

Versuche mit Leichtbeton hoher Festigkeit

Von K. Walz, J. Bonzel und G. Baum, Düsseldorf

Übersicht

Im Jahre 1959 wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie Versuche mit der Fragestellung aufgenommen, ob mit den in Deutschland lieferbaren leichten Zuschlägen Konstruktionsbeton der Güten B 300 und höher mit Rohdichten möglichst unter 1,80 kg/dm³ hergestellt werden kann. Von den neun zunächst verfügbaren Zuschlägen, die z. T. heute nicht mehr hergestellt werden, erwiesen sich bei den Voruntersuchungen 4 Zuschläge (1 Blähton, 1 Hüttenbims und 2 Flugaschensinterbimse) als geeignet. Der Flugaschensinierbims H und der Hüttenbims K wurden ausführlicher untersucht auf Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit bis zu 1 Jahr sowie auf Elastizität, Schwinden und Kriechen bis zu 2,5 Jahren. Dabei konnte Beton der Güte B 300 mit einer Rohdichte unter 1,80 kg/dm³ (rd. 1,75 kg/dm³) nur mit dem im Schachtofen hergestellten Flugaschen-Sinterbims H erzielt werden. Der Hüttenbims K lieferte Betongüten B 300 und B 400, jedoch lagen die Rohdichten bereits bei 1,95 kg/dm³. Danach stand im Jahre 1959 in Deutschland kein Leichtzuschlag zur Verfügung, der besonders günstigen amerikanischen Blähtonen gleichwertig war.

Das Schwinden dieser Betone war etwa so groß wie bei vergleichbaren Schwerbetonen. Die elastische Verformung war größer, das Kriechen kleiner als bei Kiessandbeton gleicher Druckfestigkeit und ähnlicher Zusammensetzung.

1. Einleitung

1.1 Allgemeines

Über die Bedeutung und die Eigenschaften von Leichtbeton hoher Festigkeit für den Stahlbeton- und Spannbetonbau wurde vor kurzem am Beispiel der Verwendung von hochwertigem Blähton in den USA berichtet [1]. Der vorliegende Bericht behandelt auch andere Zuschlagstoffe für Leichtbeton hoher Festigkeit und bringt Ergebnisse von Untersuchungen des Forschungsinstitutes der Zementindustrie.

Neben der günstigeren Wärmedämmung [2] und höheren Feuersicherheit, die der Konstruktions-Leichtbeton als Stahl- oder Spannbeton bietet, sind es wirtschaftliche, dem kleineren Gewicht entstehende Vorteile, die trotz des meist höheren Preises des Leichtzuschlags in einem bestimmten Bereich von Baukonstruktionen

einen Anreiz für die Anwendung geben. Bei Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen kann das Eigengewicht üblichen Schwerbetons bereits einen großen Anteil des Gesamttragvermögens ausmachen. Bauteile aus leichtem, aber ebenso festem Beton können bei gleichen Abmessungen größere Nutzlasten aufnehmen und bei gleicher Nutzlast weiter gespannt oder mit kleineren Querschnittsabmessungen hergestellt werden. Fertigbauteile gleicher Abmessungen haben geringeres Gewicht und sind leichter zu transportieren.

Für Konstruktionsbeton der Güteklassen B 300 und höher liegen in den USA bereits jahrelange Erfahrungen vor. Dort wurden im Hoch- und Ingenieurbau Leichtbetone der Güten bis etwa B 450 verwendet. Mit sehr günstigem Blähton und Zementgehalten bis 550 kg/m³ wurden im Laboratorium Betongüten bis rd. B 600 bei Rohdichten bis rd. 1,8 kg/dm³ erreicht. Auch andere, für den Konstrukteur wichtige Kennwerte stehen dort für den Konstruktionsleichtbeton zur Verfügung. Der E-Modul sowie die Biege-, Spaltzug- und Scherfestigkeit liegen etwa zwischen 60 und 80 % der Werte des Schwerbetons gleicher Druckfestigkeit. Schwinden und Kriechen waren teilweise kleiner, im Mittel aber um 30 bis 40 % größer als beim vergleichbaren Schwerbeton [1].

Wie der nachfolgenden Übersicht (Tafel 1) zu entnehmen ist, wurden, vorwiegend im Laboratorium, auch mit anderen Leichtzuschlä-

Tafel 1 Rohdichte und Druckfestigkeit von Leichtbeton hoher Festigkeit aus verschiedenen Leichtzuschlägen nach ausländischen Versuchen (Beispiele)

Leichtzuschlag	Erzeugungs-		Rohdichte kg/dm ³	Beton- Druckfestigkeit kp/cm ²	Schriftum und Jahr
	Art	Land			
Hüttenbims Sinterbims (Flugasche)	— —	USA	rd. 1,7 rd. 1,6	rd. 300 rd. 300	[3], 1949
Blähton	Drehofen	Dänemark	rd. 1,8	rd. 400	[4], 1951
Sinterbims (Feuerungssasche)	Sinterband	England	rd. 1,6	rd. 300	[5], 1959
Blähton	Sinterband	England	rd. 1,7	rd. 300	[6], 1959
Sinterbims (Feuerungssasche)	Sinterband	England	rd. 1,8	rd. 300	
Blähton	—	CSR	rd. 2,0	rd. 500	[7], 1959
Sinterbims (Feuerungssasche)	Sinterband	England	rd. 1,7 rd. 1,7	rd. 420 rd. 540	[8], — [9], 1961
Blähton	Drehofen	Norwegen	rd. 1,7	rd. 310	[10], 1961
Blähton	—	UdSSR	rd. 1,8	rd. 300	[11], 1962
Blähton	Sinterband	England	rd. 1,8	rd. 490	[12], 1963
Blähton	—	UdSSR	rd. 1,7 rd. 1,8	rd. 300 rd. 400	[13], 1964
Sinterbims (Flugasche)	—	Indien	rd. 1,5 rd. 1,6	rd. 310 rd. 400	[13a], 1964

gen und in anderen Ländern Leichtbetone der Güten B 300 und höher hergestellt (die Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit). Leichtbeton aus Flugaschen-Sinterbims wurde in Ungarn bereits im Brückenbau verwendet [14].

In Deutschland ist der Konstruktionsleichtbeton, abgesehen von einer Anwendung während des letzten Krieges [15], im Versuchsstadium geblieben. Über die wichtigsten Eigenschaften deutscher, vorwiegend künstlicher Leichtzuschlagstoffe und deren Herstellung wurde verschiedentlich berichtet [2, 16 bis 28]. Die erzielten Betonfestigkeiten genügten im allgemeinen für hochwertigen Leichtbeton nicht. Mit Schaumlava, Hüttenbims, Ziegelsplitt und Blähton wurden in der Regel nur Betongüten bis höchstens B 225 erreicht [2, 17, 20 bis 23, 28 bis 35]. Bei größeren Natursand-Zusätzen fiel die Festigkeit teilweise etwas größer aus; die wesentlich höheren Rohdichten ließen diese Betone jedoch nicht besonders vorteilhaft erscheinen [28, 30, 32, 33, 36]. Auch bei neueren Untersuchungen (Tafel 2), bei denen das Interesse am Konstruktionsleichtbeton im Vordergrund stand, wurde nur in wenigen Fällen ein Beton mit einer noch angemessenen Rohdichte von höchstens $1,80 \text{ kg/dm}^3$ erreicht, der auch auf der Baustelle mit einiger Sicherheit eine Betongüte B 300 erwarten läßt [24, 34, 37 bis 42].

Tafel 2 Rohdichte und Druckfestigkeit hochfester Leichtbetone nach neueren deutschen Versuchen

Leichtzuschlag	Beton-Rohdichte kg/dm^3	Druckfestigkeit kp/cm^2	Schrifttum und Jahr
Hüttenbims	1,87 bis 2,00*)	330 bis 460	[24], 1959
Steinkohlenfilterasche Braunkohlenfilterasche	1,49 1,80	248 285	[37], 1960
Hüttenbims und Rennschlacke	1,90	rd. 300	[38], 1962
Blähton (Drehofen)	1,60	350	[39], 1962
Blähton (Sinterband)	1,99	407	[40], 1963
Blähton (Drehofen)	1,59	330	[41], 1964
Blähziegelton (Drehofen)	1,80	rd. 450	[42], 1964

*) Rohdichte des Frischbelots

Für die Konstrukteure in Deutschland bestand bisher wenig Anlaß, sich mit den Möglichkeiten von Konstruktions-Leichtbeton der Güten B 300 und höher eingehender zu befassen, da keine geeigneten Zuschlagstoffe zur Verfügung standen. In den wenigen Fällen, in denen neuerdings Laboratoriumsversuche geeignete Leichtzuschläge für B 300 auswiesen, gaben die diesbezüglichen Untersuchungen zu wenig Aufschluß über die laufende Gleichmäßigkeit der Herstellung sowie über andere Eigenschaften, die neben Rohdichte und Druckfestigkeit des daraus hergestellten Konstruktionsbetons von Bedeutung sind.

1.2 Untersuchungen des Forschungsinstitutes der Zementindustrie*)

Im Jahre 1959 wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, Versuche über Leichtbeton hoher Festigkeit mit den seinerzeit in Deutschland vorhandenen leichten Zuschlägen aufgenommen. Damals waren die Möglichkeiten gering, in etwa geeignet erscheinende und in gleichmäßiger Qualität lieferbare Leichtzuschläge für die Versuche zu bekommen. Die Untersuchungen sollten einen Beitrag zu folgenden beiden Fragen liefern:

- a) Gibt es bei uns leichte Zuschlagstoffe, mit denen Beton hoher Festigkeit (B 300 und höher) und geringer Rohdichte (möglichst unter $1,80 \text{ kg/dm}^3$) wirtschaftlich hergestellt werden kann?
- b) Welche mechanischen Eigenschaften hat solcher Leichtbeton, insbesondere über längere Zeit und unter Dauerlast?

In Vorversuchen war zunächst zu klären, welche Zuschlagstoffe und welche Betonzusammensetzungen zur Herstellung von Leichtbetonen hoher Druckfestigkeit zur Verfügung standen.

Aus den hier nach ausgewählten Zuschlagtypen sollten in den Hauptversuchen Betone hergestellt und in verschiedenem Alter ihre Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, ihr E-Modul, Schwinden und Kriechen festgestellt werden.

2. Zuschlagsstoffe

2.1 Art und Beurteilung der Leichtzuschläge nach Augenschein

Auf den Bildern 1 bis 9 sind typische Körner der groben Korngruppen der untersuchten Leichtzuschläge wiedergegeben. In die Untersuchungen waren einbezogen:

Hüttenbims R (Bild 1) in den Korngruppen 0/3 mm, 3/7 mm und 7/15 mm. Er wurde durch Aufblähen von Hochofenschlacke und anschließendes Brechen hergestellt. Die Körner sind mit geschlossenen Poren, vorwiegend bis zu 1 mm Durchmesser, durchsetzt. Sie sind fest und gedrungen und besitzen eine unregelmäßige Form sowie eine rauhe, offenporige Oberfläche.

Hüttenbims K (Bild 2) in den Korngruppen 0/3 mm und 3/15 mm. Er entstand aus aufgeblähter und gebrochener Kalksilicatschmelze, die bei der Phosphorsäure-Herstellung anfiel. Das Korn erscheint sehr fest und hat eine glatte, offenporige Oberfläche und wenig zusammenhängende Poren, vorwiegend bis zu 1 mm Durchmesser.

*) Das Forschungsvorhaben wurde von der Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen, Köln, unterstützt. — Die Versuchsausführung lag bis zum Frühjahr 1961 überwiegend in den Händen von Herrn Dipl.-Ing. L. Knubben; anschließend führte Herr Dipl.-Ing. G. Baum die Messungen und Prüfungen weiter.

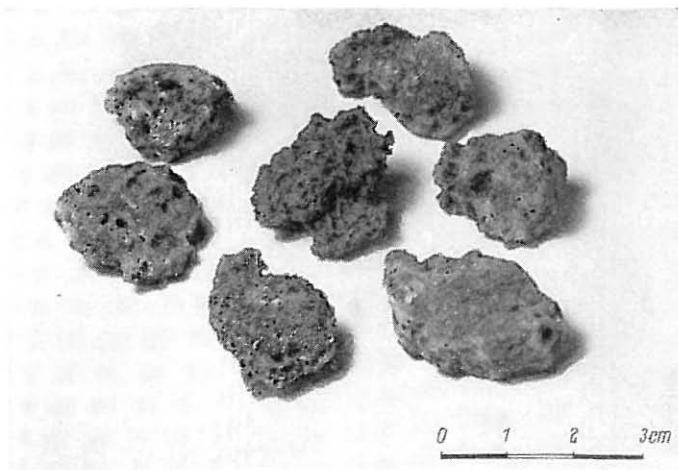


Bild 1 Hüttenbims R, Korngruppe 7/15 mm



Bild 2 Hüttenbims K, Korngruppe 7/15 mm

Sinterbims H (Bild 3) in den Korngruppen 0/3 mm, 3/8 mm und 8/15 mm. Er wurde durch Sintern von Flugasche im Schachtofen hergestellt. Das überwiegend rundliche Korn ist sehr fest und hat eine weitgehend geschlossene, mäßig rauhe Oberfläche und zusammenhängende Poren, vorwiegend bis zu 0,5 mm Durchmesser.

Sinterbims T (Bild 4) in den Korngruppen 0/3 mm, 3/7 mm und 7/15 mm. Er wurde durch Sintern von Flugasche auf dem Sinterband und anschließendes Brechen gewonnen. Das bizarre geformte



Bild 3 Sinterbims H, Korngruppe 8/15 mm

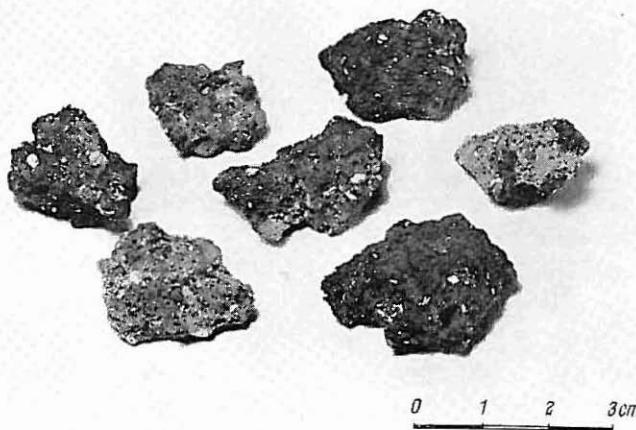


Bild 4 Sinterbims T, Korngruppe 7/15 mm

Korn ist fest, hat eine weitgehend offenporige, sehr rauhe Oberfläche und zusammenhängende Poren, vorwiegend bis zu 1 mm Durchmesser.

Blähton A (Bild 5) in der Korngruppe 3/15 mm. Er wurde auf einem Sinterband gebrannt und anschließend gebrochen. Das unregelmäßig geformte Korn ist fest und hat eine mäßig rauhe Oberfläche. Es ist von wenig zusammenhängenden Poren, vorwiegend bis zu 1 mm Durchmesser, durchsetzt.

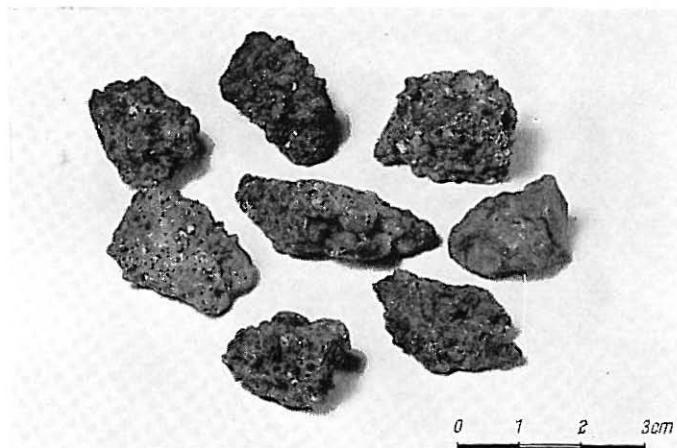


Bild 5 Blähton A, Korngruppe 7/15 mm

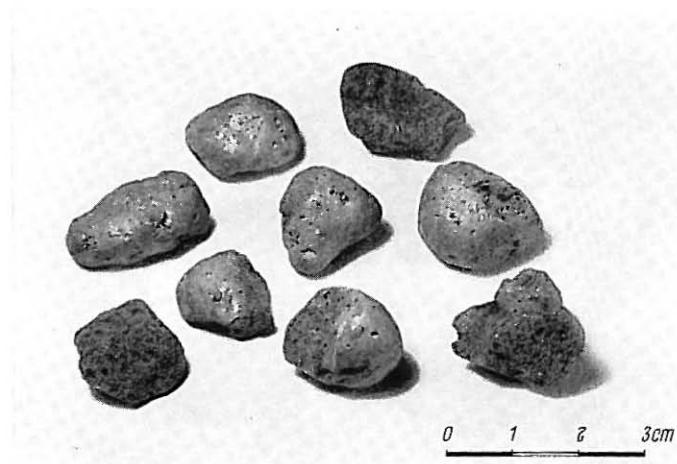


Bild 6 Blähton LD, Korngruppe 10/20 mm

Blähton LD (Bild 6) in den Korngruppen 0/3 mm, 3/10 mm und 10/20 mm. Der fette, kalkarme Ton wurde im Drehofen bei Temperaturen von 1200 bis 1300 °C gebläht. Das Korn ist fest und kugelig und hat eine weitgehend geschlossene, glatte Oberfläche; es weist zusammenhängende Poren, vorwiegend bis zu 0,5 mm Durchmesser, auf. Die Korngruppen enthalten auch gebrochene Körner.

Blähton LN (Bild 7) in den Korngruppen 0/2 mm, 2/3 mm, 3/10 mm und 10/20 mm. Die Herstellung entsprach der Herstellung des Bläh-

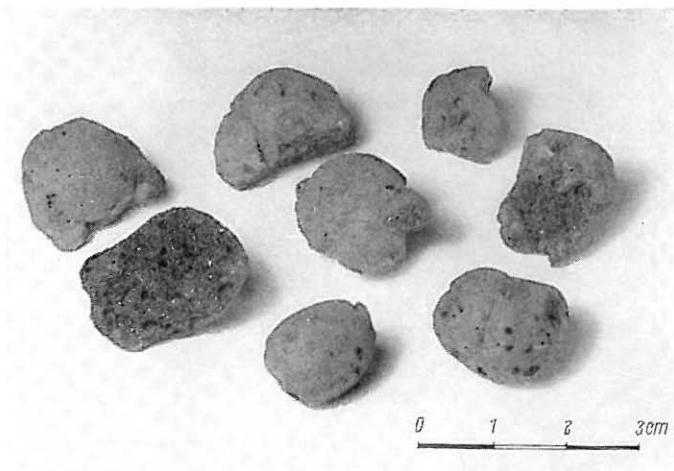


Bild 7 Blähton LN, Korngruppe 10/20 mm



Bild 8 Blähton P, Korngruppe 7/15 mm

tons LD. Das kugelige Korn erscheint mäßig fest und hat eine weitgehend geschlossene, glatte Oberfläche; es weist zahlreiche, nur wenig zusammenhängende Poren, vorwiegend bis zu 0,5 mm Durchmesser, auf. Die Korngruppen enthalten auch gebrochene Körner.

Blähton P (Bild 8) entstand in großen Brocken im Tunnelofen, die für die Versuche von Hand zerschlagen wurden. Der Bruch wurde durch Siebung in die Korngruppen 0/3 mm, 3/7 mm und 7/15 mm

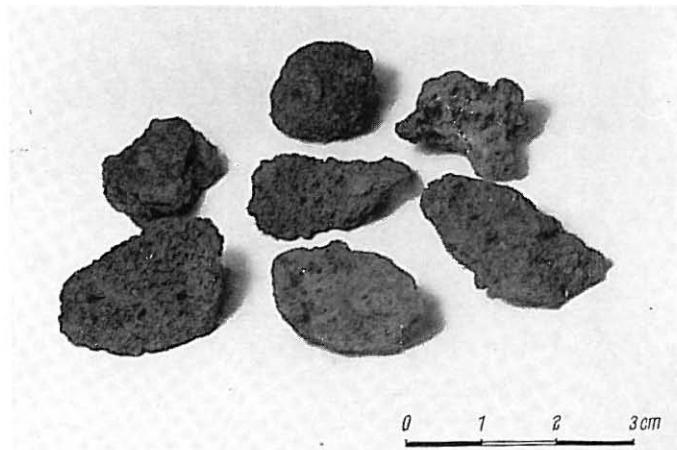


Bild 9 Lavaschlacke L, Korngruppe 7/15 mm

aufgeteilt. Das Korn ist fest und mäßig gedrungen; es hat eine rauhe, offenporige Oberfläche und zusammenhängende Poren, vorwiegend bis zu 2 mm Durchmesser.

Lavaschlacke L (Bild 9) in den Korngruppen 0/3 mm, 3/7 mm und 7/15 mm. Sie stammt aus dem östlichen Teil der Eifel. Die z. T. durch Zerkleinern entstandenen Körner sind mäßig fest und gedrungen und besitzen eine rauhe, offenporige Oberfläche. Das Gefüge ist meist grobporig und vorwiegend mit Poren bis zu 1 mm Durchmesser durchsetzt.

2.2 Natursand und Normensand

Für eine angemessene Verarbeitbarkeit und die Herstellung eines Betons mit geschlossenem Gefüge war es bei den meisten Mischungen nötig, *Rheinsand Rs* in Korngruppen bis 7 mm und *Normensand N* (Korngruppe I, 0/0,2 mm) nach DIN 1164 mit zu verwenden.

2.3 Kornzusammensetzung, Dichte und Kornfestigkeit der Leichtzuschläge

Die Feststellungen sind in Tafel 3 zusammengestellt.

Die Kornzusammensetzung der Korngruppen wurde durch Siebversuche mit den Prüfsieben 0,2 DIN 4188 und 1,0, 3,0, 7,0, 15,0 und 30,0 DIN 1170 ermittelt.

Die *Reindichte* ϱ_0 (die auf die Raumeinheit ausschließlich der Hohlräume bezogene Masse der bei 105 °C getrockneten Leichtzuschläge) wurde in Anlehnung an DIN 52 102 am Mahlgut 0/0,09 mm im Pyknometer mit Isobutanol bestimmt.

Tafel 3 Kornzusammensetzung, Dichten und Zertrümmerungsgrad der Leichtzuschläge (Mittelwerte aus 3 Versuchen)

Leichtzuschlag Korngruppen (Lieferangabe)	Maschen- sieb (mm) 0,2	Kornzusammensetzung Durchgang durch das Rundlochsieb (mm)					Reindichte	Korn- rohdichte	Schüttrohdichte		Zertrümme- rungsgrad (7/15 mm)	Korn- porosität
		1	3	7	15	30			lose	verdichtet		
	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	kg/dm³	kg/dm³	kg/dm³	kg/dm³	—	Raum-%
R	4	18	64	100	100	100	2,85	2,15	0,950	—	—	24,5
	0,6	0,9	1,6	29	92	100	2,85	1,95	0,735	—	—	31,5
	0,6	0,8	1,0	3	61	100	2,85	1,89	0,738	—	0,787	33,7
K (Vorversuche)												
	0/3 mm	14	31	81	100	100	—	2,12	1,015	—	—	—
	3/15 mm	2,2	3	4	22	99	—	1,55	0,726	—	—	—
K (Hauptversuche)												
	3/15 mm	3	5	7	45	92	100	2,93	1,51	0,680	0,796	0,925
H (Vorversuche)												
	0/30 mm	6	7	8	15	69	100	—	1,12	0,646	—	—
H (Hauptversuche)												
	0/3 mm	34	45	69	100	100	100	2,58	—	1,06	—	—
	3/8 mm	8	8	9	10	91	100	2,65	1,50	0,73	—	43,4
T												
	8/15 mm	9	10	10	11	29	100	2,65	1,47	0,72	—	0,505
	0/3 mm	14	35	66	100	100	100	2,68	—	0,806	0,925	—
3/7 mm	6	7	10	36	100	100	2,78	1,40	0,584	0,646	—	49,7
	7/15 mm	0,7	1,1	1,4	2,4	73	100	2,81	1,34	0,492	0,550	0,864

Fortsetzung der Tafel 3

Leichtzuschlag Korngruppen (Lieferangabe)	Maschen- sieb (mm) 0,2	Kornzusammensetzung Durchgang durch das Rundlochsieb (mm)						Reindichte	Korn- rohdichte	Schüttrohdichte		Zertrümme- rungsgrad (7/15 mm)	Korn- porosität	
		1	3	7	15	30	Gew.-%			Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	—	
	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	kg/dm ³	kg/dm ³	kg/dm ³	kg/dm ³	—	Raum-%
A 3/15 mm	2,2	4	6	27	85	100	—	—	1,08	0,629	—	—	0,736	—
LD 0/3 mm 3/10 mm 10/20 mm	6 — —	12 0,6 —	98 1,9 —	100 50 0,6	100 100 93	100 100 100	— — 2,43	— 0,72 0,54 0,46 0,249	0,421 0,303 — —	— — — —	— — — 1,045	— — — 81,1	— — — —	
LN 0/2 mm 2/3 mm 3/10 mm 10/20 mm	43 3 2,1 0,9	86 4 2,5 0,9	100 42 2,6 1,0	100 100 16 1,0	100 100 97 16	100 100 100 100	— 2,55 — 2,54	1,79 0,91 0,48 0,50	0,766 0,431 0,261 0,264	— — — —	— — — 2,472	— — — 80,3	— — — 64,3	
P 0/3 mm 3/7 mm 7/15 mm	5 — —	78 — —	100 — —	100 100 —	100 100 100	100 100 100	— 2,64 —	— 1,33 1,13	1,106 0,514 0,512 0,593	1,318 0,606 — 1,160	— — — —	— — — 49,6	— — — —	
L 0/3 mm 3/7 mm 7/15 mm	9 — —	85 4 —	98 26 5	100 100 22	100 100 98	100 100 100	— 2,99 —	2,40 1,85 1,78	1,413 0,846 0,809	— — —	— — —	— — —	38,2 — —	

Die *Kornrohdichte* ϱ (die auf die Raumeinheit einschließlich der Kornporen bezogene Masse der bei 105 °C getrockneten Körner) wurde mit dem Auftriebsverfahren an den mit Kerosin getränkten Körnern ermittelt [43].

Die *Schüttrohdichte* ϱ_s der einzelnen Korngruppen (die auf die Raumeinheit einschließlich aller Hohlräume bezogene Masse des bei 105 °C getrockneten Schüttguts) wurde lose eingefüllt und eingerrüttelt festgestellt, je nach Größtkorn in einem zylindrischen 1- bzw. 5 l-Gefäß nach DIN 52 110.

Als Maß für die *Kornfestigkeit* wurde der Druckzertrümmerungsgrad an lufttrockenen Proben der sauber abgesiebten Korngruppen 7/15 mm nach A. Hummel [19] ermittelt. Dabei wurde die in einen zylindrischen Mörser lose eingefüllte Probe von etwa 0,5 l mit einem bis auf 5 MPa anwachsenden Druck belastet und der Druckzertrümmerungsgrad Z_{Dr} wie folgt errechnet:

$$Z_{Dr} = \frac{\Sigma Rv - \Sigma Rn}{100}$$

Es bedeuten:

Rv = mittlerer Rückstand in Gew.-% auf den Prüfsieben 1, 3 bzw. 7 DIN 1170 vor dem Druckversuch.

Rn = mittlerer Rückstand in Gew.-% auf den Prüfsieben 1, 3 bzw. 7 DIN 1170 nach dem Druckversuch.

Die *Kornporosität* p wurde aus Reindichte und Kornrohdichte nach der Beziehung errechnet:

$$p = (1 - \frac{\varrho}{\varrho_0}) 100$$

3. Vorversuche

3.1 Allgemeines

Die Vorversuche wurden angestellt, um zu ermitteln, mit welchen der neun zur Verfügung stehenden Leichtzuschläge bei vertretbarem Zementgehalt ein ausreichend verarbeitbarer Beton mit Rohdichten möglichst unter 1,80 kg/dm³ und 28 Tage-Druckfestigkeiten von 300 kp/cm² und mehr erhalten wird. Mit den Zuschlagstoffen wurden hierzu Betone verschiedener Zusammensetzung hergestellt.

3.2 Betonherstellung und Prüfung

Für die Vorversuche wurde ein Portlandzement Z 375, Werk wbn, mit einer Normenfestigkeit N₂₈ von 492 kp/cm² verwendet. Die Leichtzuschläge wurden 1 Tag vor der Prüfung abgewogen und angenäßt. Zement, Zuschläge und Zusatzwasser wurden etwa 5 Minuten von Hand gemischt. Der Feinmörtel aller Mischungen war weich, der Frischbeton etwa knapp weich und zusammenhängend. Der Beton wurde in 10 cm-Würfelformen mit Aufsatz-

kasten eingefüllt und auf einem Rütteltisch (2800 U/min, s = 1,1 mm) je nach Konsistenz 10 bis 20 sec verdichtet.

Die Würfel (3 je Mischung) lagerten dauernd bei 20 °C, zunächst 7 Tage unter feuchten Tüchern, dann in Raumluft mit 65 % relater Feuchte. Sie wurden im Alter von 7 und 28 Tagen auf Rohdichte und Druckfestigkeit geprüft. Die Zusammensetzung der Mischungen und die Ergebnisse der Prüfung sind in Tafel 4 zusammengestellt.

3.3 Beurteilung der Leichtzuschläge

3.3.1 Korneigenschaften

Die Ergebnisse der Tafeln 3 und 4 lassen erkennen, daß die Eignung der Leichtzuschläge zur Herstellung von Leichtbeton hoher Festigkeit mit den Eigenschaften des Zuschlags allein nur beschränkt beurteilt werden kann. Die Kornfestigkeit wird zwar in erster Linie von der Festigkeit des Stoffes und dem strukturellen Aufbau des Korns bestimmt, Einfluß auf die Betonfestigkeit haben aber auch Form und Oberflächenbeschaffenheit des Korns.

Offenbar wirken sich nur sehr große Unterschiede in der Kornrohdichte und im Zertrümmerungsgrad auf die Druckfestigkeit des Betons aus. Dies ist beim Blähton LN und beim Sinterbims H (vgl. Tafel 3) der Fall. Der Blähton LN hatte mit 0,50 kg/dm³ (Korngruppe 10/20 mm) eine sehr kleine Kornrohdichte und mit 2,47 einen mehr als doppelt so großen Zertrümmerungsgrad wie alle anderen Zuschläge. Mit ihm entstand bei einem Zementgehalt von 361 kg/m³ nur eine Druckfestigkeit von 88 kp/cm². Dagegen ergab der Sinterbims H mit einer mittleren Kornrohdichte von rd. 1,50 kg/dm³ und dem mit Abstand geringsten Zertrümmerungsgrad von rd. 0,50 bei einem Zementgehalt von 347 kg/m³ eine Druckfestigkeit von 334 kp/cm². Bei den übrigen Zuschlägen streute der Zertrümmerungsgrad der geeigneten und auch der nicht geeigneten Zuschläge zwischen 0,74 und 1,16. Auch Zuschläge mit ungünstiger Kornform (scharfkantig, wenig gedrungen und bizarr) sowie rauher, offenporiger Kornoberfläche sind bei gleicher Kornrohdichte und gleicher spezifischer Kornfestigkeit sicher weniger geeignet, weil solche Körner einen hohen Sandanteil und einen hohen Wassersanspruch für eine bestimmte Konsistenz erfordern.

Nach diesen Untersuchungen erscheinen Zuschläge mit Kornrohdichten unter etwa 1,00 kg/dm³ und mit Zertrümmerungsgraden über etwa 1,20 nicht ausreichend fest. (In den USA wiesen Blähtone für Betone hoher Festigkeit mit Rohdichten unter 1,80 kg/dm³ Kornrohdichten um 1,20 kg/dm³ auf [1].) Wegen der noch wenig erfaßbaren Zusammenhänge wird die Eignung leichter Zuschlagsstoffe zur Herstellung fester Leichtbetone zweckmäßig durch Prüfung von Betonmischungen beurteilt.

Die Leichtzuschläge erwiesen sich als sehr unterschiedlich wasseraugend. Sie sollten daher im allgemeinen wenigstens 24 Stunden vor dem Mischen vorgenäßt werden. Für Konstruktions-Leichtbetone empfiehlt sich eine knapp plastische Betonkonsistenz, weil die leichten Zuschläge beim Rütteln die Neigung haben, im weichen Beton aufzuschwimmen.

Tafel 4 Betonzusammensetzung, Rohdichten und Druckfestigkeiten von 10 cm-Würfeln (Vorversuche)

Leichtzuschlag	Misch.-Nr.	Anteil der Korngruppen im Zuschlaggemisch					Mischungsverhältnis			Frischrohdichte	Zementgehalt	Rohdichte**) nach		Druckfestigkeit**) nach	
		Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Z	G	W/Z*)			7 Tagen	28 Tagen	7 Tagen	28 Tagen
R	1	Rs 0/3 24,8	R 0/3 30,3	R 3/7 9,2	R 7/15 35,7	—	1	4,00	0,78	1,99	344	—	1,89	—	236
	2	N 0/0,2 6,0	R 0/3 24,4	R 0/3 29,8	R 3/7 9,0	R 7/15 30,8	1	4,00	0,66	2,05	362	—	1,99	—	337
	3	N 0/0,2 10,2	Rs 0/3 30,7	Rs 1/2 10,2	R 3/7 31,5	R 7/15 17,4	1	3,88	0,68	2,18	389	2,18	2,12	315	413
K	1	N 0/0,2 10,1	K 0,2/3 34,9	K 3/15 55,0	—	—	1	4,00	0,67	1,69	298	—	1,64	—	256
	2	N 0/0,2 9,7	Rs 0/3 13,8	K 0,2/3 27,8	K 7/15 48,7	—	1	4,00	0,62	1,83	326	—	1,79	—	343
	3	N 0/0,2 6,4	Rs 0/3 26,1	Rs 3/7 19,6	K 3/15 47,9	—	1	3,52	0,46	1,99	400	1,98	1,95	377	486
	4	N 0/0,2 13,7	Rs 0/3 20,3	K 1/3 16,4	K 3/15 49,6	—	1	3,50	0,55	1,89	374	1,90	1,86	331	438
	5	N 0/0,2 13,0	Rs 0/3 32,8	K 3/15 54,2	—	—	1	3,50	0,55	1,86	368	1,89	1,83	280	372
	6	N 0/0,2 14,2	Rs 0/3 28,5	K 3/15 57,3	—	—	1	4,00	0,60	1,94	346	1,95	1,90	315	387
	7	N 0/0,2 14,2	Rs 0/3 28,5	K 3/15 57,3	—	—	1	3,50	0,50	1,98	396	1,98	1,93	346	442
	8	N 0/0,2 13,1	Rs 0/3 32,8	K 3/15 54,1	—	—	1	3,50	0,50	1,95	390	1,96	1,92	374	438
H	1	Rs 0/3 54,2	H 3/8 30,9	H 8/15 14,9	—	—	1	3,50	0,65	1,93	375	1,92	1,88	322	407
	2	Rs 0/3 54,2	H 3/8 30,9	H 8/15 14,9	—	—	1	3,00	0,65	1,94	417	1,94	1,88	326	404
	3	H 0/3 49,6	H 3/8 33,8	H 8/15 16,6	—	—	1	3,37	1,02	1,72	320	1,71	1,58	204	269

H	4	N 0/0,2 4,3	Rs 0/3 28,6	H 0,2/3 18,5	H 3/8 32,6	H 8/15 16,0	1	3,50	0,83	1,85	347	1,85	1,76	257	334
	5	N 0/0,2 4,3	Rs 0/3 28,6	H 0,2/3 18,5	H 3/8 32,6	H 8/15 16,0	1	3,00	0,74	1,88	397	1,88	1,78	293	356
T	1	N 0/0,2 14,9	Rs 0/3 29,8	T 1/3 16,8	T 3/7 23,6	T 7/15 14,9	1	3,50	0,79	1,90	360	1,88	1,82	236	341
	2	N 0/0,2 14,9	Rs 0/3 29,8	T 1/3 16,8	T 3/7 23,6	T 7/15 14,9	1	3,00	0,72	1,89	400	1,90	1,82	313	420
A	1	N 0/0,2 11,8	Rs 0/3 41,6	A 3/15 46,6	—	—	1	4,00	0,72	1,75	317	1,77	1,68	234	376
	2	N 0/0,2 11,8	Rs 0/3 41,6	A 3/15 46,6	—	—	1	3,50	0,56	1,81	358	1,84	1,78	327	430
	3	N 0/0,2 11,8	Rs 0/3 41,6	A 3/15 46,6	—	—	1	3,00	0,57	1,83	400	1,83	1,79	358	440
LD	1	Rs 0/3 45,8	LD 0/3 21,0	LD 3/10 13,7	LD 10/20 19,5	—	1	1,75	0,57	1,19	359	—	1,14	—	145
LN	1	LN 0/2 46,2	LN 2/3 22,5	LN 3/10 16,2	LN 10/20 15,3	—	1	1,57	0,95	1,27	361	—	1,19	—	88
P	1	N 0/0,2 10	P 0,2/1 15	P 1/3 20	P 3/7 20	P 7/15 35	1	3,31	0,92	1,81	346	—	1,65	—	184
	2	N 0/0,2 5	Rs 0/3 20	P 1/3 20	P 3/7 20	P 7/15 35	1	3,37	0,73	1,87	367	—	1,75	—	277
	3	N 0/0,2 5	Rs 0/3 15	Rs 1/2 20	P 3/7 25	P 7/15 35	1	3,64	0,55	1,96	378	—	1,88	—	394
L	1	L 0/3 25,0	L 3/7 29,0	L 7/15 46,0	—	—	1	3,95	0,65	1,84	329	—	1,73	—	204
	2	Rs 0/3 19,9	L 0/3 12,1	L 3/7 23,3	L 7/15 44,7	—	1	3,50	0,88	2,07	385	—	1,96	—	272
	3	Rs 0/3 32,0	L 3/7 23,0	L 7/15 45,0	—	—	1	3,50	0,62	2,15	420	2,14	2,09	386	518

*) W = Gesamtwasser einschließlich der vom Zuschlag aufgesaugten Feuchtigkeit

**) Mittel aus 3 Einzelwerten

3.3.2 Zuschläge für die Hauptversuche

Nach dem Ergebnis der Vorversuche an 10 cm-Würfeln konnten Betone mit einer Rohdichte um etwa 1,80 kg/dm³ und einer Druckfestigkeit von mindestens 300 kp/cm² (bezogen auf den 20 cm-Würfel) nur mit den Leichtzuschlägen A, T, K und H erwartet werden. Da die Zuschläge A und T für die Hauptversuche in der erforderlichen Menge nicht mehr geliefert werden konnten, wurden in die Hauptversuche nur Betone aus Hüttenbims K und Sinterbims H einbezogen.

4. Ausführliche Untersuchung (Hauptversuche)

4.1 Stoffe

Alle Betone wurden mit Portlandzement 375 (Werk wbn) hergestellt, von dem eine frühere Lieferung bereits für die Vorversuche verwendet worden war. Bei Prüfung nach DIN 1164 fand sich:

Rückstand auf dem Prüfsieb 0,09 DIN 4188	2,6 %
Druckfestigkeit im Alter von 7 Tagen	330 kp/cm ²
Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen	474 kp/cm ²

Folgende Zuschläge wurden verwendet:

Hüttenbims K 3/15 mm
Sinterbims H 0/3 mm, 3/8 mm und 8/15 mm
Normensand N 0/0,2 mm
Rheinsand Rs 0/3 mm

Die Sieblinie des Zuschlaggemisches 0/15 mm verlief im Feinbereich nahe der Sieblinie B₁₅ und im Grobbereich nahe der Sieblinie A₁₅ [44]. Auf Stoffraummengen bezogen, betragen die Anteile

bis	0,2	1	3	7	15 mm
bei Hüttenbims K	13	29	34	62	94 %
bei Sinterbims H	16	32	41	49	83 %

4.2 Herstellung

Die Leichtzuschläge wurden 1 Tag vor der Herstellung angemäßt. Die nach Gewicht abgemessene Mischung wurde etwa 5 Minuten in einem 250 l-Zwangsmischer gemischt. Der Beton fiel beim Auskippen schollig, der Feinmörtel war schmierig und weich. Die Konsistenz der Betone wurde mit dem Verformungsgerät nach Powers [45] und z.T. mit dem Ausbreittisch nach DIN 1048, der Luftporengehalt des Frischbetons nach dem Druck-Ausgleichsverfahren [46] bestimmt. Mit dem Zuschlag K wurden zwei Betone, bezeichnet B 300 K und B 400 K, und mit dem Zuschlag H ein Beton B 300 H hergestellt. Aus jedem Beton wurden gefertigt:

- 15 Würfel mit 10 cm Kantenlänge
 15 Würfel mit 20 cm Kantenlänge
 15 Balken mit 70 cm x 15 cm x 10 cm Kantenlänge
 30 Zylinder mit 15 cm Durchmesser und 30 cm Höhe
 8 Zylinder mit 15 cm Durchmesser und 60 cm Höhe

Dazu waren für jeden Beton 4 Mischungen zu je etwa 160 l erforderlich. Die Mischungen wurden so auf die einzelnen Prüfkörper verteilt, daß sie an allen Probekörperarten und den verschiedenen Prüfterminen beteiligt waren. Die mit Aufsatztassen gefüllten Formen (Überstand mind. 10 cm) wurden mit Innenrüttler (\varnothing 32 mm, 8500 Umdrehungen/min) nach den Angaben in Tafel 5 verdichtet.

Tafel 5 Eintauchstellen des Innenrüttlers und gesamte Rüttelzeit

Würfel		Zylinder		Balken
10 cm	20 cm	15/30 cm	15/60 cm	70/15/10 cm
				
rd. 45 sec	rd. 150 sec	rd. 70 sec	rd. 120 sec	rd. 240 sec

Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften sind in Tafel 6 wiedergegeben. Der Zementgehalt der Betone B 300 H und K lag bei rd. 345 kg/m³ und der des Betons B 400 K bei rd. 390 kg/m³. Der Gesamtwassergehalt des Betons aus dem Leichtzuschlag H war wesentlich größer (290 l/m³) als bei den Betonen mit Zuschlag K (rd. 200 l/m³), obwohl der Beton B 300 H wesentlich steifer angemacht war als die Betone mit dem Zuschlag K (siehe Hubzahl). Dieser sehr hohe Gesamtwassergehalt war durch die große Wasseraufnahme des Leichtzuschlags H bedingt. Der in Tafel 6 aufgeführte Luftgehalt des Frischbetons schließt neben den natürlichen Luftporen des Feinmörtels vermutlich auch einen Teil der Kornporen des Zuschlags ein. Er ist daher mit dem Porengehalt von Beton aus üblichen dichten Zuschlägen nicht zu vergleichen.

Nach dem Entformen im Alter von rd. 1 Tag wurden an den Zylindern 15/60 cm die für die Schwind-, Kriech- und E-Modul-Messungen vorgesehenen Meßplättchen angebracht. Bei allen Zylindern wurde die obere Stirnfläche mit Zementmörtel 1:1 eben abgeglichen. Mit Ausnahme einiger Balken, die nach dem Entformen zum Vergleich bis zur Prüfung unter Wasser bei rd. 20 °C aufbewahrt wurden, lagerten alle Probekörper bei 20 °C, die ersten 7 Tage unter nassen Tüchern, anschließend an der Luft mit 65 % relativer Feuchte.

Tafel 6 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften der Hauptversuche (Mittelwerte aus 4 Mischungen)

Beton	Anteil der Korngruppen im Zuschlaggemisch					Mischungsverhältnis			Frischbetoneigenschaften							
	Z	G	W/Z*)	Ausbreitmaß	Hubzahl (Powers)	LP-Gehalt	Rohdichte ϱ_0	Zementgehalt	Zuschlag-Gehalt	Sand	Leichtzuschlag	Wasser gehalt				
	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-%	Gew.-T	Gew.-T	Gew.-T	cm	—	%	kg/dm ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	
B 300 K	N 0/0,2 14,2	Rs 0/3 28,5	K 3/15 57,3	—	—	1	4,0	0,60	—	12	6,0	1,95	348	595	799	209
B 400 K	N 0/0,2 14,2	Rs 0/3 28,5	K 3/15 57,3	—	—	1	3,5	0,50	38,5	14	5,0	1,96	392	587	787	196
B 300 H	N 0/0,2 4,3	Rs 0/3 28,6	H 0/3 18,5	H 3/8 32,6	H 8/15 16,0	1	3,5	0,85	—	23	5,0	1,83	342	394	802	290

*) W = Gesamtwasser einschließlich der vom Zuschlag aufgesaugten Feuchtigkeit

4.3 Festigkeiten

Die *Druckfestigkeit* wurde an Würfeln mit 10 cm und 20 cm Kantenlänge und an Zylindern mit 15 cm Durchmesser und 30 cm Höhe im Alter von 14, 28, 56, 90 und 360 Tagen ermittelt.

Die *Biegezugfestigkeit* wurde an feucht- und luftgelagerten Balken 70 cm x 15 cm x 10 cm im Alter von 14, 28, 56, 90 und 360 Tagen geprüft. Dabei wurden die Balken mit einer Einzellast in der Mitte der Stützweite von 40 cm nach Bild 10 belastet.

Die *Spaltzugfestigkeit* wurde an Zylindern 15/30 cm im Alter von 14, 28, 56, 90 und 360 Tagen nach Bild 11 bestimmt. Dabei wurde die Belastung über rd. 10 mm breite und 3 mm dicke Lastverteilungsleisten aus Messing eingeleitet. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug etwa 0,5 kp/cm² je sec.

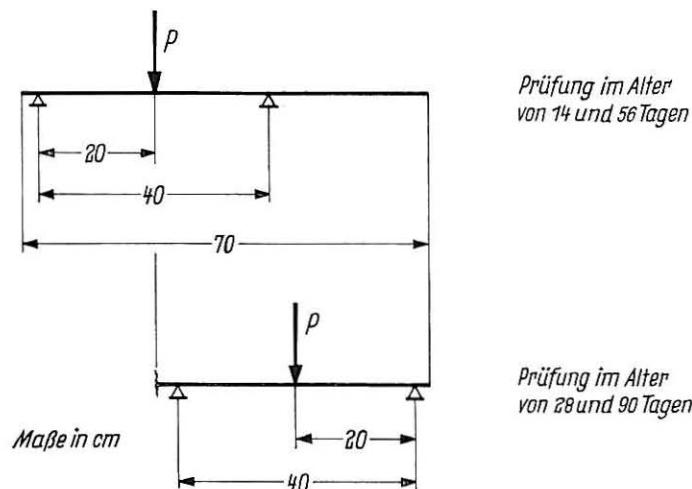


Bild 10 Versuchsanordnung bei Prüfung der Biegezugfestigkeit

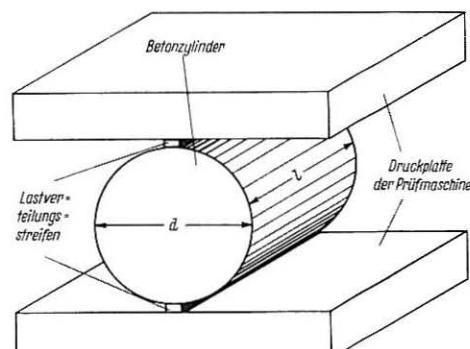


Bild 11
Versuchsanordnung bei
Prüfung
der Spaltzugfestigkeit

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

Tafel 7 Rohdichten des erhärteten Betons (Mittelwerte aus 3 Proben)

Beton	Prüfalter Tage	Rohdichte in kg/dm ³					feucht*) Balken 70 / 15 / 10 cm
		7 Tage unter feuchten Tüchern, dann in Luft von 65 % rel. Feuchte	Würfel 10 cm	Würfel 20 cm	Zylinder 15/30 cm	Zylinder 15/60 cm	
B 300 K	14	1,95	1,94	1,93	1,95	1,93	1,96
	28	1,94	1,94	1,93	1,94	—	—
	56	1,93	1,94	1,92	1,93	1,91	1,96
	90	1,93	1,93	1,92	1,92	—	—
	360	1,89	1,92	1,88	1,91	1,87	—
B 400 K	14	1,93	1,95	1,95	1,98	1,96	1,97
	28	1,94	1,95	1,94	1,97	—	—
	56	1,94	1,94	1,94	1,96	1,95	1,98
	90	1,93	1,94	1,94	1,96	—	—
	360	1,92	1,93	1,94	1,94	1,93	—
B 300 H	14	1,79	1,81	1,78	1,79	1,81	1,84
	28	1,77	1,78	1,78	1,78	—	—
	56	1,74	1,77	1,74	1,75	1,75	1,85
	90	1,72	1,76	1,73	1,74	—	—
	360	1,69	1,72	1,73	1,72	1,72	—

*) Lagerung dauernd unter Wasser

Die Rohdichten sind in Tafel 7, die Festigkeiten in Tafel 8 und die Festigkeitsverhältniswerte in Tafel 9 zusammengestellt (Mittelwert aus je 3 Proben).

4.4 Druck-Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul wurde an zwei Zylindern 15/60 cm je Betonart bei mehreren Last- und verschiedenen Altersstufen zwischen dem Betonalter von 14 Tagen und rd. 2 Jahren festgestellt. Bei jeder Laststufe wurde so oft beladen und entlastet, bis die bleibende Zusammendrückung nicht mehr zunahm. Die Längenänderungen wurden an zwei diametral gegenüberliegenden, 40 cm langen Meßstrecken auf 1/1000 mm mit Setzdehnungsmessern¹⁾ und zusätzlich an vier um 90° versetzten, in der Mitte der Zylinderhöhe liegenden Meßstellen mit 60 mm langen Dehnungsmeßstreifen gemessen. Die Versuchsanordnung ist in Bild 12 dargestellt. Die Zylinder lagerten zwischen den Prüfterminen auf Lattenrostern bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte. Der Elastizitätsmodul wurde errechnet nach der Gleichung

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{elastisch}}}$$

¹⁾ Bauart MPA München

Tafel 8 Festigkeiten (Mittelwerte aus 3 Proben), Lagerung wie in Tafel 7 angegeben

Beton	Prüfalter Tage	Druckfestigkeit in kp/cm ²			Biegezugfestigkeit in kp/cm ²		Spaltzug- festigkeit in kp/cm ² Z_s (Zylinder 15/30 cm)
		D ₁₀ (Würfel 10 cm)	D ₂₀ (Würfel 20 cm)	D _{15/30} (Zylinder 15/30 cm)	B _t (Balken 70 / 15 / 10 cm trocken)	B _f (Balken 70 / 15 / 10 cm feucht)	
B 300 K	14	378	328	246	36	53	18
	28	401	353	285	36	55	19
	56	421	366	300	44	55	20
	90	425	392	325	50	59	24
	360	453	410	330	57	—	29
B 400 K	14	431	375	323	36	65	19
	28	470	418	352	51	64	20
	56	499	438	371	44	64	20
	90	505	442	397	51	66	25
	360	499	476	425	60	—	28
B 300 H	14	315	278	266	46	53	18
	28	360	317	278	34	58	19
	56	377	349	318	30	61	16
	90	411	354	339	25	61	19
	360	400	403	391	43	—	29

Tafel 9 Verhältniswerte der Festigkeiten

Druckfestigkeit am 10 cm-Würfel: D₁₀, am 20 cm-Würfel: D₂₀, am Zylinder: D_{15/30}

Biegezugfestigkeit am trockenen Balken: B_t, am feuchten Balken: B_f

Spaltzugfestigkeit: Z_s

Beton	Prüfalter Tage	D ₁₀ D ₂₀	D _{15/30} D ₂₀	D ₂₀ B _f	D ₂₀ Z _s	B _f Z _s	B _f B _t
B 300 K	14	1,15	0,75	6,2	18,2	2,94	1,47
	28	1,14	0,81	6,4	18,6	2,89	1,53
	56	1,15	0,82	6,6	18,3	2,75	1,25
	90	1,08	0,83	6,6	16,3	2,46	1,18
	360	1,10	0,80	—	14,1	—	—
B 400 K	14	1,15	0,86	5,8	19,7	3,42	1,81
	28	1,12	0,84	6,5	20,9	3,20	1,25
	56	1,14	0,85	6,8	21,9	3,20	1,45
	90	1,14	0,90	6,7	17,7	2,64	1,29
	360	1,05	0,89	—	17,0	—	—
B 300 H	14	1,13	0,96	5,2	15,4	2,94	1,15
	28	1,14	0,88	5,5	16,7	3,05	1,71
	56	1,08	0,91	5,7	21,8	3,81	2,03
	90	1,16	0,96	5,8	18,6	3,21	2,44
	360	0,99	0,97	—	13,9	—	—

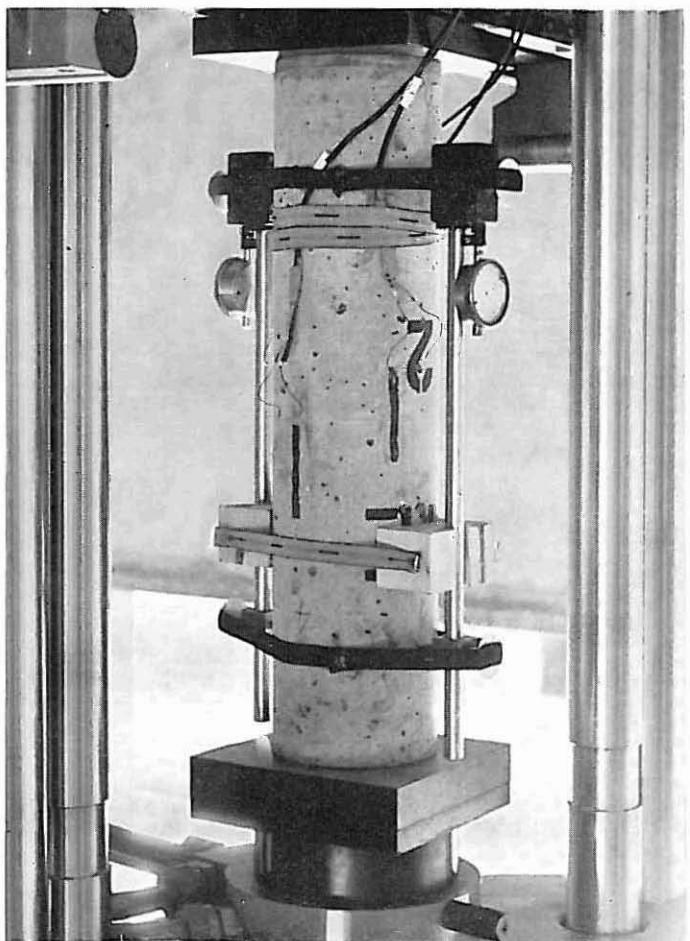
Die Verkürzung wurde an zwei diametral gegenüberliegenden, 40 cm langen Meßstrecken von zwei Zylindern 15/60 cm je Beton-

4.5 Schwinder

gering waren.
Laststufengruppen erschien möglich, weil die Abweichungen sehr stufengruppen in Tafel 10 aufgeführt. Die Zusammenfassung in Die Mittelwerte der E-Moduli sind für zusammengefaßte Last-

untersuchungen bei den Zylindern 15/60 cm ermittelten, die bis dahin in gleicher Weise wurde der E-Modul mit Setzdehnungsmessern an 2,5 Jahre alten Zylindern 15/60 cm ermittelt, die bis dahin unter Dauerlast standen (Abschnitt 4.6).

Bild 12 Versuchsanordnung bei der Messung des E-Moduls an Zylindern 15/60 cm



Tafel 10 E-Modul an Zylindern 15/60 cm unter Druckbelastung
(Mittelwerte aus Messungen an 2 Zylindern bei mehreren Belastungsstufen)

Belon	Bereich der Prüfspannung kp/cm ²	E-Modul in 10 ³ kp/cm ² im Alter von Tagen					nach Dauerbelastung von rd. 2½ Jahren Dauerlast aufgebracht im Alter von Tagen	
							14	28
		14	28	180	360	720	14	28
B 300 K	20 bis 60	253	258	238	202	194	256	201
	80 bis 120	—	255	234	201	191	—	206
	140 bis 240	—	—	230	208	200	—	—
B 400 K	20 bis 60	303	281	307	282	277	270	251
	80 bis 120	282	284	289	270	261	266	251
	140 bis 200	—	282	282	264	258	—	—
	220 bis 280	—	—	272	264	260	—	—
B 300 H	20 bis 60	180	186	195	196	189	175	164
	80 bis 120	—	183	193	191	188	—	—
	140 bis 200	—	—	189	190	188	—	—

art mit Setzdehnungsmessern (vgl. Abschnitt 4.4) bestimmt. Die Nullmessung wurde am Ende der Feuchtlagerung im Alter von 7 Tagen vorgenommen. Weitere Messungen folgten während der anschließenden Lagerung im Klimaraum (20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte) im Alter von 8 und 10 Tagen und stets parallel zu den Kriechmessungen (Abschnitt 4.6).

Der zeitliche Verlauf des Schwindens ist in Bild 13 aufgetragen.

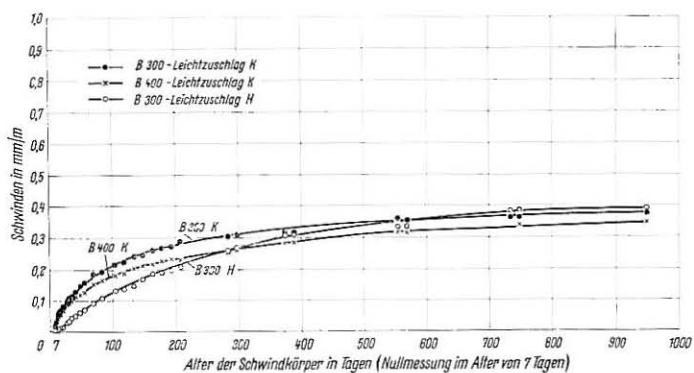


Bild 13 Schwinden unbelasterter Zylinder 15/60 cm, Nullmessung nach 7tägiger Feuchtlagerung

4.6 Verkürzung infolge Dauerbelastung

Im Alter von 14 und 28 Tagen wurden zwei Zylinder 15/60 cm je Betonart in den Dauerdruck-Ständen belastet. Die Dauerdruckspannung betrug bei den im Alter von 14 Tagen belasteten Zylindern

$\sigma_D = 80 \text{ kp/cm}^2$ für die Betone B 300 K (24 %) und B 300 H (29 %)

$\sigma_D = 110 \text{ kp/cm}^2$ für den Beton B 400 K (29 %)

bei den im Alter von 28 Tagen belasteten Zylindern

$\sigma_D = 117 \text{ kp/cm}^2$ für den Beton B 300 K (33 %)

$\sigma_D = 105 \text{ kp/cm}^2$ für den Beton B 300 H (33 %)

$\sigma_D = 140 \text{ kp/cm}^2$ für den Beton B 400 K (33 %)

In Klammern ist das Verhältnis der aufgebrachten Druckspannung zur Würfeldruckfestigkeit (20 cm-Würfel) nach 14 bzw. 28 Tagen angegeben.

Die Versuchsanlage (Bauart MPA München [49])²⁾ mit den 16 Druckständen ist in Bild 14 dargestellt. Auf die Bodenplatte jedes Stan-

²⁾ Siehe auch [47, 48]

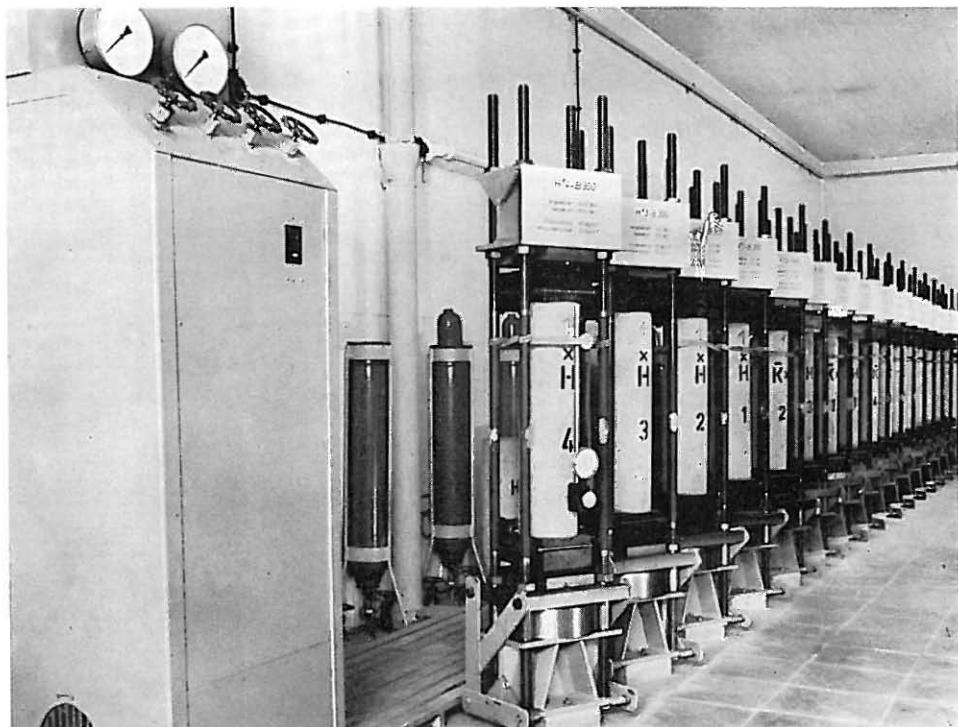


Bild 14 Prüfstände mit Betonzyllindern 15/60 cm unter Dauerbelastung

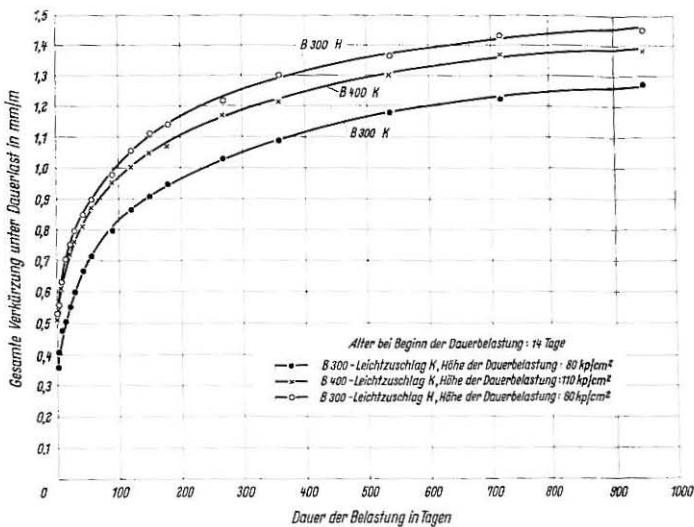


Bild 15 Gesamle Verkürzung (Schwinden und Zusammendrückung unter Last); Beginn der Belastung im Alter von 14 Tagen

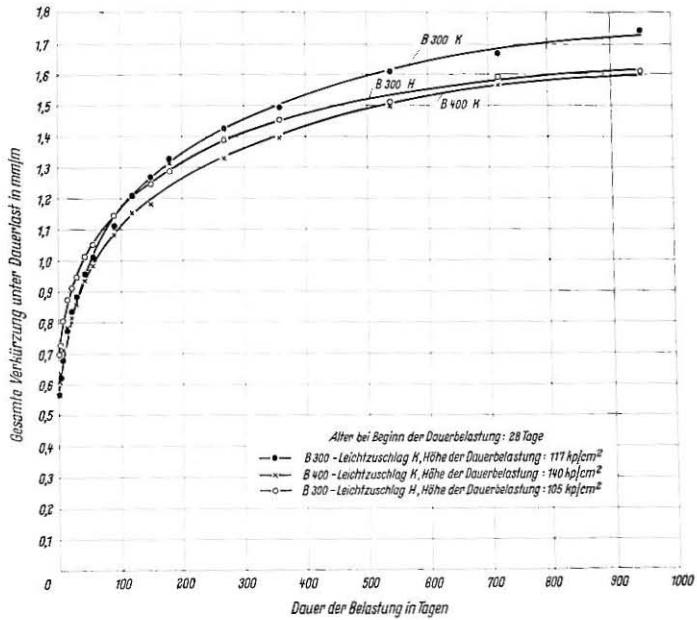


Bild 16 Gesamle Verkürzung (Schwinden und Zusammendrückung unter Last); Beginn der Belastung im Alter von 28 Tagen

des wirkt über eine Gummiblase der von einer Druckluftflasche aufrechterhaltene hydraulische Druck. Zum Aufbringen und zum Korrigieren des Druckes dient eine für alle Versuchsstände gemeinsame Druck- und Regelanlage (vorn links).

Die Verkürzung unter Dauerlast wurde bis zur Belastungsdauer von rd. 2,5 Jahren mit Setzdehnungsmessern (siehe Abschnitt 4.4)

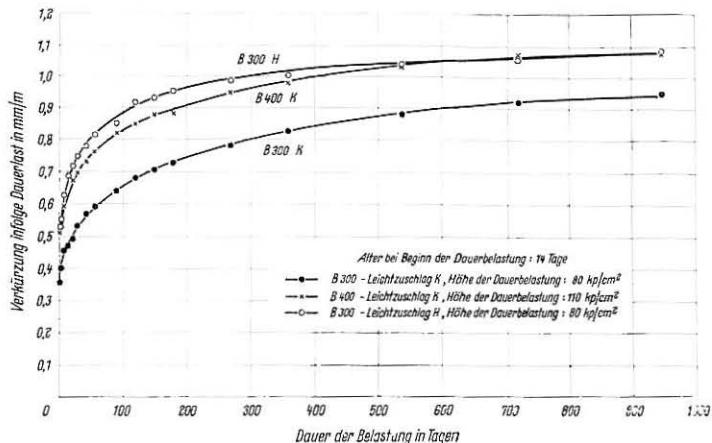


Bild 17 Verkürzung infolge Belastung (gesamte Verkürzung abzüglich Schwinden); Beginn der Belastung im Alter von 14 Tagen

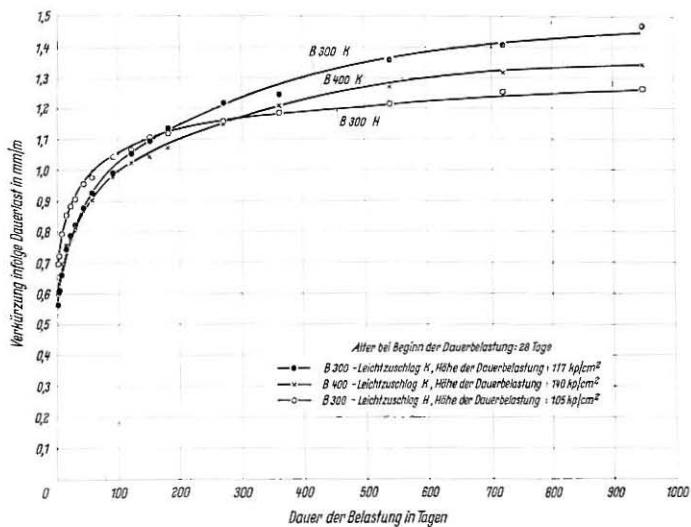


Bild 18 Verkürzung infolge Belastung (gesamte Verkürzung abzüglich Schwinden); Beginn der Belastung im Alter von 28 Tagen

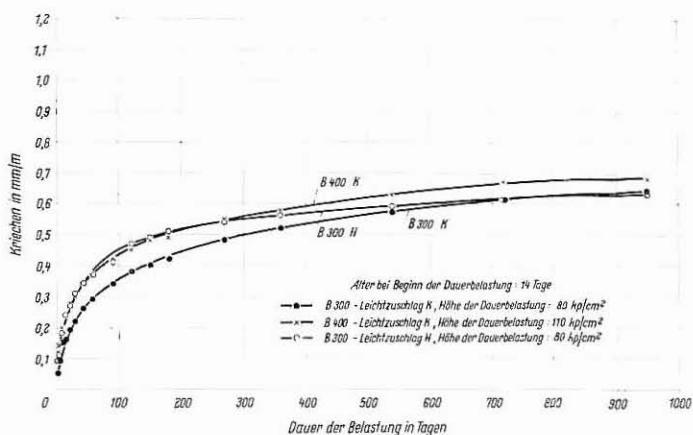


Bild 19 Bleibende Stauchung (Kriechen); Beginn der Belastung im Alter von 14 Tagen

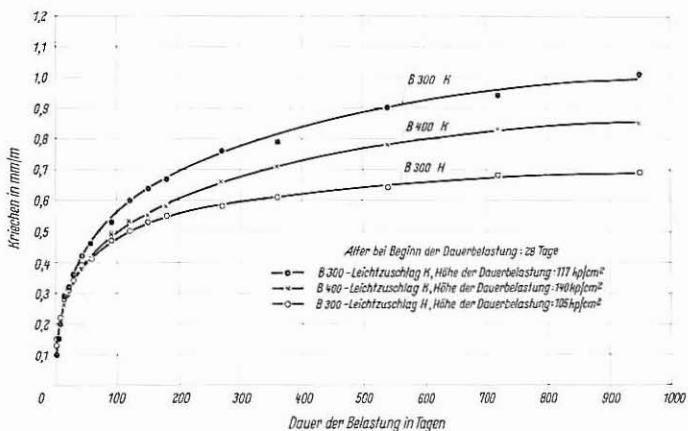


Bild 20 Bleibende Stauchung (Kriechen); Beginn der Belastung im Alter von 28 Tagen

gemessen. Die Gesamtverkürzung (einschließlich des Schwindens) ist in den Bildern 15 und 16, die Verkürzung infolge Belastung (Gesamtverkürzung abzüglich des Schwindens) in den Bildern 17 und 18 aufgetragen. Die Bilder 19 und 20 geben die bleibende Stauchung (Kriechen) wieder.

Die elastische Zusammendrückung wurde an Zylindern 15/60 cm, die nicht dauernd unter Last standen, bestimmt und bei Errechnung des Kriechens für den jeweiligen Beton als konstant angenommen (siehe Abschnitt 4.4 und Tafel 11, Spalte n).

Tafel 11 Kriechmaße und Kriechzahlen mit Vergleichswerten anderer Untersuchungen

a	b	c	d	e	f	g	h	i	k	l	m
		Versuche	Zementgehalt	Wasser-zementwert	Druckfestigkeit zu Beginn der Belastung			Druckspannung	Alter bei Belastungsbeginn	Schwinden während rd. 2½ J.	Verformungen nach rd. 2½ J. unter Dauerbeanspruchung
			Z	W/Z*)	D ₂₀	D _{15/30}	σ _K		ε _s	ε _{Ges}	ε = ε _{Ges} - ε _s
			kg/m ³	—	kp/cm ²	kp/cm ²	kp/cm ²	Tage	mm/m	mm/m	mm/m
1	Hummel [48]	B 300 (Kiessand)	334	0,55	323	286	110	28	0,32	1,96	1,64
2		B 450 (Kiessand)	334	0,55	504	435	170	28	0,37	2,24	1,87
3	Shideler [52]	B 270 (Kiessand)	216	0,62	290	242	42	28	—	—	—
4		B 270 (Blähton)	247	1,19	284	237	42	28	—	—	—
5		B 270 (Hüttenbims)	371	0,71	247	206	42	28	—	—	—
6		B 400 (Kiessand)	269	0,49	403	336	42	28	—	—	—
7		B 400 (Blähton)	335	0,86	418	350	42	28	—	—	—
8		B 400 (Hüttenbims)	466	0,54	358	300	42	28	—	—	—
9	For-schungs-institut der Zement-industrie	B 300 K (Hüttenbims)	348	0,60	328	246	80	14	0,32	1,28	0,96
10					353	285	117	28	0,28	1,75	1,47
11		B 400 K (Hüttenbims)	392	0,50	375	323	110	14	0,30	1,38	1,08
12					418	352	140	28	0,26	1,60	1,34
13		B 300 H (Flugaschen-sinterbims)	342	0,85	278	266	80	14	0,37	1,45	1,08
14					317	278	105	28	0,35	1,61	1,26

*) W = Gesamtwasser einschließlich der vom Zuschlag aufgesaugten Feuchtigkeit

n	o	p	q	r	s	t	u	v
Verformungen nach rd. 2 ^{1/2} J. unter Dauer- beanspruchung	Kriechmaß	End- kriechen	End- kriechmaß	Kriechzahl n. 2 ^{1/2} J.	Endkriechzahl φ_∞	Versuche	nach DIN 4227 a + k	End- schwindmaß
ε_{el}	Kriechen $\varepsilon_{\text{bl}} = \varepsilon - \varepsilon_{\text{el}}$	$-\varepsilon_{\text{bl}}$	$\varepsilon_{\text{bl},\infty}$	$-\varepsilon_{\text{bl},\infty}$	$\varphi = \varepsilon_{\text{bl}}/\varepsilon_{\text{el}}$	$\frac{\varepsilon_{\text{bl},\infty}}{\varepsilon_{\text{el}}}$	von (a=2,50)	bis (a=4,00)
mm/m	mm/m	$10^{-3} \frac{\text{mm/m}}{\text{kp/cm}^2}$	mm/m	$10^{-3} \frac{\text{mm/m}}{\text{kp/cm}^2}$	—	—	—	mm/m mm/m
0,41	1,23	11,18	1,36	12,38	3,00	3,32	3,13	5,00 0,35 —
0,54	1,33	7,82	1,45	8,53	2,46	2,69	1,90	3,08 0,39 —
0,17	0,58	13,81	0,59	14,05	3,41	3,47	1,82	2,92 — —
0,38	0,72	17,15	0,77	18,35	1,89	2,02	1,82	2,92 — —
0,27	0,83	19,75	0,90	21,40	3,07	3,33	1,82	2,92 — —
0,16	0,43	10,25	0,45	10,71	2,69	2,81	1,82	2,92 — —
0,33	0,58	13,81	0,65	15,48	1,76	1,97	1,88	3,00 — —
0,24	0,64	15,25	0,71	16,90	2,67	2,96	1,82	2,92 — —
0,31	0,65	8,13	0,68	8,50	2,10	2,20	—	0,33 0,39
0,46	1,01	8,64	1,03	8,81	2,20	2,24	1,88	3,00 0,29
0,40	0,68	6,18	0,69	6,27	1,70	1,72	—	0,31 0,36
0,49	0,85	6,06	0,86	6,14	1,73	1,76	1,82	2,92 0,27
0,45	0,63	7,88	0,64	8,00	1,40	1,42	—	0,41 0,42
0,57	0,69	6,56	0,70	6,67	1,21	1,23	2,25	3,60 0,39

5. Erörterung der Feststellungen

5.1 Betonfestigkeiten (Tafel 8)

Nach Tafel 7 weichen die Rohdichten der verschiedenen Probekörperarten eines Betons nicht wesentlich voneinander ab, so daß ihre Festigkeiten miteinander verglichen werden können.

5.1.1 Druckfestigkeit

Auf den 28 Tage alten Würfel von 20 cm Kantenlänge bezogen, erreichte der Leichtbeton B 300 K eine Druckfestigkeit von 353 kp/cm², der B 400 K eine Druckfestigkeit von 418 kp/cm² und der B 300 H eine Druckfestigkeit von 317 kp/cm². Die Rohdichte des Betons aus Sinterbims H lag bei 1,78 kg/dm³, die der Betone aus Hüttenbims K bei rd. 1,95 kg/dm³. Den eingangs gestellten Anforderungen (Rohdichte möglichst unter 1,80 kg/dm³ und Druckfestigkeit mindestens 300 kp/cm²) genügte demnach nur der Beton aus Sinterbims H.

Die Nacherhärtung bis zum 360. Tag betrug bei den beiden Betonen aus Hüttenbims K rd. 15 % und beim B 300 H rd. 27 %. Im Alter von 28 Tagen wiesen die 10 cm-Würfel eine im Mittel 13 % größere

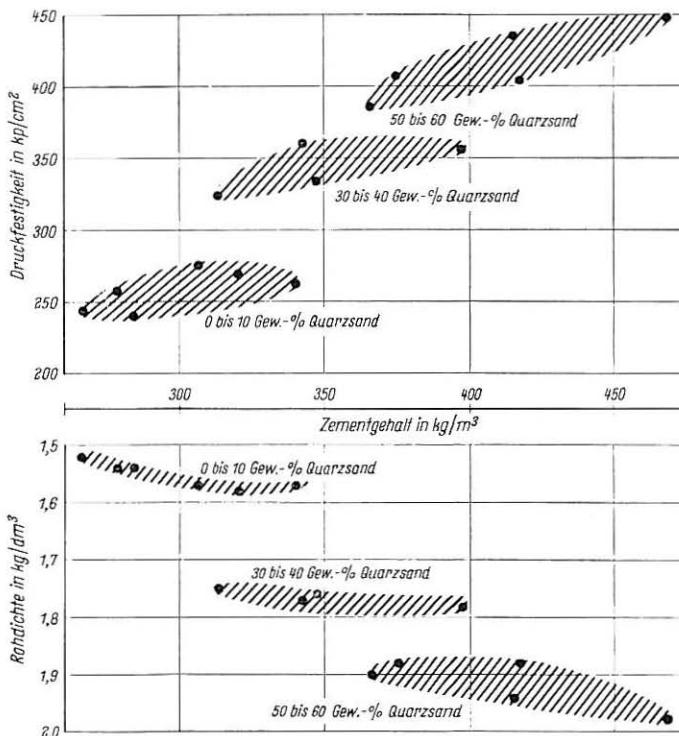


Bild 21 Druckfestigkeit und Rohdichte des Betons mit Sinterbims H nach 28 Tagen in Abhängigkeit von Kennwerten seiner Zusammensetzung

und die Zylinder 15/30 cm eine im Mittel 16 % kleinere Druckfestigkeit als 20 cm-Würfel auf. Diese Festigkeitsunterschiede wurden im allgemeinen mit zunehmendem Alter (d. h. mit höherer Festigkeit) kleiner.

In Bild 21 sind aus den Vor- und Hauptversuchen Druckfestigkeit (10 cm-Würfel), Rohdichte, Zementgehalt und Sandanteil (Rheinsand und Normensand, also überwiegend Quarzsand) für Beton mit dem als günstig befundenen Sinterbims H aufgetragen. Die wenigen Ergebnisse lassen die Tendenz erkennen, daß im untersuchten Bereich Druckfestigkeit und Rohdichte bevorzugt mit wachsendem Quarzsandanteil zunehmen und daß mit dem Sinterbims H bei einer Betonrohdichte unter 1,80 kg/dm³ mit der für eine Baustelle erforderlichen Sicherheit ein Beton der Güte B 300 hergestellt werden kann.

5.1.2 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit der 28 Tage alten, feuchtgelagerten Balken lag für die Betone B 300 bei rd. 56 kp/cm², für den B 400 bei 64 kp/cm². Sie nahm bis zum 90. Tag nur noch wenig zu. Im Alter von 28 Tagen betrug der Verhältniswert Druckfestigkeit (20 cm-Würfel) zu Biegezugfestigkeit (feuchtgelagerte Balken) bei den Betonen aus Hüttenbims K rd. 6,5 und beim Leichtbeton B 300 H 5,5; er wurde mit zunehmendem Alter etwas größer. Der Verhältniswert war bei den Betonen B 400 K und B 300 H deutlich kleiner als bei vergleichbaren Kiessandbetonen; beim B 300 H war er etwa so groß wie bei Splittbeton gleicher Druckfestigkeit [50].

Während des Austrocknens nahm die Biegezugfestigkeit der 7 Tage feucht- und anschließend luftgelagerten Balken vorübergehend ab, wie es auch bei Schwerbeton der Fall ist. Die niedrigste Biegezugfestigkeit infolge sich überlagernder Schwindspannungen betrug beim B 300 K 65 %, beim B 400 K 55 % und beim B 300 H 41 % der Ergebnisse der stets feuchtgelagerten Balken. Sie trat bei den Betonen aus Hüttenbims K im Betonalter zwischen 14 und 28 Tagen und beim B 300 H vermutlich wegen des starken Saugvermögens des Sinterbimses H erst nach etwa 90 Tagen auf. Die Beeinflussung der Biegezugfestigkeit durch die Luftlagerung war beim Beton mit Sinterbims H besonders ausgeprägt.

5.1.3 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit war mit rd. 20 kp/cm² bei allen Betonen bis zum Betonalter von 90 Tagen kleiner als bei Kiessandbeton gleicher Druckfestigkeit (etwa 25 bis 30 kp/cm² [51]).

Die Ergebnisse erlauben den Schluß, daß die Luftlagerung der Prüfkörper die Spaltzugfestigkeit des hochfesten Leichtbetons vorübergehend mehr vermindert als die des vergleichbaren Kiessandbetons [51].

5.2 Schwinden (Bild 13)

Das aus den Messungen bis zum Alter von rd. 2,5 Jahren ermittelte Schwinden (Bild 13) lag bei etwa 0,37 mm/m und war damit etwa

gleich dem Schwinden vergleichbarer Schwerbetone. Die aus den Schwindkurven abgeschätzten Endschwindmaße (vgl. Tafel 11, Spalte v) sind nur wenig größer als das in Tafel V, Zeile 4, der DIN 4227 mit 0,30 mm/m für den Beton im Bauwerk angegebene Endschwindmaß.

Das Schwinden kann bei saugenden Zuschlägen verzögert werden. Aus diesem Grunde ist auch das Schwinden des B 300 H mit dem stärker saugenden Sinterbims H anfänglich deutlich kleiner als das der Betone mit dem Hüttenbims K.

5.3 Elastizitätsmodul (Tafel 10)

Der Druck-Elastizitätsmodul betrug im Betonalter von 28 Tagen beim Beton B 300 K rd. 255 000 kp/cm², beim B 400 K rd. 280 000 kp/cm² und beim B 300 H rd. 185 000 kp/cm². Unter gleicher Druckbeanspruchung (etwa $\frac{1}{3} D_{28}$) waren die elastischen Zusammendrückungen größer, und daher war der Elastizitätsmodul kleiner als bei üblichem Kiessandbeton gleicher Druckfestigkeit (vgl. Tafel 11, Spalte n). Dies gilt besonders für den B 300 H und dürfte in erster Linie auf die leichtere Zusammendrückbarkeit der Leichtbetonzuschläge zurückzuführen sein.

Beim B 300 K nahm der E-Modul aus nicht ohne weiteres ersichtlichen Gründen mit dem Alter ab. Eine Abnahme des E-Moduls mit wachsender Spannung ergab sich, vermutlich wegen der oftmaligen Belastung, im allgemeinen nicht.

5.4 Kriechen (Bilder 19 und 20, Tafel 11)

Das Kriechen (bleibende Stauchung) war bei den im Alter von 28 Tagen mit rd. 33 % der Würfeldruckfestigkeit belasteten Zylindern deutlich größer als bei den im Alter von 14 Tagen mit nur 25 bis 30 % der zugehörigen Würfeldruckfestigkeit belasteten Probekörpern. Dies dürfte vorwiegend darauf zurückzuführen sein, daß die auf die entsprechende Druckfestigkeit bezogene Belastung der nach 14 Tagen belasteten Zylinder im Alter von 28 Tagen wesentlich geringer war als bei den nach 28 Tagen belasteten Zylindern. Die frühe Dauerbelastung und die Nacherhärtung zwischen dem 14. und 28. Tag können als Grund für eine noch nennenswerte Festigkeitssteigerung angesehen werden. Das Kriechen war bei allen drei Leichtbetonen etwas geringer als bei vergleichbarem Kiessandbeton [48, 49, 53].

In Tafel 11 sind die wesentlichen Kenngrößen der Verformung sowie die daraus ermittelten Kriechzahlen und Kriechmaße zusammengestellt. Zum Vergleich wurden auch Ergebnisse von A. Hummel [48] und J. J. Shideler [52] aufgenommen. Die Ergebnisse der im Alter von 28 Tagen belasteten Leichtbetone (Zeilen 10, 12, 14) können mit den Ergebnissen der Kiessandbetone nach [48] (Zeilen 1 und 2) verglichen werden, da Betongüten, Zementleimmengen sowie Beginn, Dauer und Höhe der Belastung etwa gleich waren. Lediglich beim Beton nach Zeile 12 war der Zementgehalt nennenswert größer.

und die Zylinder 15/30 cm eine im Mittel 16 % kleinere Druckfestigkeit als 20 cm-Würfel auf. Diese Festigkeitsunterschiede wurden im allgemeinen mit zunehmendem Alter (d. h. mit höherer Festigkeit) kleiner.

In Bild 21 sind aus den Vor- und Hauptversuchen Druckfestigkeit (10 cm-Würfel), Rohdichte, Zementgehalt und Sandanteil (Rheinsand und Normensand, also überwiegend Quarzsand) für Beton mit dem als günstig befundenen Sinterbims H aufgetragen. Die wenigen Ergebnisse lassen die Tendenz erkennen, daß im untersuchten Bereich Druckfestigkeit und Rohdichte bevorzugt mit wachsendem Quarzsandanteil zunehmen und daß mit dem Sinterbims H bei einer Betonrohdichte unter 1,80 kg/dm³ mit der für eine Baustelle erforderlichen Sicherheit ein Beton der Güte B 300 hergestellt werden kann.

5.1.2 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit der 28 Tage alten, feuchtgelagerten Balken lag für die Betone B 300 bei rd. 56 kp/cm², für den B 400 bei 64 kp/cm². Sie nahm bis zum 90. Tag nur noch wenig zu. Im Alter von 28 Tagen betrug der Verhältniswert Druckfestigkeit (20 cm-Würfel) zu Biegezugfestigkeit (feuchtgelagerte Balken) bei den Betonen aus Hüttenbims K rd. 6,5 und beim Leichtbeton B 300 H 5,5; er wurde mit zunehmendem Alter etwas größer. Der Verhältniswert war bei den Betonen B 400 K und B 300 H deutlich kleiner als bei vergleichbaren Kiessandbetonen; beim B 300 H war er etwa so groß wie bei Splittbeton gleicher Druckfestigkeit [50].

Während des Austrocknens nahm die Biegezugfestigkeit der 7 Tage feucht- und anschließend luftgelagerten Balken vorübergehend ab, wie es auch bei Schwerbeton der Fall ist. Die niedrigste Biegezugfestigkeit infolge sich überlagernder Schwindspannungen betrug beim B 300 K 65 %, beim B 400 K 55 % und beim B 300 H 41 % der Ergebnisse der stets feuchtgelagerten Balken. Sie trat bei den Betonen aus Hüttenbims K im Betonalter zwischen 14 und 28 Tagen und beim B 300 H vermutlich wegen des starken Saugvermögens des Sinterbimses H erst nach etwa 90 Tagen auf. Die Beeinflussung der Biegezugfestigkeit durch die Luftlagerung war beim Beton mit Sinterbims H besonders ausgeprägt.

5.1.3 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit war mit rd. 20 kp/cm² bei allen Betonen bis zum Betonalter von 90 Tagen kleiner als bei Kiessandbeton gleicher Druckfestigkeit (etwa 25 bis 30 kp/cm² [51]).

Die Ergebnisse erlauben den Schluß, daß die Luftlagerung der Prüfkörper die Spaltzugfestigkeit des hochfesten Leichtbetons vorübergehend mehr vermindert als die des vergleichbaren Kiessandbetons [51].

5.2 Schwinden (Bild 13)

Das aus den Messungen bis zum Alter von rd. 2,5 Jahren ermittelte Schwinden (Bild 13) lag bei etwa 0,37 mm/m und war damit etwa

gleich dem Schwinden vergleichbarer Schwerbetone. Die aus den Schwindkurven abgeschätzten Endschwindmaße (vgl. Tafel 11, Spalte v) sind nur wenig größer als das in Tafel V, Zeile 4, der DIN 4227 mit 0,30 mm/m für den Beton im Bauwerk angegebene Endschwindmaß.

Das Schwinden kann bei saugenden Zuschlägen verzögert werden. Aus diesem Grunde ist auch das Schwinden des B 300 H mit dem stärker saugenden Sinterbims H anfänglich deutlich kleiner als das der Betone mit dem Hüttensand K.

5.3 Elastizitätsmodul (Tafel 10)

Der Druck-Elastizitätsmodul betrug im Betonalter von 28 Tagen beim Beton B 300 K rd. 255 000 kp/cm², beim B 400 K rd. 280 000 kp/cm² und beim B 300 H rd. 185 000 kp/cm². Unter gleicher Druckbeanspruchung (etwa $\frac{1}{3} D_{28}$) waren die elastischen Zusammendrückungen größer, und daher war der Elastizitätsmodul kleiner als bei üblichem Kiessandbeton gleicher Druckfestigkeit (vgl. Tafel 11, Spalte n). Dies gilt besonders für den B 300 H und dürfte in erster Linie auf die leichtere Zusammendrückbarkeit der Leichtbetonzuschläge zurückzuführen sein.

Beim B 300 K nahm der E-Modul aus nicht ohne weiteres ersichtlichen Gründen mit dem Alter ab. Eine Abnahme des E-Moduls mit wachsender Spannung ergab sich, vermutlich wegen der oftmaligen Belastung, im allgemeinen nicht.

5.4 Kriechen (Bilder 19 und 20, Tafel 11)

Das Kriechen (bleibende Stauchung) war bei den im Alter von 28 Tagen mit rd. 33 % der Würfeldruckfestigkeit belasteten Zylindern deutlich größer als bei den im Alter von 14 Tagen mit nur 25 bis 30 % der zugehörigen Würfeldruckfestigkeit belasteten Probekörpern. Dies dürfte vorwiegend darauf zurückzuführen sein, daß die auf die entsprechende Druckfestigkeit bezogene Belastung der nach 14 Tagen belasteten Zylinder im Alter von 28 Tagen wesentlich geringer war als bei den nach 28 Tagen belasteten Zylindern. Die frühe Dauerbelastung und die Nacherhärtung zwischen dem 14. und 28. Tag können als Grund für eine noch nennenswerte Festigkeitssteigerung angesehen werden. Das Kriechen war bei allen drei Leichtbetonen etwas geringer als bei vergleichbarem Kiessandbeton [48, 49, 53].

In Tafel 11 sind die wesentlichen Kenngrößen der Verformung sowie die daraus ermittelten Kriechzahlen und Kriechmaße zusammengestellt. Zum Vergleich wurden auch Ergebnisse von A. Hummel [48] und J. J. Shideler [52] aufgenommen. Die Ergebnisse der im Alter von 28 Tagen belasteten Leichtbetone (Zeilen 10, 12, 14) können mit den Ergebnissen der Kiessandbetone nach [48] (Zeilen 1 und 2) verglichen werden, da Betongüten, Zementleimmengen sowie Beginn, Dauer und Höhe der Belastung etwa gleich waren. Lediglich beim Beton nach Zeile 12 war der Zementgehalt nennenswert größer.

Das Kriechen der Leichtbetone K und H war etwas kleiner als bei den Kiessandbetonen der Zeilen 1 und 2 in Tafel 11. Besonders auffallend ist dies beim B 300 H (Zeile 14), der die größte elastische Verkürzung und das kleinste Kriechen aufwies. J. J. Shideler [52] fand dagegen bei etwa gleichen Betongüten, jedoch wesentlich geringerer Belastung (10 bis 17 % der Würfeldruckfestigkeit), für Kiessandbeton ein geringeres Kriechen als für Blähton- und Hüttensimsbeton. Allerdings war der Zementgehalt beim Kiessandbeton deutlich kleiner als bei den Leichtbetonen.

Die gleichen Hinweise gelten auch für das Endkriechen (Tafel 11, Spalte q), das aus dem Kriechverlauf mit Hilfe einer Hyperbel-Funktion [53] errechnet wurde. Das auf die Beanspruchung bezogene Kriechen (Kriechmaß und Endkriechmaß, vgl. Spalten p und r) weist darauf hin, daß die Verformung nicht geradlinig mit der Beanspruchung wächst.

Aus dem Kriechen und der elastischen Zusammendrückung wurden die Kriechzahl $\varphi = \varepsilon_{b1} / \varepsilon_{el}$ und die Endkriechzahl $\varphi_\infty = \varepsilon_{b\infty} / \varepsilon_{el}$ errechnet (Tafel 11, Spalten s und t). Während die amerikanischen Versuche (Zeilen 3 bis 8) vermutlich wegen der teilweise sehr verschiedenen Zementgehalte keine unterschiedlichen Kriechzahlen für Kiessand- und Leichtbeton ergaben, zeigten die Leichtbetone der Zeilen 9 bis 14 wegen des geringeren Kriechens auch deutlich geringere Kriech- und Endkriechzahlen als die vergleichbaren Schwerbetone der Zeilen 1 und 2. Wie ein Vergleich der Spalten t und u zeigt, lag die aus den 28 Tage-Ergebnissen ermittelte Endkriechzahl bei den Betonen der Zeilen 1, 2, 4, 6, 7 und 10 in dem nach DIN 4227 rechnerisch ermittelten Bereich für φ_∞ (Spalte u). Die Endkriechzahlen der übrigen Betone lagen i. a. nur wenig außerhalb des Bereichs der DIN 4227. Nennenswert war die Unterschreitung der Endkriechzahl der DIN 4227 nur beim B 300 H, weil sich dieser Leichtbeton durch geringes Kriechen, aber große elastische Zusammendrückung auszeichnete.

6. Zusammenfassung

Die hier untersuchten Leichtbetone höherer Festigkeit wurden mit den im Jahre 1959 in Deutschland erhältlichen leichten Zuschlägen hergestellt. Die aus den Versuchen resultierenden, nachstehend hervorgehobenen Ergebnisse sind nur z. T. allgemein übertragbar, weil sie nur mit wenigen leichten Zuschlägen gewonnen wurden. Immerhin weisen die Feststellungen auf einige Eigenschaften hin, durch die sich Leichtbetone, je nach verwendetem Zuschlag, von üblichen Schwerbetonen unterscheiden können.

6.1 Für die Herstellung von Leichtbeton hoher Festigkeit muß das Zuschlagkorn eine hohe Eigenfestigkeit aufweisen; es soll möglichst feinporig sein und etwas gedrungene Kornform sowie eine weitgehend geschlossene Oberfläche haben. Im allgemeinen ist für die Beurteilung eines Zuschlags eine Eignungsprüfung mit Beton unentbehrlich.

6.2 Die Leichtzuschläge sind meist stärker saugend als übliches Zuschlagestein; sie sollen daher vorgefeuchtet werden. Bei den untersuchten Zuschlägen war im allgemeinen ein Natursandzusatz erforderlich. Da leichte Zuschläge in weichem Beton und bei längerem Rütteln aufschwimmen, sollte die Betonkonsistenz möglichst steif sein.

6.3 Von den neun in den Vorversuchen geprüften Zuschlägen erwiesen sich nur vier zur Herstellung eines Betons der Güte B 300 mit einer Rohdichte bis höchstens $1,80 \text{ kg/dm}^3$ als geeignet.

6.4 Die 28 Tage-Druckfestigkeit der eingehender untersuchten Betone mit Sinterbims H und Hüttenbims K lag zwischen 317 und 418 kp/cm^2 . Dabei erreichte die Rohdichte des Betons aus Sinterbims H $1,75 \text{ kg/dm}^3$ und die der Betone aus Hüttenbims K allerdings schon rd. $1,95 \text{ kg/dm}^3$. Im Alter von 28 Tagen wiesen 10 cm -Würfel aus diesen Betonen eine rd. 13 % größere und Zylinder $15/30 \text{ cm}$ eine rd. 16 % kleinere Druckfestigkeit auf als 20 cm -Würfel; die Unterschiede sind ähnlich denen üblicher Schwerbetone.

6.5 Die Biegezugfestigkeit war etwas größer als beim Kiessandbeton gleicher Druckfestigkeit. Beim Austrocknen ergab sich wie beim Schwerbeton ein vorübergehender Rückgang der Biegezugfestigkeit. Er war beim Beton mit dem stark saugenden Zuschlag H besonders ausgeprägt und trat erst nach rd. 3 Monaten Luftlagerung auf.

6.6 Schwinden und Endschwindmaß entsprachen bis zum Alter von 2,5 Jahren etwa denen vergleichbarer Schwerbetone. Das Schwinden war beim Beton mit dem stark saugenden Zuschlag H zu Anfang allerdings verzögert.

6.7 Bei gleicher Beanspruchung (σ rd. $1/3$ der Würfeldruckfestigkeit) waren die elastischen Zusammendrückungen größer und der Elastizitätsmodul kleiner als bei üblichem Kiessandbeton gleicher Druckfestigkeit. Dies war beim Beton mit Sinterbims H besonders ausgeprägt, jedoch weniger als bei amerikanischen Versuchen [1].

6.8 Das Kriechen der hier untersuchten Leichtbetone war kleiner als bei vergleichbarem Kiessandbeton. Bei den im Alter von 28 Tagen belasteten Probekörpern war es größer als bei den schon im Alter von 14 Tagen belasteten. Die Endkriechzahl φ_{∞} der Leichtbetone mit Hüttenbims K entsprach etwa der nach DIN 4227. Beim Beton mit Sinterbims H war sie wegen des geringen Kriechens und der großen elastischen Zusammendrückung nennenswert kleiner.

S C H R I F T T U M :

- [1] Walz, K., und G. Wischers: Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit. Stand der Entwicklung in den USA am Beispiel von Blähtonzuschlag aus dem Drehofen. beton 14 (1964) H. 7, S. 293/299, H. 8, S. 327/333, und H. 9, S. 375/383; ebenso Betontechnische Berichte 1964. Beton-Verlag, Düsseldorf 1965, S. 127/185.
- [2] Walz, K.: Leichte Zuschlagstoffe für Beton. Keramische Zeitschrift 5 (1953) H. 5, S. 219/225.
- [3] Kluge, R. W., M. M. Sparks und E. C. Tuma: Lightweight-aggregate concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 45 (1949) S. 625/642.
- [4] Braun, G.: Der dänische Leca-Leichtbeton. Betonstein-Zeitung 16 (1951) H. 10, S. 235/237.
- [5] Hobbs, C.: Building materials from pulverized fuel-ash. British Chemical Engineering 1959, April, S. 212/216.
- [6] Shortl, A.: The use of lightweight concrete for reinforced concrete construction. The Reinforced Concrete Review V (1959) Sept., Nr. 3.
- [7] Kruml, F.: Lightweight aggregate concrete made with artificial aggregate. Stavebnisky Gasopis Slovenska Akademie, Vied (Bratislava) 6 (1958) Nr. 3, S. 146/154. Nach Ref. in Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) Nr. 10, S. 1161.
- [8] The properties of Lytag aggregate and Lytag concretes. Lytag Technical Bulletin, Nr. 1, Tafel 3.
- [9] Lytag concrete. Lytag Technical Bulletin, Nr. 5, Oktober 1961, S. 15.
- [10] Shirayama, K.: The estimation of the strength of concrete made with lightweight aggregate. Magazine of Concrete Research 13 (1961) H. 38, S. 61/70.
- [11] Iwanow-Djatlow, I. G., S. G. Swerev, J. D. Bitschenkow und K. P. Dellos: Keramsit-Stahlbeton für eine Spannbetonbrücke. Auttomobilnije Dorogi (1961) H. 3, S. 12/15. Ref. in Beton- und Stahlbetonbau 57 (1962) H. 1, S. 24.
- [12] Evans, R. H.: The suitability of a lightweight aggregate (Aglite) for structural use. Magazine of Concrete Research 15 (1963) Nr. 44, S. 93/100.
- [13] Schekanenko, P. A.: Mischungsaufbau bei Blähtonbelon für tragende Bauteile. Beton i Shelesobeton (1964) H. 4, S. 174/178.
- [13a] Jindal, B. K.: Properties of structural lightweight concrete using sintered fly ash aggregate. Indian Concrete Journal 38 (1964) Nr. 11, S. 413/418.
- [14] Tevan, Z.: Mechanische Eigenschaften von tragenden Flugaschensinterkiesbetonen und ihre Anwendung im Brückenbau. Wissensch. Mitt. d. Techn. Univ. f. Bau- u. Verk.-Wesen (Ungarn) 9 (1963) H. 5, S. 185/213. Nach Ref. im Zentralblatt d. Ungar. Techn. 16 (1964) H. 3, S. 104.
- [15] Finsterwalder, U.: Betonschiffe in Schalenbauweise. VDI-Zeitschrift 91 (1949) Nr. 7, S. 157/163.
- [16] Keil, F.: Zur Prüfung der Kornfestigkeit von Hüttenbims. Zement 29 (1940) H. 45, S. 578/581.
- [17] Leonhardt, F.: Leichte Belonzuschlagstoffe aus gebranntem Ton. Ziegel-Industrie 3 (1950) H. 4, S. 59/60, und H. 5, S. 84/86.
- [18] Meyer, K.: Herstellung von Leichtbeton-Zuschlagstoffen nach dem Saugzug-Sinterverfahren. Betonstein-Zeitung 16 (1950) H. 3, S. 47/49, und H. 4, S. 95/99.
- [19] Hummel, A.: Die Ermittlung der Kornfestigkeit von Ziegelsplitt und anderen Leichtbeton-Zuschlagstoffen. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 114, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1954, S. 21/30.
- [20] Schätzer, L.: Keramische Zuschlagstoffe für Leichtbeton. Silikattechnik 7 (1956) H. 6, S. 224/226.

- [21] Kristen, Th., und R. Czech: Versuche mit Blähton aus deutschem Ton. Zement-Kalk-Gips 9 (1956) H. 2, S. 49/58.
- [22] Ruopp, W.: Herstellung und Anwendung von Hüttenbims, Stahl und Eisen 77 (1957) H. 1, S. 36/43.
- [23] Wesche, K.: Beton aus porigen Stoffen. Betonstein-Zeitung 23 (1957) H. 7, S. 515/522.
- [24] Cremer, J., und F. Rodis: Hüttenbims-Knapsack – Seine Verwendung als Leichtbetonzuschlag. Betonstein-Zeitung 25 (1959) H. 6, S. 269/274.
- [25] Steinicke, K.-H.: Herstellung, Anwendung und Wirtschaftlichkeit des Blähton-Betons im Hochbau. Dissertation T. H. Karlsruhe 1960.
- [26] Knaust, W.: Technologie der Aschensinterung. Silikattechnik 11 (1960) H. 7, S. 308/311.
- [27] Schulz, B.: Herstellung, Klassierung und Verwendung von Blähton beton 13 (1963) H. 8, S. 376/378.
- [28] Keil, F.: Hochofenschlacke. 2. Aufl. Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1963.
- [29] Korth, H., und H. Hahn: Die Leichtbetone. Ihre Herstellung, Eigen schaften und Anwendungsbiete. Der Bauhelfer (1950) H. 7, S. 181/193, H. 10, S. 277/281, H. 16, S. 447/450, und H. 19, S. 518/522.
- [30] Lappe, W.: Schaumlava und Lavakies aus der Eifel. Betonstein Zeitung 16 (1951) H. 4, S. 78/79.
- [31] Hummel, A.: Über die Druckfestigkeit von Ziegelsplittbelon mit geschlos semem Gefüge. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 110, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1952, S. 63/66.
- [32] Charisius, K., und H. Breyer: Über die Eignung von Lava an Stelle von Ziegelbrechgut als Zuschlag für Berliner Beton. Berliner Bauwirtschaft (1959) H. 11, S. 238/247.
- [33] Kramer, W., und R. Vinkeloe: Einfluß von Feinmehlzusätzen auf die Druckfestigkeit und Wärmedämmung von Hüttenbimsbeton. Die Bau wirtschaft 14 (1960) H. 30, S. 677/681.
- [34] Reinsdorf, S.: Leichtbeton. Band I, Leichtbetone aus porigen Zuschlag stoffen. VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin 1961.
- [35] Pilny, F., und H. Korth: Sintersplitt. Die Bautechnik 38 (1961) H. 3, S. 84/90.
- [36] Weirich, K.: Über die Druckfestigkeit von Leichtkornbeton mit dichtem Gefüge. beton 10 (1960) H. 8, S. 375/378.
- [37] Kromarek, H., und A. Schlägl: Aschenbeton und Aschengasbeton. Silikat technik 11 (1960) H. 7, S. 319/322.
- [38] Vinkeloe, R.: Schüttbeton – Thermocrete aus schwerem, kornfestem Hüttenbims. Die Bauwirtschaft 16 (1962) H. 14, S. 342/347.
- [39] Steinicke, K.-H.: Leichtspannbeton. Betonstein-Zeitung 28 (1962) H. 10, S. 463/468, H. 11, S. 526/528, und H. 12, S. 567/570.
- [40] Pilny, F., und H. Korth: Sinterkies. Die Bautechnik 40 (1963) H. 4, S. 127/132.
- [41] Schulz, B.: Beitrag zur Technologie des Leichtbetons. beton 14 (1964) H. 4, S. 137/142.
- [42] Hundert Jahre Dyckerhoff-Zement, Wiesbaden 1964, S. 70.
- [43] Walz, K.: Prüfung von Sand, Kies, Splitt und Schotter aus natürlichen Gesteinen. Handbuch der Werkstoffprüfung, 3. Bd., 2. Aufl. Springer Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957, S. 177.

- [44] Walz, K.: Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. *Beton- und Stahlbetonbau* 53 (1958) H. 6, S. 163/169.
- [45] Walz, K.: Die Prüfung des Frischbetons. *Handbuch der Werkstoffprüfung*. 3. Bd., 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1957, S. 403/411.
- [46] Vorläufiges Merkblatt für die Verwendung von luftporenbildenden Zuschlägen zu Straßenbeton. *Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e. V.*, Köln 1953.
- [47] Best, C. H., T. Pirlitz und M. Polivka: A loading system for creep studies of concrete. *ASTM Bulletin* 224, 1957, S. 44/47.
- [48] Hummel, A., K. Wesche und W. Brand: Der Einfluß der Zementart, des Wasser-Zement-Verhältnisses und des Belastungsalters auf das Kriechen von Beton. *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton*, Heft 146, Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1962, S. 9/18 und 34/70.
- [49] Rüschi, H., K. Kordina und H. Hilsdorf: Der Einfluß des mineralogischen Charakters der Zuschläge auf das Kriechen von Beton. *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton*, Heft 146, Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1962, S. 19/32 und 71/133.
- [50] Bonzel, J.: Über 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.
- [51] Bonzel, J.: Über die Spaltzugfestigkeit des Betons. *beton* 14 (1964) H. 3, S. 108/114, und H. 4, S. 150/157; ebenso *Betontechnische Berichte* 1964. Beton-Verlag, Düsseldorf 1965, S. 59/96.
- [52] Shideler, J. J.: Lightweight aggregate concrete for structural use. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 54 (1957/58) S. 299/328.
- [53] Wagner, O.: Das Kriechen unbewehrten Betons. *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton*, Heft 131, Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1958.