonkörpers

dunklen Linien auf der spiegelnden, spannungsoptisch aktiven Schicht kennzeichnen die Stellen der Betonfläche, an denen große Dehnungen aufgetreten sind. Die Zug- und Druckverteilung um die Normalbetonzuschlagkörner in der angeschliffenen Betonoberfläche wurde auch mit Dehnungsmeßstreifen an ausgewählten Stellen gemessen. In Bild 13 sind als Beispiel zugehörige Meßergebnisse eingetragen; die Vektorpfeile geben die Richtung und Art der Spannung (Druck oder Zug) und die Länge der Pfeile die gemessene Dehnung an. Die Druckspannungen in Richtung der von außen aufgetragenen Belastung sind an den vier ausgewählten Stellen von gleicher Größenordnung (Pfeile 1, 4, 5 und 7). Demgegenüber sind die Zugspannungen rechtwinklig zur äußeren Kraft sehr unterschiedlich; sie sind klein am oberen und unteren Rand des Zuschlagkorns (Pfeile 2 und 6) und sehr groß an den seitlichen Rändern (Pfeile 3 und 8). Auch diese Ergebnisse bestätigen damit die Feststellungen an den Modellbetonen.

5. Bruchmechanismus des Betons

Die Ausbildung von Mikrorissen unmittelbar um die Zuschlagkörner, deren Ursache aus der gemessenen Spannungsverteilung um die Normalbeton- und Leichtbetonzuschlagkörner hervorgeht,

ist zunächst nur auf diejenigen Bereiche um die Zuschlagkörner beschränkt, in denen Zugspannungen herrschen. Durch das Auftreten der Mikrorisse verschwinden jedoch die Zugspannungen in diesem Bereich. Für ein Ausdehnen der Risse werden höhere Spannungen nötig. Bei zunehmender äußerer Druckbelastung im Normalbeton entstehen dann durch eine Querverschiebung der Zuschlagkörner erneut Zugspannungen. Diesen Vorgang verdeutlicht Bild 14, in dem die Spannungsverteilung um ein Normalbetonzuschlagkorn wie in Bild 6 auf mehrere Körner erweitert wurde und in das die Bereiche überwiegender Druckspannungen (-) und Zugspannungen (+) eingetragen wurden. Zwischen den vier zentral angeordneten Zuschlagkörnern deuten Vektorpfeile die vorherrschende Übertragung der Druckkräfte von Zuschlagkorn zu Zuschlagkorn an. Die dadurch erzwungene Querverschiebung der Zuschlagkörner erzeugt Zugspannungen zwischen den mittig nebeneinanderliegenden Körnern, die in Bild 14 ebenfalls durch Vektorpfeile dargestellt sind. Diese Zugspannungen ermöglichen die weitere Ausdehnung der Mikrorisse in gleicher Richtung, in der sie in der Haftzone entstanden sind, also wieder parallel zur äußeren Druckspannungsrichtung.

Im Leichtbeton (Bild 15) entstehen Zugspannungen durch einen anderen Mechanismus, weil hier der größere Teil des äußeren Drucks über die Matrixzwischen-schichten zwischen den Leichtzuschlagkörnern übertragen wird und sich dabei das wabenartige System der Matrixzwischen-schichten in Richtung des Drucks zusammendrückt und quer dazu dehnt. Die dabei entstehenden Zugspannungen treten, in Richtung des äußeren Drucks gesehen,

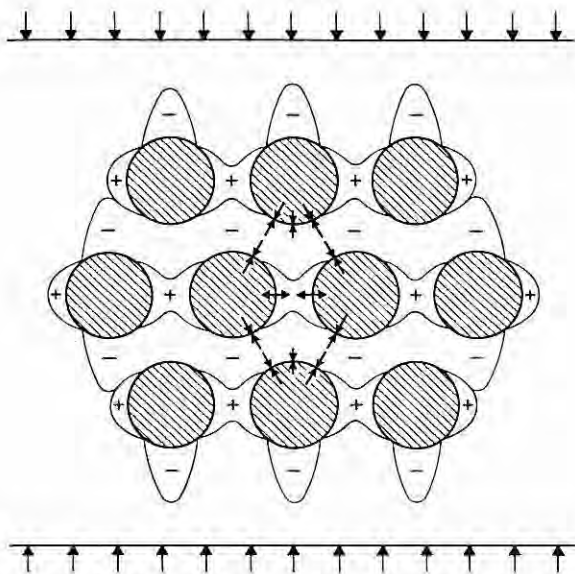


Bild 14 Spannungsverteilung zwischen den Einschlüssen eines belasteten Normalbetonmodells
 (+) Zugspannungsbereich
 (-) Druckspannungsbereich

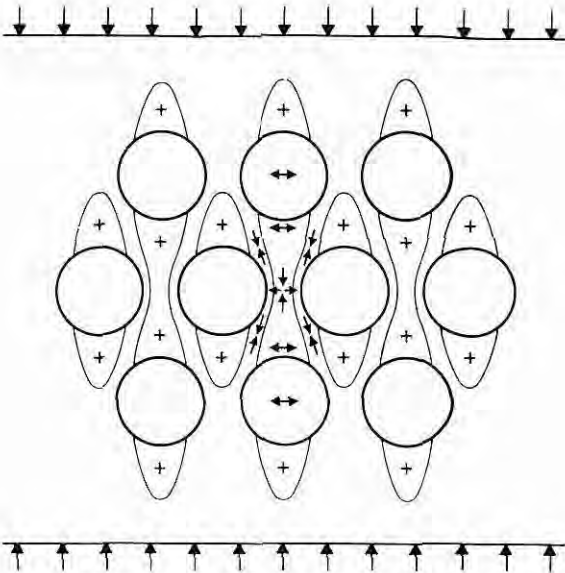


Bild 15 Spannungsverteilung zwischen den Einschlüssen eines belasteten Leichtbetonmodells

vorwiegend oberhalb und unterhalb der Zuschlagkörner auf und verursachen eine weitere Ausbreitung der Mikrorisse. Die Ausbreitung der Mikrorisse geschieht ebenfalls parallel zur äußeren Druckspannungsrichtung, da die neu entstehenden Zugspannungen rechtwinklig zur äußeren Druckkraft gerichtet sind.

Aus dem Vorgang der Mikrorißentstehung und -ausdehnung kann das Ablaufschema des Verformungs- und Bruchvorgangs von Normal- und Leichtbeton entwickelt werden. Der Vorgang kann in vier sich charakteristisch unterscheidende aufeinanderfolgende Abschnitte unterteilt werden. Der erste Abschnitt umfaßt die elastisch-plastische Verformung der Zementstein- oder Feinmörtelschichten zwischen den Zuschlägen ohne Mikrorißbildung. Dieser Abschnitt ist für Normalbeton und Leichtbeton qualitativ gleich. Im zweiten Abschnitt des Bruchvorgangs von Normalbeton bilden sich nach Bild 16, links, die Mikrorisse in der Haftzone von Zuschlag und Matrix. Der dritte Abschnitt (Bild 16, Mitte) umfaßt die Ausdehnung der Risse aufgrund der Querverschiebung der Zuschlagkörner. Durch diesen Vorgang, wenn also Risse in Richtung der äußeren Kraft durch den Körper ganz hindurchlaufen, entsteht ein stabartiges Gebilde. Der Betonkörper ist dann quasi ein Stabbündel, bei dem die Stäbe keine oder nur eine geringe Verbindung untereinander haben. Dennoch besitzt dieses stabartige Gebilde noch ein beträchtliches Tragvermögen. Im vierten Abschnitt schließlich (Bild 16, rechts) tritt der vollständige Bruch des Normalbetons ein, weil die einzelnen Stäbe ausknicken oder abscheren.

Bild 17 gibt entsprechend den Vorgang beim Leichtbeton wieder. Der Unterschied gegenüber dem Normalbeton zeigt sich bereits

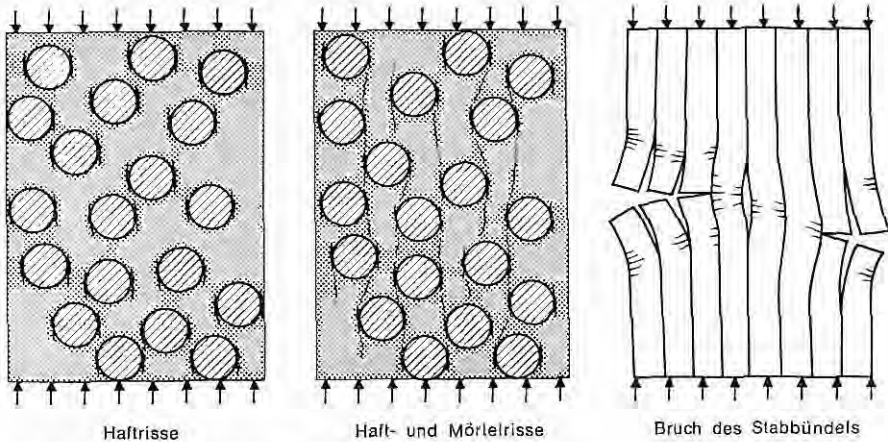


Bild 16 2. bis 4. Abschnitt des Bruchvorgangs von Normalbeton

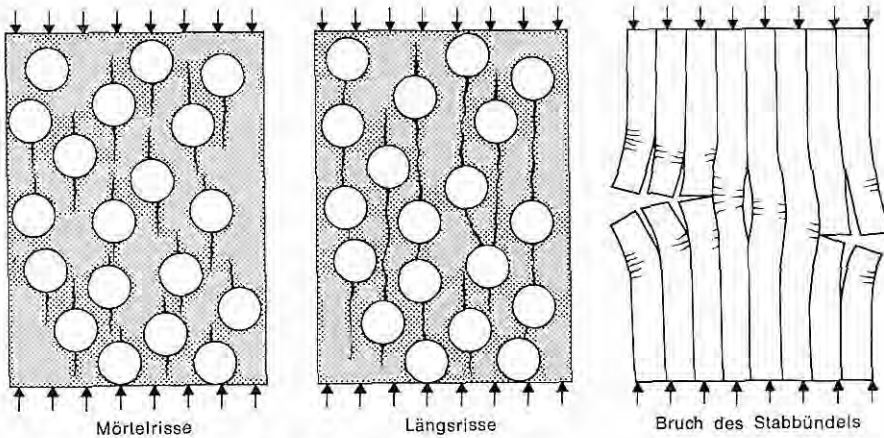


Bild 17 2. bis 4. Abschnitt des Bruchvorgangs von Leichtbeton

im zweiten Abschnitt (Bild 17, links) dadurch, daß die Mikrorisse erst beim Erreichen der Zugfestigkeit der Zementstein- oder Feinmörtelmatrix auftreten und daß sie meist durch die Zuschläge hindurchgehen. Die Haftsicht zwischen Zuschlagkorn und Matrix wird dabei nur punktförmig beansprucht. Bei der Ausdehnung dieser Risse wird der Betonkörper ebenfalls in ein stab-bündelartiges Gebilde zerlegt (Bild 17, Mitte), das schließlich durch Ausknicken oder Abscheren der Einzelstäbe wie beim Normalbeton versagt (Bild 17, rechts).

Der unterschiedliche Bruchmechanismus von Normal- und Leichtbeton geht indirekt auch aus dem unterschiedlichen Spannungs-Verformungs-Verhalten der beiden Betonarten hervor, das in Bild

18 schematisch dargestellt ist. Zur Verdeutlichung des Bruchvorgangs wurde dabei die Spannungs-Verformungs-Linie der Betone stark übertrieben gezackt dargestellt. Die einzelnen Zacken werden jeweils durch das Entstehen eines Risses verursacht, weil bei jedem Riß eine gewisse örtliche Entspannung bei gleichzeitiger Zunahme der Verformung des Betonkörpers eintritt. Die dünn eingezeichneten, gleichmäßigen Kurven entsprechen den bei solchen Untersuchungen gewöhnlich aufgenommenen Spannungs-Verformungs-Linien von Normal- und Leichtbeton, die als Summenkurve das makroskopische Ergebnis zahlreicher mikroskopischer Veränderungen in der Betonstruktur darstellen.

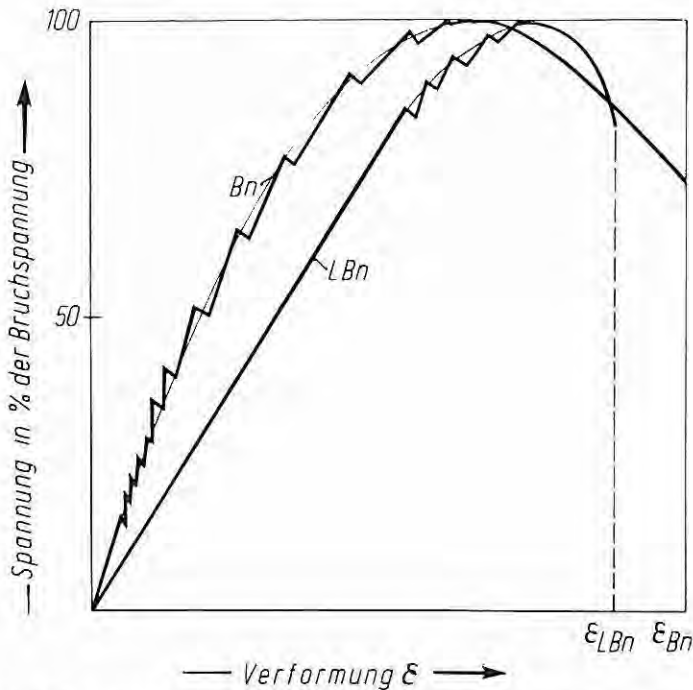


Bild 18 Schematische Darstellung der Spannungsdehnungslinien von Normalbeton (Bn) und Leichtbeton (LBn)

Beim Normalbeton ist die Spannungs-Verformungs-Linie praktisch von Beginn der Belastung an gekrümmt. Die Krümmung wird durch die Mikrorisse verursacht, die in dem auf Zug beanspruchten begrenzten Bereich der Haftschrift um die Zuschlagkörner entstehen. Diese Mikrorisse treten schon bei relativ niedriger Belastung — etwa ab 10 bis 30% der Bruchlast — sehr zahlreich statistisch verteilt auf und erzeugen dadurch eine gleichmäßige Krümmung der Spannungs-Verformungs-Linien. Mit zunehmender

Belastung des Normalbetons dehnen sich die Mikrorisse aus, und es entstehen etwa ab 70 % der Bruchlast einzelne Längsrisse. Die Krümmung der Spannungs-Verformungs-Linie nimmt dabei zu, erreicht ein Maximum, bei dem sich ein Bündel einzelner Stäbe gebildet hat, das instabil ist und mit zunehmender Dehnung bei abnehmender Tragfähigkeit (Last) versagt.

Beim Leichtbeton findet eine Mikrorißbildung in der Haftschrift zwischen Matrix und Zuschlagkorn nicht statt. Es entstehen erst nach Überschreiten eines wesentlich größeren Anteils der Bruchlast „ohne Vorankündigung“ Mikrorisse in der Matrix. Die Spannungs-Verformungs-Linie des Leichtbetons ist aus diesem Grund bis zu dieser Laststufe nahezu linear und gleicht der des reinen Zementsteins. Die künstlich hergestellten und daher hinsichtlich Form und Größe weitgehend gleichmäßigen Leichtzuschlagkörner bewirken, daß die Mikrozugrisse in der Matrix erst bei im Vergleich zum Normalbeton höherer Belastung — etwa ab 85 % der Bruchlast — entstehen. Die Verbindung dieser Risse und die Ausbildung des Stabbündels gehen dann aufgrund der großen gespeicherten elastischen Energie im Leichtbetonkörper sehr rasch vor sich. Dadurch ist bei Leichtbeton ein relativ spröderes Verhalten als bei Normalbeton verständlich.

Die dargelegte Hypothese über den Bruchmechanismus wird durch die Form von Betonbruchstücken nach einachsiger Druckbeanspruchung bestätigt. Typisch für Normalbetonbruchstücke sind die herausgelösten großen Zuschläge mit der seitlich durch die Zugspannungen abgelösten Matrix (Bild 19). Dort, wo in der Haftzone nur Druckkräfte wirken — nämlich oben und unten am Zuschlagkorn — blieb die Haftung und damit der Verbund zur



Bild 19
Beim Bruch eines Normalbetonkörpers herausgelöste Zuschlagkörner

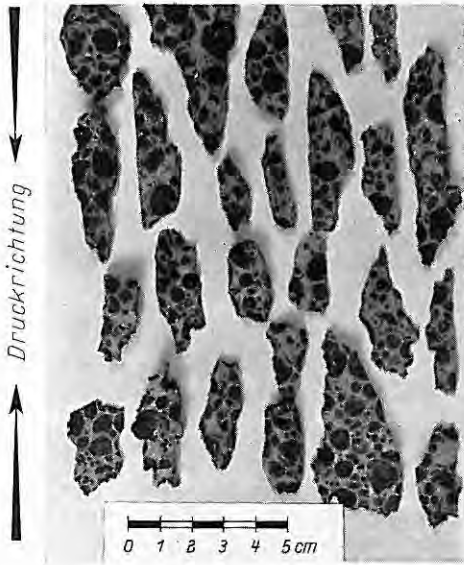


Bild 20
 Beim Bruch eines
 Leichtbetonkörpers ent-
 standene Bruchstücke

Mörtelschicht erhalten. Leichtbetonbruchstücke nach einachsiger Druckbeanspruchung (Bild 20) sind ebenfalls in Druckrichtung langgestreckt, jedoch verlaufen die Risse meistens durch die Zuschläge hindurch.

6. Folgerungen für die Betontechnik

Aus dem Entstehen und der Verteilung der Spannungen sowie dem Bruchvorgang im druckbeanspruchten Beton lassen sich Folgerungen für den Aufbau hochbelastbaren Normal- und Leichtbetons ableiten. Dabei wird davon ausgegangen, daß das Entstehen von Mikrorissen schon den Beginn des Bruchvorgangs einleitet und daß daher alle Maßnahmen, die ein Entstehen der Mikrorisse erst bei höherer Druckbeanspruchung bewirken, vorteilhaft sind. Es wurde hier jedoch nicht nachgewiesen, daß alle diese Maßnahmen zwingend auch zu einer höheren Bruchlast führen müssen. In diesem Fall kann dann bei Sicherheitsbetrachtungen, die von der Bruchlast ausgehen, der Vorteil nur klein sein. Dennoch dürfte für viele Anwendungsbereiche bei gleicher Sicherheit gegen Bruch denjenigen Betonen der Vorzug zu geben sein, deren Gefüge im Bereich der Gebrauchslast noch ungeschädigt ist, d. h. bei denen Mikrorisse erst bei höherer Beanspruchung auftreten.

Grundsätzlich bieten sich zwei Wege an, um dieses Ziel zu erreichen. Man kann entweder durch entsprechende Betonkomponenten erreichen, daß nur relativ geringe Spannungskonzentrationen um die Zuschlagkörner entstehen, oder durch Betonkomponenten mit relativ höherer Festigkeit, daß die entstehenden

Spannungskonzentrationen ohne Ribbildung bis zu höheren Belastungen aufgenommen werden können.

Für die Größe der Zugspannungen um die Zuschlagkörner im Normalbeton wie im Leichtbeton und damit für die Höhe der Druckbelastung, bei der die Voraussetzungen für erste Mikrorisse entstehen, sind in erster Linie das Verhältnis der E-Moduln von Zuschlag und Matrix, die Größe und Form der Zuschlagkörner, ihr gegenseitiger Abstand sowie die Kornzusammensetzung maßgebend.

6.1 Normalbeton hoher Belastbarkeit

Eine Angleichung des E-Moduls von Zuschlag und Zementfeinmörtel würde eine besonders wirksame Maßnahme zur Verbesserung der Belastbarkeit von Normalbeton darstellen; sie läßt sich jedoch praktisch nicht verwirklichen, weil der E-Modul dichter Naturgesteine als Normalbetonzuschlag überwiegend in der Größenordnung von $6 \text{ bis } 8 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2$ gegeben ist und weil sich der E-Modul hochfester Zementmörtel nicht über $3 \text{ bis } 4 \cdot 10^5 \text{ kp/cm}^2$ steigern läßt.

Eine sich günstig auswirkende Maßnahme ist die Erhöhung der Haftzugfestigkeit zwischen Zuschlagkorn und Zementstein. Dies läßt sich in gewissem Maße sowohl durch eine angerauhte Kornoberfläche als auch durch Verwendung von solchem Gestein erreichen, das mit dem Zementstein in der Haftzone reagiert, wodurch eine besonders feste Verbindung entstehen kann. Das Wissen um solche Vorgänge ist allerdings zur Zeit noch recht begrenzt.

Eine Zementsteinmatrix hoher Zugfestigkeit kann nur in begrenztem Maße durch Zemente hoher Normfestigkeit, durch möglichst geringen Wasserzementwert und durch gleichmäßig gute Verdichtung sowie ausreichende Nachbehandlung erzielt werden. Theoretisch müßte dies auch durch Zugabe von Fremdfasern hohen E-Moduls und hoher Zugfestigkeit möglich sein, jedoch haben die bisherigen Untersuchungen auf diesem Gebiet noch zu keinem für die Praxis verwertbaren Ergebnis geführt.

Die hohe Belastbarkeit des Normalbetons setzt eine möglichst hohe Festigkeit, insbesondere Zug- und Spaltzugfestigkeit des Zuschlags, voraus. Durch Wahl entsprechenden Zuschlaggesteins, wie z. B. Basalt, kann diese Forderung erfüllt werden.

Da kugelförmige Zuschlagkörner unter sonst gleichen Verhältnissen kleinere Spannungskonzentrationen liefern, sollte der Anteil länglicher oder plattiger Körner bei natürlich gekörntem Zuschlag möglichst klein sein. Splitt sollte eine gedrungene Form aufweisen, wie sie im allgemeinen durch doppeltes Brechen entsteht.

Eine Begrenzung des Größtkorns erhöht die Belastbarkeit des Normalbetons, weil unter sonst gleichen Verhältnissen die relative Spannungskonzentration mit anwachsendem Größtkorn zunimmt. Dies wird durch Ergebnisse aus dem Schrifttum bestätigt. Eine vor kurzem veröffentlichte Zusammenfassung amerikanischer Untersuchungen [22] ergab, daß Normalbetone mit gleichem

Wasserzementwert und gleicher Konsistenz mit abnehmendem Größtkorn größere Druckfestigkeiten erreichten. Während dieser Einfluß bei einem Wasserzementwert von 0,70 und damit mittleren Festigkeiten klein war, wurde bei einem Wasserzementwert von 0,40 durch Herabsetzen des Größtkorns von 76 mm auf 4,8 mm die Betonfestigkeit von 450 auf 650 kp/cm² erhöht. Auch bei einem Größtkorn von 9,5 mm lag die Festigkeit noch über 600 kp/cm², bei 19 mm jedoch unter 600 und bei 38 mm nur noch wenig über 500 kp/cm². Auch bei Untersuchungen über den Einfluß des E-Moduls von Zementstein und Zuschlag auf den E-Modul von Mörtel und Beton [23] konnte durch Vermindern des Größtkorns von 15 auf 3 mm bei gleichem Wasserzementwert eine Steigerung der Festigkeit um etwa 20 % festgestellt werden. Jedoch nahm dabei der Zementleimgehalt von 50 auf 67 Vol.-% zu. Bei Untersuchungen an Betonen höchster Festigkeit [24] mit rd. 1200 bis 1500 kp/cm² wurde unter Beachtung solcher Feststellungen nur ein Größtkorn von 15 mm verwendet, ohne daß näher untersucht wurde, ob und um wieviel sich diese Festigkeit durch ein kleineres Größtkorn noch hätte steigern lassen.

Mit abnehmendem Größtkorn nimmt andererseits die spezifische Oberfläche des Zuschlags und damit bei gleichbleibendem Wasserzementwert und für eine bestimmte Konsistenz der Zementleimgehalt zu. Das Größtkorn für Beton höchster Festigkeit, dessen Durchmesser sich aus den vorliegenden Untersuchungen und nach dem Schrifttum nur ungefähr abschätzen läßt, dürfte für die Praxis zu etwa 10 mm angenommen werden können.

Da bereits eine Zwischenkorngröße die relative Spannungskonzentration um 20 % vermindert (siehe Abschnitt 4.4), läßt ein stetiger Kornaufbau bei gleichem Größtkorn geringere Spannungskonzentrationen und damit eine höhere Belastbarkeit erwarten als eine Ausfallkörnung.

6.2 Leichtbeton hoher Belastbarkeit

Ein möglichst geringer Unterschied im E-Modul zwischen Leichtzuschlag und Matrix läßt sich durch Abstimmung der Porosität und damit des E-Moduls und der Festigkeit von künstlich hergestelltem Leichtzuschlag erreichen. Für Leichtbetone hoher Festigkeit sind daher weniger poröse und festere Leichtzuschläge zweckmäßig; damit ist allerdings eine höhere Rohdichte verbunden. Demgegenüber ist es technologisch nicht zu befürworten, aus einem porösen und damit stark verformbaren Leichtzuschlag einen Beton höherer Belastbarkeit durch einen unangemessen festen Zementmörtel herzustellen, denn die Rohdichte des Leichtbetons wird angehoben und die dadurch angestrebte Festigkeitssteigerung ist begrenzt.

Die Zugfestigkeit des Leichtbetonzuschlags übt im Gegensatz zum Normalzuschlag einen großen Einfluß auf den Widerstand des Leichtbetons gegen erste Mikrorisse aus. Die Zugfestigkeit des Leichtzuschlags nimmt mit abnehmender Porosität zu.

Hinsichtlich Zugfestigkeit der Zementsteinmatrix, Gestalt der Zuschlagkörner, Größtkorn und Kornaufbau, gelten die gleichen Grundsätze wie bei Normalbeton.

7. Zusammenfassung

Im Zweistoff-System Beton besitzen Zuschlag und Zementsteinmatrix unterschiedliche E-Moduln. Im allgemeinen hat der Zuschlag im Normalbeton einen mehrfach größeren und im Leichtbeton einen mehrfach kleineren E-Modul als die Matrix. Deshalb entsteht auch in einem durch gleichmäßigen äußeren Druck beanspruchten Beton eine sehr unterschiedliche Spannungsverteilung aus Druck- und Zugspannungen. Spannungskonzentrationen treten vor allem in der unmittelbaren Nachbarschaft der Haftzone Zuschlag/Matrix auf. Sie sind unter gleicher äußerer Belastung um so größer, je größer das einzelne Korn ist, je weiter seine Form von der Kugelgestalt abweicht und je dichter die einzelnen Zuschlagkörner gepackt liegen. Besonders hohe Spannungen treten an Ecken und Kanten von Zuschlagkörnern auf.

Äußere Druckbeanspruchung führt im Normalbeton in eng begrenzten Bereichen der Haftzone von Zuschlag und Matrix zu Zugspannungen. Nach Überschreiten der Haftzugfestigkeit dieser Grenzzone treten Mikrorisse auf, die parallel zur äußeren Druckkraftrichtung gerichtet sind.

Äußere Druckbeanspruchung führt im Leichtbeton in unmittelbar an die Zuschlagkörner angrenzenden Zonen der Matrix ebenfalls zu Zugspannungen. Der Haftverbund zwischen Matrix und Zuschlagkorn wird dabei jedoch nur wenig beansprucht. Mikrorisse treten erst bei Erreichen der Zugfestigkeit der Zementsteinmatrix auf. Sie sind ebenfalls parallel zur äußeren Druckkraftrichtung gerichtet und verlaufen häufig durch grobe Zuschlagkörner.

Bei steigender äußerer Druckbeanspruchung bilden sich wieder Zugspannungen bei der Querverschiebung der Zuschlagkörner im Normalbeton bzw. der Querverschiebung des Gerüsts der Matrixzwischen-schichten im Leichtbeton. Aufgrund dieser Zugspannungen können sich die Mikrorisse durch den gesamten Betonkörper ausdehnen.

Das Tragverhalten des Betons bis zum Bruch läßt sich in vier Abschnitte unterteilen. Diese Abschnitte sind gekennzeichnet durch die elastisch-plastische Verformung der Zementsteinzwischen-schichten zwischen den Zuschlägen ohne Ribbildung, durch die Mikroribbildung, durch die Ausdehnung der Mikrorisse zu Längsrissen durch den gesamten Betonkörper, wodurch dieser in ein stabbündelartiges Gebilde zerlegt wird, und schließlich durch das Ausknicken und Abscheren der Einzelstäbe dieses Stab-bündels.

Die Belastbarkeit von Beton kann gesteigert werden, wenn die Ausbildung und die Wirkung der inneren Spannungskonzentrationen vermindert werden. Neben den bekannten Maßnahmen, wie Verwendung eines Zements mit hoher Normfestigkeit und eines niedrigen Wasserzementwerts, erscheinen für Normalbeton nach theoretischen Überlegungen zweckmäßig die Verwendung einer stetigen Sieblinie mit einem Größtkorn von nicht wesentlich mehr als 10 mm, die Verwendung von möglichst runden oder kubisch gedrun-genen Zuschlagkörnern, die Verbesserung der Haftzugfestigkeit zwischen Zuschlag und Zementmörtel durch Auswahl bestimmter Zuschlaggesteine mit einer reaktionsfähigen, mäßig

rauen Kornoberfläche sowie — mit gewissen Vorbehalten — die Steigerung der Zementmörtel-Zugfestigkeit durch geeignete Fremdfasern.

Bei Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge verspricht die Verwendung eines kornfesten Leichtzuschlags mit einem E-Modul, der von dem des Zementmörtels nicht allzu verschieden ist, eine deutlich gesteigerte Belastbarkeit. Bis auf eine Steigerung der Haftzugfestigkeit zwischen Zuschlag und Mörtel wirken sich auch die für Normalbeton angegebenen Maßnahmen günstig aus.

SCHRIFTTUM

- [1] Lusche, M.: Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 1971; ebenso Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 39, Beton-Verlag, Düsseldorf 1972.
- [2] Hsu, T. T. C., F. O. Slate, 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.
- [3] Jones, R.: A method of studying the formation of cracks in a material subjected to stress. Brit. J. Appl. Phys. 3 (1952) Nr. 7, S. 229/232.
- [4] Berg, O. Y.: Strength and plasticity of concrete. Dokl. Akad. Nauk SSSR 70 (1950) Nr. 4, S. 617/620; (engl. Übersetzung: Proc. Acad. Sci. USSR 70 (1950) Nr. 4).
- [5] Blakey, F. A., und F. D. Beresford: A note on the strain distribution in concrete beams. Civil Engineer (London) 50 (1955) Nr. 586, S. 415.
- [6] Hsu, T. T. C., und F. O. Slate: Tensile strength between aggregate and cement paste or mortar. Proc. Amer. Concr. Inst. 60 (1963) Nr. 4, S. 465/485.
- [7] Alexander, K. M., J. Wardlaw und D. J. Gilbert: Aggregate-cement bond, cement paste strength and the strength of concrete. The Structure of Concrete, Proc. Internat. Conf. London September 1965, Cement and Concr. Assoc., London 1968, S. 59/81.
- [8] Dantine, R.: Modules d'élasticité statique et dynamique des bétons et mortiers, résistance à la compression et à la traction. Bulletin du Centre d'Etudes, de Recherches et d'Essais Scientifiques du Génie Civil (Liège) 8 (1956) S. 155/170.
- [9] Nepper-Christensen, P., und T. P. H. Nielsen: Vedhaefningerne mellem sten og mortel og dens indflydelse på styrken af beton. Betonforskningslaboratoriet Karlstrup, Intern Rapport Nr. 169, Karlstrup 1968.
- [10] Shah, S. P., und S. Chandar: Critical stress, volume change and microcracking of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 65 (1968) Nr. 9, S. 770/781.
- [11] Sawin, G. N.: Spannungserhöhung am Rande von Löchern. VEB Verlag Technik, Berlin 1956.
- [12] Mehmel, A., und E. Kern: Elastische und plastische Stauchungen von Beton infolge Druckschwell- und Standbelastung. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 153, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1962.
- [13] Franz, G.: Betrachtungen zur Mechanik des Zusammenwirkens von Beton und Kunststoffen. beton 18 (1968) H. 1, S. 5/9.
- [14] Baker, A. L. L.: An analysis of deformation and failure characteristics of concrete. Mag. Concr. Res. 11 (1959) Nr. 33, S. 119/128.

- [15] Anson, M.: An investigation into a hypothetical deformation and failure mechanism for concrete. Mag. Concr. Res. 18 (1964) Nr. 47, S. 73/82.
- [16] Reinius, E.: A theory of the deformation and the failure of concrete. Mag. Concr. Res. 8 (1956) Nr. 24, S. 157/160.
- [17] Baker, L. L.: A criterion of concrete failure, Proc. Inst. Civ. Eng. 45 (1960) S. 269/278.
- [18] Sasse, H. R.: Zum Problem des Bruchverhaltens betonähnlicher Zweistoffsysteme. Dissertation, TH Aachen 1969; ebenso Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2192, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1971.
- [19] Wischers, G.: Aufnahme von Druckkräften in Scherbeton und in Leichtbeton. beton 17 (1967) H. 5, S. 183/186; ebenso Betontechnische Berichte 1967, Beton-Verlag, Düsseldorf 1968, S. 53/62.
- [20] Griffith, A. A.: The phenomena of rupture and flow in solids, Philos. Trans. Royal Soc. London, Ser. A 221 (1920) S. 163/198.
- [21] Irwin, G. R.: Relaxation of stresses near a crack to the extension force. Actes 9. Congr. Internat. Méc. Appl., Univ. Bruxelles 8 (1967) S. 245/251.
- [22] Dartsch, B.: Einfluß des Zuschlaggrößtkorns auf die Zusammensetzung und die Druckfestigkeit des Betons (Darstellung nach einigen Veröffentlichungen). beton 21 (1971) H. 10, S. 409/412; ebenso Betontechnische Berichte 1971, Beton-Verlag, Düsseldorf 1972, S. 139/149.
- [23] Manns, W.: Über den Einfluß der elastischen Eigenschaften von Zementstein und Zuschlag auf die elastischen Eigenschaften von Mörtel und Beton. Dissertation, TH Aachen 1969; ebenso Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2112, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen 1970.
- [24] Walz, K.: Über die Herstellung von Beton höchster Festigkeit. beton 16 (1966) H. 8, S. 339/340; ebenso Betontechnische Berichte 1966, Beton-Verlag, Düsseldorf 1967, S. 139/144.