

# Verformungsverhalten und Energieaufnahme von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitdruckversuch

Von Eberhard Siebel und Gerd Wischers, Düsseldorf

## Übersicht

*Für die Beurteilung des Tragverhaltens und der Sicherheit von Betonbauteilen sind neben der Festigkeit weitere Betoneigenschaften von Bedeutung, zu denen insbesondere das Verformungsverhalten, die Energieaufnahme und das Bruchverhalten (zäh oder spröde) gehören. Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden diese Eigenschaften an Normal- und Leichtbeton unterschiedlicher Zusammensetzung und Festigkeit im Kurzzeitdruckversuch ermittelt. Die Völligkeit der Arbeitslinien nimmt mit zunehmender Festigkeit und beim Übergang von Normal- auf Leichtbeton ab; der abfallende Ast der Arbeitslinie wird steiler. Der Anteil aufgezehrter Energie an der Gesamtenergie wird mit zunehmender Festigkeit geringer. Aus der elastisch gespeicherten Energie und der insgesamt aufgenommenen Energie wurde ein Zähigkeitskennwert entwickelt. Mit zunehmender Festigkeit und beim Übergang von Normal- auf Leichtbeton nimmt die Zähigkeit ab. Um die gleiche materialtechnische Sicherheit zu erreichen, darf die Festigkeit spröder Betone nur in geringerem Maße genutzt werden.*

## 1 Einleitung

Zur Beurteilung des Tragverhaltens eines Baustoffes müssen seine Materialeigenschaften weitgehend bekannt sein. Hierzu gehören u. a. die Verformungseigenschaften, die Energieaufnahme und — daraus hergeleitet — die Kenntnis, ob der Baustoff ein sprödes oder ein zähes Bruchverhalten aufweist. Normalbeton und Konstruktionsleichtbeton mit geschlossenem Gefüge — im folgenden abgekürzt als Leichtbeton bezeichnet — haben ein unterschiedliches Tragverhalten. Aus diesem Grunde weichen die Bemessungsvorschriften der DIN 4219 Teil 2 und der DIN 4227 Teil 4 bei der Bemessung von Stahl- und Spannbeton von denen der DIN 1045 und 4227 Teil 1 für Normalbeton ab. Zur Klärung des unterschiedlichen Tragverhaltens können die Arbeitslinien der Betone und die daraus abgeleiteten Kennwerte einen Beitrag liefern.

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden deshalb Untersuchungen über die Arbeitslinien, die Energieaufnahme und das Bruchverhalten von Normal- und Leichtbetonen mit unterschiedli-

chen Zuschlägen und Zusammensetzungen im Kurzzeitdruckversuch durchgeführt; die Ergebnisse sind in [1] ausführlich dargestellt. Der nachfolgende Bericht enthält die bei den Untersuchungen ermittelten wesentlichen Zusammenhänge zwischen Festigkeit, Arbeitslinie und Energieaufnahme sowie einige für die Praxis wichtige Folgerungen hinsichtlich der Tragfähigkeit von Beton.

## 2 Auswertung des Schrifttums

Beton ist ein Verbundwerkstoff, bei dem die einzelnen Zuschlagkörner durch einen Kleber — das Gemisch aus Zement und Wasser — fest und dauerhaft miteinander verkittet werden. Das im frischen Zustand als Zementleim bezeichnete Gemisch erhärtet durch die Hydratation zum festen Zementstein. Bei Beton geht man häufig von einem Zweistoffsystem aus, bei dem die Zuschläge in einer Matrix eingebettet sind. Zur Matrix rechnet man dabei neben dem Zementstein auch die feinen Anteile des Zuschlags und ggf. mineralische Zusatzstoffe. Das Bruchverhalten von Beton wird — neben dem Verhalten der einzelnen Stoffe — insbesondere durch das Verbundverhalten von Matrix und Zuschlag beeinflusst. Die Heterogenität des Werkstoffes Beton bringt es mit sich, daß alle Modelle zur Beschreibung des Verhaltens von Beton nur für einen bestimmten Bereich des Bruchmechanismus Gültigkeit haben [2]. Es ist mit ihnen jedoch nicht möglich, das gesamte mechanische Verhalten des Betons wirklichkeitsnah zu beschreiben. Man ist deshalb auf Versuche angewiesen.

Bei Beton ergibt sich beim Druckversuch je nach Zusammensetzung, insbesondere je nach Zuschlagart, ein unterschiedliches Bruchverhalten [3]. Bei Normalbeton wird die Last überwiegend von den Zuschlägen abgetragen, während bei Leichtbeton die Mörtelzwischen-schichten den größten Teil der Last aufnehmen. In Druckrichtung gesehen, kommt es bei Normalbeton zu einer anfänglichen Rißbildung an der Seite der Zuschläge, während bei Leichtbeton ober- und unterhalb der Zuschläge die ersten Risse entstehen. Bei Normalbeton werden die Risse immer wieder von Poren und Zuschlägen gebremst und abgelenkt. Es entstehen schließlich eine oder mehrere Bruchebenen, die zur Druckrichtung geneigt sind [4], während sich die Risse bei Leichtbeton häufig parallel zur Druckrichtung durch die Zuschläge hindurch fortsetzen und somit einzelne Stäbe entstehen, die durch Knicken das endgültige Versagen einleiten [3].

Die Arbeitslinie von Beton im Kurzzeitdruckversuch hängt von der Größe, der Form, der Festigkeit und dem E-Modul des Zuschlags, der Betonzusammensetzung, dem Alter des Betons, der Belastungsgeschwindigkeit und der Probekörperform und -größe ab. Im Belastungsast kann die Arbeitslinie in vier Bereiche unterteilt werden [5]:

- 1) Keine Rißbildung durch äußere Lasten,
- 2) erste Verbundrißbildung zwischen Zuschlag und Matrix,
- 3) Entstehen von Gefügerissen und
- 4) Auflösen des Verbundes.

Es wurden von mehreren Autoren, so unter anderem [6], Versuche durchgeführt, um die Spannungen bei den Übergängen zwischen den einzelnen Bereichen zahlenmäßig festlegen zu können. Die Arbeitslinie verläuft jedoch stetig bis zur Höchstlast. Ausgeprägte Änderungen bei ihrer Krümmung lassen sich nicht feststellen. Bei Versuchen [7] wurden keine Beweise für besondere Übergänge zwischen den obengenannten Bereichen gefunden. Anhand von Geräuschmessungen und der Messung des Energieverzehrs wurde festgestellt, daß die Schädigung des Betons durch Bildung von Mikrorissen schon bei geringer Druckspannung beginnt und bei Steigerung der Beanspruchung kontinuierlich zunimmt. Für eine vergleichende Beurteilung verschiedener Betone kann es trotzdem notwendig sein, Übergänge zwischen den einzelnen Bereichen anzugeben. Es ist jedoch beim Vergleich zwischen Normal- und Leichtbeton Vorsicht geboten, da — wie oben erwähnt — diese Betone ein unterschiedliches Bruchverhalten aufweisen.

Der Belastungsast der Arbeitslinie ist bei hoher Festigkeit gestreckter, im allgemeinen bei Leichtbeton gestreckter als bei Normalbeton und bei Zementstein am wenigsten gekrümmt. Ein Maß für die Krümmung der Arbeitslinie ist der Völligkeitsgrad. Er gibt das Verhältnis der Fläche unterhalb der Arbeitslinie zum umschließenden Rechteck an. Der Völligkeitsgrad nimmt sowohl mit zunehmender Festigkeit als auch beim Übergang von Normal- zu Leichtbeton ab. Der Entlastungsast der Arbeitslinie ist bei höheren Festigkeiten steiler und im allgemeinen auch bei Leichtbeton steiler als bei Normalbeton (siehe unter anderem [8 und 9]). Auch die Probekörperschlankheit hat einen Einfluß auf den Entlastungsast der Arbeitslinie. Der Ast ist um so steiler, je schlanker die Probekörper sind [10]. Bei Zementstein kann der abfallende Ast nicht erfaßt werden.

Anhand der beim Belastungsversuch aufgenommenen und verzehrten Energie eines Prüfkörpers kann die Zähigkeit von Zementstein, Mörtel und Beton beurteilt werden [11 und 12]. Die bei einer Belastung eines Prüfkörpers aufgenommene Energie läßt sich je Volumeneinheit aus dem Integral der Spannung über der Stauchung errechnen:

$$H = \int_0^{\epsilon} \sigma \cdot d\epsilon \quad (1)$$

Diese Energie entspricht der Fläche unter der Arbeitslinie, siehe Bild 1. Sie läßt sich, wie im Bild 2 dargestellt, bei einem elastoplastischen Stoff aufteilen in einen Anteil  $H_{pl}$ , der durch bleibende Verformungen aufgezehrt wird, und einen elastisch gespeicherten Anteil  $H_{el}$ . Bei allen viskoelastoplastischen Stoffen, die dadurch gekennzeichnet sind, daß ein Teil der durch die Spannung bewirkten Verformung verzögert auftritt — hierzu gehört auch Beton —, enthält die Gesamtenergie noch einen Anteil  $H_D$ . Das ist der Anteil, der durch eine Dämpfung bei wiederholter Be- und Entlastung verbraucht wird. Vergleichende Beurteilungen der während einer Druckbeanspruchung aufgenommenen und aufgezehrten Energie von Betonen mit verschiedenartigen Normal- und Leichtzuschlägen lagen bisher nicht vor; es wurde lediglich in [12] die Bruchenergie von Normalbetonen unterschiedlicher Festigkeit aus Rheinkiepsand

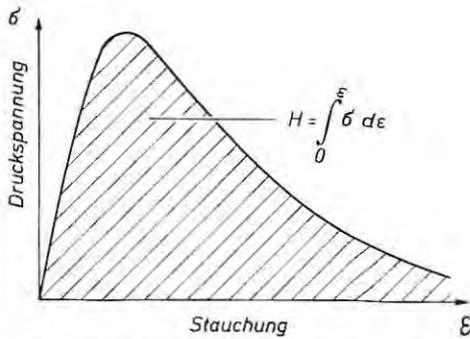


Bild 1 Aufgenommene Energie H (Fläche unter der Arbeitslinie)

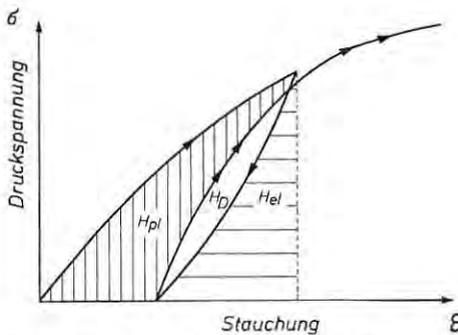


Bild 2 Bestimmung der durch Ausbildung von Rissen aufgezehrten Energie  $H_{pl}$ , der Energie infolge Dämpfung  $H_D$  und der elastisch gespeicherten Energie  $H_{el}$

untersucht. Dabei stieg die Bruchenergie von Normalbeton weniger an als seine Festigkeit. Hieraus wurde gefolgert, daß mit zunehmender Festigkeit die Zähigkeit des Betons abnimmt.

Grundsätzlich kann man bei Werkstoffen, die bis zum Bruch beansprucht werden, ein sprödes oder ein mehr oder weniger ausgeprägtes duktiles (zähes) Bruchverhalten feststellen. Kennzeichnend für einen spröden Bruch ist ein schlagartiges Versagen. Demgegenüber geht einem duktilen Bruch stets eine mehr oder weniger lange Einleitungsphase voraus. Zäh ist ein Werkstoff dann, wenn er die Fähigkeit hat, im Querschnitt einer Probe lokal entstandene Spannungsspitzen abzubauen, und zwar im allgemeinen durch lokale plastische oder quasi-plastische Verformungen. Beton weist ein mehr oder weniger ausgeprägtes duktilen Bruchverhalten auf [12]. Zwar entstehen in seinem Inneren durch die Heterogenität seines Gefüges selbst bei äußerer einaxialer Druckbeanspruchung Zugspannungsspitzen, die jedoch zu einem erheblichen Teil durch energieverzehrende Mikrorisse abgebaut werden. Die Ausbreitung der Mikrorisse wird bei Normalbeton mehr als bei Leichtbeton durch

große Gefügebestandteile, wie z. B. Poren und Zuschlagkörner, gebremst oder in spannungsmäßig weniger relevante Richtungen verzweigt.

### **3 Art, Umfang und Durchführung der Untersuchungen**

Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, die Arbeitslinien von Normal- und Leichtbeton verschiedener Zusammensetzung und Festigkeit zu untersuchen, ferner die daraus abgeleiteten Werte, insbesondere die Energieaufnahme des Betons, vergleichend zu bewerten und schließlich der Frage nachzugehen, ob konstruktiver Leichtbeton ein weniger zähes Bruchverhalten zeigt als Normalbeton und welche Einflüsse verschiedene Normalzuschläge und Leichtzuschläge auf die Zähigkeit der mit ihnen hergestellten Betone haben. In den Folgerungen für die Praxis sollte zumindest qualitativ die Frage beantwortet werden, ob und welche Einflüsse Zähigkeit und andere Eigenschaften des Betons auf die Tragfähigkeit und die Standsicherheit haben.

#### **3.1 Ausgangsstoffe**

In die Versuche wurden je ein Portlandzement Z 35 F, Z 45 F und Z 55 einbezogen. Die Untersuchungsergebnisse über die wichtigsten Kenndaten der Zusammensetzung und der Eigenschaften der Zemente sind in Tafel 1 zusammengestellt.

Als Normalzuschlag wurde neben einem Rheinkies sand ein Mainkies sand und ein Basaltplitt verwendet. Die Zuschläge entsprechen nach Angaben der Hersteller und nach augenscheinlicher Beurteilung DIN 4226 Teil 1. Die Rohdichte aller Zuschläge und die Wasseraufnahme des Mainkieses enthält Tafel 2. Die Wasseraufnahme des Rheinkieses und des Basalts ist vernachlässigbar klein.

Die Leichtzuschläge wurden so ausgewählt, daß ihre Rohdichte im Rahmen der in der Bundesrepublik Deutschland für gefügedichten Konstruktionsleichtbeton verwendeten Zuschläge von niedrig bis hoch reichte. Neben vier Blättonen wurde auch ein Blähschiefer in die Untersuchungen einbezogen, um den Einfluß der unterschiedlichen Kornform bei Leichtzuschlägen mit zu untersuchen. Die Zuschläge entsprachen nach Angaben der Hersteller und augenscheinlicher Beurteilung DIN 4226 Teil 2. Die Rohdichte und die Wasseraufnahme der einzelnen Zuschläge enthält Tafel 2.

Zur weiteren Charakterisierung der verwendeten Blättonen und des Blähschiefers wurden nach dem „Merkblatt I für Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge“ [13] Vergleichsmischungen mit allen Leicht- und Normalzuschlägen hergestellt. Die Mischungen hatten einen einheitlichen Zementgehalt von  $350 \text{ kg/m}^3$  PZ 45 F (Zement 2) und einen w/z-Wert von 0,50. Dem Leichtzuschlaggemisch wurde insgesamt 15% Natursand inklusive Quarzmehl zugegeben. Mit dem Blähschiefer B wurde sowohl eine Mischung mit 16 mm als auch mit 25 mm Größtkorn hergestellt. Mit den Blättonen Lg, Lm und Lh (Zuschlag 3, 4, 5) wurden jeweils zwei Mischungen in die Untersuchungen einbezogen, und zwar eine mit dem geblähten Leichtsand L und eine, in der die Hälfte des geblähten Leichtsand es durch gemahlene Leichtsand ersetzt wurde. Die

Tafel 1 Zusammensetzung und Eigenschaften der Zemente

Zement	Art und Festigkeitsklasse	Mahlfeinheit (Blaine) cm <sup>2</sup> /g	Erstarrungsbeginn/-ende		Wasseranspruch Gew.-%	Druckfestigkeit		Biegezugfestigkeit		Klinkerphasen nach Bogue			
			Stunden			2 d	28 d	2 d	28 d	Gew.-%			
						N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
1 (1. Lieferung)	PZ 35 F (Werk A)	2940	3,3	4,7	26,0	22	50	4,3	8,0	60	16	12	6
1 (2. Lieferung)	PZ 35 F (Werk A)	3050	2,3	3,8	24,5	26	51	5,6	8,5	61	15	12	5
2	PZ 45 F (Werk B)	3640	2,2	3,7	26,5	28	60	6,0	8,8	57	16	13	7
3	PZ 55 (Werk A)	4790	2,7	4,0	32,0	45	70	8,0	9,7	61	15	11	6

Tafel 2 Rohdichte und Wasseraufnahme der Zuschläge

Nr.	Zuschlag Art	Rohdichte kg/dm <sup>3</sup> der Korngruppe					Wasseraufnahme Gew.-% (30 Minuten) der Korngruppe				
		0/2	2/4	4/8	8/16	16/32 (16/25)	0/2	2/4	4/8	8/16	16/25
0	Basalt- splitt	—	—	3,00	3,00	—	—	—	—	—	—
1	Rheinkies- sand	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	—	—	—	—	—
7	Mainkies- sand	—	2,52	2,52	2,56	—	—	1,4	1,3	—	—
2	Blähton Rg	1,4	1,1	0,8	0,8	—	17,6	14,3	14,0	—	—
	Blähsand L (für 3,4,5)	0,99	—	—	—	—	11,6	—	—	—	—
	Blähsand L gebrochen (für 3,4,5)	1,43	—	—	—	—	15,7	—	—	—	—
3	Blähton Lg	—	—	0,79	0,75	—	—	—	14,7	14,2	—
4	Blähton Lm	—	—	1,12	1,16	—	—	—	13,8	11,6	—
5	Blähton Lh	—	—	1,32	1,42	—	—	—	4,9	4,1	—
6	Blähschiefer B	1,63	1,34	1,13	1,17	0,90	8,9	6,1	6,3	4,9	5,9

Ergebnisse der Frisch- und Festbetonprüfungen sind in Tafel 3 zusammengestellt.

Der Unterschied zwischen den Mischungen mit den Blähtonen Lg, Lm und Lh mit und ohne gemahlene Leichtsand ist gering und liegt im Bereich der Streuungen. Da der gebrochene Sand zwar weniger porig ist als der nicht gebrochene, aber auch der geblähte, nicht gebrochene Sand schon eine ausreichend hohe Festigkeit und Steifigkeit hat, war eine weitere Steigerung der Betonfestigkeit, insbesondere bei den im Verhältnis geringen Zugabemengen des Sandes, nicht zu erwarten. Es ergab sich ein relativ guter Zusammenhang zwischen der Rohdichte der Zuschläge und der Druckfestigkeit der mit ihnen hergestellten Leichtbetone (siehe Bild 3).

### 3.2 Betonzusammensetzung

Es wurden Betone für vier Festigkeitsbereiche (für Rheinkies- und fünf) hergestellt, siehe Tafel 4. Für die Konsistenz wurde stets der Bereich Ende KP/Anfang KR angestrebt. Insgesamt wurden 45 Betone hergestellt, davon 18 Normalbetone, 26 Leichtbetone und — nur orientierend — ein Leichtbeton mit Stahlfasern. Die Zuschläge hatten im allgemeinen ein Größtkorn von 16 mm. Zusatzversuche wurden auch mit 8 mm und 32 mm (bei Leichtbeton 25 mm) Größtkorn durchgeführt. Es wurde eine Sieblinie im mittleren Bereich von A/B der Sieblinienbilder der DIN 1045 angestrebt. Neben einem PZ 35 F (Zement 1) wurde ein PZ 55 (Zement 3) eingesetzt, teilweise um eine höhere Festigkeit zu erzielen, teilweise um bei gleicher angestrebter Betonfestigkeit den Zementgehalt zu senken. So ergaben sich auch einige von der Praxis abweichende Betonzusammensetzungen.

Tafel 3 Frisch- und Festbetoneigenschaften der nach Merkblatt I [13] hergestellten Betone (PZ 45 F, z = 350 kg/m<sup>3</sup>, w/z = 0,50, Größtkorn 16 mm)

Beton-Bez.	Zuschlag	Verdichtungsmaß		Rohdichte kg/dm <sup>3</sup>		Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup> 20-cm-Würfel 28 Tage
		sofort	nach 30'	Frischbeton	Festbeton 28 Tage	
S2042	0 Basaltspült	1,21	1,28	2,56	2,55	59
S2142	1 Rheinkiessand	1,09	1,19	2,37	2,35	55
S2742	7 Mainkiessand	1,10	1,19	2,34	2,39	53
S2242	2 Blähton Rg	1,02	1,07	1,45	1,40	19
S2342	3 Blähton Lg	1,03	1,13	1,44	1,40	24
S2348	3 Blähton Lg + gemahlener Leichtsand	1,05	1,13	1,47	1,43	25
S2442	4 Blähton Lm	1,01	1,08	1,59	1,55	38
S2448	4 Blähton Lm + gemahlener Leichtsand	1,08	1,21	1,57	1,53	40
S2542	5 Blähton Lh	1,02	1,07	1,68	1,67	48
S2548	5 Blähton Lh + gemahlener Leichtsand	1,05	1,14	1,71	1,67	47
S2642	6 Blähschiefer B	1,02	1,05	1,65	1,61	36
S2643	6 Blähschiefer B (Größtkorn 25 mm)	1,01	1,06	1,58	1,53	27

zungen, insbesondere zu geringe Zementgehalte, die sich jedoch zur Einhaltung der Zielsetzung nicht vermeiden ließen. Nach oben hin wurde der Zementgehalt auf den auch in DIN 4219 Teil 1 enthaltenen höchstzulässigen Wert von 450 kg/m<sup>3</sup> begrenzt, damit nicht andere Einflüsse, wie z. B. Zementsteinschichtdicke, Schwinden und Kriechen, den Einfluß der Zuschläge auf das Verformungs- und Bruchverhalten überdeckten. Es mußte deshalb bei einigen Mischungen für die höherfesten Betone in Kauf genommen werden, daß die Betone steifer waren und daß dadurch das vorgesehene Verdichtungsmaß überschritten wurde. Unterschritt der Zementgehalt 270 kg/m<sup>3</sup>, so wurde Quarzmehl zur Wahrung eines ausreichenden Mehlkorngehalts zugegeben.

Für den Zusatzversuch „Stahlfaserleichtbeton“ wurde eine glatte Stahlfaser mit einem Durchmesser von 0,3 mm und einer Länge von 25 mm verwendet. Der Anteil der Fasern an der Betonmischung betrug 2 Vol.-%.

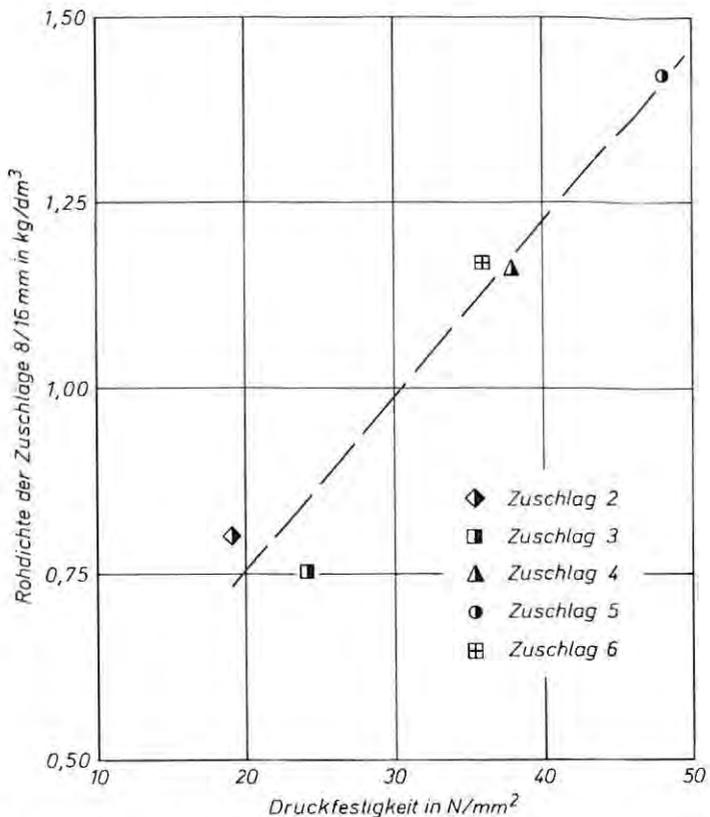


Bild 3 Zusammenhang zwischen Rohdichte der Leichtzuschläge und der Druckfestigkeit der mit ihnen nach Merkblatt I [13] hergestellten Betone (Größtkorn 16 mm)

### 3.3 Herstellung und Lagerung

Der Normalbeton wurde in einem 250 l-Tellermischer rd. 2 Minuten gemischt, anschließend wurde sein Verdichtungsmaß geprüft. Der Mainkiesbeton wurde wie die Leichtbetone behandelt, da der Mainkies im Gegensatz zum Rheinkies und Basalt während des Mischvorgangs Wasser aufnimmt. Die Herstellung der Leichtbetonmischungen erfolgte in Anlehnung an das Merkblatt I [13]. In dem Tellermischer wurden die Zuschläge, das gesamte Zusatzwasser, das durch die Zuschläge aufgesaugt wird, und ein Teil des Anmachwassers (rd. 20%) rd. 30 Sekunden gemischt. Die so vorgefeuchteten Zuschläge verblieben 5 Minuten mit feuchten Tüchern abgedeckt im Mischer. Hiernach wurden der Zement und der Rest des Anmachwassers zugegeben und der Beton weitere 1,5 Minuten gemischt. Wiederum abgedeckt verblieb der Beton 15 Minuten im Mischer. Nach erneutem kurzen Durchmischen (rd. 5 Sekunden) wurde das Verdichtungsmaß geprüft und wurden die Probekörper hergestellt.

99 Tafel 4 Hergestellte Betonmischungen (Größtkorn des Zuschlags 16 mm)

Festigkeitsbereich	angestrebte Druckfestigkeit  $\beta_{w28}$	Zement nach Tafel 1	Zuschlag nach Tafel 2												
			0	1	7	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6
Nr.	N/mm <sup>2</sup>		Basallspitt + Rheinsand	Rheinkies + Rheinsand	Mainkies + Rheinsand	Blähion Rg + Blähsand	Blähion Rg + Rheinsand	Blähion Lg + Blähsand	Blähion Lg + Rheinsand	Blähion Lm + Blähsand	Blähion Lm + Rheinsand	Blähion Lh + Blähsand	Blähion Lh + Rheinsand	Blähschiefer B + Blähsand	Blähschiefer B + Rheinsand
1	15 bis 20	PZ 35 F (1)		X		X	X	X	X				X		
2	30 bis 35	PZ 35 F (1)	X	X <sup>1)</sup>	X					X <sup>3)</sup>	X	X	X	X <sup>2)</sup>	X
3	45 bis 50	PZ 35 F (1)	X	X	X						X	X	X		
4	60 bis 65	PZ 35 F (1)	X	X	X								X		
2	30 bis 35	PZ 55 (3)		X			X		X						
3	45 bis 50	PZ 55 (3)	X	X						X		X	X	X	X
4	60 bis 65	PZ 55 (3)	X	X								X	X		
5	rd. 75	PZ 55 (3)		X											

1) Auch mit Größtkorn 8 mm und 32 mm; 2) Auch mit Größtkorn 8 mm und 25 mm; 3) Auch mit Stahlfasern

Es wurden je Beton 16 Zylinder 15/30, 4 Zylinder 15/60 und 3 Würfel mit einer Kantenlänge von 20 cm hergestellt. Der Beton wurde unter Stochern in einer Schicht in die Form eingefüllt, und die Probekörper wurden anschließend auf einem Rütteltisch verdichtet.

Die Probekörper lagerten bis zum Entformen im Alter von einem Tag im Arbeitsraum unter feuchten Tüchern, anschließend 6 Tage im Feuchtraum mit 20 °C ebenfalls unter feuchten Tüchern und danach bis auf die Zylinder zur Prüfung der Spaltzugfestigkeit im Klimaraum bei 65% r. F. und 20 °C. Die Prüfflächen der Zylinder für die Ermittlung der Arbeitslinien und des E-Moduls wurden während der Feuchtlagerung naß geschliffen.

### 3.4 Prüfungen

#### 3.4.1 Festigkeit

Zur Zuordnung der Betone zu den einzelnen Festigkeitsbereichen wurden 3 Würfel mit 20 cm Kantenlänge nach DIN 1048 auf Druck geprüft. Die Spaltzugfestigkeit wurde im Alter von 28 Tagen an 3 Zylindern 15/30 nach DIN 1048 bestimmt. Ferner wurde an allen Zylindern zum Abschluß anderer Untersuchungen die Druckfestigkeit teils mit gleichmäßiger Belastung, teils mit gleichmäßiger Verformungsgeschwindigkeit geprüft (siehe Abschnitt 3.4.2). Der Elastizitätsmodul wurde an 4 Zylindern 15/30 nach DIN 1048 im Alter von 28 Tagen geprüft. Hierzu wurde der Körper insgesamt 11mal bis zu  $\frac{1}{3}$  der Höchstlast be- und entlastet. Anschließend wurden die gleichen Körper 5mal bis zu rd.  $\frac{2}{3}$  der Höchstlast be- und entlastet und nach der 5. Entlastung bis zum Bruch belastet (gleichmäßige Belastungsgeschwindigkeit).

#### 3.4.2 Verformungen

Die Arbeitslinien der Betone wurden an 4 Zylindern 15/30 mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit, an 4 Zylindern 15/30 und 4 Zylindern 15/60 mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit jeweils nach 28 Tagen und an einem Zylinder 15/30 mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit im Alter von 91 Tagen ermittelt. Hierzu wurden zwei 15 cm lange Dehnungsmeßstreifen (DMS) rechtwinklig zur Oberfläche, mittig, auf zwei gegenüberliegenden Mantellinien und ebenfalls zwei 15 cm lange DMS auf den Umfang des Zylinders in Zylindermitte zur Bestimmung der Querdehnung geklebt. Bei den Zylindern, die mit gleichmäßiger Verformungsgeschwindigkeit geprüft wurden, wurden zusätzlich 3 Wegaufnehmer so zwischen den Druckplatten aufgestellt, daß ihr Abstand untereinander gleich war und sie rd. 1 cm Abstand zur Zylindermantelfläche hatten. Mit den Wegaufnehmern wurde sowohl die konstante Verformungsgeschwindigkeit gesteuert als auch die Stauchung der Zylinder ermittelt. Nach Überschreiten der Höchstlast wurde die Stauchung nur noch mit Hilfe der Wegaufnehmer erfaßt, weil bei zunehmender Zerstörung des Prüfkörpers die Dehnungsmeßstreifen häufig ausknicken und reißen.

#### 3.4.3 Aufgenommene, gespeicherte und aufgezehrte Energie

Die von den Probekörpern aufgenommene Gesamtenergie wurde aus der aufgetragenen Spannung und der Längsstauchung nach

Gleichung (1) berechnet. Wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, wurden die E-Modul-Prüfkörper 11mal bis zu  $\frac{1}{3}$  und anschließend 5mal bis zu  $\frac{2}{3}$  der zu erwartenden Höchstlast belastet. Aus den gemessenen Spannungs-Stauchungslinien konnte entsprechend Bild 2 die elastisch gespeicherte Energie  $H_{el}$  und die aufgezeehrte Energie  $H_{pl}$  für die Bereiche bis zu  $\frac{1}{3}$  und  $\frac{2}{3}$  der Höchstlast bestimmt werden. Zusätzlich wurde für den Bereich bis zu  $\frac{2}{3}$  der Höchstlast die Dämpfungsenergie  $H_D$  errechnet. Die Dämpfungsenergie für den Bereich der Arbeitslinie bis zu  $\frac{1}{3}$  der Höchstlast ist verhältnismäßig klein und wurde daher vernachlässigt.

#### 4 Darstellung und Erörterung der Versuchsergebnisse

Die Versuchsergebnisse werden in dieser Veröffentlichung nur soweit dargestellt, wie dies für die Beurteilung der Zusammenhänge zwischen Festigkeit, Arbeitslinie und Energieaufnahme unmittelbar erforderlich ist.

##### 4.1 Druckfestigkeit

Die Würfeldruckfestigkeit lag mit einer Abweichung von bis zu 2 N/mm<sup>2</sup> innerhalb der fünf vorgegebenen Festigkeitsbereiche (siehe Tafel 4). Die mit gleichmäßiger Belastungsgeschwindigkeit geprüften Zylinder 15/30 hatten erwartungsgemäß eine geringere Druckfestigkeit als die Würfel. DIN 1045 gibt für die Umrechnung zwischen der Druckfestigkeit der 20-cm-Würfel  $\beta_W$  und der der Zylinder 15/30  $\beta_C$  folgende Beziehung für die Betone unterschiedlicher Festigkeitsklassen an

bis einschließlich B 15:  $\beta_W = 1,25 \cdot \beta_C$

für B 25 und höher:  $\beta_W = 1,18 \cdot \beta_C$

Die aus der vorliegenden Untersuchung errechneten Umrechnungsfaktoren lagen für Normalbeton zwischen 1,03 und 1,40; sie waren — im Gegensatz zu der in DIN 1045 angegebenen Tendenz — bei höheren Festigkeiten größer als bei niedrigen, wie auch aus der Darstellung in Bild 4 anschaulich hervorgeht. Die gleiche Tendenz wurde auch in anderen Arbeiten des Forschungsinstituts [12 und 14] gefunden. Sie widerspricht den Normfestlegungen, die in erster Linie auf einer vor 30 Jahren durchgeführten Auswertung [15] des damals vorliegenden Schrifttums beruhen. Die in [15] ausgewerteten Untersuchungsergebnisse wurden vermutlich mit Prüfeinrichtungen ermittelt, die eine geringere Steifigkeit aufwiesen. Darüber hinaus entsprachen die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Umrechnungsfaktoren nur im mittleren Festigkeitsbereich dem in DIN 1045 für die Berechnung der Rechenfestigkeit  $\beta_R$  zugrundeliegenden Faktor von 0,85 für die Umrechnung der Würfel- auf die Prismenfestigkeit ( $\beta_P = 0,85 \beta_W$ ). Mit steigender Festigkeit wird vermutlich auch die Querdehnungsbehinderung an den Druckplatten der Prüfmaschine größer, was sich auf die Druckfestigkeit der Würfel stärker als auf die der Zylinder auswirken dürfte. Insgesamt erscheint eine Überprüfung der Umrechnungsfaktoren in den Normen angebracht.

Im Gegensatz zum Normalbeton wurde in der vorliegenden Arbeit bei den Leichtbetonen praktisch kein Unterschied zwischen der

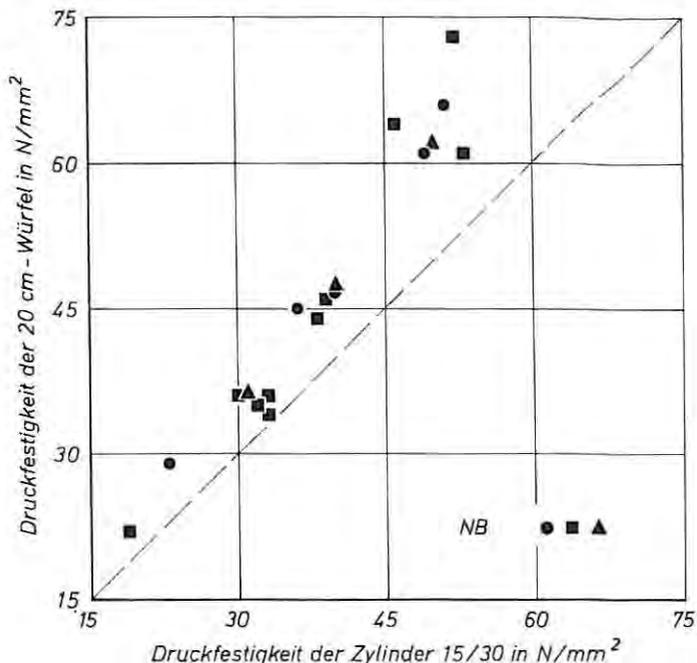


Bild 4 Zusammenhang zwischen 20-cm-Würfeldruckfestigkeit  $\beta_W$  und Druckfestigkeit der Zylinder 15/30  $\beta_C$  für Normalbeton (NB)

Würfel- und der Zylinderdruckfestigkeit ermittelt. Das geht auch anschaulich aus Bild 5 hervor. Rechnerisch wurde ein Umrechnungsfaktor von im Mittel 1,02 ermittelt, die Einzelwerte lagen zwischen 0,92 und 1,10. Die Querdehnung und damit auch die Querdehnungsbehinderung an den Druckplatten ist bei Leichtbeton wesentlich geringer, so daß deren Einfluß auf die Festigkeit von untergeordneter Bedeutung ist. Auch der geringere E-Modul des Leichtbetons wirkt sich in der Tendenz gleichartig aus.

#### 4.2 Arbeitslinie

Auf die versuchsmäßig ermittelten Arbeitslinien hatten sowohl die Prüfkörperschlankheit als auch die Meßlänge zur Bestimmung der Verformung einen erheblichen Einfluß. Die so ermittelten Arbeitslinien entsprachen daher nicht den Anforderungen, die man an Stoffgesetze stellt. Wählt man bei der Prüfung stets die gleiche, sinnvolle Konvention, so erlauben die Ergebnisse aussagekräftige Vergleiche. Für den Vergleich zwischen Normal- und Leichtbeton wurden Arbeitslinien ausgewählt, die an Zylindern 15/30 mit zwei zwischen den Prüfplatten angeordneten induktiven Weggebern bestimmt wurden (Meßlänge rd. 30 cm).

Die Arbeitslinien sind vergleichend in den Bildern 6 bis 8 dargestellt. Ihre Form wurde in stärkerem Maße sowohl durch die Festig-

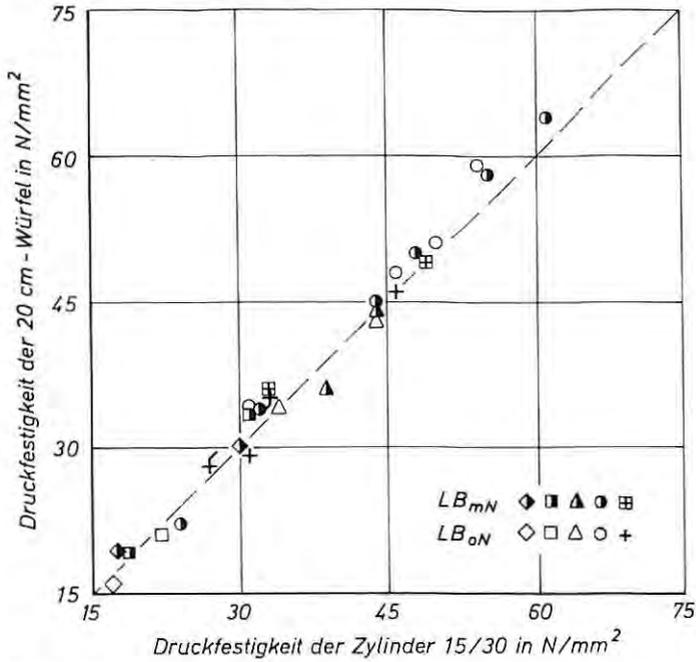


Bild 5 Zusammenhang zwischen 20-cm-Würfel­druckfestigkeit  $\beta_W$  und der Druckfestigkeit der Zylinder 15/30  $\beta_C$  für Leichtbeton mit Natursand ( $LB_{mN}$ ) und für Leichtbeton ohne Natursand ( $LB_{oN}$ )

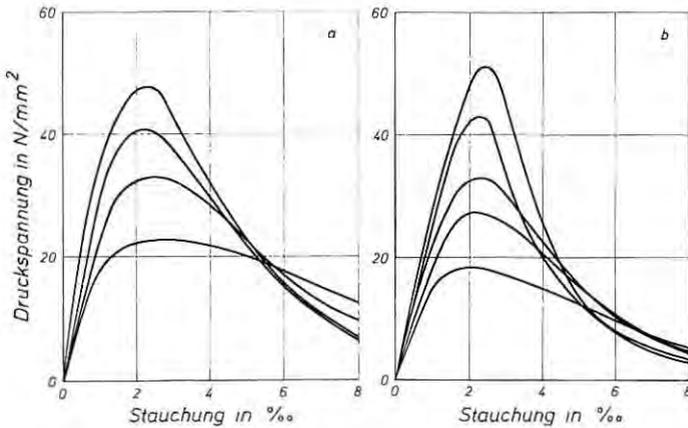


Bild 6 Arbeitslinien der Normalbetone unterschiedlicher Festigkeit (Zylinder 15/30, Alter 28 Tage)  
 a) mit Basaltsplitt  
 b) mit Rheinkies

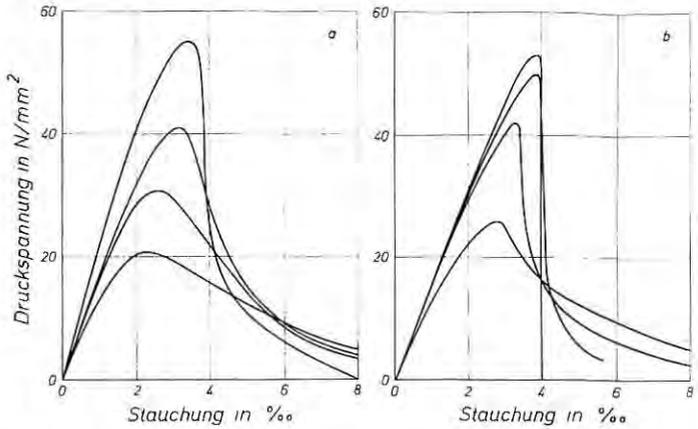


Bild 7 Arbeitslinien der Leichtbetone mit Leichtzuschlag Lh (5) unterschiedlicher Festigkeit (Zylinder 15/30, Alter 28 Tage)  
 a) mit Natursand  
 b) ohne Natursand

keit des Betons als auch durch die Zuschlagart beeinflusst. Je höher die Festigkeit der untersuchten Betone war, um so geringer war die Krümmung des aufsteigenden Astes der Arbeitslinie, um so steiler war der abfallende Ast, und um so kleiner war der Krümmungsradius an der Spitze (bei Höchstlast) der Arbeitslinie (siehe auch [12]). Energieverzehrende Risse, die zu einer Krümmung der Arbeitslinie beitragen, traten bei höherfesten Betonen erst bei einem höheren Prozentsatz der Höchstlast — teilweise erst unmittelbar vor der Höchstlast — auf. Der mit steigender Festigkeit größer werdende

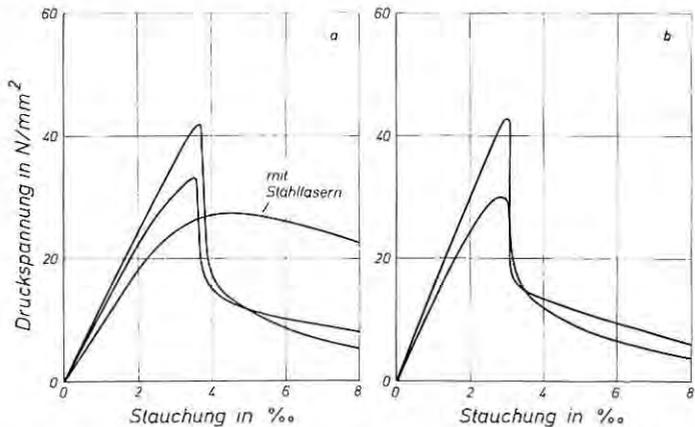


Bild 8 Arbeitslinien der Leichtbetone unterschiedlicher Festigkeit (Zylinder 15/30, Alter 28 Tage)  
 a) mit Blähton Lm (4) - 1 Beton mit 2 Vol.-% Stahlfasern  
 b) mit Blähschiefer B (6)

Elastizitätsmodul der Matrix und der besser werdende Verbund zwischen Matrix und Zuschlag bewirken, daß energieverzehrende Risse erst bei höherer Belastung der Betonprüfkörper auftreten.

Die Arbeitslinien von Betonen mit Basaltsplitt wiesen schon im aufsteigenden Ast insgesamt größere Krümmungen (größere Völligkeit) auf als die der mit Kies hergestellten (siehe Bilder 6a und 6b). Besonders bei Höchstlast war der Krümmungsradius der Arbeitslinien der Basaltsplittbetone größer. Durch die unregelmäßige Form der Splittkörner und die größeren Unterschiede der E-Moduli von Splittkorn und Matrix werden Spannungsspitzen hervorgerufen, die zu energieverzehrenden Rissen und somit quasi plastischen Verformungen führen.

Die Arbeitslinien der Leichtbetone verliefen wegen des geringeren E-Moduls zunächst schwächer geneigt und im oberen Bereich gestreckter als die der Normalbetone (siehe Bilder 7 und 8). Der Krümmungsradius im Bereich der Höchstlast ist kleiner und der abfallende Ast steiler. Die Arbeitslinien der Leichtbetone mit Natursand (siehe Bild 7a) hatten einen größeren Krümmungsradius bei Höchstlast als die der Leichtbetone ohne Natursand (siehe Bild 7b). Bei einigen Leichtbetonen zeigte sich ein nahezu senkrecht abfallender Ast der Arbeitslinie, der erst bei rd. 40% der Höchstlast abflachte (siehe auch Abschnitt 4.3.2). Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem Beton mit Blähschiefer B(6) und dem mit Blähton etwa gleicher Rohdichte Lm(4) ließ sich bei den Arbeitslinien nicht erkennen (siehe Bilder 8a und 8b).

Die Arbeitslinie eines nur orientierend untersuchten Leichtbetons mit Stahlfasern (siehe Bild 8a) zeigte schon im aufsteigenden Ast eine größere Krümmung; für Normalbetone mit Stahlfasern wurde dies schon häufiger untersucht. Deutlich ausgeprägt war der Unterschied zwischen Leichtbeton ohne und mit Stahlfasern bei Höchstlast. Der Krümmungsradius der Arbeitslinie des Stahlfaserleichtbetons war in diesem Bereich deutlich größer. Der abfallende Ast verlief wie erwartet deutlich flacher. Bei Leichtbeton kommt der Einfluß von Stahlfasern auf die Tragwirkung noch besser zur Geltung als bei Normalbeton, da die ersten Risse nicht wie bei Normalbeton zwischen Zuschlag und Matrix, sondern oberhalb der Zuschläge in der Matrix auftreten, die mit Stahlfasern durchsetzt ist; die Weiterentwicklung entstehender Risse wird dadurch gebremst.

Zur weiteren Charakterisierung des Betonverhaltens bei Druckbeanspruchung wurden unter anderem die Stauchung bei Höchstlast und die Bruchstauchung ermittelt.

#### *Stauchung bei Höchstlast*

Die Stauchung bei Höchstlast lag für Normalbeton zwischen 2,0 und 2,8‰, für Leichtbeton mit Natursand zwischen 2,1 und 3,4‰ und für Leichtbeton ohne Natursand zwischen 2,2 und 4,0‰. Bei Normalbeton mit Kiessand nahm die Stauchung bei Höchstlast, wie u. a. auch in [12] festgestellt wurde, mit zunehmender Festigkeit geringfügig zu. Bild 9 zeigt, daß die Stauchung bei Höchstlast nicht nur von der Festigkeit des Betons, sondern auch von der Festigkeitsklasse des Zements abhängt. Bei gleicher Druckfestigkeit war die Stauchung bei Höchstlast bei Kiessandbeton mit PZ 55 um rd.

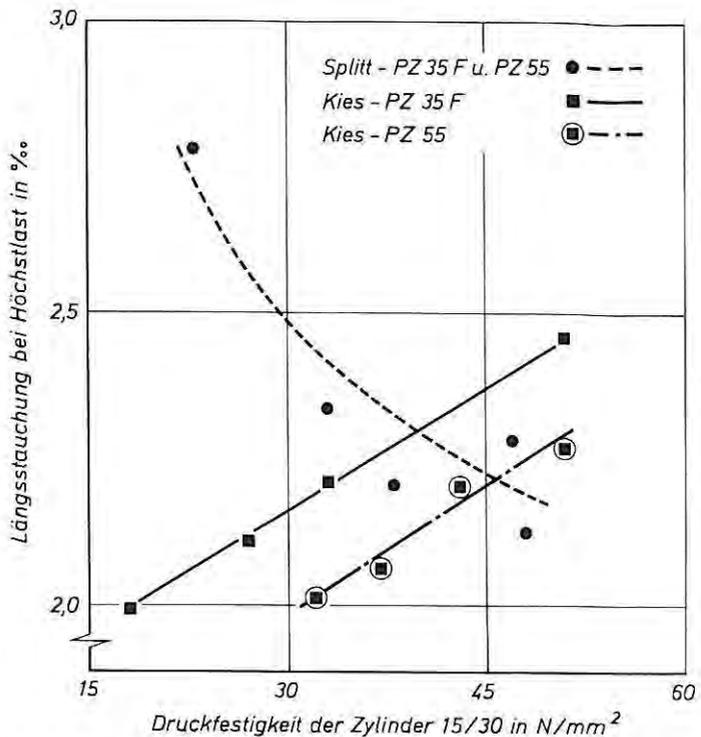


Bild 9 Längsstauchung bei Höchstlast in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit für Normalbeton mit unterschiedlichen Zuschlägen und mit Zementen unterschiedlicher Festigkeitsklassen (Zylinder 15/30, Alter 28 Tage)

0,2‰ (absolut) geringer als bei Kiessandbeton mit PZ 35 F. Bei Beton mit Z 55 kann der w/z-Wert für gleiche Druckfestigkeit gegenüber einem mit Z 35 F angehoben werden; bei gleicher Konsistenz ist somit für gleiche Druckfestigkeit ein geringerer Zementgehalt erforderlich, der vermutlich zu der geringeren Stauchung des Betons führt.

Ein völlig anderes Verhalten zeigte der Beton mit Basaltsplitt, dessen Längsstauchung bei Höchstlast mit zunehmender Druckfestigkeit abnahm. Die plastische Verformung dieser Splittbetone ist bei geringer Betonfestigkeit wesentlich größer als bei höherfesten Betonen. Hierdurch hatten die Splittbetone niedrigerer Festigkeit sehr große Längsstauchungen bei Höchstlast. Ein Einfluß der Festigkeitsklasse des Zements auf die Längsstauchung der Splittbetone war bei diesen Versuchen nicht erkennbar.

Bei Leichtbeton spielt der plastische Anteil an der Verformung nur eine untergeordnete Rolle, so daß die Längsstauchung bei Höchstlast mit zunehmender Betondruckfestigkeit entsprechend der Zunahme der elastischen Verformung zunimmt.

## Bruchstauchung

Als Bruchstauchung bezeichnet man die Längsstauchung beim Bruch des Körpers, definitionsgemäß hier bei einer Resttragfähigkeit von 10% der Höchstlast. Wie aus Bild 10 anschaulich hervorgeht, nimmt sie wegen der steiler abfallenden Arbeitslinie mit zunehmender Druckfestigkeit sowohl für Normalbeton als auch für Leichtbeton ab. Dies läßt sich auch an den Arbeitslinien ablesen. Sie ist für geringere Festigkeiten beim Basaltsplittbeton größer als beim Kiessandbeton, nimmt jedoch bei Basaltsplittbeton stärker ab. Dadurch stellt sich für alle Normalbetone mit einer Druckfestigkeit von rd. 50 bis 60 N/mm<sup>2</sup> ein etwa gleich großer Wert von 6 bis 8‰

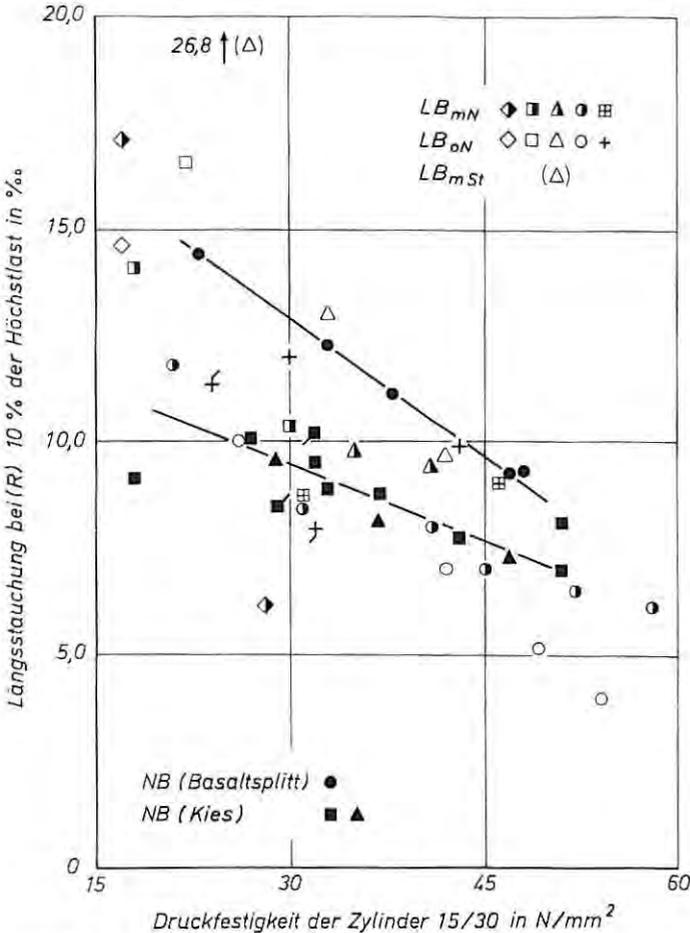


Bild 10 Bruchstauchung (Längsstauchung bei einer Resttragfähigkeit von 10% der Höchstlast) in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit der Zylinder 15/30 für Normalbeton (NB), Leichtbeton mit Natursand (LB<sub>oN</sub>), Leichtbeton ohne Natursand (LB<sub>mN</sub>) und Leichtbeton mit Stahlfasern (LB<sub>mSt</sub>)

ein. Der Verzahnungseffekt bei Splitt scheint sich nur bei geringeren Festigkeiten auf das Verformungsverhalten und damit auf die Bruchslauchung auszuwirken.

### 4.3 Energieaufnahme, -speicherung und -verzehr

Das Tragverhalten von Baustoffen lässt sich sehr gut mit energetischer Betrachtung beurteilen, bei der sowohl die von einem Prüfkörper ertragbaren Spannungen als auch die Verformungen berücksichtigt werden. In erster Linie wird nachfolgend die von einem Betonkörper aufnehmbare Energie diskutiert. Zusätzlich werden einige Anmerkungen zu der Aufteilung der Gesamtenergie in die einzelnen Energieanteile gemacht. Diese geben einen Hinweis auf die fortschreitende Zerstörung bei der Belastung eines Probekörpers.

#### 4.3.1 Energie im Belastungsast

Die verschiedenen Energieanteile wurden bei  $\frac{1}{3}$  und  $\frac{2}{3}$  der Höchstlast untersucht (siehe Abschnitt 3.4.3).

#### *Elastisch gespeicherte Energie*

Die elastisch gespeicherte Energie  $H_{el}$  nahm proportional mit der Druckfestigkeit der Betone zu und war, wie erwartet, bei  $\frac{2}{3}$  der Höchstlast rd. viermal so groß wie bei  $\frac{1}{3}$  der Höchstlast. Durch die Ausbildung der Risse im Beton bei Steigerung der Last wird die Zunahme der elastischen Energie somit praktisch nicht beeinträchtigt. Man kann die elastisch gespeicherte Energie beim Belasten des Prüfkörpers mit Hilfe des Elastizitätsmoduls näherungsweise berechnen ( $H_{el(E-Modul)}$ ). Sie ist um rd. 11% größer als die direkt ermittelte elastisch gespeicherte Energie ( $H_{el(Versuch)}$ ). Bei den vorliegenden Versuchen ergab sich die folgende Korrelation:

$$H_{el(E-Modul)} = 1,107 \cdot H_{el(Versuch)} \quad (B=99\%) \quad (2)$$

#### *Aufgezehrte Energie*

Die durch die Ausbildung von Rissen aufgezehrte Energie  $H_{pl}$  nahm bei Normal- und Leichtbeton mit zunehmender Festigkeit zu. Das Verhältnis von aufgezehrter Energie bei  $\frac{2}{3}$  der Höchstlast zu dem bei  $\frac{1}{3}$  der Höchstlast war abhängig von der Festigkeit und dem Zuschlag des Betons und lag für Normalbeton zwischen dem rd. 4- und dem rd. 9fachen bzw. für Leichtbeton zwischen dem rd. 3- und dem rd. 8fachen. Das Verhältnis nahm mit zunehmender Festigkeit ab. Der prozentuale Anteil der aufgezehrten Energie  $H_{pl}$  an der Gesamtenergie  $H$  bei  $\frac{2}{3}$  der Höchstlast nahm mit zunehmender Festigkeit des Betons stark ab. Die Abnahme war für alle Zuschläge in etwa gleich, wie Bild 11 zeigt. Die absolute Höhe des Anteils war jedoch für Normalbeton größer als für Leichtbeton und nahm zudem für Leichtbeton mit abnehmender Rohdichte des Leichtzuschlags ab. Weiterhin war der prozentuale Anteil der aufgezehrten Energie an der Gesamtenergie bei Leichtbeton ohne Natursand geringer als bei Leichtbeton mit Natursand. Die Abnahme des prozentualen Anteils der aufgezehrten Energie  $H_{pl}$  an der Gesamtenergie  $H$  spiegelt die Abnahme der quasiplastischen Verformbarkeit des Betons und somit eine Abnahme der Zähigkeit bei zunehmender Festigkeit und beim Übergang von Normal- auf Leichtbeton wider.

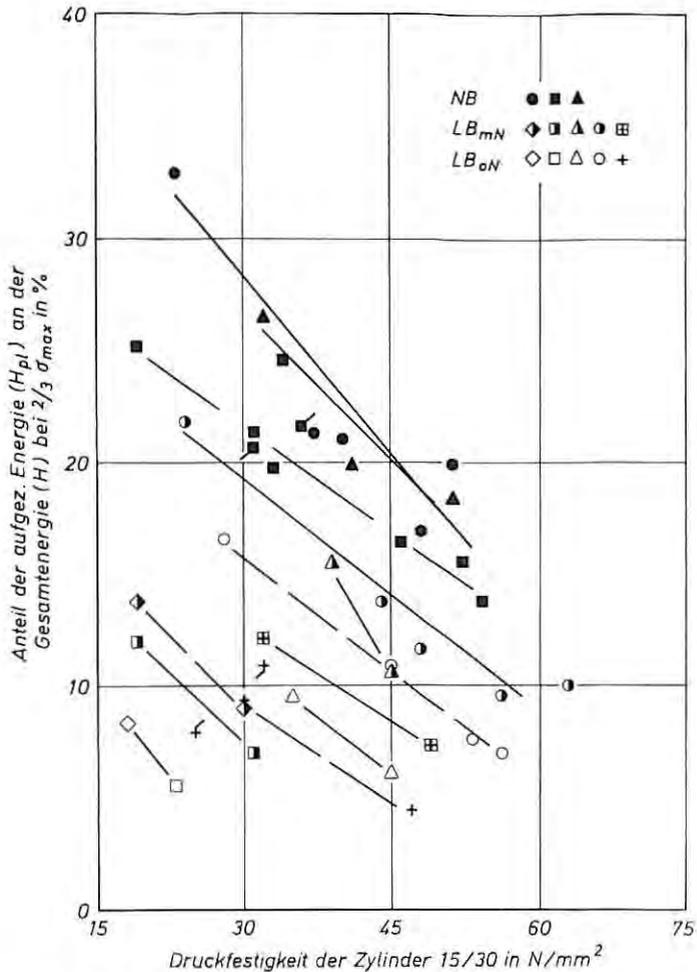


Bild 11 Anteil der aufgezehten Energie ( $H_p$ ) an der Gesamtenergie ( $H$ ) in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit der Zylinder 15/30 bei  $\frac{2}{3}$  der Höchstlast für Normalbeton (NB), Leichtbeton mit Natursand ( $LB_{mN}$ ) und Leichtbeton ohne Natursand ( $LB_{oN}$ )

### Dämpfungsenergie

Der nur bei  $\frac{2}{3}$  der Höchstlast ermittelte Anteil der Dämpfungsenergie an der Gesamtenergie lag immer unter 10%, änderte sich mit zunehmender Festigkeit nur unwesentlich und war bei Leichtbeton etwas geringer als bei Normalbeton.

### 4.3.2 Bruchenergie

„Bruchenergie“ ist eine vereinfachende Kurzbezeichnung für die gesamte Energie, die einem Probekörper zugeführt wird, bis er vollkommen versagt. Definitionsgemäß ist bei diesen Untersuchungen

die Bruchenergie  $H_{\text{Bruch}}$  die bis zur Resttragfähigkeit von 10% der Höchstlast aufgenommene Energie. Sie entspricht der Fläche unter der Arbeitslinie (siehe Abschnitt 3.4.3). Die Bruchenergie stieg nicht mehr proportional mit der Festigkeit an, sondern wurde — siehe hierzu auch [12 und 16] — mit zunehmender Festigkeit nur geringfügig größer, siehe Bild 12. Die auf die Druckfestigkeit bezogene Bruchenergie fällt deshalb stark ab. Die Bruchenergie der Basaltsplittbetone war um rd.  $\frac{1}{3}$  größer als die der Kiesbetone. Die aufnehmbare Energie wurde vermutlich durch den Verzahnungseffekt des Splitts, der sich insbesondere bei dem abfallenden Ast der Ar-

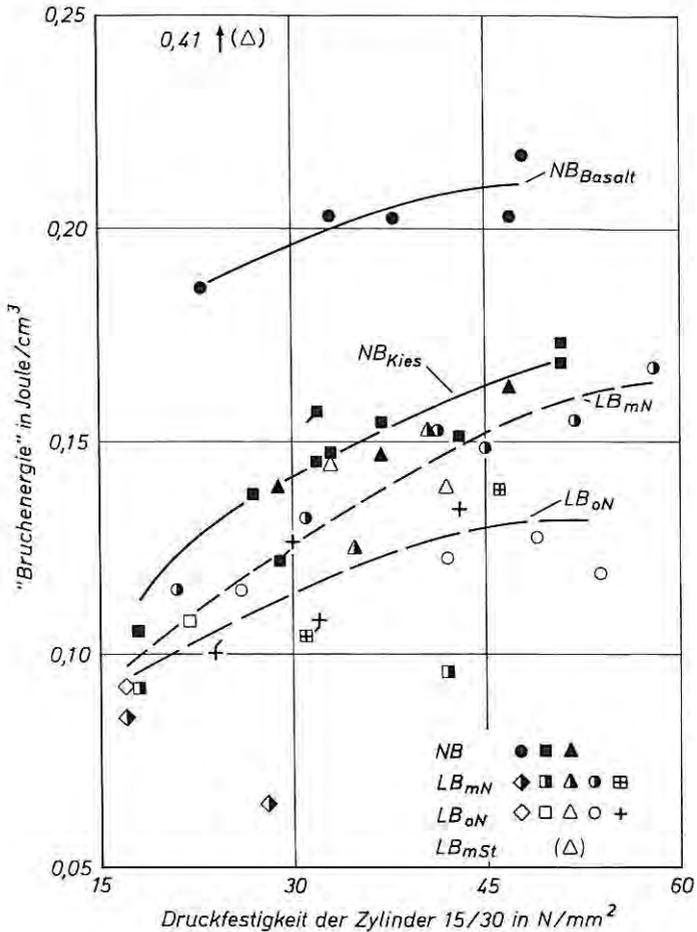


Bild 12 Bruchenergie (insgesamt von einem Probekörper bis zu einer Resttragfähigkeit von 10% der Höchstlast aufgenommene Energie) in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit der Zylinder für Normalbeton (NB), Leichtbeton mit Natursand (LB<sub>mN</sub>), Leichtbeton ohne Natursand (LB<sub>oN</sub>) und Leichtbeton mit Stahlfasern (LB<sub>mSt</sub>)

beitslinie (siehe Bild 6) bemerkbar machte, vergrößert. Bei Leichtbeton war die aufnehmbare Energie im abfallenden Ast (siehe Bild 7) häufig nur noch sehr gering. Die Bruchenergie der Leichtbetone lag deshalb im allgemeinen rd. 10% bis 20% unter der der Kiesbetone.

Wie in Bild 12 erkennbar ist, war die Bruchenergie zweier Leichtbetone deutlich geringer als die der übrigen. Bei sehr weiter Überschreitung der Grenzfestigkeit eines Leichtzuschlags ist die Bruchenergie im Verhältnis zur Festigkeit sehr gering, da praktisch nur noch die Matrix die Tragfunktion übernimmt. Es handelte sich bei diesen beiden Leichtbetonen um Betone mit den Zuschlägen 2 und 3, bei denen die mit der Standardmischung nach Merkblatt I [13] geprüfte Druckfestigkeit nur 19 bzw. 24 N/mm<sup>2</sup> betrug, siehe Tafel 3. Es erscheint deshalb zweckmäßig, mit einem Leichtzuschlag keine Betondruckfestigkeit anzustreben, die deutlich über die nach Merkblatt I zu erreichende Festigkeit hinausgeht.

#### 4.3.3 Zähigkeit

Ein unmittelbarer Vergleich der Zähigkeit verschiedener Betone anhand der Bruchenergie ist nur sinnvoll, wenn die Betone in etwa die gleiche Stauchung bei Höchstlast aufweisen [16]. Somit konnten bei dieser Untersuchung nur die Normalbetone direkt miteinander verglichen werden. Um jedoch für die unterschiedliche Zähigkeit verschiedener Betone eine Beurteilungsmöglichkeit zu erhalten, wurde ein Zähigkeitskennwert eingeführt. Hierbei wird die Bruchenergie  $H_{\text{Bruch}}$  auf die bis zur Höchstlast gespeicherte Energie  $H_{\text{el, omax}}$  bezogen. Da die bei Höchstlast elastisch gespeicherte Energie nicht direkt bestimmt wurde, wurde näherungsweise die elastische Energie mit Hilfe des Elastizitätsmoduls berechnet.

$$H_{\text{el, omax}} \approx \frac{1}{2} \beta_c \cdot \epsilon = \frac{1}{2} \cdot \frac{\beta_c^2}{E} \quad (3)$$

Wie in Abschnitt 4.3 erläutert, ist die Abweichung zwischen der so berechneten und der tatsächlich vorhandenen elastischen Energie von untergeordneter Bedeutung. Das Verhältnis von Bruchenergie zur elastisch gespeicherten Energie wird als Zähigkeitskennwert  $Z$  bezeichnet.

$$Z = \frac{H_{\text{Bruch}}}{H_{\text{el, omax}}} = \frac{2E \cdot H_{\text{Bruch}}}{\beta_c^2} \quad (4)$$

Verformt sich ein Körper bis zur Höchstlast nur elastisch und bricht dann schlagartig ohne weitere Energiezufuhr, so ist er spröde; der Zähigkeitskennwert beträgt dann eins, weil die Bruchenergie gleich der elastisch gespeicherten Energie ist. Wie aus Bild 13 hervorgeht, lag bei den Versuchen der Zähigkeitskennwert für Normalbeton zwischen rd. 5 und 23, für Leichtbeton mit Natursand zwischen rd. 2 und 8 und für Leichtbeton ohne Natursand zwischen rd. 1,2 und 5. Für die Übertragbarkeit des Zähigkeitskennwertes auf Bauteile, und damit auf die Praxis, muß beachtet werden, daß bei unterschiedlichem Bruchverhalten und unterschiedlicher Beanspruchung in Bauteilen mit diesem Kennwert nur eine tendenzmäßige Aussage für die Praxis möglich ist.

Aus Bild 13 geht ferner hervor, daß die Zähigkeit mit zunehmender Festigkeit deutlich abnimmt. Hochfeste Leichtbetone ohne Natur-

sandzusatz wiesen nur eine ganz geringe Zähigkeit auf, d.h. sie brachen bei Erreichen der Höchstlast mehr oder weniger schlagartig. Auch die Zähigkeit von Normalbetonen aus unterschiedlichen Zuschlägen kann sehr verschieden sein. Die Zähigkeit des Mainkiesbetons war etwas kleiner als die des Rheinkiesbetons und die wiederum geringer als die des Basaltsplittbetons. Insgesamt war die Zähigkeit eines Normalbetons größer als die eines Leichtbetons gleicher Festigkeit. Hierbei war die Zähigkeit des Leichtbetons mit Natursand größer als die des Leichtbetons ohne Natursand. Es ist zu vermuten, daß auch Sandkörner für das Rißwachstum bei Beanspruchung des Betons eine hemmende Wirkung haben und somit

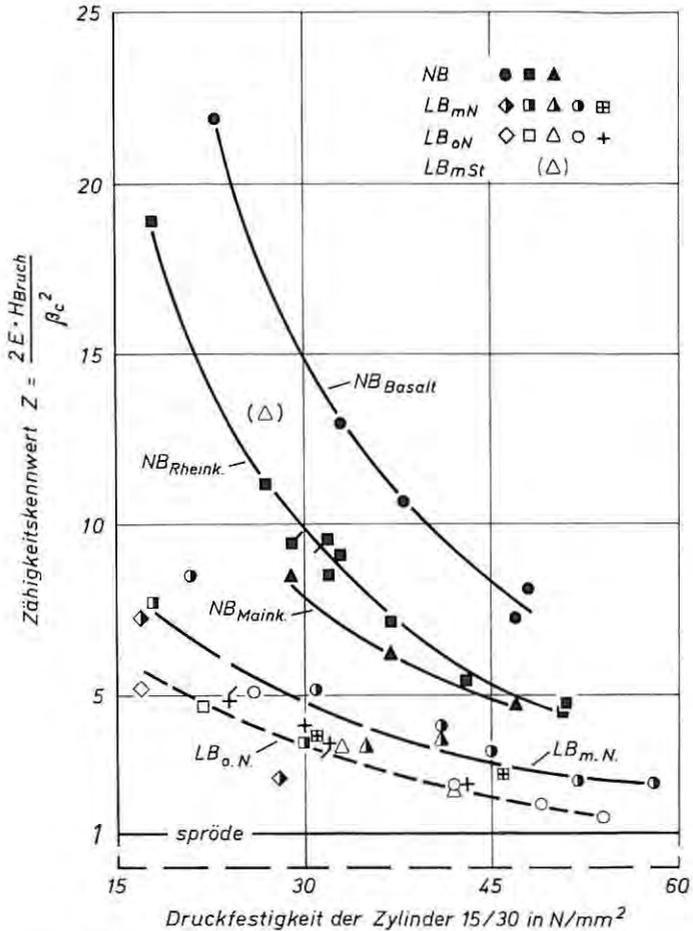


Bild 13 Zähigkeitskennwert (Bruchenergie bezogen auf die bis zur Höchstlast gespeicherte elastische Energie) in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit der Zylinder 15/30 für Normalbeton (NB), Leichtbeton mit Natursand (LB<sub>mN</sub>), Leichtbeton ohne Natursand (LB<sub>oN</sub>) und Leichtbeton mit Stahlfasern (LB<sub>mSt</sub>)

zu einer durch quasiplastische Verformungen vergrößerten Zähigkeit des Leichtbetons mit Natursand beitragen. Durch Stahlfasern konnte in dem orientierenden Versuch die Zähigkeit eines Leichtbetons auf das Niveau der Normalbetone gleicher Festigkeit angehoben werden.

## 5 Zusammenfassung und Folgerungen für die Praxis

Zur Beurteilung des Verformungsverhaltens und der Energieaufnahme von Normal- und Leichtbeton unterschiedlicher Festigkeit wurden Betonzusammensetzungen mit Basaltsplitt, Rhein- und Mainkies, vier Blähtonen und einem Blähschiefer hergestellt und die Arbeitslinien von Zylindern mit gleichmäßiger Verformungsgeschwindigkeit im Kurzzeitdruckversuch ermittelt. Aus diesen Arbeitslinien wurden Kennwerte abgeleitet, die einen Einblick in die Energieaufnahme und die Zähigkeit verschiedener Betone zulassen.

5.1 Das Verhältnis von Würfel- zu Zylinderdruckfestigkeit nahm — im Gegensatz zu den Umrechnungsfaktoren der DIN 1045 — für Normalbeton mit zunehmender Festigkeit zu. Die Zylinderdruckfestigkeit von Leichtbeton war im allgemeinen gleich oder nur unwesentlich geringer als die Würfeldruckfestigkeit. Für Leichtbeton ergab sich keine systematische Zunahme des Verhältniswertes mit steigender Druckfestigkeit.

5.2 Die Stauchung bei Höchstlast nahm mit zunehmender Festigkeit zu. Ausgenommen hiervon war der Normalbeton mit Basaltsplitt, dessen Stauchung bei Höchstlast bis zu einer Druckfestigkeit von rd. 40 N/mm<sup>2</sup> abnahm. Grund dafür ist, daß die plastische Verformung von Basaltsplittbeton mit steigender Festigkeit stärker abnimmt, als die elastische zunimmt.

5.3 Die Bruchstauchung — Stauchung beim Versagen des Prüfkörpers — wurde hier als Stauchung bei einer Resttragfähigkeit von 10% der Höchstlast definiert. Sie nahm mit zunehmender Festigkeit des Betons ab, weil bei hochfesten Betonen die Arbeitslinie meist steiler abfällt.

5.4 Die elastisch gespeicherte Energie nahm im Belastungsast proportional, die durch plastische Verformung oder quasiplastische Verformung (Mikrorisse) aufgezehrte Energie überproportional im Verhältnis zur Belastung zu. Mit zunehmender Belastungshöhe bilden sich immer mehr entlastende Risse, die die aufgezehrte Energie vergrößern, die elastisch gespeicherte Energie im Belastungsast jedoch nicht wesentlich beeinflussen.

5.5 Der Anteil der aufgezehrten Energie  $H_{pi}$  an der Gesamtenergie war bei  $\frac{2}{3}$  der Höchstlast bei Normalbeton größer als bei Leichtbeton und nahm mit zunehmender Festigkeit ab.

5.6 Die Bruchenergie — bis zum Bruch aufgenommene Energie — wurde hier als Energie definiert, die der Prüfkörper bis zu einer Resttragfähigkeit von 10% der Höchstlast aufnehmen kann. Sie nahm mit zunehmender Festigkeit nur geringfügig zu, so daß die auf die Festigkeit bezogene Bruchenergie stark abnahm.

5.7 Je größer die durch energieverzehrende Risse bewirkten plastischen Verformungen sind, um so zäher ist ein Beton, um so grö-

ber ist die Sicherheit gegen ein plötzliches Versagen durch örtliche Überbeanspruchung und um so mehr kann seine Festigkeit ausgenutzt werden. Aus der insgesamt von einem Beton bis zum endgültigen Versagen aufgenommenen Energie und der bei Höchstlast elastisch gespeicherten Energie wurde ein Zähigkeitskennwert errechnet, der mit zunehmender Betonfestigkeit kleiner wurde und folgende Reihenfolge abnehmender Zähigkeit ergab:

Normalbeton mit Basaltspilit  
Normalbeton mit Rheinkies  
Normalbeton mit Mankies  
Leichtbeton mit Natursand und  
Leichtbeton ohne Natursand.

Die Zugabe von Stahlfasern, die in einem orientierenden Zusatzversuch untersucht wurde, kann auch besonders bei Leichtbeton die Zähigkeit erheblich steigern.

5.8 Aus den vorgenannten Versuchsergebnissen lassen sich für die Bemessung von Stahlbetonbauteilen in DIN 1045 und DIN 4219 folgende Hinweise ableiten.

Die Abminderung der Rechenfestigkeit  $\beta_R$  gegenüber der Nennfestigkeit  $\beta_{WN}$  sollte beibehalten werden, weil bei zunehmender Betonfestigkeit das Verhältnis von Prismen- zur Würfeldruckfestigkeit abnimmt, die Völligkeit der Arbeitslinie, die in erster Näherung für den Kurzzeitdruckversuch der Spannungsverteilung in der Biegedruckzone gleichgesetzt werden kann, geringer wird und eine Tendenz zur Versprödung gegeben ist. Die zusätzliche Abminderung für Stahlleichtbeton sollte beibehalten werden. Darüber hinaus sollten mit einem Leichtzuschlag nur Festigkeiten angestrebt werden, die nicht wesentlich über den Festigkeiten liegen, die mit der Standardmischung nach Merkblatt I für Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge [13] erzielt werden können.

## SCHRIFTTUM

- [1] Siebel, E.: Verformungsverhalten, Energieaufnahme und Tragfähigkeit von Normal- und Leichtbeton im Kurzzeitdruckversuch. Dissertation TH Darmstadt (D17) 1988; ebenso Schriftenreihe der Zementindustrie H.50, Beton-Verlag, Düsseldorf 1989
- [2] Eibl, J., und G. Iványi: Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton, Teil A: Verhalten der einzelnen Komponenten. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 260. Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin (1976)
- [3] Lusche, M.: Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Dissertation, Ruhr-Universität Bochum 1971; ebenso Schriftenreihe der Zementindustrie H. 39. Beton-Verlag, Düsseldorf 1972
- [4] Diaz, S. J., und H. K. Hilsdorf: Fracture mechanism of concrete under static, sustained and repeated compressive loads. Civil engineering studies, Structural Research, Serie Nr. 382. University of Illinois, Urbana/ Illinois (1971)
- [5] Glücklich, J.: The effect of microcracking on time-dependent deformations and the long-term strength of concrete. The Structures of Concrete. Proc. Intern. Conf., London, September 1965. Cement and Concrete Association, London 1968, S. 176/189

- [6] Schickert, G.: Schwellenwerte beim Betondruckversuch. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton. H. 312. Verlag Wilh. Ernst & Sohn, Berlin (1980)
- [7] Spooner, D.C., and J.W. Dougill: A quantitative assessment of damage sustained in concrete during compressive loading. Magazine of Concrete Research 27 (1975), H. 92, S. 151/160
- [8] Weigler, H., und S. Karl: Stahlleichtbeton. Herstellung, Eigenschaften, Ausführung. Bauverlag, Wiesbaden-Berlin (1972)
- [9] Hermann, V.: Spannungs-Dehnungs-Linie von Leichtbeton. Dissertation TH Aachen 1977
- [10] Mier, J.G.M. van, H.W. Reinhardt und B.W. van der Vlugt: Ergebnisse dreiachsiger verformungsgesteuerter Belastungsversuche an Beton. Bauingenieur 62 (1987), H. 8, S. 353/361
- [11] Spooner, D.C., C.D. Pomeroy und J.W. Dougill: Damage and energy dissipation in cement pastes in compression. Magazine of Concrete Research 28 (1976), H. 94, S. 21/29
- [12] Wischers, G.: Aufnahme und Auswirkungen von Druckbeanspruchungen auf Beton. beton 28 (1978), H. 2, S. 63/67 und H. 3, S. 98/103; ebenso Betontechnische Berichte 1978, Beton-Verlag, Düsseldorf (1979), S. 31/56
- [13] Merkblatt I für Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem Gefüge: Betonprüfung zur Überwachung der Leichtzuschlagherstellung (Fassung Juli 1974). beton 24 (1974), H. 7, S. 265/267; ebenso Betontechnische Berichte 1974, Beton-Verlag, Düsseldorf 1975, S. 111/119
- [14] Rendchen, K.: Einfluß der Granulometrie von Zement auf die Eigenschaften des Frischbetons und auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Festbetons. Dissertation TH Aachen 1985
- [15] Bonzel, J.: Zur Gestallsabhängigkeit der Betondruckfestigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 54 (1959) H. 9, S. 223/228 und H. 10, S. 247/248
- [16] Bielak, E.: Das Tragverhalten von Beton — Einfluß der Festigkeit und der Erhärtingsbedingungen. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt 1986