

*Universität der Bundeswehr München*

Institut für **Werkstoffe**  
**des Bauwesens**

Bauchemie und Werkstoffe des  
Bauwesens  
Leichtbeton

Univ.-Prof. Dr.-Ing. K.-Ch. Thienel

Frühjahstrimester 2020

# Inhaltsverzeichnis

	1
1 Einleitung	4
1.1 Allgemeines	4
1.2 Unterscheidung der Leichtbetone	5
1.2.1 Gefügedichter (konstruktiver) Leichtbeton	5
1.2.2 Haufwerksporiger Leichtbeton	7
1.2.3 Porenleichtbeton	7
1.2.4 Porenbeton	7
2 Konstruktiver Leichtbeton	8
2.1.1 Besonderheiten der Herstellung von Leichtbeton	8
2.1.2 Nachbehandlung	12
2.2 Tragverhalten	13
2.3 Rohdichte und Druckfestigkeit	15
2.4 Zugfestigkeit	18
2.4.1 Biegezugfestigkeit $f_{tk,fl}$	18
2.5 Formänderungen	18
2.5.1 Spannungsdehnungslinie	18
2.5.2 Elastizitätsmodul	20
2.5.3 Kriechen	20
2.5.4 Schwinden	20
2.5.5 Wärmedehnung	21
2.6 Dauerhaftigkeit	21
3 Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge	22
3.1 Allgemeines	22
3.2 Mischungsentwurf	22
3.3 Gesteinskörnung	22

3.4	Festigkeit und Rohdichte	23
3.5	Zugfestigkeit	23
3.6	Formänderung	24
3.7	Elastizitätsmodul	24
3.8	Dauerhaftigkeit	24
4	Porenleichtbeton (Schaumbeton)	25
5	Porenbeton	26
6	Literatur	27

Das vorliegende Skript basiert in Teilen auf dem Skriptum „Beton“ zur Grundvorlesung in Baustoffkunde von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. P. Schießl vom Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffkunde der Technischen Universität München [1]. Für dessen freundliche Genehmigung möchte ich mich ausdrücklich bedanken.

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Leichtbeton ist definiert als Beton mit einer Trockenrohddichte unter  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Leichtbetone können nach ihrer Zusammensetzung in folgende Gruppen unterteilt werden:

- Konstruktiver (gefügedichteter) Leichtbeton (Bild 1 (a)),
- Haufwerksporiger Leichtbeton (Bild 1 (b) und (c)),
- Schaumbeton und
- Porenbeton.

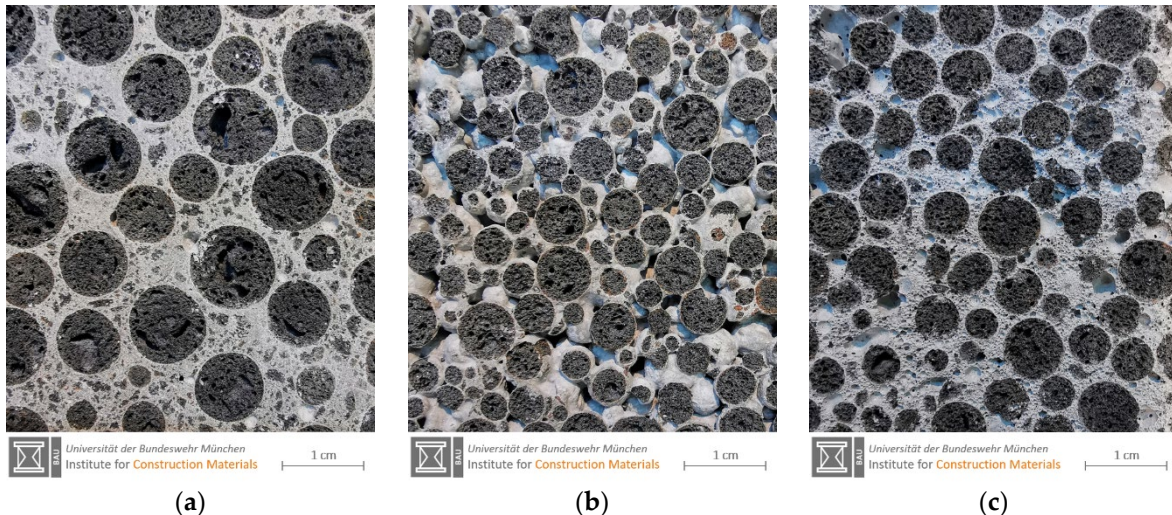


Bild 1: Gefüge verschiedener Leichtbetone (a) gefügedichteter Leichtbeton (LC); (b) haufwerksporiger Leichtbeton (LAC); (c) haufwerksporiger Leichtbeton mit porosierter Matrix. Alle Leichtbetone wurden mit Blähton eines Herstellers produziert. [2]

Gefügedichteter Leichtbeton kann sowohl in Fertigteil- als auch als Ortbeton zum Einsatz kommen. Haufwerksporige Leichtbetone werden nur für Fertigteile verwendet [3, 4]. Während dies beiden Betone unter atmosphärischen Bedingungen aushärten, wird Porenbeton wegen der notwendigen hydrothermalen Erhärtung im Autoklaven ausschließlich werkmäßig produziert. Die geringere Rohddichte im Vergleich zu Normalbeton kann durch

- den Einsatz leichter Gesteinskörnung,
- gezielt zwischen der Gesteinskörnung verbleibende Hohlräume (Haufwerksporen) oder
- den Einsatz von Luftporenbildnern oder Schäumen

erreicht werden. Die drei Möglichkeiten können je nach Einsatzzweck allein oder in Kombination verwendet werden.

Die gelegentlich anzutreffende Bezeichnung „leichter Normalbeton“ wird für Normalbeton mit einer Rohddichte zwischen  $2000$  und  $2200 \text{ kg/m}^3$  benutzt. Bei diesen Betonen wird die Rohddichte nur soweit reduziert, dass die Festlegungen nach DIN 1045-2 [5] und DIN EN 206-1 [6] für Normalbeton z. B. bezüglich Festigkeit und Verformung noch benutzt werden dürfen. Eine normative Verankerung für diesen Begriff gibt es nicht.

Druckfestigkeit und Rohddichte des Leichtbetons werden entscheidend von der eingesetzten Gesteinskornart und der Betonzusammensetzung bestimmt. Durch die verringerte Betonrohddichte wird das Eigengewicht und die Wärmeleitfähigkeit reduziert.

Mehr als 80 % der Leichtbetone (ohne Porenbeton) sind haufwerksporige Leichtbetone, die wegen der guten wärmedämmenden Eigenschaften in für Mauersteine, Wandtafeln etc. eingesetzt werden [7]. Der Einsatz gefügedichteten Leichtbetons stellt ein verhältnismäßig kleines Marktsegment des Betonbaus dar. So werden etwa 350.000 m<sup>3</sup> leichte Gesteinskörnung vornehmlich für Fertigteile genutzt. Als Ortbeton wird gefügedichteter Leichtbeton - gemessen an seinem Leistungspotenzial - relativ wenig eingesetzt. Die Gründe sind hauptsächlich eine gegenüber Normalbeton anspruchsvollere Technologie und die höheren Stoffkosten [8].

Bild 2 veranschaulicht die Bandbreite des Festigkeits- und Rohdichtebereichs, der von Beton abgedeckt wird.

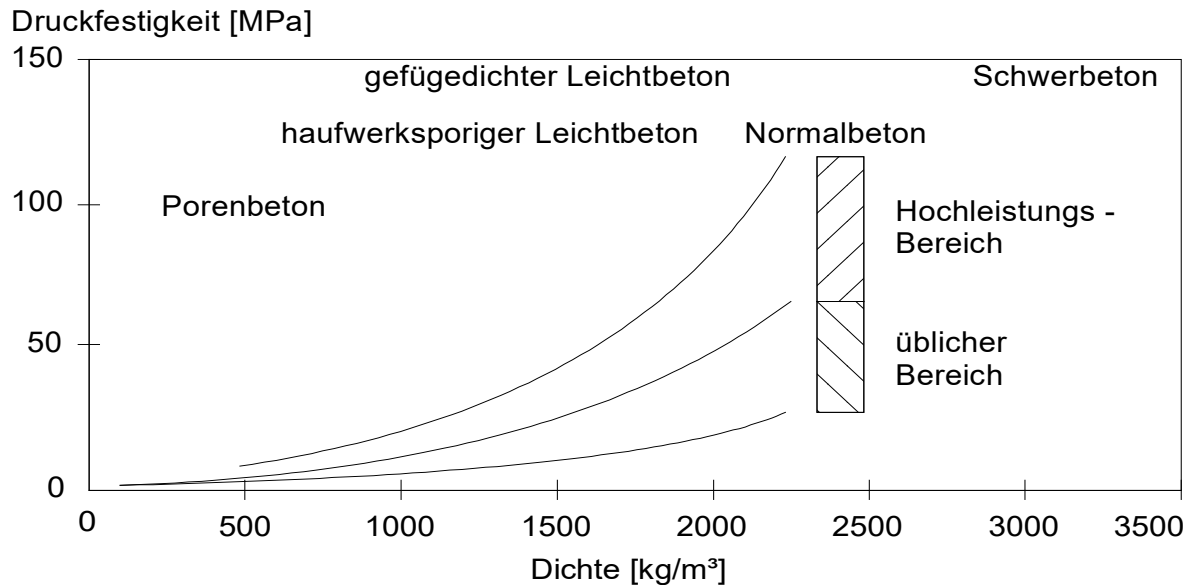


Bild 2: Festigkeits- und Rohdichtebereich von Beton [8]

## 1.2 Unterscheidung der Leichtbetone

### 1.2.1 Gefügedichteter (konstruktiver) Leichtbeton

Konstruktiver Leichtbeton hat ein geschlossenes Gefüge wie Normalbeton (Bild 1). Die niedrigere Rohdichte wird durch den Austausch der dichten (schweren) normalen Gesteinskörnung gegen die porige leichte Gesteinskörnung erreicht. Das übliche Vorgehen ist ein teilweiser oder vollständiger Ersatz der groben normalen Gesteinskörnung, um die gewünschte Rohdichte zu erreichen. In einem weiteren Schritt kann dann noch die Sandfraktion gegen Leichtsand ausgetauscht werden. Die Unterschiede der Kornrohdsichten der in unterschiedlichen Gesteinskörnungen verdeutlicht Bild 3. Eine ausführliche Abgrenzung findet sich in [2].

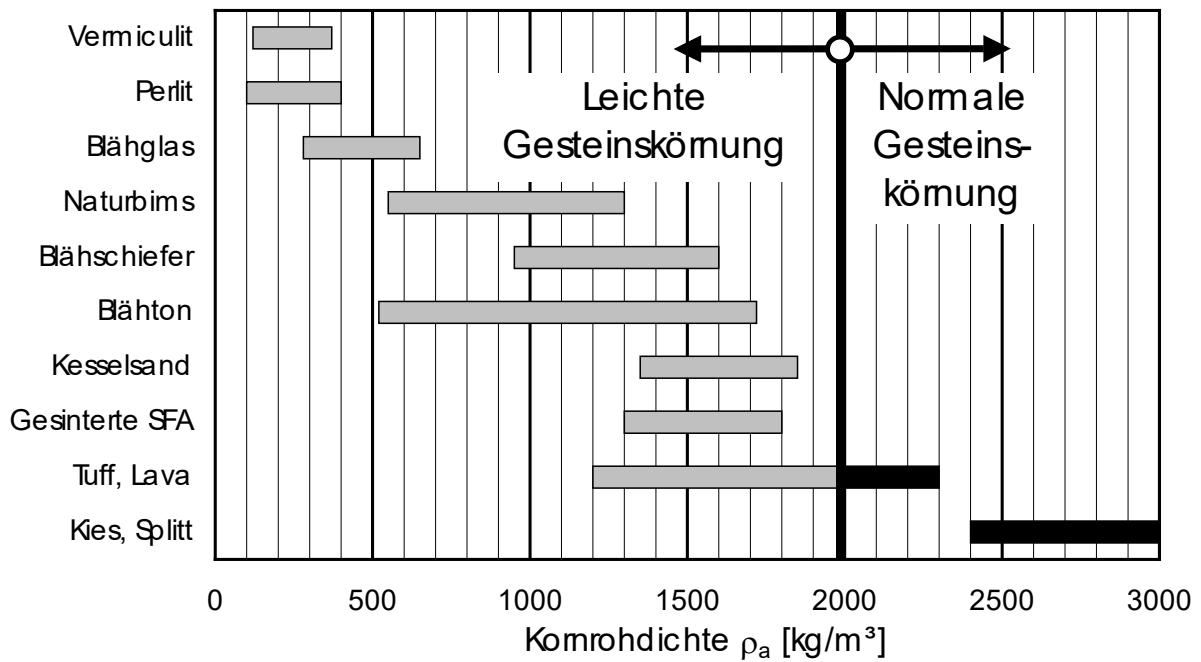


Bild 3: Kornrohdichtebereiche leichter und normaler Gesteinskörnung [9]

Konstruktiver Leichtbeton wird vorwiegend mit Blähton und Blähschiefer hergestellt. Gesinterte Steinkohlenflugasche (SFA) ist auf dem deutschen Markt nicht mehr präsent.

Mit der Verminderung der Betonrohdichte durch den gezielten Einbau von Poren sinkt im Allgemeinen die Druckfestigkeit und der E-Modul. Bild 4 verdeutlicht diesen Zusammenhang am Beispiel der Würfeldruckfestigkeit.

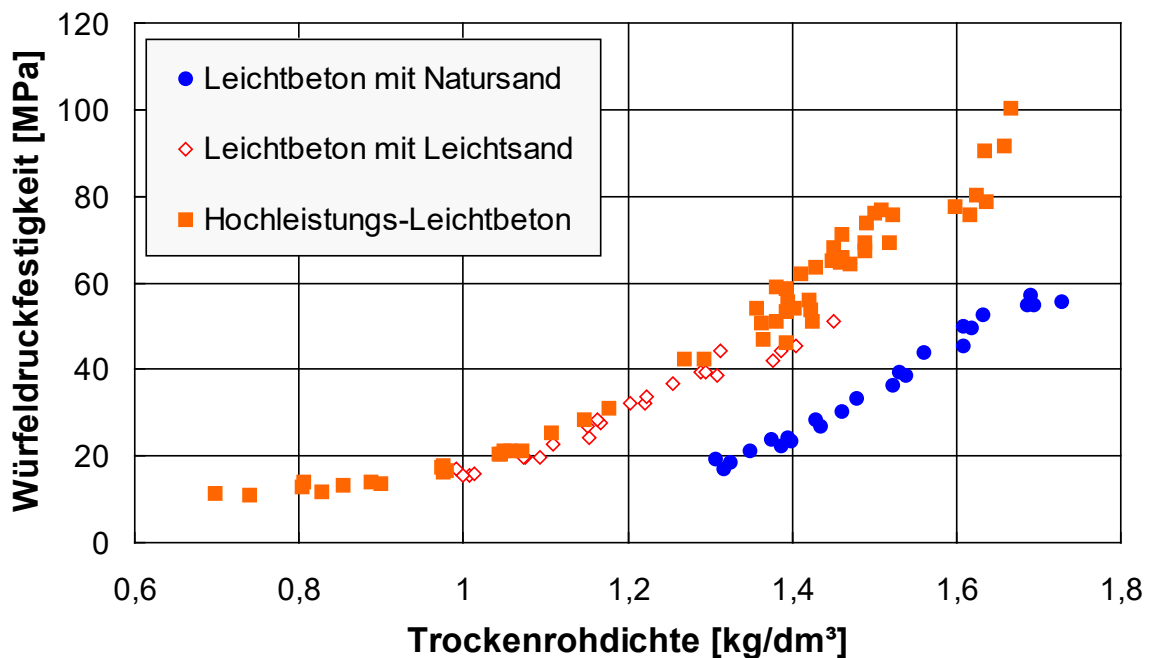


Bild 4: Zusammenhang zwischen Würfeldruckfestigkeit und Beton-Trockenrohdichte am Beispiel von Leichtbeton mit Blähton [10]

### **1.2.2 Haufwerksporiger Leichtbeton**

Durch gezieltes Auslassen oder Reduzieren einzelner Korngruppen beim Aufbau der Sieblinie, oder den Einsatz nur einer Korngruppe (Einkornbeton) entsteht ein Haufwerk. Dieses Haufwerk wird mit möglichst wenig Zementleim so verkittet, dass der eingesetzte Zementleim ausreicht, um die Gesteinskörner zu umhüllen, zugleich jedoch die Zwickel im Haufwerk freilässt. Der so hergestellte Beton wird als haufwerksporiger Beton bezeichnet.

Haufwerksporiger Leichtbeton wird fast ausschließlich unter Einsatz grober leichter Gesteinskörnung produziert (Bild 1 (b)). Für die Sandfraktion wird je nach Anforderung Leichtsand oder bei wärmetechnisch weniger interessanten Produkten auch Natursand verwendet.

Eine besondere Variante sind haufwerksporige Leichtbetone mit porosierter Matrix (Bild 1 (c)). Diese Variante wird inzwischen als Basis für Infraleichtbeton verwendet [2].

### **1.2.3 Porenleichtbeton**

Porenleichtbeton oder Schaumbeton wird in der Regel ohne grobe Gesteinskörnung hergestellt. Er besteht im Wesentlichen aus Zement und Wasser. Durch den Einsatz eines Schaumbildner wird der Zementleim stark aufgeschäumt. Je nach Anwendungszweck wird unter den geschäumten Zementleim noch Sand oder Polystyrolgranulat gemischt.

### **1.2.4 Porenbeton**

Porenbeton wird aus quarzhaltigem Sand, Zement und/oder Kalk Bindemittel, Aluminium als Treibmittel und Wasser im Porenbetonwerk erzeugt. Details zur Produktion enthält das Skript „Bauchemie und Werkstoffe des Bauwesens - Mauersteine und Mörtel“.

## 2 Konstruktiver Leichtbeton

Konstruktiver Leichtbeton oder Konstruktionsleichtbeton wird für die Herstellung von Stahlleicht- und Spannleichtbeton eingesetzt. Seine Anwendung ist in DIN EN 1992-1-1 [11], DIN 1045-2 [5] und DIN EN 206-1 [6] geregelt. Die Zusammensetzung unterscheidet sich zum Normalbeton im Wesentlichen durch den teilweisen oder vollständigen Austausch normaler Gesteinskörnung gegen leichte Gesteinskörnung.

### 2.1.1 Besonderheiten der Herstellung von Leichtbeton

#### 2.1.1.1 Wasseraufnahme der Gesteinskörnung

Aufgrund ihrer Porosität kann die leichte Gesteinskörnung dem Zementleim sowohl während des Mischens als auch im Zeitraum bis zum Erstarren des Leichtbetons Wasser entziehen. Dieses Wassersaugen beschleunigt das Ansteifen des Frischbetons. Durch ein gezieltes Vornässen der Gesteinskörnung kann das Ansteifen des Frischbetons vermindert werden.

Die Wasseraufnahme grober leichter Gesteinskörnung wird im Vorfeld im Standzylinder nach DIN V 18004 [12] oder im Pyknometer nach DIN EN 1097-6, Anhang C [13] bestimmt. Da diese Verfahren für gebrochenen Leichtsand ungeeignet sind, wird dessen Wasseraufnahme mithilfe einer Filternutsche nach DIN V 18004 gemessen. Damit die tatsächliche Wasseraufnahme im Leichtbeton nicht überschätzt und der wirksame Wasser/Zement-Wert nicht unterschätzt wird, berücksichtigt man bei der groben leichten Gesteinskörnung nur die Wasseraufnahme innerhalb der ersten 60 min (Bild 5). Beim leichten Brechsand ist nur 70 % des gemessenen Wertes anzusetzen, um ebenfalls auf der sicheren Seite im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit des Leichtbetons zu liegen [14].

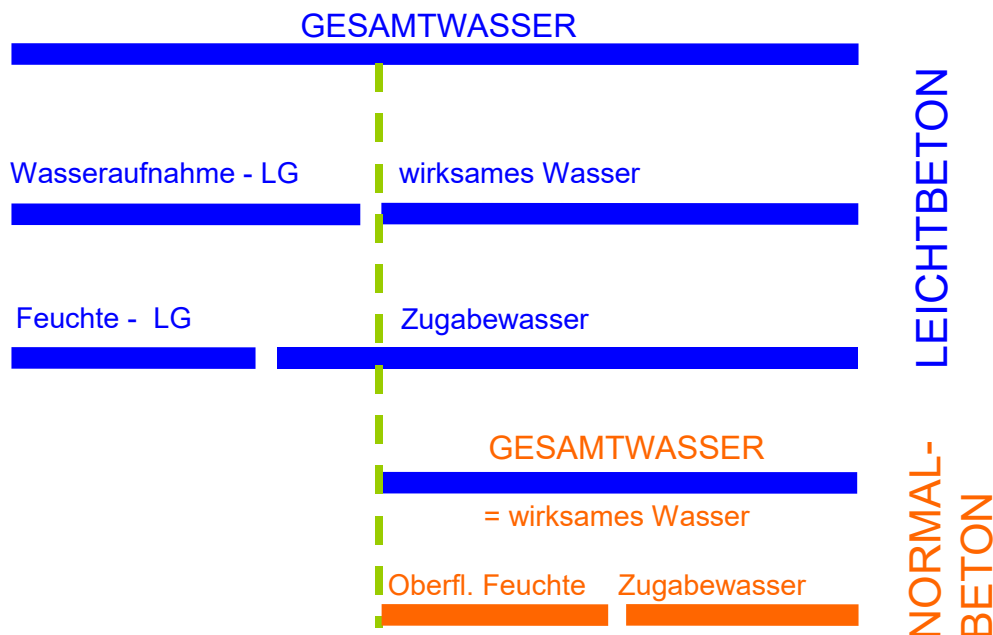


Bild 5: Wasser in Leicht- und Normalbeton [1]

Das von der leichten Gesteinskörnung aufgenommene Wasser steht dem Zementstein zunächst nicht zur Verfügung und wirkt sich daher nicht auf die Bildung von Kapillarporen aus. Im Zuge der weiteren Hydratation wird die Porenstruktur des Zementsteins immer feiner. Über die zunehmende Kapillarwirkung wird ein Teil des von der leichten Gesteinskörnung aufgenommenen Wassers aus dieser herausgesogen und bewirkt so eine innere Nachbehandlung des Leichtbetons. Dadurch erhält gefügedichter Leichtbeton ein sehr dichtes



Gefüge, sodass es Jahre dauern kann, bis sich im Beton eine Gleichgewichtsfeuchte einstellt. Das überschüssige Wasser erhöht zunächst die Wärmeleitfähigkeit und kann den Frostwiderstand vermindern. Dies hat mit dazu geführt, dass man in Deutschland meist von einer Vakuumsättigung absieht und sich allenfalls mit ausgiebigen Vornässen der Gesteinskörnung begnügt. Dem möglichen beschleunigten Ansteifen des Leichtbetons wird durch eine längere Mischdauer und/oder die Wahl einer weicheren Ausgangskonsistenz Rechnung getragen. Wird das Saugwasser nicht berücksichtigt, kann es zu Mikrorissen im Gefüge und signifikanten Festigkeitsverlusten kommen [2].

### 2.1.1.2 Mischungsentwurf [2]

Einige Besonderheiten der leichten Gesteinskörnungen fließen direkt in die Mischungsberechnung für konstruktiven Leichtbeton ein. Dies sind u. a.:

- die Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnung,
- die unterschiedliche Korndichte der leichten Gesteinskörnung und
- die Abhängigkeit der Betonfestigkeit von der Korndichte.

Deshalb weicht der Gang der Mischungsberechnung für Leichtbeton vom Berechnungsgang für Normalbeton in einigen Punkten ab. Die Vorgehensweise für Leichtbeton wird nachfolgend exemplarisch beschrieben.

- Wahl des Zementgehalts in Abhängigkeit von der geforderten Expositionsklasse
- Festlegen der Zugabewassermenge

Die Zugabewassermenge setzt sich aus dem wirksamen Wasser und dem zusätzlichen Wasser für die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung zusammen. Das zusätzliche Wasser hängt von der Eigenfeuchte der leichten Gesteinskörnung ab. Das wirksame Wasser bestimmt die Konsistenz und den w/z-Wert des Leichtbetons. Die Erfahrung aus der Praxis zeigt jedoch, dass das Wassersaugen im Tauchversuch die Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnung aus dem Zementleim im Mischer nur unzureichend charakterisiert. An dieser Stelle muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass für gefügedichten Leichtbeton der Zementgehalt bedeutender ist, als der Wasser/Zement-Wert.

Als Anhaltswert für den Mischungsentwurf kann nominell von einem wirksamen w/z-Wert von 0,5 ausgegangen werden. Genauere Angaben sind wegen der Wechselwirkung von Konsistenz und Wasseraufnahme schwierig. Der tatsächlich für die üblicherweise angestrebte Konsistenz C3 erforderliche Gesamtwassergehalt und damit der w/z-Wert liegen wegen der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung deutlich höher (vgl. Bild 5). Der erforderliche Wassergehalt hängt u. a. vom gewählten Sand (Leichtsand oder Natursand) ab. Zum Erreichen der Konsistenz C3 muss in der Praxis von einer Zugabewassermenge von etwa 230 - 260 l/m<sup>3</sup> ausgegangen werden.

Die Konsistenz wird in der Eignungsprüfung 15 min nach dem Beginn der Wasserzugabe überprüft.

- Wahl des Sandanteils  
Als Sand kann Leichtsand, Natursand oder ein Gemisch aus beiden verwendet werden. Mit Natursand liegt die Trockenrohdichte des Leichtbetons um etwa 200 kg/m<sup>3</sup> höher. Das benötigte Sandvolumen errechnet sich unter Ansatz des Mörtelgehalts nach Tabelle 1 aus:

Sandvolumen = Mörtelgehalt - (Zementvolumen + Wasservolumen + Verdichtungs-poren)

Tabelle 1: Anhaltswerte für den Mörtelgehalt

Verwendung	Mörtelmenge [dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
Fertigteile	560 - 580
Transportbeton	580 - 600
Pumpbeton	600 – 620

- Festlegen der groben leichten Gesteinskörnung  
Das Kornvolumen ergibt sich als Restmenge zum Mörtelgehalt:

$$\text{Kornvolumen} = 1000 \text{ dm}^3 - \text{Mörtelgehalt}$$

Im Gegensatz zu Normalbeton wird die Betondruckfestigkeit primär von der gewählten leichten Gesteinskörnung bestimmt. Zum Einsatz kommen sowohl stetig zusammengesetzte Sieblinien als auch Ausfallkörnungen. Schütt- und Kornrohddichten der feinen und der groben Körnung können sich bei leichter Gesteinskörnung deutlich voneinander unterscheiden. Bei der Wahl der leichten Gesteinskörnung ist dieser Unterschied unter anderem zu beachten, weil bei einigen leichten Gesteinskörnungen mit steigendem Korndurchmesser die Kornrohddichte und damit die erzielbare Betonfestigkeit abnehmen kann.

- Bestimmen der voraussichtlichen Trockenrohddichte des Leichtbetons  
Die voraussichtliche Trockenrohddichte des Leichtbetons kann abgeschätzt werden, indem man unterstellt, dass der Zement bei der Hydratation Wasser in der Größenordnung von 20 % seines Gewichts chemisch bindet (keine vollständige Hydratation!), dieser Anteil also auch nach dem Trocknen im Beton verbleibt (vgl. Skript Festbeton).

$$\rho_d = (1,2 \cdot Z + G) / 1000$$

$\rho_d$  Trockenrohddichte [kg/dm<sup>3</sup>]

Z Zementgehalt [kg/m<sup>3</sup>]

G Körnungsgehalt, trocken [kg/m<sup>3</sup>]

- Kontrolle der Ergiebigkeit  
Der gewählte Mischungsentwurf muss im Rahmen der Eignungsprüfung kontrolliert werden [2, 15]. Dazu wird unter anderem die berechnete Betonrohddichte (frisch) mit dem erreichten Ergebnis verglichen. Wegen der nicht genau bekannten Wasseraufnahme und des beim Mischen erfolgten Kornbruchs werden beide Angaben fast nie übereinstimmen. Der Mischungsentwurf ist daher entsprechend zu korrigieren.

### 2.1.1.3 Mischen [2]

Die Dosierung der leichten Gesteinskörnung sollte grundsätzlich volumetrisch erfolgen. Sofern nur eine gravimetrische Einwaage möglich ist, müssen der Feuchtegehalt und die Schüttdichte in angemessenen Abständen überprüft und Veränderungen beim Dosieren berücksichtigt werden. Alle anderen Bestandteile werden wie üblich abgemessen.

Beim Mischen wird zunächst die leichte Gesteinskörnung eingefüllt. In den laufenden Mischer wird als Nächstes bis zu <sup>2</sup>/<sub>3</sub> des benötigten Anmachwassers gegeben und etwa 30 s untergemischt [16]. Dies ist besonders dann wichtig, wenn Leichtsand verwendet wird, da dieser relativ viel Wasser aufnimmt. Nachfolgend wird der Zement und anschließend das

restliche Anmachwasser hinzugefügt. Zusatzmittel sollten so spät wie möglich hinzugegeben werden. Pulverförmige Zusatzmittel und Zusatzstoffe werden dem Zement beigegeben. Damit flüssige Zusatzmittel nicht in unkontrollierbarer Weise von der leichten Gesteinskörnung aufgesaugt werden, werden sie am besten dem restlichen Anmachwasser zugemischt. Die Mindestmischdauer von gefügedichtem Leichtbeton, nach Zugabe aller Bestandteile, ist gegenüber Normalbeton von 30 - 60 s auf 90 s erhöht [16].

Gefügedichter Leichtbeton wird vorzugsweise im Zwangsmischer hergestellt. Die Mischerschaufeln sollten nach Möglichkeit eine Kunststoffauskleidung haben, um insbesondere bei sehr leichten Gesteinskörnungen das Korn nicht unnötig zu zertrümmern. Im Betonwerk werden bis zu 5 - 10 % der sehr leichten Gesteinskörnungen zertrümmert. Im Labor liegt diese Kornzertrümmerung zwischen 3 % und 5 %, bei einigen laborüblichen Mischern auch schnell höher. Durch die Kornzertrümmerung wird u. a. die Wasseraufnahme erhöht.

#### **2.1.1.4 Verarbeitbarkeit [16]**

Infolge der Wasseraufnahme der leichten Gesteinskörnungen beeinflusst die Dauer des Transportes und Einbringens die Verarbeitbarkeit des Leichtbetons stärker als die des Normalbetons. Für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit und den Vergleich unterschiedlicher Leichtbetone sollte das Verdichtungsmaß herangezogen werden. Die Werte des Ausbreitversuchs können irreleitend sein, da bei diesem Versuch das Gewicht der Gesteinskörnungen als treibende Kraft wirkt. Bei Leichtbetonen können mithin bei augenscheinlich gleicher Konsistenz, je nach eingesetzter Kornrohddichte, unterschiedliche Ausbreitmaße bestimmt werden.

#### **2.1.1.5 Einbau**

Gefügedichter Leichtbeton wird auf der Baustelle überwiegend mit Kübeln eingebaut. Dies ist ein Grund für den zurückhaltenden Einsatz konstruktiven Leichtbetons. In den USA ist das Pumpen von Leichtbeton gang und gäbe. Allerdings werden dort wassergesättigte leichte Gesteinskörnungen eingesetzt. Inzwischen ist die Leichtbetontechnologie in Deutschland soweit fortgeschritten, dass auch Leichtbeton mit begrenzt vorgehängter leichter Gesteinskörnung gepumpt werden kann. Beim Pumpen von Leichtbeton wird durch den Pumpdruck Wasser aus dem Zementleim in die Kornporen gedrückt. Dies führt zum Ansteifen des Leichtbetons, häufig zum Entmischen und kann das Scheitern des Pumpens bedeuten. Dies kann sogar trotz einer vorangegangenen, länger andauernden (z. B. 24 Stunden) Wasserlagerung der leichten Gesteinskörnung der Fall sein [16]. Abhilfe bieten speziell abgestimmte, sehr fließfähige Rezepturen. Eine Eignungsprüfung einschließlich eines Pumpversuchs ist bei Pumpbaustellen immer zu empfehlen.

#### **2.1.1.6 Verdichten**

Das Verdichten mit Außenrüttlern erfolgt bei Leichtbeton mit einer Frequenz von etwa 3000 Hz. Dies ist niedriger als bei Normalbeton, wo 6000 Hz gängig sind. Neben der reduzierten Frequenz muss gleichzeitig die Amplitude im Vergleich zum Normalbeton deutlich erhöht werden. Beim Einsatz von Innenrüttlern ist darauf zu achten, dass Leichtbeton kaum „getrieben“ werden kann. Daher müssen die Eintauchstellen näher beieinander liegen, als dies bei Normalbeton der Fall wäre. Der Unterschied des Wirkungsradius von Innenrüttlern kann anhand der Rohddichte abgeschätzt werden: Bei halber Betonrohddichte ist der Wirkradius nur etwa halb so groß [16]. Die Unterschiede beim Verdichten von Leicht- und Normalbeton beruhen auf der geringeren schwingenden Kornmasse der leichten Gesteinskörnung und der damit verbundenen Dämpfung.

Beim Einbringen ist zu beachten, dass der Leichtbeton nicht zu lange gerüttelt wird, da anderenfalls in der üblichen Konsistenz C3 durch das Aufschwimmen der leichten Gesteinskörnung entmischt wird. Diese Gefahr besteht bei Leichtbeton insbesondere dann, wenn die Dichte des Mörtels und die Dichte der Körnung deutlich voneinander abweichen. Das Aufschwimmen der Körnung wird durch die Zugabe von Stabilisatoren verhindert. Zugleich wird die Verarbeitbarkeit verbessert. Bild 6 fasst die verschiedenen Aspekte zusammen, die beim Herstellen und Verarbeiten von Leichtbeton zu beachten sind.

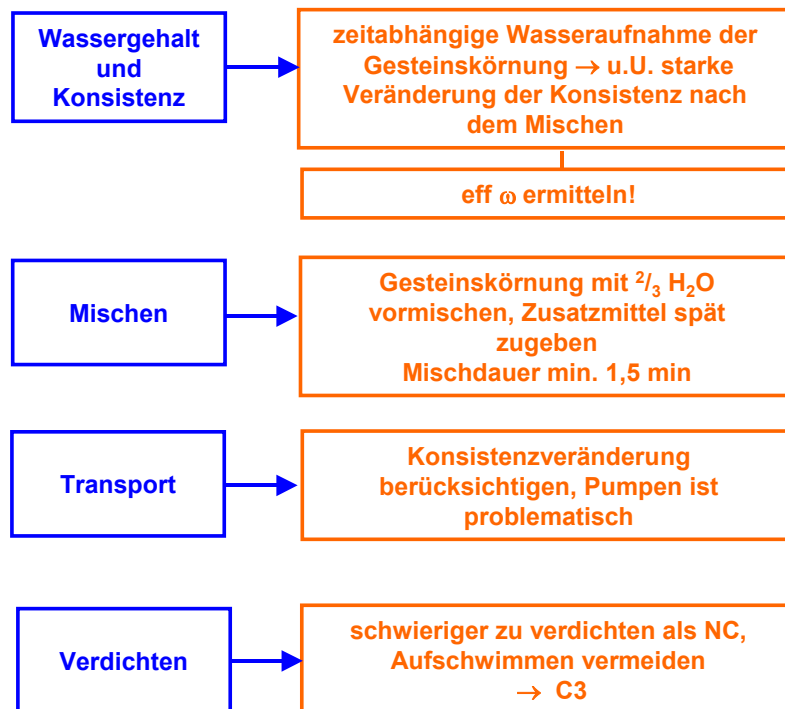


Bild 6: Herstellen und Verarbeiten von Leichtbeton [1]

### 2.1.2 Nachbehandlung

Trotz der guten inneren Nachbehandlung durch die in der leichten Gesteinskörnung gespeicherten Feuchte bedarf Leichtbeton einer sorgfältigen Nachbehandlung. Die Oberfläche ist vor Austrocknen zu schützen, damit kein zu großes Feuchtegefälle zwischen Kern und Rand auftritt. Leichtbeton erwärmt sich während der Hydratation stärker als Normalbeton, weil seine Wärmekapazität und seine Wärmeleitfähigkeit geringer sind (Bild 7). Zum Vermeiden von Temperaturrissen kann daher ein späteres Ausschalen oder ein Abdecken mit einer Wärmedämmung sinnvoll sein. Beim Austrocknen oder Abkühlen entstehen größere Feuchte- bzw. Temperaturgradienten als bei Normalbeton, die zu größeren Zugspannungen führen. Diese erhöhten Zugspannungen können trotz des geringeren E-Moduls von Leichtbeton Netzrisse (Krakeleerissen) an der Oberfläche verursachen.

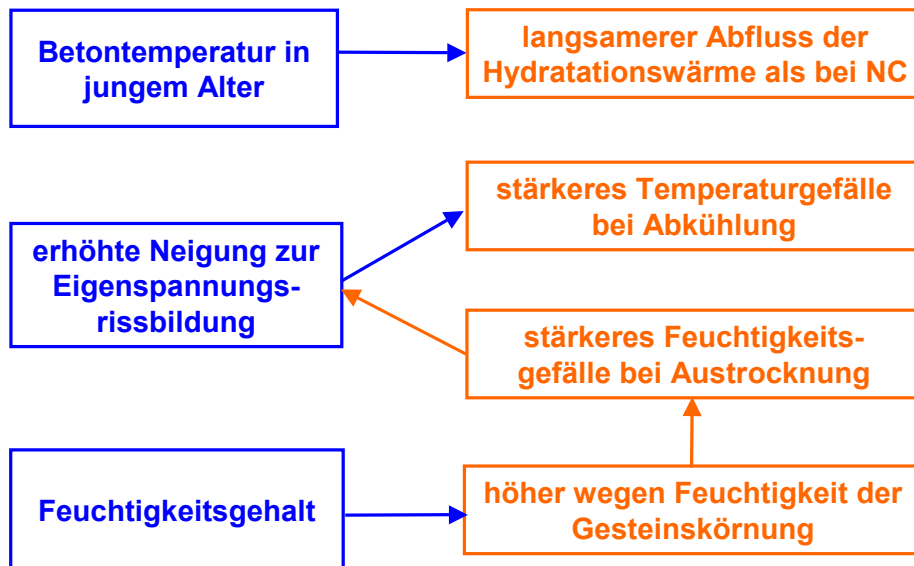


Bild 7: Nachbehandlung von Leichtbeton [9]

## 2.2 Tragverhalten

Die Festigkeit von Normalbeton wird bestimmt durch die Festigkeit der Mörtelmatrix. Daher kann ein einheitlicher Zusammenhang zwischen der Beton- und der Matrixdruckfestigkeit zugrunde gelegt werden. Dies ist charakterisiert durch den  $w/z$ -Wert und die Normdruckfestigkeit des Zements.

Beim Leichtbeton sind die leichten Gesteinskörner je nach Kornrohichte oft weniger fest und steif als die Matrix. Daher ist die leichte Gesteinskörnung maßgebend für die Festigkeit des Leichtbetongefüges. Dies hat die Folge, dass die Betonfestigkeit hinter der Matrixdruckfestigkeit zurückbleiben kann.

Im jungen Alter entwickelt sich die Festigkeit zunächst wie beim Normalbeton. Bei Belastung verlaufen die Hauptdruckspannungslinien konzentriert von Korn zu Korn. Die Mörtelschichten müssen die Druckkräfte übertragen und werden dabei überwiegend auf Druck beansprucht. Rechtwinklig zur Belastungsrichtung entstehen auf Grund der Umlenkung der Drucktrajektorien Zugspannungen, die auch den Haftverbund zwischen Korn und Matrix beanspruchen. Wie beim Normalbeton kommt es hier unterhalb einer vom Gesteinskorn abhängigen Grenzfestigkeit zu Hafttrissen und schließlich zum Bruch (vgl. Bild 8 links).

Mit fortschreitender Erhärtung kann die Steifigkeit und Festigkeit der Matrix diejenige der Gesteinskörnungen übertreffen. In diesem Fall ändert sich der innere Kraftfluss (Bild 8 rechts). Die Hauptdruckspannungen laufen nun um die leichten Gesteinskörner herum, welche sich zunehmend der höheren Belastung entziehen. Die Mörtelschichten werden bei der Kraftweiterleitung in ihren Schichtflächen auf Druck beansprucht. Dabei entstehen oberhalb bzw. unterhalb der leichten Gesteinskörner Zugspannungen rechtwinklig zu den Drucktrajektorien, d. h. etwa rechtwinklig zur Belastungsrichtung. Überschreiten die Zugspannungen die Matrixzugfestigkeit, bilden sich dort Risse. Im Weiteren lagern sich die Zugkräfte allmählich auf die Gesteinskörner um, bis schließlich auch deren Zugfestigkeit erreicht wird. Die Tragfähigkeit des Leichtbetons ist dann erreicht. Dieser so genannte Kornbruch bestimmt die obere Grenze der Druckfestigkeit des Leichtbetons.

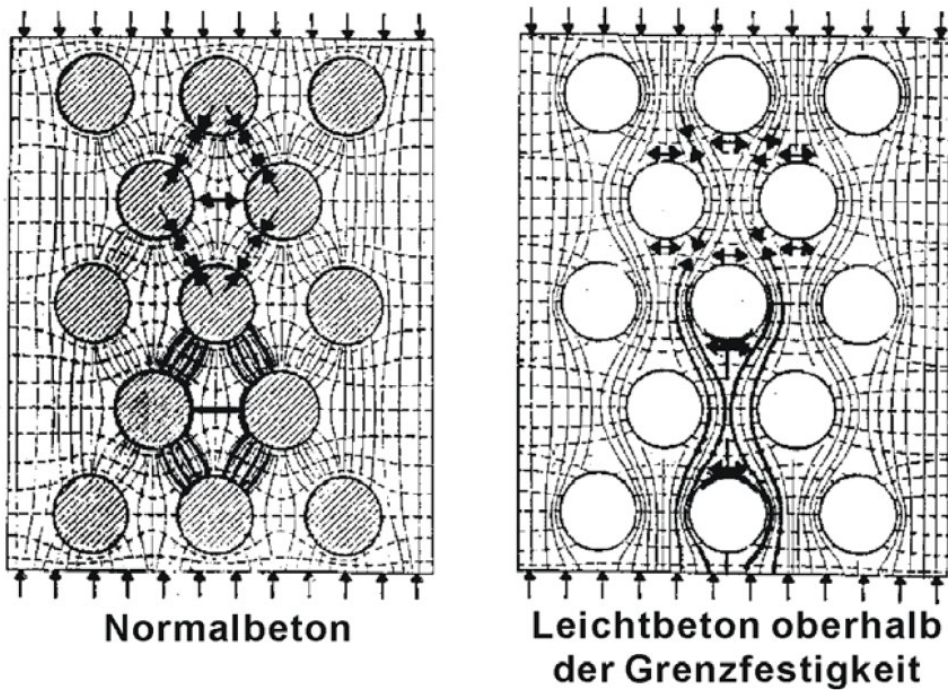


Bild 8: Verlauf der Hauptspannungslinien bei Druckbeanspruchung [17]

Können die mit dem Reißen der Matrix frei werdenden Umlagerungskräfte auf Grund eines zu geringen Verbundes von leichtem Gesteinskorn und Matrix nicht auf das Korn übertragen werden, reißt die Matrix entlang der Korngrenzen. Es erfolgt ein vorzeitiger Verbundbruch.

Bis zu einer von der leichten Gesteinskörnung abhängigen Festigkeit, der **Grenzfestigkeit** [18], erreicht die Festigkeit des Leichtbetons praktisch die Matrixfestigkeit. Darüber nimmt die Leichtbetonfestigkeit bei Steigerung der Matrixfestigkeit unterproportional zu (Bild 9).

Da oberhalb der Grenzfestigkeit die Gesteinskörner zunehmend einen geringeren Beitrag zum Lastabtrag liefern, muss zu einer weiteren Steigerung der Betonfestigkeit die Matrixfestigkeit sehr stark erhöht werden. Die Grenzfestigkeit ist abhängig von dem verwendeten leichten Gesteinskörnung: Je höher die Festigkeit der leichten Gesteinskörnung ist, desto höher liegt auch die Grenzfestigkeit.

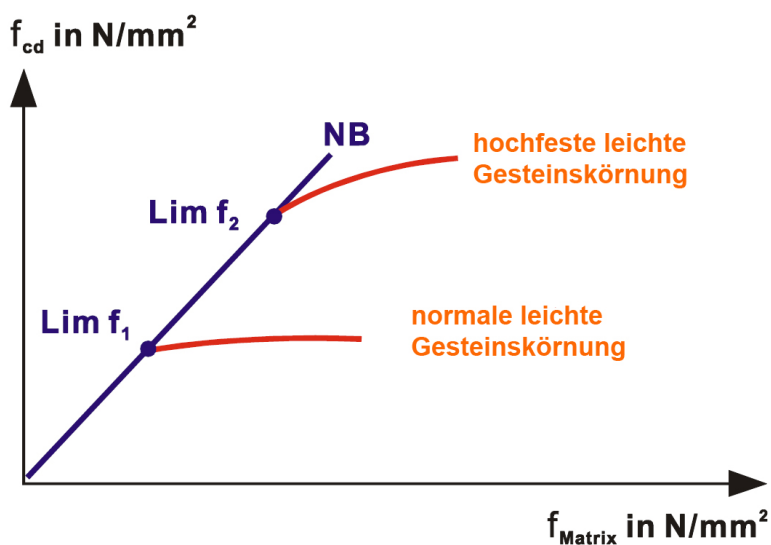


Bild 9: Grenzfestigkeit von Leichtbeton [19]

Bei Festigkeiten unterhalb der Grenzfestigkeit unterscheiden sich die Betonfestigkeiten nur wenig von den Matrixfestigkeiten, d. h., die Festigkeitsentwicklung entspricht etwa der eines Normalbetons gleicher Festigkeit. Die Grenzfestigkeit ist etwa erreicht, wenn der E-Modul der Matrix denjenigen des Gesteinskorns überschreitet, sodass sich die Körner nicht mehr entsprechend ihrem Volumenanteil an der Kraftübertragung beteiligen.

Bei Festigkeiten unterhalb der Grenzfestigkeit verläuft die Druckfestigkeitsentwicklung während der Erhärtung demnach zunächst nach der Geraden  $f_c = f_{\text{matrix}}$  und dann deutlich flacher (vgl. Bild 10). Über der Zeit aufgetragen ergibt sich damit der für Normal- und Leichtbeton unterschiedliche Verlauf der Festigkeitsentwicklung. Der rechte Teil von Bild 10 zeigt bei einer auf 28 d bezogenen Darstellung, dass dann zwischen den Festigkeitswerten im Alter von 7 und 28 d bei Leichtbeton nur ein geringer Unterschied besteht. Damit dürfen die Gleichungen zur Umrechnung bei Normalbeton von  $f_{ck7}$  auf  $f_{ck28}$  nach DIN 1045-3 [20] nicht auf Leichtbeton angewendet werden.

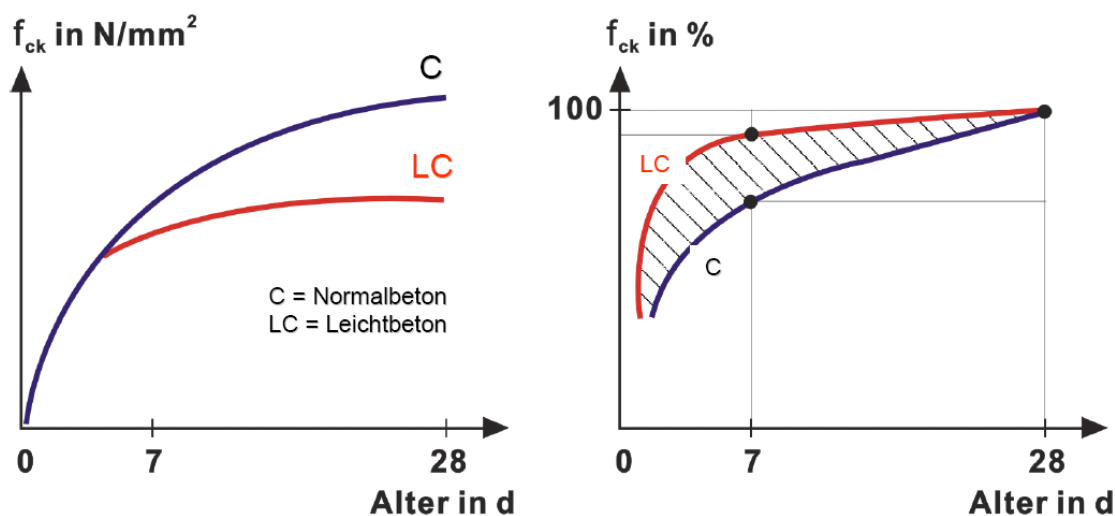


Bild 10: Festigkeitsentwicklung von Normalbeton (C) und Leichtbeton (LC) [16]

### 2.3 Rohdichte und Druckfestigkeit

Die Kornporigkeit, d. h., die Kornrohichte der leichten Gesteinskörnungen beeinflusst maßgebend die Rohdichte des Leichtbetons, die im Gegensatz zum Normalbeton eine Zielgröße bei der Herstellung und eine Lieferbedingung bei der Bestellung ist. Nach DIN EN 1992-1-1 [11] und DIN EN 206-1 [6] wird daher der gefügedichte Leichtbeton in Rohdichteklassen eingeteilt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Rohdichteklassen gemäß DIN EN 1992-1-1 [11] und DIN EN 206-1 [6]

Rohdichteklasse	Grenzen des Mittelwertes der Leichtbeton-Trockenrohichte $\text{kg/m}^3$
D1,0	$\geq 800$ und $\leq 1000$
D1,2	$> 1000$ und $\leq 1200$
D1,4	$> 1200$ und $\leq 1400$
D1,6	$> 1400$ und $\leq 1600$
D1,8	$> 1600$ und $\leq 1800$
D2,0	$> 1800$ und $\leq 2000$

Bild 4 zeigt, dass die Kornporigkeit über die Betonrohddichte die maximale Druckfestigkeit beeinflusst, dass aber bei gleicher Betonrohddichte ein großer Festigkeitsbereich vorhanden ist. Es ist nicht möglich, für die verschiedensten Leichtbetone Rohdichte- und Festigkeitsklassen beliebig miteinander zu kombinieren (Bild 11). Tabelle 3 enthält die Festigkeitsklassen für Leichtbeton nach DIN EN 1992-1-1 [11] bzw. DIN EN 206-1 [6]. **Maßgebend ist die Zylinderdruckfestigkeit.**

Tabelle 3: Festigkeitsklassen nach DIN EN 1992-1-1 [11] bzw. DIN EN 206-1 [6]

Festigkeits- klasse	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Zylindern $f_{ck,cyl}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Würfeln $f_{ck,cube}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittlere Druckfestigkeit von Zylindern $f_{cm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
LC8/9	8	9	16
LC12/13	12	13	20
LC16/18	16	18	24
LC20/22	20	22	28
LC25/28	25	28	33
LC30/33	30	33	38
LC35/38	35	38	43
LC40/44	40	44	48
LC45/50	45	50	53
LC50/55	50	55	58
LC55/60	55	60	63
LC60/66	60	66	68
LC70/77	70	77	78
LC80/88	80	88	88

Die aus der Bezeichnung der Festigkeitsklassen resultierende Zuordnung von Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit ist für Leichtbeton mit Vorsicht zu betrachten (Bild 12)! Aktuelle Untersuchungen deuten darauf hin, dass die für Normalbeton geltende Zuordnung zutreffender ist [19, 21].



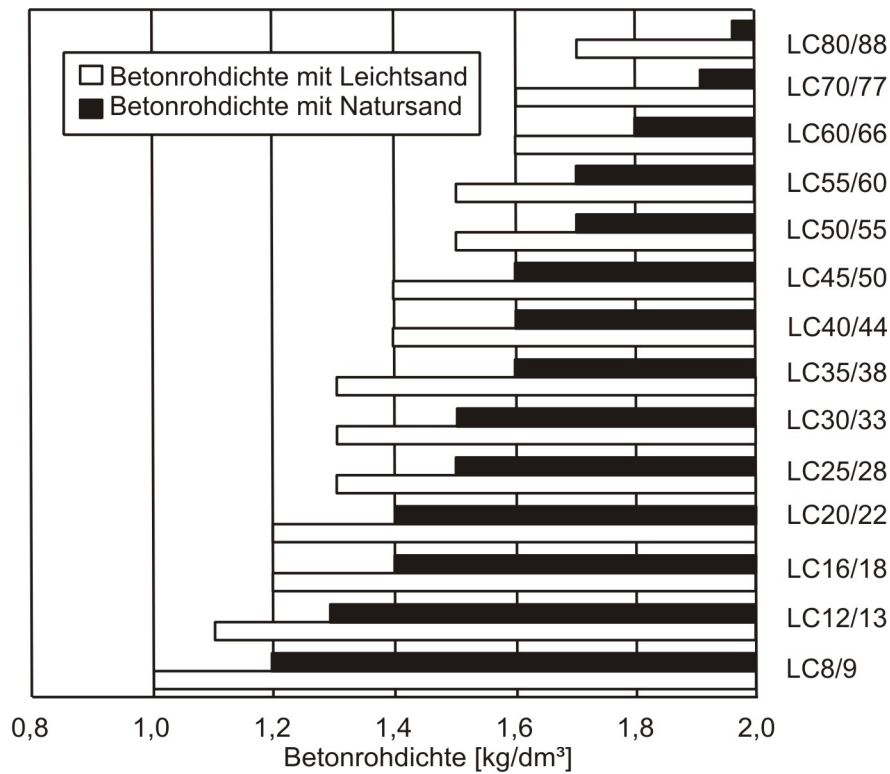


Bild 11: Anhaltswerte für die erforderliche Trockenrohddichte von Leichtbeton zum Erreichen einer Festigkeitsklasse nach DIN EN 1992-1-1 bzw. DIN EN 206-1 [14]

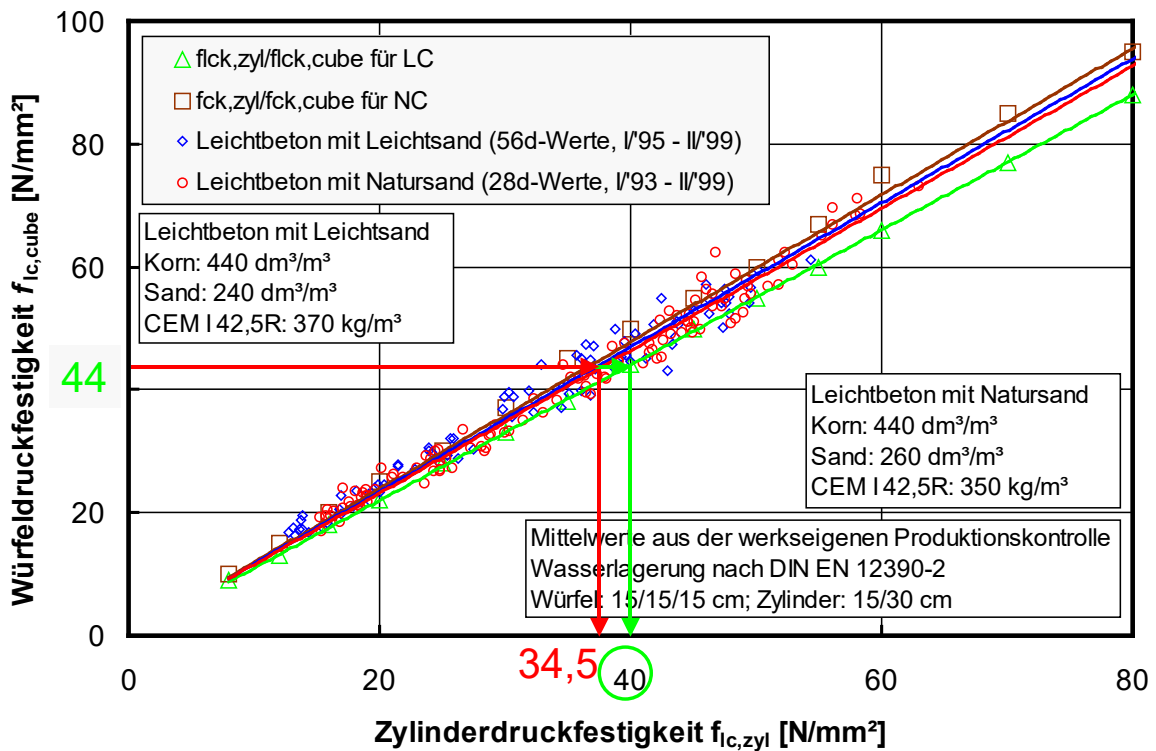


Bild 12: Vergleich der Festigkeitsklassen nach DIN EN 1992-1-1 bzw. DIN EN 206-1 mit Messwerten [19, 21]

## 2.4 Zugfestigkeit

### 2.4.1 Biegezugfestigkeit $f_{tk,n}$

Beim Austrocknen entstehen infolge des Feuchtegefälles zwischen dem porösen Korn und der Matrix zusätzliche Gefügespannungen, welche die Biegezugfestigkeit stärker vermindern als bei Normalbeton. Die Festigkeit kann bis auf 60 % der Festigkeit bei Feucht- oder Wasserlagerung abfallen [16, 22] (Bild 13). Wenn sich nach längerer Zeit ein Feuchtegleichgewicht zwischen Gesteinskörnung und Matrix eingestellt hat und die Schwindspannungen wieder abgebaut sind, stellt sich die normale Abhängigkeit der Biegezugfestigkeit von der Druckfestigkeit ein.

#### 2.4.1.1 Spaltzugfestigkeit $f_{tk,sp}$

Die Spaltzugfestigkeit ist im Vergleich zu Normalbeton niedriger und streut auch stärker. Auch ist hier der Einfluss der Lagerung größer als bei Normalbeton.

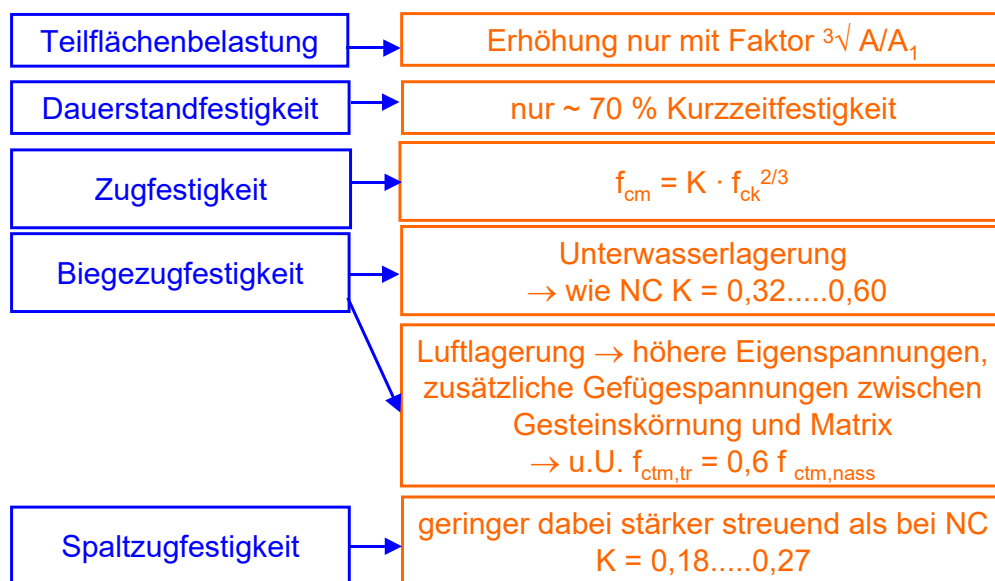


Bild 13: Besondere Beanspruchung und Zugfestigkeit von Leichtbeton ([1] mit Angaben aus [16])

## 2.5 Formänderungen

### 2.5.1 Spannungsdehnungslinie

Die Spannungsdehnungslinien von Leichtbeton sind im aufsteigenden Ast weniger gekrümmt als die von Normalbeton (Bild 14), da die Bildung der Mikrorisse aufgrund des Verlaufs der Hauptspannungslinien anders abläuft:

Bei Normalbeton bilden sich bereits bei verhältnismäßig niedrigen Verhältnissen  $\sigma/f_{cd}$  Haftzugrisse in Lastrichtung zwischen Korn und Matrix, die sich bei höheren Spannungen zu durchgehenden Rissen verbinden. Dadurch sind die Spannungsdehnungslinien von Normalbeton verhältnismäßig stark gekrümmt.

Bei Leichtbeton bilden sich dagegen erst bei höheren Verhältnissen  $\sigma/f_{cd}$  die ersten Risse und zwar in Lastrichtung, aber in der Zugzone der Matrix oberhalb und unterhalb der Körner (vgl. Bild 8 rechts). Bild 15 fasst die verschiedenen Aspekte zusammen.

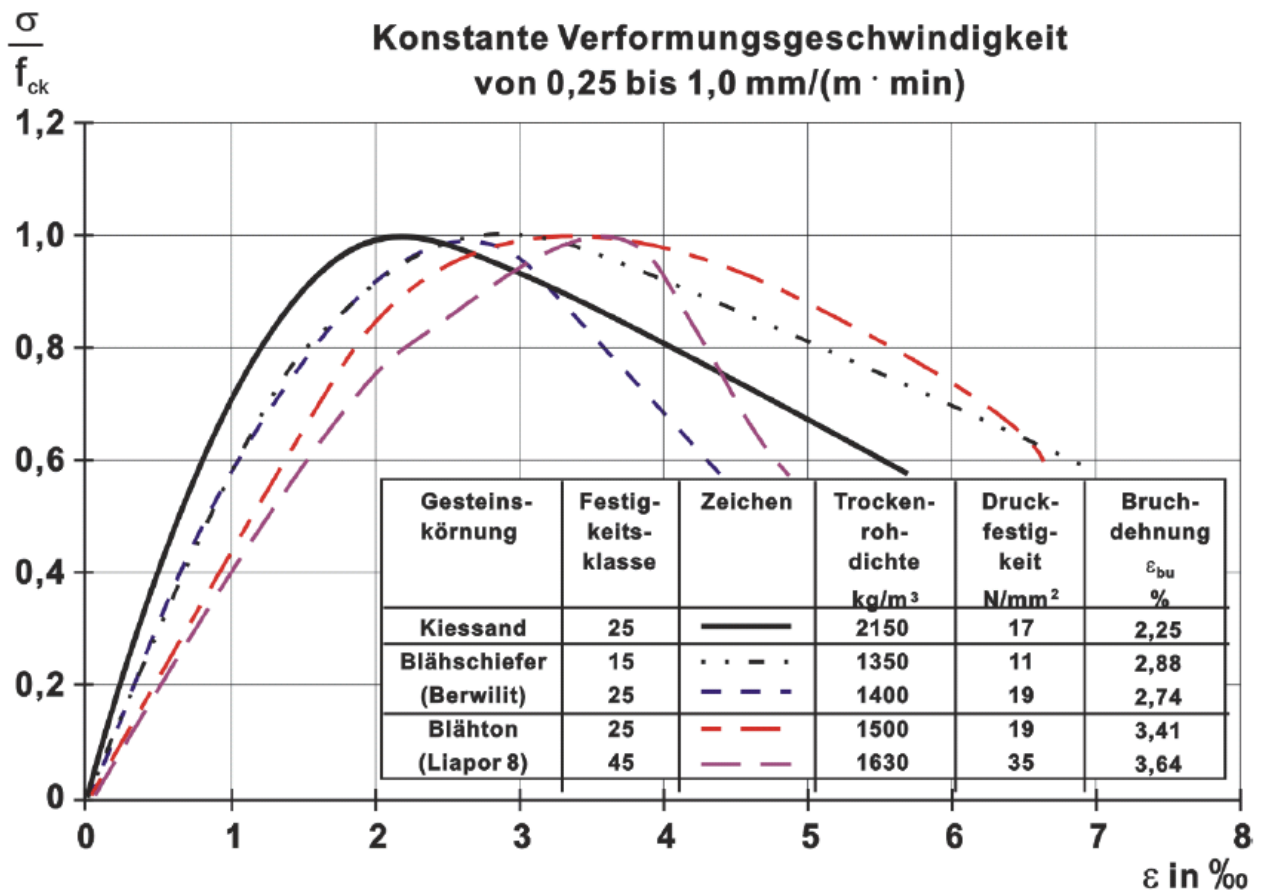


Bild 14: Spannungsdehnungslinien für verschiedene Leichtbetone und für Normalbeton [23]

Aus den vorgenannten Gründen rechnet man nach DIN EN 1992-1-1 [11] bei der Ermittlung der Bruchschnittgrößen im Gegensatz zum Normalbeton mit anderen Abminderungsbeiwerten beim Dreieck-Rechteck- und beim Parabel-Rechteck-Diagramm.

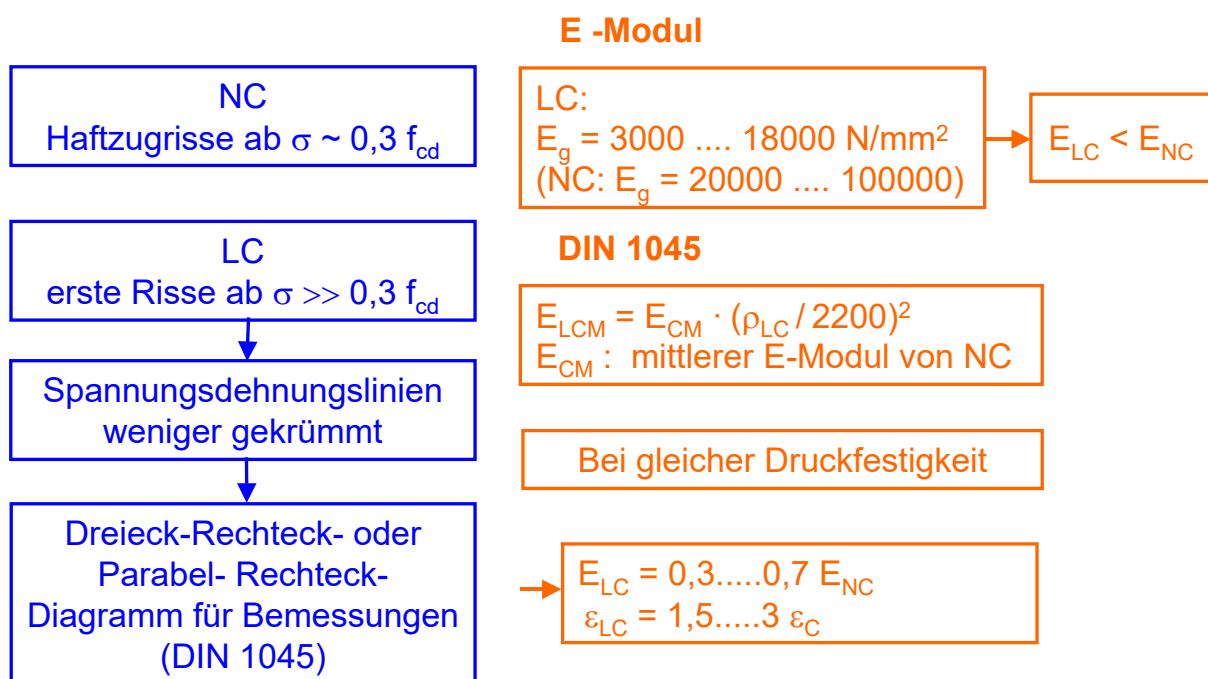


Bild 15: Formänderungen von Leichtbeton [1]

## 2.5.2 Elastizitätsmodul

Da der E-Modul der Gesteinskörnung schon bei Normalbeton einen bemerkenswerten Einfluss hat, ist der Einfluss bei Leichtbeton demzufolge noch wesentlich größer. Die Elastizitätsmoduln der leichten Gesteinskörnungen liegen etwa zwischen 3000 und 18000 N/mm<sup>2</sup> (Bild 15) und erreichen damit nur einen Bruchteil des E-Moduls von normaler Gesteinskörnung [16, 24]. Sie sind im Allgemeinen auch niedriger als diejenigen der Matrix. Je nach Gesteinskörnungsart, Druckfestigkeit und Rohdichte des Betons liegt der E-Modul von konstruktivem Leichtbeton zwischen 5000 und 24000 N/mm<sup>2</sup>. Den Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul und Rohdichte zeigt Bild 16 für unterschiedlich zusammengesetzte Leichtbetone.

Bei gleicher Festigkeitsklasse beträgt der E-Modul von Leichtbeton nur etwa 30 bis 70 % der Werte von Normalbeton. Daher sind die elastischen Verformungen bei gleicher Beanspruchung (Spannung) im Mittel 1,5- bis 3-mal so groß.

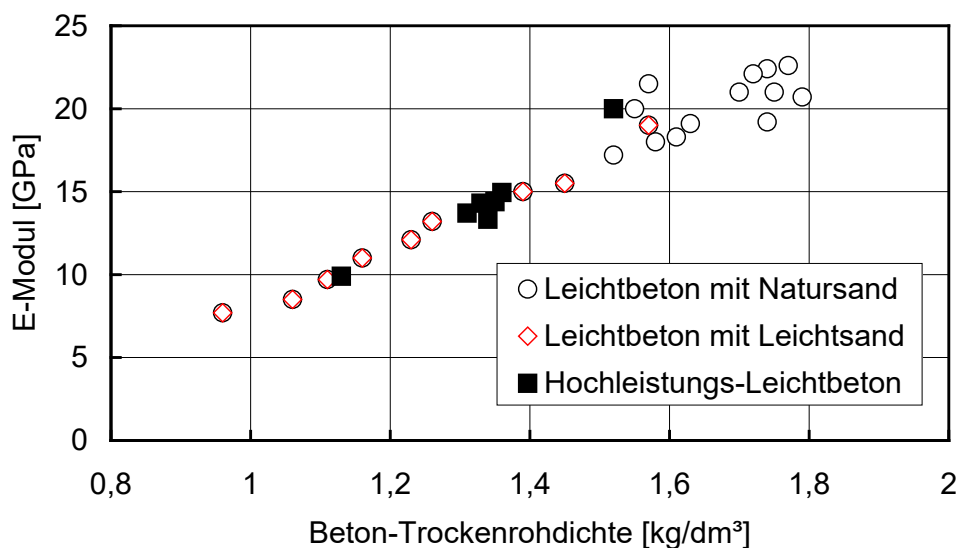


Bild 16: Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul und Rohdichte [8]

## 2.5.3 Kriechen

Das Kriechen hängt überwiegend vom Volumen des kriechenden Zementsteins ab. Für Leichtbeton gilt der Ansatz der DIN EN 1992-1-1 [11] für die Berechnung der Kriechverformungen ebenso wie für Normalbeton. Allerdings ist bei Leichtbeton der geringere E-Modul des Leichtbetons zu berücksichtigen. Bei gleicher Festigkeit und gleicher Kriechspannung zeigt Leichtbeton zum Teil größere Kriechdehnungen  $\epsilon_k$  als Normalbeton. Die Kriechzahl steigt hingegen nur begrenzt an (0 % bis 30 %), weil die elastischen Verzerrungen von Leichtbeton wesentlich größer sind.

## 2.5.4 Schwinden

Das Schwinden von Leichtbeton wird durch Zementsteingehalt, Art und Feuchtegehalt der Gesteinskörnung und die Bauteilabmessungen beeinflusst. Die Gesteinskörnung behindert das Schwinden in Abhängigkeit von ihrem E-Modul, der ja außerdem für eine bestimmte Festigkeit die Matrixeigenschaften festlegt. Daher muss auch bei schwächeren (leichteren) Gesteinskörnungen, d.h., bei solchen mit kleinerem E-Modul, die vor allem bei Leichtbetonen mit geringerer Druckfestigkeit eingesetzt werden, mit einem höheren Endschwindmaß als bei Normalbeton gerechnet werden.

Hohe Korneigenfeuchten verzögern im ersten Jahr zunächst das Schwinden. Bei geringen Korneigenfeuchten stellt sich im Leichtbeton höheres Schwindmaß als im Normalbeton ein. Daher sind in DIN EN 1992-1-1 [11] die Grundswindmaße (Normalbeton) für Leichtbeton bis zur Festigkeitsklasse LC16/18 um 50 %, ab LC20/22 um 20 % zu erhöhen [16].

Infolge der Austrocknung ist im Leichtbeton ein steileres Feuchtigkeitsgefälle als im Normalbeton vorhanden. Dies führt zu Schwindeigenspannungen und in der Folge ggf. zu feinen Netzkissen. Daher ist die ausreichende Nachbehandlung von Leichtbeton sehr wichtig.

### **2.5.5 Wärmedehnung**

Der Wärmedehnungskoeffizient  $\alpha$  von Blähschiefer und Blähton ist mit  $4$  bis  $6 \cdot 10^{-6}/K$  sehr niedrig. Der Wärmedehnungskoeffizient von Leichtbeton liegt zwischen  $5,0 \cdot 10^{-6}/K$  und  $12,0 \cdot 10^{-6}/K$ , im Mittel bei  $8,0 \cdot 10^{-6}/K$ , ist also um rd.  $2,0 \cdot 10^{-6}$  kleiner als bei Normalbeton [16].

Wegen der guten Wärmedämmung kann im Hochbau bei Leichtbetonbauten ggf. auf besondere Dämmschichten verzichtet werden. Weitere Vorteile durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit sind bei der Dampfbehandlung, beim Winterbau und im Brandfall zu verzeichnen. Andererseits tritt bei starker Wärmestrahlung (z.B. bei Dachplatten) durch den größeren Temperaturunterschied zwischen Außen- und Innenseite die Gefahr des Verwölbens auf.

## **2.6 Dauerhaftigkeit**

Gefügedichter Leichtbeton enthält in der eingesetzten leichten Gesteinskörnung viele Poren. Diese Porosität ist allerdings nicht gleichbedeutend mit Permeabilität. Leichtbeton ist wegen seiner guten inneren Nachbehandlung mindestens ebenso dauerhaft wie ein entsprechend zusammengesetzter Normalbeton. Da die Festigkeit des Leichtbetons maßgeblich von der gewählten leichten Gesteinskörnung abhängt, kann ein Zusammenhang zwischen der Festigkeitsklasse und der Dauerhaftigkeit (Expositionsklasse) nicht hergestellt werden [14, 17]. Eine Einstufung in Expositionsklassen kann nur über den effektiven w/z-Wert und den Zementgehalt erfolgen.

Leichtbetonspezifische Probleme mit der Dauerhaftigkeit sind nicht bekannt [25].

## **3 Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge**

### **3.1 Allgemeines**

Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge (LAC: Lightweight Aggregate Concrete) ist gekennzeichnet durch definierte Hohlräume zwischen den Gesteinskörnern, die nach dem Verdichten im Gefüge verbleiben (vgl. Bild 1 (b)). Diese Haufwerksporen werden erzeugt, indem der Zementleimgehalt auf die Menge beschränkt wird, die erforderlich ist, um die Körner an den Berührungsstellen mehr oder weniger punktweise zu verkitten. Eine Norm für haufwerksporigen Leichtbeton vergleichbar der DIN EN 1992-1-1 [11] und der DIN EN 206-1 [6] existiert nicht. Als vergleichbarer Bezug kann DIN EN 1520 [3] genutzt werden.

Anwendung findet haufwerksporiger Beton mit normaler Gesteinskörnung überwiegend in der Herstellung von Hohlblocksteinen (HBn) [26, 27]. Wegen seiner Durchlässigkeit wird er in dieser Form auch für Filterrohre, als Dränbeton und wegen der erhöhten Schallabsorption für Lärmschutzwände eingesetzt.

Haufwerksporiger Leichtbeton mit leichter Gesteinskörnung wird in großem Umfang zur Herstellung von Vollsteinen (VBl, V) und Hohlblöcken (HBl) [26, 27], für tragende und wärmedämmende Wandelemente sowie für Lärmschutzwände (DIN EN 1520 zusammen mit DIN 4213 [3, 4]) und leichte Dränbetone eingesetzt.

### **3.2 Mischungsentwurf**

Der Mischungsentwurf eines haufwerksporigen Betons unterscheidet sich deutlich von dem eines gefügedichten Betons. Den Ausgangspunkt bildet die gewählte grobe Gesteinskörnung. Je nach Zusammensetzung wird etwa 1000 l lose Körnung je m<sup>3</sup> haufwerksporigen Betons eingesetzt. Der Haufwerksporenraum des verdichteten Betons hängt von der gewählten Sieblinie ab und lässt sich daraus grob abschätzen. Die Sandfraktion vergrößert das Zementleimvolumen und verbessert die Festigkeit. Durch den Zementleim und den (Leicht-)Sand kann sich das Volumen geringfügig vergrößern (Sperrkorn) oder verringern (Schlupfkorn und verringerte Reibung) (vgl. Skript Gesteinskörnung).

Bei haufwerksporigem Beton kann der w/z-Wert des Zementleims nur in engen Grenzen verändert werden, da er sonst entweder so trocken ist, dass er die Körner nicht ausreichend umhüllt, oder so nass ist, dass er abtropft und tiefer liegende Hohlräume verstopft bzw. sich am Boden der Schalung sammelt. Ein gleichmäßiges Umhüllen und damit Verkitten der Körner ist in diesem Fall für die Druckfestigkeit des Betons wichtiger als der w/z-Wert.

Eine Variante des haufwerksporigen Leichtbetons wird unter Einsatz von Luftporen bildenden Betonzusatzmitteln erzeugt. Dieser Beton weist auf den ersten Blick eine Matrix auf, die der des gefügedichten Leichtbetons sehr ähnelt. Bei näherem Betrachten fallen die fein dispergierten Kugelporen in der Matrix auf (vgl. Bild 1 (c)). Diese Kugelporen erzeugt das Zusatzmittel. Durch den Einsatz des Zusatzmittels kann in der Betonrezeptur ggf. auf Leichtsand verzichtet werden. Zugleich werden die mechanischen Eigenschaften des Betons verbessert, ohne die Rohdichte und damit die wärmetechnischen Eigenschaften zu verändern.

### **3.3 Gesteinskörnung**

Als normale Gesteinskörnung wird gebrochenes Material bevorzugt, weil es zu einem größeren Hohlraumgehalt führt und sich besser verzahnt. Die Verzahnung wirkt sich positiv auf die Grünstandfestigkeit und Festigkeit aus. Als leichte Gesteinskörnung werden vorwiegend natürliche leichte Gesteinskörnungen wie z. B. gebrochene Schaumlava oder Bims und

industriell hergestellte leichte Gesteinskörnung, wie z. B. Blähglas, Blähton oder Blähschiefer verwendet.

### 3.4 Festigkeit und Rohdichte

Die Druckfestigkeit von LAC kann nach DIN EN 1520 [3] vom Hersteller entweder als deklarierte charakteristische Druckfestigkeit oder als deklarierte Festigkeitsklasse angegeben werden (Tabelle 4). Die Norm gestattet eine statistische Auswertung der Ergebnisse. Durch die in DIN EN 1520 enthaltenen  $K_n$ -Werte kann der Stichprobenumfang berücksichtigt werden. Referenzprobekörper für die Druckfestigkeit sind Bohrkerne mit einer ihrem Durchmesser entsprechenden Länge oder Würfel, die aus den vorgefertigten Elementen entnommen werden.

Tabelle 4: Festigkeitsklassen und Festigkeitsanforderungen für LAC nach DIN EN 1520 [3]

Festigkeitsklasse	LAC 2	LAC 4	LAC 6	LAC 8	LAC 10	LAC 12	LAC 15	LAC 20	LAC 25
$f_{ck}$ [MPa]	2	4	6	8	10	12	15	20	25
$f_{c,3}$ <sup>a</sup> [MPa]	≥ 4	≥ 7	≥ 9	≥ 11	≥ 13	≥ 15	≥ 18	≥ 24	≥ 29
$f_{c,n}$ <sup>b</sup>	≥ $f_{ck} + K_n \times s_n$ <sup>d</sup>								
$f_{cmin}$ <sup>c</sup> für $n < 6$	≥ 1,5	≥ 3,5	≥ 5,5	≥ 7,0	≥ 9,0	≥ 11	≥ 14	≥ 19	≥ 24
$f_{cmin}$ <sup>c</sup> für $6 \leq n \leq 9$	≥ 1,5	≥ 3,0	≥ 4,5	≥ 6,0	≥ 7,5	≥ 9,0	≥ 12	≥ 17	≥ 22
$f_{cmin}$ <sup>c</sup> für $n \geq 10$	≥ 1,5	≥ 3,0	≥ 4,0	≥ 5,5	≥ 7,0	≥ 8,0	≥ 11	≥ 16	≥ 21
<sup>a</sup>	Geforderte Mindestdruckfestigkeit jedes Prüfsatzes von drei aufeinander folgenden Probekörpern.								
<sup>b</sup>	Geforderte Mindestdruckfestigkeit einer Prüfserie mit $n \geq 6$ Probekörpern. Die von der Anzahl $n$ der Probekörper abhängigen $K_n$ -Werte sind aus der Tabelle 4 in DIN EN 1520 zu entnehmen.								
<sup>c</sup>	Kleinster Einzelwert der Druckfestigkeit einer Prüfserie von $n$ Probekörpern.								
<sup>d</sup>	$s_n$ ist die Standardabweichung der Druckfestigkeit einer Prüfserie mit $n$ Prüfergebnissen.								

DIN EN 1520 gilt für Trockenrohddichten  $\geq 400 \text{ kg/m}^3$  und  $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$  (Tabelle 5).

Tabelle 5: Rohdichteklassen für LAC nach DIN EN 1520 [3]

Rohdichteklasse	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Mittlere Trockenrohddichte	≥400	>500	>600	>700	>800	>900	>1000	>1200	>1400	>1600	>1800
[kg/m <sup>3</sup> ]	≤500	≤600	≤700	≤800	≤900	≤1000	≤1200	≤1400	≤1600	≤1800	≤2000

### 3.5 Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit kann wie bei gefügedichtem Leichtbeton aus der Druckfestigkeit abgeschätzt werden. Der Unterschied der beiden Festigkeitswerte ist allerdings geringer als bei gefügedichtem Leichtbeton.

### 3.6 Formänderung

Für die Bemessung des LAC wird eine idealisierte bilineare Spannungsdehnungslinie angenommen [3]. Mit geringen Abweichungen trifft diese Idealisierung zu (Bild 17).

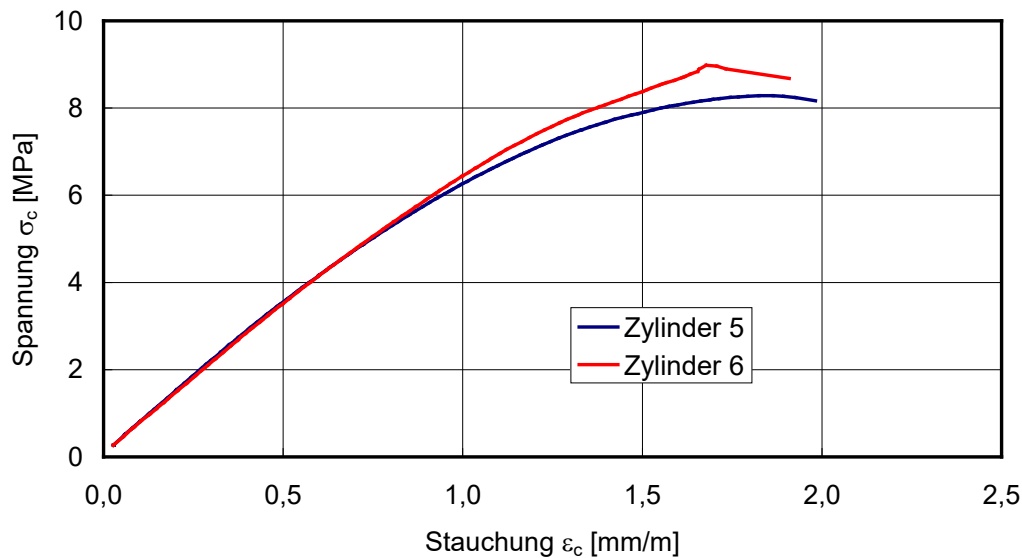


Bild 17: Gemessene Spannungsdehnungslinien von haufwerksporigem Leichtbeton [28]

### 3.7 Elastizitätsmodul

Die Werte des Elastizitätsmoduls liegen je nach Gesteinskörnungsart, Druckfestigkeit und Rohdichte des LAC zwischen 2000 und 25000 N/mm<sup>2</sup>.

### 3.8 Dauerhaftigkeit

Tragende Bewehrung muss im haufwerksporigen Leichtbeton gegen Korrosion geschützt werden (Verzinkung, einbetten in gefügedichten Beton, Beschichtung). Der LAC kann problemlos einer freien Bewitterung ausgesetzt werden z. B. Lärmschutzelement). Im Wohnungsbau wird der LAC in der Regel verputzt oder bekleidet (Vorsatzschale).



## 4 Porenleichtbeton (Schaumbeton)

Die Makroporen im Porenleichtbeton können auf zwei Wegen in den Mörtel eingebracht werden. Durch Zugabe von:

- Schaumbildnern beim Mischen oder
- getrennt vorgefertigtem Schaum.

Je nach Einsatzzweck und Anforderung wird Porenleichtbeton unter Verwendung von Natursand bis 2 mm Größtkorn oder gebrauchtem Polystyrol hergestellt.

Porenleichtbeton kann auf Grund des hohen Schwindmaßes nur dort angewendet werden, wo Schwindrisse unbedeutend sind, so z. B. als Ausgleichs-, Schutz- und überdeckte Wärmedämmschichten oder als Verfüllmassen. Anhaltswerte für den Zusammenhang zwischen Rohdichte und Wärmeleitfähigkeit bzw. Druckfestigkeit gibt Bild 19.

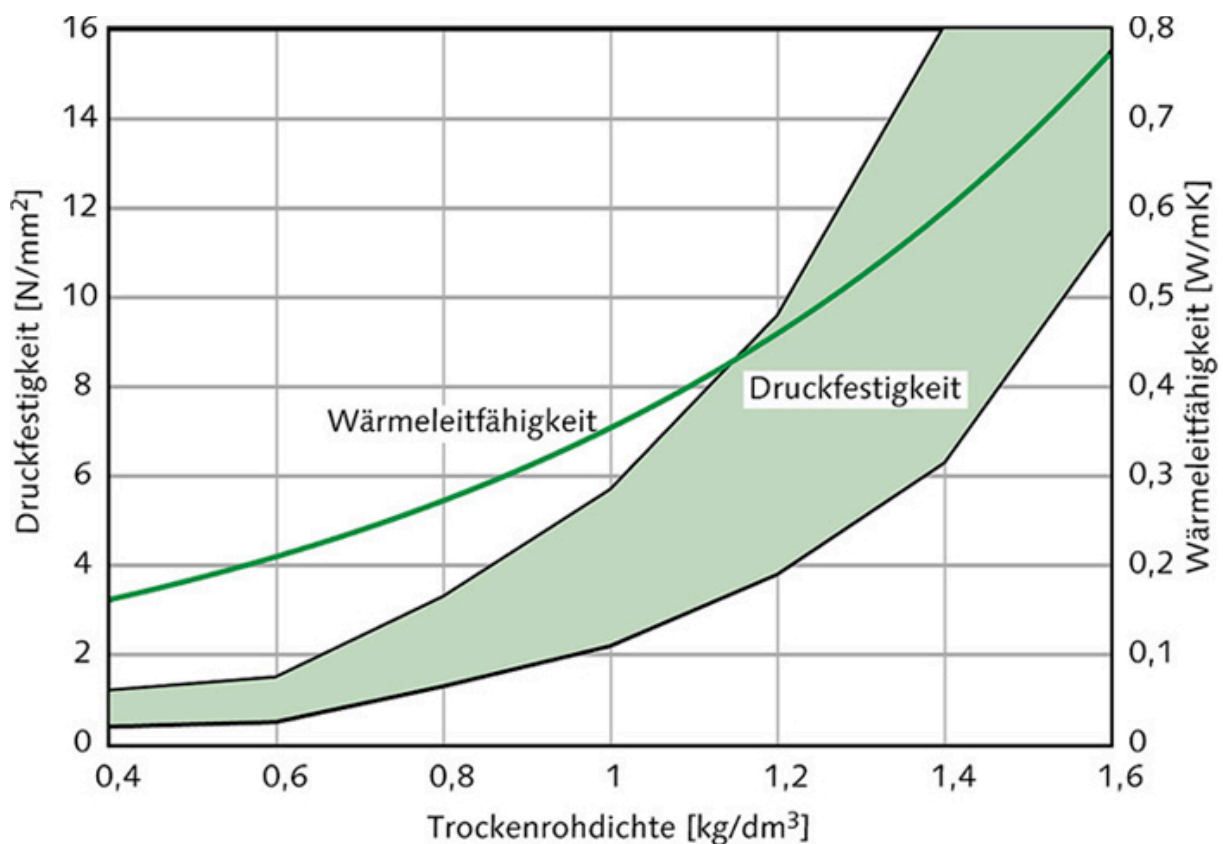


Bild 18: Eigenschaften von Porenleichtbeton [29]

## 5 Porenbeton

Porenbeton wird aus einem flüssigen Mörtel hergestellt, der aus einem Bindemittel (meist Zement und Kalk), gemahlener silikatreicher Gesteinskörnung (Quarzsand) und einem Treibmittel (meist Aluminiumpulver) besteht. Dieses Treibmittel reagiert mit dem Calciumhydroxid des Bindemittels, wobei Wasserstoff frei wird, der den Mörtel in der Form aufbläht (vgl. Skript Mauersteine und Mörtel). Die Bauteile werden nach dem Erstarren dampfgehärtet, wobei die silikatische Gesteinskörnung, durch die hohen Temperaturen reaktionsfähiger wird und sich mit dem CaO des Bindemittels zu ähnlichen Phasen hoher Festigkeit verbindet, wie sie bei der Zementerhärtung auftreten. Eine Erhärtung an der Luft würde ohne diese Reaktion eine zu geringe Festigkeit ergeben.

Bei einer Reindichte von rd.  $2500 \text{ kg/m}^3$  und üblichen Rohdichten zwischen  $300$  bis  $1000 \text{ kg/m}^3$  kann die Porigkeit des Porenbetons zwischen rd.  $60$  bis  $90 \text{ Vol.-%}$  liegen (Bild 19). Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton sind nach DIN EN 12602 [30] genormt.

Die Druckfestigkeit ist unter anderem vom Ablauf der Autoklavbehandlung abhängig. Sie steigt mit der Rohdichte und nimmt mit steigendem Feuchtegehalt zunächst stark, ab etwa  $8 \text{ Vol.-%}$  aber nur noch geringfügig ab.

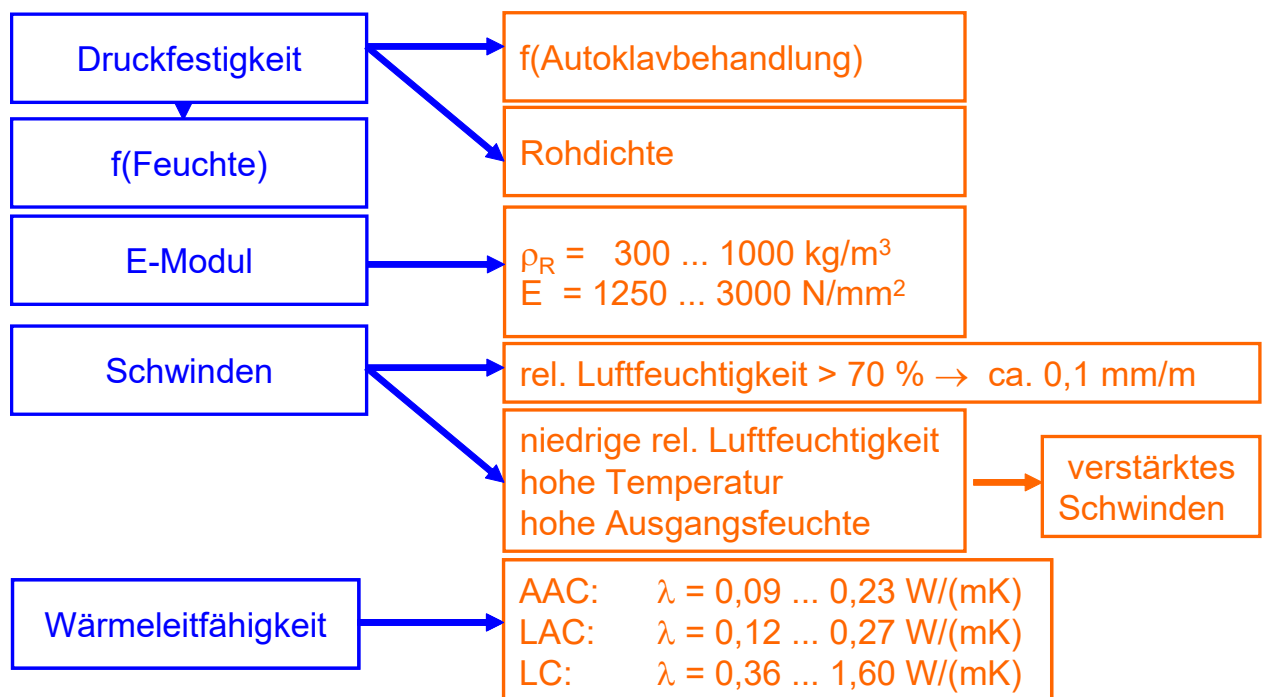


Bild 19: Eigenschaften von Porenbeton [1]

## 6 Literatur

- [1] Schießl, P., *Beton - Kapitel 4-7. Skriptum zur Grundvorlesung in Baustoffkunde*, ed. Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung. 2006, München. 114 p.
- [2] Thienel, K.-C.; Haller, T. and Beuntner, N., *Lightweight Concrete—From Basics to Innovations*. Materials, 2020. 13(5): pp. 1120.
- [3] DIN EN 1520. *Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung (Prefabricated reinforced components of lightweight aggregate concrete with open structure with structural and non-structural reinforcement)*. 2011, p. 119.
- [4] DIN 4213. *Anwendung von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton in Bauwerken*. 2003.
- [5] DIN 1045-2. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1 (Concrete, reinforced and prestressed concrete structures – Part 2: Concrete – Specification, properties, production and conformity – Application rules for DIN EN 206-1)*. 2008, p. 62.
- [6] DIN EN 206-1. *Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. 2001.
- [7] Weigler, H.; Karl, S., *Stahlleichtbeton. Herstellung, Eigenschaften, Ausführung*. 1972, Wiesbaden, Berlin: Bauverlag Buchverlag GmbH. 260 p.
- [8] Thienel, K.-C., *Materialtechnologische Eigenschaften der Leichtbetone aus Blähton*, in *Baustoffe in Praxis, Lehre und Forschung: Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy*, Schmidt-Döhl, F., Editor. 1997, Wilhelm Ernst & Sohn: Braunschweig. pp. 203-210.
- [9] Faust, T., *Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau*. 2003, Berlin: Ernst & Sohn. 307 p.
- [10] Thienel, K.-C.; Peck, M., *Die Renaissance leichter Betone in der Architektur*. DETAIL, 2007(5): pp. 522 – 534.
- [11] DIN EN 1992-1-1. *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. 2011.
- [12] DIN V 18004. *Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken - Prüfverfahren für Gesteinskörnungen nach DIN V 20000-103 und DIN V 20000-104*. 2004, p. 14.
- [13] DIN EN 1097-6. *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme; Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption*. 2013, p. 51.
- [14] Thienel, K.-C., *Besonderheiten bei Leichtbeton in DIN FB 100*, in *Heft 526 Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN EN 13670, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN EN 12620*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Editor. 2011, Beuth Verlag: Berlin. pp. 80-84.
- [15] ACI Committee 211. *ACI 211.9R-18 Guide to Selecting Proportions for Pumpable Concrete*. 2018, p. 13.
- [16] Wesche, K., *Baustoffe für tragende Bauteile - Band 2: Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit*. 3. ed. Vol. 2. 1993, Wiesbaden: Bauverlag. XXII, 502 p.
- [17] Lusche, M., *Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge*. Schriftenreihe der Zementindustrie, ed. Verein Deutscher Zementwerke (VDZ). Vol. 39. 1972: Beton-Verlag. 114 p.

- [18] Schütz, F.R., *Der Einfluß der Zuschlagelastizität auf die Betondruckfestigkeit*. 1970, TH Aachen: Aachen.
- [19] Thienel, K.-C.; Sposito, R., *Effects of Specimen Shape, Size, Age and Curing on Compressive Strength Values Obtained for Structural Lightweight Concrete / ЗАВИСИМОСТЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОЧНОСТИ ЛЕГКОГО КОНСТРУКЦИОННОГО БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ ОТ ФОРМЫ, РАЗМЕРОВ, ВОЗРАСТА И УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ ОБРАЗЦОВ*. ALITinform: Cement. Concrete. Dry Mixtures, 2017. 47(2-3): pp. 26 - 46.
- [20] DIN 1045-3. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung - Anwendungsregeln zu DIN EN 13670*. 2012, p. 41.
- [21] Thienel, K.-C., *Verification of Conversion Factors used for Compressive Strength Values obtained for Structural Lightweight Concrete*, in *fib Symposium 2017 High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, Hordijk, D.A.; Luković, M., Editors. 2017, Springer International Publishing AG: Maastricht, The Netherlands. p. 1636-1644.
- [22] Båve, G.; Bright, N.J.; Leitch, F.N.; Rottau, W.; Svanholm, G.; Trambovetsky, V.P. and Weber, J.W., *Autoclaved aerated concrete: CEB/FIP manual of design and technology*, ed. Comité euro-international du béton - Fédération internationale de la précontrainte. 1977, Lancaster, England: Construction Press. 169 p.
- [23] Short, A., *Lightweight aggregate concrete: CEB/FIP manual of design and technology*, ed. Comité euro-international du béton - Fédération internationale de la précontrainte. 1977: Construction Press. 169 p.
- [24] Hermann, V., *Spannungs-Dehnungs-Linien von Leichtbeton*, in *Fakultät für Bauingenieurwesen*. 1977, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen: Aachen. p. 93.
- [25] Maage, M.; Thienel, K.-C.; Smeplass, S.; van Breugel, K.; Kwint, E.; Mijnsbergen, J.; Monsen, A. and Sveindottir, E.L., *LWAC Material Properties - State-of-the-Art. EuroLightCon - Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete*, ed. Mijnsbergen, J.P.G., 2000, Gouda: The European Union – Brite EuRam III. 71 p.
- [26] DIN EN 771-3. *Festlegungen für Mauersteine - Teil 3: Mauersteine aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen) (Specification for masonry units – Part 3: Aggregate concrete masonry units (Dense and lightweight aggregates))*. 2015, p. 43.
- [27] DIN 20000-403. *Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 403: Regeln für die Verwendung von Mauersteinen aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen) nach DIN EN 771-3:2015-11 (Application of building products in structures – Part 403: Rules for the application of aggregate concrete masonry units (dense and lightweight aggregates) according to DIN EN 771-3:2015-11)*. 2018, p. 23.
- [28] Thienel, K.-C.; Müller, A., *Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4233 und DIN 1045-1*, in *Gutachten im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik*. 2005, Fraunhofer IRB Verlag: München. p. 64.
- [29] Küchlin, D.; Hersel, O., *Betontechnische Daten*, ed. HeidelbergCement AG. 2017, Leimen. 368 p.
- [30] DIN EN 12602. *Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton (Prefabricated reinforced components of autoclaved aerated concrete)*. 2016, p. 195.