

Über die Spaltzugfestigkeit des Betons

Von Justus Bonzel, Düsseldorf

Übersicht

Seit etwa 25 Jahren wird die Zugfestigkeit des Betons auch mit Hilfe der Spaltzugprüfung ermittelt. Dabei werden Zylinder (liegend) sowie würfelförmige oder prismatische Probekörper in üblichen Druckprüfmaschinen über Lastverteilungstreifen bis zum Bruch belastet. Die darüber in der Literatur bekanntgewordenen Untersuchungen wurden ausgewertet und durch eigene Feststellungen ergänzt.

Bewährt haben sich Lastverteilungstreifen aus Hartfaserplatten oder Hartfilz. Ihre Breite sollte $1/10$ des Zylinderdurchmessers oder der Würfelkantenlänge nicht überschreiten. Die Spaltzugfestigkeit ist von den Abmessungen üblicher Probekörper weitgehend unabhängig und bei gleichem Verdichtungsgrad für Zylinder 15/30 cm und 20 cm-Würfel etwa gleich. Sie nimmt mit wachsendem W/Z-Wert ab und ist bei Beton aus gebrochenem Zuschlag etwa 10 bis 20 % größer als bei Kiessandbeton gleicher Druckfestigkeit. Der Austrocknungszustand der Probekörper (Schwindspannungen) beeinflusst die Spaltzugfestigkeit bedeutend weniger als die Biegezugfestigkeit.

Je nach Betongüte (etwa B 100 bis B 600) beträgt die Druckfestigkeit im Mittel das 8,0- bis 14,5fache und die Biegezugfestigkeit im Mittel das 2,0- bis 1,5fache der Spaltzugfestigkeit. Die direkte Zugfestigkeit dürfte im Mittel etwa das 0,75fache der Spaltzugfestigkeit betragen.

1. Allgemeines

Im Stahlbetonbau werden Biegequerschnitte im allgemeinen nach Stadium II (vgl. Bild 1) bemessen. Dabei wird angenommen, daß die Betonzugzone gerissen ist und daß Zugspannungen vom Stahl und Druckspannungen vom Beton aufgenommen werden. Für Betonkonstruktionen, bei denen Risse in der Zugzone nicht auftreten sollen, ist jedoch auch die Zugfestigkeit des Betons von Bedeutung. In der Vergangenheit ist die Zugfestigkeit von Mörtel und Beton durch Zerreißen von Achterkörpern und von prismen- und zylinderförmigen Körpern geprüft worden, teilweise auch an Hohlzylindern mit Flüssigkeitsinnendruck [1, 2, 3, 4]. Nach spannungsoptischen Untersuchungen [5] treten bei den Zerreißenversuchen Spannungskonzentrationen an den Einspannstellen auf, die sich auch noch störend auf die Spannungsverteilung im geprüften Zugquerschnitt auswirken. Inhomogene Stellen des Be-

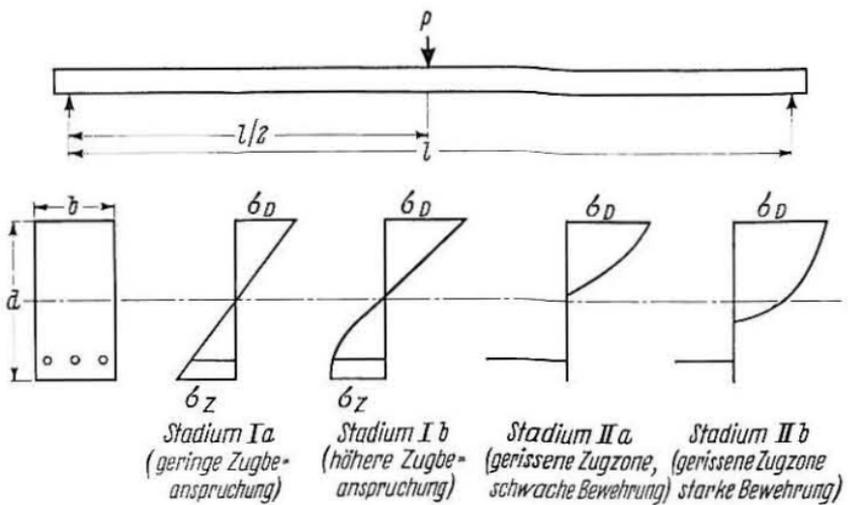
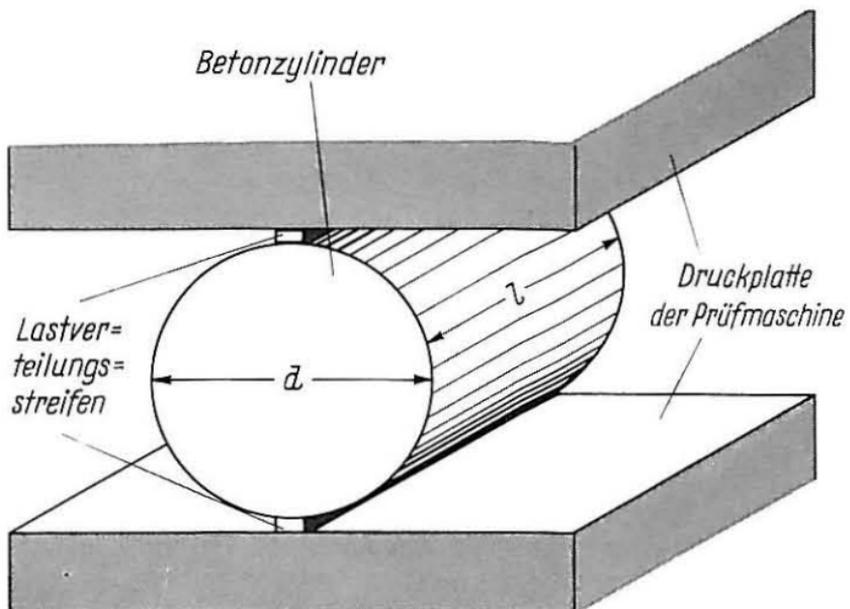


Bild 1 Spannungsverteilung im Betonquerschnitt bei Bemessen auf Biegung

tongefüges und ungleichmäßige Betongüte im Zugquerschnitt haben ebenso wie die beim Einsetzen der Zugproben in die Prüfmaschine sich einstellenden Außermittigkeiten zur Folge, daß resultierende Zugkraft und Prüfkörperachse nicht zusammenfallen. Auch in jüngster Zeit werden Untersuchungen über die direkte Zugfestigkeit des Betons durchgeführt [6]. Dabei wird versucht, Nebenspannungen infolge Lasteinleitung dadurch auszuschalten, daß genügend steife Lasteintragungsplatten aus Stahl mit geeigneten Kunststoffen auf die Stirnseiten der Probekörper aufgeklebt werden [7].



$$Z = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot l}$$

Bild 2 Versuchsanordnung bei der Spaltzugprüfung von Betonzylindern

Da es schwierig ist, die Zugfestigkeit durch eine achsiale Zugkraft zu bestimmen, wird die Zugfestigkeit des Betons schon seit langem als Biegezugfestigkeit [4] ermittelt. Die Suche nach einem möglichst einfachen, aber genügend genauen Prüfverfahren führte in den Jahren 1937 in Japan [8] und 1941 in Brasilien [9] zur „Spaltzugprüfung“, die auch als Quertzugprüfung oder als indirekte Zugprüfung bezeichnet wird.

2. Theoretische Grundlagen der Spaltzugprüfung

Bei der Spaltzugprüfung werden liegend eingesetzte Betonzylinder auf zwei sich genau gegenüberliegenden Mantellinien in einer üblichen Druckprüfmaschine bis zum Bruch belastet. Die Versuchsanordnung ist in Bild 2 dargestellt. Unter Höchstlast wird der Zylinder in Lastwirkungsrichtung aufgespalten. Die beiden Bruchhälften des Zylinders nach der Spaltzugprüfung sind in Bild 3 dargestellt.



Bild 3 Bruchhälften des Zylinders nach der Spaltzugprüfung

Bei Annahme eines ebenen Spannungszustandes und Betrachten einer sehr dünnen Kreisscheibe mit zwei diametral angreifenden und sich genau gegenüberliegenden Einzellasten (vgl. Bild 4) können die Spannungen nach der Elastizitätstheorie für alle Punkte innerhalb der Kreisscheibe durch die Gleichungen (1) bis (3) ausgedrückt werden [9, 10]:

$$\sigma_x = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l} \left[\frac{(R-y) \cdot x^2}{r_1^4} + \frac{(R+y) \cdot x^2}{r_2^4} - \frac{1}{d} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_y = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l} \left[\frac{(R-y)^3}{r_1^4} + \frac{(R+y)^3}{r_2^4} - \frac{1}{d} \right] \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l} \left[\frac{(R-y)^2 \cdot x}{r_1^4} - \frac{(R+y)^2 \cdot x}{r_2^4} \right] \quad (3)$$

Die Ausdrücke der Gleichungen sind in Bild 4 erläutert. In Lastwirkungsebene treten Druckspannungen und rechtwinklig zur Lastwirkungsebene Zugspannungen auf. Für die Bedingung $y = 0$ (d. h. für alle Punkte auf der horizontalen x -Achse der Kreisscheibe, vgl. Bild 4) ergeben sich die kleinsten Normalspannungen auf dem Kreisumfang ($x = R$; $y = 0$) zu $\sigma_x = \sigma_y = 0$ und die größten Normalspannungen im Mittelpunkt der Kreisscheibe ($x = 0$; $y = 0$) zu

$$\text{Zug } \sigma_x = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (4)$$

$$\text{Druck } \sigma_y = -\frac{6 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (5)$$

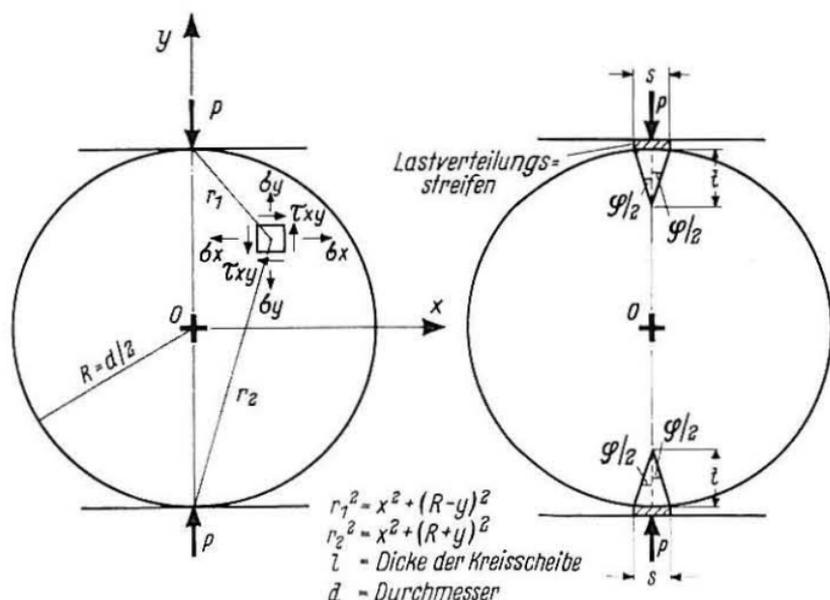


Bild 4 Spannungen in einer Kreisscheibe bei diametral angreifenden und sich gegenüberliegenden Einzellasten

Für die Bedingung $x = 0$ (d.h. für alle Punkte auf der vertikalen y -Achse, vgl. Bild 4) ergeben sich folgende Normalspannungen:

$$\text{Zug } \sigma_x = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d} \quad (6)$$

$$\text{Druck } \sigma_y = -\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l} \left[\frac{2}{d-2 \cdot y} + \frac{2}{d+2 \cdot y} - \frac{1}{d} \right] \quad (7)$$

Bei diesem Lastfall treten Spannungen, die zum Bruch führen können, theoretisch nur auf der vertikalen y -Achse (vgl. Bild 4) auf. Dies bestätigen auch alle praktischen Versuche, bei denen der Bruch stets in der Lasteintragungsebene lag, die mit der Ebene der y -Achse ($x = 0$) identisch ist. Die Zugspannung erreicht ihren Größtwert auf der y -Achse und ist, wie Gleichung (6) zeigt, bei diesen theoretischen Voraussetzungen für alle Punkte der y -Achse konstant. Die Druckspannung entspricht im Mittelpunkt der Kreisscheibe ($x = 0$; $y = 0$) Gleichung (5), wächst jedoch bis zu den Lasteinleitungspunkten auf dem Scheibenumfang ($x = 0$; $y = R$) auf $\sigma_y = \infty$ an.

Zur Verminderung der sehr hohen Druckspannungen an den Lasteintragungsstellen wird daher die Last beim Versuch über Lastverteilungstreifen eingeleitet, die zwischen den Druckplatten und dem Probekörper angeordnet werden und von denen eine gleichmäßige Lastverteilung und -einleitung angenommen wird. Auf Bild 5 sind die theoretischen Möglichkeiten des Bruches nach N. B. Mitchell [10] wiedergegeben. Danach entsteht ohne Last-

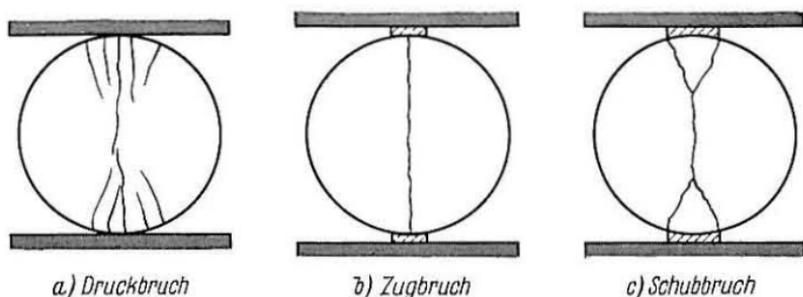


Bild 5 Bruchmöglichkeiten bei der Spaltzugprüfung nach Mitchell [10]

verteilungstreifen ein Bruch durch sehr hohe Druckspannungen (Bild 5, Fall a) und bei sehr breiten Lastverteilungstreifen ein Schubbruch (Bild 5, Fall c). Lastverteilungstreifen aus geeignetem Material (vgl. Abschnitt 5.4.1) mit einer Breite etwa zwischen $d/10$ und $d/20$ sollen jedoch die Druckspannungsspitzen abbauen und einen Bruch zur Folge haben, der von den Zugspannungen bestimmt wird (Bild 5, Fall b). Für die Normalspannungen des Bereiches, in dem die Lastverteilungstreifen verteilend wirken, geben F. Carneiro und A. Barcellos [9] folgende Gleichungen an (vgl. auch [2, 11]):

$$\text{Zug } \sigma_x = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d} \left[1 - \frac{d}{2 \cdot s} (\zeta - \sin \zeta) \right] \quad (8)$$

$$\text{Druck } \sigma_y = - \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot l \cdot d} \left[\frac{d}{2 \cdot s} (\zeta + \sin \zeta) + \frac{d}{d-t} - 1 \right] \quad (9)$$

Die Ausdrücke dieser Gleichungen sind in Bild 4 erläutert. Bild 6 zeigt den nach F. Carneiro und A. Barcellos [9] (vgl. auch [2, 12]) bei der Spaltzugprüfung zu erwartenden Spannungsverlauf. Danach bleibt die Spaltzugspannung auch dann noch über einen wesentlichen Teil der Druckfläche in gleicher Größe erhalten, wenn die Breite des Lastverteilungstreifens $d/10$ nicht überschreitet. C. Zelger [12] zeigte mit dieser Darstellung ebenfalls, daß die in Lastrichtung wirkenden Hauptdruckspannungen, abgesehen von der unmittelbaren Umgebung des Lasteintragungspunktes, sehr klein sind. Auch nach A. Voellmy [13] bleibt die Abweichung der Spannungsdifferenzen von den theoretischen Werten kleiner als 5%, wenn die Breite der Lastverteilungstreifen kleiner als $d/10$ ist.

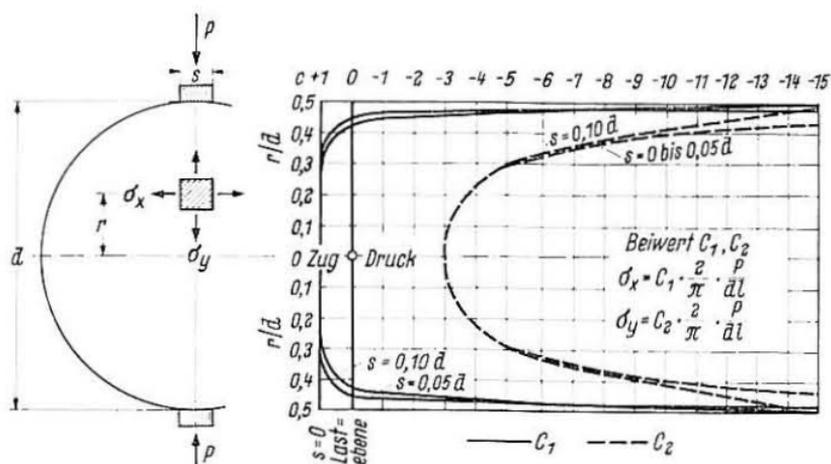


Bild 6 Bei der Spaltzugprüfung zu erwartender Spannungsverlauf [2, 7, 12]

Bei der Spaltzugprüfung liegt also ein zweiachsiger Spannungszustand vor, der auch beim Bruch harter und spröder Stoffe zwar nicht immer ganz befriedigend, aber im allgemeinen doch hinreichend genau mit der Mohrschen Schubspannungshypothese beurteilt werden kann. Nach elastizitätstheoretischen Überlegungen [14] haben bei mehrachsigen Spannungszuständen Hauptspannungen gleichen Vorzeichens grundsätzlich dieselbe Bruchgefahr wie die ungünstigste einachsige Beanspruchung, Hauptspannungen verschiedenen Vorzeichens aber geringere Sicherheit zur Folge. Während die Hüllkurven für Stoffe mit etwa gleicher Zug- und Druckfestigkeit, wie z. B. bei Stahl, zwei parallele Geraden sind, ergeben sich für sprödere Stoffe gekrümmte Linienzüge, die etwa der Form in Bild 7 entsprechen, aber in jedem Einzelfall durch Versuche zu bestimmen sind. Bei Hauptspannungen ungleichen Vorzeichens ist der Bruch im ersten Fall

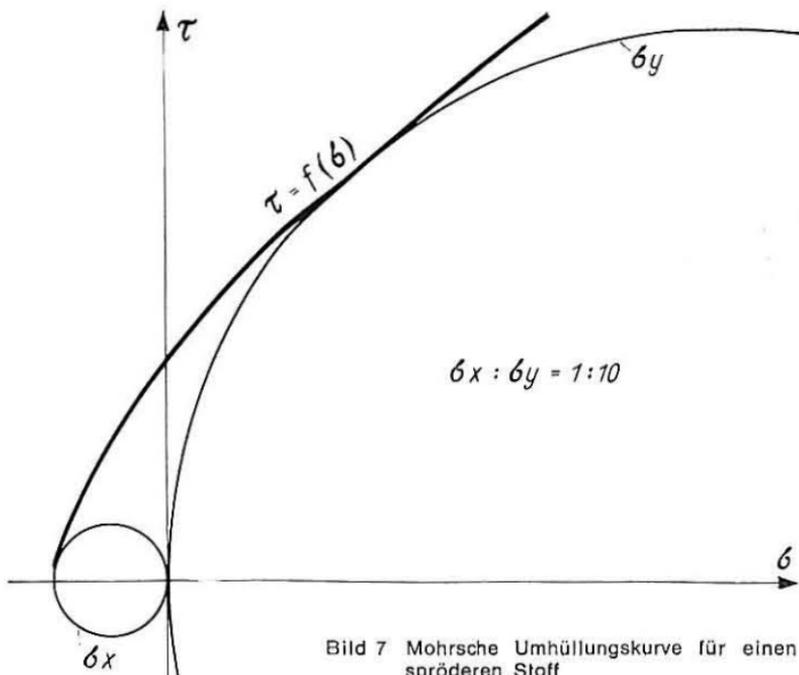


Bild 7 Mohrsche Umhüllungskurve für einen spröderen Stoff

durch maximale Schubspannungen gekennzeichnet, im Fall des Bildes 7 nähert er sich mit zunehmendem Anstieg der Umhüllenden, d. h. mit wachsendem Verhältnis $\sigma_{\text{Druck}} / \sigma_{\text{Zug}}$, dem reinen Zugbruch. N. B. Mitchell [10] folgerte daraus, daß die Spaltzugprüfung nur bei Stoffen mit einem Verhältnis Druckfestigkeit zu Zugfestigkeit $\geq 10 : 1$ sinnvoll ist, was ja für Beton im allgemeinen zutrifft. Nach C. Zelger [12] kennzeichnet die nach der Elastizitätstheorie errechnete Hauptzugspannung auch den Bruchzustand des Betons bei der Spaltzugprüfung ausreichend, weil die Zugspannungen an der Bruchstelle im mittleren Bereich nahezu konstant sind und eine wesentliche Spannungsumlagerung deshalb im plastischen Bereich unwahrscheinlich ist und weil, solange die Hauptdruckspannung etwa das Fünffache der Hauptzugspannung nicht überschreitet, ein Trennbuch eintritt, wenn die Hauptzugspannung die Zugfestigkeit erreicht. Soweit die Verteilung der Linienlasten einwandfrei erfolgt, kann nach A. Voellmy [13] auch an den Endflächen der Zylinder der ebene Spannungszustand angenommen werden.

Spannungsoptische Untersuchungen [10, 13, 15] haben gezeigt, daß die angenommene Spannungsverteilung eine gute Näherung darstellt und daß der Spannungszustand diametral belasteter Kreisscheiben im mittleren Bereich gut mit dem der umschriebenen Quadratscheibe übereinstimmt. Daher können zur Spaltzugprüfung außer Zylindern auch Würfel und Prismen herangezogen werden, bei denen die Querschnittshöhe a gleich oder kleiner als die Querschnittsbreite b ist (vgl. Abschnitt 5.4.3). Bei der Spaltzugprüfung sollte der Bruch im Bereich vorherrschender Zugspannungen, d. h. im mittleren Bereich der Scheibe, beginnen, was bei den Versuchen des Abschnittes 4 überwiegend zutrif. Da-

durch wird die Spaltzugfestigkeit unabhängiger von Zufälligkeiten und Fehlstellen an der Probenoberfläche und unempfindlicher gegenüber Lagerungseinflüssen. Ein Vorteil der Spaltzugprüfung ist auch, daß sie an gleichen Probekörpern wie die Druckprüfung durchzuführen ist, so daß die Beschaffenheit der Probekörper für die beiden Festigkeitsprüfungen als gleich angenommen werden kann. Die hier vernachlässigten plastischen Verformungen werden sicherlich die hohen Druckspannungen an den Lasteintragungsstellen weiter abmindern und Spannungsspitzen im Innern der Probekörper ausgleichen.

3. Ermittlung der Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit des Betons kann an zylindrischen, würfelförmigen oder prismatischen Probekörpern in einer üblichen Druckprüfmaschine ermittelt werden. Die Prüfung ist in einigen Ländern bereits genormt, so z. B. in den USA in ASTM-Standard C 496-62 T. Zwischen den belasteten Flächen der Probekörper und den Druckplatten der Prüfmaschine werden geeignete Lastverteilungstreifen (vgl. Abschnitt 5.4.1) angeordnet, deren Breite $s \leq d/10$ ist. Betonzylinder werden liegend in die Druckprüfmaschine eingebaut und auf zwei sich genau gegenüberliegenden Mantellinien mit einer festgelegten Prüfgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 5.4.2) bis zum Bruch belastet. Die Spaltzugfestigkeit des Betonzylinders vom Durchmesser d und der Länge l , deren Prüfung in Bild 2 dargestellt ist, beträgt dann (vgl. Abschnitt 2):

$$Z_s \text{ (Zylinder)} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot l} = 0,64 \frac{P}{d \cdot l}$$

Betonwürfel und Betonprismen mit quadratischem Querschnitt können aufliegend (normal; vgl. Bild 8, Fall a) oder auf eine Kante gestellt (diagonal; vgl. Bild 8, Fall b) in die Prüfmaschine eingesetzt werden. Sie sollten so in die Prüfmaschine eingesetzt werden, daß die Herstellungsoberseite bei der Prüfung normal oder diagonal eingesetzter Würfel stets Seitenfläche ist (Lastwirkungsebene nicht gleichlaufend mit Einfüllrichtung, vgl. Ab-

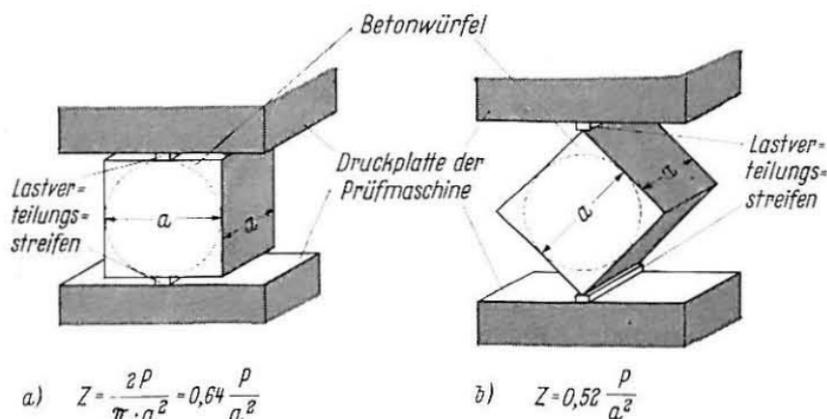


Bild 8 Versuchsanordnung bei der Spaltzugprüfung normal und diagonal eingesetzter Würfel oder Prismen aus Beton

schnitt 5.4.3). Die Versuchsanordnung ist für beide Verfahren in Bild 8 dargestellt. Betonprismen mit nicht quadratischem Querschnitt können nur normal in die Prüfmaschine eingesetzt und nur dann auf Spaltzugfestigkeit geprüft werden, wenn bei der Prüfung die Querschnittshöhe a gleich oder kleiner als die Querschnittsbreite b ist. Auch für die Prüfung von Prismen und Würfeln ist die Prüfgeschwindigkeit festzulegen (vgl. Abschnitt 5.4.2). Die Spaltzugfestigkeit normal eingesetzter Würfel der Kantenlänge a und Prismen der Länge l , der Querschnittshöhe a und der Querschnittsbreite b beträgt dann:

$$Z_s \text{ (Würfel normal)} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot a^2} = 0,64 \cdot \frac{P}{a^2}$$

$$Z_s \text{ (Prismen normal)} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot a \cdot l} = 0,64 \cdot \frac{P}{a \cdot l}$$

Nach S. Nilsson [16] und B. R. Sen und Prakasch Desayi [17, 18] errechnet sich die Spaltzugfestigkeit diagonal eingesetzter Würfel der Kantenlänge a zu:

$$Z_s \text{ (Würfel diagonal)} = 0,52 \cdot \frac{P}{a^2}$$

In allen Gleichungen bedeutet P die größte Lastanzeige der Prüfmaschine des jeweiligen Versuches (vgl. Bilder 2 und 8).

4. Eigene Versuche über die Spaltzugfestigkeit des Betons

4.1 Umfang und Durchführung der Versuche

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden in den Jahren 1961 und 1962 einige Versuche*) über die Streuung bei der Spaltzugprüfung und den Einfluß durchgeföhrt, den Herstellung, Form, Lagerung und Prüfrichtung der Proben und Art der Lastverteilungstreifen auf die Spaltzugfestigkeit haben. Die Betone unterschieden sich im W/Z-Wert sowie in der Art und Kornzusammensetzung der Zuschlagstoffe. Als Zement wurde ein Portlandzement der Güteklasse 275 verwendet, der nach 28 Tagen im Mittel eine Biegezugfestigkeit von 73 kp/cm² und eine Druckfestigkeit von 428 kp/cm² (DIN 1164) besaß. Tafel 1 enthält Angaben über die Zusammensetzung der Betone und die Frischbetoneigenschaften sowie über die Rohdichte und die Druckfestigkeit, die im Alter von 28 Tagen an 20 cm-Würfeln nach DIN 1048 ermittelt wurden.

Die Spaltzugfestigkeit wurde im Alter von 28 Tagen an Zylindern von 15 cm Durchmesser und Würfeln von 20 cm Kantenlänge ermittelt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,5 kp/cm² je Sekunde. Da der obere Teil stehend hergestellter Betonzylinder eine etwas geringere Festigkeit aufweisen kann, wurden die 30 cm hohen Zylinder zunächst mit 10 oder 30 cm hohem Aufbeton (entsprechender Aufsatzkasten) hergestellt, der durch das

*) Die Versuche wurden von Herrn Dipl.-Ing. J. Dahms durchgeföhrt.

Tafel 1 Zusammensetzung und kennzeichnende Eigenschaften der untersuchten Betone

Beton	Gehalt an PZ 275	Zuschlag		W/Z	Konsistenz		Frischbetonroh-dichte	Luftgehalt im Frischbeton	Roh-dichte **)	Druckfestigkeit **)
		Art und Zusammensetzung	Gehalt		Ausbreitmaß DIN 1048	Hubzahl Powers				
	kg/m ³		kg/m ³	—	cm	—	kg/dm ³	%	kg/dm ³	kp/cm ²
1	rd. 285	Rheinkiessand Sieblinie D/E DIN 1045	1996	0,56	39	8	2,44	0	2,40	403
2	rd. 250	Rheinkiessand Sieblinie F DIN 1045	1888	0,70	40 *)	16	2,31	2,9	2,27	254
3	rd. 405	33 % Normensand I und 67 % Normensand II DIN 1164	1657	0,56	36	9	2,29	1,4	2,25	340

*) Kegelstumpf meist zerfallen

**) 20 cm-Würfel nach 7 Tagen Wasser- und 21 Tagen Luftlagerung

Abstreichen unmittelbar nach dem Verdichten wieder entfernt wurde. Aus gleichem Grunde wurde am Kopf einiger Betonzylinder in der Regel im Alter von 7 Tagen ein 10 cm langes Teilstück naß abgesägt, so daß Zylinder von 20 und 30 cm Länge entstanden. Die Würfel wurden mit 10 cm hohem Aufbeton (halbvoller Aufsatzkasten) hergestellt und gemäß Bild 8, Fall a, mit Lastangriff auf einer Würfelseitenfläche so geprüft, daß die Herstellungsoberseite einmal parallel und zum anderen rechtwinklig zur Lastwirkungsebene lag. Die Einfüllrichtung des Würfels lag im ersten Fall rechtwinklig zur Lastwirkungsebene, im zweiten Fall in der Lastwirkungsebene. Zylinder und Würfel wurden während 20 Sekunden auf einem Rütteltisch (Schwingungszahl 2800/min, Schwingungsbreite rd. 1 mm) praktisch vollständig verdichtet und lagerten bis zur Prüfung bei 20 °C teils unter Wasser und teils bis zu 21 Tage vor der Prüfung bei 65 % relativer Luftfeuchtigkeit.

Zur Lasteinleitung wurden bei der Spaltzugprüfung 1,5 cm breite und 0,8 bis 1,0 cm dicke Lastverteilungsstreifen aus Hartfaserplatten oder aus grauem Hartfilz 0,35 F 1 nach DIN 61 200 verwendet. Die Hartfaserplatten zeigten auch nach mehrmaligem Gebrauch keine nennenswerte Veränderung. Da der Hartfilz beim ersten Gebrauch deutlich wahrnehmbar zusammengedrückt wurde, wurden auch einige Versuche mit Lastverteilungsstreifen aus einmal gebrauchtem Hartfilz durchgeführt. Außer der Rohdichte und der Spaltzugfestigkeit des Betons wurde auch der Anteil der im Bruchquerschnitt gebrochenen Kieskörner ermittelt und festgestellt, auf welcher der beiden Stirnseiten und an welcher Stelle bei der Prüfung der erste Riß auftrat.

4.2 Versuchsergebnisse

Alle Ergebnisse der Spaltzugprüfung sind für die Betonzylinder in Tafel 2, für die Würfel in Tafel 3 zusammengestellt. Während der Trennbruch bei den Zylindern in der Regel zunächst im Inneren der Stirnflächen als Riß sichtbar wurde, vgl. Bild 9, entstand er bei den Würfeln teilweise zuerst nahe der oberen oder unteren Lasteintragungsstelle. In der Regel ergaben sich eine etwas größere Spaltzugfestigkeit und ein etwa gleichzeitiges Auftreten des ersten Risses auf beiden Stirnseiten bei Zylindern, an deren Kopf (Herstellungsoberseite) ein 10 cm langes Teilstück abgesägt worden war, und bei Würfeln, deren Herstellungsoberseite bei der Prüfung Seitenfläche war (Lastwirkungsebene rechtwinklig zur Einfüllrichtung der Würfel).

Bei Zylindern und Würfeln aus Beton mit $W/Z = 0,70$ lag der Anteil der im Bruchquerschnitt gebrochenen Kieskörner vorwiegend zwischen 10 und 20 %. Soweit feststellbar, war er unabhängig vom Auftreten des ersten Risses, vom Absägen des Zylinderstückes und von der Lage des Würfels bei der Prüfung. Anders verhielten sich die Probekörper aus Beton mit $W/Z = 0,56$. Der Anteil der gebrochenen Kieskörner lag zwischen 40 und 55 % bei Zylindern, an deren Kopf ein 10 cm langes Teilstück abgesägt worden war, und bei Würfeln, deren Herstellungsoberseite bei der Prüfung Seitenfläche war (Lastwirkungsebene rechtwinklig zur Einfüllrichtung). Bei den übrigen Proben dieses Betons, bei denen der oft etwas weniger gute Beton im Bereich der Herstellungsoberseite mitgeprüft wurde, streute der Anteil der im Bruchquerschnitt gebrochenen Kieskörner zwischen 25 und 55 %.

Alle Ergebnisse dieser Versuche – auch die über den Einfluß der Betonzusammensetzung, der Lagerung und der Art der Lastverteilungstreifen – und ihre Streuung werden im Abschnitt 5 mit den Ergebnissen anderer Stellen besprochen.

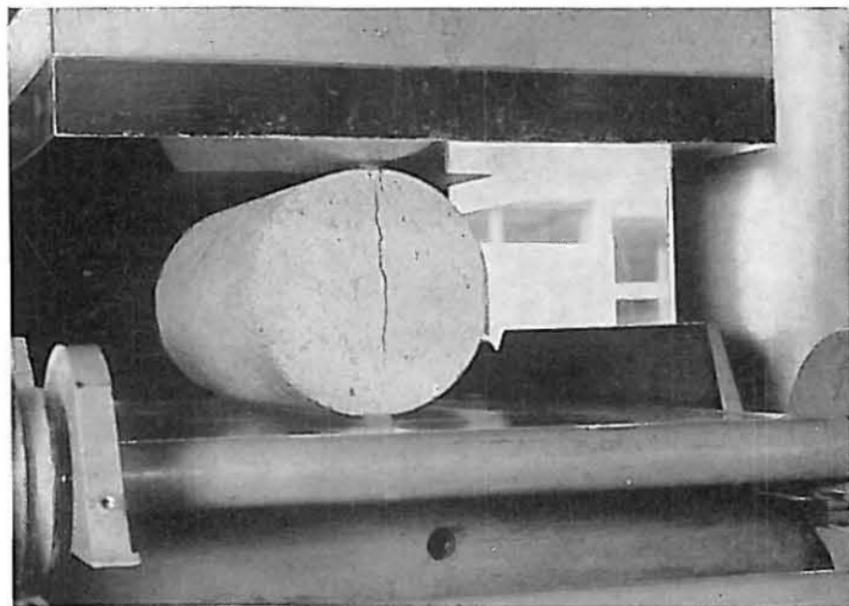


Bild 9 Bruchzustand eines Zylinders bei der Spaltzugprüfung

Tafel 2 Spaltzugfestigkeit von Betonzylindern ϕ 15 cm in Abhängigkeit von Zusammensetzung, Herstellung, Lagerung und Prüfung

Lfd. Nr.	Beton	Zylinderprüflänge	Herstellung	Lagerung bei 20 °C	Lastverteilungsstreifen aus	Rohdichte (28 Tg.)	Mittlere Spaltzugfestigkeit (28 Tage)			Im Bruchquerschnitt gebrochene Kieskörner	Erster Riß auf der Herstellunterseite (Vergleich mit gegenüberliegender Stirnfläche)		
							aus n Werten	Stand.-Abweichung					
		cm				kg/dm ³	—	kp/cm ²	kp/cm ²	%			
1	1	20	10 cm hoher Aufsatzkasten, am Kopf 10 cm abgesägt	1 Tag feucht 27 Tage Wasser	Hartfaserplatten	2,44	15	28,5	1,9	rd. 40	etwa gleichzeitig		
2					Hartfilz neu	2,44	15	28,8	3,5	rd. 40	etwa gleichzeitig		
3					Hartfilz 1x gebr.	2,42	5	26,0	2,7	rd. 40	etwa gleichzeitig		
4				1 Tag feucht 26 Tage Wasser 1 Tag trocken	Hartfilz neu	2,42	5	28,9	1,6	rd. 45	bei 3 Proben 3 sec später, sonst gleichzeitig		
5					Hartfaserplatten	2,40	10	32,5	2,1	rd. 50	etwa gleichzeitig		
6				6 Tage Wasser 21 Tage trocken	Hartfilz neu	2,41	5	34,0	2,2	rd. 50	etwa gleichzeitig		
7				30 cm hoher Aufsatzkasten	1 Tag feucht 27 Tage Wasser	Hartfaserplatten	2,43	5	24,8	1,0	rd. 50	i. M. 3 sec später	
8					1 Tag feucht 6 Tage Wasser 21 Tage trocken	Hartfaserplatten	2,40	5	30,6	1,7	rd. 45	i. M. 4 sec später	
9				30	10 cm hoher Aufsatzkasten	1 Tag feucht 27 Tage Wasser	Hartfaserplatten	2,43	5	24,3	1,2	rd. 25	i. M. 7 sec später
10							Hartfilz neu	2,43	5	23,3	2,0	rd. 35	i. M. 9 sec später
11						1 Tag feucht 6 Tage Wasser 21 Tage trocken	Hartfaserplatten	2,39	5	30,0	1,0	rd. 50	i. M. 5 sec später

Fortsetzung der Tafel 2

Lfd. Nr.	Beton	Zylinderprüflänge	Herstellung	Lagerung bei 20 °C	Lastverteilungsstreifen aus	Rohdichte (28 Tg.)	Mittlere Spallzugfestigkeit (28 Tage)			Im Bruchquerschnitt gebrochene Kieskörner	Erster Riß auf der Herstellunterseite (Vergleich mit gegenüberliegender Stirnfläche;
							aus n Werten	Stand.-Abweichung			
		cm				kg/dm ³	—	kp/cm ²	kp/cm ²	%	
12	2	20	10 cm hoher Aufsatzkasten, am Kopf 10 cm abgesägt	1 Tag feucht 27 Tage Wasser	Hartfaserplatten	2,30	15	18,8	0,70	rd. 10	etwa gleichzeitig
13					Hartfilz neu	2,31	15	18,6	1,3	rd. 15	etwa gleichzeitig
14					Hartfilz 1x gebr.	2,32	5	17,7	2,1	rd. 15	etwa gleichzeitig
15				1 Tag feucht 6 Tage Wasser 21 Tage trocknen	Hartfaserplatten	2,25	5	21,2	0,46	rd. 15	etwa gleichzeitig
16					Hartfilz neu	2,26	5	19,6	0,64	rd. 15	etwa gleichzeitig
17				30	10 cm hoher Aufsatzkasten	1 Tag feucht 27 Tage Wasser	Hartfilz neu	2,29	5	15,6	2,5
18	3	20	wie Nr. 1 bis 6	1 Tag feucht 27 Tage Wasser	Hartfaserplatten	2,31	2	29,1	—	—	etwa gleichzeitig
19			wie Nr. 1 bis 6, jedoch Kunststoffform		Hartfaserplatten	2,30	2	25,9	—	—	etwa gleichzeitig

Tafel 3 Spaltzugfestigkeit von 20 cm-Betonwürfeln in Abhängigkeit von Zusammensetzung, Lagerung und Prüfung

Lfd. Nr.	Beton	Lastwirkungs-ebene *)	Lagerung bei 20 °C	Lastverteilungsstreifen aus	Rohdichte (28 Tage)	Mittlere Spaltzugfestigkeit (28 Tage)			Im Bruchquerschnitt gebrochene Kieskörner	Erster Riß auf den Stirnseiten während der Prüfung	
						aus n Werten		Standardabweichung			
					kg/dm ³	—	kp/cm ²	kp/cm ²	%		
1	1	parallel zur Herstelloberseite	1 Tag feucht 27 Tage Wasser	Hartfaserplatten	2,43	3	31,5	3,6	rd. 50	etwa gleichzeitig	
2				Hartfilz neu	2,43	6	29,5	2,5	rd. 50	etwa gleichzeitig	
3		rechtwinklig zur Herstelloberseite	1 Tag feucht 27 Tage Wasser	Hartfilz neu	2,42	4	19,8	1,7	rd. 45	auf Herstelloberseite i. M. 7 sec früher	
4				Hartfilz 1x gebr.	2,42	2	24,2	—	rd. 55	auf Herstelloberseite i. M. 4 sec früher	
5				1 Tag feucht 26 Tage Wasser 1 Tag trocken	Hartfilz neu	2,43	3	25,3	3,5	rd. 25	auf Herstelloberseite i. M. 4 sec früher
6				2	parallel zur Herstelloberseite	1 Tag feucht 27 Tage Wasser	Hartfaserplatten	2,33	3	20,6	0,6
7	Hartfilz neu	2,32	6				17,4	1,6	rd. 20	etwa gleichzeitig	
8	rechtwinklig zur Herstelloberseite	1 Tag feucht 27 Tage Wasser	Hartfaserplatten		2,32	3	18,6	1,1	rd. 15	etwa gleichzeitig	
9			Hartfilz neu		2,31	6	14,7	2,5	rd. 15	auf Herstelloberseite i. M. 3 sec früher	
10			Hartfilz 1x gebr.		2,30	2	14,3	—	rd. 15	auf Herstelloberseite i. M. 5 sec früher	
11			1 Tag feucht 6 Tage Wasser 21 Tage trocken	Hartfilz neu	2,26	3	16,5	1,2	rd. 25	etwa gleichzeitig	

*) Lastangriff stets auf Würfelseitenfläche, Lastwirkungsrichtung stets rechtwinklig zur Einfüllrichtung des Würfels

5. Einflüsse auf die Spaltzugfestigkeit

Da Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit von zahlreichen Einflußgrößen abhängig sind, soll im folgenden untersucht werden, welchen Einfluß Betonzusammensetzung, Alter, Nachbehandlung, Probenart und Prüfverfahren auf die Spaltzugfestigkeit haben.

5.1 Betonzusammensetzung

5.1.1 Zementgehalt und Wasserzementwert

Da die Eigenschaften des Zementsteins und die Haftung zwischen Zementstein und Zuschlag mit dem W/Z -Wert verändert werden, muß auch die Spaltzugfestigkeit vom W/Z -Wert abhängig sein. Die Spaltzugfestigkeit verschiedener Betone ist in Bild 10 im Alter von 14 Tagen nach Versuchen von S. Nilsson [16] und A. Efsen und O. Glarbo [19], in Bild 11 im Alter von 28 Tagen nach Versuchen von T. Akazawa [8], F. Carneiro und A. Barcellos [9], C. K. Ramesh und S. K. Chopra [11] und nach eigenen Versuchen in Abhängigkeit vom W/Z -Wert aufgetragen. Im Alter von 28 Tagen betrug die Spaltzugfestigkeit beim W/Z -Wert von 0,80 im Mittel 45 %, beim W/Z -Wert von 0,70 im Mittel 55 % und beim W/Z -Wert von 0,60 im Mittel 70 % des Wertes bei $W/Z = 0,45$. Sie nahm im untersuchten Bereich mit wachsendem W/Z -Wert fast geradlinig ab. Die Abnahme der Spaltzugfestigkeit war kleiner als die der Druckfestigkeit, aber etwas größer als die der Biegezugfestigkeit. Die Ergebnisse von St. Walker und D. L. Bloem [20] stimmen damit nicht ganz überein. Sie fanden mit wachsendem W/Z -Wert im Bereich kleiner W/Z -Werte eine geringere Abnahme der Spaltzugfestigkeit als im Bereich größerer und insgesamt eine geringere Abnahme als bei der Biegezugfestigkeit. Zur Angabe allgemeingültiger Kennwerte sind weitere Versuche erforderlich, die auch den Einfluß des Zementes berücksichtigen.

R. J. T. Williams [21] untersuchte die Festigkeiten und den dynamischen E-Modul von *Magerbeton* mit Mischungsverhältnissen

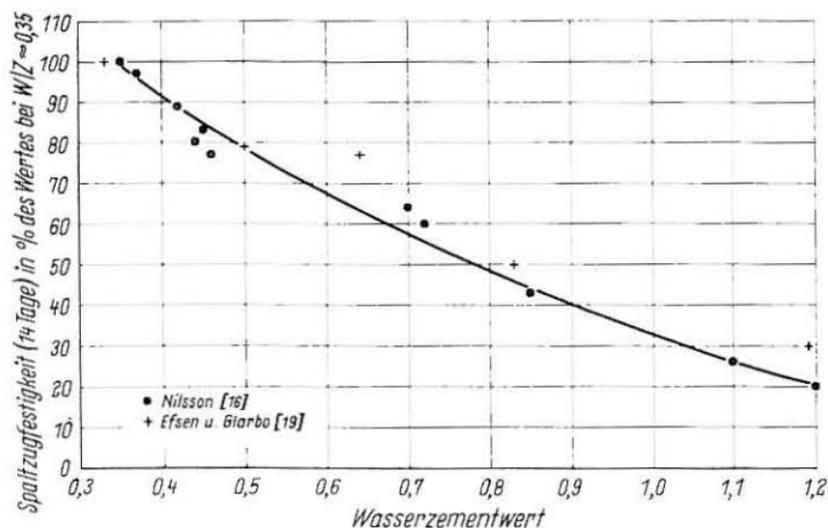


Bild 10 Spaltzugfestigkeit nach 14 Tagen in Abhängigkeit vom W/Z -Wert

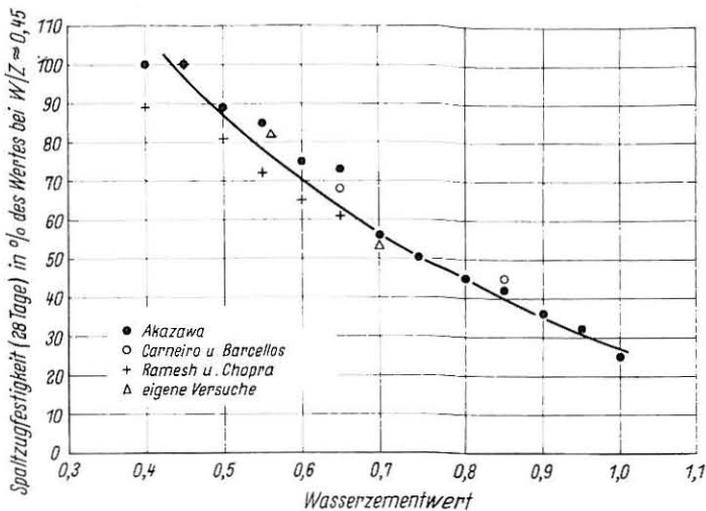


Bild 11 Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen in Abhängigkeit vom W/Z-Wert

von 1 : 8 : 0,54 bis 1 : 50 : 3,06. Die Probekörper lagerten feucht und waren vermutlich nicht mehr vollständig verdichtet. Die Spaltzugfestigkeit nahm – bezogen auf die Anfangswerte bei $W/Z = 0,54$ – mit wachsendem W/Z-Wert und Magerungsgrad bis auf 5 % ab, bei allen W/Z-Werten aber weniger als die Druckfestigkeit und mehr als die Biegezugfestigkeit und der E-Modul.

Bei einigen Versuchen wurde nicht der W/Z-Wert, sondern der Zementgehalt als Kenngröße des Betons angegeben. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Tafel 4 zusammengestellt. Danach

Tafel 4 Abnahme der Festigkeiten mit abnehmendem Zementgehalt

Lfd. Nr.	Versuche von	Zuschlag	Abnahme des Zementgehaltes kg/m^3	Prozentuale Abnahme der		
				Spaltzugfestigkeit	Biegezugfestigkeit	Druckfestigkeit
1	Gruenwald [22]	Kiessand	von 500 auf 200	35 %	–	67 %*) 57 %
2	Joosting [32]	Kiessand	von 350 auf 200	25 %	–	40 %
3	Grieb und Werner [24]	Kiessand	von 390 auf 250	30 %	26 %	40 %
4		Kalkstein	von 420 auf 230	31 %	32 %	47 %
5	Narrow und Ullberg [25]	Kiessand	von 390 auf 280	7 bis 15 %	3 bis 12 %	–
6		gebrochener Zuschlag	von 365 auf 250	15 bis 32 %	12 bis 20 %	–

*) 67 % bei Zement geringer Güte, 57 % bei Zement hoher Güte

nimmt die Spaltzugfestigkeit mit abnehmendem Zementgehalt ab, jedoch deutlich weniger als die Druckfestigkeit und im Mittel geringfügig mehr als die Biegezugfestigkeit. Auch diese Ergebnisse bestätigen die vorher herausgestellte Abhängigkeit der Spaltzugfestigkeit vom W/Z-Wert, da anzunehmen ist, daß Betone mit kleinerem Zementgehalt größere W/Z-Werte hatten.

5.1.2 Zuschlagstoffe

Da Art, Beschaffenheit und Zusammensetzung der Zuschlagstoffe über die Haftung zwischen Zementstein und Zuschlag und die Verzahnung und Abstützung des Zuschlaggerüsts allgemein die Eigenschaften des erhärteten Betons verändern können, soll auch ihr Einfluß auf die Spaltzugfestigkeit untersucht werden.

Dem Einfluß der *Kornform* und der *Oberflächenbeschaffenheit* des Zuschlags gingen S. Nilsson [16], W. E. Grieb und G. Werner [24] und J. Narrow und E. Ullberg [25] nach. Bei den Versuchen von S. Nilsson [16] wies Beton aus gebrochenem Zuschlag mit 32 mm Größtkorn im W/Z-Bereich von 0,34 bis 1,20 bei gleichem W/Z-Wert — die Druckfestigkeit wurde nicht angegeben — vorwiegend eine bis zu 10 % größere Spaltzugfestigkeit auf als Kiessandbeton mit 16 mm Größtkorn. Dieser Festigkeitsunterschied kann jedoch von Größtkorn und Kornzusammensetzung des Zuschlags, vom Mischungsverhältnis und möglicherweise auch vom Grad der Verdichtung beeinflußt sein. W. E. Grieb und G. Werner [24] untersuchten Betone mit Grobzuschlag (38 mm Größtkorn) aus Kies und aus gebrochenem Kalkstein. Die Kalksteinbetone besaßen bei gleicher Druckfestigkeit eine vorwiegend um 10 bis 20 % größere Spaltzugfestigkeit als die Kiessandbetone. Bei den Versuchen von J. Narrow und E. Ullberg [25], die den W/Z-Wert und die Druckfestigkeit nicht angaben, wiesen Betone aus Kiessand und aus gebrochenem Gestein bei gleicher Biegezugfestigkeit auch etwa gleiche Spaltzugfestigkeit auf.

Das *Größtkorn* des Zuschlags soll im allgemeinen nicht größer als ein Viertel bis ein Drittel der kleinsten Probeabmessung sein. In Tafel 5 sind Ergebnisse von F. Carneiro und A. Barcellos [9] zusammengestellt, die verschiedene Betone mit 4,8, 19 und 38 mm Größtkorn untersuchten. Bei gleichem W/Z-Wert nahm die Spaltzugfestigkeit mit abnehmendem Größtkorn insgesamt um etwa 5 bis 40 % ab. Diese Abnahme war im Bereich größerer W/Z-Werte ausgeprägter als bei kleineren und insgesamt etwas geringer als bei der Druckfestigkeit. Bei den Versuchen von R. P. Johnson [26] nahm die Spaltzugfestigkeit nur im Bereich kleiner W/Z-Werte im Mittel um 10 % zu, wenn das Zuschlaggrößtkorn bei gleichem W/Z-Wert von 4,8 auf 2,4 mm abnahm.

St. Walker und D. L. Bloem [20] untersuchten Kiessandbetone mit 9,5, 19, 38 und 64 mm Größtkorn bei gleichem Zementgehalt und etwa gleicher Konsistenz (Setzmaß). Betone mit mittleren und höheren Zementgehalten ergaben bei gleichem Zementgehalt mit wachsendem Größtkorn, wobei W/Z-Wert und Sandanteil etwas abnahmen, etwa 5 bis 10 % kleinere Druckfestigkeiten, aber nahezu unveränderte Biegezug- und Spaltzugfestigkeiten. Bei Betonen mit rund 4,5 % Luftporen im Frischbeton nahmen Spaltzugfestigkeit und Biegezugfestigkeit mit wachsendem Größtkorn vorwie-

Tafel 5 Festigkeit des Betons in Abhängigkeit vom Zuschlaggrößtkorn nach F. Carneiro und A. Barcellos [9]

Nr. Lfd.	W/Z	Z	Zuschlaggrößtkorn	Spaltzugfestigkeit nach Tagen			Druckfestigkeit nach Tagen		
				7	28	84	7	28	84
	—	kg/m ³	mm	kp/cm ²			kp/cm ²		
1	0,45	617	4,8	20,8	25,4	27,8	234	337	356
2		515	19	21,3	28,6	27,1	288	384	414
3		460	38	22,1	27,4	27,5	272	368	399
4	0,65	422	4,8	11,6	14,4	16,3	122	179	179
5		355	19	14,6	19,5	20,8	171	232	282
6		317	38	15,3	20,6	21,6	176	247	279
7	0,85	320	4,8	7,0	11,9	12,8	63,5	124	128
8		270	19	10,1	12,9	16,5	101	146	188
9		240	38	11,6	14,4	15,0	113	163	179

gend bis zu etwa 10 % und die Druckfestigkeit bis zu etwa 20 % ab. W. E. Grieb und G. Werner [24] untersuchten Kalksteinbetone mit 19, 25 und 38 mm Größtkorn. Betone gleicher Druckfestigkeit oder gleicher Biegezugfestigkeit wiesen bei kleinerem Größtkorn teilweise geringfügig größere Spaltzugfestigkeiten auf als bei größerem Größtkorn. Eigene Versuche (vgl. Tafeln 1 und 2) ergaben etwa gleiche Spaltzugfestigkeit, aber um etwa 15 % geringere Druckfestigkeiten, wenn bei gleichem W/Z-Wert und gleicher Konsistenz, aber erheblich vergrößertem Zementgehalt der Kiessand nach Sieblinie D/E durch ein Gemisch aus Normensand I und II nach DIN 1164 ersetzt wurde.

Über den Einfluß der *Kornzusammensetzung* des Zuschlags sind Versuche nicht bekannt. Die *Eigenfestigkeit* des Gesteins wird sich wie bei der Biegezugfestigkeit nur dann festigkeitsmindernd auf die Spaltzugfestigkeit auswirken, wenn es sich um sehr weiches Gestein oder um Zuschlag mit großem Anteil weniger fester Bestandteile handelt. Ausreichend feste Zuschläge mit kleinerem E-Modul können einen Spannungsausgleich im Innern des Betons begünstigen.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß auch die Spaltzugfestigkeit mit zunehmender Haftung zwischen Zement und Zuschlag und mit besserer Verzahnung des Zuschlaggerüsts zunimmt. Haftung und Verzahnung sind aber im allgemeinen bei gebrochenen Zuschlägen und bei Zuschlägen mit rauher Oberfläche besser als bei Kiessand. Daher besitzt auch Beton aus gebrochenem Zuschlag in der Regel eine um 10 bis 20 % größere Spaltzugfestigkeit als Kiessandbeton etwa gleicher Druckfestigkeit. Insgesamt kann angenommen werden, daß von praktisch vollständig verdichteten Betonen gleichen W/Z-Wertes und gleicher Zementleimenge sandreichere Mischungen und Mischungen mit kleinerem Größtkorn eine etwas größere Spaltzugfestigkeit aufweisen.

5.2 Alter des Betons

Über den Einfluß des Alters auf die Spaltzugfestigkeit verschiedener Betone mit 28 Tage-Druckfestigkeiten zwischen 60 und 400 kp/cm² berichteten T. Akazawa [8], F. Carneiro und A. Barcellos [9], C. K. Ramesh und S. K. Chopra [11], A. Voellmy [13], St. Walker und D. L. Bloem [20], W. E. Grieb und G. Werner [24] sowie J. Narrow und E. Ullberg [25]. Ihre Ergebnisse sind in Tafel 6 zusammengestellt. Wie zu erwarten war, nahm die Spalt-

Tafel 6 Spaltzugfestigkeit verschiedener Betone in Abhängigkeit vom Alter

Lfd. Nr.	Versuche von	Zuschlag	W/Z-Wert *)	Spaltzugfestigkeit nach 28 Tagen kp/cm ²	Spaltzugfestigkeit in % der 28 Tage-Spaltzugfestigkeit nach Tagen			
					3	7	14	90
1	Akazawa [8]	Kiessand	0,40 bis 1,00	32,4 bis 7,5	—	69 bis 52 i. M. 62	—	—
2	Carneiro und Barcellos [9]	Kiessand	0,45	27,1	—	79	—	102
3			0,65	18,2	—	77	—	108
4			0,85	13,1	—	72	—	113
5	Ramesh und Chopra [11]	Kiessand	0,45	26,4	60	79	—	—
6	Walker und Bloem [20]	Kiessand	0,36 bis 0,79	37 bis 26	—	—	—	97 bis 108 **) i. M. 104
7	Voellmy [13]	Kiessand	—	38,5	—	79	—	107
8	Grieb und Werner [24]	Kiessand	—	26,4	—	72	93	—
9		gebrochener Kalkstein	—	40,3	—	89	—	94
10		Leichtzuschlag	—	32,0	—	85	—	103
11	Narrow und Ullberg [25]	Kiessand	305	32,0	—	75	89	111
12			335	34,1	—	77	91	110
13			365	35,1	—	79	93	118
14		gebrochener Kalkstein	280	33,7	—	77	89	113
15			305	36,2	—	82	87	109
16			335	36,7	—	78	88	101
17			365	40,0	—	68	84	104

*) in den Zeilen 11 bis 17 dieser Spalte wurde der Zementgehalt in kg/m³ angegeben

**) unabhängig vom W/Z-Wert

zugfestigkeit mit dem Alter des Betons zu, sofern der Hydrationsgrad weiter anwuchs und die Festigkeit auch allgemein anstieg. Die Spaltzugfestigkeit erreichte bis zum Alter von 7 Tagen vorwiegend 72 bis 85 % und bis zum Alter von 14 Tagen vorwiegend 84 bis 93 % der 28 Tage-Werte. Dabei lagen Betone mit kleinerem W/Z und höherer Festigkeit überwiegend an der oberen Grenze des jeweiligen Bereichs. Zur Angabe allgemeingültiger Kennwerte sind auch hier (vgl. 5.1.1) weitere Versuche erforderlich, die auch den Einfluß des Zementes berücksichtigen. Der im Alter von 7 und 14 Tagen erreichte Anteil der 28 Tage-Spaltzugfestigkeit war im allgemeinen größer als bei der Druckfestigkeit, aber etwas kleiner als bei der Biegezugfestigkeit.

Im Alter von 90 Tagen lag die Spaltzugfestigkeit vorwiegend zwischen 100 und 113 % des jeweiligen 28 Tage-Wertes. Die Nacherhärtung nach dem 28. Tag war durchweg geringer als bei der Druckfestigkeit.

5.3 Nachbehandlung

Von der Biegezugfestigkeit her ist bekannt, daß fehlende Feuchtnachbehandlung nicht nur ausreichende Erhärtung in Frage stellt, sondern durch das Entstehen von Schwindspannungen auch die sich beim Versuch ergebende Festigkeit beträchtlich herabsetzen kann; Übersicht siehe [4]. In Tafel 7 sind die Ergebnisse einiger Untersuchungen zusammengestellt, die dem Einfluß der Feuchtnachbehandlung auf die Spaltzugfestigkeit verschiedener Betone nachgingen. Die in der Regel geringere Spaltzugfestigkeit der nur 1 oder 2 Tage feucht und anschließend an Luft gelagerten Probekörper dürfte auf ungenügende Erhärtung zurückzuführen sein. Die übrigen Ergebnisse sind nicht ganz einheitlich und scheinen zunächst nicht einmal eine Aussage darüber zu gestatten, ob die Spaltzugfestigkeit durch die gemischte Lagerung vergrößert oder verkleinert wird. Bei den sehr verschiedenen Betonen lag die Spaltzugfestigkeit der zunächst feucht und anschließend an Luft gelagerten Probekörper vorwiegend zwischen 84 und 116 % der entsprechenden Werte der stets feucht gelagerten. (Unberücksichtigt blieben dabei die Ergebnisse der Versuche von J. A. Hanson [27], bei denen der Verhältniswert zwischen den Spaltzugfestigkeiten der verschieden gelagerten hochfesten Leichtbetone einen großen Bereich umfaßte und im großen ganzen mit wachsender Betongüte zunahm.)

Die anschließende Luftlagerung ergab danach teils eine Abnahme, die allerdings wesentlich geringer war als bei der Biegezugfestigkeit [4, 24], teils sogar eine Zunahme der Spaltzugfestigkeit. Vermutlich wird nach ausreichender feuchter Vorlagerung und anschließender Luftlagerung bis zur Gewichtskonstanz eine etwas größere Spaltzugfestigkeit als nach ständiger Feuchtlagerung zu erwarten sein; denn auch nach N. B. Mitchell [10] brechen trockene Betonzylinder bei etwas größerer Belastung als feuchte Zylinder, außerdem plötzlicher und mit größerer Zerstörung der Probe. Nach bisheriger Erfahrung wird jedoch die Spaltzugfestigkeit — ausreichende Erhärtung vorausgesetzt — längst nicht in so großem Maße vom Feuchtigkeitszustand der Probekörper beeinflusst wie die Biegezugfestigkeit.

Tafel 7 Einfluß der Lagerung auf die Spaltzugfestigkeit

Lfd. Nr.	Versuche von	Proben	Lagerung		Spaltzugfestigkeit Z_s		Besonderheiten des Betons
					kp/cm ²	% von Z_s bei Feuchtlagerung	
1	Voellmy [13]	Zyl. 15/30 cm	7 Tage	bei 80 % rel. Luft- feuchte	29,2	96	—
2			28 Tage		36,0	94	—
3			90 Tage		38,8	94	—
4		Würfel 20 cm	7 Tage		28,9	108	—
5			28 Tage		35,0	104	—
6			90 Tage		38,0	102	—
7		Prismen- abschnitt 20/20/21 bis 35 cm	7 Tage		31,8	100	—
8			28 Tage		35,6	94	—
9			90 Tage		40,1	92	—
10	Efsen und Glarbo [19]	Zyl. 15/30 cm	10 Tage feucht 18 Tage an Luft	24,7	106	normaler PZ W/Z = 0,72	
11			4 Tage feucht 10 Tage an Luft	24,0	100	schnell erhärt. PZ W/Z = 0,81	
12			2 Tage feucht 5 Tage an Luft	22,1	89	sehr schnell erhärt. PZ W/Z = 0,87	
13	Grieb und Werner [24]	Zyl. 15/30 cm	7 Tage feucht 21 Tage an Luft	22,1	69	Leichtzuschlag	
14			7 Tage feucht 358 Tage an Luft	29,5	90	Leichtzuschlag	
15			7 Tage feucht 21 Tage an Luft	34,1	84	Kalkstein 19 mm Größtkorn	
16			1 Tag feucht 27 Tage an Luft	25,3	64	Kalkstein 38 mm Größtkorn	
17			7 Tage feucht 21 Tage an Luft	34,8	88		
18			7 Tage feucht 20 Tage an Luft 1 Tag feucht	41,5	104		
19	Hanson [27]	Zyl. 15/30 cm	7 Tage feucht 21 Tage an Luft	18,5 bis 48,1	59 bis 117 *) i. M. 80	Leichtzuschlag	
20	Bonzel (vgl. Tafel 2)	Zyl. 15/30 cm	27 Tage feucht 1 Tag an Luft	28,9	100	Kiessand W/Z = 0,56	
21			7 Tage feucht 21 Tage an Luft	33,2	116		
22			7 Tage feucht 21 Tage an Luft	20,4	109	Kiessand W/Z = 0,70	

*) vorwiegend mit wachsender Betongüte zunehmend

Das günstigere Verhalten der Spaltzugfestigkeit bei verschiedenen Lagerungen wird darauf zurückzuführen sein, daß die maximalen Zugspannungen bei der Spaltzugprüfung vorwiegend im Innern des Körpers und nicht wie beim Biegebalken an der Austrocknung und dem Schwinden besonders ausgesetzten äußeren Faser auftreten. Das Austrocknen der äußeren Zone dürfte hier eher noch eine gewisse Umschnürung der Probekörper zur Folge haben.

Auch die Lagerungstemperatur beeinflusst die Eigenschaften des Betons. Die Erhärtung wird durch niedrigere Temperaturen verzögert und durch höhere Temperaturen beschleunigt. Im erhärteten Beton verursachen Temperaturänderungen ein Temperaturgefälle im Betonprobekörper, das Temperaturspannungen zur Folge hat. Über den Einfluß solcher Temperaturspannungen auf die Spaltzugfestigkeit sind Versuche nicht bekannt.

Da eine Änderung des Feuchtigkeitszustandes und der Temperatur des Probekörpers die Spaltzugfestigkeit des Betons zwar gering, aber doch etwas beeinflussen kann, sollte die Spaltzugfestigkeit bei Eignungs- und Güteprüfungen an Probekörpern ermittelt werden, die stets feucht und bei gleichbleibender Temperatur gelagert werden.

5.4 Prüfverfahren

Die Eigenschaften der Baustoffe sind keine absoluten Größen und nicht nur von der Beschaffenheit des Stoffes abhängig, sondern stets auf ein bestimmtes Prüfverfahren bezogen, das den praktischen Verhältnissen möglichst nahe kommen, vor allem aber reproduzierbare Ergebnisse liefern soll. Von Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit ist bekannt, daß sie insbesondere von der Art und Einleitung der Kräfte, der Prüfgeschwindigkeit, der Gestalt und Größe der Probekörper, der Oberflächenbeschaffenheit und der Prüflage der Probekörper sowie teilweise von der Art, Abstützung und Steifigkeit der Prüfmaschinen beeinflusst werden [4, 28]. Für die Spaltzugfestigkeit soll der Einfluß der Lastverteilungstreifen und der Prüfgeschwindigkeit sowie der Form, der Abmessungen, der Herstellung und des Einbaues der Probekörper untersucht werden.

5.4.1 Lastverteilungstreifen

Die Lastverteilungstreifen, die zwischen Probekörper und Druckplatten der Prüfmaschine angeordnet werden, haben die Aufgabe, die Last gleichmäßig in den Probekörper einzuleiten. Der sich dabei im Probekörper einstellende Spannungszustand ist abhängig von den Stoffeigenschaften und den Abmessungen der Lastverteilungstreifen.

Stoffeigenschaften: In der Vergangenheit wurden Lastverteilungstreifen aus Metall, Sperrholz, Hart- und Weichfaserplatten, Hartfilz, Leder und Pappe verwendet. P. J. F. Wright [2] fand bei Lastverteilungstreifen aus Stahl im Mittel 15% geringere Spaltzugfestigkeiten als bei Sperrholz- oder Gummileisten. Nach seiner Ansicht eignet sich ein nicht zu hartes Material wie z. B. Sperrholz. L. L. Simon und M. J. Aust [29] verwendeten Holzleisten,

A. Voellmy [13] Messingleisten und E. Gruenwald [22] Leisten aus ungegerbtem Leder. S. Thaulow [30] empfiehlt Pappe oder Sperrholzleisten. Bei den Versuchen von T. Gyengö [31] erwiesen sich Hartholzleisten als zu steif und Sperrholzleisten als „geeignet“. Nach N. B. Mitchell [10] sind Pappestreifen zwar „ausreichend, aber nicht ideal“, Leisten aus Stahl oder Hartfaserplatten zu starr und Gummistreifen zu nachgiebig. Er hält Korkstreifen für „geeignet“, aber noch weitere Versuche für erforderlich. R. Sell [32] fordert für gleichmäßige Lastverteilung ausreichende Festigkeit und so große Verformbarkeit, daß auch bei einer Spaltzugfestigkeit von 5 kp/cm^2 Unebenheiten der Probekörperoberfläche von 0,2 mm Tiefe noch ausgeglichen werden. Bei seinen Versuchen erfüllten lediglich Leisten aus Hartfaserplatten und aus Filz beide Forderungen, da Weichfaser zerstört wurde, Sperrholz zu steif war und auch Gummi und Sperrholz durch strukturelle Schäden bleibend verformt wurden. Seine Ergebnisse der Spaltzugprüfung mit den als geeignet angesehenen Lastverteilungsstreifen sind in Tafel 8 zusammengestellt, sie enthält auch Versuchsergebnisse des Verfassers. Bei den eigenen Versuchen wurde nicht zwischen neuen und gebrauchten Streifen aus Hartfaserplatten unterschieden, da sich die Leisten bei der Prüfung nicht nennenswert veränderten.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß im Ausland überwiegend Leisten aus fehlerfreiem Sperrholz empfohlen werden (vgl. auch ASTM-Standard C 496-62 T) und daß von den in Deutschland verwendeten Materialien sich vor allem Lastverteilungsstreifen aus Hartfaserplatten und aus Hartfilz als geeignet erwiesen haben. Im allgemeinen dürfte aber bei Filzstreifen wohl eine etwas größere Streuung der Versuchsergebnisse zu erwarten sein.

Breite: Nach den Überlegungen des Abschnittes 2 soll die Breite der Lastverteilungsstreifen etwa $\frac{1}{10}$ des Zylinderdurchmessers oder der Querschnittshöhe von Würfeln und Prismen nicht überschreiten, da sonst Schubbrüche (vgl. Bild 5) entstehen können und die Abweichungen von der angenommenen Spannungsverteilung zu groß werden [10, 12, 13, 32].

Bei ihren Versuchen an Betonzylindern 15/30 cm verwendeten J. Narrow und E. Ullberg [25] 50 mm, W. E. Grieb und G. Werner [24] 19 mm, S. Nilsson [16] und der Verfasser (vgl. Abschnitt 4.1) 15 mm, C. K. Ramesh und S. K. Chopra [11] 12 mm und R. Sell [32] rund 8 mm breite Lastverteilungsstreifen. R. Sell und der Verfasser ordneten diese Streifen auch bei der Prüfung von 20 cm-Würfeln an. S. Thaulow [30] empfiehlt rund 50 mm breite Streifen und R. P. Johnson eine Breite von $\frac{1}{12}$ des Zylinderdurchmessers. Die Versuche von P. J. F. Wright [2] an Betonzylindern 15/30 cm ergaben bei 25 mm und 13 mm breiten Sperrholzleisten im Mittel nahezu gleichgroße Spaltzugfestigkeiten. N. B. Mitchell [10], der die Spaltzugfestigkeit von Betonzylindern 15/30 cm ohne und mit 19 bis 50 mm breiten Lastverteilungsstreifen aus Hartpappe ermittelte, fand lediglich bei 38 mm breiten Streifen stets ein dem Zugbruch entsprechendes Bruchbild (vgl. Bild 5). Auch diese Versuche ergaben keine systematischen Festigkeitsunterschiede in Abhängigkeit von der Streifenbreite.

Tafel 8 Spaltzugfestigkeit des Betons bei verschiedenen Lastverteilungstreifen und Probekörperformen

Lfd. Nr.	Versuche von	Lastverteilungstreifen aus	Zylinder ϕ 15 cm				Würfel von 20 cm Kantenlänge				Festigkeits-Verhältnis $\frac{Z_s \text{ (Würf. norm.)}}{Z_s \text{ (Zyl.)}}$	
			Probenzahl	Rohdichte	Spaltzugfestigkeit Z_s (Zyl.)	V *)	Probenzahl	Rohdichte	Spaltzugfestigkeit Z_s (Würf. norm.)	V *)		
			—	kg/dm ³	kp/cm ²	%	—	kg/dm ³	kp/cm ²	%	—	
1	Sell [32]	Hartfaser gebraucht	12	—	28,2	7,4	12	—	28,2	12,2	1,00	
2		Hartfaser neu	12	—	30,6	11,3	12	—	28,4	10,7	0,93	
3		Filz gebraucht	12	—	32,1	12,4	12	—	29,6	7,4	0,92	
4		Mittelwert	—	—	—	10,4	—	—	—	10,1	0,95	
5	Bonzel (vgl. Tafeln 2 und 3)	Beton 1	Hartfaser neu u. gebraucht	15	2,44	28,5	6,7	3	2,43	31,5	11,4	1,10
6			Hartfilz neu	15	2,44	28,8	12,2	6	2,43	29,5	8,5	1,02
7			Hartfilz 1x gebraucht	5	2,42	26,0	10,4	—	—	—	—	—
8		Beton 2	Hartfaser neu u. gebraucht	15	2,30	18,8	3,7	3	2,33	20,6	2,9	1,10
9			Hartfilz neu	15	2,31	18,6	7,0	6	2,32	17,4	9,2	0,94
10			Hartfilz 1x gebraucht	5	2,32	17,7	11,9	—	—	—	—	—
11			Mittelwert	—	—	—	8,6	—	—	—	8,0	1,04

*) V = Variationskoeffizient

Eine geringe Überschreitung der oberen Grenze der Streifenbreite wirkt sich danach nicht so nachteilig auf die Spaltzugfestigkeit aus, wie es zunächst erwartet wurde. Da sie jedoch auch keine Vorteile bringt und ihre Nachteile möglicherweise auch von der Materialart abhängen können, erscheint es sinnvoll, den rechnerischen Überlegungen zu folgen und eine Streifenbreite von $\frac{1}{10}$ des Zylinderdurchmessers nicht zu überschreiten.

Dicke: P. J. F. Wright [2] untersuchte auch die Spaltzugfestigkeit von Betonzylindern 15/30 cm mit 3, 6 und 13 mm dicken Sperrholzleisten von 13 mm Breite. Systematische Festigkeitsunterschiede ergaben sich dabei nicht. J. Narrow und E. Ullberg [25] und S. Nilsson [16] verwendeten etwa 3 mm dicke Hartfaserleisten, W. E. Grieb und G. Werner [24] und C. K. Ramesh und S. K. Chopra [11] etwa 3 mm dicke Sperrholzleisten und R. Sell [32] Streifendicken zwischen 3,4 und 6,5 mm. Nach S. Thaulow [30] soll die Dicke etwa 3 mm, nach R. P. Johnson [26] wenigstens $\frac{3}{4}$ der Breite betragen.

Der Einfluß der Streifendicke auf die Spaltzugfestigkeit dürfte, insgesamt gesehen, unbedeutend sein, wenn Streifen aus geeignetem Material verwendet werden. Je nach Zusammendrückbarkeit und Breite erscheint eine Streifendicke zwischen 3 und 10 mm zweckmäßig.

5.4.2 Prüfungsgeschwindigkeit

Nach dem Verhalten der Druck- und der Biegezugfestigkeit zu schließen, wird auch die Spaltzugfestigkeit von der Prüfungsgeschwindigkeit abhängig sein. Bei den bisherigen Versuchen wurde in der Regel mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit geprüft. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug bei den Versuchen von C. K. Ramesh und S. K. Chopra [11] etwa 7 kp/cm² je Minute für Beton und etwa 5 kp/cm² je Minute für Mörtel, bei den Versuchen von W. E. Grieb und G. Werner [24] etwa 10,5 kp/cm² je Minute, bei den Versuchen von J. Narrow und E. Ullberg [25] etwa 18,5 kp/cm² je Minute und bei den Versuchen des Verfassers (vgl. Abschnitt 4.1) rund 30 kp/cm² je Minute. S. Thaulow [30] empfiehlt für die Spaltzugprüfung eine Belastungsgeschwindigkeit von etwa $\frac{1}{4}$ derjenigen der Druckprüfung. Bei den Versuchen von N. B. Mitchell [10] hatte eine größere Belastungsgeschwindigkeit eine größere Spaltzugfestigkeit zur Folge.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß auch die Spaltzugfestigkeit bei konstanter Prüfungsgeschwindigkeit zu ermitteln ist. Geeignet sind Belastungsgeschwindigkeiten zwischen 10 und 30 kp/cm² je Minute. (Wegen konstanter Verformungsgeschwindigkeiten siehe [4]).

5.4.3 Form, Herstellung und Einbau der Probekörper

Die Spaltzugfestigkeit kann an Probekörpern verschiedener Form ermittelt werden. In Tafel 9 sind die Ergebnisse der Versuche von S. Nilsson [16] und B. R. Sen und Prakasch Desayi [17] zusammengestellt, die die Spaltzugfestigkeit von Betonzylindern 15/30 cm mit der Spaltzugfestigkeit von Würfeln verschieden zusammengesetzter Betone verglichen. Die Würfel waren teils normal (Bild 8, Fall a) und teils diagonal (Bild 8, Fall b) in die

Tafel 9 Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit von Form und Einbau der Probekörper

Lfd Nr.	Versuche von	Beton- mischungs- verhältnis	Zylinder 15/30 cm		Würfel normal *)		Würfel diagonal *)		Festigkeitsverhältnis	
			Spaltzugfestigkeit Z_s (Zyl.)	V **)	Spaltzugfestigkeit Z_s (W. n.)	V **)	Spaltzugfestigkeit Z_s (W. d.)	V **)	$\frac{Z_s \text{ (W. n.)}}{Z_s \text{ (Zyl.)}}$	$\frac{Z_s \text{ (W. d.)}}{Z_s \text{ (Zyl.)}}$
1	Nilsson [16]	1 : 4,8 : 0,35	43,4	5,3	42,8	5,3	36,4	7,0	0,99	0,84
2		1 : 4,5 : 0,37	41,7	11,7	39,8	7,2	36,0	3,5	0,96	0,86
3		1 : 5,7 : 0,37	39,4	8,0	37,3	3,8	31,5	10,8	0,95	0,80
4		1 : 4,4 : 0,42	38,1	3,6	35,8	5,2	34,4	9,2	0,94	0,90
5		1 : 3,9 : 0,45	35,7	5,0	32,7	0,9	33,0	7,8	0,92	0,93
6		1 : 7,7 : 0,47	34,9	7,9	31,5	3,8	26,5	6,6	0,90	0,76
7		1 : 6,5 : 0,48	31,6	5,0	30,8	12,6	25,6	11,2	0,97	0,81
8		1 : 7,8 : 0,70	28,4	5,4	27,3	5,3	21,3	4,3	0,96	0,75
9		1 : 6,2 : 0,70	27,6	5,2	25,8	1,8	18,0	4,4	0,94	0,70
10		1 : 7,1 : 0,85	18,4	6,1	16,5	3,0	11,8	4,0	0,90	0,64
11		1 : 11,5 : 1,10	14,3	4,5	15,0	1,1	9,9	10,6	1,05	0,69
12		1 : 9,9 : 1,20	8,7	7,5	9,1	2,0	6,7	4,3	0,96	0,77
13		Mittelwert	—	6,3	—	4,3	—	7,0	0,95	0,79
14	Sen und Prakasch Desayi [17]	1 : 3,0 : 0,30	29,6	—	24,4	—	32,1	—	0,82	1,08
15		1 : 4,5 : 0,42	28,7	—	26,7	—	27,8	—	0,93	0,97
16		1 : 6,0 : 0,50	22,2	—	22,1	—	22,7	—	1,00	1,02
17		1 : 6,0 : 0,55	21,9	—	22,2	—	23,1	—	1,01	1,05
18		1 : 7,5 : 0,50	21,4	—	21,0	—	22,7	—	0,98	1,06
19		1 : 9,0 : 0,57	17,9	—	14,6	—	16,0	—	0,82	0,89
20		Mittelwert	—	—	—	—	—	—	0,93	1,01

*) Versuchsanordnung siehe Bild 8 und Abschnitt 3; bei den Versuchen von Nilsson wurden 20 cm-Würfel, bei den übrigen Versuchen 15 cm-Würfel geprüft

***) V = Variationskoeffizient

Prüfmaschine eingesetzt worden. Tafel 8 enthält die Spaltzugfestigkeit von Betonzyindern ϕ 15 cm und von normal eingesetzten 20 cm-Würfeln nach Versuchen von R. Sell [32] und des Verfassers (vgl. Tafeln 2 und 3). Der Verhältniswert zwischen den Spaltzugfestigkeiten der normal eingebauten Würfel und der Zylinder aller Versuche lag vorwiegend zwischen 0,92 und 1,10, im Mittel bei 0,96 und war unabhängig von der Betongüte. Dies bedeutet auch, daß die Spaltzugfestigkeiten von Betonzyindern 15/30 cm und von normal eingebauten Würfeln von 15 und 20 cm

Kantenlänge etwa gleich groß sind. Der Verhältniswert zwischen den Spaltzugfestigkeiten der diagonal eingebauten Würfel und der Betonzylinder 15/30 cm betrug bei den Versuchen von S. Nilsson [16] im Mittel 0,79 und bei den Versuchen von B. R. Sen und Prakasch Desayi [17] im Mittel 1,01. Die Streuung der Ergebnisse war bei den Einzelprüfungen der drei Verfahren der Spaltzugprüfung nicht sehr verschieden, im Mittel bei den normal eingebauten Würfeln etwas kleiner als bei den übrigen Verfahren.

Eine weitergehende Beurteilung der Ergebnisse erscheint nicht möglich, weil die dazu erforderlichen Angaben fehlen. Probekörper verschiedener Form können jedoch unterschiedliche Verdichtungsgrade und Rohdichten (vgl. Tafeln 2, 3 und 8) und deshalb auch unterschiedliche Festigkeiten aufweisen. Bei der Prüfung der Würfel ergeben sich auch höhere Spaltzugfestigkeiten (vgl. Tafel 3), wenn die Herstellungsoberseite (Abstreichseite) bei der Spaltzugprüfung normal oder diagonal eingesetzter Würfel Seitenfläche ist, d. h. wenn die Lastwirkungsebene nicht gleichlaufend mit der Einfüllrichtung beim Herstellen der Würfel ist. Bei den Versuchen des Verfassers in Tafel 8 war diese Bedingung erfüllt, vermutlich lag deshalb sein Festigkeitsverhältniswert im Mittel etwas höher. Auch die Unterschiede zwischen den Festigkeitsverhältniswerten der Versuche von S. Nilsson [16] und B. R. Sen und Prakasch Desayi [17] (vgl. Tafel 9) sind möglicherweise damit zu erklären. — Nach den Ergebnissen der Tafel 2 beeinflusst der Aufbeton im Aufsatzkasten bei dem nicht sehr wasserreichen Beton die Spaltzugfestigkeit der Zylinder nicht. Deutlich höhere Spaltzugfestigkeiten und geringere Streuungen ergaben sich jedoch, wenn am Kopf (Herstellungsoberseite) der erhärteten Betonzylinder vor der Prüfung ein 10 cm langes Teilstück abgesägt wurde.

A. Voellmy [13] und R. Sell [32] untersuchten auch die Spaltzugfestigkeit von Prismenabschnitten und R. Joosting [23] die Spaltzugfestigkeit von Bohrkernen 15/30 cm. Die Spaltzugfestigkeit der Prismenabschnitte war meist etwas größer, die der Bohrkern teils größer und teils kleiner als die der gesondert hergestellten Betonzylinder 15/30 cm. Auch hier fehlen zur weiteren Deutung der Ergebnisse einzelne Kennwerte. — R. Sell [32] und S. Nilsson [33] prüften Würfel und teilweise auch Zylinder auf Druckfestigkeit, an denen zuvor die Spaltzugfestigkeit ermittelt worden war. Die Druckfestigkeit dieser Würfel war im Mittel nach S. Nilsson ebenso groß, nach R. Sell etwa 20 % kleiner, die der Zylinder etwa 40 % kleiner als die der vorher nicht auf Spaltzugfestigkeit geprüften Würfel. — Schließlich sollen noch die Arbeiten von B. R. Sen und Prakasch Desayi [18] und von G. Hondros [34] erwähnt werden, die für die verschiedenen Spaltzugprüfungen auch die Poissonsche Zahl und den Elastizitätsmodul des Betons mitteilen.

5.4.4 Abmessungen der Probekörper

Dem Einfluß der Probekörperabmessungen auf die Spaltzugfestigkeit gingen P. J. F. Wright [2], A. Efsen und O. Glarbo [19], A. Voellmy [13] und W. E. Grieb und G. Werner [24] nach. Die wichtigsten Ergebnisse der entsprechenden Versuche sind in

Tafel 10 Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit von den Abmessungen der Betonzylinder

Lfd. Nr.	Versuche von	Probenanzahl je Probenabmessung	Spaltzugfestigkeit in kp/cm ²									
			Zylinder-Durchmesser 10 cm			Zylinder-Durchmesser 15 cm						
			l = 10 cm	l = 20 cm	l = 6 cm	l = 7,5 cm	l = 9 cm	l = 12 cm	l = 15 cm	l = 18 cm	l = 24 cm	l = 30 cm
1	Wright [2]	25	35,7	—	—	32,9	—	—	31,8	—	—	32,9
2	Efsen und Glarbo [19]	7	25,8	26,0	—	—	—	—	—	—	—	25,2
3		7	—	35,8	—	—	—	—	—	—	—	32,8
4	Voellmy [13]	2	—	—	27,8	—	32,4	33,3	(25,4)	32,9	33,5	30,4
5		2	—	—	(16,3)	—	36,5	34,4	34,9	37,8	36,8	38,5
6		2	—	—	46,4	—	41,8	43,4	42,7	39,9	43,9	41,2
7	Grieb und Werner [24]	2	—	—	—	—	—	—	19,0	—	—	19,4
8		2	—	—	—	—	—	—	21,1	—	—	21,1
9		2	—	—	—	—	—	—	27,1	—	—	30,2
10		2	—	—	—	—	—	—	30,2	—	—	25,3
11		2	—	—	—	—	—	—	25,0	—	—	27,4

Tafel 10 zusammengestellt. Danach beeinflusst die Zylinderlänge die Spaltzugfestigkeit nicht und scheint auch der Einfluß des Zylinderdurchmessers sehr gering zu sein. Die Streuung der Ergebnisse war im allgemeinen bei den größeren Probekörpern etwas kleiner. Auch nach S. Thaulow [30] und N. B. Mitchell [10] ist die Spaltzugfestigkeit nahezu unabhängig von den Probekörperabmessungen. Lediglich R. P. Johnson [26] fand — bei allerdings 2,7mal so großer Belastungsgeschwindigkeit — an Zylindern von 3,75 cm Durchmesser und 7,5 cm Länge im Mittel eine 25% größere Spaltzugfestigkeit und eine erheblich größere Versuchsstreuung als an Zylindern 15/30 cm. Bei den Versuchen des Verfassers (vgl. Tafel 2) wiesen die 20 cm langen Zylinder ϕ 15 cm durchweg eine wenigstens 10% größere Spaltzugfestigkeit auf als die 30 cm langen Zylinder. Diese Ergebnisse können zur Beurteilung des Einflusses der Zylinderlänge jedoch nicht herangezogen werden, da die höhere Spaltzugfestigkeit der 20 cm langen Betonzylinder wohl vorwiegend darauf zurückzuführen ist, daß an ihrem Kopf (Herstellungsobenseite) vor der Spaltzugprüfung eine Schicht mit oft etwas geringer Güte abgesägt wurde (vgl. Abschnitte 4 und 5.4.3).

Nach den bisherigen Erfahrungen ist also die Spaltzugfestigkeit von den Probekörperabmessungen weitgehend unabhängig. Dies könnte damit im Zusammenhang stehen, daß hier im Gegensatz zu anderen Zugprüfverfahren nur ein verhältnismäßig kleiner Bereich im Innern des Probekörpers maximalen Beanspruchungen ausgesetzt wird. Die Spaltzugfestigkeit von Beton mit 30 mm Größtkorn sollte jedoch im allgemeinen an Zylindern 15/30 cm oder an 20 cm-Würfeln ermittelt werden.

6. Verhältnis der Spaltzugfestigkeit zu anderen Festigkeiten

Für die Beurteilung eines Baustoffes ist neben der Größe einer bestimmten Festigkeit auch der Verhältniswert zwischen den verschiedenen Festigkeiten von Bedeutung. Da alle Größen, die Einfluß auf die einzelnen Festigkeiten nehmen, auch die Verhältniswerte verändern, ergibt sich beim Vergleich mehrerer Untersuchungen in der Regel ein größerer Streubereich und eine nicht einfach überschaubare Abhängigkeit. Im allgemeinen ist es daher recht schwierig, einfache Richtwerte für bestimmte Bedingungen anzugeben. In Tafel 11 sind die Festigkeitsergebnisse der Spaltzugprüfung, der Druckprüfung und der Biegezugprüfung aus bekannten Versuchsarbeiten zusammengestellt. Berücksichtigt wurden Untersuchungen an normalem Beton, Mörtel, Magerbeton und hochfestem Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Tafel 11 enthält auch Angaben über Form und Abmessungen der Probekörper und die Art der Biegezugprüfung sowie über die Streuung der verschiedenen Festigkeitsergebnisse.

Der Variationskoeffizient der Spaltzugfestigkeit war durchweg deutlich größer als bei der Druckfestigkeit, aber in der Regel etwas kleiner als bei der Biegezugfestigkeit und deutlich kleiner als bei der direkten Zugfestigkeit. (Der Frage, warum die verschiedenen Prüfverfahren unterschiedliche Zugfestigkeiten zur Folge haben, soll in einer späteren Arbeit nachgegangen werden.)

6.1 Druckfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit

Für die Abhängigkeit zwischen Spaltzugfestigkeit Z_s und Druckfestigkeit D werden in der Literatur folgende Gleichungen angegeben:

- T. Akazawa [8]: $Z_s = 0,46 \cdot D^{0,73}$ (Mörtelzylinder)
 $Z_s = 0,396 \cdot D^{0,73}$ (Betonzylinder)
- F. Carneiro und
A. Barcellos [9]: $Z_s = 0,339 \cdot D^{0,735}$ (Betonzylinder)
- C. K. Ramesh und
S. K. Chopra [11]: $Z_s = 1,168 \cdot D^{0,748}$ (Mörtel, Würfel für D)
 $Z_s = 2,172 \cdot D^{0,604}$ (Beton, Würfel für D)
- B. R. Sen und
Prakasch Desayi [17]: $Z_s = 0,628 \cdot D^{0,730}$ (Beton, Würfel für D)
 $Z_s = 0,851 \cdot D^{0,714}$ (Betonzylinder)
- A. Efsen und
O. Glarbo [19]: $Z_s = 0,435 \cdot D^{0,73}$ } (Betonzylinder)
 $D = (5 + 0,2 \cdot Z_s) \cdot Z_s$ }
- M. R. Vinayaka [36]: $Z_s = 0,88 \cdot D^{0,716}$ (Betonzylinder)

Die Nichtübereinstimmung dieser Gleichungen, die vorwiegend auf unterschiedliche Rohdichte, Probekörperabmessungen und Prüfverfahren zurückzuführen ist, veranlaßte den Verfasser, die Versuchsergebnisse der Spaltzugfestigkeit und der Druckfestigkeit der Tafel 11 in Bild 12 aufzutragen. Danach nimmt die Spaltzugfestigkeit Z_s grundsätzlich mit wachsender Druckfestigkeit D

Tafel 11 Versuchsergebnisse über das Verhältnis der Spaltzugfestigkeit zur Druck- und zur Biegezugfestigkeit

Nr.	Versuche von	Merkmal der Zusammensetzung	Spaltzugprüfung			Druckprüfung			Biegezugprüfung				Festigkeitsverhältniswerte	
			Probenabmess.	Festigkeits Z_s	v %)	Probenabmess.	Festigkeits D	v %)	Balkenabmess.	Belastungsart **)	Festigkeits B	v %)	D $\frac{D}{Z_s}$	B $\frac{B}{Z_s}$
1	Akazawa [8]	Beton, alt	Zyl. 15/30	5 ... 28	—	Zyl. 15/30	39 ... 331	—	15/15/80	E	10 ... 56	—	6,3 ... 14,1	1,4 ... 2,6
2	Ramesh und Chopra [11]	Beton	Zyl. 15/30	16 ... 36	2,7	Würf. 15	186 ... 509	1,4	10/10/50	E	34 ... 68	4,4	11,6 ... 17,1	1,9 ... 2,2
3	Thaulow [30]	Beton	Zyl. 15/30	—	—	—	—	—	15/15/52,5	D	—	—	—	1,7
4	Rüsch und Hilsdorf [7]	Beton	Zyl. 15/30	14 ... 33 (*****)	—	Zyl. 15/30	132 ... 473	—	15/10/70	E	29 ... 56 (*****)	—	8,6 ... 16,7	1,6 ... 2,1
5						Würf. 20	148 ... 548	—	15/10/70	D	26 ... 52 (*****)	—	9,9 ... 19,4	1,3 ... 1,6
6	Walker und Bloem [20]	Beton	Zyl. 15/30	24 ... 37	—	Zyl. 15/30	163 ... 418	—	15/15/90	D	30 ... 55	—	6,8 ... 11,7	1,1 ... 1,6
7	Eisen und Glarbo [19]	Beton	Zyl. 15/30	11 ... 38	6,6	Zyl. 15/30	95 ... 455	5,7	10/10/60	D	16 ... 42	6,8	8,2 ... 12,5	1,5 ... 1,1
8	Rüsch und Vigerust [35]	Beton	Zyl. 15/30	28 ... 38 (*****)	6,0	Würf. 20	280 ... 630	2,5	15/10/70	E	43 ... 48 (*****)	4,6	10 ... 17	1,6 ... 1,2
9	Grieb und Werner [24]	Kies-sand-beton	Zyl. 15/30	10 ... 40	—	Zyl. 15/30	83 ... 468	—	15/15/52,5	D	18 ... 55	—	7,4 ... 12,2	2,0 ... 1,2
10		Kalkstein-beton	Zyl. 15/30	13 ... 45	—	Zyl. 15/30	95 ... 518	—	15/15/52,5	D	25 ... 67	—	6,7 ... 13,0	2,0 ... 1,3
11		Leicht-beton	Zyl. 15/30	21 ... 43	—	Zyl. 15/30	209 ... 693	—	15/15/52,5	D	30 ... 50	—	8,9 ... 18,9	1,8 ... 1,1
12	Narrow und Ullberg [25]	Beton	Zyl. 15/30	20 ... 47	—	—	—	—	15/15/52,5	D	38 ... 65	—	—	1,9 ... 1,4

13	Williams [21]	Magerbeton	Zyl. 15/30	1,8 ... 35	—	Würf. 10	17 ... 514	—	10/10/50	D	3,9 ... 43	—	9,5 ... 14,7	2,2 ... 1,2
14	Wright [2]	Beton	Zyl. 15/30	28	5,0	Würf. 10	418	3,5	10/10/40	D	42	6,0	14,9	1,5
15	Sell [32]	Beton	Zyl. 5/10	30	10,4	10/15/15	328	15,5	15/10/70	D	44	8,7	10,9	1,5
16	Akazawa [8]	Mörtel	Zyl. 15/30	8 ... 41	—	Zyl. 5/10	51 ... 498	—	—	—	—	—	6,1 ... 12,1	—
17		Beton, neu	Zyl. 15/30	5 ... 32	—	Zyl. 15/30	34 ... 402	—	—	—	—	—	6,8 ... 12,8	—
18	Carneiro und Barcellos [9]	Beton	Zyl. 15/30	10 ... 29	—	Zyl. 15/30	101 ... 414	—	—	—	—	—	9,7 ... 15,3	—
19	Gruenwald [22]	Beton	Zyl. 15/30	15 ... 31	11	Zyl. 15/30	139 ... 427	2,5	—	—	—	—	8,9 ... 13,8	—
20	Voellmy [13]	Beton	Zyl. 15/30	29 ... 41	—	Zyl. 15/30	317 ... 407	—	—	—	—	—	9,7 ... 11,0	—
21	Sen und Prakash Desayi [17]	Beton	Zyl. 15/30	18 ... 30	—	Zyl. 15/30	185 ... 421	—	—	—	—	—	10,3 ... 14,2	—
22	Joosting [23]	Beton	Zyl. 15/30	23 ... 31	—	Würf. 20	289 ... 487	—	—	—	—	—	12,5 ... 15,7	—
23	Ramesh und Chopra [11]	Mörtel	Zyl. 5/7,5	14 ... 65	4,6	Würf. 7	91 ... 473	3,3	—	—	—	—	6,2 ... 7,5	—
24	Zentrallabor Madrid [6]	Beton	—	14	9,2	—	135	7,3	—	—	—	—	9,6	—
25	Hanson [27]	Leichtbeton	Zyl. 15/30	25 ... 47	—	Zyl. 15/30	210 ... 602	—	—	—	—	—	8,4 ... 73,6	—
26	Bonzel (vgl. Tafel 2)	Kies-sandbeton	Zyl. 15/30	19 u. 29	1,9	Würf. 20	254 u. 403	—	—	—	—	—	12,8 u. 13,8	—

*) V = Variationskoeffizient; **) E = mittige Einzellast, D = Drittelspannbelastung; ***) bei allen Versuchen nahm D/Z_R mit wachsender Betongüte zu; ****) B/Z_S ist bei lfd. Nr. 1 bis 5 unabhängig von der Betongüte, nimmt bei lfd. Nr. 6 mit der Betongüte zu und bei lfd. Nr. 7 bis 13 mit wachsender Betongüte vorwiegend ab; *****) Proben lagerten 1 Woche feucht und 3 Wochen an Raumluft.

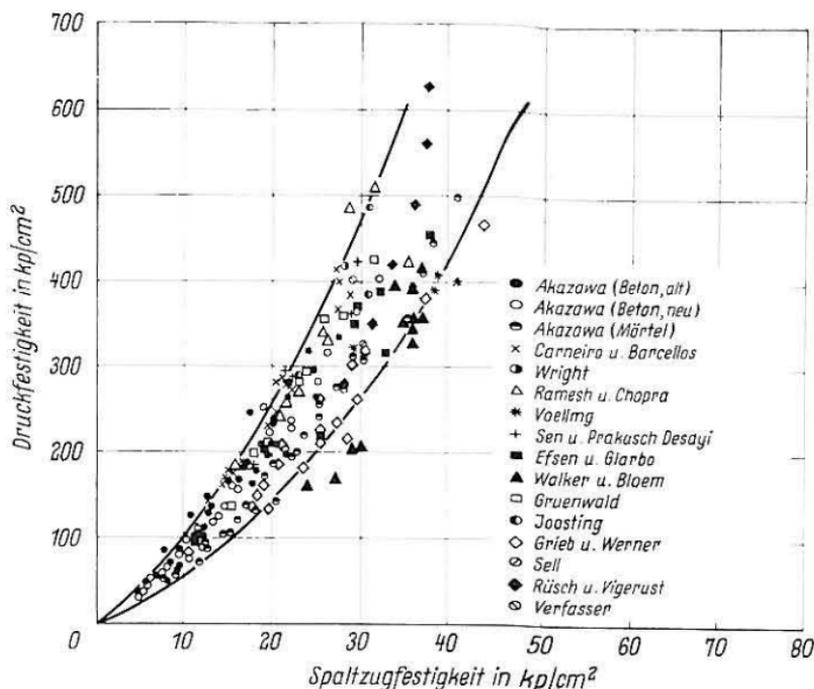


Bild 12 Abhängigkeit zwischen Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit

zu, diese Zunahme wird jedoch mit wachsender Betongüte kleiner. Daher nimmt auch der Verhältnisswert D/Z_s mit wachsender Betongüte zu. Der in Bild 12 vorhandene Streubereich ist vorwiegend darauf zurückzuführen, daß nicht alle Bedingungen der verglichenen Versuche gleich waren und daß ein gleicher Verdichtungsgrad an den Stellen maximaler Beanspruchung insbesondere auch bei unterschiedlichen Probekörpern nicht voraussetzen ist. In Tafel 12 sind der einer bestimmten Druckfestigkeit zugehörige Bereich der Spaltzugfestigkeit nach Bild 12 und die entsprechenden Festigkeitsverhältnisswerte angegeben. Danach liegt der Verhältnisswert D/Z_s je nach Betongüte (etwa B 100 bis B 600) im Mittel zwischen 8,0 und 14,5 und für Beton der Güte B 300 im Mittel bei 10,9.

Tafel 12 Richtwerte für den Zusammenhang zwischen Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit

Druckfestigkeit D	Zugehöriger Bereich der Spaltzugfestigkeit Z_s	Verhältnisswert D/Z_s	
		Einzelwerte	Mittel
kp/cm ²	kp/cm ²	—	—
100	10 bis 15	10,0 bis 6,7	8,0
200	17 bis 25	11,8 bis 8,0	9,5
300	22 bis 33	13,6 bis 9,1	10,9
400	27 bis 39	14,8 bis 10,3	12,1
500	31 bis 44	16,1 bis 11,4	13,3
600	35 bis 48	17,2 bis 12,5	14,5

6.2 Biegezugfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit

Noch schwieriger ist es, Richtwerte für das Verhältnis Biegezugfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit zu nennen, da die Biegezugfestigkeit in starkem Maße von den Probekörperabmessungen, vom Prüfverfahren und von der Lagerung abhängt [4] und da bei den Probekörpern der Biegezug- und der Spaltzugprüfung noch eher ein ungleicher Verdichtungsgrad vorhanden sein kann. In Bild 13 sind die Versuchsergebnisse der Tafel 11 aufgetragen. Danach nimmt die Spaltzugfestigkeit Z_s mit wachsender Betongüte nahezu in gleichem Maße, allenfalls geringfügig stärker zu als die Biegezugfestigkeit B . Der Verhältniswert B/Z_s nimmt

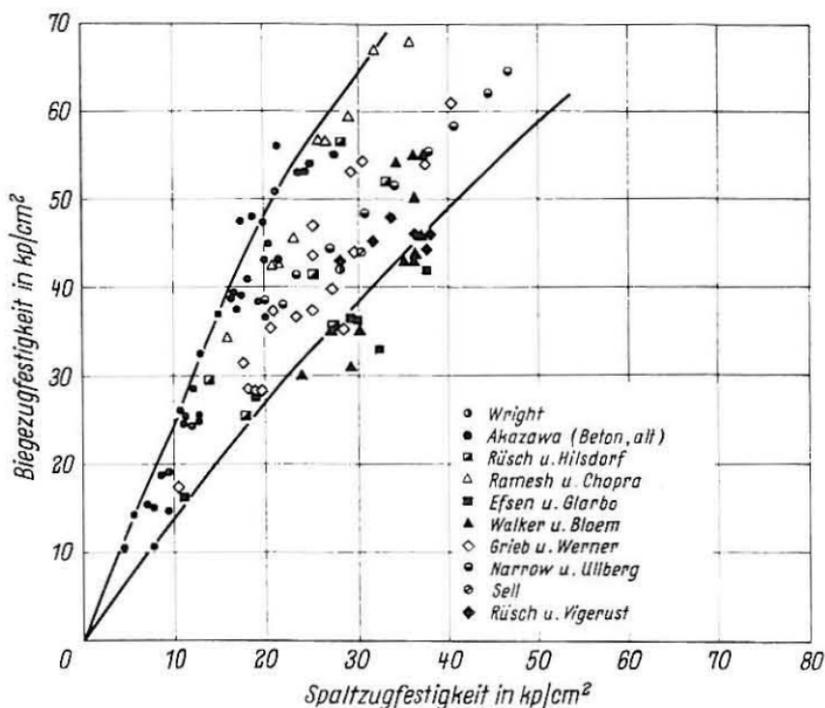


Bild 13 Abhängigkeit zwischen Spaltzugfestigkeit und Biegezugfestigkeit

Tafel 13 Richtwerte für den Zusammenhang zwischen Spaltzugfestigkeit und Biegezugfestigkeit

Biegezugfestigkeit B	Zugehöriger Bereich der Spaltzugfestigkeit Z_s	Verhältniswert B/Z_s	
		Einzelwerte	Mittel
kp/cm ²	kp/cm ²	—	—
10	4 bis 7	2,5 bis 1,4	2,0
20	8 bis 14	2,5 bis 1,4	1,9
30	12 bis 23	2,5 bis 1,3	1,8
40	16 bis 32	2,5 bis 1,2	1,6
50	21 bis 41	2,4 bis 1,2	1,6
60	27 bis 51	2,2 bis 1,2	1,5

dementsprechend mit wachsender Betongüte etwas ab. Wie Bild 13 zeigt, streuen die Versuchsergebnisse jedoch sehr. Die von J. Narrow und E. Ullberg [21] angegebene lineare Beziehung $B = Z_s + 17,5$ gilt annähernd nur bei einer Spaltzugfestigkeit von $Z_s \geq 20 \text{ kp/cm}^2$ unter den bei diesen Versuchen vorhandenen Bedingungen.

In Tafel 13 sind der einer bestimmten Biegezugfestigkeit zugehörige Bereich der Spaltzugfestigkeit und die entsprechenden Verhältniszerte angegeben. Dazu ist jedoch zu bemerken, daß die Grenze $B/Z_s = 2,5$ fast ausschließlich von den Ergebnissen der älteren Versuche von T. Akazawa [8] bestimmt wird und daß B/Z_s je nach Betongüte im Mittel etwa zwischen 2,0 und 1,5 liegt. Der Fehler wird sich vermutlich in Grenzen halten, wenn angenommen wird, daß die Biegezugfestigkeit beim Beton der Güte B 300 und höher im Mittel etwa 1,5mal so groß ist wie die Spaltzugfestigkeit.

6.3 Zugfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit

Die Festigkeiten der direkten Zugprüfung waren im allgemeinen niedriger als die der Spaltzugprüfung und wiesen auch durchweg die größere Streuung auf (vgl. auch Abschnitt 1).

P. J. F. Wright [2] fand am Beton nach Zeile 14 der Tafel 11 eine direkte Zugfestigkeit Z von 19 kp/cm^2 bei einem Variationskoeffizienten von $7,0\%$ und einem Verhältniszert Z/Z_s von $0,68$. Bei Versuchen von C. K. Ramesh und S. K. Chopra [11] am Mörtel nach Zeile 23 der Tafel 11 lag die direkte Zugfestigkeit Z zwischen 14 und 27 kp/cm^2 bei einem mittleren Variationskoeffizienten von $6,1\%$. Der Verhältniszert Z/Z_s lag vorwiegend zwischen $0,75$ und $0,41$ und nahm mit wachsender Mörtelgüte ab. Nach Angaben des Zentralversuchslabors für Baustoffe und

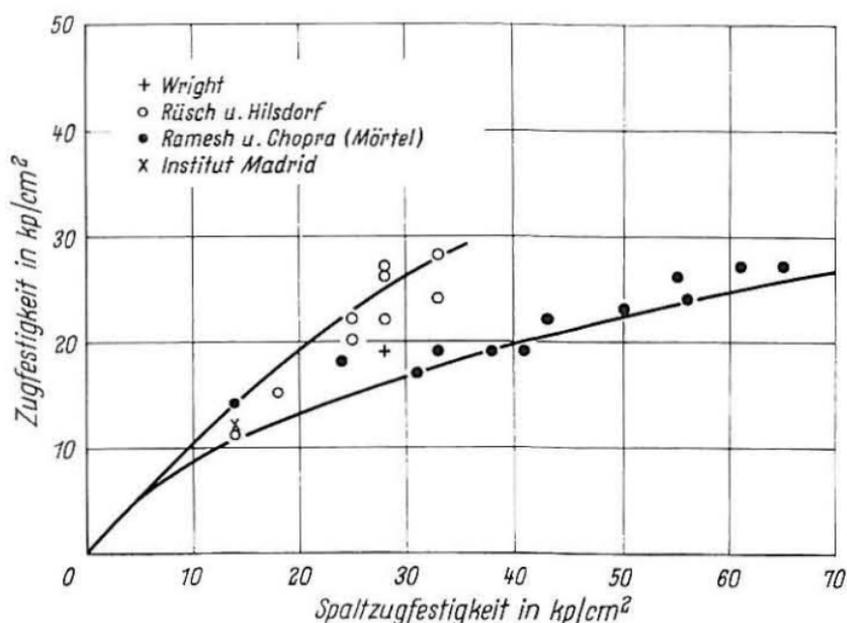


Bild 14 Abhängigkeit zwischen Spaltzugfestigkeit und direkter Zugfestigkeit

Konstruktionen in Madrid [6] betrug die direkte Zugfestigkeit am Beton nach Zeile 24 der Tafel 11 bei einem Variationskoeffizienten von 10,4% im Mittel 85% der Spaltzugfestigkeit. Wie das Ergebnis der RILEM-Umfrage [6] zeigt, ergaben auch Versuche der Institute in Lüttich, Tokio, London und München im allgemeinen etwas höhere Werte für die Spaltzugfestigkeit. Bei den Versuchen von H. Rüsck und H. Hilsdorf [7], die dabei auch den Einfluß der Dehnungsgeschwindigkeit untersuchten und für geringere Dehnungsgeschwindigkeiten meist kleinere, teilweise aber auch etwas größere direkte Zugfestigkeiten fanden, lag der Verhältniswert Z/Z_s insgesamt zwischen 0,72 und 1,0. Eine systematische Abhängigkeit von der Betongüte ergab sich dabei nicht.

In Bild 14 sind die Ergebnisse der direkten Zugprüfung in Abhängigkeit von der zugehörigen Spaltzugfestigkeit aufgetragen. Für eine umfassende Aussage reichen diese Ergebnisse nicht aus, zumal die Festigkeiten von C. K. Ramesh und S. K. Chopra [11] an Mörtelprobekörpern ermittelt wurden. Bild 14 deutet jedoch an, daß mit wachsender Betongüte die Spaltzugfestigkeit Z_s mehr zunimmt als die direkte Zugfestigkeit Z und der Verhältniswert Z/Z_s etwas abnimmt. Der Fehler wird sich vermutlich in Grenzen halten, wenn für die direkte Zugfestigkeit im Mittel das 0,75fache der Spaltzugfestigkeit angenommen wird.

7. Zusammenfassung

Für die Spaltzugfestigkeit des Betons und ihre Ermittlung gilt aufgrund von Untersuchungen folgendes:

7.1 Die Spaltzugfestigkeit kann in üblichen Druckprüfmaschinen an Zylindern (liegend) sowie an würfelförmigen oder prismatischen Probekörpern ermittelt werden. Würfel und Prismen mit quadratischem Querschnitt können dabei sowohl normal als auch diagonal in die Prüfmaschine eingesetzt werden (vgl. Bild 8).

7.2 Zur gleichmäßigen Lasteinleitung sind zwischen Druckplatten und Probekörper Lastverteilungstreifen anzuordnen. Bewährt haben sich Streifen aus Hartfaserplatten und aus gebrauchtem (zusammengedrücktem) Hartfilz. Ihre Breite soll $1/10$ des Zylinderdurchmessers oder der Würfelkantenlänge nicht überschreiten, die Dicke je nach Zusammendrückbarkeit und Breite etwa 3 bis 10 mm betragen.

7.3 Auch bei der Spaltzugprüfung ist eine konstante Prüfgeschwindigkeit einzuhalten. Geeignet sind Belastungsgeschwindigkeiten zwischen 10 und 30 kp/cm² je Minute.

7.4 Die Spaltzugfestigkeit ist von den Abmessungen üblicher Probekörper weitgehend unabhängig und bei gleichem Verdichtungsgrad für Zylinder 15/30 cm und 20 cm-Würfel etwa gleich.

7.5 In der Regel fällt die Spaltzugfestigkeit etwas größer aus, wenn am Kopf der Zylinder vor der Prüfung ein Teilstück abgesägt wird und wenn bei der Prüfung von Würfeln die Herstellungsoberseite Seitenfläche ist (Lastwirkungsebene nicht gleichlaufend mit Einfüllrichtung).

7.6 Die Spaltzugfestigkeit nimmt mit wachsendem W/Z-Wert ab, jedoch etwas weniger als die Druckfestigkeit und etwas mehr als die Biegezugfestigkeit. Sie ist bei Beton aus gebrochenem Zuschlag etwa 10 bis 20 % größer als bei Kiessandbeton etwa gleicher Druckfestigkeit.

7.7 Der bis zum 7. Tage erreichte Anteil der 28 Tage-Spaltzugfestigkeit ist im allgemeinen größer als bei der Druckfestigkeit, aber etwas kleiner als bei der Biegezugfestigkeit.

7.8 Nach ausreichender Erhärtung beeinflußt der Austrocknungsgrad der Probekörper (Schwindspannungen) die Spaltzugfestigkeit bedeutend weniger als die Biegezugfestigkeit.

7.9 Je nach Betongüte (etwa B 100 bis B 600) beträgt die Druckfestigkeit D im Mittel das 8,0- bis 14,5fache und die Biegezugfestigkeit B im Mittel das 2,0- bis 1,5fache der Spaltzugfestigkeit Z_s . Für einen Beton B 300 liegt D/Z_s im Mittel bei 10,9 und B/Z_s im Mittel bei 1,5. Die direkte Zugfestigkeit dürfte im Mittel etwa das 0,75fache der Spaltzugfestigkeit betragen.

SCHRIFTTUM :

- [1] Gonnerman, H. F., und E. C. Shuman: Compression, flexure and tension tests of plain concrete. Proc. Amer. Soc. Test. Mat. 28 (1928) Part. II, S. 527/552.
- [2] Wright, P. J. F.: Comments on an indirect tensile test on concrete cylinders. Magaz. of Concr. Res. 7 (1955) Nr. 20, S. 87/96.
- [3] Walz, K.: Die Prüfung der Rohwichte, Reinwichte und des Hohlraumgehaltes sowie der Festigkeit des erhärteten Betons. Handbuch der Werkstoffprüfung. 3. Bd. Prüfung nichtmetallischer Baustoffe. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957, S. 411/425.
- [4] Bonzel, J.: Ober die Biegezugfestigkeit des Betons. beton 13 (1963) H. 4, S. 179/182, und H. 5, S. 227/232; ebenso Betontechnische Berichte 1963. Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 59/83.
- [5] Abott, B. W., und K. F. Reinschmidt: Photoelastic studies of the tensile briquet. Massachusetts Inst. Technology Report 142, Juni 1959.
- [6] Essai de traction directe du béton. RILEM-Bulletin, September 1963, Neue Serie H. 20, S. 83/90.
- [7] Rüsck, H., und H. Hilsdorf: Verformungseigenschaften von Beton unter zentrischen Zugspannungen. Teil 1 Voruntersuchungen. Bericht Nr. 44 des MPA f. d. Bauwesen d. TH München 1963.
- [8] Akazawa, T.: Méthode pour l'essai de traction des bétons. RILEM-Bulletin 1953, H. 16, S. 13/23.
- [9] Carneiro, F., und A. Barcellos: Résistance à la traction des bétons. RILEM-Bulletin 1953, H. 13, S. 97/123.
- [10] Mitchell, N. B.: The indirect tension test for concrete. Materials Research and Standards ASTM 1 (1961) H. 10, S. 780/788.

- [11] Ramesh, C. K., und S. K. Chopra: Determination of tensile strength of concrete and mortar by the split test. The Indian Concrete Journal 34 (1960) H. 9, S. 354/357.
- [12] Zelger, C.: Ein neues Verfahren zur Bestimmung der Betonzugfestigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 51 (1956) H. 6, S. 139/140.
- [13] Voellmy, A.: Festigkeitskontrolle von Betonbelägen. Betonstraßen-Jahrbuch 1957/58, Bd. 3. Fachverband Zement Köln, S. 179/204.
- [14] Flügge, W.: Festigkeits- und Elastizitätstheorie. Taschenbuch für Bauingenieure. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1949, S. 154/155.
- [15] Rudnick, A., A. R. Hunter und F. C. Holden: An analysis of the diametral-compression test. Materials Research and Standards ASTM 3 (1963) H. 4, S. 283/289.
- [16] Nilsson, S.: The tensile strength of concrete determined by splitting tests on cubes. RILEM-Bulletin, Juni 1961, Neue Serie H. 11, S. 63/67.
- [17] Sen, B. R., und Prakasch Desayi: Determination of the tensile strength of concrete by splitting a cube along its diagonal plane. The Indian Concrete Journal 36 (1962) H. 7, S. 249/252.
- [18] Sen, B. R., und Prakasch Desayi: Determination of elastic constants for concrete from splitting tests. The Indian Concrete Journal 36 (1962) H. 11, S. 410/413.
- [19] Efsen, A., und O. Gjarbo: Tensile strength of concrete determined by cylinder splitting test. Beton og Jernbeton (Copenhagen) 8 (1956) H. 1, S. 33/39. Nach einem Referat in Cement and Lime Manufacture XXIX (1956) Nr. 3, S. 37/40.
- [20] Walker, St., und D. L. Bloem: Effects of aggregate size on properties of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 283/298.
- [21] Williams, R. J. T.: The effect of cement content on the strength and elastic properties of dry lean concrete. Technical Report of Cem. and Concr. Assoc. London, TRA 323, Nov. 1962.
- [22] Gruenwald, E.: Discussion of a paper by Sven Thaulow: Tensile splitting test and high strength concrete test cylinders. Proc. Amer. Concr. Inst. 53 (1957) S. 1316/1318.
- [23] Joosting, R.: Betonieren und Baukontrolle. Betonstraßen, Mitteilungsblatt der Betonstraßen-AG. Wildeg, Juli 1960, Nr. 45, und Oktober 1960, Nr. 46.
- [24] Grieb, W. E., und G. Werner: Comparison of the splitting tensile strength of concrete with flexural and compressive strengths. Public Roads 32 (1962) H. 5, S. 97/106.
- [25] Narrow, J., und E. Ullberg: Correlation between tensile splitting strength and flexural strength of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 60 (1963) H. 1, S. 27/38.
- [26] Johnson, R. P.: Strength tests on scaled-down concretes suitable for models, with a note on mix design. Magaz. of Concr. Res. 14 (1962) H. 40, S. 47/53.
- [27] Hanson, J. A.: Tensile strength and diagonal tension resistance of structural lightweight concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 58 (1961) H. 1, S. 1/39.
- [28] Bonzel, J.: Zur Gestaltsabhängigkeit der Betondruckfestigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 54 (1959) H. 9, S. 223/228, und H. 10, S. 247/248.

- [29] Simon, L. L., und M. J. Aust: The use of the indirect tensile test for quality control of pavement concrete. *Construction Review*, August 1956, S. 23/29.
- [30] Thaulow, S.: Tensile splitting test and high strength concrete test cylinders. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 53 (1956/57) S. 699/706.
- [31] Gyengö, T.: Neue Grundlagen für die Bestimmung der Betonfestigkeit. *Acta Technica der Akademiae Scientiarum Hungaricae XXVI* (1959) S. 103/114.
- [32] Sell, R.: Einfluß der Zwischenlage auf Streuung und Größe der Spallzugfestigkeit von Beton. *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton*, H. 155. Verlag von W. Ernst & Sohn, Berlin 1963, S. 35/47.
- [33] Nilsson, S.: Tensile strength and compressive strength of concrete determined on the same cube. *RILEM-Bulletin*, Dezember 1962, Neue Serie H. 17, S. 35/36.
- [34] Hondros, G.: The evaluation of poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the brazilian test with particular reference to concrete. *Australian Journal of Applied Science* 10 (1959) Nr. 3, S. 243/268.
- [35] Rüsçh, H., und G. Vigerust: Discussion of a paper by Sven Thaulow: Tensile splitting test and high strength concrete test cylinders. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 53 (1956/57) S. 1318/1325.
- [36] Vinayaka, M. R.: The relationship between crushing strength and tensile splitting strength of concrete. *C.B.J.*, 29th. Session, Hyderabad 1959.