

Leichtbeton als tragender Baustoff (Technologie des Leichtbetons, Berechnung von Tragwerken)

Autor(en): **Pauw, Adrian**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht**

Band (Jahr): **8 (1968)**

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-8724>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Vb

**Leichtbeton als tragender Baustoff (Technologie des Leichtbetons,
Berechnung von Tragwerken)**

ADRIAN PAUW

Professor of Civil Engineering, University of Missouri, Columbia, Mo.

1. Einleitung

Das vermehrte Streben nach wirksamerer Anwendung von Materialien in Konstruktionen, verbunden mit dem zunehmenden Mangel an natürlichen Zuschlagstoffen von guter Beschaffenheit in vielen Teilen der Welt, führte zu vermehrter Verwendung von fabrikmäßig hergestellten Leichtzuschlagstoffen im Beton. Weil Beton mit Konstruktionseigenschaften mit vielen dieser Zuschlagstoffen ohne weiteres hergestellt werden kann, werden große Mengen in Betonbauten verwendet; nicht nur in den Vereinigten Staaten von Amerika, sondern auch in anderen Teilen der Welt. Allein in den USA und in Kanada erreicht die laufende Jahreserzeugung von hergestellten Leichtzuschlagstoffen jeder Art bald 10 Millionen Kubikmeter. Fast 40% der Gesamtherstellung werden für Konstruktionsleichtbeton angewendet, der Rest vorwiegend für Betonblockherstellung und Isolierbeton gebraucht. Die Zuwachsrate in der Verwendung von Leichtzuschlagstoffen für Konstruktionsbeton ist besonders bemerkenswert. Für Zuschlagstoffe der Drehofenart, die ungefähr 70% der Gesamtherstellung aller Arten darstellt, hat die Verwendung für Konstruktionsbeton von weniger als 30 000 m³ im Jahre 1952 auf einen gegenwärtigen Verbrauch von über 3 000 000 m³ zugenommen. Konstruktionsleichtbeton hat viele verschiedene Anwendungen, einschließlich mehrgeschossiger Gebäude, wie Wohnhäuser, Bürogebäude, Garagen, Hotels und ähnliche; unzählige Arten von Schalen, einschließlich Falwerke; Platten für Brücken und Übergänge; und überhaupt in allen Arten von Konstruktionen, bei denen eine Gewichtsverminderung eine Gesamtwirtschaftlichkeit bringt. Einige wenige der bedeutenden Projekte, die

mit Leichtbeton hergestellt wurden, umfassen die überwältigende Empfangshalle der TWA im JFK-Flughafen, der 60stöckige Wohnturm in Marina-City in Chicago und das Statler Hilton Hotel in Dallas. Damit ist gezeigt, daß Konstruktionsbeton mit Leichtzuschlagstoffen als wichtiger Teil der Konstruktionsbetonindustrie sich schnell entwickelt hat.

Da die mechanischen Eigenschaften des Konstruktionsleichtbetons – mit Ausnahme des Raumgewichtes – denjenigen von normalem Beton sehr ähnlich sind, kann der Entwurf sowohl von armiertem als auch von vorgespanntem Leichtbeton auf denselben Voraussetzungen gründen, wie diejenigen, die für normalen Beton verwendet werden. Konstruktionsbetons mit Leichtzuschlagstoffen besitzen aber einmalige Eigenschaften, die in bedeutenden Gesichtspunkten von denjenigen des normalen Betons abweichen. Sollen diese Eigenschaften richtig genutzt werden, so sind ihre Auswirkungen auf das Konstruktionsverhalten sorgfältig abzuklären.

Obwohl sich die Verwendung von Beton mit leichten Zuschlagstoffen rasch ausbreitet und eine vermehrte Verwendung in der Zukunft unbestritten ist, ist der Leichtbeton vielen Ingenieuren, Architekten und Bauunternehmern immer noch zu wenig bekannt. Dies ist teils das Ergebnis einer großen Verschiedenheit unter den natürlichen und hergestellten Leichtzuschlagstoffen, die für die Betonherstellung erhältlich sind und die im Raumgewicht und anderen physikalischen Eigenschaften stark variieren. Figur 1 zeigt eine Klassifizierung des Leichtbetons, der vom Isolierbeton mit dem kleinen Raumgewicht von 240 kg/m^3 bis zu dem dichteren Konstruktionsbeton mit einem Raumgewicht von 2000 kg/m^3 reicht. Die Erörterungen in dieser Abhandlung beschränken sich auf Leichtbetons für tragende Konstruktionen, der wie folgt definiert ist:

Beton, enthaltend geblähte oder poröse Zuschlagstoffe, mit einem Raumgewicht von 1350 bis 2000 kg/m^3 und einer Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen von 175 bis 500 kg/cm^2 .

Zum Vergleich ist der normale Beton wie folgt definiert:

Beton, der Zuschlagstoffe aus natürlich gebrochenem Stein oder Sand und Kies enthält und ein Raumgewicht von 2400 kg/m^3 sowie eine Zylinderdruckfestigkeit nach 28 Tagen von 175 bis 500 kg/cm^2 hat.

2. Leichte Zuschlagstoffe für Konstruktionsbeton

Die Herstellung von Leichtbeton mit tragenden Eigenschaften gründet auf der Verfügbarkeit von hochwertigen Leichtzuschlagstoffen. Figur 1 zeigt, daß verschiedene Arten von Zuschlagstoffen am oberen Ende der Leiter für Konstruktionsbeton verfügbar sind. Immerhin können nicht alle diese Stoffe benutzt werden, um hochfesten Beton herzustellen, ohne die Hinzufügung von natürlichen Stoffen und/oder eines übermäßigen Zementfaktors. Die natürlichen Zuschlagstoffe in dieser Reihe, Bims, Lavaschlacke und Tuff, sind Leicht-

stoffe, die im allgemeinen in Vulkanablagerungen gefunden werden. Verbunden mit Natursand können einige dieser Stoffe verwendet werden, um ziemlich guten Beton herzustellen, aber hohe Festigkeiten sind schwierig zu erhalten und erfordern im allgemeinen einen übermäßigen Zementgehalt.

Die Rohstoffe, die in der gewerblichen Herstellung von Leichtzuschlagstoffen verwendet werden, sind entweder Stoffe, die in einem natürlichen Zustand gefunden werden, wie bestimmte Arten von Lehm, Schieferton und Schiefer, oder Nebenerzeugnisse anderer gewerblicher Betriebe, wie Schlacke von Hochöfen oder Flugasche vom Verbrennen von Koks oder Kohle in den Kraftwerken. Hochofenschlacken, obwohl sie für Betonsteine viel verwendet werden, eignen sich wenig und unterschiedlich für die Betonherstellung.

Gegenwärtig gibt es mindestens hundert Werke in den USA allein, die Leichtzuschlagstoffe herstellen. Von diesen verwenden ungefähr sechzig Werke das Drehofenverfahren. In diesem Verfahren wird Rohlehm, Schieferton oder Schiefer in Drehöfen unter überwachten Bedingungen erhitzt und gebläht. Die anderen vierzig Werke verteilen sich ungefähr gleich auf Sinterwerke und Werke für geblähte Hochofenschlacke. Im Sinterverfahren wird Rohlehm, Schieferton, Schiefer oder Flugasche mit zerstäubtem Brennstoff auf einem beweglichen Rost gemischt, gebrannt und gebläht unter überwachten Bedingungen. Geblähte Schlacke wird hergestellt, indem geschmolzene Hochofenschlacke Wasser-, Dampf- und/oder Luftstrahlen unter überwachten Bedingungen ausgesetzt wird.

In diesen Verfahren wird die Blähung dadurch erzeugt, indem Zellen im Zuschlagstoff gebildet werden, entweder durch 1. Bildung von Gasen wie SO_2 oder CO_2 , welche die flüssigen Mineralbestandteile aufblähen, 2. Abbrennen von Brennmaterial oder 3. Bildung von Dampf, der in den Mineralien enthalten ist.

Das Erzeugnis ist ein leichter Zellenzuschlagstoff mit Zellen, die von mikroskopisch klein bis zu mehreren Millimetern in ihrer längsten Ausdehnung reichen können, abhängig vom angewandten Herstellungsverfahren und dem verwendeten Rohmaterial. Für einen idealen Zuschlagstoff wäre die sich ergebende Zellenstruktur ein Honigwabengefüge, bestehend aus leeren Räumen, bescheiden in Größe und vollständig getrennt durch starke Zellenwände.

Der Ausstoß der meisten Werke ist ein Klinker, der abgekühlt, gebrochen und sortiert werden muß, um einen abgestuften Zuschlagstoff herzustellen. Diese Zuschlagstoffe sind im allgemeinen scharfkantig, eckig und haben eine genarbte oder porige Oberflächenbeschaffenheit. Durch Vorsortierung oder Granulierung der Rohstoffe und durch Überwachen des Brennens, um Zusammenballungen zu verhindern oder diese auf einen Geringstwert zu beschränken, kann ein runder Zuschlagstoff sowohl im Drehofen wie auch im Sinterverfahren hergestellt werden.

Es ist offensichtlich, daß mehrere verschiedene Verfahren und Stoffe, die verfügbar sind, viele verschiedene Arten von Zuschlagstoffen mit stark vari-

ierenden Eigenschaften ergeben. Es muß immerhin anerkannt werden, daß alle diese Verfahren und Stoffe erfolgreich angewandt wurden.

3. Eigenschaften der Leichtzuschlagstoffe

Währendem die Eigenschaften der Leichtzuschlagstoffe, als Art klassifiziert, beträchtlich ändern können, ist die physikalische Eigenschaft eines Leichtzuschlagstoffes von einer einzelnen Herkunft im allgemeinen gleich. Immerhin besitzen die Leichtzuschlagstoffe einmalige Eigenschaften, die sie von normalgewichtigen Zuschlagstoffen unterscheiden. Diese einmaligen Eigenschaften zu verstehen ist erforderlich, um die volle Leistungsfähigkeit dieses Stoffes zu nutzen.

3.1. Das *Raumgewicht* dieser Zuschlagstoffe ist beträchtlich niedriger. Leichtbeton ergibt eine 30prozentige Gewichtsverminderung und macht ihn auch in Fällen anwendbar, wo der Gebrauch von normalem Beton nicht in Frage kommt. Die feineren Körnungen haben allgemein ein etwas größeres Raumgewicht, weil sie gerne Körner von Stoffen einschließen, die am wenigsten gebläht sind. Dieser Unterschied in Dichte der Zuschlagstoffkörner erklärt eine gewisse Neigung zur Entmischung bei der Lagerung. Gleichmäßige Zuschlagstoffkörnung ist für Leichtgewicht-Zuschlagstoffe weniger geeignet; Änderungen in der Körnung können Schwankungen des Raumgewichts und anderer Eigenschaften des Betons verursachen.

3.2. Das *Maximalkorn* von Leichtzuschlagstoffen ist allgemein kleiner als dasjenige der meisten normalen Zuschlagstoffe. Für geblähte Schlacke und Blähschiefer ist die Höchstgröße allgemein 1–2 cm, obwohl einige der Drehofen-Blähschiefer in Größen bis zu 2,5 cm erhältlich sind. Meistens sind die Erfordernisse für normalen Beton, verglichen mit denjenigen für Leichtbeton, bezüglich beispielsweise optimalen Luftgehalts die gleichen, wenn die höchste Zuschlagstoffgröße betrachtet wird.

3.3. Die *Form* der Teile der Leichtzuschlagstoffe, wie vorgängig festgehalten, kann ganz verschieden sein, reichend von den rauhen und unregelmäßigen, gebrochenen Zuschlagstoffen mit genarbtten und rauhen Oberflächen bis zu den gerundeten und feinen Kügelchen, die durch Granulierung der Rohstoffe und Überwachen des Brennvorganges hergestellt wurden.

3.4. Das *spezifische Gewicht* der Zuschlagskörner ist sehr niedrig, verglichen mit den üblichen Betonzuschlagstoffen. Da die aufgeblähten Körner ganz unterschiedlich Hohlräume oder eingeschlossene Luftblasen enthalten, ist es schwierig, das spezifische Gewicht zu bestimmen. Dies gilt speziell für die feinen Anteile wegen unterschiedlicher Wasseraufnahmefähigkeit. Das spezifische Gewicht, wie auch das Raumgewicht, ändert mit dem Durchmesser der Körner. Größere Körner haben niedrigere Werte, kleinere Körner sind schwerer.

3.5. Die *Festigkeit* der Zuschlagsteile ändert je nach Herkommen. Die Skala

geht hier von schwach und zerbrechlich bis zäh und hart. Die Festigkeit der Körner muß nicht unbedingt ihre Verwendung im Leichtbetonbau bestimmen. Sie geht jedoch ziemlich parallel mit der Druckfestigkeit des damit hergestellten Materials, sofern mit gleichem Zementgehalt und gleicher Konsistenz gearbeitet wird. Dies gilt besonders bei höheren Festigkeiten.

3.6. *Beschaffenheit und Eignung des Zuschlagmaterials*, wie sie durch die Standard-Frost- und -Tauprüfung festgelegt werden, sind normalerweise entsprechend den Werten, die mit üblichem Beton guter Qualität erreicht werden. Einschlüsse fremder Materialien, wie gebrannte Tone oder eisenhaltige Stoffe, welche verschlechternd wirken und Verfärbungen hervorrufen, sollten in zulässigen Grenzen gehalten werden.

3.7. Die *Wasseraufnahmefähigkeit* der Leichtzuschlagstoffe ist hoch, verglichen mit den 1–2 Gewichtsprozent Wasser pro Trockengewicht, welche normale Zuschläge aufnehmen. Letztere enthalten meistens genügend innere Feuchtigkeit im Moment des Mischens, so daß sie dann kein oder wenig mehr zusätzliches Wasser aufnehmen. Daher kann bei normalem Beton mit der Wassermenge für den Mischprozeß sehr einfach die Wasseraufnahmefähigkeit der Zuschläge berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu nehmen die meisten Leichtzuschläge 5–20 Gewichtsprozent Wasser auf. Die gesamte Wasseraufnahme erfolgt zudem normalerweise nicht während des Mischens und vor dem Einbringen. Soll in der Zeit zwischen Anmachen und Einbringen das Gemisch nicht zu steif werden, muß zusätzliches Wasser beim Mischen beigegeben werden. Die Wasseraufnahmefähigkeit ist daher ein wichtiger Faktor, der berücksichtigt werden muß, soll die Verarbeitbarkeit der einzelnen Mischerchargen ungefähr konstant bleiben.

Es ist wichtig zu wissen, daß das durch die Körner aufgenommene Wasser für den Hydratationsprozeß des Zementes nicht zur Verfügung steht und daher keinen Einfluß auf den Wasserzementfaktor hat. Bei vergleichbaren Festigkeiten ist der effektiv vorhandene Wasserzementfaktor für Leichtbeton derselbe wie für normalen Beton.

Die hohe Wasseraufnahmefähigkeit hat jedoch auch Vorteile. Das aufgesaugte Wasser ist ein inneres Reservoir von Feuchthaltewasser, das für die fortgesetzte Hydratation des Zementes zur Verfügung steht, und zwar sogar dann, wenn die normalen Feuchthaltevorkehrungen aufgehört haben. Deshalb wird der Leichtbeton in den ersten Monaten nach seiner Herstellung und nach äußerer Nachbehandlung relativ große Zunahmen an Festigkeit zeigen.

4. Physikalische Eigenschaften von Leichtbeton

Die Zusammenstellung der nachfolgend angegebenen Eigenschaften beschränkt sich auf die in Figur 1 klassifizierten und als für tragend, armiert und vorgespannt geeignet bezeichneten Zuschlagstoffe. Unter dieser Einschränkung

fallen die Eigenschaften von beinahe allen Leichtbeton-Zuschlagstoffen, welche in den USA, in Kanada oder Australien hergestellt werden, in ein breites Band, das jedoch kaum größer ist, als dasjenige von Zuschlagstoffen für normalen Beton.

Die Eigenschaften von Leichtbeton sind etwas abhängiger vom Wassergehalt des Betons. Im weitern scheinen die meisten Eigenschaften eine direkte Funktion des Eigengewichtes zu sein, zum Beispiel haben leichtere Betonarten niedrigeren Elastizitätsmodul und niedrigere Wärmeleitfähigkeit als schwerere Leichtbetons vergleichbarer Festigkeit. Auf der andern Seite besteht keine klare Abgrenzung der physikalischen Eigenschaften auf Grund der Zuschlagstoffsorten, weder als Funktion der Ursprungsmaterialien noch als Funktion des Fabrikationsprozesses.

Die Figuren 2 bis 8 zeigen den Bereich einiger wichtiger physikalischer Eigenschaften, die nachstehend beschrieben sind. Die Eigenschaften von Beton aus Elgin-Sand und -Kies vergleichbarer Festigkeit und Konsistenz sind durch gestrichelte Linien zu Vergleichszwecken dargestellt.

4.1. Das *Raumgewicht* von Leichtbeton variiert von 1300 bis 2000 kg/m³ oder ungefähr 60–80% von normalem Beton gleicher Festigkeit. Diese Eigenschaft ist selbstverständlich der hauptsächlichste Grund für seine Anwendung, und sie kann diese wirtschaftlich machen trotz der höheren Kosten der Leichtbeton-Zuschlagstoffe (Figur 2).

4.2. Druckfestigkeiten bis zum praktisch höchsten Wert von 400 kg/cm² werden erhalten mit etwas größerem Zementgehalt als für gewöhnlichen Beton entsprechender Granulometrie und Festigkeit. Druckfestigkeiten über 600 kg pro cm² wurden gemeldet bei Verwendung von ausgesuchten Zuschlagstoffen und eher hohen Zementgehalten. Auf der andern Seite liegt die größte Druckfestigkeit für einzelne Zuschlagstoffsorten bei 350 kg/cm², was wahrscheinlich auf die kleinere Festigkeit der einzelnen Zuschlagkörner zurückzuführen ist. Bei den meisten Leichtbetonaggregaten und bei gleichem Zementgehalt und gleicher Konsistenz können die feineren Anteile in Natursand beigegeben werden, was die Druckfestigkeit erhöht. Diese Erhöhung ist meistens jedoch nicht immer gleichzeitig auch eine Erhöhung des Raumgewichtes (Figur 3).

Wie bei normalem Beton beschleunigt eine Dampfhärtung die Festigkeitszunahme. Wegen der besseren isolierenden Eigenschaften von Leichtbeton ist die Festigkeitszunahme meist sogar noch mehr beschleunigt als bei normalem Beton unter gleichen Dampfhärtungsbedingungen.

4.3. *Schubfestigkeit (Haupt-Zugspannungen), Spalt-Zug-Festigkeit und Bruchmodul* sind alle in enger Abhängigkeit von der Zugspannung. Die Spalt-Zug-Festigkeit kann deshalb als guter Richtwert für die anderen Eigenschaften gelten. Für sorgfältig feucht nachbehandelten Leichtbeton fallen die Spalt-Zug-Spannungen in ein enges Band, das nicht weit entfernt liegt vom Band für normalen Beton. Die entsprechenden Spalt-Zug-Festigkeitswerte jedoch von Leichtbeton, der ausgetrocknet wurde, ist beträchtlich unter den Werten für solchen,

der sorgfältig feucht nachbehandelt wurde. Dieses Abfallen scheint herzurühren von unterschiedlichen Schwindspannungen, die sich zufolge unterschiedlicher Feuchtigkeitsgehalten im Innern und an der Oberfläche einstellen. Dieses unterschiedliche Schwinden verursacht Zugspannungen in der äußeren Schale und Druckspannungen in den inneren Schichten, während die Spalt-Zug-Festigkeit abfällt. Der Ersatz der feineren Teile durch Natursand erhöht die Spalt-Zug-Spannungen von getrocknetem Leichtbeton, wobei in vielen Fällen nur ein teilweiser Ersatz bis zu nur ein Drittel fast die gleiche Wirkung wie der volle Ersatz zeigt (Figur 4).

4.4. *Haftfestigkeiten*, wie sie bestimmt werden durch das Herausziehen von Armierungsstahleisen mit gerippter Oberfläche, zeigen Werte von etwa 70% derjenigen normalen Betons vergleichbarer Festigkeit. Auszieh-Haftfestigkeiten variieren bei normalem oder Leichtbeton über ein breites Gebiet. Der Bruch kann zustandekommen entweder durch Aufspaltung der Probe durch Keileffekt oder durch Zerstörung des Betons unter den Deformationen des Stahles. Natursandersatz scheint hier günstig zu wirken für einige Aggregatsorten. Weitere Untersuchungen sind nötig, um die Auswirkungen der Aggregate auf die Haftfestigkeit abzuklären und zu ermitteln, wie aus den Ausziehversuchen auf die Haftfestigkeit geschlossen werden darf (Figur 5).

4.5. Der *Elastizitätsmodul* variiert normalerweise von 110 000 bis 210 000 kg/cm², was etwa $\frac{1}{2}$ bis $\frac{2}{3}$ der Werte von normalem Beton entspricht. Der Elastizitätsmodul für beide Sorten, normaler und Leichtbeton, kann angenähert berechnet werden durch die empirisch gefundene Formel folgender Form:

$$E = a \sqrt{f'_c \cdot w^3} .$$

Der Wert a ist abhängig vom Zuschlagstoff und variiert zwischen 0,12 und 0,16.

$$\begin{aligned} E &= \text{Elastizitätsmodul, kg/cm}^2 \\ f'_c &= \text{Druckfestigkeit, kg/cm}^2 \\ w &= \text{Raumgewicht, kg/m}^3 . \end{aligned}$$

Die wenigen vorhandenen Versuchsergebnisse zeigen, daß es für praktische Bedürfnisse genügt, den E -Modul für Zug und Druck gleich hoch anzunehmen (Figur 6).

4.6. Die *Poissonsche Querdehnungszahl* ist ungefähr die selbe für normalen wie für Leichtbeton. Normalerweise wird mit 0,20 gerechnet.

4.7. *Kriechen und Schwinden* sind eng verwandte Vorgänge, die über ein weites Gebiet veränderlich sind im normalen wie im Leichtbeton. Durchschnittlich sind jedoch Kriech- und Schwindwerte für Leichtbeton erheblich größer. Aus praktischen Gründen wird normalerweise das Superpositionsgesetz als gültig angenommen. Es wird daher das Kriechen, welches als Veränderung der Abmessungen unter ständigen Lasten definiert ist, gemessen, indem das Schwin-

den eines unbelasteten Vergleichskörpers von der Gesamtdeformation eines belasteten Versuchskörpers abgezogen wird.

Das Kriechen, auf diese Art bestimmt, scheint abzunehmen mit steigender Festigkeit, wobei die größten Kriecherscheinungen in den ersten Monaten nach der Lastaufbringung auftreten. Die vergrößerten Kriechwerte erklären sich teilweise aus der langsameren Festigkeitszunahme. Das Schwinden jedoch ist zur Hauptsache verknüpft mit der Härte der Zuschläge und kann zunehmen mit der Festigkeit (Figuren 7 und 8).

Die Verwendung von gewöhnlichem Sand verkleinert Kriechen und Schwinden, was wahrscheinlich auf die verminderte Wasserzugabe zurückzuführen ist. Dampfhärtung vermindert ebenfalls Kriechen und Schwinden in der Größenordnung von 20 bis 40%.

4.8. Die *größten Dehnungen* für die meisten Leichtbetonsorten sind etwas größer als der Wert 0,003, der vom American Concrete Institute zugelassen wird. Die Spannungs-Dehnungs-Kurve für Leichtbeton ist über eine größere Strecke der Druckfestigkeit linear, und daraus folgend, sind die Werte k_1 , k_3 sowie k_2 etwas kleiner als für normalen Beton. Zusätzliche Forschung ist notwendig, um abzuklären, wie weit die Koeffizienten für das Bruchlastverfahren vom normalen Beton auf den Leichtbeton übernommen werden könnten.

4.9. *Weitere physikalische Eigenschaften.* Leichtbeton ist überraschend dauerhaft. Die Frostbeständigkeit ist gleich oder sogar besser als bei normalem Beton, sei er mit oder ohne Luftporenbildner hergestellt. Luftporeneinschluß bewirkt nicht nur größere Frostbeständigkeit und größere Widerstandskraft gegen aggressive Salze, sondern erhöht auch die Verarbeitbarkeit des Gemisches. Leichtbeton ist in der Lage 12 bis 22 Volumenprozent Wasser aufzunehmen gegenüber etwa 12% bei normalem Beton. Irgendein Zusammenhang zwischen Wasseraufnahmefähigkeit und Beständigkeit auf lange Dauer ist ungewiß, wie ja schon die Tatsache zeigt, daß Lufteinschlüsse die Beständigkeit erhöhen, ohne die Wasseraufnahmefähigkeit merklich zu verändern.

Die Überdeckung der Armierungsstähe ist normalerweise gleich wie bei Stahlbeton. Es sind keine Fälle bekannt, wonach die Leichtzuschlagstoffe je nach Herkommen unterschiedlichen Korrosionsschutz der Stähle bieten. Die rauhe und harte Oberfläche der Zuschlagstoffe ergibt gute Abreibfestigkeit, was durch den guten Zustand der vielen Fahrbahntafeln aus Leichtbeton bewiesen wird. Wegen der geringeren Zugfestigkeiten jedoch kann das Material absplittern unter Schlagbeanspruchung. Eine dünne Epoxyharzbeschichtung hat sich als gut erwiesen beim Ausflicken und zum Schutz von Stellen, die extrem dem Abrieb und der Abnutzung ausgesetzt sind.

Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist ungefähr 80% desjenigen von normalem Beton mit Zwischenwerten für diejenigen Fälle, wo Natursand die feineren Teile des Leichtzuschlagstoffes teilweise oder ganz ersetzt. Thermische Leitfähigkeit ist eine Funktion des Trockenraumgewichtes des Leichtbetons und liegt innerhalb eines Fünftels bis eines Drittels der Werte von normalem

Beton. Das ist der Grund, warum Leichtbeton einen 20–50% größeren Feuerwiderstand sowie vergrößerte thermische Isolation bietet.

5. Gedanken für den Entwurf

Leichtbetonbauwerke haben an Bauteil- und Bauwerksuntersuchungen gezeigt, daß sie sich in sehr ähnlicher Weise wie Bauwerke aus normalem Beton verhalten. Hinsichtlich der meisten Betoneigenschaften ist der Unterschied nur quantitativ. Die Entwurfsgrundregeln bleiben dieselben, und nur wenige Anpassungen sind nötig, um die geänderten Materialeigenschaften zu berücksichtigen. Es wurden viele vorbildliche Bauten mit Verwendung von Leichtbeton entworfen mit der einzigen Unterscheidung, daß in der statischen Berechnung das Eigengewicht reduziert wurde.

Für viele Eigenschaften von Leichtbeton sind die Unterschiede zu klein, als daß sich Entwurfsänderungen aufdrängen würden. So ist zum Beispiel, ob schon der Wärmeausdehnungskoeffizient etwas niedriger ist und das Schwindmaß etwas größer, keine Änderung der Schwind- und Temperaturarmierungen erforderlich. Es verhält sich ähnlich mit der Überdeckung der Armierungsstähe, da die Wasserdurchlässigkeit, die Rißbreiten und Rißabstände von Leichtbeton sich nur wenig unterscheiden von den entsprechenden Größen im normalen Beton. Was andere Eigenschaften betrifft, so zum Beispiel Kriechen und Schwinden, so sind hier die Streuungen so groß für normalen wie auch für Leichtbeton, daß nur Durchschnittswerte Verwendung finden als Richtschnur für die jeweilige Beurteilung des Ingenieurs. Sobald solche Materialeigenschaften wichtig werden für das zukünftige Verhalten der Bauwerke, soll sich der Entwurf auf Versuchsergebnisse oder Erfahrungen stützen, die mit dem gleichen Material gemacht worden sind.

Ausgenommen das Gewicht, sind die beiden nachfolgenden Eigenschaften genügend verschieden vom normalen Beton, daß Änderungen beim Entwurf nötig werden: Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul.

5.1. *Bauteile unter vorwiegender Biegebeanspruchung* können entworfen werden unter den gleichen Voraussetzungen wie Balken und Platten unter den gleichen Gesamtlasten. Dieses Vorgehen rechtfertigt sich, da die Anforderungen aus dem Traglastverfahren ohne Änderung auch für Leichtbetons gelten. Die vorhandenen kleineren Zugfestigkeiten jedoch sollten berücksichtigt werden a) bei Schub- und Hauptzugbeanspruchungen; b) wenn die Rißlast vorgespannter Elemente gesucht ist und c) bei der Berechnung der Durchbiegungen, wenn derjenige Zustand bestimmt wird, wo der homogene in den gerissenen Querschnitt übergeht.

Auch die Haftspannungen müssen reduziert eingesetzt werden, ob schon diese kaum je einen entscheidenden Einfluß auf den Entwurf haben, sofern Stahl verwendet wird mit einer Oberfläche, die große Haftfestigkeit garantiert.

Sofern Durchbiegungsprobleme wichtig sind, können Vergrößerungen der Querschnittshöhe um 20% nötig werden, um den Einfluß des kleineren Elastizitätsmoduls sowie des erhöhten Schwindens und Kriechens zu berücksichtigen. Es sei darauf hingewiesen, daß die Abnahme der Biegesteifigkeit eines Baugliedes nicht direkt proportional der Abnahme des Elastizitätsmoduls ist, da das Verhältnis n (E -Modul Stahl zu E -Modul Leichtbeton) zunimmt. Diese Zunahme von n ist auch vorteilhaft im Gebrauchszustand für die Verteilung der Spannungen in der Druckzone. So wird für gleiche Querschnitte mit gleichen Stahlprozentsätzen die neutrale Achse beim Balken in Leichtbeton tiefer liegen als beim Balken in normalem Beton. Daraus folgt, daß die Betonspannungen im Gebrauchszustand etwas tiefer liegen beim auf Biegung beanspruchten Leichtbeton als bei entsprechenden Bauelementen aus normalem Beton. Diese Faktoren, kombiniert mit reduziertem Gewicht, ermöglichen eine Kompensation für die verkleinerte Steifigkeit, herrührend vom kleineren E -Modul. Ebenfalls kann das durch Schwinden hervorgerufene Moment verglichen werden. Die erhöhte Schwindtendenz des Leichtbetons wird kompensiert durch die tieferliegende neutrale Achse.

Der kleinere E -Wert, welcher biegsamere Bauglieder ergibt, kann hin und wieder von Vorteil sein. Bei Schlag oder dynamischen Beanspruchungen und bei gewissen Arten von hochgradig statisch unbestimmten Konstruktionen, zum Beispiel Schalen mit festgehaltenen Rändern, verkleinert die reduzierte Steifigkeit örtliche Spannungskonzentrationen.

Es wurde nachgewiesen, daß Abmessungen und Form der Bauglieder größte Wichtigkeit haben hinsichtlich Kriechen und Schwinden und bis zu einem gewissen Grad auch für die Zugfestigkeit von Leichtbeton. Da diese Eigenschaften mit einem Feuchtigkeitsverlust zusammenhängen und Kriech- und Schwindmaß in jungem Alter größer sind, bevor der Beton seine geforderte Festigkeit erreicht, sind dünne Querschnitte und Konstruktionen mit großer Oberfläche, bezogen auf das Betonvolumen, viel kriech- und schwindempfindlicher und zeigen reduzierte Zugfestigkeit. Zurzeit werden die Formfaktoren in den amerikanischen Normen nicht berücksichtigt, obschon sie in einigen Normen europäischer Länder und in den CEB-Empfehlungen vorkommen.

Leichtbeton kann in vorgespannten Konstruktionen Verwendung finden, wobei jedoch der kleinere E -Modul und die verminderte Zugfestigkeit berücksichtigt werden müssen bei der Berechnung der Vorspannverluste und beim Entwurf der Verankerungen. Die Durchbiegungen aus Eigengewicht werden annähernd aufgehoben durch die entgegenwirkenden Vorspannkräfte. Die Verkürzung in der Achse hingegen wird größer sein und in größeren Bewegungen beim Auflager resultieren. Die Enddurchbiegung von vorgespannten Leichtbetonelementen wird in größeren Bereichen schwanken. Wegen der größeren Wärmeisolation des Leichtbetons werden die Temperaturunterschiede etwas größer. Auch werden Leichtbetonbauteile wegen der größeren Wasseraufnahmefähigkeit eher sich aufwölben oder ungleich verformen durch unterschiedliche Feuchtigkeitsaufnahme.

5.2. *Säulen* können auf der gleichen Basis entworfen werden, unabhängig, ob Leicht- oder normaler Beton verwendet wird, sofern das Knicken außer Frage steht. Während die Verteilung der Spannungen in Stahl und Beton etwas unterschiedlich ist wegen größeren Kriechens und Schwindens, so wird die Bruchlast ungefähr dieselbe bleiben, da sie unabhängig vom E -Modul ist. Für hohe Säulen hingegen muß die reduzierte Steifigkeit berücksichtigt werden. Es sind ungenügend Versuche vorhanden über das Verhalten von Säulen mit einem Schlankheitsgrad größer als 15 aus Leichtbeton. Es scheint zurzeit ratsam, den Faktor 0,8 einzuführen in den Lastreduktionsformeln, sofern Leichtbeton verwendet wird.

Da Säulen bei mehrstöckigen Gebäuden einen kleinen Anteil an Betonkubatur ausmachen und aus dem gegenwärtigen Bestreben nach größeren Säulenabständen und kleineren Säulenabmessungen heraus, ist es allgemein üblich in den USA, hochwertigen Beton in die Säulen und weniger druckfesten Beton in die Decken einzubauen. Die Verwendung von gewöhnlichem Beton in Säulen sowie Leichtbeton in den Decken ist wirtschaftlich und praktisch und hilft mit, zu verhindern, daß falscher Beton in die Säulen gerät.

6. Ausführung der Bauten

Hochwertiger Leichtbeton, der weder beim Einbringen noch beim Abziehen Schwierigkeiten bietet, kann auf einfache Weise dadurch erhalten werden, daß die Grundsätze für das Mischen von Beton und seine Kontrolle und die speziellen Eigenschaften der Leichtzuschlagstoffe beachtet werden. Probleme auf der Baustelle können auftreten, sofern diese speziellen Eigenschaften nicht berücksichtigt werden. Die meisten Schwierigkeiten – sowohl als auch die meisten Vorteile – stammen von der größeren Wasseraufnahmefähigkeit und dem kleineren Raumgewicht der Leichtzuschlagstoffe her.

Wegen der unterschiedlichen Wasseraufnahmefähigkeit können die üblichen Misch- und Kontrollmethoden nicht direkt übernommen werden. Befriedigende Ersatzmethoden sind jedoch entwickelt worden, die anzuwenden sind. Lufteschluß ist fast immer erwünscht, nicht nur um die Dauerhaftigkeit sondern auch um die Verarbeitbarkeit zu erhöhen. Das Einhalten einer gleichmäßigen Körnung und Kornabstufung ist etwas schwieriger wegen der Veränderlichkeit der Raumgewichte der verschiedenen Korngrößen. Wegen des leichteren Gewichtes der Zuschlagstoffe ist das Setzmaß bei vorgegebener Verarbeitbarkeit kleiner als bei normalem Beton. Dies ist von Vorteil, wenn der Leichtbeton in steiler Neigung eingebracht werden muß, zum Beispiel bei Schalendächern.

Hinsichtlich Einbringens und Fertigung hat der Leichtbeton einige Vorteile und auch einige Nachteile im Vergleich zu normalem Beton. Der Hauptvorteil ist die Gewichtsreduktion des Materials, das transportiert und verarbeitet werden muß. Schalungen und Rüstungen können deshalb für viel kleinere Drücke

entworfen werden. Das kleinere Gewicht des Leichtbetons verlangt weniger Energie beim Einbringen und verkleinert die Abnutzung der Gerätschaften. Die hauptsächlichsten Nachteile, die aus dem leichteren Gewicht resultieren, sind Entmischungsgefahr, speziell wenn der Beton übervibriert wird oder die Mischung falsch zusammengestellt wurde. Obschon etwas Lufteinschlüsse wünschenswert sind, um die Plastizität der Mischung zu verbessern, so kann ein Überschuß an Luft Blasenlöcher und Pockennarbenstruktur auf der Oberfläche zurücklassen und das Abziehen des Betons erschweren. Übermäßiges Vibrieren soll vermieden werden, damit keine Entmischung eintritt, welche beim Leichtbeton noch viel unerwünschter ist, da die leichteren, größeren Körner Tendenz zum Schwimmen zeigen, während der schwerere Zementleim und die feineren Anteile zu Boden sinken.

7. Anwendungen

Leichtbeton ist zur Hauptsache an Gebäuden und ähnlichen Bauvorhaben angewendet worden, wo das reduzierte Eigengewicht die erhöhten Materialkosten rechtfertigte. Im allgemeinen unterscheiden wir zwei Kategorien.

In die erste Kategorie gehören Bauten, wo das Eigengewicht einen großen Anteil der Gesamtlast ausmacht und wo der Leichtbeton ohne Rücksicht auf seine Kosten eingesetzt werden kann. Beispiele dieser Art sind die Verwendung von Leichtbeton in Schiffsbauten und beim Wiederaufbau oder bei baulichen Veränderungen auf bestehenden Fundamenten und/oder Unterbauten, und wo das Gesamtgewicht begrenzt ist.

In die zweite Kategorie gehören die Anwendungen, wo der Entscheid über Leichtbeton auf Grund von Wirtschaftlichkeitsüberlegungen getroffen werden muß. Die Faktoren, welche bei der Wahl von Leichtbeton zu berücksichtigen sind, schließen ein: a) Reduktion des Eigengewichtes, was eventuell niedrigere Trägerquerschnitte, dünnere Säulen und kleinere Foundationen mit sich bringt; b) Reduktion der Erdbebenkräfte; c) Einsparungen im Bau aus leichter konstruierten Schalungen, reduziertem Aufwand beim Betoneinbringen und hinsichtlich vorgefertigter Bauteile einfachere Transporte und Montagen; d) Reduzierter *E*-Modul und seine Vorteile und Nachteile auf die Biegesteifigkeit, inbegriffen vergrößerte Vorspannverluste; e) Thermische Eigenschaften, eingeschlossen die vergrößerte Isolation und der vergrößerte Feuerwiderstand.

Leichtbeton wurde vorteilhafterweise verwendet für Decken und Dächer, und zwar an Ort und vorgefertigt, vorgefertigte Wände, Brückenträger, Brückenplatten und Schalendächer. Das Material war speziell brauchbar für Anwendungen am oder im Wasser, wie zum Beispiel für schwimmende Konstruktionen, zum Beispiel Schiffe und Schwimmdocks, weil das Gewicht unter Wasser nur etwa die Hälfte vom normalen Beton ist.

Die neuesten Entwurfsgedanken und -entwicklungen mit neuen Materialien werden noch breitere Anwendungsgebiete erschließen. Leichtbetondecken in

Verbund mit Stahlträgern und/oder vorgefertigten und vorgespannten Balken haben sich als sehr wirtschaftlich erwiesen. Hohle tragende Platten und zusammengesetzte Querschnitte aus vorgefertigten Einheiten und Leichtfüllmaterial können verwendet werden, um die Steifigkeit und die Isolationswerte der Querschnitte zu erhöhen. Andere Entwicklungstendenzen, die zurzeit studiert werden und welche die Anwendung von Leichtbeton radikal ändern könnten, sind die Verwendung von Expansivzement, um das größere Schwinden zu kompensieren, und die Verwendung von Drahtstücken oder Faserarmierungen, um die Zugfestigkeit zu erhöhen. Obschon damit zusätzliche Kosten erwachsen, so sind diese bezüglich der Kosten des Leichtbetons erheblich kleiner als bezüglich der Kosten des normalen Betons und rechtfertigen sich daher eher.

In diesem Überblick war es nur möglich, auf die Eigenschaften von Leichtbetonzuschlagstoffen hinzuweisen und kurz die gegenwärtigen Anwendungen zu streifen. Die eingehendere Diskussion der Kongreßteilnehmer über Probleme, wie

Qualitätskontrolle für die Zuschlagstoffherstellung und den Leichtbetonbau, Entwurfsideen und Bauverfahren, welche die besonderen Eigenschaften dieses Materials am besten ausnützen, und

neue Entwicklungen oder Verbesserungen auf Material- und Entwurfsseite, sollten weitere Erkenntnisse in der Leichtbetonbauweise bringen.

Diese Beiträge sollten mithelfen, klares Licht zu werfen auf die einzigartigen Eigenschaften und Möglichkeiten dieses ausgezeichneten Baumaterials.