



Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton

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

Wintertrimester 2018

Inhaltsverzeichnis

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	Besonderheiten der Herstellung von Leichtbeton	8
2.1.1	Wasseraufnahme der Gesteinskörnung	8
2.1.2	Bestimmung der Kornrohddichte von Leichtsand	10
2.1.3	Mischungsentwurf	12
2.1.4	Mischen	14
2.1.5	Verarbeitbarkeit	15
2.1.6	Einbau	15
2.1.7	Verdichten	16
2.1.8	Nachbehandlung	17
2.2	Gefüge	17
2.3	Tragverhalten	18
2.4	Rohddichte und Druckfestigkeit	21
2.5	Dauerstandfestigkeit	23
2.6	Dauerschwingfestigkeit	23
2.7	Querdehnverhalten, mehraxiale Festigkeit	23
2.8	Zugfestigkeit	24
2.8.1	Biegezugfestigkeit $f_{tk,fl}$	24
2.9	Formänderungen	24

2.9.1	Spannungsdehnungslinie	24
2.9.2	Elastizitätsmodul	26
2.9.3	Kriechen	26
2.9.4	Schwinden	27
2.9.5	Wärmedehnung	27
2.10	Dauerhaftigkeit	27
2.11	Selbstverdichtender Leichtbeton	28
3	Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge	30
3.1	Allgemeines	30
3.2	Mischungsentwurf	30
3.3	Gesteinskörnung	31
3.4	Verarbeitung und Einsatzgebiete	31
3.5	Festigkeit und Rohdichte	32
3.6	Zugfestigkeit	32
3.7	Formänderung	33
3.8	Elastizitätsmodul	33
3.9	Dauerhaftigkeit	33
4	Literatur	35

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

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

- Konstruktiver (gefügedichter) Leichtbeton,
- Haufwerksporiger Leichtbeton,
- Schaumbeton und
- Porenbeton.

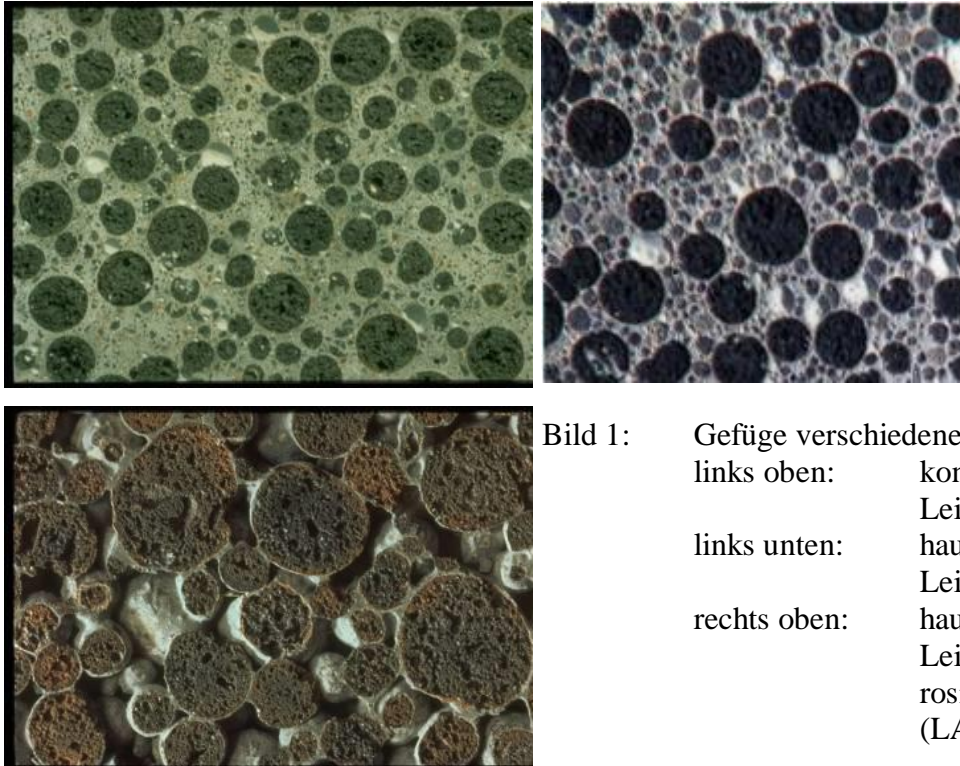


Bild 1: Gefüge verschiedener Leichtbetone
links oben: konstruktiver Leichtbeton (LC)
links unten: haufwerksporiger Leichtbeton (LAC)
rechts oben: haufwerksporiger Leichtbeton mit porosierter Matrix (LAC)

Während die ersten drei Leichtbetone sowohl als Fertigteil- als auch als Ortbeton zum Einsatz kommen, wird Porenbeton wegen der notwendigen 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 kg/m^3 benutzt. Bei diesen Betonen wird die Rohddichte nur soweit reduziert, dass die Festlegungen nach DIN 1045 und DIN EN 206-1 für Normalbeton z. B. bezüglich Festigkeit und Verformung noch benutzt werden dürfen. Eine normative Verankerung für diesen Begriff gibt es nicht.

Druckfestigkeit und Rohdichte 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 Leichtbetonproduktion (ohne Porenbeton) sind haufwerksporige Leichtbetone, die wegen der guten wärmedämmenden Eigenschaften in für Mauersteine, Wandtafeln etc. eingesetzt werden [Lit 17]. Der Einsatz gefügedichten Leichtbetons stellt ein verhältnismäßig kleines Marktsegment des Betonbaus dar. So werden etwa 350.000 m³ leichte Gesteinskörnung vornehmlich für Fertigteile genutzt. Als Ort beton wird gefügedichter Leichtbeton - gemessen an seinem Leistungspotenzial - relativ wenig eingesetzt. Die Gründe sind hauptsächlich eine gegenüber Normalbeton anspruchsvollere Technologie und die höheren Stoffkosten [Lit 11].

Bild 2 veranschaulicht den Festigkeits- und Rohdichtebereich, der von Beton abgedeckt wird.

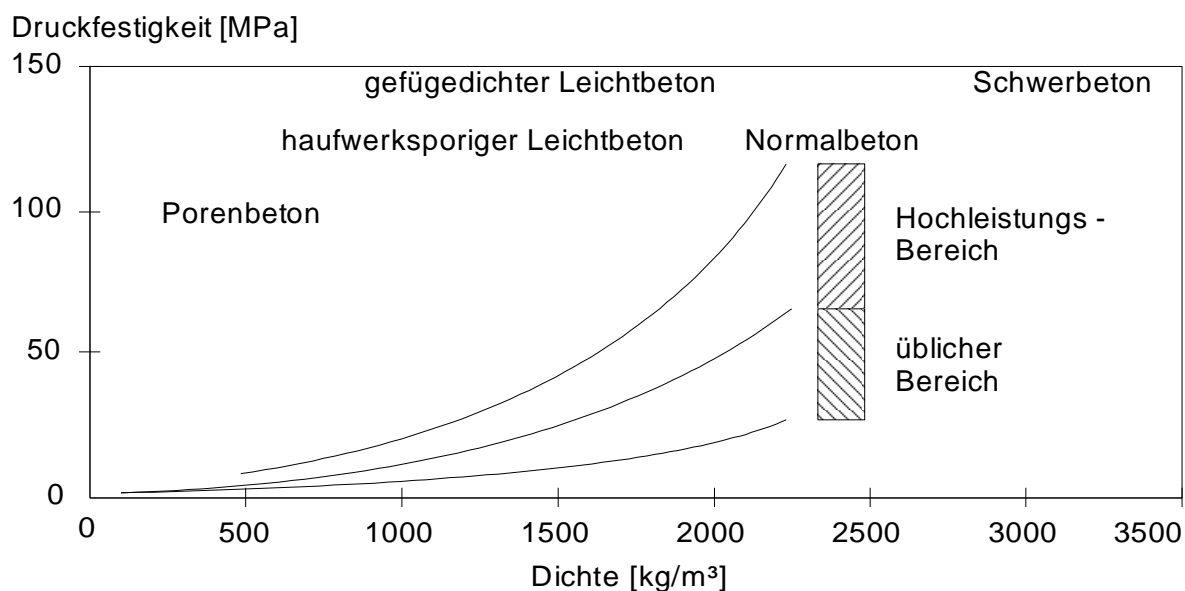


Bild 2: Festigkeits- und Rohdichtebereich von Beton [Lit 11]

1.2 Unterscheidung der Leichtbetone

1.2.1 Gefügedichter (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 Bandbreite der Kornrohddichten der unterschiedlichen Gesteinskörnungen verdeutlicht Bild 3.

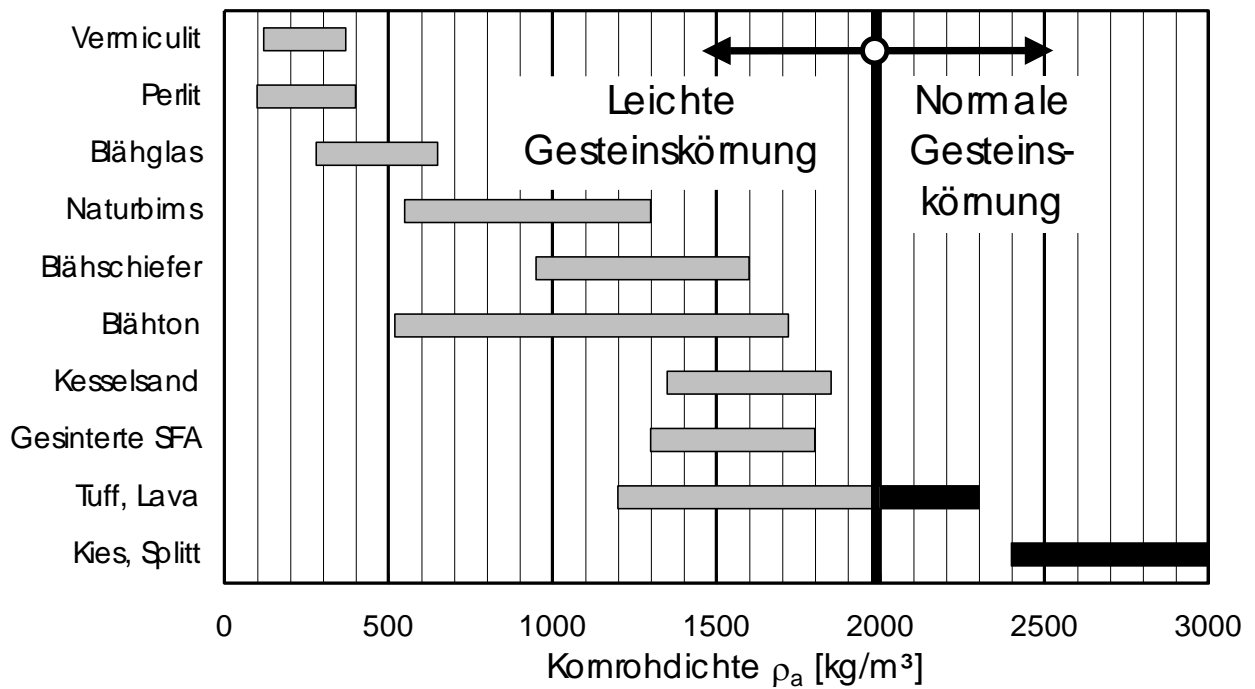


Bild 3: Kornrodichtebereiche leichter und normaler Gesteinskörnung [Lit 5]

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

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

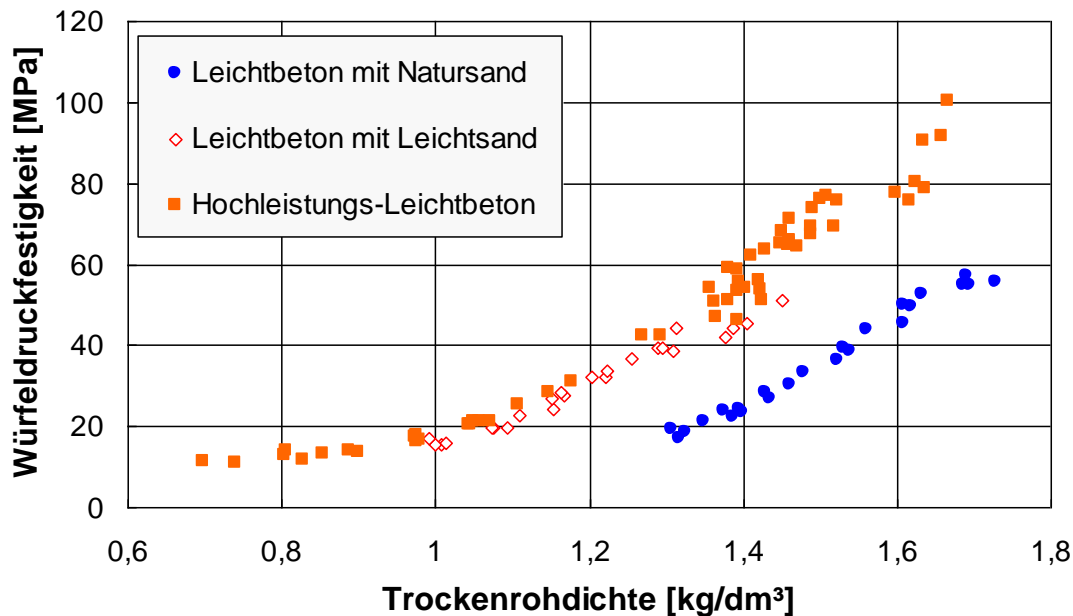


Bild 4: Zusammenhang zwischen Würfeldruckfestigkeit und Beton-Trockenrodichte am Beispiel von Leichtbeton mit Blähton

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 unten links). 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 oben rechts).

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 Schaumbildners 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 als 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 1045 und DIN EN 206-1 geregelt. Die Zusammensetzung unterscheidet sich zum Normalbeton im Wesentlichen durch den teilweisen oder vollständigen Austausch normaler Gesteinskörnung gegen leichte Gesteinskörnung.

2.1 Besonderheiten der Herstellung von Leichtbeton

2.1.1 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. Der Verlauf der Wasseraufnahme unterscheidet sich zwischen den verschiedenen Arten leichter Gesteinskörnung sowohl in der Geschwindigkeit als auch der aufgenommenen Wassermenge (Bild 5). Bild 6 veranschaulicht den Unterschied im Wassergehalt zwischen Leicht- und Normalbeton.

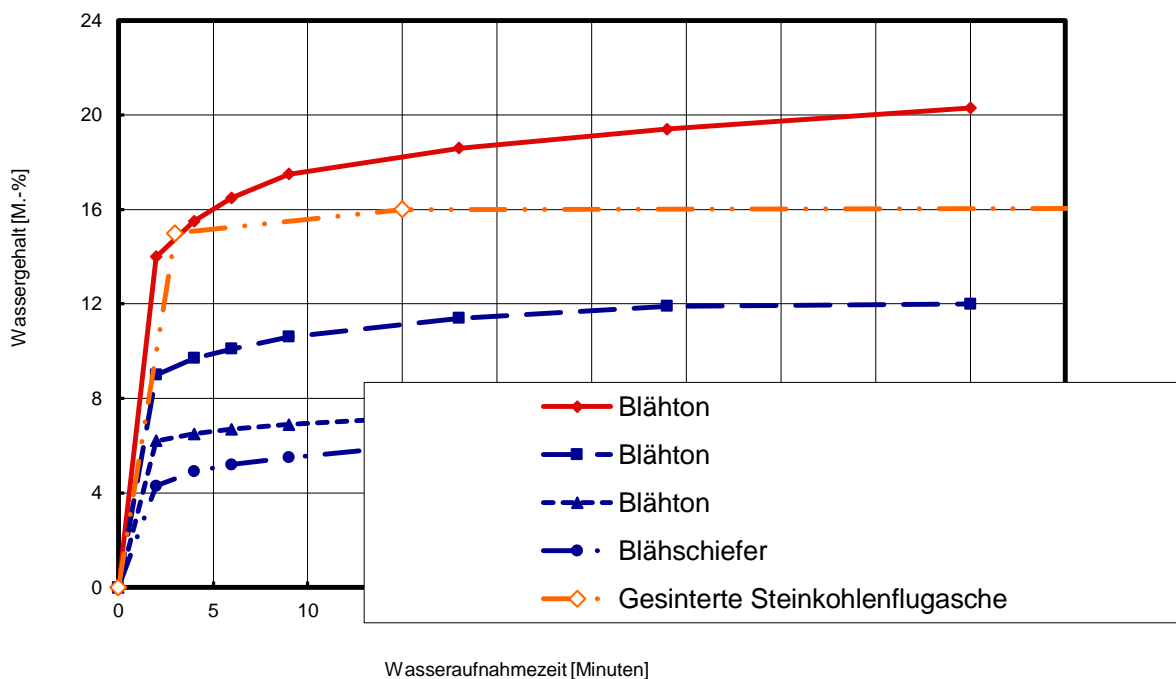


Bild 5: Wasseraufnahme verschiedener leichter Gesteinskörnungen

Die Wasseraufnahme grober leichter Gesteinskörnung wird im Vorfeld im Standzylinder nach DIN V 18004 oder im Pyknometer nach DIN EN 1097-6, Anhang C bestimmt. In beiden Fällen wird die leichte Gesteinskörnung nur geringfügig unter Wasser bewegt. In der Körnung eingeschlossener Luft wird durch die Oberflächenspannung des Wasser zum Teil am Entweichen gehindert. Dies macht sich besonders bei Blähton bemerkbar, der viel mehr Wasser aufnehmen kann, wenn er nur besprüht oder beregnet wird, weil er dann Entlüften kann. Im Betonmischer nimmt Blähton viel schneller Wasser auf als im Standzylinderversuch. Das Benetzungsverhalten entspricht dem bei Besprühen.

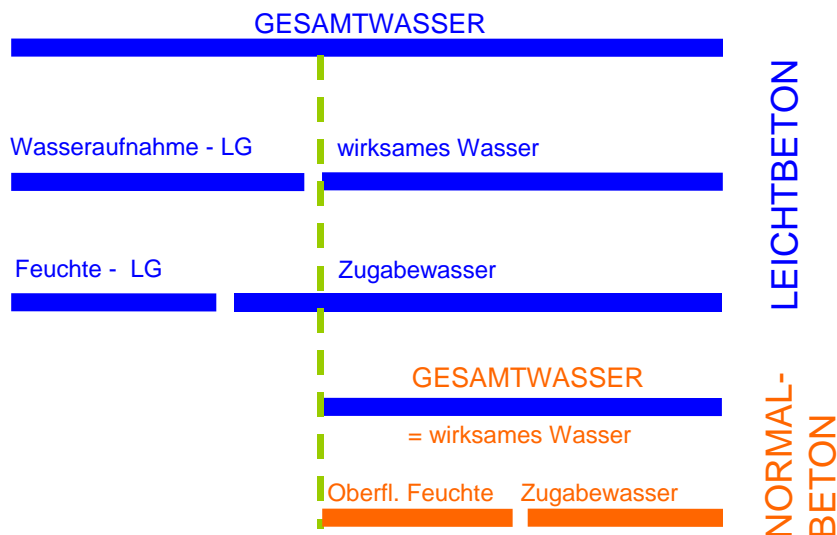


Bild 6: Wasser in Leicht- und Normalbeton [Lit 9]

Es gibt noch einen weiteren Einfluss auf die Wasseraufnahme von leichter Gesteinskörnung, der mit dem Zeitpunkt des Vornässens zusammenhängt. Wird trockenes Material direkt vor dem Mischen vorgehässelt, befindet sich das dabei aufgenommene Wasser bevorzugt im äußeren Bereich des Kornes (Bild 7 links). Andererseits ist häufig die Situation anzutreffen, dass die leichte Gesteinskörnung längere Zeit im Lager lag, dort nass wurde und dann langsam abtrocknet. In diesem Fall stellt sich im Korn ein Feuchtegradient ein, wie er in Bild 7 rechts dargestellt ist. Dieser Einfluss ist bei Körnungen mit einer dichteren äußeren Schale wie z. B. ungebrochenem Blähton besonders ausgeprägt. Die Wasseraufnahme bei der Betonherstellung kann durch die unterschiedliche Feuchteverteilung im Korn bei gleichem Vornässgrad durchaus um 5 Masse-% differieren (Bild 8). Wird dieser Effekt nicht berücksichtigt, kann es zu deutlichen Qualitätsschwankungen bei der Produktion von Leichtbeton kommen.

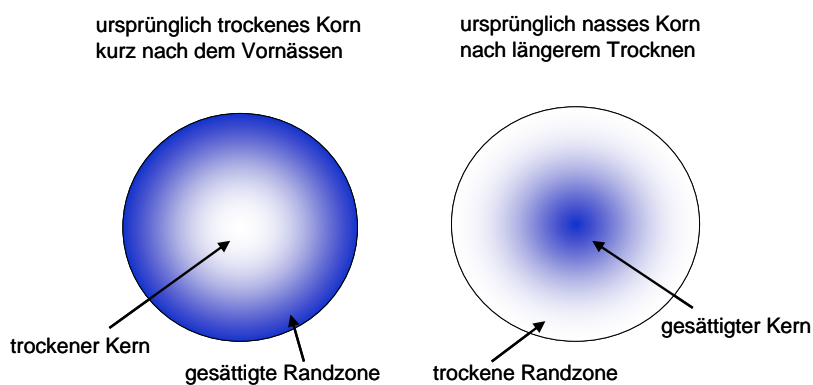


Bild 7: Mögliche Feuchteverteilungen in einer leichter Gesteinskörnung

Die Verfahren zur Bestimmung der Wasseraufnahme im Pyknometer nach DIN EN 1097-6, Anhang C bzw. im Standzylinder nach DIN V 18004 sollen erst am einer Korngröße von 4 mm verwendet werden. Abgesehen vom Anwendungsbereich kann allenfalls das Standzylinderverfahren mit ausreichende Übung für gebrochenen Leichtsand genutzt werden. Um diese Lücke zu schließen, kann die Wasseraufnahme mit Hilfe einer Filternutsche nach DIN V 18004 gemessen werden.

Damit die tatsächliche Wasseraufnahme im Leichtbeton nicht überschätzt und der wirksame Wasser/Zement-Wert in der Folge nicht unterschätzt wird, berücksichtigt man bei der groben

leichten Gesteinskörnung nur die Wasseraufnahme innerhalb der ersten 60 Minuten. 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 [Lit 13].

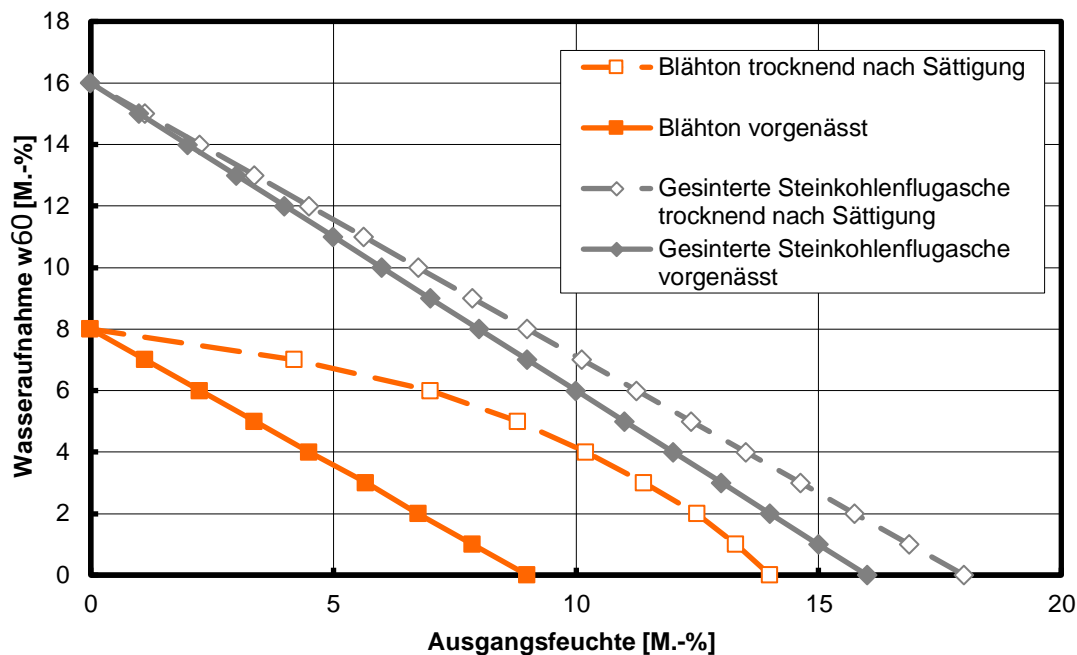


Bild 8: Einfluss der Ausgangsfeuchte und des Feuchtezustandes auf die Wasseraufnahme leichter Gesteinskörnung [Lit 10]

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 dadurch zunehmende Kapillarwirkung wird ein Teil des von der leichten Gesteinskörnung aufgenommenen Wassers aus dieser herausgesogen und sorgt so für 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 einem ausgiebigen Vornässen der Gesteinskörnung absieht. Dem möglichen beschleunigten Ansteifen des Leichtbetons wird durch eine längere Mischdauer und/oder die Wahl einer weicheren Ausgangskonsistenz Rechnung getragen.

2.1.2 Bestimmung der Kornrohichte von Leichtsand

Die Kornrohichte grober leichter Gesteinskörnung wird im Vorfeld im Standzylinder nach DIN V 18004 oder im Pyknometer nach DIN EN 1097-6 bestimmt. Die so ermittelten Werte stimmen gut überein. Für gebrochenen Leichtsand bereitet zumindest das Pyknometer erhebliche Probleme. Für derartige Materialien wird die Kornrohichte entweder mit dem Standzylinderverfahren nach DIN V 18004 oder mithilfe einer Filternutsche nach DIN V 18004 (BVK-Verfahren) gemessen. Beide Verfahren liefern gravierend voneinander abweichende Werte [Lit 15]. Verantwortlich für die Unterschiede ist der Wassergehalt des Leichtsand es zu Beginn der Prüfung. Für das Standzylinderverfahren wird ofentrocknes Material eingesetzt, während der Leichtsand beim BVK-Verfahren wassergesättigt ist. Die Auswirkung unterschiedlicher Vornässgrade des Leichtsand es auf die gemessene Kornrohichte zeigt Bild 9.

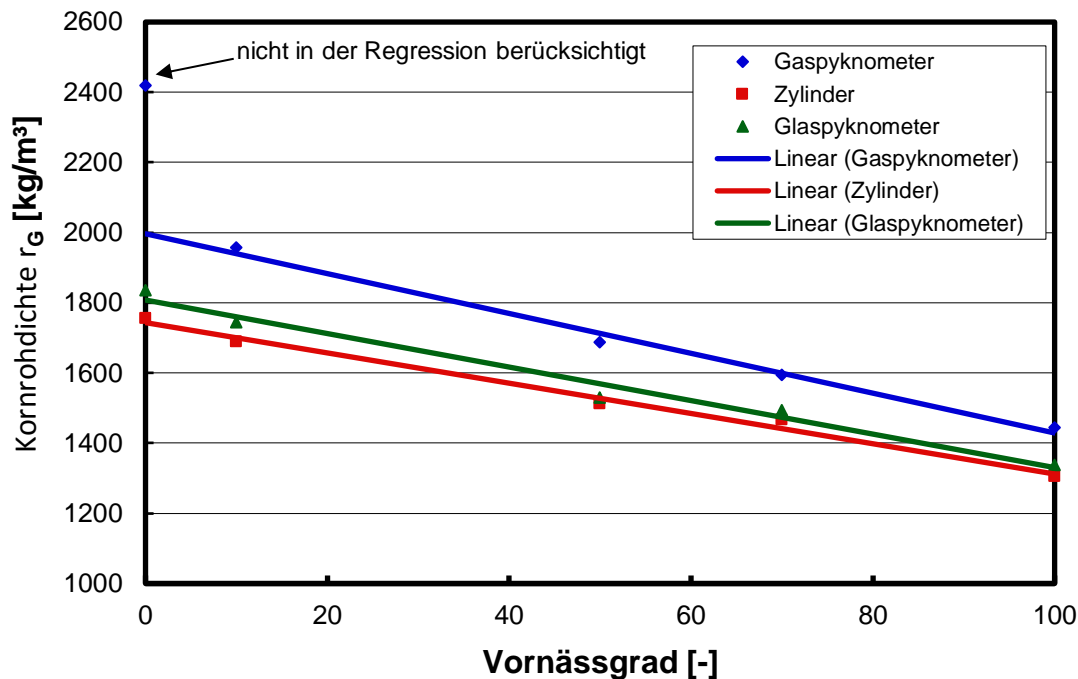


Bild 9: Einfluss des Vornässgrads des eingesetzten Leichtsand (Liapor K-Sand 0/2 mm) auf den Messwert der Kornrohddichte [Lit 15]

Ein gut zusammengesetzter gefügedichter Leichtbeton kann in etwa einen halben Kubikmeter (lose) Leichtsand enthalten. Üblicherweise wird in Transportwerken nach Gewicht und nicht nach Volumen dosiert. Die Unterschiede in der gemessenen Kornrohddichte wirken sich auf das Betonvolumen aus, wenn die Einwaage (wie üblich) nicht verändert wird. Im nachstehenden Beispiel (Tabelle 1) käme es zu einer Mehrlieferung. Nicht berücksichtigt wird bei dieser einfache Betrachtung, dass sich im Endeffekt die Zusammensetzung des Leichtbetons verändert.

Tabelle 1: Auswirkung einer falsch angenommenen Kornrohddichte des Leichtsand auf die Zusammensetzung eines Leichtbetons (Veränderungen in orange)

	theoretische Rezeptur ¹⁾			tatsächliche Rezeptur ¹⁾		
	Stoffraum	Rohdichte	Massen trocken	Stoffraum	Rohdichte	Massen trocken
	[dm³/m³]	[kg/dm³]	[kg/m³]	[dm³/m³]	[kg/dm³]	[kg/m³]
Liapor F 6.5 2/10 mm	380	1,19	450	380	1,19	450
Liapor K-Sand 0/2	225	1,73	389	248	1,57	389
Flugasche	60	2,25	135	60	2,25	135
CEM III/B 42,5 N	134	2,98	400	134	2,98	400
Wasser	182	1,00	182	182	1,00	182
Restporen	19			19		
Summe	1000		1556	1023		1556

¹⁾ Zusatzmittel und Saugwasser sind nicht aufgeführt

2.1.3 Mischungsentwurf

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.

Festlegen der groben leichten Gesteinskörnung

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 Kornrohdichten der feinen und der groben Körnung können sich bei leichter Gesteinskörnung deutlich voneinander unterscheiden. Insbesondere bei Leichtsand stimmen die gravimetrische und volumetrische Kornverteilung nicht überein (Bild 10). Bei der Wahl der leichten Gesteinskörnung ist dieser Unterschied unter anderem zu beachten, weil bei einigen leichten Gesteinskörnungen mit steigendem Korndurchmesser die Kornrohdichte und -festigkeit und damit die erzielbare Betonfestigkeit abnehmen kann.

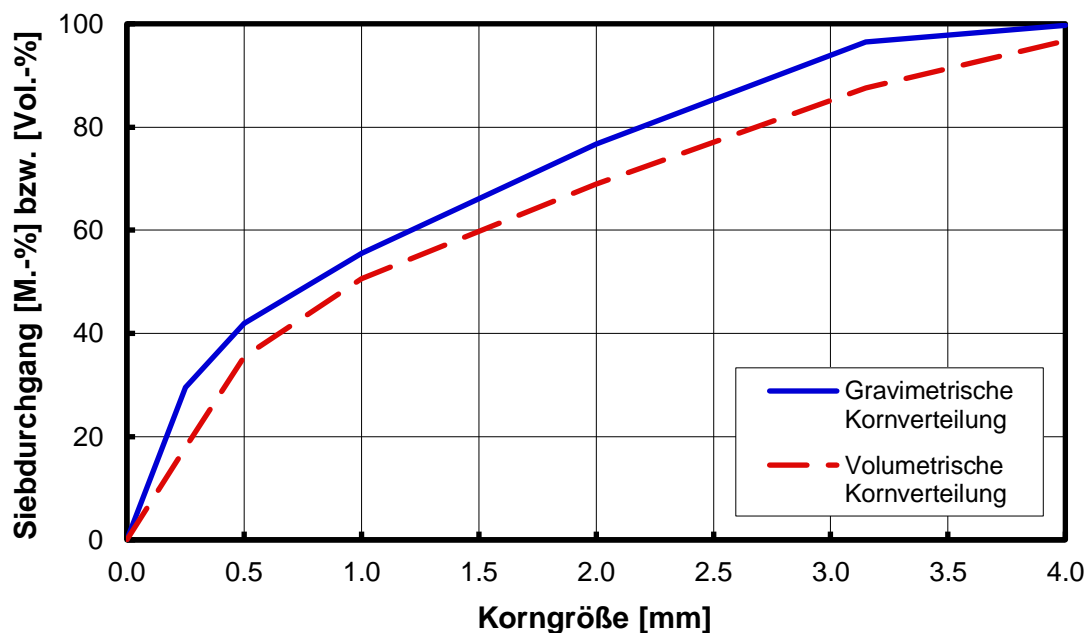


Bild 10: Unterschied zwischen gravimetrischer und volumetrischer Kornverteilung bei leichtem Brechsand

Bei der Auswahl der groben leichten Gesteinskörnung für die gewünschte Festigkeitsklasse wird immer wieder fälschlicherweise auf die Kornfestigkeit nach DIN EN 13055-1 Bezug genommen. Dieser Wert dient ausschließlich der werkseigenen Produktionskontrolle und kann nicht einfach auf Aussagen zur erreichbaren Druckfestigkeit eines Leichtbetons angewendet werden. Er ist auch nicht geeignet, leichte Gesteinskörnungen unterschiedlicher Hersteller im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit miteinander zu vergleichen. Sofern keine eigenen Erfahrungen mit dem Entwurf von Leichtbeton vorliegen, sollte immer vom Hersteller der leichten Gesteinskörnung eine Rezepturempfehlung erfragt werden.

Wahl des Zement- bzw. Bindemittelgehalts in Abhängigkeit von der geforderten Expositionsklasse

Im Gegensatz zu Normalbeton hängt die Dauerhaftigkeit eines Leichtbetons nicht mit der Festigkeitsklasse zusammen [Lit 13]. Die Einstufung in eine Expositionsklasse kann daher ausschließlich über den Bindemittelgehalt und den Wasserbindemittelwert erfolgen. Wegen der geringeren Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu Normalbeton empfiehlt es sich, Zement mit einer geringen Hydratationswärme (z. B. CEM III/A oder CEM III/B) zu wählen (siehe Kapitel 2.1.8).

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 den w/z-Wert und die Konsistenz 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 (siehe Kapitel 2.1.1). An dieser Stelle muss ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass für gefügedichten Leichtbeton der Zementgehalt bedeutender ist, als der Wasser/Zement-Wert. Letzterer muss allerdings den Vorgaben von DIN 1045-2, Tab. F.2.1 und F.2.2 für die geforderte Expositionsklasse entsprechen [Lit 2].

Wenn noch keine genaueren Angaben bekannt sind, kann als Anhaltswert für den Mischungsentwurf nominell von einem wirksamen w/z-Wert von 0,5 ausgegangen werden. 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 6). Genauere Angaben sind wegen der Wechselwirkung von Konsistenz und Wasseraufnahme schwierig. 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/m³ ausgegangen werden.

Die Konsistenz wird in der Eignungsprüfung 15 Minuten nach dem Beginn der Wasserzugabe überprüft. Um Informationen über das Ansteifverhalten zu erhalten, sollten zusätzlich Messungen nach 45 Minuten und bis zum Ende der zu erwartenden Einbauzeit auf der Baustelle durchgeführt werden.

Anteil der Verdichtungsporen

Das Volumen der Verdichtungsporen muss bei der Mischungsberechnung zunächst abgeschätzt werden, sofern keine Erfahrungswerte vorliegen. Leichtbeton mit Natursand kann tendenziell besser entlüftet werden als Leichtbeton mit Leichtsand und hat daher weniger Verdichtungsporen. Für eine Konsistenz C3 kann von folgenden Anhaltswert ausgegangen werden.

- Leichtbeton mit Natursand: 1,0 % – 1,5 % Verdichtungsporen
- Leichtbeton mit Leichtsand: 1,5 % – 2,0 % Verdichtungsporen

Diese Werte hängen zum einen deutlich von der Konsistenz ab und gelten nicht, wenn künstliche Luftporen eingeführt werden.

Wahl des Sandanteils

Als Sand kann Leichtsand, Natursand oder ein Gemisch aus beiden verwendet werden. Mit Natursand liegt die Trockenrohddichte des Leichtbetons um etwa 200 kg/m³ höher. Das benötigte Sandvolumen errechnet sich aus:

Sandvolumen = Mörtelgehalt - (Zementvolumen + Wasservolumen (effektiv) + Verdichtungsporen)

Tabelle 2: Anhaltswerte für den Mörtelgehalt

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

Das Kornvolumen ergibt sich als Restmenge zum Mörtelgehalt:

Kornvolumen = 1000 dm³ - Mörtelgehalt

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.

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

ρ_d Trockenrohddichte [kg/dm³]

Z Zementgehalt [kg/m³]

G Körnungsgehalt, trocken [kg/m³]

Kontrolle der Ergiebigkeit

Der gewählte Mischungsentwurf muss im Rahmen der Eignungsprüfung kontrolliert werden. 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. Diese Kontrolle sollte später im Zuge der Produktion beibehalten werden.

2.1.4 Mischen

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 ²/₃ des benötigten Anmachwassers gegeben und etwa 30 s untergemischt. 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.

Gefügedichter Leichtbeton wird vorzugsweise im Zwangsmischer hergestellt. Die Mischerschaukeln 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 Mixern auch schnell höher. Durch die Kornzertrümmerung wird u. a. die Wasseraufnahme erhöht.

2.1.5 Verarbeitbarkeit

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 irreführend sein, da bei diesem Versuch das Gewicht der Gesteinskörnungen als treibende Kraft wirkt. Bei Leichtbetonen können mithin bei augenscheinlich gleicher Konsistenz, je nach eingesetzter Kornrohichte, unterschiedliche Ausbreitmaße bestimmt werden.

2.1.6 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 vorgehärteter leichter Gesteinskörnung zielsicher gepumpt werden kann.

Eine Ursache für die Probleme beim Pumpen von Leichtbeton ist das durch den Pumpdruck aus dem Zementleim in die Kornporen gedrückte Wasser (Bild 11). Dadurch wird das Leichtbetonvolumen und gleichzeitig die Luft in den Kornporen komprimiert, weil Wasser in die leichte Gesteinskörnung gedrückt wird. Letzteres führt zum Ansteifen des Leichtbetons. Sobald der Druck auf den frischen Leichtbeton am Ende der Förderleitung oder - bedingt durch die Bauart der Pumpe - in der Förderleitung abfällt, kann sich die Porenluft und auch der Leichtbeton wieder entspannen und ausdehnen. Die in den Poren der leichten Gesteinskörnung eingeschlossenen Luft drückt das Wasser aus dem Korn heraus. Dies führt häufig zum Entmischen des Leichtbetons und kann das Scheitern des Pumpens bedeuten. Dieses Verhalten kann sogar trotz einer vorangegangenen, länger andauernden (z. B. 24 Stunden) Wasserlagerung der leichten Gesteinskörnung auftreten. Abhilfe bieten speziell abgestimmte, sehr fließfähige Rezepturen. Eine Eignungsprüfung einschließlich eines Pumpversuchs ist bei Pumpbaustellen immer zu empfehlen.

Selbst wenn das Pumpen von Leichtbeton gelungen ist, kann es sich negativ auf die Festbetonqualität ausgewirkt haben (Bild 12). Ursächlich verantwortlich ist wieder das beim Pumpen in die Poren der leichten Gesteinskörnung gedrückte Wasser. Es wird nach dem Entspannen durch die im Korn eingeschlossene und zunächst komprimierte Luft herausgedrückt. Um das Korn bildet sich ein Wassersaum, der nach dem Erhärten als poröser Ring erhalten bleibt. Einen vergleichbaren Effekt kann auftreten, wenn der Leichtbeton auf der Baustelle vor der Übergabe nicht erneut aufgemischt wird (Bild 13).

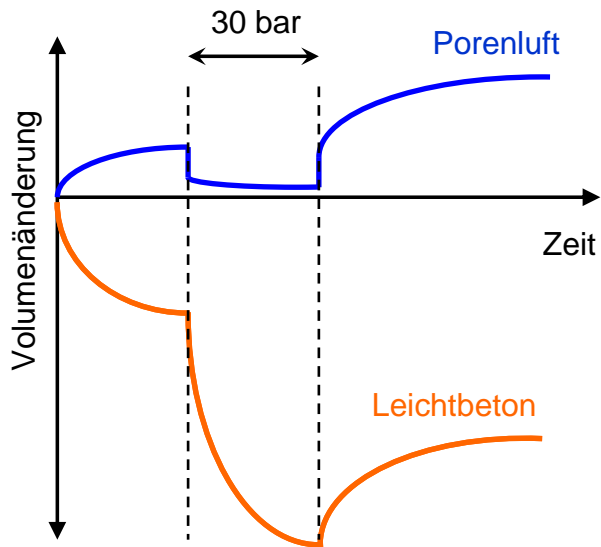


Bild 11: Volumenänderungen während des Pumpens von Leichtbeton [Lit 7]

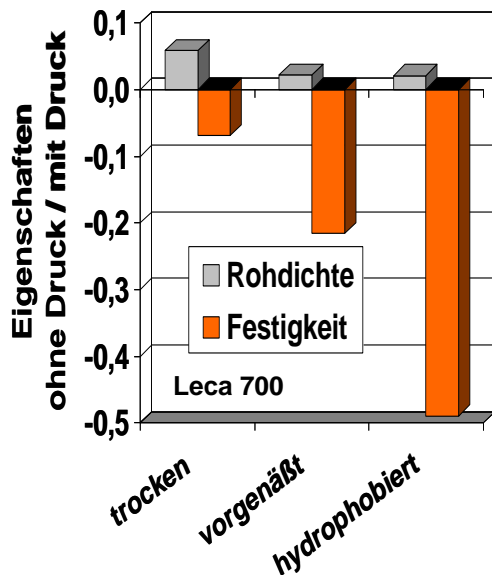


Bild 12: Auswirkung des Pumpens auf Festigkeit und Rohdichte von Leichtbeton [Lit 10]

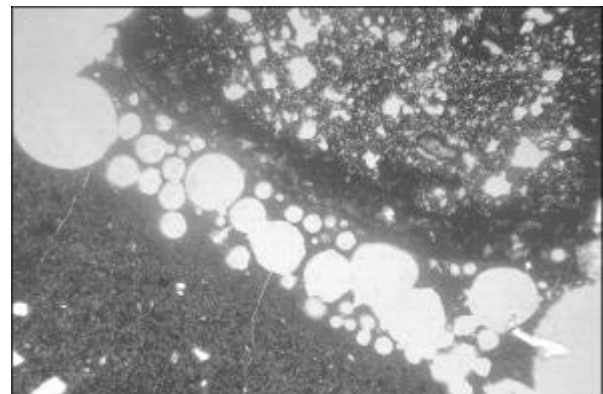


Bild 13: Luftporen in der Verbundzone von Leichtbeton [Lit 6]

2.1.7 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 Rohdichte abgeschätzt werden: Bei halber Betonrohichte ist der Wirkradius nur etwa halb so groß. Die Unterschiede beim Verdichten von Leicht- und Normalbeton beruhen auf der geringeren schwingenden Masse der leichten Gesteinskörnung und der damit verbundenen höheren 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 eine stabil aufgebaute Mörtelmatrix oder die Zugabe von Stabilisatoren verhindert. Zugleich wird die Verarbeitbarkeit verbessert.

2.1.8 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 (Bild 14), weil seine Wärmekapazität und seine Wärmeleitfähigkeit geringer sind. 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.

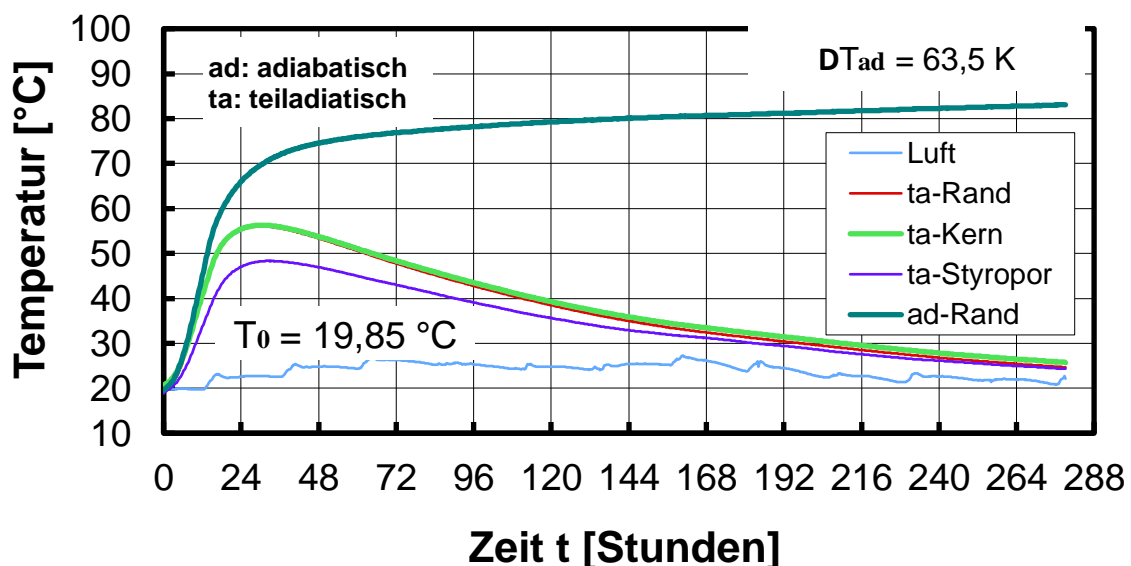


Bild 14: Entwicklung der Temperatur infolge Hydratation eines LC20/22 D1,3 in einer Styroporschalung

2.2 Gefüge

Die Gefügequalität eines Leichtbetons unterscheidet sich von Normalbeton. Letzterer stellt ein 3-Phasen-System aus Körnung, Matrix und der Verbundzone rund um die Körnung dar. Im Gegensatz dazu gibt es bei Leichtbeton bei richtiger Zusammensetzung keine Verbundzone (Bild 15). Ursächlich sind hierfür vier Mechanismen:

1. Die leichte Gesteinskörnung nimmt während des Mischens Wasser auf. Zusammen mit dem Anmachwasser gelangen Teile des Bindemittels in das poröse Korn. Die Hydratationsprodukte der Bindemittel wachsen also nicht nur auf das Korn von außen auf, sondern in begrenztem Umfang auch im und aus dem Korn heraus. Die dadurch erzielte Steigerung der Festigkeit des Kornes ist mit einem Anstieg der Rohdichte und einem Bindemittelverlust in der Matrix verknüpft. In der Summe liefert der

- Bindemittelintrag ins Korn zwar einen Vorteil, wirtschaftlicher ist es jedoch, das Bindemittel in der Matrix zu halten.
2. Bei einzelnen Blättonen sind außen auf dem Korn reaktive Klinkerphasen wie Gehlenit (C_2AS) zu finden. Diese Körnung kann daher in begrenztem Umfang mit dem Bindemittel reagieren.
 3. Die Kornoberfläche ist rau und porös und gestattet eine sehr gute mechanische Verzahnung.
 4. Das von der leichten Gesteinskörnung aufgenommene Wasser steht im Zuge der Hydratation für eine optimale innere Nachbehandlung zu Verfügung. Diese Eigenschaft wird zum Teil bei hochfesten Normalbetonen gezielt genutzt [Lit 16].

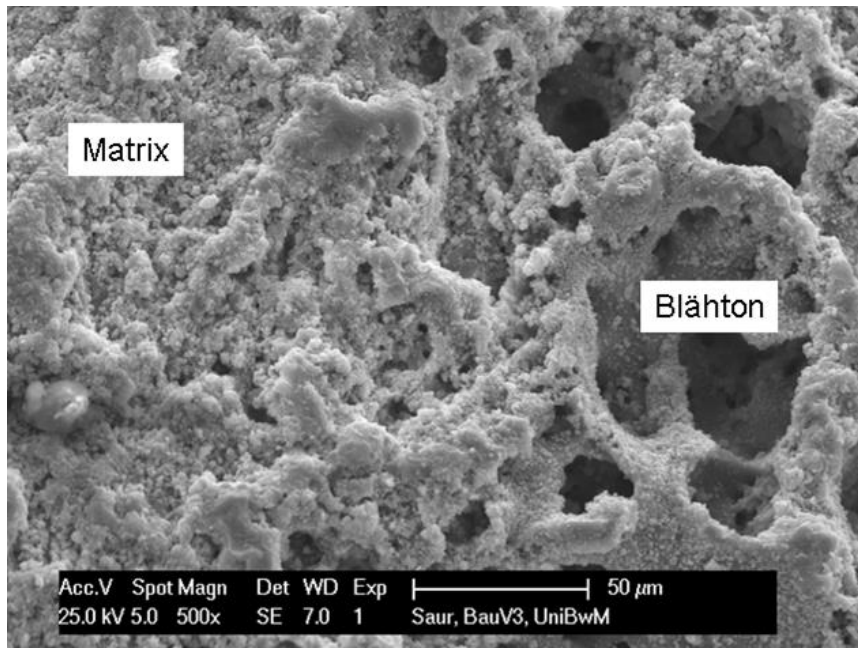


Bild 15: REM-Aufnahme des Übergangs Matrix – Blätton eines Leichtbetons

Das Fehlen einer ausgeprägten Verbundzone wirkt sich auf das Tragverhalten (s. Kapitel 2.3) und die Dauerhaftigkeit (s. Kapitel 2.10) aus. Für die Zusammensetzung und das Mischen des Betons ist es insbesondere beim Einsatz von Silicastaub von Bedeutung. Im Normalbeton soll durch die Zugabe von Silicastaub vor allem die schwache Verbundzone verbessert werden. Daher wird die Silicasuspension beim Mischen direkt nach der Körnung in den Mischer gegeben, um es auf die Oberfläche Gesteinskörnung zu bringen. Beim Leichtbeton würde die Silicasuspension so im Korn verloren gehen. Sie kommt daher erst mit dem restlichen Anmachwasser in die Mischung (s. Kapitel 2.1.4) und soll die Qualität der Matrix verbessern.

2.3 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 beim Leichtbeton zunächst wie beim Normalbeton. Bei einer Druckbelastung 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 Haftbrissen und schließlich zum Bruch (vgl. Bild 16 links).

Mit fortschreitender Erhärtung kann die Steifigkeit und Festigkeit der Matrix diejenige der Gesteinskörnungen übertreffen. In diesem Fall ändert sich der innere Kraftfluss (Bild 16 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.

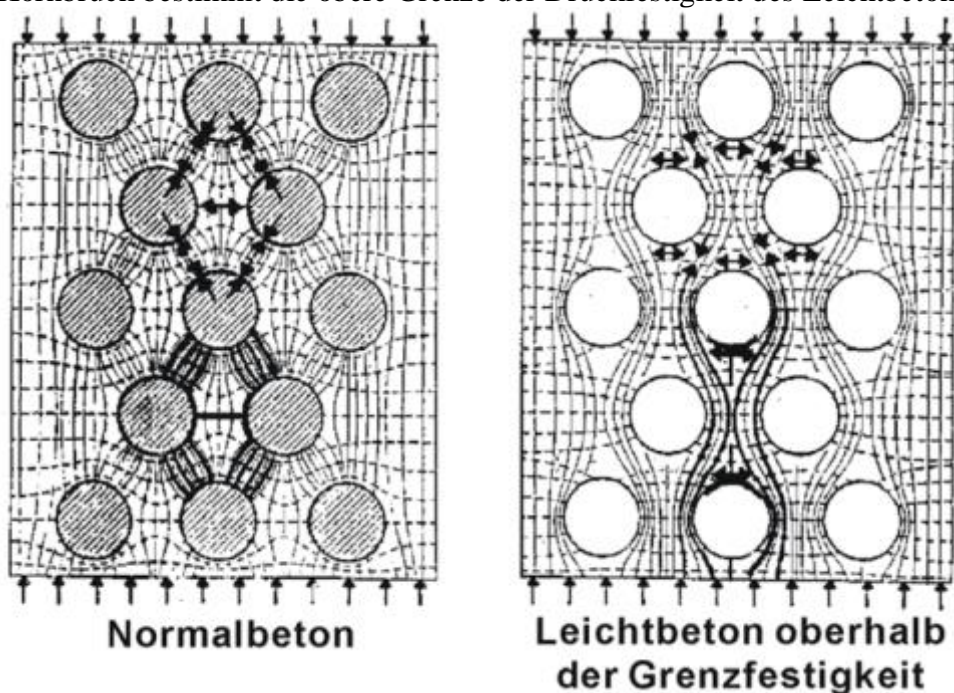


Bild 16: Verlauf der Hauptspannungslinien bei Druckbeanspruchung

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**, erreicht die Festigkeit des Leichtbetons praktisch die Matrixfestigkeit. Darüber nimmt die Leichtbetonfestigkeit bei Steigerung der Matrixfestigkeit unterproportional zu (Bild 17).

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 hängt ab von der verwendeten leichten Gesteinskörnung: Je höher die Festigkeit der leichten Gesteinskörnung ist, desto höher liegt auch die Grenzfestigkeit.

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 Gesteinkorns überschreitet, sodass sich die Körner nicht mehr entsprechend ihrem Volumenanteil an der Kraftübertragung beteiligen.

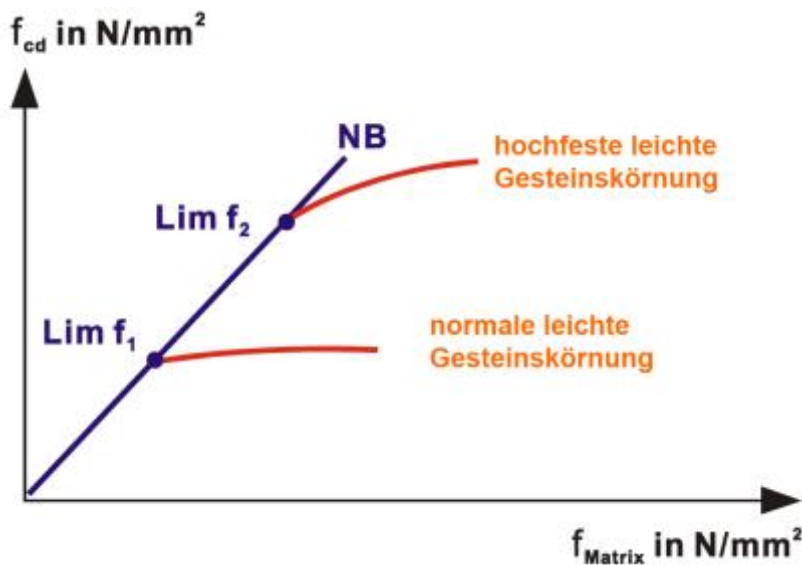


Bild 17: Grenzfestigkeit von Leichtbeton

Bei Festigkeiten unterhalb der Grenzfestigkeit verläuft die Druckfestigkeitsentwicklung während der Erhärtung demnach zunächst nach der Geraden $f_c = f_{matrix}$ und dann deutlich flacher (vgl. Bild 18). Über der Zeit aufgetragen ergibt sich damit der für Normal- und Leichtbeton unterschiedliche Verlauf der Festigkeitsentwicklung. Der rechte Teil von Bild 18 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} in DIN 1045 nicht auf Leichtbeton angewendet werden.

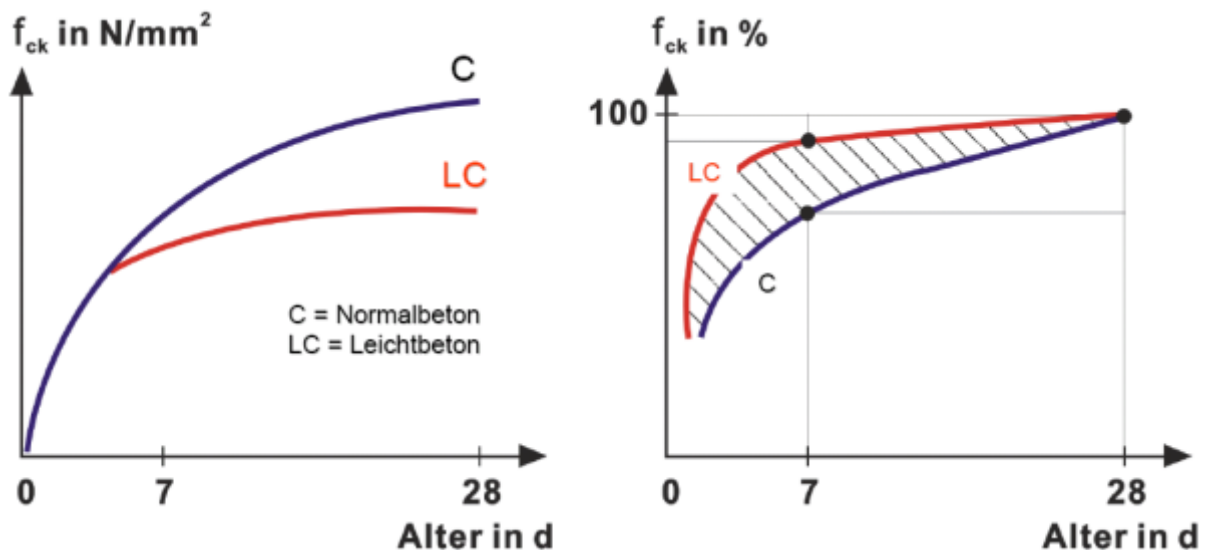


Bild 18: Festigkeitsentwicklung von Normalbeton (C) und Leichtbeton (LC)

2.4 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 1045-1 [Lit 1] wird daher der gefügedichte Leichtbeton in Rohdichteklassen eingeteilt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Klasseneinteilung von Leichtbeton nach der Rohdichte gemäß DIN 1045-1 [Lit 1]

Rohdichteklasse	Grenzen des Mittelwertes der Leichtbeton-Trockenrohichte kg/m^3
D1,0	≥ 800 und ≤ 1000
D1,2	> 1000 und ≤ 1200
D1,4	> 1200 und ≤ 1400
D1,6	> 1400 und ≤ 1600
D1,8	> 1600 und ≤ 1800
D2,0	> 1800 und ≤ 2000

Bild 4 zeigt, dass die Kornporigkeit über die Betonrohichte die maximale Druckfestigkeit beeinflusst, dass aber bei gleicher Betonrohichte ein großer Festigkeitsbereich vorhanden ist. Es ist nicht möglich, für die verschiedensten Leichtbetone Rohdichte- und Festigkeitsklassen beliebig miteinander zu kombinieren (Bild 19).

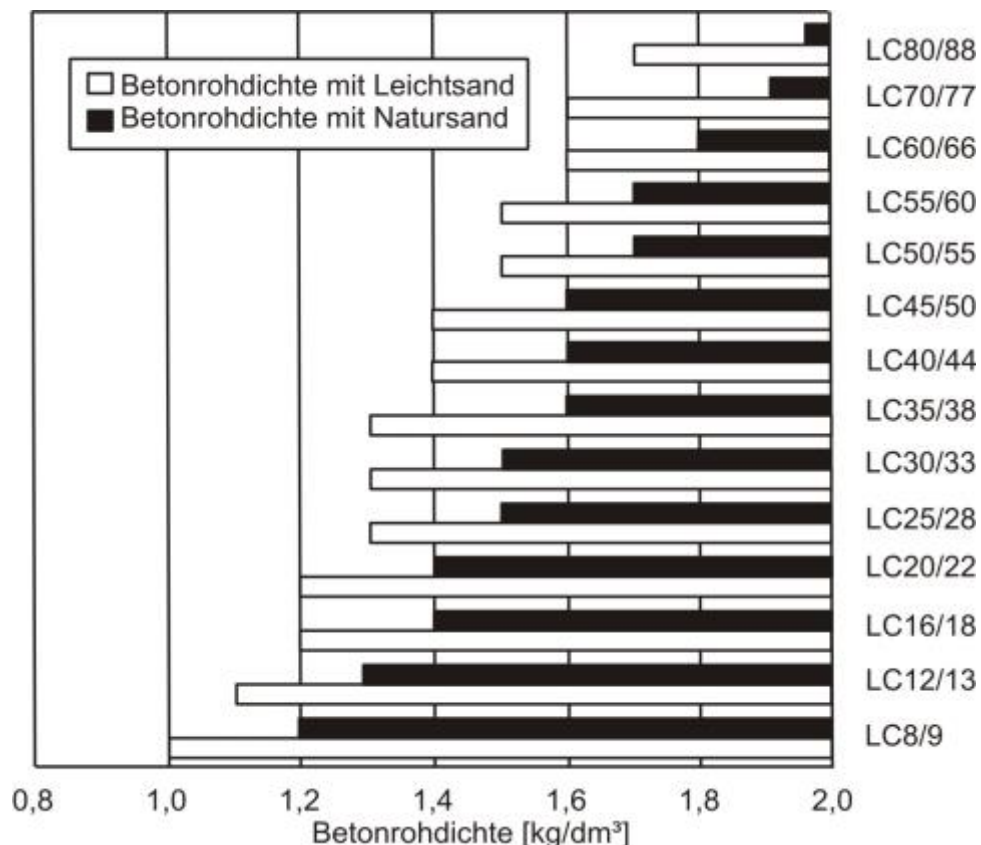


Bild 19: Anhaltswerte für die erforderliche Trockenrohddichte von Leichtbeton zum Erreichen einer Festigkeitsklasse nach DIN 1045 [Lit 13]

Tabelle 4 enthält die Festigkeitsklassen für Leichtbeton nach DIN 1045-1 [Lit 1]. **Maßgebend ist die Zylinderdruckfestigkeit.** Die aus der Bezeichnung der Festigkeitsklassen resultierende Zuordnung von Zylinder- und Würfeldruckfestigkeit ist für Leichtbeton mit Vorsicht zu betrachten (Bild 20)! Aktuelle Untersuchungen deuten darauf hin, dass die für Normalbeton geltende Zuordnung zutreffender ist.

Tabelle 4: Festigkeitsklassen nach DIN 1045-1 [Lit 1]

Festigkeits- klasse	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Zylindern $f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Würfeln $f_{ck,cube}$ [N/mm ²]	Mittlere Druckfestigkeit von Zylindern f_{cm} [N/mm ²]
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

* Zustimmung im Einzelfall oder allgemeine bauaufsichtliche Zulassung

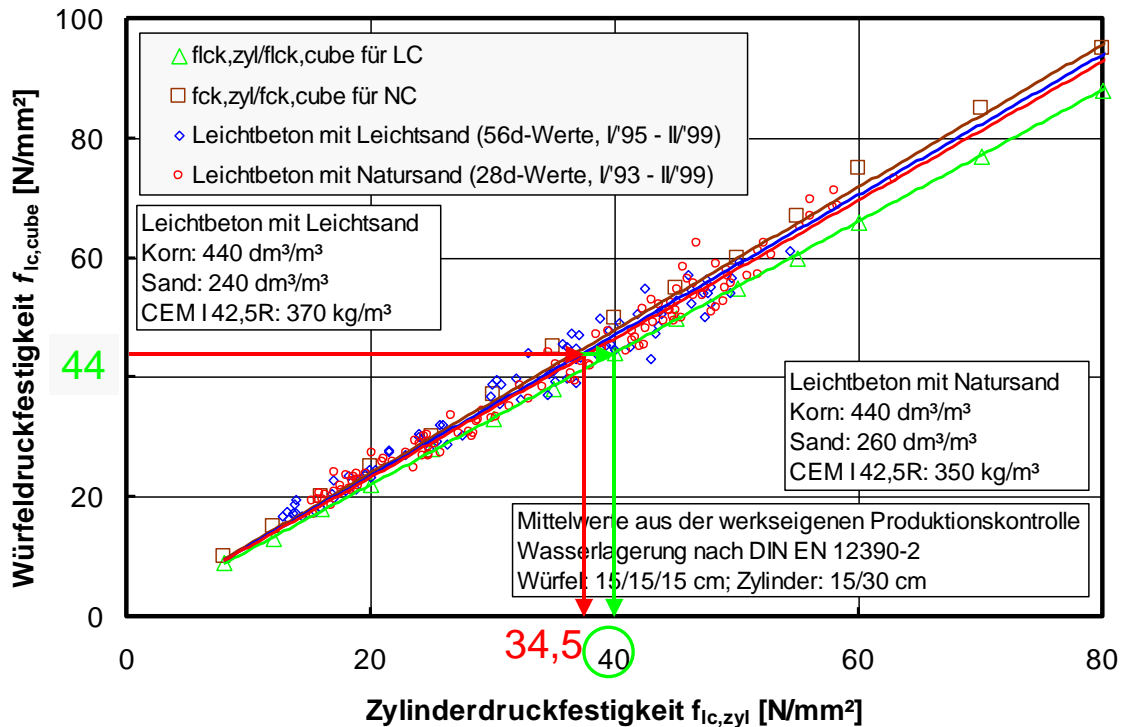


Bild 20: Vergleich der Festigkeitsklassen nach DIN 1045 und DIN EN 206-1 mit Messwerten

2.5 Dauerstandfestigkeit

Das Nacherhärtungspotenzial von Leichtbeton jenseits eines Alters von 28 Tagen ist geringer als bei Normalbeton. Dies macht sich in einer geringeren Dauerstandfestigkeit bemerkbar. Bei einer hohen Belastung werden in der Matrix die Spannungen durch Kriechen auf die Gesteinskörnung umgelagert. Da die Festigkeit der Körnung sich im Laufe der Hydratation nicht ändert, wird das Korn überlastet und es kommt zu Versagen. Dies Verhalten wird in [Lit 1] durch einen Abminderungsfaktor von 0,75 bzw. 0,80 für Leichtbeton im Gegensatz zu 0,85 für Normalbeton berücksichtigt.

2.6 Dauerschwingfestigkeit

Positiv machen sich bei Leichtbeton die geringeren Steifigkeitsunterschiede zwischen Korn und Matrix bei Dauerschwingbeanspruchungen bemerkbar. Dies führt zu geringeren lokalen Spannungen und einer mindestens ebenso hohen Dauerschwingfestigkeit wie Normalbeton [Lit 4], die unter anderem bei Offshore-Konstruktionen unter Beweis gestellt wurde.

2.7 Querdehnverhalten, mehraxiale Festigkeit

Das Tragverhalten des Leichtbetons (Bild 16) führt zu einer geringeren Querdehnung im Druckversuch als bei Normalbeton (siehe auch Kapitel 2.9.1). Dieser Effekt ist besonders ausgeprägt, wenn eine Leichtsandmatrix verwendet wird [Lit 5]. Eine Nebeneffekt der geringeren Querdehnung macht sich bei mehraxialer Belastung bemerkbar. Die Festigkeitssteigungen durch zwei Querdruckbeanspruchung fällt deutlich geringer aus als bei Normalbeton. Dies wird sich auch bei umschnürten Bauteilen oder Teilflächenbelastung aus. Der Erhöhungsfaktor beträgt bei Teilflächenbelastung nur $\sqrt[3]{A/A_1}$ [Lit 1].

2.8 Zugfestigkeit

2.8.1 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. 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.

2.8.1.1 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. Die niedrigere Spaltzugfestigkeit muss dort, wo konzentrierte Lasten eingeleitet werden, durch zusätzliche Spaltzugbewehrung kompensiert werden.

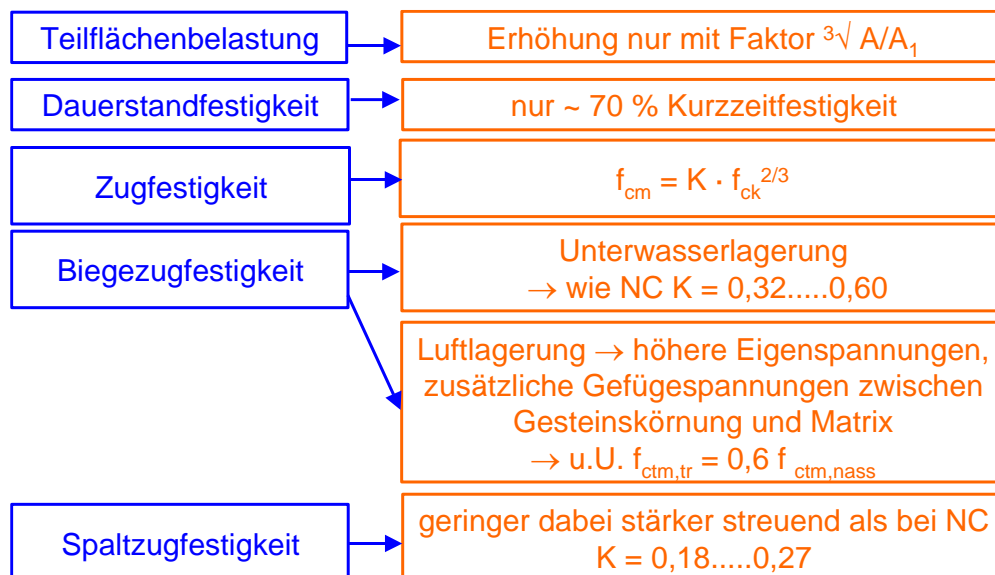


Bild 21: Besondere Beanspruchung und Zugfestigkeit von Leichtbeton

2.9 Formänderungen

2.9.1 Spannungsdehnungslinie

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

Bei Normalbeton bilden sich bereits bei verhältnismäßig niedrigen Verhältnissen σ/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.

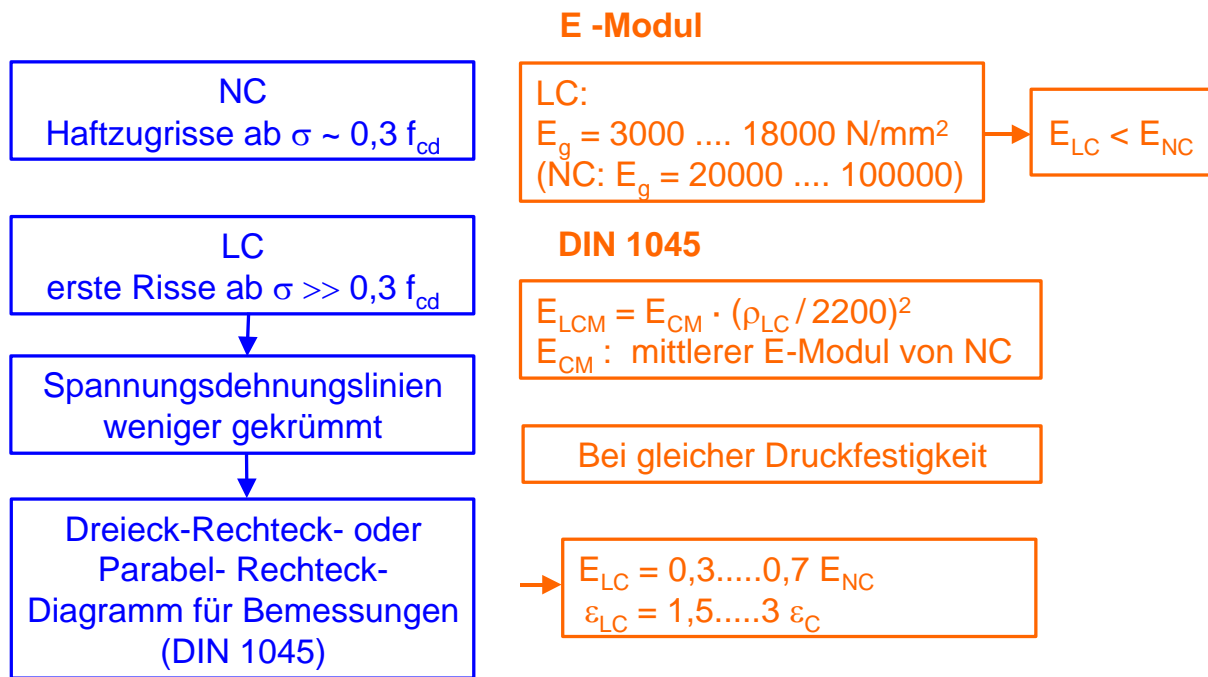


Bild 22: Formänderungen von Leichtbeton

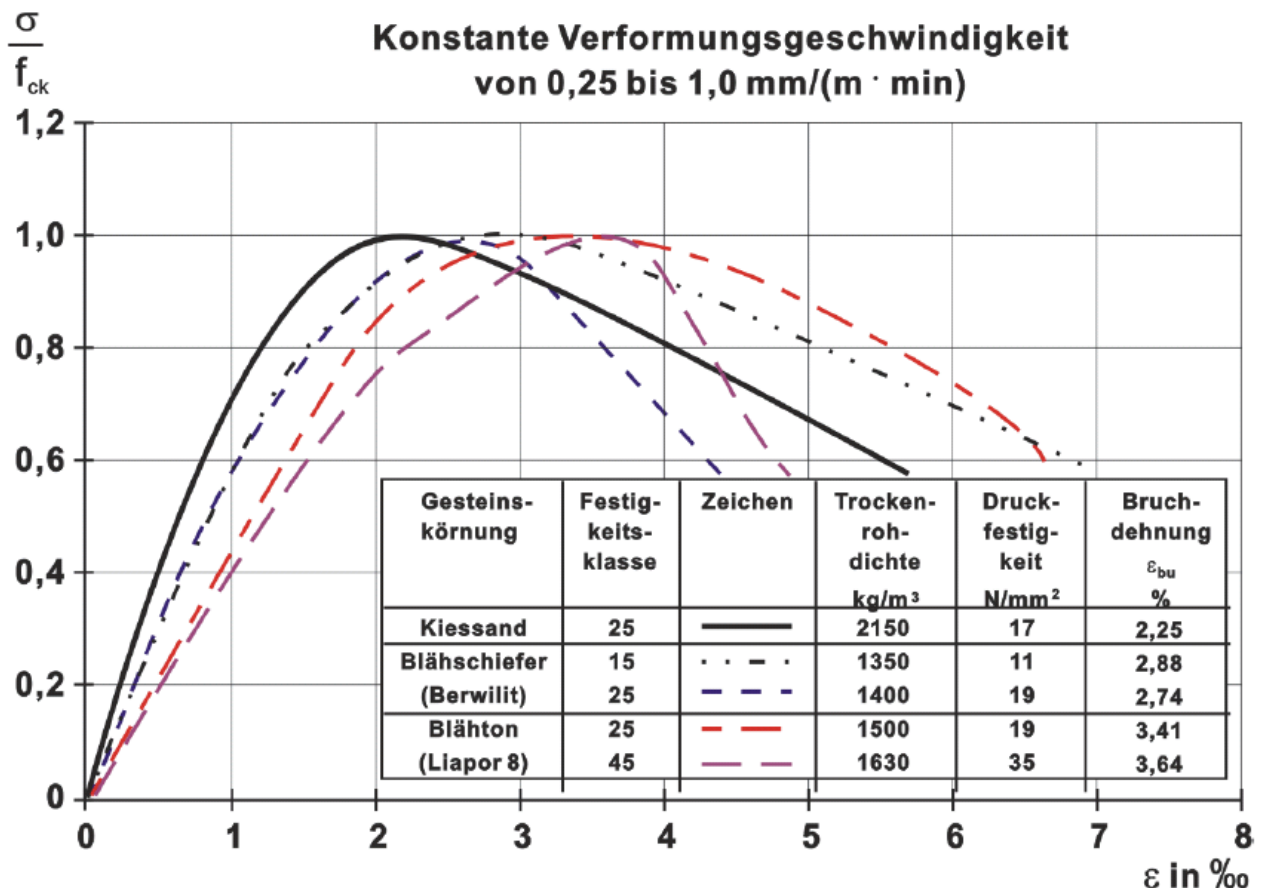


Bild 23: Spannungsdehnungslinien für verschiedene Leichtbetone und für Normalbeton [Lit 9]

Bei Leichtbeton bilden sich dagegen erst bei höheren Verhältnissen σ/f_{cd} die ersten Risse und zwar in Lastrichtung, aber in der Zugzone der Matrix oberhalb und unterhalb der Körner (vgl. Bild 16 rechts).

Aus den vorgenannten Gründen rechnet man nach DIN 1045 bei der Ermittlung der Bruchschnittgrößen im Gegensatz zum Normalbeton mit anderen Abminderungsbeiwerten beim Dreieck-Rechteck- und beim Parabel-Rechteck-Diagramm [Lit 1].

2.9.2 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/mm² und erreichen damit nur einen Bruchteil des E-Moduls von normaler Gesteinskörnung. 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/mm². Den Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul und Rohdichte zeigt Bild 24 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.

Der Einfluss der Festigkeit auf den Elastizitätsmodul wird in [Lit 1] wie für Normalbeton berücksichtigt und um den Einfluss der Rohdichte erweitert:

$$E = 9500(f_{lck} + 8)^{1/3} \cdot \eta_E \quad [\text{MPa}]$$

$$\text{mit } \eta_E = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2.$$

Die so gewonnenen Ergebnisse stimmen gut mit den Messwerten überein, geben allerdings angesichts der großen Unterschiede in der Steifigkeit der verschiedenen leichten Gesteinskörnungen nur einen mittleren Zusammenhang wieder [Lit 5].

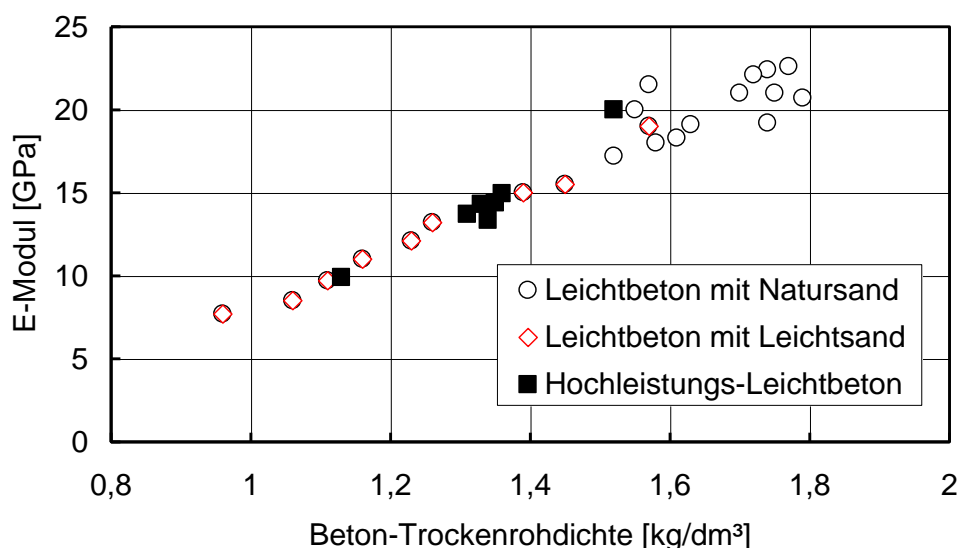


Bild 24: Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul und Rohdichte [Lit 11]

2.9.3 Kriechen

Das Kriechen hängt überwiegend vom Volumen des kriechenden Zementsteins ab. Für Leichtbeton gilt der Ansatz der DIN 1045 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 ε_k als Normalbeton. Die Kriechzahl steigt hingegen nur begrenzt an (0 % bis 30 %), weil die elastischen Dehnungen von Leichtbeton wesentlich größer sind.

2.9.4 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 1045 die Grundswindmaße (Normalbeton) für Leichtbeton bis zur Festigkeitsklasse LC16/18 um 50 %, ab LC20/22 um 20 % zu erhöhen.

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

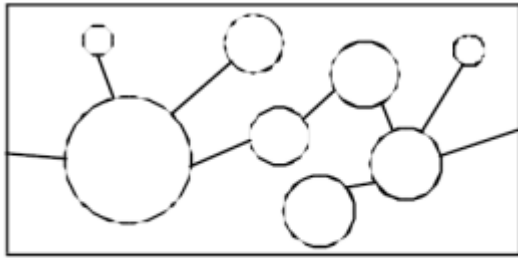
2.9.5 Wärmedehnung

Der Wärmedehnungskoeffizient α von Blähschiefer und Blähton ist mit 4 bis $6 \cdot 10^{-6}/K$ sehr niedrig. Der Wärmedehnungskoeffizient damit hergestellter Leichtbetone 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 rund $2,0 \cdot 10^{-6}$ kleiner als bei Normalbeton.

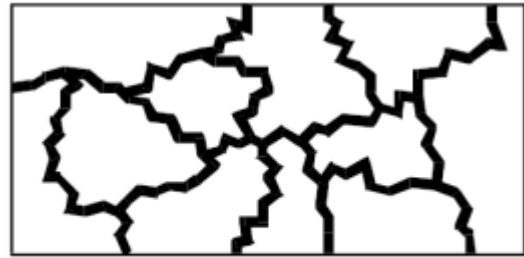
Wegen der guten Wärmedämmung kann im Hochbau bei Leichtbetonbauten ggf. auf besondere Dämmschichten verzichtet werden. Weitere Vorteile durch die niedrige Wärmeleitfähigkeit sind bei der Dampfbehandlung, beim Winterbau und im Brandfall zu verzeichnen. Andererseits tritt bei starker Wärmestrahlung (z.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

2.10 Dauerhaftigkeit

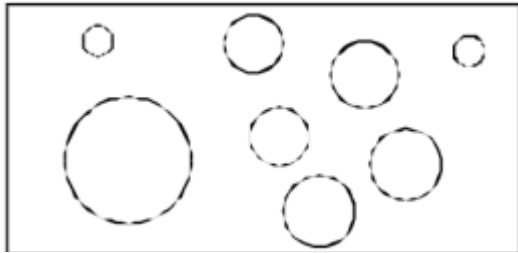
Gefügedichter Leichtbeton enthält in der eingesetzten leichten Gesteinskörnung viele Poren. Diese Porosität ist allerdings nicht gleichbedeutend mit Permeabilität (Bild 25). Leichtbeton ist wegen seiner guten inneren Nachbehandlung mindestens ebenso dauerhaft wie ein entsprechend zusammengesetzter Normalbeton. 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. Eine Einstufung in Expositionsklassen kann nur über den effektiven w/z-Wert und den Zementgehalt erfolgen.



a. hohe Porosität / niedrige Permeabilität



b. mittlere Porosität / hohe Permeabilität



c. hohe Porosität / keine Permeabilität



d. geringe Porosität / hohe Permeabilität

Bild 25: Schematische Unterscheidung zwischen porösen und permeablen Porensystemen [Lit 4]

Leichtbetonspezifische Probleme mit der Dauerhaftigkeit sind nicht bekannt.

2.11 Selbstverdichtender Leichtbeton

Selbstverdichtender Leichtbeton ist in Deutschland nicht geregelt. Es gab drei inhaltlich übereinstimmende Zulassungen für LC30/33 D1,3, LC30/33 D1,4 und LC35/38 D1,6 die jedoch wegen der darin enthaltenen zahlreichen Auflagen den Einsatz unwirtschaftlich werden ließen. Die Gültigkeit dieser Zulassungen ist inzwischen ausgelaufen. Eine Aufnahme in die Richtlinie „Selbstverdichtender Beton“ wurde wegen fehlender Erfahrungen mit selbstverdichtenden Leichtbetonen abgelehnt.

Selbstverdichtender Leichtbeton erfordert einen hohen Mehlkorngesamtgehalt. Die Zugabe eines Stabilisierers ist nicht unbedingt erforderlich.

Die bisher vorliegenden Erkenntnisse zeigen, dass selbstverdichtende Leichtbetone zielsicher hergestellt werden können. Dies gilt insbesondere dann, wenn Leichtsand verwendet wird. Dadurch werden zum einen die Rohdichteunterschiede zwischen den Bestandteilen des Leichtbetons verringert und damit die Entmischungsneigung minimiert. Zum anderen puffert der Leichtsand Unterschiede im Wassergehalt ab und erhöht so die Robustheit des Selbstverdichtenden Leichtbetons. Die mechanischen Eigenschaften selbstverdichtender Leichtbetone stimmen mit denen konventioneller Leichtbetone überein [Lit 8].

Tabelle 5: Exemplarische Zusammensetzung Selbstverdichtender Leichtbetone [Lit 8]

	LC30/33 D1,3			LC35/38 D1,6		
	Stoff- raum	Roh- dichte	Massen trocken	Stoffraum	Roh- dichte	Massen trocken
	[dm ³ /m ³]	[kg/dm ³]	[kg/m ³]	[dm ³ /m ³]	[kg/dm ³]	[kg/m ³]
Liapor K-Sand 0/2 ¹⁾	257	1,22	314			
Natursand 0/2 mm				211	2,62	554
Liapor F6.5 2/10 mm ²⁾	336	1,19	400	378	1,19	450
Flugasche SAFAMENT	95	2,32	220	96	2,32	223
CEM II/A-LL 42,5 R	109	3,03	330	111	3,03	337
Zugabewasser	164	1,00	164	188	1,00	188
Restporen	40			16		
Summe	1000		1428	1000		1752
Stabilisierer			1,3			1,0
Fließmittel			6,5			3,4

1) Vornässgrad 20 M.-%; 2) Vornässgrad 15 M.-%

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 links unten). 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 1045 und der DIN EN 206-1 existiert nicht. Als Bezug kann DIN EN 1520 [Lit 3] genutzt werden. Es gibt keine eindeutige Definition, ab welchem Porenvolumen ein Beton als „haufwerksporig“ gilt. Als Anhalt kann ein planmäßiges Porenvolumen von etwa 4 % angenommen werden, was nicht durch Zugabe von Luftporenbildner (LP-Beton) erzeugt wird. Letztlich muss die Entscheidung auf Basis der Stoffraumrechnung getroffen werden.

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

Haufwerksporiger Leichtbeton mit leichter Gesteinskörnung wird in großem Umfang zur Herstellung von Vollsteinen (VBI, V) und Hohlblöcken (HBI), für tragende und wärmedämmende Wandelemente (DIN EN 1520 [Lit 3]) sowie für leichte Dränbetone und wegen der erhöhten Schallabsorption für Lärmschutzwände 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 etwas mehr als 1000 l lose Körnung je m³ haufwerksporigen Betons eingesetzt. Die Sandfraktion vergrößert das Zementleimvolumen und damit die Kontaktflächen zwischen den Körnern (Bild 26 links). Dies beeinflusst die Festigkeit. Als Anhaltswert kann von etwa 200 l losem Leichtsand je m³ haufwerksporigem Leichtbetons ausgegangen werden. Durch den Zementleim und den (Leicht)Sand kann sich das Volumen geringfügig vergrößern (Sperrkorn) oder verringern (Schlupfkorn und verringerte Reibung). Der verbleibende Haufwerksporenraum des verdichteten Betons hängt von der gewählten Sieblinie ab und lässt sich daraus grob abschätzen.

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 Luftporenbildenden 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 rechts oben und Bild 26 rechts). Diese Kugelporen erzeugt das Zusatzmittel. Durch den Einsatz des Zusatzmittels kann in der Betonrezeptur ggf. auf Leichtsand verzichtet werden. Die Reibung zwischen den leichten Gesteinskörnern wird durch den porosierten Zementleim im Vergleich zum normalen Zementleim verringert. Dadurch wird die Packungsdichte der groben leichten Gesteinskörnung erhöht. Es wird daher mehr Material je m³ benötigt. Zugleich werden die

mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum normalen haufwerksporigen Leichtbeton verbessert, ohne die Rohdichte und damit die wärmetechnischen Eigenschaften zu verändern [Lit 12].

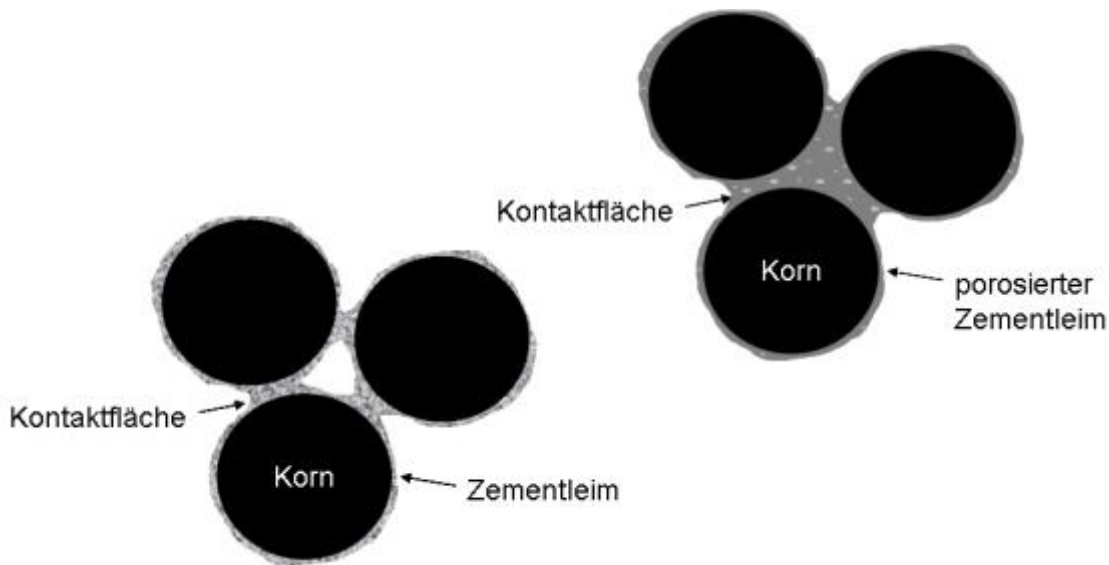


Bild 26: Punktuelle Kontaktflächen zwischen Gesteinskörnern im haufwerksporigen Leichtbeton (links mit Leichtsand, rechts mit porosierter Matrix)

Während es für gefügedichten Leichtbeton noch vergleichsweise leicht ist, die Festigkeit vorherzusagen, beruht der Entwurf eines haufwerksporigen Leichtbetons noch in erheblich größerem Maße auf Erfahrung. Wenn keine eigenen Erfahrungen vorliegen, empfiehlt es sich daher, die gewünschten Parameter dem Hersteller der leichten Gesteinskörnung mitzuteilen und von dort eine Rezepturempfehlung als Basis für die Anpassung an die eigene Anlage und die weitere Optimierung zu erhalten.

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 Verarbeitung und Einsatzgebiete

Haufwerksporiger Leichtbeton kann nicht wie Ortbeton mit Innenrüttlern verdichtet werden. In der Betonsteinproduktion erfolgt die Verdichtung über Vibropressen. Fertigteilwerke müssen über eine Verdichtungswalze verfügen, weil ein Verdichten mit den Schalungsrüttlern unter den Tischen nicht möglich ist. Da Verdichtungswalzen nicht zur Standardausstattung gehören, tun sich viele Fertigteilwerke schwer mit dem Einsatz haufwerksporiger Leichtbetone.

Durch eine porosierte Matrix werden die Frischbetoneigenschaften des haufwerksporigen Leichtbetons gravierend verändert. Haufwerksporiger Leichtbeton mit porosierter Matrix lässt sich mit den üblichen Verdichtungsgeräten (Innen – oder Außenrüttler) verdichten. Durch diese Maßnahme wird das Einsatzfeld der haufwerksporigen Leichtbetone deutlich erweitert. Sie können sowohl in jedem Fertigteilwerk verarbeitet werden, als auch auf Baustellen als Ortbeton verarbeitet werden [Lit 13].

Für den Baustelleneinsatz als Ortbeton gibt es in Deutschland bisher keine Regelung. Haufwerksporiger Leichtbeton darf daher als Ortbeton nur wie eine gebundene Schüttung eingesetzt werden.

3.5 Festigkeit und Rohdichte

Die Druckfestigkeit von LAC kann nach DIN EN 1520 [Lit 3] vom Hersteller entweder als deklarierte charakteristische Druckfestigkeit oder als deklarierte Festigkeitsklasse angegeben werden (Tabelle 6). Die Norm gestattet eine statistische Auswertung der Ergebnisse. Die in enthaltenen DIN EN 1520 K_n -Werte liegen zwischen $K_n = 1,87$ ($n = 6$) und $K_n = 1,48$ ($n \geq 15$). Referenzprobekörper für die Druckfestigkeit sind Bohrkern mit einer ihrem Durchmesser entsprechenden Länge oder Würfel, die aus den vorgefertigten Elementen entnommen werden.

Tabelle 6: Festigkeitsklassen und -anforderungen für LAC nach DIN EN 1520 [Lit 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
$f_{c,3}$ ^a [MPa]	≥ 4	≥ 7	≥ 9	≥ 11	≥ 13	≥ 15	≥ 18	≥ 24	≥ 29
$f_{c,n}$ ^b	$\geq f_{ck} + K_n \times s_n$ ^d								
f_{cmin} ^c für $n < 6$	$\geq 1,5$	$\geq 3,5$	$\geq 5,5$	$\geq 7,0$	$\geq 9,0$	≥ 11	≥ 14	≥ 19	≥ 24
f_{cmin} ^c für $6 \leq n \leq 9$	$\geq 1,5$	$\geq 3,0$	$\geq 4,5$	$\geq 6,0$	$\geq 7,5$	$\geq 9,0$	≥ 12	≥ 17	≥ 22
f_{cmin} ^c für $n \geq 10$	$\geq 1,5$	$\geq 3,0$	$\geq 4,0$	$\geq 5,5$	$\geq 7,0$	$\geq 8,0$	≥ 11	≥ 16	≥ 21
^a Geforderte Mindestdruckfestigkeit jedes Prüfsatzes von drei aufeinander folgenden Probekörpern.									
^b 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.									
^c Kleinster Einzelwert der Druckfestigkeit einer Prüfserie von n Probekörpern.									
^d 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 7).

Tabelle 7: Rohdichteklassen für LAC nach DIN EN 1520

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 [kg/m ³]	≥ 400	> 500	> 600	> 700	> 800	> 900	> 1000	> 1200	> 1400	> 1600	> 1800
	≤ 500	≤ 600	≤ 700	≤ 800	≤ 900	≤ 1000	≤ 1200	≤ 1400	≤ 1600	≤ 1800	≤ 2000

3.6 Zugfestigkeit

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

$$f_{t,flk} = 0,42 f_{ck}^{2/3} \cdot \eta_1$$

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6(\rho / 2200) \quad \text{für } \rho > 1400 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_1 = 0,78 \quad \text{für } \rho \leq 1400 \text{ kg/m}^3$$

Dabei ist

$f_{t, flk}$ die charakteristische Biegezugfestigkeit von LAC [MPa];

ρ der Mittelwert der Trockenrohddichte von LAC [kg/m^3];

f_{ck} die charakteristische Druckfestigkeit von LAC (s. Kapitel 3.5) [MPa].

3.7 Formänderung

Für die Bemessung des LAC wird eine idealisierte bilineare Spannungsdehnungslinie angenommen. Mit geringen Abweichungen trifft diese Idealisierung zu (Bild 27).

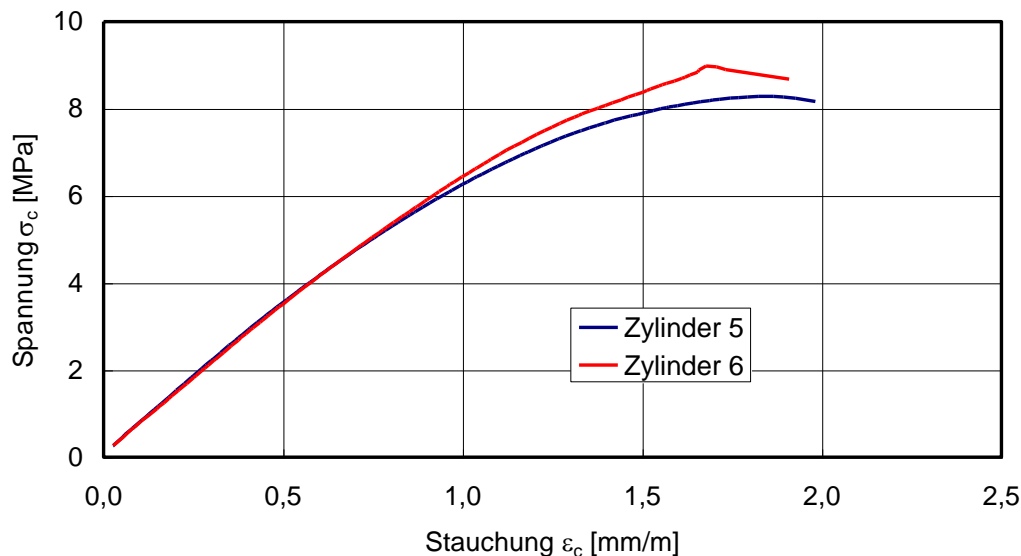


Bild 27: Spannungsdehnungslinien von haufwerksporigem Leichtbeton [Lit 14]

3.8 Elastizitätsmodul

Die Werte des Elastizitätsmoduls liegen je nach Gesteinskörnungsart, Druckfestigkeit und Rohddichte des LAC zwischen 2000 und 25000 N/mm^2 . Diese Werte werden nach DIN EN 1520 aus der Festigkeit abgeschätzt:

$$E_{cm} = 10000 f_{ck}^{1/3} \cdot \eta_2$$

mit

E_{cm} der Mittelwert des Elastizitätsmoduls [MPa];

f_{ck} die charakteristische Druckfestigkeit nach [MPa];

$$\eta_2 = (\rho / 2200)^2 \quad \text{für } \rho > 1400 \text{ kg/m}^3$$

$$\eta_2 = 0,64 (\rho / 2200) \quad \text{für } \rho \leq 1400 \text{ kg/m}^3$$

3.9 Dauerhaftigkeit

Tragende Bewehrung muss im haufwerksporigen Leichtbeton gegen Korrosion geschützt werden (Verzinkung, Einbetten in gefügedichten Beton, Beschichtung). Dabei ist zu beachten,

dass eine Verzinkung im hoch alkalischen Milieu ($pH > 12$) einen deutlichen Korrosionsabtrag erfährt.

Haufwerksporiger Leichtbeton kann problemlos einer freien Bewitterung ausgesetzt werden. Lärmschutzelemente an Straßen sind dabei zum Teil einer Beanspruchung entsprechend der Expositionsklasse XF4 ausgesetzt. Elemente aus haufwerksporigem Leichtbeton widerstehen auch als horizontale Schallabsorber auf der festen Fahrbahn der Bahn problemlos den Beanspruchungen.

Im Wohnungsbau werden Elemente (Fertigteile oder Mauerblöcke) in der Regel verputzt oder bekleidet (Vorsatzschale).

4 Literatur

- Lit 1: DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Deutsches Institut für Normung, 08/2008
- Lit 2: DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Deutsches Institut für Normung, 08/2008
- Lit 3: DIN EN 1520: Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton. Deutsche Fassung EN 1520:2002 + AC:2003, 07/2003
- Lit 4: EuroLightCon: LWAC Material Properties. State-of-the-Art. Document BE96-3942/R2, December 1998
- Lit 5: Faust, T.: Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau. Verlag Ernst & Sohn, 2003
- Lit 6: Helland, S.; Maage, M.: Strength Loss in Un-remixed LWA-Concrete. In: Proceedings: International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, pp. 533 – 540, Sandefjord, Norway, 1995
- Lit 7: Norden, G.; Thienel, K.-Ch.: Pumping of Lightweight Concrete Based on Expanded Clay in Europe. In: Proceedings: Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, pp. 823 – 832, Kristiansand, Norway, 2000
- Lit 8: MPA Karlsruhe: Prüfbericht Nr. 03 24 69 0279, 2003
- Lit 9: Schießl, P.: Beton. Vorlesungsskript zur Grundvorlesung in Baustoffkunde. Technische Universität München, 2006
- Lit 10: Smeplass, S.: Moisture in Lightweight Aggregates – Practical Consequences for the Production Properties of Lightweight Aggregate Concrete. In: Proceedings: Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, pp. 844 – 854, Kristiansand, Norway, 2000
- Lit 11: Thienel, K.-Ch.: Materialtechnologische Eigenschaften der Leichtbetone aus Blähton. Festschrift Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy, S. 203-210, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1997
- Lit 12: Thienel, K.-Ch.: Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit porosierter Matrix. Betonwerk + Fertigteiltechnik, Vol. 60, Nr. 1, S. 62-72, 2000
- Lit 13: Thienel, K.-Ch.: Besonderheiten bei Leichtbeton in DIN FB 100. In: „Erläuterungen zu den Normen DIN EN 206-1, DIN 1045-2, DIN 1045-3, DIN 1045-4 und DIN 4226“. DAfStb Heft 526, S. 68 – 71, Beuth Verlag, 2003
- Lit 14: Thienel, K.-Ch.; Müller, A.: Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232. Bauforschungsbericht F 3087, Fraunhofer IRB-Verlag, 2005
- Lit 15: Thienel, K.-Ch.: Heavy Lifter – Konstruktion und Bautechnik. Vortrag VDB-Fachtagung, Leipzig, 2010
- Lit 16: Weber, S.; Reinhardt, H.-W.: A Blend of Aggregates to Support Curing of Concrete. In: Proceedings: International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, pp. 662 – 671, Sandefjord, Norway, 1995
- Lit 17: Weigler, H. und Karl, S., „Stahlleichtbeton - Herstellung, Anwendung, Ausführung“ Bauverlag, 1972

