

Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit

Stand der Entwicklung in den USA

am Beispiel von Blähonzuschlag¹⁾ aus dem Drehofen

Von Kurt Walz und Gerd Wischers, Düsseldorf

Übersicht

Blähton aus dem Drehofen ist als Leichtzuschlag betontechnisch günstig, weil er mit gerundeter Kornform und weitgehend geschlossener Oberfläche in groben und feinen Korngruppen hergestellt werden kann. In den letzten 10 Jahren hat sich in den USA die Zahl der Drehofenwerke, die aus tonhaltigen Rohstoffen Leichtzuschläge blähen, nahezu verdoppelt, so daß die Erzeugung von über 60 Werken jährlich annähernd 4 Millionen m³ erreicht.

Mit günstigem Blähonzuschlag entstehen Betone mit 28 Tage-Würfeldruckfestigkeiten zwischen 300 und 600 kp/cm² und Rohdichten zwischen etwa 1,6 und 1,8 kg/dm³. Der erforderliche Zementgehalt dieser Betone ist größer als der von Schwebeton gleicher Druckfestigkeit. Im allgemeinen ist mit einer vergleichsweise kleineren Zugfestigkeit sowie mit einem kleineren Elastizitätsmodul zu rechnen.

Konstruktions-Leichtbeton ist teurer als Schwebeton gleicher Festigkeit, bietet jedoch wirtschaftliche Vorteile vor allem bei Hochhausbauten mit mehr als 10 Stockwerken, bei weitgespannten Konstruktionen und bei Fertigteilen, weil durch das verminderte Eigengewicht Einsparungen beim Bewehrungsstahl, bei der Gründung und beim Transport von Fertigteilen möglich sind.

Es ist die Absicht, mit diesen Ausführungen einen möglichst umfassenden Überblick über den Stand der Herstellung, die Eigenschaften und die Verwendung von Konstruktions-Leichtbeton aus Drehofenblähton in den USA zu geben. Die Entwicklung auf diesem Gebiet hat in den USA in jeder Hinsicht einen hohen technischen Stand erreicht, während in Europa die praktische Verwendung von hochfestem Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge über Versuche nicht hinausgekommen ist.

Der erste Teil enthält Angaben über die Erzeugung, die hauptsächlichsten Anwendungsgebiete, die Kosten und die Wirtschaft-

¹⁾ Soweit die Ausführungen nicht den Rohstoff des geblähten Leichtzuschlages unmittelbar betreffen, wird für geblähte Zuschlagstoffe aus Ton (clay), Schieferthon (shale) oder Tonschiefer (slate) zur Vereinfachung der Sammelbezeichnung „Blähton“ verwendet.

lichkeit – auch im Vergleich mit den Gegebenheiten in Deutschland. In einer Übersicht wird das Wichtigste aus amerikanischen Normen und Richtlinien für Zuschlag zu Konstruktions-Leichtbeton, für die Herstellung dieses Betons und für seine Bemessung im Hochbau mitgeteilt.

Der zweite Teil befaßt sich mit der Herstellung des Blättons im Drehofen, wie z. B. mit Auswahl der Rohstoffe, Aufbereitung, Brennen und Überwachung, ferner mit den Besonderheiten des Mischungsaufbaus und der Frischbetoneigenschaften.

An Hand des amerikanischen Schrifttums werden im dritten Teil die wichtigsten Beurteilungsmerkmale und Festbetoneigenschaften, wie die Druckfestigkeit (auch im Verhältnis zur Rohdichte und zum Zementgehalt), die Biege- und Scherfestigkeit, der E-Modul, das Kriechen und Schwinden u. a., herausgestellt. Abschließend finden sich Bemerkungen zur Bemessung, soweit sie von der des Schwerbetons abweicht.

1. Allgemeines

Für die Bemessung eines Betontragwerks sind überwiegend das Eigengewicht und die Nutzlast maßgebend. Das Verhältnis Eigengewicht zu Nutzlast ist je nach Art und Nutzung des Bauwerks sehr unterschiedlich. Das Gewicht der Decken aus Schwerbeton von Lagerhäusern macht z. B. oft nur einen Bruchteil der Nutzlast aus, während sich bei weit gespannten Konstruktionen, wie Brücken, das Verhältnis umkehrt. So sind bei der zur Zeit im Bau befindlichen Spannbetonbrücke über den Rhein bei Bendorf das Eigengewicht an der Gesamtbeanspruchung zu rd. 80 % und das aus dem zukünftigen Verkehr nur zu höchstens 10 % beteiligt.

Die Rohdichte (Raumgewicht) des üblichen Schwerbetons beträgt etwa 2,35 bis 2,40 kg/dm³, die eines hochfesten Leichtbetons mit dem erforderlichen geschlossenen Gefüge etwa 1,6 bis 1,8 kg/dm³, also nur rd. 75 % des Gewichtes des Schwerbetons. Das dadurch kleinere Eigengewicht der Konstruktion würde bei gleichen mechanischen Eigenschaften dieses Betons und gleichen zulässigen Spannungen eine merkbare Einsparung an Bewehrungsstahl erlauben, ferner kleinere Querschnitte für noch leichtere Bauglieder, weniger Aufwand bei der Gründung oder noch größere Spannweiten.

Auch bei Bauwerken, bei denen der Unterschied zwischen Eigengewicht und Nutzlast nicht sehr groß ist, kann die Verwendung von Konstruktions-Leichtbeton Vorteile bieten. Das gilt vor allem bei vielgeschossigen Bauten für die Bemessung der Stützen sowie die Gründung auf weniger tragfähigem Untergrund. Schließlich verdient beim Bauen mit Fertigteilen der Konstruktions-Leichtbeton Beachtung, da mit ihm geringeres Transport- und Verlegegewicht der Teile erzielt wird oder mit sonst gleichem Gerät größere Fertigteile bewegt werden können.

So gesehen führen durch die Verminderung des Betongewichtes um 25 bis 30 % in erster Linie wirtschaftliche Anreize zur Verwendung von hochfestem Leichtbeton, nicht zuletzt aber auch die Aussicht, die bisher mit Schwerbeton gesetzten Grenzen der

Spannweiten zu vergrößern. Außer den durch das kleinere Gewicht gegebenen Vorteilen des Konstruktions-Leichtbetons sind mit ihm kaum günstigere mechanische und technologische Eigenschaften gegenüber dem üblichen Schwerbeton zu erwarten, wenn man von einem erhöhten Feuerwiderstand von Spannbetonbauteilen und einer verminderten Wärmeleitfähigkeit absieht. Die Wärmedämmung des Konstruktions-Leichtbetons mit einer Rohdichte zwischen 1,6 und 1,8 kg/dm³ ist jedoch nicht so günstig, daß sie für seine Anwendung bestimmend werden dürfte.

Die wirtschaftlichen Vorteile des Leichtbetons im Ingenieurbau zeigten sich bereits bei der 1937 fertiggestellten Oakland-Bay-Bridge (San Francisco) besonders deutlich. Die 15 cm dicke Stahlbeton-Fahrbahnplatte des oberen Decks dieser Hängebrücke wurde in Konstruktions-Leichtbeton mit einem im Drehofen hergestellten Blähton ausgeführt [1, 2]. Bei einer Rohdichte von rd. 1,65 kg/dm³ erreichte der Beton eine 28 Tage-Druckfestigkeit von rd. 250 kp/cm² (umgerechnet auf Würfeldruckfestigkeit nach DIN 1048; siehe hierzu Fußnote 7). Allein durch das geringere Gewicht der Leichtbeton-Fahrbahnplatte konnten an der gesamten Brückenkonstruktion rd. 3 Mill. \$ eingespart werden. Das waren 5 % der Gesamtkosten, die den Bau eines Drehofen-Blähtonwerks für diese Bauaufgabe rechtfertigten [1, 2, 3].

Betontechnisch besonders vorteilhaft erwiesen sich allgemein die im Drehofen geblähten Leichtzuschläge aus Ton und Schiefer-ton, weil sie mit gerundeter Kornform sowie dichter und geschlossener Oberfläche in allen Korngruppen hergestellt werden können. Solcher Zuschlag aus dem Drehofen wird in den USA seit vielen Jahren erzeugt, doch haben seine Herstellung und Anwendung für Konstruktions-Leichtbeton insbesondere in den letzten 10 Jahren stark zugenommen (siehe auch [4]). Es gibt dort bereits Richtlinien und Normen für die Beurteilung dieses Zuschlags, und der Konstruktions-Leichtbeton fand in den neuen amerikanischen Stahlbetonbestimmungen (1963) volle Berücksichtigung. Technisch-wissenschaftliche Untersuchungen und die Arbeit besonderer Ausschüsse, wie z. B. die amerikanische „Kommission für vorgespannten Leichtbeton“, tragen zur Vertiefung und Verbreitung der Erkenntnisse bei. Besonders gefördert wird die Entwicklung in den USA durch das „Expanded Shale, Clay and Slate Institute“ (ESCSI) ²⁾ in Washington, in dem sich die meisten Hersteller von Drehofenblähton zusammengeschlossen haben (43 Werke in den USA, 7 in Kanada und 2 in Australien [5]). Diese Vereinigung stellt auch praktisch einen Güteschutzverband dar, da nur Werke aufgenommen werden, mit deren Blähton bei einem festgelegten Zementgehalt eine bestimmte Rohdichte nicht überschritten und eine bestimmte Druckfestigkeit nicht unterschritten wird (siehe unter 2.4.1).

Aber auch bei uns hätten frühere Ansätze weiter verfolgt werden können. So stellte W. Czernin während des letzten Krieges in

²⁾ Häufiger erwähnte Institutionen und deren Abkürzungen sind: ACI = American Concrete Institute; ASTM = American Society for Testing and Materials; ESCSI = Expanded Shale, Clay and Slate Institute; NBS = National Bureau of Standards; PCA = Portland Cement Association.

einem alten Zementwerk in Oppeln festen Blähtonzuschlag im Drehofen her, und unter der Leitung der Firma Dyckerhoff & Widmann wurden Kähne und Seeschiffe in Schalenbauweise aus Konstruktions-Leichtbeton gebaut, dessen Rohdichte bei $1,7 \text{ kg/dm}^3$ und dessen Druckfestigkeit zwischen 400 und 500 kp/cm^2 lag [6].

Trotz solcher Beispiele blieb die Herstellung von Blähton für Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit in Europa zurück, obwohl man hier angesichts der schon früh einsetzenden Verwendung des Stahl- und Spannbetons zu bedeutsamen, weitgespannten Konstruktionen und Fertigteilen ebenfalls auf die Vorteile eines Konstruktions-Leichtbetons hingelenkt wurde. Ein zunehmendes Interesse der Konstrukteure für den Leichtbeton hoher Festigkeit und für die durch ihn gebotenen Möglichkeiten zeichnet sich in den letzten Jahren mehr und mehr ab. (Siehe auch zugehörige Ausführungen auf dem Internationalen Spannbetonkongreß in Rom 1962 [7].) Die Tätigkeit des vor kurzem vom Internationalen Spannbeton-Verband (FIP) gebildeten Arbeitsausschusses „Vorgespannter Leichtbeton“ dürfte der weiteren Entwicklung förderlich sein.

Wenn dieses Interesse noch zu keinem baupraktischen Ergebnis in Deutschland geführt hat, so liegt das wohl daran, daß diese günstigen, in den USA künstlich hergestellten Leichtzuschläge für Beton hoher Festigkeit noch fehlen, obwohl geeignete Rohstoffe unschwer zu erschließen wären und wahrscheinlich auch ungenutzte Drehöfen, z. B. aus der Erzsinterung (Rennanlagen) oder aus anderen Betrieben, für erste Versuche im großtechnischen Maßstab oder auch zur anschließenden Erzeugung zur Verfügung stehen würden.

Die wirtschaftlichen Überlegungen zum Bau eines Drehofen-Blähtonwerks für hochfesten Leichtbeton sind bei uns besonders sorgfältig anzustellen. Man muß dabei bedenken, daß im allgemeinen erst nach Herstellung im großtechnischen Maßstab endgültig beurteilt werden kann, ob mit Blähton aus einem bestimmten Vorkommen hohe Betonfestigkeiten zu erzielen sind.

In den USA besteht auch für mäßig festen Blähtonzuschlag eine Absatzmöglichkeit; es werden daraus Wandbauelemente, z. B. Hohlblocksteine u. ä. hergestellt, für die dort höhere Festigkeiten gefordert werden als für die bei uns meist üblichen Leichtbetonelemente (Güteklassen B 25 und B 50). Ein neues Blähtonwerk in den USA kann also nötigenfalls seine Erzeugung hierfür absetzen. Eignet sich der Drehofenblähton auch für Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit, so nimmt der Anteil für diese Verwendung in dem Lieferbereich eines Werkes erfahrungsgemäß ständig zu; schon heute geben mehrere Drehofenwerke, die sehr festen Blähton herstellen, ihre gesamte Erzeugung für Konstruktions-Leichtbeton ab. Von den im Drehofen hergestellten Blähtonen werden heute im Mittel etwa 35 % für Konstruktions-Leichtbeton verwendet.

In Deutschland wird es in manchen Gebieten schwierig sein, einen nur mäßig festen Blähton für Hohlblocksteine u. ä. wirtschaftlich zu verarbeiten, wenn dort andere, billigere Leichtzuschläge zur Verfügung stehen, die für unsere leichteren Steine

mit niedrigen Festigkeitsanforderungen genügen. Bei der Planung eines Drehofen-Blähtonwerks muß man bei uns daher einerseits überlegen, wo ein für hochfesten Konstruktionsbeton (Spannbeton) nicht geeigneter Blähton wirtschaftlich untergebracht werden könnte. Für den Fall, daß die Herstellung des angestrebten sehr festen Blähtons gelingt, muß man sich andererseits am Anfang der Entwicklung einen laufenden Absatz dieses teuren Zuschlags für eine solche Anwendung sichern, bei der er wirtschaftliche Vorteile zu bieten vermag.

Mit den nachfolgenden Ausführungen soll ein Überblick über die Eigenschaften des Konstruktions-Leichtbetons und seine Anwendung sowie über die Herstellung hochwertiger Blähtons in den USA gegeben werden. Da die amerikanischen Erfahrungen darauf hinweisen, daß Konstruktions-Leichtbeton mit optimalen Eigenschaften am zuverlässigsten mit Blähton-Zuschlag aus dem Drehofen hergestellt werden kann, und da mit ihm auch die umfassendsten Untersuchungen durchgeführt wurden, beziehen sich die Ausführungen beispielhaft im wesentlichen auf diesen Zuschlag. (Damit soll nicht zum Ausdruck kommen, daß nicht auch aus anderen Stoffen, z. B. aus Flugasche, Hüttenschlacken oder Waschbergen, oder nicht auch durch andere Brennverfahren, z. B. im Schacht- oder Tunnelofen oder auf dem Sinterband, ebenfalls Zuschläge für festen Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge erzeugt werden können.) Es wird auch darauf verzichtet, die in den letzten Jahren veröffentlichten europäischen Berichte über die Herstellung von Leichtzuschlägen für Konstruktionsbeton und dessen technologische Eigenschaften einzubeziehen³⁾, weil damit unseres Wissens noch kein Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit (B 300 und höher) laufend hergestellt wird und weil andere Leichtzuschlagstoffe für Beton hoher Festigkeit in einem anderen, an dieser Stelle erscheinenden Bericht noch berücksichtigt werden. Den Ausführungen liegen die wichtigsten, vorwiegend amerikanischen Veröffentlichungen über den Blähton aus dem Drehofen und Leichtbeton hoher Festigkeit zugrunde⁴⁾ sowie Feststellungen der beiden Verfasser anlässlich Studienreisen durch die USA in den Jahren 1961 und 1963⁵⁾.

³⁾ Vgl. auch eine Zusammenstellung über Veröffentlichungen früherer Jahre [8].

⁴⁾ Leider standen bei der Ausarbeitung die beiden zur Herbsttagung 1963 des ACI eingereichten Berichte von J. J. Shideler über „Lightweight structural concrete“ (Versuche des Laboratoriums der PCA) und von T. W. Reichard, F. G. Erskine und L. A. Thorssen über „Volume changes due to elasticity, creep and drying shrinkage of expanded shale, clay and slate concretes and normal weight concretes“ (Versuche des NBS) nicht zur Verfügung [9]. Unmittelbar vor Drucklegung erschien ein Bericht von T. W. Reichard [10] mit den 1- und 2-Jahreswerten der NBS-Versuche, die mit der Unterstützung des ESCSI im Jahre 1959 begonnen wurden und sich über mehrere Jahre erstrecken. In diese Versuche sind 24 verschiedene, handelsübliche Drehofenblähtone und vergleichsweise 5 natürliche Schwerbetonzuschläge einbezogen. Der Bericht enthält Angaben über die Frühfestigkeit nach Wärmebehandlung, den E-Modul, das Kriechen und das Schwinden. Die wesentlichsten Feststellungen aus diesem Bericht wurden noch so weit wie möglich berücksichtigt.

⁵⁾ Auch an dieser Stelle möchten die Verfasser den Herren der Portland Cement Association, Chicago und Skokie (PCA), sowie den Herren des Expanded Shale, Clay and Slate Institute, Washington D.C. (ESCSI), für die vielen bereitwilligst erteilten Auskünfte danken.

2. Erzeugung, Verwendung und Normung

2.1 Entwicklung und Stand der Erzeugung

1931 stellten 7 Werke mit 14 Drehöfen „Haydite“ her⁶⁾. Im Jahre 1954 erzeugten 33 Werke etwa 1,7 Millionen m³ Blähton im Drehofen [11], 1961 waren es 52 Werke [12] und im Jahre 1963 lieferten über 60 Drehofenwerke etwa 4 Millionen m³ Blähton. Die Zahl der Drehofenwerke mit Blähtonerzeugung nahm demnach in den letzten 10 Jahren um etwa 30 zu, das sind rd. 100 %. Die durchschnittliche Jahreserzeugung eines Werkes betrug 1962 etwa 65 000 m³ Blähton, das entspricht bei 325 Arbeitstagen 200 m³/Tag. Im Schrifttum sind neuere Anlagen mit einer Leistung von etwa 1000 m³/Tag beschrieben [13], und in Gesprächen mit amerikanischen Fachleuten wurde von geplanten Werken mit einer Tageserzeugung von 1500 bis 2000 m³ berichtet.

Neben den über 60 Drehofenwerken brannten 1963 noch etwa 20 Werke über 1 Million m³ Blähton auf dem Sinterband. Die Anzahl der Werke mit Sinterbandanlagen nahm in den letzten 10 Jahren jedoch nur um 4 oder 5 zu. Ergänzend sei angemerkt, daß in den USA 1962 22 Hüttenwerke um 2,3 Millionen m³ Hüttenbims herstellten, der praktisch ausschließlich für Wandbausteine (blocks) verwendet wurde.

Als Rohstoff wird vor allem bei neu errichteten Werken aus betriebswirtschaftlichen Gründen Schieferthon bevorzugt (siehe Abschnitt 3.2.1). Einer Aufstellung aus dem Jahre 1961 [12], in der die meisten Betriebe in den USA und Kanada aufgeführt sein dürften, die irgendwelche leichten Zuschlagstoffe herstellen oder aufbereiten, kann man entnehmen, daß 65 % der Drehofen-Blähtonwerke als Rohstoff Schieferthon (shale) verwenden; 29 % verwenden Ton (clay) und 6 % Tonschiefer (slate).

Aus der Aufstellung geht weiter hervor, daß die Drehofenwerke auf 27 Staaten über die ganzen USA verteilt sind, und zwar unabhängig davon, ob in einem Staat natürliche Leichtzuschlagstoffe, wie z. B. Bims und Lavaschlacke in Kalifornien, oder künstlich hergestellte Leichtzuschläge, wie z. B. geschäumte Hochofenschlacke im Staate Illinois, zur Verfügung stehen.

Jährlich werden in den USA rd. 1,5 Millionen m³ Leichtzuschläge zu Konstruktionsbeton verarbeitet. Etwa 80 % dieser Zuschläge sind Blähtone aus dem Drehofen, die restlichen 20 % werden überwiegend auf dem Sinterband hergestellt. Der Anteil des Konstruktions-Leichtbetons am Transportbeton hat sich im Zeitraum von 1960 bis 1963 nahezu verdoppelt und betrug 1963 3 bis 4 %. In Großstädten, wie z. B. New York, in denen Hochhausbauten wegen des verminderten Eigengewichts bevorzugt mit Konstruktions-Leichtbeton gebaut werden, betrug der Anteil am Transportbeton sogar 10 bis 15 %. Transportbeton wird aber auch zu einem großen Anteil für Tiefbauten, Gebäudefundamente,

⁶⁾ Als erster dürfte sich S. J. Hayde von 1913 an mit der Herstellung von Blähton befaßt haben [3]; 1917 erhielt er ein diesbezügliches Patent. Er nannte diesen Blähton „Haydite“.

Stützmauern sowie niedrige Bauten oder Konstruktionen mit kleinen Spannweiten geliefert, bei denen der Vorteil geringen Gewichts keine Bedeutung hat; d.h. der Anteil des von den Transportbetonwerken gelieferten Konstruktions-Leichtbetons am potentiellen Markt ist dort wesentlich größer als 15 %.

Man muß auch beachten, daß in den Spannbetonwerken Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit selbst hergestellt und nicht als Transportbeton bezogen wird. Eine vermutlich im Jahre 1963 durchgeführte Erhebung in 310 Spannbetonwerken (Querschnitt über die ganzen USA) wies aus, daß hiervon etwa 60 Werke (rd. 19 %) Blähton als Zuschlag für Spannbetonteile benutzten [5]. Angaben über den Anteil des Leichtspannbetons an der gesamten Spannbetonherzeugung dieser 60 Werke enthält die Übersicht nicht.

Zusammenfassend kann man aus diesen Feststellungen allgemein folgern, daß in den USA die Zahl der Werke, die Blähton im Drehofen erzeugen, in den letzten Jahren besonders stark angestiegen ist, daß als Zuschlag für Konstruktions-Leichtbeton überwiegend der im Drehofen geblähte Schieferton dient und daß Blähton sowohl in einer beachtlichen Anzahl von Spannbetonwerken verwendet wird als auch einen wichtigen Platz für Ortbeton im Ingenieurhochbau einnimmt.

2.2 Anwendungsgebiete

Im amerikanischen Schrifttum sind zahlreiche Bauwerke aus Konstruktions-Leichtbeton beschrieben. Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf solche Bauten, deren Beton mit Blähton aus dem Drehofen hergestellt ist; hierzu ermöglichen die Veröffentlichungen des ESCSI eine besonders gute Übersicht.

Schlaff bewehrter Ortbeton aus Blähton wurde in den rd. 70 Anwendungsbeispielen, die in der Zeitschrift des ESCSI 1962 und 1963 beschrieben wurden, allgemein für folgende Bauteile verwendet [14]: Gebäudedecken, -unterzüge und -säulen von Bürohochhäusern, Wohnhochhäusern, Hotels sowie Hörsaal- und Krankenhausgebäude, ferner Rahmen, Flach- und Faltdächer, Dachschalen und -kuppeln sowie Brückenfahrbahnen. Nachträglich vorgespannter Ortbeton wurde kaum eingebaut, wie dies auch allgemein für Schwerbeton — wenigstens bis vor kurzem — galt; diese Ausführungsart ist in den USA offensichtlich zu sehr durch den höheren Zeitaufwand und Lohnanteil belastet.

Unter den aus Leichtbeton hergestellten Fertigteilen finden sich auch schlaff bewehrte Deckenplatten, Rahmenkonstruktionen und Außenwände oder Fassadenelemente. Vorgespannte Fertigteile wurden als Dachbinder, Decken- und Brückenträger und Deckenplatten verwendet.

Die als Ortbeton für die einzelnen Bauten verbrauchten Mengen reichten von rd. 500 bis 20 000 m³; Fertigteile wurden je Bauwerk in Mengen von 500 bis 10 000 m³ eingebaut.

Für weniger beanspruchten Ortbeton werden nach 28 Tagen, auf den 20 cm-Würfel umgerechnet, Druckfestigkeiten von 250 kp/cm²

und 300 kp/cm² verlangt und für Dächer, Schalen und Säulen häufig 410 kp/cm² ⁷⁾).

Als Druckfestigkeit für den Beton der Leichtbeton-Fertigteile wurden im allgemeinen 330 bis 410 kp/cm² gefordert. Bei der Güteprüfung des Betons wurden diese Druckfestigkeiten oft beachtlich überschritten. Vom ESCS-Institute wird mitgeteilt [17], daß in den meisten der Spannbetonwerke, die Blähton aus dem Drehofen benutzen, eine für das Vorspannen erforderliche Anfangsdruckfestigkeit von 330 kp/cm² durch Wärmebehandlung auch schon nach 24 h stets erreicht wurde (zugehörige 28 Tage-Druckfestigkeiten 410 kp/cm² und mehr bzw. 490 kp/cm² ohne Wärmebehandlung nach Normallagerung).

Die Rohdichte, meist an 7 Tage feucht, dann 21 Tage trocken gelagerten Zylindern festgestellt (siehe 2.4.1), lag für den Ort-beton und für Fertigteile je nach Festigkeit zwischen etwa 1,60 und 1,75 kg/dm³.

Während mit dem Blähton-Leichtbeton demnach die für Konstruktions-Schwerbeton üblichen Betonfestigkeiten zuverlässig erzielt wurden, wies der Leichtbeton nur ein Gewicht bis höchstens 75 % jenes des Schwerbetons auf.

Aus dem Anwendungsgebiet des Blähton-Leichtbetons heben sich Bauwerke mit ungewöhnlicher Konstruktion oder Kühnheit besonders heraus. Dazu gehört z. B. das 120 m weit gespannte Kuppel-Faltdach der Versammlungshalle der Universität von Illinois in Urbana, Bild 1 [18]. Die gesamte Dachkuppel wurde aus Leichtbeton der Güte B 330 mit Blähton aus dem Drehofen hergestellt (Frischbetonrohichte 1,70 kg/dm³).

Auch das bekannte, an 4 Stellen aufgesetzte, aus 4 Schalenelementen gebildete Dach des Gebäudes der TWA-Fluggesellschaft auf dem New York International-Flughafen ist hier zu erwähnen [19], Bild 2, mit einer Spannweite von 90 m x 65 m und einer Schalendicke bis hinab zu 15 cm (Druckfestigkeit des Blähtonbetons nach 28 Tagen im Mittel 410 kp/cm²).

⁷⁾ Für den üblichen Konstruktions-Schwerbeton finden sich in den USA folgende Güteklassen (bezogen auf die Druckfestigkeit von Zylindern h = 30 cm, d = 15 cm, im Alter von 28 Tagen oder in einem früheren Alter, falls dann bereits die volle Beanspruchung auftritt) [15]:

2500	3000	4000	5000	psi
------	------	------	------	-----

Auf den 20 cm-Würfel umgerechnet sind dies rd.

200	250	330	410	kp/cm ²
-----	-----	-----	-----	--------------------

Bei dieser Umrechnung (Faktor 0,07/0,85 = 0,082) wäre für Schwerbeton nicht berücksichtigt, daß Zylinder hieraus nach den amerikanischen Normen bis zum Alter von 28 Tagen dauernd feucht gelagert werden. Der Schwerbeton der Zylinder ist also bei der Prüfung in den USA feuchter als der der Würfel nach DIN 1048, der nur 7 Tage feucht gehalten wird. Die Zylinderdruckfestigkeit von Schwerbeton dürfte daher – als Würfeldruckfestigkeit nach DIN 1048 ausgedrückt – noch etwas größer sein als oben angegeben ist (siehe auch [16]). Das trifft jedoch nicht für Zylinder aus Konstruktions-Leichtbeton zu, da diese wie die Würfel nach DIN 1048 7 Tage feucht und dann an der Luft gelagert werden (siehe 2.4.1). Der Umrechnungsfaktor von 0,082 dürfte daher für den Leichtbeton zutreffen.

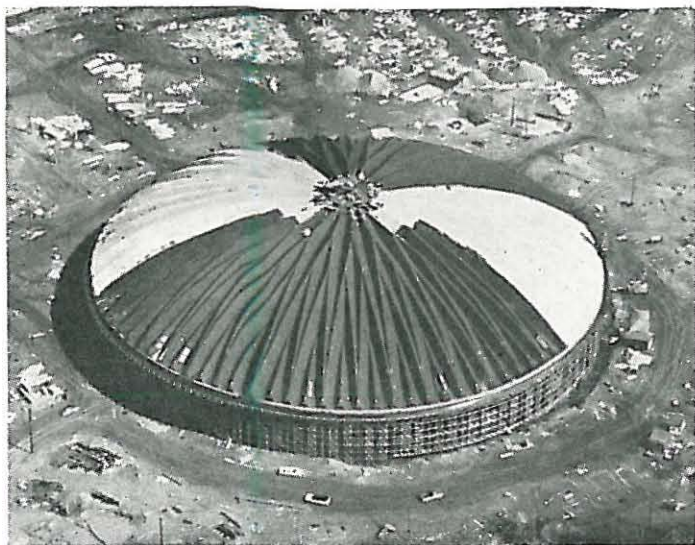


Bild 1 Kuppelfaltdach der Versammlungshalle der Universität von Illinois in Urbana; Spannweite 120 m; gesamte Dachkonstruktion in schlaff bewehrtem Leichtbeton aus Drehofenblähton; verlangte 28 Tage-Würfel-druckfestigkeit 330 kp/cm², Rohdichte 1,70 kg/dm³ [18]

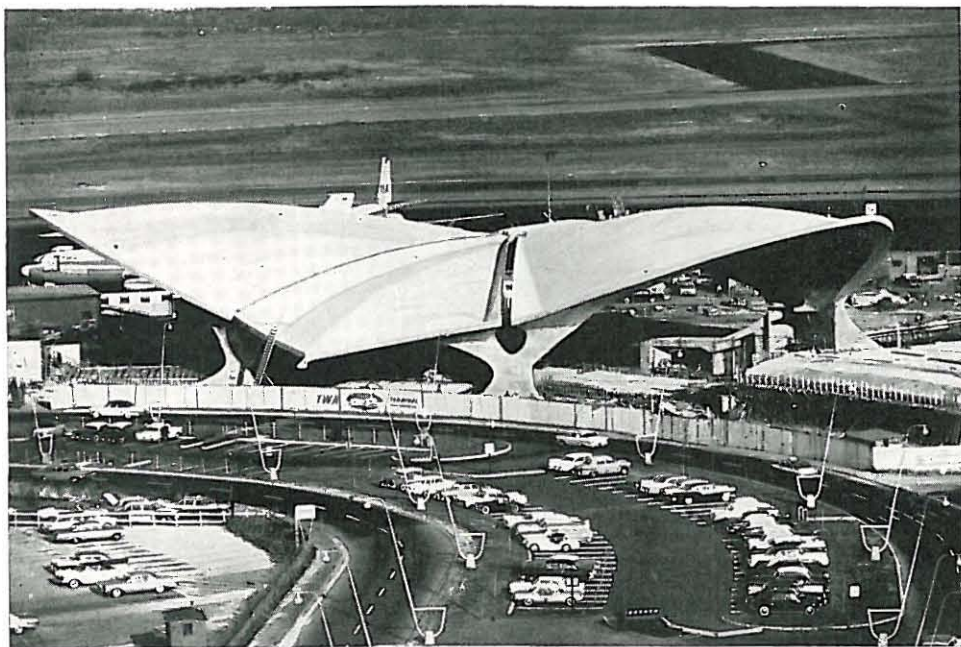


Bild 2 Halle der Fluggesellschaft TWA auf dem Flughafen New York International; Leichtbeton-Schalendach 90 m · 65 m mit Dicken bis hinab zu 15 cm; 28 Tage-Druckfestigkeit des Drehofenblähton-Betons im Mittel 410 kp/cm², verlangte Rohdichte 1,85 kg/dm³ [19]

Bild 3 zeigt das 22 Stockwerke hohe Brown Palace Hotel in Denver, Colorado, dessen gesamte Konstruktion aus Leichtbeton besteht [20]. Für die Stützen war eine 28 Tage-Druckfestigkeit von 410 kp/cm^2 vorgeschrieben und für die 24 cm dicken Flachdecken („Pilzdecken“ ohne verstärkte Stützenköpfe) eine Druckfestigkeit von 310 kp/cm^2 . Diese Festigkeiten wurden bei einer Frischbetonrohddichte von nur $1,54 \text{ kg/dm}^3$ erreicht. Dadurch verminderte sich gegenüber einer Ausführung in Schwebeton das für die Gründung maßgebende Gesamtgewicht des Gebäudes um 6800 t.



Bild 3 Brown Palace Hotel in Denver, Colorado. Die gesamte tragende Konstruktion ist aus Leichtbeton, Stützen in B 410, Decken in B 310; die Rohddichte betrug nur $1,54 \text{ kg/dm}^3$ [20]



Bild 4 Parkhochhaus in San José, Californien, aus Leichtbeton der Güte B 410 mit Drehofenblähton. Balken und Unterzüge sind vorgefertigt und vorgespannt; Decken, Säulen und Randträger in Ortbeton [21]

Leichtbeton der Güte 410 kp/cm^2 aus Blähton wurde bei der Parkgarage des San José State College, Bild 4, sowohl für die vorgespannten Fertigteile als auch für den Ortbeton der Säulen, Decken und Randträger benutzt [21].

Querschnitte und Abmessungen von vorgespannten Fertigteilbalken sind weitgehend vereinheitlicht, doch scheut man sich nicht, auch Einzelelemente von ungewöhnlichen Abmessungen als Fertigteile anzufertigen. Der in Bild 5 dargestellte, auf dem Transport befindliche, T-förmige, vorgespannte Leichtbetonbalken ist 45 m lang, 1,5 m hoch und 2,4 m breit; er wiegt rd. 45 t und wurde 29 km weit bis zum Einbau in eine Bowling-Halle transportiert. Der im Spannbett hergestellte Balken erhielt nach 16stündiger Wärmebehandlung bei einer Betondruckfestigkeit von 410 kp/cm^2 seine Vorspannung [22].

Um die Beispiele der vielfältigen Anwendung, die der Blähton-Leichtbeton findet, abzurunden, sei noch erwähnt, daß ferner aus ihm schwimmende Arbeitsbarken, die praktisch keine Unter-

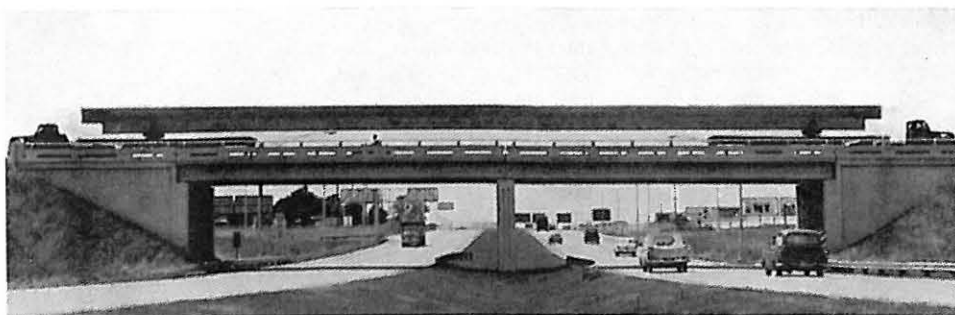


Bild 5 Vorgespannter, T-förmiger Leichtbetonträger aus Drehofenblähton auf dem Transport zur Einbaustelle (45 m lang, 1,5 m hoch und 2,4 m breit). Druckfestigkeit nach 16stündiger Wärmebehandlung 410 kp/cm^2 [22]

haltung fordern, gebaut werden [23], obwohl heute keine Stahlknappheit herrscht, die, wie im letzten Weltkrieg, im Schiffsbau ein Ausweichen auf Leichtbeton verlangte; im letzten Weltkrieg wurden in den USA 104 seegängige Leichtbetonschiffe gebaut [11]. Bemerkenswert ist auch, daß zur Gewichtsersparnis für Fahrbahnplatten von Brücken und Hochstraßen in vielen Fällen Leichtbeton hoher Festigkeit verwendet wird, wie z. B. für die Fahrbahnplatte einer Hochstraße der Brückenauffahrt nach Kansas City [24]. Dieser Leichtbeton stammte aus einem Transportbetonwerk.

Die guten Erfahrungen, die selbst mit direkt befahrenen Brückenplatten aus Leichtbeton gemacht wurden, veranlassen offenbar manche Behörden, diese Bauweise beizubehalten [11]. Aufschluß über die Bewährung solcher Brücken gibt eine Bestandsaufnahme, in der 150 Brücken in den USA und in Kanada aufgeführt sind, deren Fahrbahnplatten aus Leichtbeton mit Blähton hergestellt wurden und deren Baujahr bis etwa 1930 zurückliegt [25]. Mit wenigen Ausnahmen, denen offensichtliche Ausführungsfehler zugrunde lagen, haben sich die Brückenplatten aus Leichtbeton bewährt [26, 27].

Zum Teil wiesen die Brückenplatten einen dünnen bituminösen Belag oder in einigen Fällen auch eine dünne Schicht aus Schwerbeton auf. Über die Hälfte der Brückenplatten (86 Brücken), darunter eine Anzahl mit schwerem Verkehr, wird jedoch direkt befahren. Die meisten Brückenplatten ohne Belag finden sich in den Staaten Kansas, Nebraska und South Dakota. Der Zustand jener direkt befahrenen 25 Brückenplatten, die etwa 12 bis wenigstens 3 Jahre unter Verkehr lagen, wird durchweg als „gut“ bis „ausgezeichnet“ angegeben. (Für die meisten Brücken liegt jedoch nur eine Beobachtungsdauer von 6 bis 3 Jahren vor.)

2.3 Kosten und Wirtschaftlichkeit

Blähton ist im allgemeinen wesentlich teurer als natürlicher Schwerbetonzuschlag; der Unterschied ist in Gebieten ohne natürliche Zuschlagvorkommen kleiner. Nach Angaben des ESCSI kostete im Drehofen hergestellter Blähtonzuschlag 1958 ab Werk etwa 5 bis 7 \$ je yard³ [28], das sind 26 bis 37 DM/m³ *). Die große Preisspanne dürfte neben der Markt- und Rohstofflage auch auf Unterschiede in der Rohdichte und Kornfestigkeit zurückzuführen sein, da die Herstellungskosten weitgehend vom verarbeiteten Gewicht abhängen, der Verkaufspreis jedoch je Volumeneinheit berechnet wird; d. h. stärker aufgeblähter Zuschlag, der jedoch weniger korngfest ist, kann billiger sein.

Da Konstruktions-Leichtbeton meist auch einen höheren Zementgehalt als Schwerbeton gleicher Festigkeit und Verarbeitbarkeit erfordert, ist der Betonpreis aufschlußreicher. Üblicher Transportbeton kostet in den USA je nach Güte, Konsistenz und Ort 63 bis 73 DM/m³ [29]. Entsprechender Leichtbeton ist 16 bis 31 DM/m³ teurer, je nachdem in welcher Entfernung natürliche und geblähte Zuschläge verfügbar sind und ob der Zusatz eines

*) Für die Umrechnung wurde 1 \$ = 4 DM angenommen.

billigeren natürlichen Sandes möglich ist. Eine steigende Wirtschaftlichkeit macht sich vor allem bei Hochhausbauten mit über 10 Geschossen bemerkbar [30].

Tafel 1 zeigt die Kostengegenüberstellung eines 12geschossigen Hochhauses mit einer Grundfläche von 30 m x 60 m (5 x 10 Felder) auf wenig tragfähigem Untergrund (Pfahlgründung), das in B 300 einmal in Schwerbeton ($\rho = 2,40 \text{ kg/dm}^3$) und zum anderen in Leichtbeton mit Natursandzusatz ($\rho = 1,75 \text{ kg/dm}^3$) gemäß den US-Baubestimmungen durchgerechnet worden ist [17]. In der Kostengegenüberstellung wurde angenommen, daß der Konstruktions-Leichtbeton nur 11,25 DM/m³ teurer war als der Normalbeton, was nach den obigen Angaben für den Leichtbeton sehr günstig ist (aber auch bei einem höheren Leichtbetonpreis hätten sich noch Ersparnisse ergeben). Für die fertig verlegte Bewehrung wurde ein Preis von 1150 DM/t eingesetzt. Einsparungen hinsichtlich des Betonvolumens und des Gesamtgewichts der Konstruktion ergaben sich bei Verwendung von Leichtbeton dadurch, daß die Deckendicke von 20 cm auf 17,5 cm und der Querschnitt der quadratischen Säulen von 68 cm auf 59 cm vermindert werden konnten. Durch die Verwendung des Leichtbetons errechnete sich für dieses Gebäude eine Kostenersparnis von 180 000 DM (Rohbaukosten waren nicht genannt; ein Teil derselben, ohne Baustellenvorbereitung, Treppenhaus, Wände usw., läßt sich jedoch in etwa aus den obigen Einheitskosten für die reine Tragkonstruktion für Schwerbeton zu rd. 1 390 000 DM und für Leichtbeton zu rd. 1 210 000 DM errechnen; Verbilligung rd. 13 %).

Tafel 1 Gegenüberstellung der Kosten eines 12geschossigen Hochhauses auf wenig tragfähigem Grund in Schwerbeton und Leichtbeton [17]

Betonart und Rohdichte	Kosten in DM/m ² Deckenfläche für			
	Rahmen und Decken		Pfahlgründung	Gesamte Konstruktion
	Beton	Stahl		
Schwerbeton ($\rho = 2,40 \text{ kg/dm}^3$)	18,08	25,36	15,92	59,36
Leichtbeton ($\rho = 1,75 \text{ kg/dm}^3$)	17,64	21,96	12,04	51,64
Ersparnis bei Leichtbeton	0,44	3,40	3,88	7,72

Ähnlich lagen die Verhältnisse beim Statler Hotel in Los Angeles. Durch Einbau von 38 000 m³ Blähtonbeton konnten eine Gewichtsverminderung des Bauwerks um 33 500 t und eine Kostensenkung von insgesamt 15 % erzielt werden [11].

Bei den Stahlskelett-Hochhäusern werden die Decken häufig aus hochwertigem Leichtbeton hergestellt, was zu einer bemerkenswerten Einsparung an Profilstahl der tragenden Stiele und Riegel führt. Entsprechendes gilt für Stahlbrücken mit einer Betonfahrbahn aus Leichtbeton.

Allgemein wird in den Veröffentlichungen über Geschoßbauten und weitgespannte Konstruktionen aus Blähton die Minderung des Gesamtgewichts bevorzugt herausgestellt und vor allem auf die damit verbundenen geringeren Kosten für den Stahl und für die Gründung hingewiesen, die eine wirtschaftliche Anwendung des teuren Konstruktions-Leichtbetons ermöglichen.

2.4 Übersicht über Normen und Richtlinien

Nachfolgend wird eine Übersicht über zur Zeit in den USA bestehende Normen und Richtlinien zur Beurteilung der Leichtzuschlagstoffe, zur Zusammensetzung der Mischungen, zur Anwendung im Hochbau und zur Bemessung der Konstruktion gegeben.

2.4.1 Anforderungen an Leichtzuschlagstoffe

Die erstmals 1953 veröffentlichte, jetzt in der Fassung von 1960 vorliegende ASTM Standard C 330-60 T ist eine allgemein für Leichtzuschläge zu Konstruktionsbeton aufgestellte, vorläufige Vorschrift [31]; sie ist aber auch für Zuschläge zu Leichtbeton hoher Festigkeit von Bedeutung. Dieser Vorschrift wird vorangestellt, daß sie für Leichtzuschlagstoffe zu Beton gilt, dessen Hauptmerkmale leichtes Gewicht und Festigkeit sind⁹⁾.

Zuschlagstoffart. Zuschlagstoffe für Konstruktions-Leichtbeton können demnach durch Blähen, Glühen oder Sintern von Hochofenschlacke, Ton, Diatomeenerde, Flugasche, Schiefer-ton oder Tonschiefer hergestellt oder aus natürlichen Vorkommen (Bims, Lavaschlacke, Tuff) aufbereitet werden.

Kornzusammensetzung. Die Zuschlagstoffe sind in Korngruppen unterteilt, nach denen sie zu liefern sind; für jede Korngruppe werden Grenzwerte für den noch zulässigen Anteil an Über- und Unterkorn oder bei Korngemischen auch für den Anteil an Zwischenkorn angegeben. Auf Maschensiebe bezogen, finden sich als „feiner“ Zuschlag die Korngruppe 0/4,8 mm und als „grober“ Zuschlag die Korngruppen 2,4/9,4 mm, 4,8/13 mm, 4,8/19 mm, 4,8/25 mm sowie 13/25 mm. (Für Leichtbeton hoher Festigkeit kommen in erster Linie die Korngruppen bis 19 mm Größtkorn in Frage, da die Kornfestigkeit mit zunehmendem Korndurchmesser abnimmt.)

Schüttdichte. Lose geschüttet soll trockener „feiner“ Zuschlag höchstens 1,12 kg/dm³ und „grober“ höchstens 0,88 kg/dm³ wiegen. Wird der Zuschlag gemischt geliefert (Größtkorn dann 13 mm), so darf die Schüttdichte höchstens 1,04 kg/dm³ erreichen. Lieferungen dürfen nicht mehr als $\pm 10\%$ vom vereinbarten Schüttgewicht abweichen.

Schädliche Bestandteile und Frostbeständigkeit. Weiter enthält die ASTM Standard C 330-60 T Anforderungen an die Sauberkeit

⁹⁾ Für leichte Zuschlagstoffe zu Mauerwerkselementen gibt es eine entsprechende Vorschrift [32].

und Prüfverfahren auf Gehalt an Tonklumpen und auf Rostfleckebildende Bestandteile. Der Glühverlust darf 5 % nicht überschreiten. Soweit keine Erfahrungen vorliegen, soll nötigenfalls durch Kurzprüfung des Zuschlags (Natrium- oder Magnesiumsulfatversuch nach ASTM Standard C 88) oder durch eine Frostprüfung des Betons die Beständigkeit des Zuschlags beurteilt werden.

Betoneigenschaften. Der Leichtzuschlagstoff soll einen Beton liefern, der nach 28 Tagen die Forderungen der Tafel 2 erfüllt. Druckfestigkeit und Rohdichte sind an Zylindern 15/30 cm zu bestimmen, die bei rd. 23 °C 7 Tage feucht und 21 Tage an der Luft bei rd. 50 % relativer Luftfeuchte erhärten. — Die Schwindverkürzung eines knapp weich angemachten Betons aus 1 RT Portlandzement und 6 RT des Zuschlaggemisches (Setzmaß 5 bis 7,5 cm) soll, auf die Ausgangsmessung nach 7 Tagen bezogen, nach 100 Tagen 1,0 mm/m nicht überschreiten. — Im Autoklav geprüft, dürfen sich am Beton keine Kornaussprengungen einstellen.

Diese schon über 10 Jahre allgemein für Leichtzuschläge vorliegenden Vorschriften sehen also verhältnismäßig vielseitige Prüfungen vor, die für Blähton aus dem Drehofen nicht immer oder laufend nötig erscheinen.

Ein Verfahren zur Beurteilung der für Beton hoher Festigkeit erforderlichen Kornfestigkeit enthalten die Bestimmungen nicht. Es ist dazu bekannt, daß alle Untersuchungen in den USA, ein solches Kriterium zu schaffen, bisher zu keinem nutzbaren Ergebnis geführt haben [33]. Zuverlässiger scheint nach dortiger Ansicht offenbar die Beurteilung eines Leichtzuschlages durch Prüfung über die Betonfestigkeit und -rohichte mit einer einheitlichen Betonmischung zu sein (siehe aber auch unter 3.2.3 — Abschnitt Kornfestigkeit).

Die Bedingungen der Tafel 2 können auch von Leichtzuschlägen erfüllt werden, die eine wesentlich geringere Güte aufweisen als in der Regel der im Drehofen gebrannte Blähton. Durch strengere Anforderungen zeichnen sich die Zulassungsbedingungen für Drehofenwerke zum ESCS-Institut aus [34]. Aufgenommen werden nur Werke, die ausschließlich solchen Zuschlag herstellen, der einen Leichtbeton mit einer Rohdichte von höchstens 1,60 kg/dm³ und einer Würfeldruckfestigkeit von mindestens 260 kp/cm² ermöglicht; der Zementgehalt dieses Prüfbetons darf

Tafel 2 Anforderungen an Druckfestigkeit und Rohdichte von Konstruktionsbeton aus beliebigen leichten Zuschlagstoffen nach ASTM Standard C 330-60 T (umgerechnet auf Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen)

Druckfestigkeit (mindestens)	Rohdichte (höchstens)
kp/cm ²	kg/dm ³
330	1,84
250	1,76
160	1,68

335 kg/m³ nicht überschreiten. Derzeit werden Überlegungen angestellt, die Festigkeitsanforderungen bei sonst gleichen Bedingungen auf rd. 285 kp/cm² anzuheben [17]. Ob bei dieser Zulassungsprüfung auch die Zementnormfestigkeit, die Kornzusammensetzung und die Konsistenz und damit der wirksame Wasserzementwert eingegrenzt sind, ist nicht bekannt.

2.4.2 Anleitung für den Mischungsaufbau des Konstruktions-Leichtbetons

Für Konstruktions-Leichtbeton hat ein Unterausschuß des ACI-Komitees 613 eine Anleitung für die Aufstellung der Leichtbetonmischungen herausgegeben [35]. (Unter Konstruktions-Leichtbeton wird dabei Beton mit geschlossenem Gefüge verstanden, der nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von mehr als 165 kp/cm² und eine Trockenrohichte von höchstens 1,84 kg/dm³ aufweist.)

Neben Hinweisen auf die u. U. große Wasseraufnahme, auf den wirksamen Wasserzementwert und auf die von der Korngröße abhängige Kornrohichte und deren Berücksichtigung bei der Errechnung der Kornzusammensetzung finden sich Richtwerte für ein erfahrungsgemäß günstiges Verhältnis von „Feinem“ zu „Grobem“ und für den Hohlraumgehalt des Zuschlaggemisches sowie für den Wasser- und Zementgehalt des Frischbetons für Druckfestigkeiten zwischen 165 und 410 kp/cm². Der Gang der Errechnung der Mischungsbestandteile wird wiedergegeben (Weiteres unter 4.).

2.4.3 Bemessung des Konstruktions-Leichtbetons (Stahlbetonbestimmungen)

Einleitend werden in der kürzlich erschienenen Neufassung der ACI-Stahlbetonbestimmungen [36] immer vorausgehende Prüfungen (Eignungsprüfungen) verlangt, wenn leichte Zuschlagstoffe benutzt werden (Abschnitt 502). Als Leichtzuschlagstoffe gelten hier solche, deren Schüttdichte im trockenen Zustand höchstens 1,12 kg/dm³ erreicht. In diesen Bestimmungen für schlaff bewehrten und vorgespannten Beton ist der Konstruktions-Leichtbeton im wesentlichen gleich behandelt wie der übliche Schwerbeton der Güteklassen 200, 250, 330 und 410 kp/cm² (siehe Fußnote 7); bemessen werden kann nach dem Gebrauchslastverfahren (n-Verfahren) oder nach dem Bruchlastverfahren (n-freies Verfahren).

Bei einer Bemessung nach dem Gebrauchslastverfahren darf nach Abschnitt 1102 [36] der E-Modul für Leichtbeton bis hinab zu einer Rohdichte von 1,44 kg/dm³ ebenso groß eingesetzt werden wie der für Schwerbeton gleicher Festigkeit. (Dies gilt jedoch nicht für die Berechnung der Durchbiegungen.) Die zulässigen Spannungen bei Beanspruchung auf Biegung mit und ohne Längskraft sowie auf Druckspannungen, Abschnitt 1002, sind die gleichen wie für Schwerbeton. Werden die Schubspannungen durch die Bewehrung aufgenommen, so kann der Leichtbeton bei beiden Berechnungsverfahren wie Schwerbeton behandelt werden; ohne Schubbewehrung sind die zulässigen Schubspannungen kleiner (Weiteres unter 6.).

2.4.4 Konstruktions-Leichtbeton im Hoch- und Ingenieurbau

Auch die neuen, 1963 erschienenen „Richtlinien für Beton im Hochbau“ des American Concrete Institute [37] schließen den Leichtbeton ein. Es finden sich Angaben über das Vornässen des Zuschlags (Abschnitt 205), die Lagerung der Probezylinder (7 Tage feucht und dann an der Luft; Abschnitt 303b) und den Mindestluftgehalt zum Schutz bei starker Frost- oder chemischer Einwirkung. Gemäß Abschnitt 304 soll dann allgemein der Wasserzementwert nicht größer als 0,53 sein und der LP-Gehalt bei Leichtbeton mindestens 6 % erreichen. (Es ist zu beachten, daß hier Leichtbetone aus den Zuschlägen sehr unterschiedlicher Beschaffenheit nach [31] einbezogen sind.) Auch wenn keine besonderen äußeren Einwirkungen zu erwarten sind, wird für Leichtbeton ein künstlicher Luftporengehalt als nötig erachtet; dieser LP-Gehalt wird in Abhängigkeit von der Festigkeitsgütekategorie angegeben (Tafel 307 b in [37]).

Das Nenn-Größtkorn für Leichtzuschlag soll 19 mm nicht überschreiten (306c). Mischungen mit Leichtzuschlagstoffen sollen durch Vorversuche mit mindestens 3 Zementgehalten ausgewählt werden. Jene Mischung ist für die Ausführung vorzusehen, deren Druckfestigkeit für die statische Berechnung nach dem Gebrauchslastverfahren mindestens 15 % und bei Berechnung nach dem Bruchlastverfahren und bei Spannbeton mindestens 25 % über der verlangten Betongüte liegt.

In Abschnitt 703 [37] sind schließlich einige Hinweise für die Zugabe des LP-Zusatzmittels und des Mischwassers enthalten.

3. Herstellen des Blähtons im Drehofen

3.1 Rohstoff und Blähvorgang

Tonhaltiger Rohstoff (Ton, Schieferon, Tonschiefer)¹⁰⁾, der beim Brennen blähen soll, hat unabhängig von der vorausgegangenen Aufbereitung zwei Bedingungen zu erfüllen; er muß

bei höherer Temperatur eine Schmelzphase mit ausreichend hoher Viskosität bilden, damit der Austritt eines gegebenenfalls entstehenden Gases verhindert wird, und

Stoffe enthalten, die bei oder ein wenig über der Entstehungstemperatur der Schmelzphase allein oder durch gegenseitige Reaktion aufblähende Gase entwickeln.

Die Temperatur, die diese beiden Vorgänge auslöst, liegt je nach Zusammensetzung und Gefüge des Rohstoffs meist zwischen 1000 und 1200 °C. Manche Rohstoffe blähen erst bei wesentlich höheren Temperaturen; sie werden wegen der höheren Brennkosten, insbesondere wenn sie Brenntemperaturen über etwa 1300 °C verlangen, als wenig geeignet bezeichnet [38, 39].

¹⁰⁾ Schieferon ist aus Ton entstanden, der durch geophysikalische Vorgänge entwässert und gepreßt worden ist. Durch stärkere Pressung (Druck und Schub) entstand der festere Tonschiefer. Bei Wasserlagerung zerfließt der Ton, der Schieferon quillt stark auf, und Tonschiefer vergrößert sein Volumen nur noch wenig.

Es ist naheliegend, daß man aus der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der tonhaltigen Rohstoffe Richtwerte für ihre Eignung als Blähton abzuleiten versuchte. Hierüber liegen zum Teil eingehende Untersuchungsberichte, darunter auch einige deutsche, vor [3, 38 bis 48] 11). Sie befassen sich teils mit bestimmten Tongesteinen und besonderen Brennvorvorgängen oder mit dem Brennverhalten eines breiteren Bereichs der Stoffzusammensetzung.

Es würde zu weit führen, im folgenden alle Feststellungen aus den einzelnen Berichten wiederzugeben. Mit einigen wesentlichen Feststellungen soll jedoch auf die Vielartigkeit der Einflußgrößen und ihre kaum auf einen einheitlichen Nenner zu bringenden Zusammenhänge hingewiesen werden.

In dem mehr oder weniger festen, in den Ofen gegebenen feinkörnigen Gut (Rohkorn selten über 25 bis 30 mm) sollen sich in einem nicht zu hoch liegenden Temperaturbereich eine Schmelze und möglichst kleine, gleichmäßig verteilte, in sich geschlossene, blähende Gasporen bilden. Durch die Schmelze sollen auch eine feste Verbindung der Gemengteile sowie eine möglichst porenfreie, glatte und gerundete Kornoberfläche entstehen.

Schmelzfluß. Damit sich bei dem in Frage kommenden Temperaturbereich ein Schmelzfluß genügend hoher Viskosität bildet, muß im

11) Das hier angeführte Schrifttum dürfte die bekanntesten Arbeiten enthalten. Einige weitere Berichte finden sich in den Quellenverzeichnissen der einzelnen Arbeiten; in [49] ist auch Schrifttum aus den osteuropäischen Ländern aufgeführt.

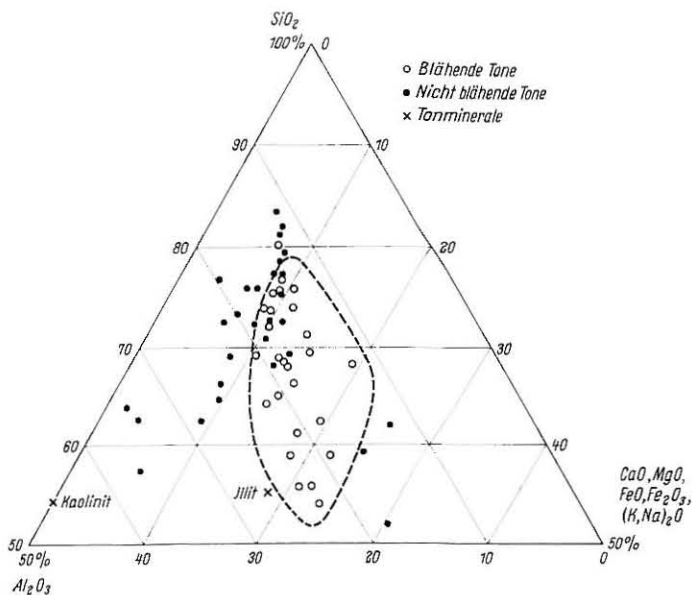


Bild 6 Dreistoffdiagramm für Blähton nach Ch. M. Riley [38]. Die gestrichelte Linie begrenzt den Bereich, in dem ein für Blähton günstiges Schmelzverhalten zu erwarten ist

Rohstoff neben den vorwiegenden sauren Bestandteilen (SiO_2 und Al_2O_3) ein bestimmter Anteil basischer Stoffe (CaO , MgO , Na_2O , K_2O , FeO und Fe_2O_3) enthalten sein. Der für Blähton brauchbare Bereich der chemischen Zusammensetzung wurde wiederholt in einem Dreistoffdiagramm dargestellt [38, 39, 42, 45, 49]. Bild 6 gibt ein von Ch. M. Riley aufgestelltes Diagramm wieder [38], in das auch die Werte aus [42] eingetragen wurden. Der für Blähton günstige Bereich wurde von Riley durch die gestrichelte Linie eingegrenzt. Danach liegt der Anteil der Kieselsäure zwischen 55 und 78 Gew.-%, der der Tonerde zwischen 12 und 25 Gew.-% und der der Summe der basischen Bestandteile zwischen 8 und 25 Gew.-%. Eine hiernach passende Zusammensetzung für die Bildung einer Schmelze besagt jedoch noch nicht, daß eine ausreichende Blähwirkung auftritt; zudem sind auch geeignete Bläh-tone außerhalb der in diesem Diagramm eingetragenen Grenzlinie möglich. Andere Autoren geben Grenzwerte für das Verhältnis verschiedener Stoffgruppen [49, S. 70] oder verschiedener Tonminerale an. Zum Beispiel wird ein günstiges Blähverhalten allgemein von Tongesteinen mit einem bestimmten, niedrigen Carbonatgehalt erwartet, bei denen das Verhältnis von Illit zu Kaolinit größer als 2:1 ist [39]. Die jeweils günstigste Zusammensetzung der Schmelzphase hängt auch von der Art und Menge der gasbildenden Nebenbestandteile ab.

Gasentwicklung. Als gasbildende Nebenbestandteile wurden Calcit (CaCO_3), Dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) und andere Carbonate festgestellt sowie Pyrit (FeS_2) und Hämatit (Fe_2O_3) [38, 39, 45] und als blähende Gase CO_2 und z. T. in geringer Menge SO_2 [39]. Bei anderen Untersuchungen [44] wurde als auslösende Ursache Sauerstoff gefunden (offenbar nur bei hohem Fe_2O_3 -Gehalt bedeutsam [39]), ferner SO_3 und H_2O [38, 46]. Es wird auch angenommen, daß organische Nebenbestandteile das Blähen bewirken [47]. Nicht blähende Tongesteine konnten durch Aufbereiten mit Zusätzen verbessert werden; für die praktische Anwendung werden hierfür Calcit, Pyrit, Hämatit und Nephelinsyenit empfohlen [39], aber auch Sulfitablauge, Kohle, Koks, Sulfate, Alkalicarbonate [42] und schweres Heizöl mit hohem C-Rückstand. Dieses bewirkte besonders ausgeprägtes Blähen, wenn es mit Natronlauge emulgiert wurde [3]. Schon Bruchteile oder wenige Prozente der gasbildenden Bestandteile reichen für das Blähen aus, wenn die Schmelz- und Gasentwicklungstemperatur eng zusammenliegen.

Am Beispiel der CO_2 -Entwicklung aus dem Calcit, die ab etwa 885 °C sehr schnell abläuft, erkennt man, daß die Schmelze sich in diesem Fall immer schon bei einer verhältnismäßig niedrigen Temperatur bilden muß. Eine Gasentwicklung etwas unterhalb der Schmelztemperatur kann auch noch zum Blähen führen, da die Temperatur im Kern eines Kornes niedriger ist und die Gasentwicklung dort erst einsetzt, wenn die Kornoberfläche durch eine Schmelzhaut bereits geschlossen ist.

Kornaufbau und Textur. Der Kornaufbau und die Textur des Rohstoffes sollen ebenfalls von Einfluß auf das Blähen sein [43, 45]. Als günstig wurde ein hoher Gehalt an Teilchen unter 0,002 mm [44], ebenso ein hoher Glimmer- und Montmorillonit-Gehalt, also Drei-

schicht-Tonminerale, angesehen [43, 44, 45]. Andererseits wird bei einer Laminartextur des Rohstoffkorns angenommen, daß das Gas parallel zu den Schichten leicht entweichen kann, sofern die Kornoberfläche nicht durch Kneten und Kollern geschlossen wird [3]. Je nach Stoffzusammensetzung und Textur sind die Erhitzungsgeschwindigkeit und die Größe der zu brennenden Körner von Bedeutung. Große Körner verlangen höhere Temperaturen bzw. längeres Einwirken der Hitze, sonst sind sie im Kern noch nicht gebrannt [43], während kleinere, sich rascher erhitzende Körner bei zu hoher Temperatur oder zu langer Einwirkung durchschmelzen, wobei das Gas entweicht. Körner bis etwa 2 mm weisen somit allgemein einen geringeren Porengehalt auf [46]. Hochwertige Erzeugnisse werden daher zweckmäßig in möglichst enge Korngruppen aufgeteilt und im Drehofen mit der jeweils passenden Temperatur und Einwirkungsdauer getrennt gebrannt [3].

Untersuchung eines Vorkommens. Im ganzen gesehen wirken also beim Schmelzen und Blähen von Tongestein äußerst komplexe Vorgänge zusammen. Es ist darum verständlich, daß die in den Berichten hierzu aufgeführten Feststellungen nicht immer zu gleichen Folgerungen führten. Man muß deshalb beachten, daß jeder Rohstoff von seiner Zusammensetzung, Korngröße, Textur und Aufbereitung her ein jeweils anders reagierendes Individuum ist, das zum Blähen ein jeweils abgestimmtes Brennen verlangt.

Bei den verschiedenen Untersuchungen waren die einwirkende Temperatur und die Erhitzungsgeschwindigkeit meist nicht einheitlich; auch die Ofenatmosphäre, die anscheinend ebenfalls von Einfluß ist, war verschieden (Untersuchungen hierüber siehe [3, 41, 45, 47]). Während in den elektrisch oder in manchen gasbeheizten Laboratoriums-Muffelöfen auf ein ruhendes Brenngut gewöhnlich eine oxydierende Atmosphäre eingewirkt haben dürfte, wird das Gut in den Drehöfen der Werke vielfach in einer reduzierenden Atmosphäre bewegt [3].

Zweifellos wird es dem Mineralogen möglich sein, mit den bis heute gewonnenen Erkenntnissen festzustellen, ob ein Rohstoffvorkommen zur Erzeugung von Blähton voraussichtlich geeignet erscheint, siehe z. B. [48]. Nach dieser ersten Beurteilung sind dann um jeweils 50 °C ansteigende Erhitzungsversuche im Bereich von etwa 1000 bis 1250 °C in einem einfachen Laborofen aufschlußreicher und weniger aufwendig als weitere, eingehende chemisch-mineralogische Untersuchungen. Bei entsprechenden Versuchen in den USA wurde die jeweilige Endtemperatur 3, 5, 10 oder 15 min gehalten und dann abgekühlt, oder es wurde auch nur ein 15minütiges Verweilen bei der Endtemperatur als ausreichend erachtet [39]. Eine Bestätigung für die Brauchbarkeit eines Rohstoffes unter betriebsähnlichen Bedingungen ist dann durch weitere Versuche im großtechnischen Maßstab oder wenigstens in einem großen Laboratoriumsdrehofen zu erhalten.

3.2 Verfahrenstechnik

3.2.1 Aufbereiten des Rohstoffes

Je nach Beschaffenheit des Rohstoffes wird das kornförmige Aufgabegut für den Drehofen verschiedenartig aufbereitet. (Die nach-

folgenden Ausführungen beziehen sich neben Schiefer-ton zum Teil auch auf Ton und Tonschiefer.)

Ton. Der plastische Rohstoff Ton wird z. B. im Kollergang durch eine Schlitz-Bodenplatte hindurchgepreßt oder auch mit dem Tonraspler zerkleinert, in einem Doppelwellen-Zwangsmischer auf die erforderliche Konsistenz gebracht und anschließend durch ein gegenläufiges Walzenwerk geschickt. Das einlaufende Gut trocknet im vorderen Teil des Drehofens und wird, soweit nötig, durch Einbauten noch weiter aufgeteilt [43, 50, 51, 52]. Noch mehr ähnelt die Aufbereitung derjenigen im Ziegelwerk, wenn in einer Ziegel- presse mit gelochtem Mundstück der Ton in Stränge gepreßt und mit dem Tonschneider in Granalien zerteilt wird; ihr Durchmesser hängt von der Lochung ab. Die Granalien können ebenfalls ohne Vortrocknung direkt in den Ofen gefördert werden [52]. Bei beiden Verfahren wird das Aufgabegut durch die Drehbewegung des Ofens gekollert und weiter gerundet.

Grob zerkrümelter Ton verhielt sich beim Brennen nicht so günstig wie der gleiche grubenfeuchte Ton, der durch die Strangpresse geführt wurde. Der Ton soll entweder von Natur aus eine gewisse Textur aufweisen oder diese durch die Strangpresse erhalten [43] (Einschränkung hinsichtlich der Textur siehe unter 3.1).

Man kann auch, wie für das Zementbrennen im Schachtofen oder auf dem Sinterband, körniges Gut (Granalien) auf dem Granulierteller oder in einer Granuliertrommel bilden. Dies setzt aber bei Ton ein künstliches Trocknen und Zermahlen voraus, damit er dem Granuliergerät als Feinmehl zugeführt werden kann; unter Wasserzugabe werden dann Granalien gebildet. Die in jedem Falle erforderliche Behandlung des Tons erlaubt nötigenfalls die Zugabe von blähenden Zusätzen oder Flußmitteln, außerdem können andere geeignete Rohstoffe, wie z. B. Flugasche, zugesetzt werden.

Schiefer-ton und Tonschiefer. Der Aufwand für die Tonaufbereitung ist verhältnismäßig groß und wirtschaftlich einengend. Schiefer-ton und Tonschiefer sind leichter aufzubereiten. Bevorzugt wird in den USA Schiefer-ton gebläht. Er kann mit dem Bagger oder Schrapper abgebaut, gebrochen, nach Korngruppen abgesiebt und ohne weitere Vorbereitung in den Drehofen gegeben werden. Das gleiche gilt für Tonschiefer; dieser fällt aber meist in ungünstiger Kornform (plattig, spießig) an.

Das Brennen von gemischt-körnigem Brechgut mitsamt den Feinanteilen führt häufig zu Schwierigkeiten im Ofengang (siehe unter 3.2.2). Staub und feines Brechgut werden daher zweckmäßig vorher weitgehend entfernt.

Um ein gleichmäßiges Blähen und Brennen bis zum Kern des Kornes zu erhalten und um ein nachträgliches Brechen zu großer Körner zu vermeiden, sollte man das Größtkorn des Rohstoffes auf das des fertigen Blähtons einstellen. (Für hochfesten Konstruktions-leichtbeton eignen sich im allgemeinen nur Blähton-Körner bis 20 mm Durchmesser, siehe unter 4.2.2.) Dabei ist zu beachten, daß das Volumen des ursprünglichen Rohkornes durch das Blähen um ein Mehrfaches zunehmen kann. Werden zu große Körner nach

dem Brennen durch Brechen zerkleinert, manchmal auch um mehr „Feines“ zu erhalten, so sind diese gebrochenen kleineren Körner betontechnisch ungünstig, weil sie kantig, offenporig und vor allem wenig fest sind.

3.2.2 Ofenbetrieb

Drehöfen. Die mit einem feuerfesten Futter versehenen Drehöfen entsprechen etwa kleineren Zementdrehöfen. In den Drehöfen, die mit Öl, Kohlenstaub oder Erdgas befeuert werden, läuft das Gut vom etwas erhöhten Beschickungsende gegen den am Austragsende eingeführten Brenner. Die größeren, meist neueren Öfen sind 40 bis 60 m lang und haben Durchmesser von etwa 2 bis 3,5 m. Die Länge der kleineren Öfen liegt bei 15 bis 20 m, ihr Durchmesser bei 1 bis 2 m. Das Rohr dreht sich etwa 1,5- bis 3,5mal in der Minute, also wesentlich schneller als bei der Zementherstellung. Die Umdrehungsgeschwindigkeit ist regelbar. Die Korngruppen mit kleinem Durchmesser benötigen naturgemäß eine kürzere Brenndauer (vgl. Abschnitt 3.1); sie werden daher schneller durchgesetzt, d. h. die Umdrehungsgeschwindigkeit ist etwas höher als beim Brennen der größeren Korngruppen.

Leistung. Die Leistung wird je nach Ofen und Werkseinrichtung unterschiedlich angegeben; als unterer Bereich finden sich Tagesleistungen von etwa 100 bis 200 m³ Blähton je Ofen. Als Leistung für moderne Anlagen mit einem Ofen wurden z. B. rund 765 m³ [4, 53], für solche mit zwei Öfen rd. 1000 m³ [13] Blähton angegeben.

Betriebsanlage. Zu einer Drehofenanlage gehören an der Aufgabeseite Vorratslager für das Bruchmaterial, Brecher, Siebe, Silos, Drehofen mit Beschickungsvorrichtung und am Austragsteil der Brenner mit Beobachtungsstand und Instrumententafel, Kühler, Siebe, Brecher für gegebenenfalls anfallendes Überkorn, Vorratsilos. Dazu kommen die Fördereinrichtungen (z. B. Bänder), Gebläse, Entstaubungsanlagen usw.; siehe Bild 7.

Als Anlagekosten für zwei neuere Werke in den USA mit einem bzw. zwei Drehöfen und einer Leistung von rd. 765 m³ Zuschlag (Crestlite, San Clemente, Calif.) und rd. 1000 m³ Zuschlag (Norlite, Cohoes, N. Y.) wurden 7,2 bzw. 8 Millionen DM genannt [13, 39].

Temperatur. Die Temperaturen, denen das Gut beim Eintritt in den Ofen ausgesetzt ist, liegen je nach Unterteilung des Ofens im vorderen Teil bei etwa 200 bis 600 °C und am Ofenende in der eigentlichen Schmelz- und Blähzone häufig um etwa 1150 °C. Die gesamte Durchlaufzeit ist etwa 30 bis 45 min [52, 53], wobei schon ein Verweilen von wenigen Sekunden bei der für den jeweiligen Rohstoff zweckmäßigsten Höchsttemperatur als ausreichend angesehen wird [43]. Eine besonders günstige Oberflächenbeschaffenheit soll erzielt werden, wenn bereits zwischen Auslauf und Flamme eine Abkühlzone mit oxydierender Atmosphäre geschaffen wird [3]. Der Einfluß langsamen oder raschen Abkühlens in der Kühltrommel scheint noch nicht ausreichend untersucht zu sein [3].

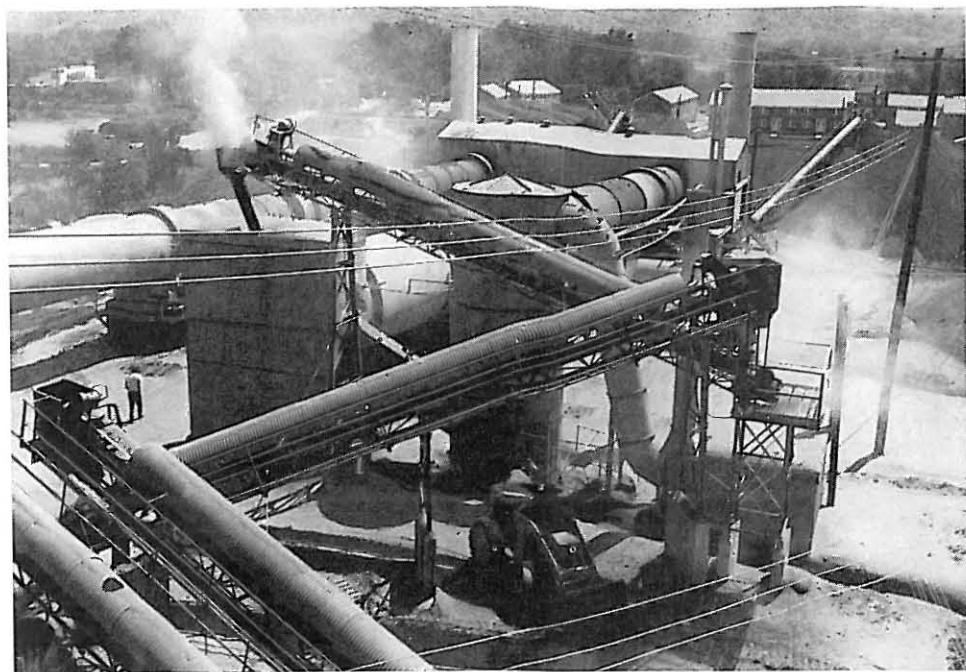


Bild 7 Blähtonwerk der Northern Lightweight Aggregate Inc. bei Albany (USA) mit 2 Drehhöfen von 52 und 60 m Länge. Leistung rd. 1000 m³ Blähtonzuschlag in 24 Stunden (Photo Rock Products [13])

Brennstoffverbrauch. Über den Brennstoffverbrauch liegen nur einige, wenig bestimmte Angaben vor [11]; er betrug demnach in den USA in den Jahren um etwa 1950 je m³ Blähton rd. 80 l Öl oder rd. 150 bis 210 kg Kohle. Nach [49] belief sich der Kohlebedarf auf etwa 15 % des Gewichts des Aufgabegutes. Dieser Wärmeverbrauch, der nach der Größenordnung in etwa mit einigen für Keramsit aufgeführten Verbrauchswerten (1000 bis 1400 kcal je kg Blähton) übereinstimmt [52], würde demnach höher als der Wärmeverbrauch beim Brennen des Zementklinkers in wärme-sparenden, modernen Trockendrehhöfen liegen (etwa 800 bis 900 kcal/kg Klinker). Beim Vergleich des Wärmeverbrauchs für Zement und Blähton ist zu beachten, daß einerseits Zement mit etwa 1450 °C wesentlich höher gebrannt wird und daß der Anteil der zu entsäuernden Bestandteile (CaCO₃) im Zement um ein Vielfaches größer ist (was beides zu größerem Wärmeaufwand bei Zementklinker führt). Andererseits ist jedoch die Klinkerbildung im Zementdrehofen ein exothermer Vorgang, und der Blähton wird im Gegensatz zum Zement häufig in reduzierender Atmosphäre gebrannt (was beides zu einem vergleichsweise größeren Wärmeaufwand bei Blähton führt).

Der Wärmeverbrauch des Blähtons wird maßgeblich durch den Wassergehalt des Rohstoffs und durch die nicht selten hohen Abgastemperaturen bestimmt. Exotherme Vorgänge in einigen kohlenstoffhaltigen Schiefertönen können nur bis zu 5 % des

Wärmebedarfs decken [3]. Vermutlich könnte der oben genannte Wärmebedarf für Blähton durch eine verbesserte Wärmeausnutzung, ähnlich wie beim Zementbrennen, noch gesenkt werden. Wenn solche Möglichkeiten in den USA weniger genutzt werden, so dürfte dies in dem dort niedrigeren Brennstoffpreis begründet sein.

Ofengang. Leicht zu schmelzendes Gut neigt von Natur aus zu Ring- und Klumpenbildung. Dazu tragen auch die feinsten Bestandteile bei, die viel Schmelze liefern und aus dem Aufgabegut weitgehend entfernt werden sollten. Die Ringbildung kann bei Kohlenstaubfeuerung durch Kohlenasche verstärkt werden. Ein störungsfreier Betrieb läßt sich einfacher durchführen, wenn nur eng begrenzte Korngruppen für sich gebrannt werden. Doch war es möglich, auch zwei Korngruppen eines nicht zu breiten Bereichs gemeinsam zu brennen. Um das Zusammen- und Anbacken zu vermeiden, wurde auch schon mit zwei voneinander getrennten Brennern erhitzt. Der erste Brenner war gleichlaufend zur Ofenachse gerichtet und erhitzte das Gut vor, während der zweite kurz vor dem Auslauf gegen die Ofenfüllung gerichtet war und das Gut am Ofenende sehr rasch auf die eigentliche Blähtemperatur brachte [11].

In schwierigen Fällen wird dem Ofen zusätzlich ein Feinmehl mit wesentlich höherer Schmelztemperatur, als sie das eigentliche Ofengut aufweist, zugeführt [3, 11, 40]. Dieses Feinmehl bildet dann beim Schmelzen der Kornoberfläche eine Puderschicht, die das Zusammenbacken verhindert. Bei der Herstellung von Granalien kann eine solche Schicht, z. B. aus Quarzmehl oder feuerfestem Ton, schon beim Granulieren aufgebracht werden [3]. (Es besteht auch die Möglichkeit, ein schwer im Drehofen zu blähendes Material auf dem Sinterband zu brennen [54] und anschließend zu brechen; dies führt allerdings zu ungünstigerer Kornform und -oberfläche.)

Eine sorgfältige laufende Überwachung des Ofenganges durch einen erfahrenen Brenner und die laufende Prüfung des ausgetragenen Blähtons auf Korngröße, Oberflächenbeschaffenheit und Schüttgewicht dürften in der Regel die einfachsten und oft zuverlässigsten Maßnahmen sein, Betriebsstörungen zu vermeiden und einen hochwertigen Zuschlagstoff gleichbleibend zu erzeugen. Über neuere, weitgehend automatisch geführte Drehöfen mit Temperaturregelung und gekoppelter Bestimmung der Rohdichte des Blähtons [53] sind keine Erfahrungen bekannt geworden. Automatisierte Regelungen, die in Zementwerken bereits zur Zufriedenheit arbeiten, können eine Hilfe bedeuten; Voraussetzung wäre jedoch, daß das im Vergleich zu Zementrohmehl nur wenig aufbereitete Ton-Aufgabegut nach Zusammensetzung und Körnung sehr gleichmäßig bleibt, weil nur dann ein gleichbleibendes Schmelz- und Blähverhalten der Körner gewährleistet ist.

3.2.3 Güteermkmale des Blähtonzuschlags

Gefügebesehschaffenheit. Für leichten Konstruktionsbeton hoher Festigkeit soll das Korn des Blähtonzuschlags fest, kantengerundet, gedrunen, im Innern gleichmäßig feinporig und mit glatter, dichter Oberfläche entstehen; siehe Bilder 8 a, 8 b und 8 c.



Bild 8 a Blähtonzuschlag „Materialite“ der Material Service Company, Chicago; im Drehofen gebrannter Schieferlon; Korngruppe 9,5/19 mm. Betondruckfestigkeiten von rd. 500 kp/cm² mit etwa 390 kg/m³ PZ I bei einer Rohdichte von etwa 1,55 kg/dm³ (Photo J. J. Shideler)



Bild 8 b Blähtonzuschlag „Idealite“ der Idealite Company, Denver; im Drehofen gebrannter Schieferlon; Korngruppe 9,5/25 mm. Betondruckfestigkeiten von rd. 500 kp/cm² mit etwa 350 kg/m³ Zement bei einer Rohdichte von etwa 1,50 kg/dm³. Rechts unten Schnitt S durch ein Zuschlagkorn

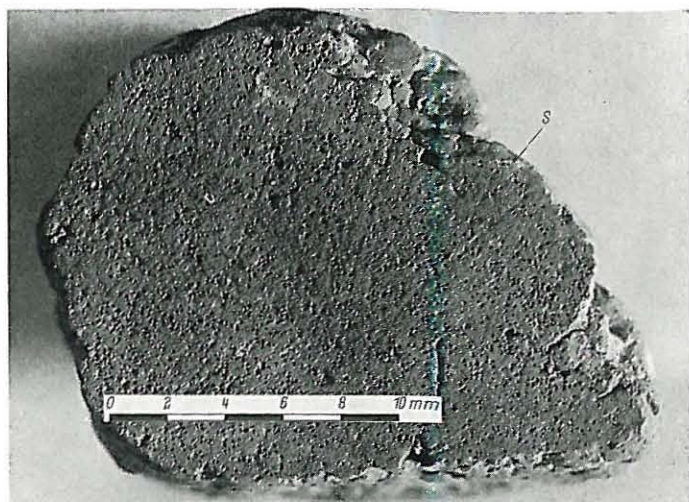


Bild 8 c Vergrößerung des Schnittes S aus Bild 8 b. Das gesamte Zuschlagkorn ist von einer Vielzahl feinsten Poren durchsetzt, die mit dem bloßen Auge kaum sichtbar sind. Bei Vergrößerung ist die Struktur der von Koks ähnlich.

Korngruppen. Voraussetzung für einen günstigen Aufbau des Betons ist eine Lieferung in mehreren Korngruppen mit wenig Unter- und Überkorn. Im allgemeinen wird hierfür in den USA ein nach 3 Korngruppen aufgeteilter Zuschlag zur Verfügung gestellt, z. B. 0/2,4 mm, 2,4/8 mm, 8/19 mm oder 0/4,8 mm, 4,8/9,5 mm und 9,5/19 mm.

Korn- und Schüttdichte. Das Einzelkorn und damit auch die einzelnen Korngruppen sollen bei ausreichender Kornfestigkeit möglichst leicht sein. Körner der untersten Korngruppe sind dichter als die stärker geblähten, größeren Körner (siehe unter 3.2.1). Kornrohichte und Schüttdichte des „Feinen“, z. B. der Korngruppe bis 4,8 mm, sind daher größer. Für 4 im Drehofen geblähte Schiefertone, die zur Herstellung von Konstruktionsbeton hoher Festigkeit geeignet waren, wurden festgestellt [55]:

Kornrohichte ¹²⁾ der Korngruppe

bis 4,8 mm:	1,75 bis 1,91 g/cm ³ ,	im Mittel 1,82 g/cm ³ ,
4,8/19 mm:	1,12 bis 1,26 g/cm ³ ,	im Mittel 1,19 g/cm ³ .

Schüttdichte der trockenen, lose geschütteten Korngruppe

bis 4,8 mm:	0,83 bis 1,16 kg/dm ³ ,	im Mittel 1,05 kg/dm ³ ,
4,8/19 mm:	0,60 bis 0,72 kg/dm ³ ,	im Mittel 0,67 kg/dm ³ .

¹²⁾ Bestimmung der Rohdichte des Grobzuschlags nach ASTM C 127-42 durch Wiegen des trockenen Zuschlags an der Luft und des wassergesättigten, oberflächentrockenen Zuschlags an der Luft und unter Wasser, die des „Feinen“ ebenso, jedoch nach Tränkung mit Kerosin gemäß ASTM C 128-42.

Die zugehörigen Schüttrohdichten der verdichteten (gestocherten) Korngruppe 4,8/19 mm waren um 4 bis 10 % größer. Nach ASTM C 330-60 T muß die Schüttrohdichte (lose geschüttet) bei Blähtonkorngruppen über 4,8 mm \leq 0,88 kg/dm³ sein (siehe auch 2.4.1).

Kornfestigkeit. Für die Prüfung der Kornfestigkeit, die sich neben der Ermittlung der Schüttrohdichte zur Beurteilung des Zuschlags besonders eignen würde, gibt es noch kein allgemein eingeführtes Prüfverfahren. Vorschläge sind dazu wiederholt gemacht worden, z. B. in den USA für die Prüfung der einzelnen Körner in einem Fallwerk in Richtung der kleinsten Kornachse mit darauf abgestimmter Schlagenergie [56] oder für die Prüfung des Einzelkornes unter statischem Druck [57]; siehe auch [58]. Bei einem anderen Verfahren [59] wird das im Topf verdichtete Zuschlaggemisch dem Druck eines kleineren Stempels ausgesetzt und diejenige Last als Kennwert bestimmt, die nötig ist, um den Stempel in bestimmte Tiefen einzudrücken. Diese Prüfung, die nach amerikanischer Ansicht nicht befriedigt (siehe auch Abschnitt 2.4.1), kann unseres Erachtens nur zur Beurteilung der Kornfestigkeit einer eng begrenzten Korngruppe herangezogen werden. Die Zweifel, die in den USA an dieser Prüfung bestehen, dürften von Untersuchungen mit Zuschlaggemischen herrühren [60]; denn bei Gemischen wird die Zusammendrückung sowohl durch die von der Kornzusammensetzung abhängige Lagerungsdichte als auch durch die von der Korngröße abhängige Kornfestigkeit beeinflusst (nur letztere soll beurteilt werden).

Auch wenn noch nicht feststeht, ob und inwieweit eine sich einstellende Zusammendrückung oder Zertrümmerung bestimmter Korngruppen eines Leichtzuschlages in Beziehung zur Druckfestigkeit eines daraus hergestellten festen Leichtbetons steht und welche Grenzwerte einzelne Korngruppen für bestimmte Betondruckfestigkeiten höchstens erreichen dürfen, so wäre z. B. die einfache Prüfung von eng begrenzten Korngruppen im Drucktopf für die Betriebsüberwachung und zum Vergleich verschiedener Erzeugnisse recht nützlich. Man muß hier auf die günstigen Erfahrungen, die mit der Prüfung von Leichtzuschlag-Korngruppen im Drucktopf gemacht wurden, verweisen [61].

4. Mischungsaufbau und Frischbetoneigenschaften

Gewisse Gesetzmäßigkeiten zwischen Mischungsaufbau und Festigkeit, die man beim üblichen Schwebeton kennt, wie Zunahme der Betonfestigkeit mit kleiner werdendem Wasserzementwert oder ansteigender Zementfestigkeit, gelten im Grunde auch für den Konstruktions-Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Während beim Mischungsentwurf des Schwebetons dessen Rohdichte nicht berücksichtigt wird, muß beim Entwurf von Konstruktions-Leichtbeton neben hoher Festigkeit noch eine möglichst niedrige Rohdichte angestrebt werden. Außerdem ist zu beachten, daß die Kornfestigkeit des Blähtons geringer als die des üblichen Zuschlaggesteins ist und daß im allgemeinen ein größerer Wassergehalt beim Abmessen des Blähtons oder eine erhebliche Wasseraufnahme beim Mischen zu berücksichtigen ist.

4.1 Besonderheiten des Blähtons als Zuschlag

Porosität. Zuschläge für Schwerbeton haben im allgemeinen eine Porosität unter 2 Raum-%, sie liegt bei Blähton wesentlich höher und ist zudem je nach Erzeugnis unterschiedlich. Unter Annahme einer Reindichte des Blähtons von 2,55 g/cm³ [62] errechnen sich für die unter 3.2.3 angeführten Korngruppen [55] folgende Porositäten:

Korngruppen in mm	Porosität in Raum-%
0/4,8	25 bis 31, im Mittel 29
4,8/19	51 bis 56, im Mittel 53

Die Porosität des groben Blähton-Zuschlags war also nahezu doppelt so groß wie die des feinen (siehe auch 3.1). Ausgehend von den sehr feinen Anteilen, die praktisch ohne Poren sind, nimmt die Porosität im allgemeinen mit dem Durchmesser des Blähtonkorns stetig zu [62].

Kornfestigkeit. Bei gleichen stofflichen Eigenschaften hängt die Kornfestigkeit außer von der Porengröße und -verteilung überwiegend von der Gesamtporosität ab. Da die Kornfestigkeit mit zunehmender Porosität abnimmt, und zwar nicht linear, sondern erheblich rascher, sind große Körner viel weniger fest als kleine. Kleine Körner, die durch nachträgliches Brechen großer Körner entstanden, sind deshalb auch nicht so fest wie kleine, unmittelbar im Drehofen erbrannte Körner (Weiteres siehe unter 4.2.1).

Wasseraufsaugen. Da die Poren des Blähtonkorns mehr oder weniger untereinander verbunden sind und zum Teil die Oberflächenhaut durchsetzen, saugt trockener Blähton meist gierig Wasser auf, und zwar stets mehr als übliches Zuschlaggestein. Würden sämtliche Poren mit Wasser gefüllt, so würde die Wasseraufnahme der oben angeführten Korngruppe 0/4,8 mm rd. 15 Gew.-% und die der Korngruppe 4,8/19 mm sogar rd. 44 Gew.-% erreichen. Die Poren füllen sich bei Wasserlagerung unter Atmosphärendruck jedoch nur zum Teil und unterschiedlich schnell. Zum Beispiel erreichte die Wasseraufnahme bei 7 hochwertigen Drehofenblähthonen nach 1 Stunde für die Korngruppe 0/4,8 mm 2 bis 10 Gew.-% und für die Korngruppe 4,8/19 mm 4 bis 11 Gew.-% [26, 55]. Nach 24 Stunden betrug die Wasseraufnahme 5 bis 12 Gew.-% bzw. 5 bis 15 Gew.-%. Die Wasseraufnahme war zwar im allgemeinen beim groben Zuschlag größer, jedoch nicht in dem Maße, wie dies auf Grund der höheren Porosität zu erwarten gewesen wäre.

Im ganzen gesehen finden sich also Blähthone, die mit einer Wasseraufnahme in den ersten Stunden von nur etwa 5 Gew.-% (rd. 6 Raum-%) äußerst dicht sind, aber auch solche, die erheblich mehr Wasser aufnehmen.

4.2 Entwurf von Mischungen für Konstruktions-Leichtbeton aus Blähton

4.2.1 Betrachtungen zur Festigkeit und Rohdichte von Zementstein und Blähton im Beton

Druckfestigkeit. Die Festigkeit der natürlichen, dichten Zuschläge für Schwerbeton ist im allgemeinen erheblich größer als die größerer Blähtonkörner und als die des Zementsteins, der die Körner miteinander verkittet. Maßgebend für die Festigkeit des Schwerbetons ist daher weitgehend die Zementsteinfestigkeit, die vom Wasserzementwert und der Zementnormenfestigkeit abhängt.

Beim Blähton-Beton muß man beachten, daß der die Festigkeit des Feinmörtels bestimmende Wasserzementwert für B 300 und höher zwischen etwa 0,50 und 0,40 liegt [60] und je nach Zementgüte eine Druckfestigkeit des Feinmörtels (an kleinen Proben bestimmt) von mindestens 500 bis 600 kp/cm² liefert. Der Feinmörtel steht im Beton zwischen den Zuschlagkörnern als Gerüst in dünnen, mehr oder weniger abgestützten Stegen und Schichten an, so daß seine spezifische Festigkeit auch im Mörtelgerüst weitgehend zur Wirkung kommen dürfte. Das größere Leichtzuschlagkorn muß andererseits eine recht erhebliche Festigkeit besitzen, wenn es die Tragfähigkeit des Mörtelgerüsts im Beton wesentlich unterstützen soll. Aus dieser sehr vereinfachten Mechanik des Tragverhaltens kann man folgern, daß die erzielbare Betondruckfestigkeit im Bereich höherer Güten sowohl von der Festigkeit des verbindenden Mörtels als auch von der Kornfestigkeit des Grobzuschlags abhängen wird.

Die Festigkeit des Blähtonbetons kann somit angehoben werden durch:

- höhere Zementnormenfestigkeit* (höhere Mörtelfestigkeit),
- Senken des Wasserzementwertes* (höhere Mörtelfestigkeit),
- mehr Feinzuschlag* (stabileres Mörtelgerüst und geringerer Anteil an weniger festem Grobkorn),
- kleineres Größtkorn* (gleichmäßigere Spannungsübertragung und -verteilung),
- höhere Kornfestigkeit des Grobzuschlags* (weitergehende Beteiligung an der Kraftaufnahme).

Rohdichte. Die Rohdichte eines lufttrockenen Zementsteins mit einem für hohe Festigkeiten erforderlichen niedrigen Wasserzementwert von beispielsweise 0,45 liegt bei 1,75 g/cm³, die des feinen Blähtonzuschlags bei 1,80 g/cm³ und die des groben bei 1,20 g/cm³. Zementstein und feiner Zuschlag haben also ungefähr die gleiche Rohdichte, so daß ein lufttrockener Konstruktions-Leichtbeton aus nur „Feinem“ auch eine Rohdichte von etwa 1,80 g/cm³ aufweisen würde. Vermindert werden kann diese Rohdichte nur durch die groben Blähtonkörner.

4.2.2 Mischungsaufbau nach amerikanischen Empfehlungen

Wegen der Eigenart des Leichtzuschlags (Kornfestigkeit, Porosität, Wasseraufnahme) wird zum Festlegen einer zweckentsprechenden

Mischung immer eine Eignungsprüfung gefordert (ACI-Stahlbetonbestimmungen [36]).

Größtkorn und Kornzusammensetzung. Da große Körner weniger fest sind, soll das Größtkorn für hochfesten Leichtbeton höchstens 19 mm betragen; häufig ist sogar eine Begrenzung auf 12,7 oder 9,5 mm erforderlich. (Zum Beispiel reichte bei den 21 Mischungen der Güte B 450 in [10], die aus verschiedenen, handelsüblichen Leichtzuschlägen mit PZ III hergestellt waren, das Größtkorn in 5 Mischungen bis 19 mm, in 7 Mischungen bis 12,7 mm und in 9 Mischungen bis nur 9,5 mm. Der Anteil der Korngruppe 12,7/19 mm lag bei den 5 Mischungen bis 19 mm Größtkorn zudem unter 10 %, z. T. unter 5 %.)

Für eine günstige Kornzusammensetzung werden zunächst die Anteile der Korngruppen ermittelt, die lose geschüttet zu einem möglichst hohlraumarmen Zuschlaggemisch führen [35]. Dies geschieht durch Ansetzen von Mischreihen mit den trockenen Zuschlagkorngruppen, bei denen die Anteile von Feinem zu Grobem in mehreren Stufen systematisch geändert werden. Die Mischreihe wird mit den Raummaßen der lose geschütteten Zuschlagkorngruppen durchgeführt, weil auf der Baustelle das Abmessen nach Raumteilen bei der Betonherstellung mit Blähton wechselnden Feuchtigkeitsgehaltes Vorteile bietet. Bestimmt wird die Schüttdichte der trockenen, verdichteten Zuschlaggemische und daraus mittels Kornrohichte der einzelnen Korngruppen der Hohlraumgehalt im Gemisch errechnet. Da das Feine eine höhere Kornrohichte aufweist, braucht das Maximum des Schüttgewichts des Gemisches nicht mit dem Minimum des Hohlraumgehaltes zusammenzufallen. Fügt man zu dem Groben steigende Anteile Feines zu, so steigt das Schüttgewicht des Gemisches zunächst stark an, von einem bestimmten Anteil an jedoch nicht mehr oder nur wenig. Trägt man das Schüttgewicht über dem Anteil des Feinen auf, so gibt der Knickpunkt dieser Kurve den Anteil des Feinen für einen minimalen Hohlraumgehalt an. Sowohl aus Gründen der Verarbeitbarkeit als auch der Festigkeit kann ein etwas höherer Anteil des Feinen zweckmäßig sein, obschon die Rohdichte damit etwas ansteigt.

Für ein Größtkorn von 19 mm wird der günstigste Anteil an Feinem (unter 4,8 mm) je nach Zementgehalt und Zusammensetzung der feinen Korngruppe zwischen 35 und 60 Raum-% angegeben [35, 55]. Schon wegen der Verarbeitbarkeit – aber auch wegen der Festigkeit – werden 40 Raum-% Feines meist nicht unterschritten. Bei zementreichen Mischungen oder bei LP-Beton kann der Feinanteil kleiner gehalten werden. Das ESCSI empfiehlt einen Feinanteil zwischen 50 und 55 Raum-% [63].

Wasseranspruch und Mischungszusammensetzung. Der Wasseranspruch des Leichtzuschlags wird nicht nur von der Kornzusammensetzung, sondern in hohem Maße durch das Wasser aufsaugen bestimmt. Leichtzuschlag kann über 120 l/m³ Wasser aufsaugen. Bei der in den USA üblichen weichen Konsistenz liegt der Gesamtwassergehalt daher zwischen 180 und 270 l/m³, im Mittel bei 233 l/m³ [35, 64].

Mit einem günstig zusammengesetzten Zuschlaggemisch (siehe oben) werden Mischungen mit drei verschiedenen Zementgehalten angesetzt. Tafel 302 b in [35] enthält Anhaltswerte für den je nach Druckfestigkeit erforderlichen Zementgehalt. (Dieser liegt jedoch in sehr weiten Grenzen, beispielsweise für B 330 zwischen 335 und 500 kg/m³ (siehe auch Abschnitt 5.1.2, Bild 10). Die Richtwerte beziehen sich auf PZ I ohne Angabe der Zementnormfestigkeit.) Der Zementgehalt sollte wegen der Entmischungsfahr wenigstens 300 kg/m³ betragen.

Zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit wird vor allem bei zementarmen Mischungen ein LP-Zusatzmittel empfohlen; der Beton wird dadurch zäher und zusammenhängender. Der Luftgehalt richtet sich nach dem Zementgehalt und soll bei 280 kg/m³ Zement etwa 4,5 Raum-%, bei 335 kg/m³ etwa 3,5 % und bei 390 kg/m³ etwa 2,5 % betragen¹³⁾; bei zementreichen Mischungen sind künstliche Luftporen meist nicht nötig [60]. Der Wassergehalt je 1 % künstlich eingeführter Luft soll bei gleichbleibender Konsistenz um 2 bis 3 % vermindert werden [35]. (Die Erfahrung lehrte, daß die Druckfestigkeit durch den erhöhten Luftgehalt bei den zementärmeren Mischungen dann im allgemeinen nicht kleiner ausfällt.)

Der Blähton wird vor dem Mischen vorgehäßt [35, 60, 63]. (Eine vollständige Wassersättigung ist nicht angezeigt, weil sich dadurch bei Laboratoriumsuntersuchungen eine etwas kleinere Druckfestigkeit einstellte [26]¹⁴⁾ und auch der Frostwiderstand geringer war [25, 26, 27, 35]; siehe auch Abschnitt 5.7.) Die Feuchtigkeit soll im Leichtzuschlag gleichmäßig verteilt sein, was wenigstens 12 Stunden Vorlagerung erfordert [63].

Die Zuschlagstoffe und rd. $\frac{2}{3}$ des vermutlich erforderlichen Zusatzwassers sowie das vorgesehene LP-Zusatzmittel werden in den Mischer gegeben und wenigstens $\frac{1}{2}$ min vorgemischt. Werden trockene Zuschlagstoffe verwendet, so ist die Wasserzugabe größer zu wählen; das Vormischen ist dann auf rd. 2 min zu verlängern bzw. so lange, bis der Zuschlag nicht mehr gierig Wasser aufnimmt. (Mit trockenen Zuschlägen, die so im Mischer vorgehäßt wurden, ergab sich praktisch die gleiche Festigkeit wie mit länger vorgehäßten Zuschlägen aus einem Silo [55].) Dann werden der Zement und sofern vorgesehen noch ein verflüssigendes Zusatzmittel mit so viel Wasser in den Mischer gegeben, bis die gewünschte Konsistenz erreicht ist. Anschließend soll noch wenigstens 2 min gemischt werden.

¹³⁾ Der LP-Gehalt des Leichtbetons wird am zuverlässigsten durch die Stoffraumrechnung, siehe [65] und ASTM C 138-63 [66], oder nach dem Auswaschverfahren ASTM C 173-58 T [67] bestimmt; Einzelheiten zu den Prüfverfahren siehe auch [68].

¹⁴⁾ Wie auch für Schwerbeton seit langem bekannt ist [69], kann die Druckfestigkeit des Betons, der unter sonst gleichen Verhältnissen mit trockenen Zuschlägen hergestellt wurde, größer ausfallen, weil der trockene Zuschlag auch nach dem Verdichten noch Wasser aus dem Zementleim aufnimmt; dadurch wird der wirksame Wasserzementwert gesenkt und die Haftung zwischen Zuschlag und Zementstein verbessert. Dieser Einfluß muß beim Vergleich von Versuchsergebnissen mit unterschiedlich feuchtem oder mit Wasser mehr oder weniger lange vorgemischtem Blähton berücksichtigt werden.

An den verdichteten Zylindern wird anschließend die Frischbetonrohddichte ermittelt; daraus und mit den Gewichten sowie Rohdichten der Mischungsbestandteile wird über die Stoffraumrechnung der Anteil der einzelnen Betonkomponenten je m^3 des verdichteten Betons errechnet.

Die Zylinder werden im Alter von 28 Tagen geprüft (siehe 2.4.1). Von den einzelnen Blähtonherstellern werden für ihren Blähton entsprechend untersuchte Mischungen in Tafeln oder Nomogrammen zusammengefaßt. In solchen Nomogrammen kann man für eine vorgesehene Konsistenz des Betons ablesen, welche Zementmenge man für eine bestimmte Druckfestigkeit benötigt und welche Rohdichte sich dabei einstellen wird. (Solche Nomogramme können unseres Erachtens nur Anhaltswerte oder Richtwerte für die Eignungsprüfung einer Mischung liefern, diese jedoch nicht ersetzen.)

4.2.3 Vorschlag für die Eignungsprüfung

Man sollte unseres Erachtens bei der Eignungsprüfung von Konstruktions-Leichtbeton ähnlich wie bei Schwerbeton vorgehen, weil damit wichtige betontechnologische Zusammenhänge auch bei Leichtbeton mehr berücksichtigt werden können als bei einem Vorgehen nach den amerikanischen Empfehlungen.

Zunächst werden die Anteile der Korngruppen für das Zuschlaggemisch wie bei Schwerbeton nach Mustersieblinien festgelegt; in Frage kommen dann für Leichtbeton hoher Festigkeit Sieblinien, die im mittleren oder oberen Teil des „besonders guten“ Bereichs der DIN 1045 liegen. Dabei muß man für die Anteile den Stoffraum (Rohdichte) der einzelnen Korngruppen zugrunde legen [65, 70]. Die Sieblinie ist nach den für Schwerbeton geltenden Regeln zu wählen (Sandgehalt um so geringer, je feiner der Sand selbst ist und je höher der Zementgehalt vorgesehen wird).

Eine ausreichende Menge des trockenen Zuschlaggemisches, dessen Gewicht für jede Mischung festgestellt ist, wird mäßig wassergetränkt. Dann wird der Raum bestimmt, den das feuchte Zuschlaggemisch einnimmt; er ist für das Abmessen nach Raumteilen maßgebend (siehe 4.3). Anschließend wird der Zuschlag an der Luft so weit abgetrocknet, daß die Körner nahezu oberflächentrocken erscheinen. Aus der jeweiligen Zementnormenfestigkeit bestimmt man den Wasserzementwert, der für Schwerbetonzuschlag nötig wäre [65]. Dem Zuschlaggemisch wird im Mischer so lange vorge-mischer Zementleim mit dem festgelegten Wasserzementwert (z. B. $w = 0,50$) zugesetzt, bis die erforderliche Konsistenz erreicht ist. Außerdem werden zwei weitere Mischungen mit einem um 0,05 und 0,10 kleineren Wasserzementwert des Zementleims ebenso auf die gleiche Konsistenz abgestimmt. Man erhält auf diese Weise 3 Mischungen, von denen die erste vermutlich keine ausreichende Druckfestigkeit liefern wird. Weitere Mischungen sind mit dem mittleren Wasserzementwert herzustellen, wobei dann das Zuschlaggemisch verändert wird (Größtkorn und Sieblinie), oder auch mit einem Zement anderer Normenfestigkeit.

Die in etwa zu erwartende Rohdichte kann abgeschätzt werden, indem von der Frischbetonrohddichte der Würfel $50 \text{ kg}/m^3$ abgezogen wird [34]. Der Anteil der Betonkomponenten je m^3 Beton wird wie üblich aus der Rohdichte und den Mischungs-

anteilen über den Stoffraum errechnet. Der Zement ist in kg je m³ verdichteten Betons anzugeben und die Korngruppen des etwa oberflächentrockenen, kernfeuchten Zuschlags außer nach Gewicht auch in Litern (lose geschüttet).

4.3 Abmessen und Mischen

In den USA werden die Leichtzuschläge meist vorgenäßt vom Blähtonwerk geliefert (keine Staubentwicklung, vermindertes Entmischen, kürzeres Mischen zum Vornässen). Die vorgenäßten Zuschläge werden nach Raumteilen abgemessen, weil das Gewicht je nach Kornfeuchtigkeit laufend verändert werden müßte. Der Zement sollte nach Gewicht zugegeben werden. Auf der Baustelle werden die vorbefeuchteten Korngruppen in den Mischer gegeben und mit einem Teil des Zusatzwassers wenigstens 1/2 min vorge-mischt (trockene Zuschläge 2 min lang). Nach Zugabe aller Betonbestandteile soll 2 min gemischt werden. Dabei ist noch so viel Wasser zuzusetzen, bis die bei der Eignungsprüfung festgelegte Konsistenz erreicht wird. Konstruktions-Leichtbeton muß grundsätzlich länger gemischt werden als Schwebeton gleicher Konsistenz (siehe auch unter 4.2.2).

4.4 Verarbeitbarkeit, Verdichten

Konstruktions-Leichtbeton gleicher Konsistenz (in den USA mit dem Setzmaß bestimmt) ist leichter verarbeitbar (geschmeidiger) als Schwebeton [29, 71, 72]. (Der Kegelstumpf des Leichtbetons sackt wegen der geringeren Frischbetonrohichte und dem höheren Zementgehalt des Leichtbetons weniger zusammen als Schwebeton gleicher Güte und Verarbeitbarkeit.) Gleiche Verarbeitbarkeit darf bei Leichtbeton angenommen werden, dessen Setzmaß wenigstens 1/3 kleiner ist als das eines sonst entsprechend zusammengesetzten Schwebetons [29, 71].

Steifer Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit wird zweckmäßig durch Rütteln verdichtet.

Während sich weich angemachter Schwebeton mit höherem Wasserzementwert u.a. durch Absinken der schweren Zuschlagkörner entmischt, haben die größeren Blähtonkörner das Bestreben, nach oben zu steigen, weil sie leichter als der Feinmörtel sind. Diese Gefahr besteht jedoch vorwiegend nur bei zu weichem Beton und bei zu langem Rütteln. Es wird daher empfohlen [37], ein Setzmaß von 7,5 cm nicht zu überschreiten. (Dieses gilt etwa für einen knapp weich angemachten Beton mit einem Ausbreitmaß nach DIN 1048 von höchstens 45 cm.) Um der allgemein etwas größeren Entmischungsneigung weichen Leichtbetons zu begegnen, sollte die Rütteldauer auf das notwendige Maß begrenzt werden, der Zementgehalt wenigstens 300 kg/m³ betragen und bis zu einem Zementgehalt von etwa 350 kg/m³ ein LP-Zusatzmittel zugesetzt werden. Die Konsistenz ist grundsätzlich so steif wie möglich einzustellen.

4.5 Nachbehandeln

Für die Nachbehandlung des Konstruktions-Leichtbetons gelten grundsätzlich die gleichen Regeln wie für Schwebeton. Man kann

wohl annehmen, daß die wasserdurchtränkten Zuschlagkörner bei Luftlagerung des Betons noch für längere Zeit Wasser für die Hydratation des Zements liefern. Zur Vermeidung von Haarrissen auf der Oberfläche sollte jedoch immer eine mehrtägige Feuchtbehandlung vorgesehen werden, insbesondere bei Fertigteilen, die aus der Wärmekammer kommen.

Leichtbeton benötigt auch längere Zeit, bis sein Feuchtigkeitsgehalt mit dem der umgebenden Luft ins Gleichgewicht kommt (Ausgleichsfeuchte; „lufttrockener Zustand“).

5. Eigenschaften des erhärteten Betons

5.1 Druckfestigkeit

Konstruktions-Leichtbeton muß in den USA eine 28 Tage-Druckfestigkeit von wenigstens 160 kp/cm² aufweisen (Festigkeitswerte auf 28 Tage-Würfel-Druckfestigkeiten bezogen; siehe Fußnote 7). Für schlaff bewehrte Konstruktionen wird der Leichtbeton meist als Transportbeton in den Güteklassen B 200, B 250 und B 300 verwendet; Konstruktions-Leichtbeton kann jedoch vielfach auch in der Güteklasse B 410 und an einigen Orten bis B 490 als Transportbeton bezogen werden [29]. In Spannbetonwerken herrschen die Güteklassen B 410 und B 490 vor [10]. Bei Versuchen sind Druckfestigkeiten nach 28 Tagen über 500 bis 690 kp/cm² häufig ermittelt worden [10, 26, 55, 60, 71, 73, 74, 75, 76, 77 u.a.].

5.1.1 Druckfestigkeit und Rohdichte

In Bild 9 sind die 28 Tage-Druckfestigkeit und die Rohdichte von lufttrockenem Konstruktions-Leichtbeton aus verschiedenen Veröffentlichungen zusammengetragen [10, 26, 55, 60, 71, 73, 74, 75, 76, 77]. Es sind nur Betone aus Drehofenblähton (ohne Natursandzusatz¹⁵⁾) mit einer Druckfestigkeit von mindestens 300 kp/cm² aufgenommen worden.

Die Betone sind danach unterschieden, ob sie mit PZ I oder mit PZ III (entsprechend PZ 275 bzw. PZ 475) hergestellt worden sind. Man erkennt, daß mit PZ III bei gleicher Rohdichte eine höhere Druckfestigkeit erreicht werden konnte, daß sich also auch beim Konstruktions-Leichtbeton eine höhere Normenfestigkeit des Zements in einer höheren Betonfestigkeit auswirkte.

Man erkennt weiter, daß mit Drehofenblähton ein wesentlich günstigeres Druckfestigkeit-Rohdichte-Verhältnis erzielt wird, als die ASTM Standard C 330-60 T noch gestattet (siehe die eingetragene Grenzlinie und Abschnitt 2.4.1). Auch die vom ESCSI als „typisch“ angegebene Beziehung [34] liegt ungünstiger als der Durchschnitt der Versuchswerte.

¹⁵⁾ Vielfach erhält der Konstruktions-Leichtbeton in den USA einen Natursandzusatz, der bis zu 60 Gew.-% des gesamten Zuschlags ausmachen kann [29]. Mit einer Natursandzugabe werden die meisten Leichtbetoneigenschaften verbessert, allerdings auf Kosten einer um 10 bis 20 % höheren Betonrohddichte [78]. Der E-Modul kann durch den Natursandzusatz bis zu 30 % ansteigen; ob und wieviel die Festigkeit ansteigt, hängt von der Kornfestigkeit, Kornform und dem Wasseranspruch des zu ersetzenden feinen Leichtzuschlages ab.

Allgemein geht aus dieser Zusammenfassung in Bild 9 hervor, daß aus den untersuchten Drehofenbläh-tonen ohne Natursand-zusatz ein B 300 mit einer Rohdichte unter $1,60 \text{ kg/dm}^3$, ein B 450 mit einer Rohdichte unter $1,70 \text{ kg/dm}^3$ und aus besonders festem Leichtzuschlag ein B 600 mit einer Rohdichte unter $1,80 \text{ kg/dm}^3$ hergestellt werden konnten.

5.1.2 Druckfestigkeit und Zementmenge

In Bild 10 ist über der 28 Tage-Druckfestigkeit der Zementgehalt der Konstruktions-Leichtbetone aus Bild 9 aufgetragen. Die Einzel-

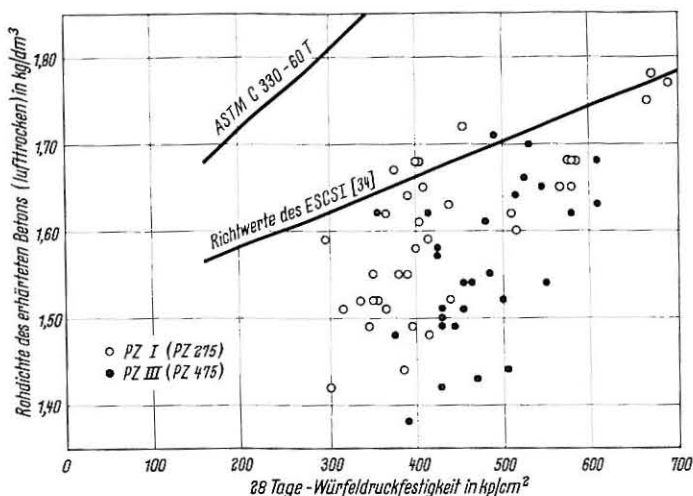


Bild 9 Rohdichte von lufttrockenem Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit aus Drehofen-Bläh-tonen nach Untersuchungen in [10, 26, 55, 60, 71, 73, 74, 75, 76, 77]

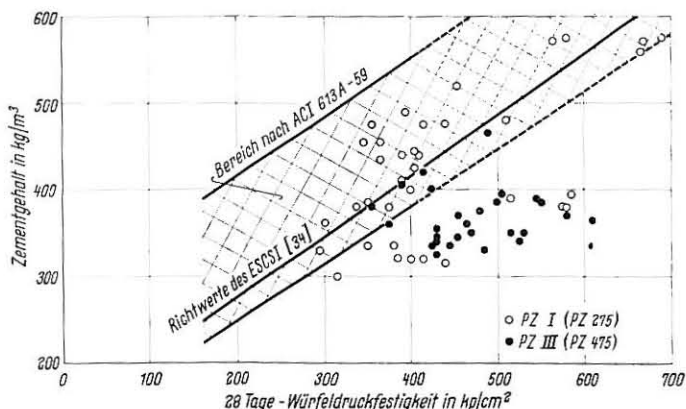


Bild 10 Zementgehalt von Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit aus Drehofen-Bläh-tonen nach Untersuchungen in [10, 26, 55, 60, 71, 73, 74, 75, 76, 77]

werte sind wiederum nach den Zementgüteklassen I und III unterschieden; durch Schraffur ist der Bereich des Zementgehalts angegeben, der in der Richtlinie ACI 613 A-59 für die Eignungsprüfungen empfohlen wird; siehe auch unter 4.2.2. (Der Zementgehalt für Betone über B 410 wurde extrapoliert; gestrichelter Linienteil.) Über $\frac{2}{3}$ der mit PZ I (PZ 275) hergestellten Betone liegen in dem durch die ACI-Richtlinie abgegrenzten Bereich des Zementgehalts, das restliche Drittel liegt unterhalb dieses Bereiches, d. h. es wurde mit den untersuchten Leichtzuschlägen für eine bestimmte Druckfestigkeit weniger Zement benötigt als nach der Richtlinie anzunehmen ist.

Nach der Aufstellung in Bild 10 erforderte ein Konstruktions-Leichtbeton aus Drehofenblähton der Güteklasse B 300 etwa 350 kg/m^3 PZ I, ein B 450 etwa 450 kg/m^3 und ein B 600 etwa 550 kg/m^3 . Mit 300 bis 400 kg/m^3 PZ III wurden im allgemeinen 28 Tage-Betondruckfestigkeiten zwischen 400 und 600 kp/cm^2 erreicht. In seinem Informationsblatt Nr. 3 [63] gibt das ESCSI Anhaltswerte für den Zementgehalt von weichen Baustellenbetonen bis B 285 in Abhängigkeit vom Größtkorn (rd. 13, 19 und 25 mm) sowie von der Kornform und -oberfläche (gebrochen oder geschlossen). In diesen offenbar auf der sehr sicheren Seite liegenden „Rezeptbetonen“ sind höhere Zementgehalte vorgesehen, z. B. für B 250 Zementgehalte zwischen 320 und 350 kg/m^3 .

5.1.3 Festigkeitsentwicklung und Wärmebehandlung

Festigkeitsentwicklung bei Normallagerung. Die Festigkeitsentwicklung von ständig feucht gelagertem Konstruktions-Leichtbeton entspricht der des üblichen Schwerbetons, siehe z. B. Bild 11 mit den Versuchsergebnissen für Konstruktions-Leichtbeton B 410 aus 5 Drehofenblähtonen und einem Kiessand [55]. Bis zum Alter von

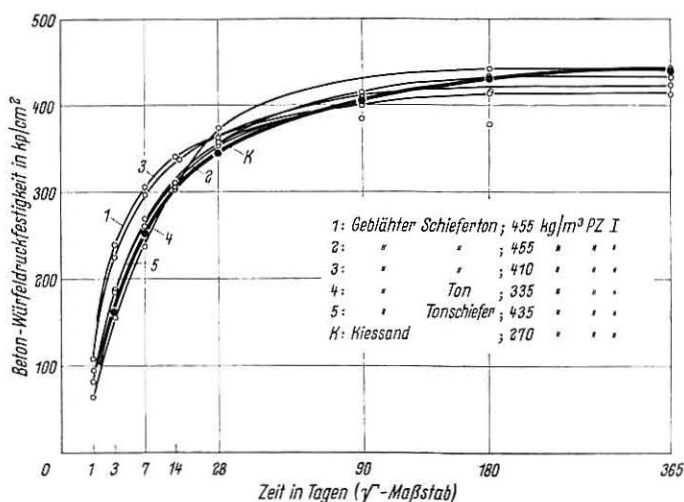


Bild 11 Festigkeitsentwicklung von 5 Blähtonbetonen und 1 Kiessandbeton nach ständiger Feuchtlagerung bei rd. 23°C [55]

einem Jahr lagen die Festigkeiten der 6 Betone mit PZ I und einem Zementgehalt beim Leichtbeton von rd. 420 kg/m^3 und beim Schwerbeton von 270 kg/m^3 in einem engen Bereich. Die Anfangsfestigkeit der Leichtbetone war – auf die jeweilige 1 Jahresfestigkeit bezogen – meist etwas größer als die des Schwerbetons; siehe auch [73]. Vermutlich ist die höhere Anfangsfestigkeit des Leichtbetons auf den günstigen Einfluß des kleineren Wasserzementwerts [79] und vielleicht auch auf eine schon früh wirksame Verbindung zwischen Zementstein und Leichtzuschlag zurückzuführen.

Die Konstruktions-Leichtbetone, die 7 Tage feucht und dann 21 Tage an der Luft lagerten, lieferten im allgemeinen eine geringfügig höhere Druckfestigkeit als gleiche, jedoch dauernd feucht gehaltene Leichtbetone; beim Schwerbeton war der druckfestigkeitssteigernde Einfluß der Austrocknung größer [55]. Die etwas geringere „Trockenfestigkeit“ des Leichtbetons kann durch die Wasserspeicherung und langsamere Austrocknung der Leichtzuschläge bedingt sein. (Andererseits steht dadurch bei mangelnder Nachbehandlung auch über längere Zeit Wasser für die Hydratation des Zements zur Verfügung.)

Festigkeitsentwicklung bei Wärmebehandlung. Von Konstruktions-Leichtbeton zu Fertigteilen, insbesondere Spannbetonfertigteilen, wird eine hohe Frühfestigkeit verlangt.

In Bild 12 ist das Mittel der Festigkeitsentwicklung aus 3 Konstruktions-Leichtbetonen aus Drehofenblähton wiedergegeben, die mit PZ I und mit PZ III (letztere ohne und mit Wärmebehandlung)

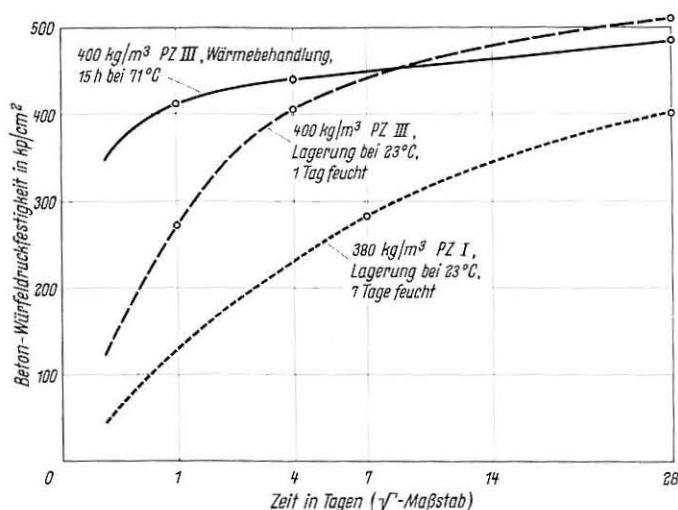


Bild 12 Festigkeitsentwicklung von hochfestem Blähtonbeton aus PZ I und PZ III; Beton aus PZ III auch nach Wärmebehandlung. Mittelwerte von Betonen aus 3 verschiedenen Drehofen-Blähtonen. Wärmebehandlung: 2 h Vorlagerung und 15 h bei 71°C , Temperaturanstieg 33°C/h [73]

hergestellt wurden [73]. Der Beton mit PZ III wurde nach 2 Stunden Normallagerung (Vorlagerung)¹⁶⁾ rd. 15 Stunden lang feuchter Atmosphäre von 71 °C ausgesetzt (Temperaturanstieg rd. 33 °C/h). Verglichen mit den Betonen aus Zement I erkennt man, daß durch den Zement III mit hoher Frühfestigkeit bei einem um rd. 20 kg/m³ höheren Zementgehalt (400 kg/m³), einer etwas steiferen Konsistenz und einem kleineren Luftgehalt (ohne LP-Zusatzmittel) die 1 Tage-Druckfestigkeit bei Normallagerung mehr als verdoppelt und bei einer zusätzlichen Wärmebehandlung nahezu vervierfacht werden konnte. Mit PZ III und Wärmebehandlung wurden nach 1 Tag im Mittel 414 kp/cm² erzielt, das waren 85 % der entsprechenden 28 Tage-Druckfestigkeit (485 kp/cm²).

Die Beton-Zylinder wurden nach der Wärmebehandlung unmittelbar an trockener Luft gelagert; es darf angenommen werden, daß bei einer auf die Wärmebehandlung folgenden mehrtägigen Feuchtlagerung eine höhere Druckfestigkeit nach 28 Tagen erreicht worden wäre.

Aus besonders umfangreichen Versuchen [10] mit wärmebehandelten Leicht- und Schwerbetonen wurden in Tafel 3 Mittelwerte zusammengestellt (21 Konstruktions-Leichtbetone aus Drehofenblättonen und 7 Betone aus Kiessand oder gebrochenem Gestein, alle mit PZ III; 4 Stunden Vorlagerung und 12 Stunden feuchte Atmosphäre bei 60 °C). Für etwa die gleiche Festigkeit war bei Leichtbeton im Mittel ein um 80 kg/m³ größerer Zementgehalt erforderlich als für den Beton mit natürlichem Zuschlag (362 gegenüber 282 kg/m³).

Die mittlere 28 Tage-Festigkeit der Leicht- und Schwerbetone war mit 470 und 460 kp/cm² etwa gleich groß; hiervon waren nach

Tafel 3 1- und 28 Tage-Druckfestigkeit von wärmebehandelten Leicht- und Schwerbetonen aus PZ III [10]

Zuschlagart	Zementgehalt kg/m ³	Rohdichte nach 28 Tagen (lufttrocken) kg/dm ³	Druckfestigkeit nach	
			1 Tag	28 Tagen
—	kg/m ³	kg/dm ³	kp/cm ² (%)	
21 Drehofenblättonen (Mittel)	362	1,54	330 (70)	470 (100)
7 Schwerzuschläge (Mittel)	282	2,31	320 (70)	460 (100)

Behandlung: 4 h Vorlagerung bei normaler Temperatur, dann 12 h in feuchter Atmosphäre bei 60 °C, anschließend in Raumluft.

¹⁶⁾ An anderer Stelle [11] findet sich ein Hinweis, daß für Leichtbeton eine Vorlagerung von 3½ bis 4 h, also eine längere Vorlagerung, als sie sonst für Schwerbeton üblich ist, zweckmäßig sein kann.

1 Tag mit Wärmebehandlung bereits 70 % entstanden (rd. 325 kp/cm²). Ein Unterschied zwischen Schwer- und Leichtbeton fand sich nicht (die Frühfestigkeit des Leichtbetons war nach Wärmebehandlung hier also nicht größer als die des Normalbetons).

Zusammenfassend ergibt sich bei den Untersuchungen, daß mit 24 Blättonen aus dem Drehofen und PZ III (entsprechend Z 475) durch Wärmebehandlung nach 1 Tag Druckfestigkeiten von 414 kp/cm² (Zementgehalt rd. 400 kg/m³, Wärmebehandlung 15 h bei 71 °C) oder 330 kp/cm² (Zementgehalt rd. 360 kg/m³, Wärmebehandlung 12 h bei 60 °C) entstanden. Das waren 85 % bzw. 70 % der Druckfestigkeit dieser Betone nach 28 Tagen von 485 kp/cm² bzw. 470 kp/cm².

5.1.4 Druckfestigkeit bei häufig wiederholter Druckbelastung

Dauerschwingversuche wurden an Konstruktions-Leichtbetonen aus einem Drehofenblätton mit einer auf übliche Weise bestimmten (Kurzzeit-)Druckfestigkeit von rd. 300 und rd. 510 kp/cm² durchgeführt [75]. Die Anzahl der Lastspiele je Minute wurde unterschiedlich eingestellt und lag zwischen 500 und 1000; sofern kein Bruch auftrat, wurden die Einzelprüfungen nach 10 Millionen Lastspielen abgebrochen. Die Unterspannung betrug rd. 3 % der Kurzzeit-Druckfestigkeit, die Oberspannung war um jeweils 10 % zwischen 40 % und 80 % abgestuft. (Es wurde also praktisch die Schwellfestigkeit bestimmt.) Alle Versuchskörper ertrugen 10 Millionen Lastspiele mit einer Oberspannung von 40 %, die meisten auch 10 Millionen Lastspiele mit einer Oberspannung von 50 %. Die Zahl der ertragenen Lastspiele ging bei einer Oberspannung von 60 % merklich, bei einer Oberspannung von 70 und 80 % sehr stark zurück. An gleicher Stelle und auf gleiche Weise geprüfter Schwerbeton hatte sich bei früheren Versuchen sehr ähnlich verhalten.¹⁷⁾

Auch bei vorgespannten Balken mit bis zu 10 Millionen Biege-Lastspielen verhielt sich der Konstruktions-Leichtbeton wie der unter gleichen Versuchsbedingungen geprüfte Schwerbeton [80].

5.2 Biege-, Spaltzug- und Scherfestigkeit

5.2.1 Biege- und Spaltzugfestigkeit

Beim Konstruktions-Leichtbeton dürften die Biege- und die Spaltzugfestigkeit mehr als beim Schwerbeton von der Festigkeit der Zuschlagkörner beeinflusst werden. So brachen bei der Spaltzugprüfung von Schwerbeton mittlerer Festigkeit (B 225 und B 300) nur etwa 10 bis 20 % der Kieskörner und erst im Beton hoher Güte (B 600) alle Körner. Bei der gleichen Prüfung von Konstruktions-Leichtbeton wurden bereits bei der Güte B 225 nahezu alle Leichtzuschlagkörner gespalten [74].

¹⁷⁾ An anderer Stelle [81] werden für die Dauerschwingfestigkeit (bestimmt als Schwellfestigkeit) von Schwerbeton bei 10 Millionen Lastspielen etwa 50 bis 55 % der Kurzzeit-Festigkeit angegeben, gleichzeitig wird jedoch darauf hingewiesen, daß es noch zweifelhaft ist, ob bei Beton mit 10 Millionen Lastspielen die Dauerfestigkeit nachgewiesen ist.

Biegefestigkeit. Die Biegefestigkeit des Konstruktions-Leichtbetons fiel in den ersten 14 Tagen gleich oder häufig etwas größer aus als die eines Schwerbetons gleicher Druckfestigkeit. (Das mag an dem höheren Zementgehalt des Leichtbetons und vielleicht auch an der besseren Haftung zwischen Zementstein und Leichtzuschlag liegen.) Nach 28 Tagen stieg die Biegefestigkeit von dauernd feucht gelagerten Balken nicht mehr an, im Gegensatz zur Biegefestigkeit von Schwerbeton, die meist noch zunahm [55].

Folgende Biegefestigkeiten wurden in Abhängigkeit von der Betongüte festgestellt [10, 55, 60]:

Betongüte (lufttrocken)	Biegefestigkeit in kp/cm^2 (28 Tage feucht gelagert)	Druckfestigkeit Biegefestigkeit
B 250 (7 Betone)	27 bis 36, im Mittel 31	8,1
B 370 (10 Betone)	30 bis 50, im Mittel 39	9,5
B 490 (16 Betone)	37 bis 55, im Mittel 47	10,4
B 600 (6 Betone)	42 bis 60, im Mittel 53	11,3

Mit zunehmender Betondruckfestigkeit stieg die Biegefestigkeit an, jedoch weniger als die Druckfestigkeit, wie aus dem Verhältnis der Druckfestigkeit zur Biegefestigkeit hervorgeht.

Vergleicht man die Mittelwerte mit denen von Schwerbeton gleicher Güte [82], so beträgt die Biegefestigkeit des Konstruktions-Leichtbetons etwa 70 bis 90 % der eines Schwerbetons gleicher Druckfestigkeit^{*)}. (Der einzelne Leichtzuschlag wirkt sich auf die Biege- und Druckfestigkeit sehr unterschiedlich aus; demzufolge wurde in [10] darauf hingewiesen, daß bei den untersuchten 21 Leichtzuschlägen für hochfesten Beton keine Beziehung zwischen Biege- und Druckfestigkeit festzustellen war.)

Trocknete feucht gelagerter Konstruktions-Leichtbeton aus, so sank die Biegefestigkeit durch die Schwindspannungen stärker ab als die eines gleich gelagerten Schwerbetons [10, 55, 73]. Die ursprüngliche Biegefestigkeit stellte sich nach dem Feuchtigkeitsausgleich zum großen Teil wieder ein [73], doch dauerte dieser Feuchtigkeitsausgleich sehr lange. So betrug die Biegefestigkeit von lufttrockenen Leichtbetonen nach 28 Tagen im Mittel nur 55 % der von gleichen, feucht gelagerten Betonen; nach 1 Jahr war die Biegefestigkeit des lufttrockenen Betons nur auf 72 % angestiegen [10].

Spaltzugfestigkeit. In Abhängigkeit von der Betongüte wurde folgende Spaltzugfestigkeit bestimmt [74]:

Betongüte (lufttrocken)	Spaltzugfestigkeit in kp/cm^2 (28 Tage feucht gelagert)	Druckfestigkeit Spaltzugfestigkeit
B 250 (6 Betone)	25 bis 29, im Mittel 26	9,6
B 370 (6 Betone)	28 bis 33, im Mittel 31	12,0
B 600 (2 Betone)	41 und 42	15,0

Mit zunehmender Betondruckfestigkeit stieg die Spaltzugfestigkeit an, jedoch weniger als die Druckfestigkeit, wie aus dem Verhältnis der Druckfestigkeit zur Spaltzugfestigkeit hervorgeht.

Ein Vergleich der Mittelwerte mit denen von Schwerbeton gleicher Güte [84] zeigt, daß die Spaltzugfestigkeiten von Konstruktions-Leichtbeton und Schwerbeton praktisch gleich groß sind ¹⁸⁾.

Durch die Schwindspannungen beim Austrocknen wird die Spaltzugfestigkeit des Schwerbetons nur wenig beeinflußt [84], die von Konstruktions-Leichtbeton kann dagegen je nach Leichtzuschlag bis zu 40 % kleiner ausfallen [74]; die Spaltzugfestigkeit eines 7 Tage feucht und 21 Tage trocken gelagerten Leichtbetons betrug je nach Zuschlag 60 bis 100 % eines gleich gelagerten Schwerbetons gleicher Druckfestigkeit.

5.2.2 Schub- und Scherfestigkeit

Die Schubfestigkeit von Konstruktions-Leichtbeton aus Blähton wurde entweder an bewehrten Stahlbetonbalken ohne Bügelbewehrung [60, 74, 77, 83] oder mit Bügelbewehrung [83] und die Scherfestigkeit mittels dreiaxialen Druckversuchs ermittelt [85].

Die Leichtbetonbalken ohne Bügel wurden auf Biegung bis zum Bruch infolge zu großer schräger Hauptzugspannungen (Schubbruch) beansprucht und hieraus die Schubfestigkeit errechnet. Da die schrägen Hauptzugspannungen u. a. auch von der Spannweite und dem Prozentsatz der Zugbewehrung abhängen, ergaben sich für die gleiche Betongüte bei unterschiedlichen Abmessungen der Balken verschieden große Schubfestigkeiten. Sie wurden auch vom Leichtzuschlag beeinflußt und stiegen mit der Druckfestigkeit an. Die Schubfestigkeit lag zwischen 6 und 18 kp/cm² [60, 74, 77, 83] und war je nach Zuschlag kleiner oder gleich der Schubfestigkeit von Schwerbeton gleicher Betondruckfestigkeit und proportional der jeweiligen Spaltzugfestigkeit des 7 Tage feucht und 21 Tage trocken gelagerten Leichtbetons [74].

Die dreiaxialen Druckversuche an 6 Konstruktions-Leichtbetonen aus Drehofenblähton und 1 Schwerbeton wurden mittels Mohrscher Spannungskreise ausgewertet [85]. Die so ermittelte Scherfestigkeit war beträchtlich größer als die Schubfestigkeit. In Übereinstimmung mit den Spaltzugversuchen betrug bei höherer Seitendruckspannung die Scherfestigkeit der lufttrockenen Leichtbetone 65 bis 95 % der des Schwerbetons gleicher Festigkeit.

5.3 Elastizitätsmodul und Querdehnung

Elastizitätsmodul. Bei gleicher Druckfestigkeit ist für Konstruktions-Leichtbeton wegen der porigen Zuschläge ein kleinerer E-Modul zu erwarten als für Schwerbeton; zahlreiche Versuche haben diese Überlegung bestätigt [10, 55, 60, 71, 77, 78, 80, 86].

Der E-Modul wurde bei den Versuchen unterschiedlich bestimmt (dynamisch oder statisch, als Sekanten-, Sehnen- oder Ursprungs-

¹⁸⁾ Nach englischen Versuchen betrug die Biegefestigkeit eines Betons aus Sinterband-Blähton nur rd. 60 % der eines gleich druckfesten Schwerbetons; bei der Spaltzugfestigkeit waren es 75 % [83].

modul, bei ein- oder mehrmaliger Belastung, bei 0,3- oder 0,4facher Bruchspannung, aus der gesamten Zusammendrückung oder nur aus dem elastischen Anteil u. a.); die im folgenden zusammengestellten E-Moduln sind von der Versuchsausführung her beeinflusst. In Abhängigkeit von der Druckfestigkeit fanden sich bei statischer Druckbelastung folgende E-Moduln:

Betongüte (lufttrocken)	Elastizitätsmodul in 10^3 kp/cm ² (Alter 28 Tage)
B 250 (17 Betone)	104 bis 154, im Mittel 125
B 370 (20 Betone)	111 bis 182, im Mittel 140
B 490 (18 Betone)	116 bis 179, im Mittel 151
B 600 (10 Betone)	139 bis 204, im Mittel 166

Vergleicht man diese E-Moduln mit denen für Schwerkton, die bei einem Teil der Versuche ermittelt wurden oder aus anderen Versuchen bekannt sind, so beträgt der E-Modul des Konstruktions-Leichtbetons nur etwa 50 bis 80 % des des Schwerktons gleicher Druckfestigkeit. Ein niedriger E-Modul kann Nachteile (Durchbiegung), jedoch auch Vorteile (geringere Spannungen bei behinderter Verformung infolge äußerer Einflüsse, z. B. Temperatur, Setzungen) haben. Wird der E-Modul zur Druckfestigkeit und Rohdichte in Beziehung gesetzt, so zeigt sich [87], daß der E-Modul des Schwerktons und der des Leichtbetons dem gleichen Gesetz folgen (Bild 13). Daraus ergab sich die empirische Beziehung

$$E \approx 4000 \rho^{1,5} \sqrt{W} \quad [\text{kp/cm}^2]$$

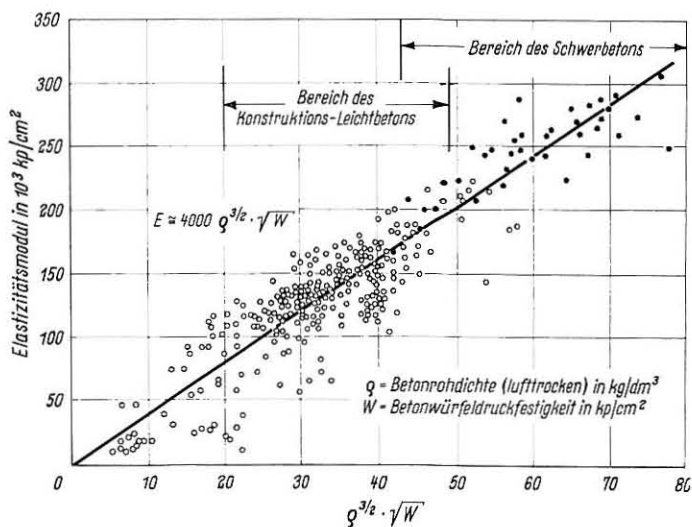


Bild 13 Elastizitätsmodul von Konstruktions-Leichtbeton und Schwerkton in Abhängigkeit von der Rohdichte und der Würfelbruchdruckfestigkeit nach [87]

Dabei ist

ρ = Rohdichte des lufttrockenen Betons in kg/dm^3

W = Beton-Würfeldruckfestigkeit in kp/cm^2

Die Streuung der Versuchswerte ist u. a. dadurch bedingt, daß Leichtzuschlagstoffe ebenso wie natürliche Zuschläge bei gleicher Rohdichte unterschiedliche E-Moduln haben können. Die obige Beziehung ist in die im Juni 1963 neu überarbeiteten amerikanischen Stahlbetonbestimmungen des ACI [36] aufgenommen worden. Mit dieser Beziehung errechnet sich E für die Betongüte B 450 bei einem Schwerbeton mit $\rho = 2,32 \text{ kg}/\text{dm}^3$ zu rd. 285 000 kp/cm^2 und bei einem Konstruktions-Leichtbeton mit $\rho = 1,80 \text{ kg}/\text{dm}^3$ zu 194 000 kp/cm^2 , also zu 68 % des Schwerbeton-E-Moduls.

Ein Austausch (Ersatz) der Sand-Korngruppe des Leichtzuschlags gegen Natursand hebt den E-Modul um 10 bis 30 % [78] und die Rohdichte um 10 bis 20 % an.

Querdehnung. Die Querdehnung des Konstruktions-Leichtbetons wurde zu 0,15 bis 0,25, im Mittel zu etwa 0,19 bestimmt [55, 77, 78] und entsprach praktisch der des Schwerbetons (im Mittel 0,20). Der Ersatz des „Feinen“ durch Natursand wirkte sich daher nicht aus [78].

5.4 Kriechen und Schwinden

Kriechen. Aus den noch laufenden, umfangreichen Kriechversuchen [10] mit Beton aus 21 verschiedenen Drehofen-Blähtonen und 6 natürlichen Schwerzuschlägen wurde aus den Feststellungen bis zu 2 Jahren geschlossen, daß das Kriechen des Konstruktions-Leichtbetons bei gleicher Lagerung nur von 2 Einflüssen abhängig ist: vom Verhältnis der Druckspannung zur Druckfestigkeit und vom Zuschlag. Mit dem Leichtzuschlag Nr. 27 wurde die in Bild 14 wiedergegebene enge, nahezu lineare Beziehung zwischen Kriechen und dem Verhältnis Druckspannung zu Druckfestigkeit gefunden, obwohl sie auf Versuchen mit 2 Zementgüteklassen, 2 Nachbehandlungen, 2 Betongüten und 2 Zementgehalten beruht. Feststellungen mit verschiedenen Zuschlägen nach Bild 15 [10] veranschaulichen grundsätzlich die gleiche Tendenz, jedoch wird der Einfluß des Zuschlags in einer gewissen Streubreite erkennbar.

An anderer Stelle [73] wird ausgeführt, daß die Zementgüteklasse keinen Einfluß auf das Kriechen bei Betonen gleicher Festigkeit hat, daß jedoch das Kriechen durch eine Wärmebehandlung merklich verkleinert wird.

Der Einfluß des Zuschlags geht auch aus Bild 16 hervor; dort ist das Kriechen von 5 Konstruktions-Leichtbetonen aus Drehofenblähton und von 1 Schwerbeton etwa gleicher Druckfestigkeit (345 bis 390 kp/cm^2) über der Zeit aufgetragen [55]. Nach 7 Tagen wurde die Druckspannung aufgebracht, die allerdings hier nur 42 kp/cm^2 betrug; zu diesem Zeitpunkt lag die Betondruckfestigkeit zwischen 235 und 305 kp/cm^2 . Nach 1 Jahr war das Kriechen der Betone aus den Leichtzuschlägen 3 und 5 gleich groß wie das des Schwerbetons, das aus den Leichtzuschlägen 2 und 4 war etwa 20 bis 35 % größer, das aus dem Leichtzuschlag 1 war mehr als 70 %

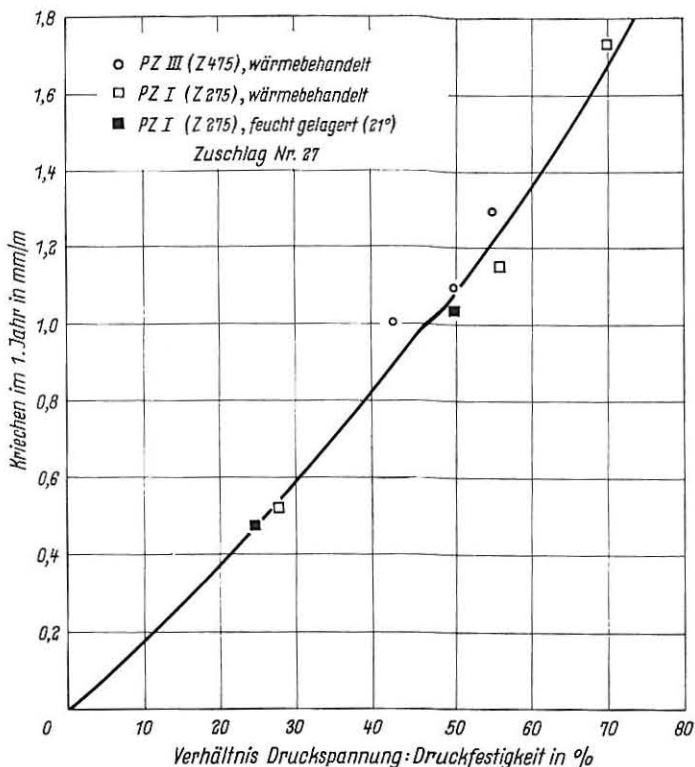


Bild 14 Kriechen nach 1 Jahr in Abhängigkeit vom Verhältnis Druckspannung zu Druckfestigkeit. Konstruktions-Leichtbetone aus 1 Drehofen-Blähton mit verschiedenen Zementgüteklassen und verschiedener Nachbehandlung [10]

größer. (Zuschlag 1 war ein Versuchsbrand, dessen „Feines“ ungenügend gebrannt war.) Scheidet man Leichtzuschlag 1 aus, so war das Kriechen der Konstruktions-Leichtbetone je nach Zuschlag gleich oder bis 35 % größer als das des Schwerbetons.

Bei anderen Untersuchungen [86] war das Kriechen von 3 Konstruktions-Leichtbetonen unter einer Druckspannung von 140 kp/cm² (Betongüte B 410) 0,88- bis 1,17fach so groß wie das des Schwerbetons gleicher Güte. Nach Wärmebehandlung [10] war das Kriechen einiger Leichtbetone (B 450; Belastung 140 kp/cm² im Alter von 28 Stunden) nicht oder nur wenig größer als das einiger Schwerbetone. Im Mittel war das Kriechen der 21 Leichtbetone jedoch nach 1 Jahr um 34 % und nach 2 Jahren um 41 % größer als das der unter gleichen Bedingungen geprüften 6 Schwerbetone.

Durch das Kriechen geht bei vorgespannten Bauteilen die Druckvorspannung zurück. Das sich hierbei einstellende Endkriechmaß wurde für 2 Konstruktions-Leichtbetone und 1 Schwerbeton (W_{28} etwa 550 kp/cm²) untersucht [71]. Die Anfangsdruckspannung betrug 128 kp/cm². Nach 1½ Jahren waren 85 bis 90 % des

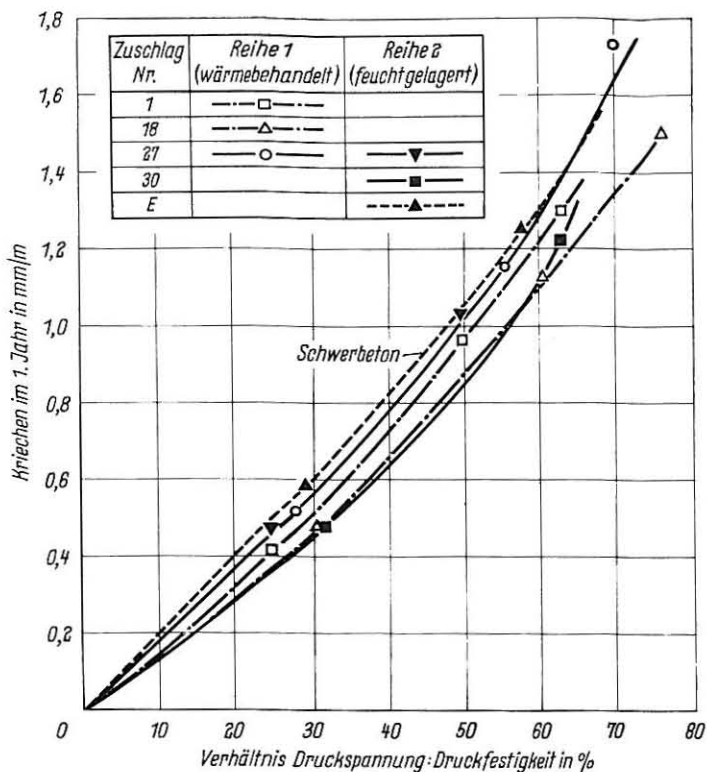


Bild 15 Kriechen nach 1 Jahr in Abhängigkeit vom Verhältnis Druckspannung zu Druckfestigkeit. Konstruktions-Leichtbetone aus 4 Drehofen-Blähtonen und 1 Schwerbeton (E) nach Wärmebehandlung und Feuchtlagerung [10]

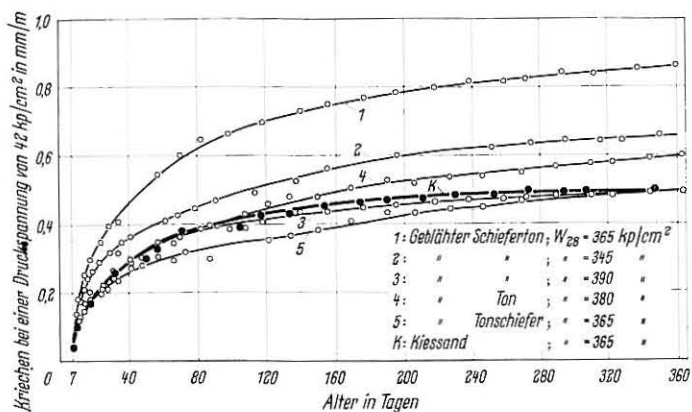


Bild 16 Kriechen von 5 Konstruktions-Leichtbetonen und 1 Schwerbeton unter einer Druckspannung von 42 kp/cm^2 . Würfel-Druckfestigkeit der Betone nach 7 Tagen bei Aufbringen der Vorspannung zwischen 235 und 305 kp/cm^2 [55]

abgeschätzten Endkriechmaßes erreicht. Das Kriechen betrug nur rd. 55 % desjenigen, das sich unter einer konstant gehaltenen Druckspannung von 128 kp/cm² eingestellt haben würde; das Kriechen der Leichtbetone war hier allerdings etwa um 80 % größer als das des Schwerbetons. Doch war das spezifische Kriechmaß des Leichtbetons mit rd. $9 \cdot 10^{-3}$ mm/m je kp/cm² insgesamt mäßig.

Allgemein ist festzustellen, daß das Kriechen einiger Leichtbetone sich von dem der vergleichsweise untersuchten Schwerbetone nicht unterschied oder z. T. kleiner war, daß aber auch wesentlich größere, offenbar vom Leichtzuschlag abhängige Kriechmaße für den Leichtbeton festgestellt wurden. Man weiß dazu, daß das Kriechen gleich fester Betone aus verschiedenen Schwerzuschlägen ebenfalls recht unterschiedlich ausfallen kann [88].

Schwinden. Das Schwinden von 5 Konstruktions-Leichtbetonen und 1 Schwerbeton der Güteklasse B 250 ist in Bild 17 aufgetragen [55]. Das Schwindmaß des zementarmen Schwerbetons betrug nach 1 Jahr etwa 0,68 mm/m, das der Leichtbetone lag zwischen 0,80 und 0,90, war also 18 bis 32 % größer. Bei den in der gleichen Arbeit [55] untersuchten Leichtbetonen höherer Festigkeit war deren Schwinden in den ersten 6 Monaten kleiner als das des Schwerbetons; nach 1 Jahr entsprach das Schwinden der Leichtbetone dem Schwinden des Schwerbetons. Insgesamt war das Schwinden der festeren und damit auch zementreicheren Betone B 370 im Mittel 5 % größer als das der oben erwähnten Betone B 250.

Eine Verminderung des Schwindens kann im allgemeinen durch eine Wärmebehandlung erreicht werden. Nach 1 Jahr lag das Schwindmaß von 21 hochfesten Leichtbetonen aus PZ III nach Wärmebehandlung [10] zwischen 0,56 und 0,99 mm/m (im Mittel 0,71 mm/m). Das Schwinden der gleichbehandelten 6 Schwerbetone fand sich zu 0,35 bis 0,76 mm/m (im Mittel zu 0,50 mm/m), war also um rd. 30 % kleiner (der Schwerbeton enthielt auch nur rd. 280 kg/m³ Zement gegenüber rd. 360 kg/m³ des Leichtbetons).

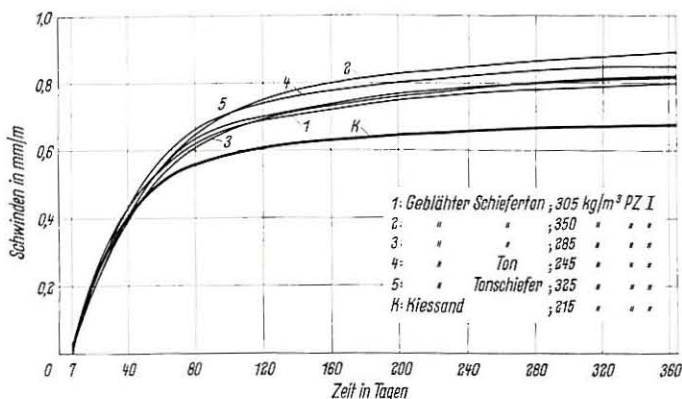


Bild 17 Schwinden von 5 Konstruktions-Leichtbetonen und 1 Schwerbeton der Güte B 250. Beginn der Luftlagerung im Alter von 7 Tagen nach Feuchtlagerung [55]

In anderen Untersuchungen [86] war das Schwindmaß von 3 Konstruktions-Leichtbetonen beträchtlich kleiner als das des unter gleichen Bedingungen geprüften Schwerbetons, der nach 1½ Jahren ein Schwindmaß von 1,0 mm/m aufwies. Umgekehrte Verhältnisse lagen wiederum bei den Untersuchungen in [71] vor, bei denen das Schwinden des Schwerbetons nach 1½ Jahren 0,69 mm/m und das der Leichtbetone 0,72 und 0,90 mm/m erreichte.

Wurde das „Feine“ des Leichtzuschlags durch Natursand ersetzt, so fiel das Schwinden um 15 bis 35 % kleiner aus [78]. Dieses verminderte Schwinden wird vor allem darauf zurückgeführt, daß mit Natursand der für eine bestimmte Festigkeit und Verarbeitbarkeit erforderliche Zement- und Wassergehalt (Zementleimgehalt) kleiner ist.

Zusammenfassend ergibt sich nach den angeführten Untersuchungen, daß das Kriechen und Schwinden bei den Konstruktions-Leichtbetonen und den Schwerbetonen etwa in der gleichen Größenordnung auftrat und daß vom einzelnen Zuschlag ein großer Einfluß ausgeht, so daß sich die Kriech- und Schwindbereiche von Konstruktions-Leichtbeton und Schwerbeton überschneiden. Im Mittel war jedoch das Kriechen und Schwinden des Konstruktions-Leichtbetons um 30 bis 40 % größer. Das geht auch aus Bild 18 hervor, in dem die Gesamtverkürzung durch Kriechen und Schwinden nach einem Jahr für die wiederholt aufgeführten 21 Leichtbetone und 6 Schwerbetone etwa gleicher Festigkeit (B 450) aufgetragen ist [10].

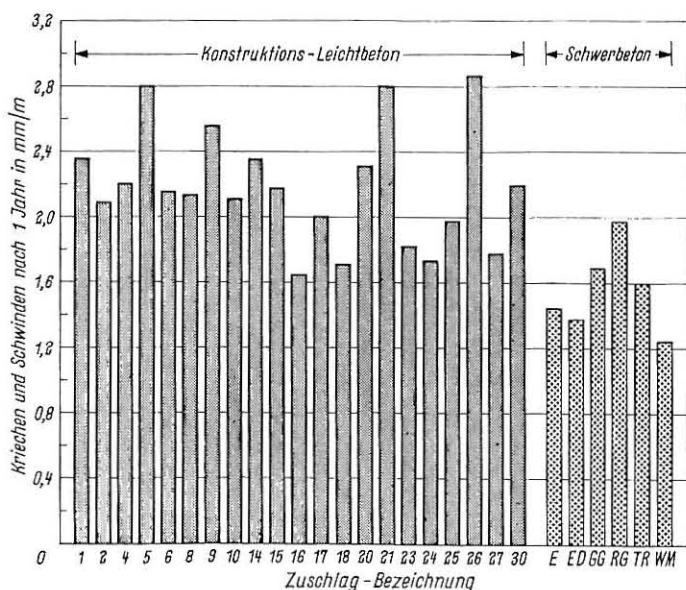


Bild 18 Kriechen und Schwinden von 21 Konstruktions-Leichtbetonen und 6 Schwerbetonen der Güte B 450. Betone aus PZ III (PZ 475) nach Wärmebehandlung (12 h bei 60 °C); Aufbringen der Vorspannung von 140 kp/cm² nach 28 h; Lagerung bei rd. 22 °C und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit [10]

5.5 Wärmedehnung und Wärmeleitfähigkeit

Wärmedehnung. Untersuchungen, in denen die Wärmedehnung von Konstruktions-Leichtbeton ermittelt wurde, sind den Verfassern nicht bekannt geworden. Da die Wärmedehnung eines Betons vor allem durch den Zuschlag bestimmt wird, ist zu erwarten, daß die Wärmedehnzahl eines Betons aus Blähton kleiner als die eines Schwerbetons aus üblichen, quarzhaltigen Zuschlägen ist, weil die Wärmedehnung von keramischen Baustoffen allgemein klein ist; sie beträgt nach [89] für Ziegelsteine 3,6- bis 5,8-, für Hartbrandsteine 4,1- und für Klinker nur $3,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. In [62] wird angegeben, daß die Wärmedehnzahl von Blähtonbeton in Dänemark mit $6,7 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ und in Norwegen mit $7,5 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ angesetzt wird. Solche niedrigen Wärmedehnzahlen (Schwerbeton im Mittel etwa 10 bis $12 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) sind auch von einigen Kalksteinbetonen bekannt.

Wärmeleitfähigkeit. Trockener Konstruktions-Leichtbeton weist naturgemäß wegen der Porosität der Zuschlagkörner eine geringere Wärmeleitfähigkeit auf als trockener Schwerbeton. Die Wärmeleitfähigkeit λ wurde für den künstlich getrockneten Blähtonbeton mit einer Rohdichte von rd. $1,60 \text{ kg/dm}^3$ zu rd. $0,45 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ und mit einer Rohdichte von $1,40 \text{ kg/dm}^3$ zu rd. $0,37 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ festgestellt [90]. Selbst mit einem Konstruktions-Leichtbeton B 450 (Zementgehalt 520 kg/m^3) und einer Rohdichte von $1,70 \text{ kg/dm}^3$ wurde eine Wärmeleitfähigkeit von nur $0,42 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ erreicht [60]. Vergleichsweise beträgt die Wärmeleitfähigkeit eines getrockneten Schwerbetons ($\rho \approx 2,25 \text{ kg/dm}^3$) $1,10$ bis $1,20 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ [81, 90].

Die Wärmeleitfähigkeit des Leichtbetons steigt bei Durchfeuchten beträchtlich an. Sie betrug z. B. nach einer Darstellung in [28] für einen künstlich getrockneten Leichtbeton mit einer Rohdichte von $1,65 \text{ kg/dm}^3$ rd. $0,39 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$, bei 10 Raum-% Feuchtigkeitsgehalt rd. $0,79 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$, bei 20 % Feuchte rd. $1,08$ und bei einem maximalen Feuchtigkeitsgehalt von etwa 37 Raum-% rd. $1,5 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$. Angaben, welcher Feuchtigkeitsgehalt sich z. B. bei Leichtbetonbauteilen aus Blähtonbeton in Wohn- oder Büroräumen mit der Zeit einstellt, wurden nicht gefunden; er wird vermutlich unter 10 Raum-% liegen.

5.6 Wasseraufnahme und -durchlässigkeit

Wasseraufnahme. Die Wasseraufnahme ist durch 24stündiges Tauchen an 28 Tage alten Betonzylindern, die 7 Tage feucht und dann an Luft von 50 % rel. Feuchte lagerten, bestimmt worden [26, 55, 83]¹⁹⁾. Für Konstruktions-Leichtbeton der Güteklasse B 370 betrug sie 13,2 bis 22,3 Raum-%, im Mittel 17,0 % [26]. Schwerbeton gleicher Güte hatte eine Wasseraufnahme von 11,8 %. Bei LP-Beton war sie für beide Betone um rd. 1 Raum-% geringer.

¹⁹⁾ Die Zylinder dürften nach diesen 3 Wochen Luftlagerung noch nicht „lufttrocken“ gewesen sein. Andererseits wird der Beton durch 24stündiges Lagern unter Wasser nicht vollständig wassergesättigt. Es handelt sich somit hier nur um Vergleichswerte unter diesen Versuchsbedingungen.

Mit zunehmender Betongüte nahm die Wasseraufnahme A etwas ab; z. B. betrug sie bei Beton aus dem gleichen Blähton für

W_{28}	=	260	380	585	685	kp/cm ²
A	=	17,8	16,4	15,3	14,2	Raum-%

Die ebenso ermittelte Wasseraufnahme des Schwerbetons mit $W_{28} = 620$ kp/cm² erreichte nur 7,5 Raum-%. Im ganzen war die Wasseraufnahme des Konstruktions-Leichtbetons um 10 bis 90 %, im Mittel um rd. 40 %, größer als die des Schwerbetons gleicher Güte.

Wasserdurchlässigkeit. Feststellungen sind nur für Konstruktions-Leichtbeton aus Sinterband-Blähton gefunden worden [83]²⁰⁾. Untersucht wurde die Durchlässigkeit an gleichbehandelten Leicht- und Schwerbetonen mit 28 Tage-Druckfestigkeiten zwischen 230 und 490 kp/cm². Die mittlere Durchflußgeschwindigkeit nahm mit zunehmender Betongüte etwas ab; sie war für die sich entsprechenden Güteklassen des Leicht- und Schwerbetons jedoch praktisch gleich groß gefunden worden.

Die vorliegenden Untersuchungen ergaben, daß die natürliche Wasseraufnahme des Leichtbetons im Mittel etwa 40 % größer ausfiel als die eines gleichfesten Schwerbetons, daß jedoch die Wasserdurchlässigkeit praktisch gleich groß war.

5.7 Beständigkeit und Verschleißwiderstand

Raumbeständigkeit. Wird der Leichtbeton auf Raumbeständigkeit im Autoklav geprüft (siehe [31] und Abschnitt 2.4.1), so kann ein hoher Anteil nicht raumbeständiger, z. B. kalk- und dolomithaltiger, Körner zum Zertreiben des Betons und ein geringer Anteil zu einzelnen Kornaussprengungen führen. Enthält der Schiefer-ton oder Tonschiefer solche treibenden Stoffe, so kann er durch Mahlen und anschließendes Granulieren zu einem bei dieser Prüfung raumbeständigen Zuschlag verarbeitet werden.

Bei der Untersuchung von Drehofenblähton auf Alkalitreiben konnte nach 9monatiger Lagerung in feuchter Luft von 38 °C [55] keine anomale Ausdehnung beobachtet werden.

Frost- und Tausalzwiderstand. Aus umfangreichen Frost-Tau-Wechsel- und Tausalz-Prüfungen [26] an Betonen der Güte B 250 und B 370 aus 7 Drehofenblähtonen und 1 Schwerzuschlag mit und ohne LP-Zusatzmittel geht hervor, daß künstlich eingeführte Luftporen den Widerstand gegen Frost- und Tausalzangriff von Konstruktions-Leichtbeton ebenso erhöhen wie den von Schwerbeton. Die hohe Wasseraufnahme des Leichtbetons hatte keinen Einfluß auf den Frostwiderstand. Die verschiedenen Drehofenblähtone wirkten sich auf den Frostwiderstand etwas aus [26]; der Einfluß war jedoch nicht größer als bei natürlichen Zuschlägen. Vor dem Mischen wassergesättigte Zuschläge (18 bis 24 Stunden Wasser-

²⁰⁾ Die Wasseraufnahme war bei diesen Versuchen ebenfalls um 30 bis 40 % größer als die von Schwerbeton gleicher Güte.

lagerung) lieferten einen Beton mit einem vergleichsweise geringeren Frostwiderstand als lufttrockene Zuschläge, vor allem bei Betonen der niederen Güteklasse ohne LP-Zusatz. Der erforderliche LP-Gehalt für Konstruktions-Leichtbeton entspricht dem des Schwerbetons; er sollte bei niederen Betongüten wenigstens 6% und bei höheren Güten wenigstens 4% betragen; damit ließen sich auch gegen Tausalze ausreichend widerstandsfähige Betone herstellen. Das Verhalten in der Praxis bestätigte diese Laborversuche [27].

Verschleißwiderstand. Laboruntersuchungen über den Verschleißwiderstand (Widerstand gegen Abrieb) von Konstruktions-Leichtbeton liegen offenbar nicht vor. Jedoch haben sich direkt befahrene Fahrbahn- und Brückenplatten auch bei Schwerverkehr bewährt, siehe [11, 25, 27] sowie unter 2.2, letzter Absatz.

5.8 Feuerwiderstand

Da die Wärmeleitfähigkeit des Konstruktions-Leichtbetons nur rd. halb so groß wie die des Schwerbetons ist, kann eine längere Widerstandsdauer von Bauteilen aus Konstruktions-Leichtbeton vorausgesetzt werden. Dies bestätigen auch Versuche [76] mit vorgespannten I-förmigen Balken mit einer Stützweite von 6,10 m, einer Höhe von rd. 50 cm, einer Flanschbreite von rd. 30 cm und einer Betonüberdeckung des Stahls an der Unterseite der Balken von 5,1 cm. Untersucht wurden Betone aus 3 Drehofenblättonen und aus 3 natürlichen Schwerzuschlägen mit Betongüten um B 450. Von den Balken aus Drehofenblätton wurde beim normgemäßen Brandversuch eine Branddauer zwischen 151 und 160 min ausgehalten gegenüber 118 min beim besten Schwerbetonbalken. Auch bei den übrigen Versuchsreihen mit anderer Belastung war die Widerstandsdauer des Leichtbetons stets um 30% länger als die des Schwerbetons. Bei den Schwerbetonbalken trat der Bruch meist durch Versagen der Bewehrung auf, während der Leichtbeton den Stahl vor frühzeitigen hohen Temperaturen schützte und damit die sehr lange Widerstandszeit von 2 Stunden und mehr bewirkte.

5.9 Haftfestigkeit von Bewehrungsstäben

Bei Ausziehversuchen [55, 60] wurden Konstruktions-Leichtbetone und 1 Schwerbeton mit Betongüten zwischen B 225 und B 600 benutzt. Die Bewehrungsstäbe waren waagrecht mit verschieden dicker Überdeckung und auch senkrecht einbetoniert. Als maßgebend wurde entweder ein Schlupf von 0,25 mm am belasteten Ende oder die höchste Zugkraft angesehen. Die Haftfestigkeit stieg mit der Betongüte an; sie war wie immer bei senkrecht einbetonierten Stäben am größten, bei waagrecht einbetonierten Stäben mit geringer Überdeckung (oben liegend) am kleinsten. Die Haftfestigkeit wurde mit den Konstruktions-Leichtbetonen zwischen 42 kp/cm² und 108 kp/cm² gefunden. Die kleinste Haftfestigkeit gehörte zu B 225 und waagrechtem, oben liegendem Stab; bei 108 kp/cm² Haftfestigkeit war bereits die Fließgrenze des Stahls erreicht. Die Haftfestigkeit im Schwerbeton war im allgemeinen

etwas größer; dies war von untergeordneter Bedeutung, da auch die etwas niedrigere Haftfestigkeit des Leichtbetons das Mehrfache der in den amerikanischen Stahlbetonbestimmungen [36] zugelassenen Spannung ausmacht [55]. Diese sind daher für Konstruktions-Leichtbeton gleich groß festgelegt wie für Schwerbeton.

5.10 Korrosionsschutz der Bewehrung

Im Auftrag des ESCSI wurde 1953 ein Schiff aus Blähton-Leichtbeton untersucht, das 1919 gebaut worden war, nach 3 Jahren auf Grund lief und halb eingetaucht im Meerwasser liegenblieb. Der verwendete sehr weiche Beton mit einem Zementgehalt von 610 kg/m^3 hatte eine Frischrohdichte von rd. $1,85 \text{ kg/dm}^3$ und eine 28 Tage-Druckfestigkeit zwischen 360 und 460 kp/cm^2 . Untersucht wurden Proben aus Schiffsteilen, die während der 34 Jahre unterhalb des Niedrigwassers, oberhalb des Mittelwassers und im Innern lagen. Die Druckfestigkeit des Betons über dem Wasser war auf rd. 700 und unter Wasser auf über 900 kp/cm^2 angestiegen. Die Bewehrung mit einer Überdeckung bis herab zu 1,5 cm war trotz des Meerwassers praktisch rostfrei geblieben. Die Haftfestigkeit wurde bei Ausziehversuchen zu 36 kp/cm^2 ermittelt.

Für den Schutz der Bewehrung gegen Rost ist die sogenannte Passivschicht, die sich im alkalischen Beton auf der Stahloberfläche bildet, wesentlich. (Chlorionen, wie die aus dem Meerwasser, können die schützende Wirkung der Passivschicht jedoch aufheben, ebenso eine Carbonatisierung des Betons bis zur Stahloberfläche.) Daß dies nicht eintrat, dürfte auf den sehr hohen Zementgehalt und den niedrigen Wasserzementwert (unter 0,45) zurückzuführen sein.

Auf Anregung der Verfasser bestimmte J. J. Shideler (PCA) an zwei 5 Jahre alten Betonen aus Drehofenblähton und Kiessand die Tiefe der carbonatisierten Schicht mit Phenolphthalein [91]. Die beiden Betone enthielten rd. 430 kg/m^3 PZ I und wurden 13 Stunden bei rd. 65°C wärmebehandelt; anschließend lagerten sie ohne weitere feuchte Nachbehandlung 5 Jahre bei rd. 23°C und 50 % rel. Feuchte. Die 28 Tage-Festigkeit des Leichtbetons betrug rd. 450 kp/cm^2 , die des Schwerbetons rd. 365 kp/cm^2 . Die Wärmebehandlung mit dem anschließenden scharfen Austrocknen dürfte die Carbonatisierung stark gefördert haben. Die Carbonisierungstiefe des Leichtbetons hatte 1,2 bis 1,8 cm, die des Kiessandbetons 1,0 bis 1,2 cm erreicht. Der Unterschied war also nicht sehr groß.

In den USA sind bis heute keine ungewöhnlichen Korrosionsschäden an hochfestem Konstruktions-Leichtbeton bekannt geworden [91]. Hinsichtlich des Korrosionsschutzes der Bewehrung werden der Konstruktions-Leichtbeton und der Schwerbeton in den Stahlbetonbestimmungen [36] gleich behandelt. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die vorgeschriebene Überdeckung in den USA allgemein etwas größer ist als in Deutschland.

6. Sonderheiten der Bemessung

Nach den amerikanischen Stahlbetonbestimmungen [36] können schlaff bewehrte Stahlbetonbauteile wahlweise nach 2 Verfahren

bemessen werden, entweder dem Gebrauchslastverfahren mit zulässigen Spannungen und der Annahme einer linearen Spannungs-Dehnungs-Linie des Betons (n-Verfahren)²¹⁾ oder dem Traglastverfahren (n-frei), das von der Bruchlast ausgeht. Spannbetonbauteile werden nach dem Traglastverfahren bemessen.

Im allgemeinen wird bei der Bemessung nicht zwischen Konstruktions-Leichtbeton und Schwerbeton unterschieden. Das gilt auch für die Bemessung von Säulen nach dem Additionsgesetz und für die Annahme einer gleichen Bruchstauchung von 3‰ beim Traglastverfahren, obwohl diese sich wegen des kleineren E-Moduls des Konstruktions-Leichtbetons von der eines gleichfesten Schwerbetons unterscheiden dürfte.

Beim n-Verfahren muß zunächst der E-Modul des Betons errechnet werden und daraus n²¹⁾. Da n im Bereich der üblichen Werte die Bemessung nur wenig beeinflusst, darf für alle Rohdichten zwischen 1,44 und 2,40 kg/dm³ eine Rohdichte von 2,32 kg/dm³ eingesetzt werden. Das gilt nicht bei der Berechnung der Durchbiegung (siehe 6.1).

6.1 Durchbiegung

Bei der rechnerischen Ermittlung der Durchbiegung muß der E-Modul des Konstruktions-Leichtbetons unter Beachtung der Rohdichte errechnet werden (siehe Formel in 5.3). In England wurde vorgeschlagen, bei diesen Berechnungen nach der Elastizitätstheorie für den Konstruktions-Leichtbeton einheitlich $n = 25$ einzusetzen [83].

Da der E-Modul des Konstruktions-Leichtbetons im allgemeinen nur 50 bis 70 % des E-Moduls eines gleich festen Schwerbetons erreicht, errechnet sich eine entsprechend größere Durchbiegung. Versuche haben allerdings gezeigt, daß die Durchbiegung von bewehrten Leichtbetonbalken nur 15 bis 35 % größer ausfiel [74], so daß hiernach auf elastizitätstheoretischer Grundlage größere Durchbiegungen für Konstruktions-Leichtbeton errechnet werden als in der Wirklichkeit zu erwarten sind.

6.2 Bemessung auf Schub

Die Schubkräfte müssen in biegebeanspruchten Bauteilen durch eine Schubbewehrung aufgenommen werden, wenn bestimmte Schubspannungen überschritten werden. Für Stahl- und Spannbeton und unabhängig vom Berechnungsverfahren betragen diese zulässigen Schubspannungen für Konstruktions-Leichtbeton ohne besonderen Nachweis nur 60 % der Werte für gleichfesten Schwerbeton, da die Schubfestigkeit des Konstruktions-Leichtbetons je nach Zuschlag zwischen 60 und 100 % der eines Schwerbetons gleicher Güte lag (siehe Abschnitt 5.2). Die zulässigen Schubspan-

²¹⁾ Abweichend von unserem n-Verfahren, bei dem $n = 15$ angenommen wird, muß man nach der amerikanischen Regelung zunächst den E-Modul des Betons in Abhängigkeit von dessen Druckfestigkeit und Rohdichte errechnen (siehe Formel in Abschnitt 5.3) und damit dann n ermitteln.

nungen für Konstruktions-Leichtbeton (n-Verfahren) betragen je nach Betongüte bei Balken 2,3 bis 3,3 kp/cm² und bei Platten 4,2 bis 6,0 kp/cm². Sie dürfen erhöht werden, wenn für einen bestimmten Zuschlag das Verhältnis $Z_s/D^{1/2}$ (Z_s = Spaltzugfestigkeit, D = Druckfestigkeit) für das Mittel aus 2 Güteklassen des daraus hergestellten Betons entsprechend groß ausfällt. (Die Schubfestigkeit ist bei Beton gleicher Güte direkt proportional der Spaltzugfestigkeit des lufttrockenen Betons.) Im Durchschnitt ergaben sich hiernach für Konstruktions-Leichtbeton aus Drehofen-Blähton rd. 80 % der für Schwerbeton zugelassenen Schubspannungen [34], also 33 % mehr als oben angegeben.

Müssen die Schubkräfte durch Bewehrung aufgenommen werden, so dürfen die Schubspannungen auch dann bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten, die jedoch wesentlich höher liegen (beim n-Verfahren z. B. je nach Betongüte zwischen 18 und 25 kp/cm²); hierbei wird nicht zwischen Konstruktions-Leichtbeton und Schwerbeton unterschieden.

6.3 Vorspannverluste durch elastisches Verformen, Kriechen und Schwinden

Gegenüber Schwerbeton sind bei Konstruktions-Leichtbeton, der nachträglich vorgespannt wird, das im allgemeinen etwas größere Kriechen und Schwinden und bei im Spannbett hergestellten Teilen außerdem der niedrigere E-Modul zu berücksichtigen.

Elastizitätsmodul. Bei im Spannbett hergestellten Bauteilen ist durch eine größere Überdehnung des Spannstahls dem kleineren E-Modul des Leichtbetons Rechnung zu tragen, soweit die Streckgrenze des Stahls das erlaubt. Bei nachträglicher Vorspannung wird ein größerer Spannweg und bei mehreren Spanngliedern unter Umständen ein Nachspannen der zuerst vorgespannten Glieder nötig.

Kriechen und Schwinden. Da der Vorspannverlust durch Kriechen und Schwinden annähernd proportional diesen Verkürzungen ist, muß bei Konstruktions-Leichtbeton im allgemeinen mit höheren Vorspannverlusten gerechnet werden. Bei den unter 5.4 erwähnten Untersuchungen [71] erreicht der an Rechteckbalken (Querschnitt 12,7 cm · 15,2 cm, Länge 2,72 m) mit nachträglicher Vorspannung gemessene Spannungsverlust durch Kriechen und Schwinden nach 1 1/2 Jahren für die beiden Leichtbetone im Mittel 27 %, für den Schwerbeton 17 %; von diesem Spannungsverlust entfielen 4 % auf das Kriechen des Stahls. Es wurde geschätzt, daß der gesamte Spannungsverlust im Endwert auf 30 bzw. 20 % ansteigen würde. Die Minderung war hier groß, weil das Schwinden bei sehr trockener Lagerung beträchtlich war; in anderer Umgebung und im Bauwerk mit größeren Querschnitten wäre der Vorspannverlust wahrscheinlich kleiner ausgefallen.

Aufschlußreich ist auch eine Rechnung mit diesen Versuchsergebnissen [71], nach der sich bei einer Ausgangs-Betondruckspannung von 70 kp/cm² folgende absoluten Spannungsverluste im Stahl ergaben:

Betonart	Spannungsverlust im Stahl	
	bei nachträglichem Verbund	bei sofortigem Verbund (Spannbett)
Schwerbeton	19,6 kp/mm ²	28,8 kp/mm ²
Leichtbeton A	33,4 kp/mm ²	42,8 kp/mm ²
Leichtbeton B	31,3 kp/mm ²	40,0 kp/mm ²

Der Spannungsverlust des Stahls im Leichtbeton war bei nachträglichem Verbund rd. 60 %, bei sofortigem Verbund rd. 45 % größer als der im Schwerbeton. Diese größeren Vorspannverluste beeinflussen lediglich die wirtschaftlichen Möglichkeiten des vorgespannten Konstruktions-Leichtbetons; sie sind – nach den Ausführungsbeispielen in Abschnitt 2.2 zu schließen – in den USA kein Hindernis für die weiter zunehmende Anwendung des hochfesten Leichtbetons.

7. Zusammenfassung

Konstruktions-Leichtbeton wird in den USA in zunehmendem Maße aus Drehofen-Blähton hergestellt; er bietet sowohl in wirtschaftlicher Hinsicht Vorteile als auch besondere konstruktive Möglichkeiten.

Der Rohstoff – Ton, Tonschiefer und bevorzugt Schiefertone – wird in Drehöfen, die bis zu 60 m lang sind, bei Temperaturen zwischen 1000 und 1200 °C gebrannt. In einem meist engen Temperaturbereich entwickelt geeigneter Rohstoff eine Schmelzphase mit der erforderlichen Viskosität und ein blähendes Gas. Das Brennen im Drehofen erlaubt den Durchsatz getrennter Rohstoff-Korngruppen und einen auf sie abgestimmten Ofengang. Dadurch gelingt es, feste und gedrungene Zuschlagkörner mit geschlossener Oberfläche für Beton hoher Festigkeit zu erzeugen. Die Schüttdichte der Korngruppe 5/19 mm liegt bei etwa 0,7 kg/dm³. Die hohen Herstell- und Anlagekosten bedingen für Blähtonzuschlag einen höheren Kubikmeterpreis als für natürlichen Schwerzuschlag; die Wirtschaftlichkeit des teureren Blähtonbetons ergibt sich jedoch bei vielen Bauten durch das kleinere Gewicht.

Beim Mischungsaufbau des Konstruktions-Leichtbetons aus Drehofen-Blähton müssen – wie allgemein bei Leichtzuschlägen – dessen Eigenheiten berücksichtigt werden. Mit korngfestem Blähton lassen sich Betone der Güteklassen B 300 bis B 600 mit Rohdichten zwischen 1,50 und 1,80 kg/dm³ bei einem Zementgehalt zwischen 350 und 550 kg/m³ herstellen. Mit 400 kg PZ 475 je m³ Beton und Wärmebehandlung wurden nach 1 Tag Festigkeiten über 400 kp/cm² erzielt, die für vorgespannte Fertigteile im Spannbett ausreichen. Die Biege-, Spaltzug- und Scherfestigkeit des Konstruktions-Leichtbetons betragen im allgemeinen rd. 70 bis 80 % der des Schwerbetons gleicher Druckfestigkeit.

Auf den Schwerbeton gleicher Druckfestigkeit bezogen, erreicht der Elastizitätsmodul des Leichtbetons aus Drehofen-Blähton etwa 60 bis 80 %. Das Kriechen und Schwinden des Blähton-Leicht-

betons hing bei den Laboratoriumsuntersuchungen stark von den Korneigenschaften der einzelnen Erzeugnisse ab. Mit einigen Bläh-tonzuschlägen wurden Kriech- und Schwindmaße festgestellt, die denen von Schwerbeton entsprachen; im Durchschnitt war das Kriechen und Schwinden jedoch um 30 bis 40 % größer.

Die Wärmeleitzahl des trockenen Konstruktions-Leichtbetons lag zwischen 0,4 und 0,6 kcal/mh°C; sein Wärmedurchlaßwiderstand ist also ungefähr doppelt so groß wie der des trockenen Schwerbetons. Die Wasseraufnahme des Konstruktions-Leichtbetons war zwar im Mittel um 40 % größer als die des Schwerbetons, der Widerstand gegen Wasserdruck bei beiden Betonarten jedoch praktisch gleich groß. Zweckentsprechend hergestellte Blähtone waren frostbeständig. Stahl- und Spannbetonbauteile aus dem Konstruktions-Leichtbeton mit Blähton erreichten beim Brandversuch eine längere Feuerwiderstandsdauer. Die Haftfestigkeit des Bewehrungsstahls im Konstruktions-Leichtbeton wurde etwa ebenso groß wie im Schwerbeton festgestellt, ebenso der Korrosionsschutz.

Stahl- und Spannbetonbauteile aus Konstruktions-Leichtbeton werden in den USA im allgemeinen wie bei Schwerbeton bemessen. Berücksichtigung finden dabei lediglich die kleinere Schubfestigkeit bei Bauteilen ohne Schubbewehrung, der kleinere E-Modul bei der Berechnung der Durchbiegung und gegebenenfalls der größere Spannungsverlust durch das größere Kriechen und Schwinden.

Zahlreiche Hochbauten und Fertigteile, z. T. mit ungewöhnlichen Ausmaßen, sowohl aus schlaff bewehrtem als auch aus vorgepanntem Konstruktions-Leichtbeton mit Drehofen-Blähton zeigen, wie vielfältig dieser Zuschlagstoff in den USA angewendet wird. Wirtschaftliche Vorteile ergaben sich bei Hochhausbauten mit mehr als 10 Stockwerken, bei Bauten großer Spannweite, wie z. B. Hallen und Brücken, sowie bei Fertigteilen. Die Entwicklung im westlichen Europa liegt demgegenüber noch weit zurück.

SCHRIFTTUM:

- [1] Stanton, T. E.: Cement and concrete control – San Francisco Oakland Bay Bridge. Proc. Amer. Concr. Inst. 32 (1936) S. 1/27.
- [2] Woodruff, G. B.: Light weight concrete pavement on the San Francisco Oakland Bay Bridge. Proc. Amer. Concr. Inst. 34 (1938) S. 225/238.
- [3] Whitaker, T.: Lightweight concrete in America. National Building Studies, Spec. Report No. 13, London 1953.
- [4] Walz, K., P. Misch und H. H. Schönrock: Beton in den USA. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 30. Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf 1962, S. 28 u.f.
- [5] ESCSI News. Expand. Shale Concr. Facts 9 (1964) H. 3, S. 15.
- [6] Finsterwalder, U.: Schalenschiffbauten. Vortrag auf der 45. Hauptversammlung des Deutschen Beton-Vereins, Wiesbaden 1948. Sammelband der Vorträge S. 96/112.
- [7] Fourth Congress of the Fédération Internationale de la Précontrainte Rome-Naples 1962, Vol. 1, Thème III.
- [8] Dokumentationsstelle für Bautechnik: Geblähte Tone als Betonzuschlagstoffe. Literaturzusammenstellung N 642. Stuttgart, Januar 1962.
- [9] Ankündigung der Herbsttagung 1963 des American Concrete Institute. Proc. Amer. Concr. Inst. 60 (1963) H. 11, News Letter, S. 2 und 5.
- [10] Reichard, T. W.: Creep and drying shrinkage of lightweight and normal-weight concretes. National Bureau of Standards Monograph 74. US Department of Commerce, Washington D.C. 1964.
- [11] Ohne Verf.: Lightweight Concrete. (Zusammenfassung bis zum Jahre 1955.) Nr. 4830, J. J. Berliner and Staff, New York.
- [12] Ohne Verf.: Light weight aggregate producing plants in the U.S. and Canada. Pit and Quarry Publications, Chicago 1961.
- [13] Schechter, W.: Twin kilns toil for Norlite. Rock Products 66 (1963) No. 3, S. 63/66.
- [14] Expanded Shale Concrete Facts 8 (1962) und 9 (1963).
- [15] Building code requirements for reinforced concrete. ACI-Standard 318-63. Amer. Concr. Inst. Publication. Detroit, June 1963.
- [16] Walz, K.: Beton- und Zementdruckfestigkeiten in den USA und ihre Umrechnung auf deutsche Prüfwerte. beton 12 (1962) H. 9, S. 420/423, und H. 10, S. 463/466; ebenso Betontechnische Berichte 1962. Beton-Verlag, Düsseldorf 1963, S. 123/140.
- [17] Jenny, D. P.: Some approaches to structural lightweight concrete design. Manuskript ESCSI, Washington 1962.
- [18] Record-size concrete dome. Expand. Shale Concr. Facts 8 (1962) H. 3, S. 3.
- [19] Concrete roof shaped to a flight form typifies TWA Terminal. Expand. Shale Concr. Facts 8 (1962) H. 4, S. 16.
- [20] Brown Palace Hotel. Expand. Shale Concrete Facts 8 (1962) H. 2, S. 4.
- [21] Multi-story garage for San José State College. Expand. Shale Concr. Facts 9 (1963) H. 1, S. 6.
- [22] Nothing lightweight about this beam – except the aggregate! Expand. Shale Concr. Facts 8 (1962) H. 2, S. 6.
- [23] Floating equipment barge retrieves oil from Louisiana swamps. Expand. Shale Concr. Facts 8 (1962) H. 4, S. 4.
- [24] Lightweight concrete in Kansas City Interchange. Expand. Shale Concr. Facts 9 (1963) H. 2, S. 6.

- [25] Bridge Deck Survey. Monographie ESCSI, Washington 1960.
- [26] Klieger, P., und J. A. Hanson: Freezing and thawing tests of lightweight aggregate concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 779/796.
- [27] Erskine, F. G.: Diskussionsbeitrag zu [26]. Proc. Amer. Concr. Inst. 58 (1961/62) S. 1742/1743.
- [28] Steinicke, K.-H.: Herstellung, Anwendung und Wirtschaftlichkeit des Blähton-Betons im Hochbau. Diss. T. H. Karlsruhe 1960.
- [29] Bloem, D. L.: Persönliche Mitteilung der National Ready Mixed Concrete Association, Washington D.C. Okt. 1963.
- [30] Herold, B. C.: Expanded clay and shale association – midyear meeting. Pit and Quarry 55 (1962/63) No. 4, S. 88.
- [31] ASTM Standard C 330-60 T: Tentative specifications for lightweight aggregates for structural concrete. 1961 Book of ASTM Standards, Part 4, S. 522/529.
- [32] ASTM Standard C 331-59 T: Tentative specifications for lightweight aggregates for masonry units. 1961 Book of ASTM Standards, Part 4, S. 510/517.
- [33] Mitteilung auf der ersten Sitzung des Ausschusses „Vorgespannter Leichtbeton“ der Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP) am 10. 1. 1964 in Wexham Springs, England; siehe auch: Prestressed lightweight concrete. Indian Concrete Journal 38 (1964) No. 3, S. 97/98.
- [34] Jenny, D. P.: Lightweight structural concrete. 1963 Concrete Short Course; Oregon State University. Manuskript ESCSI, Washington 1963.
- [35] ACI Standard 613 A-59: Recommended practice for selecting proportions for structural lightweight concrete. Amer. Concr. Inst. Publication. Detroit, August 1959.
- [36] ACI Standard 318-63: Building code requirements for reinforced concrete. Amer. Concr. Inst. Publication. Detroit, June 1963.
- [37] ACI Committee 301: Suggested specifications for structural concrete for buildings. Proc. Amer. Concr. Inst. 60 (1963) No. 10, S. 1321/1373.
- [38] Riley, Ch. M.: Relation of chemical properties to the bloating of clays. Journal of the American Ceramic Society 34 (1951) No. 4, S. 121/128.
- [39] Everhart, J. O., E. G. Ehlers, J. E. Johnson und J. H. Richardson: A study of lightweight aggregate. Ohio State University (Columbus); Engineering Experiment Station, Bulletin No. 169 (1958).
- [40] Davis, R. E., und J. W. Kelly: Lightweight aggregates. Symposium on Mineral Aggregates 1948. Amer. Soc. Test. Materials. Spec. Techn. Publication No. 83 (1948) S. 160/171.
- [41] Austin, C. R., J. L. Nunes und J. D. Sullivan: Basic factors involved in bloating of clays. Amer. Inst. of Mining and Metallurgical Engineers; Techn. Publication No. 1486 (1942).
- [42] Conley, J. E., H. Wilson, T. A. Klinefelter und andere: Production of lightweight concrete aggregates from clays, shales, slates and other materials. U.S. Bureau of Mines Reports. Investigation No. 4401 (1948)
- [43] Kaempfe, F.: Zur Frage des Blähtons. Zement-Kalk-Gips 11 (1958) H. 10, S. 437/442.
- [44] Fastabend, H. und J.-L. Ruyter: Untersuchungen über die Bläheigenschaften von Marschtonen. Tonindustrie-Zeitung 83 (1959) H. 22, S. 532/535.
- [45] Hill, D. D., und D. N. Crook: Some causes of bloating in expanded clay and shale aggregates. Australian Journal of Applied Science 11 (1960) S. 374/384.
- [46] Lucke, K. H.: Untersuchungen über den Blähvorgang bei Tonschiefer. Silikattechnik 11 (1960) Nr. 7, S. 300/301.

- [47] Schellmann, W., und H. Fastabend: Untersuchungen über den Blähprozeß bei Tonen. Die Ziegelindustrie 16 (1963) H. 24, S. 899/905.
- [48] Chopra, S. K., Kishan Lal und S. N. Narain: Bloated clay aggregate from silt deposited at Calcutta Waterworks. The Indian Concrete Journal 37 (1963) No. 2, S. 46/50.
- [49] Reinsdorf, S.: Leichtbeton. Bd. 1, Leichtbetone aus porigen Zuschlagstoffen. VEB-Verlag für Bauwesen, Berlin 1961, S. 66/76.
- [50] Chutsch, W.: Leca – ein neuer, interessanter Baustoff. Das Baugewerbe 42 (1962) Nr. 13, S. 746/748.
- [51] Schulz, B.: Herstellung, Klassierung und Verwendung von Blähtonbeton 13 (1963) H. 8, S. 376/378.
- [52] Hanke, H.: Die Technologie der neuen Blähtonwerke. Silikattechnik 11 (1960) Nr. 7, S. 302/304.
- [53] Utley, H. F.: Crestlite's new expanded shale aggregate plant. Pit and Quarry 55 (1962) No. 3, S. 94/97.
- [54] Flint, E. P.: In lightweight aggregate production select proper burning equipment. Brick and Clay Record 116 (1950) No. 4, S. 65/66 und 69.
- [55] Shideler, J. J.: Lightweight aggregate concrete for structural use. Proc. Amer. Concr. Inst. 54 (1957/58) S. 299/328; ebenso: PCA Res. and Devel. Lab., Bulletin D 17, Skokie/Illinois 1957.
- [56] Jackson, F. H.: An impact test for gravel. Proc. Amer. Soc. Test. Materials 22 (1922) S. 362.
- [57] Report of Committee C 9: Proc. Amer. Soc. Test. Materials 28 (1928) I, S. 341.
- [58] Woolf, D. O.: Methods for the determination of soft pieces in aggregate. Proc. Amer. Soc. Test. Materials 47 (1947) S. 967.
- [59] Price, W. H., und W. A. Cordon: Tests of lightweight-aggregate concrete designed for monolithic construction. Proc. Amer. Concr. Inst. 45 (1948/49) S. 581/600.
- [60] Nelson, G. H., und O. C. Frei: Lightweight structural concrete proportioning and control. Proc. Amer. Concr. Inst. 54 (1957/58) S. 605/621.
- [61] Hummel, A.: Die Ermittlung der Kornfestigkeit von Ziegelsplitt und anderen Leichtbeton-Zuschlagstoffen. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton. H. 114, Berlin 1954, S. 21/30.
- [62] Schulz, B.: Beitrag zur Technologie des Leichtbetons. beton 14 (1964) H. 4, S. 137/142.
- [63] Lightweight concrete information sheet, No. 3: Suggested mix design for job mixed structural concrete. ESCSI, Washington D.C. 1958.
- [64] Editors of Concrete Products: Lightweight aggregate structural concrete – more points for producers. Concrete Products 1963, H. 10, S. 42/52.
- [65] Walz, K.: Anleitung für die Zusammensetzung und Herstellung von Beton mit bestimmten Eigenschaften. 2. Aufl. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1963.
- [66] ASTM Standard C 138-63: Weight per cubic foot, yield, and air content (gravimetric) of concrete.
- [67] ASTM Standard C 173-58 T: Air content of freshly mixed concrete by the volumetric method.
- [68] Schäfer, A.: Die Bestimmung des Luftporengehalts im Beton. beton 13 (1963) H. 8, S. 383/386, ebenso Betontechnische Berichte 1963. Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 127/136.
- [69] Walz, K.: Einfluß des Wassergehalts der Zuschlagstoffe auf Festigkeit und Konsistenz des Betons. Bautenschutz 3 (1932) H. 2, S. 17/20.

- [70] Leitsätze für die Bauüberwachung im Beton- und Stahlbetonbau. Deutscher Beton-Verein, 11. Aufl. Wiesbaden 1962, S. 46 und 47.
- [71] Beecroft, G. W.: Creep and shrinkage of two lightweight aggregate concretes. Highway Res. Board, Bulletin 307, Washington 1962, S. 26/41.
- [72] Lightweight concrete information sheet, No. 1: Workability is easy. ESCSI, Washington D.C. 1958.
- [73] Shideler, J. J.: Manufacture and use of lightweight aggregates for structural concrete. PCA Research and Development Laboratories, Bulletin D 40, 1961.
- [74] Hanson, J. A.: Tensile strength and diagonal tension resistance of structural lightweight aggregate concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 58 (1961) S. 1/39.
- [75] Gray, W. H., J. F. McLaughlin und J. D. Antrim: Fatigue properties of lightweight aggregate concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 58 (1961) S. 149/162.
- [76] Selvaggio, S. L., und C. C. Carlson: Fire resistance of prestressed concrete beams. Study B: Influence of aggregate and load intensity. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 6 (1964) H. 1, S. 41/64.
- [77] Hanson, J. A.: Shear strength of lightweight reinforced concrete beams. Proc. Amer. Concr. Inst. 55 (1958/59) S. 387/403.
- [78] Hanson, J. A.: Displacement of lightweight aggregate fines with natural sand in structural concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 61 (1964) S. 779/793.
- [79] Wischers, G.: Einfluß der Zusammensetzung des Betons auf seine Frühfestigkeit. Betontechnische Berichte 1963. Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 137/151.
- [80] Nordby, G. M., und W. J. Venuti: Fatigue and static tests of steel strand prestressed beams of expanded shale concrete and conventional concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 54 (1957/58) S. 141/160.
- [81] Graf, O., W. Albrecht und H. Schäffler: Die Eigenschaften des Betons. 2. Aufl. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg 1960.
- [82] Bonzel, J.: Über die Biegezugfestigkeit des Betons. Betontechnische Berichte 1963. Beton-Verlag, Düsseldorf 1964, S. 59/83.
- [83] Evans, R. H., und A. V. Dongre: The suitability of a lightweight aggregate (Aglite) für structural concrete. Magazine of Concrete Research 15 (1963) H. 44, S. 93/100.
- [84] Bonzel, J.: Über die Spaltzugfestigkeit des Betons. beton 14 (1964) H. 3, S. 108/114, und H. 4, S. 150/157.
- [85] Hanson, J. A.: Strength of structural lightweight concrete under combined stress. Journal of the PCA Research and Development Laboratories 5 (1963) H. 1, S. 39/46.
- [86] Best, C. H., und M. Polivka: Creep of lightweight concrete. Magazine of Concrete Research 11 (1959) H. 33, S. 129/134.
- [87] Pauw, A.: Static modulus of elasticity of concrete as effected by density. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 679/687.
- [88] Rüsck, H., K. Kordina und H. Hilsdorf: Der Einfluß des mineralischen Charakters der Zuschläge auf das Kriechen von Beton. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 146. Verlag von Wilh. Ernst & Sohn, Berlin 1962, S. 19/32
- [89] Wollers, F.: Bestimmung des Wärmeausdehnungskoeffizienten von Baustoffen, insbesondere Mauerwerk. Diss. T.H. Berlin 1933, S. 35.
- [90] Lightweight concrete information sheet, No. 4: Thermal insulation of various walls. ESCSI, Washington D. C. 1958.
- [91] Shideler, J. J.: Persönliche Mitteilungen. Febr. und März 1964.