

**Vergleich der Festlegungen für die
Eigenschaften des Leichtbetons in
DIN EN 1520 mit den Regelungen in
DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1**

T 3087

T 3087

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6926-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de



UNIVERSITÄT
DER BUNDESWEHR
MÜNCHEN

FAKULTÄT FÜR BAUINGENIEUR-
UND VERMESSUNGSWESEN

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

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

**Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des
Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN
4028, DIN 4232 und DIN 1045-1**

**Gutachten im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin
August 2005**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
1.1	Hintergrund	4
1.2	Allgemeines	4
2	Rohdichte	8
2.1	Angaben zur Rohdichte in den Normen	8
2.2	Vergleich der Angaben zur Rohdichte in DIN EN 1520 mit den anderen Normen	10
3	Druckfestigkeit	11
3.1	Angaben zur Druckfestigkeit in den Normen	11
3.2	Vergleich der Angaben zur Druckfestigkeit in DIN EN 1520 mit den anderen Normen	16
3.3	Vergleich der Angaben zur Druckfestigkeit in DIN EN 1520 mit Messwerten	17
4	Biegezugfestigkeit	22
4.1	Angaben zur Biegezugfestigkeit in den Normen	22
4.2	Vergleich der Angaben zur Biegezugfestigkeit in DIN EN 1520 mit denen in DIN 1045-1	23
4.3	Vergleich der Angaben zur Biegezugfestigkeit in DIN EN 1520 mit Messwerten	27
5	Spannungsdehnungslinie	30
5.1	Angaben zur Spannungsdehnungslinie in den Normen	30
5.2	Vergleich der Angaben zur Spannungsdehnungslinie in DIN EN 1520 mit denen in den anderen Normen	33
5.3	Vergleich der Angaben zur Spannungsdehnungslinie in DIN EN 1520 mit Messwerten	33
6	Elastizitätsmodul	35
6.1	Angaben zum Elastizitätsmodul in den Normen	35

6.2	Vergleich der Angaben zur Druckfestigkeit in DIN EN 1520 mit den anderen Normen	36
6.3	Vergleich der Angaben zum Elastizitätsmodul in DIN EN 1520 mit Messwerten	39
7	Querdehnzahl	42
7.1	Angaben zur Querdehnzahl in den Normen	42
8	Wärmedehnzahl	43
8.1	Angaben zur Wärmedehnzahl in den Normen	43
9	Trocknungsschwinden	44
9.1	Angaben zum Trocknungsschwinden in den Normen	44
9.2	Vergleich der Angaben zum Schwinden in DIN EN 1520 mit denen in DIN 1045-1	46
9.3	Vergleich der Angaben zum Schwinden in DIN EN 1520 mit Messwerten	47
10	Kriechen	49
10.1	Angaben zum Kriechen in den Normen	49
10.2	Vergleich der Angaben zum Kriechen in DIN EN 1520 mit denen in DIN 1045-1	52
10.3	Vergleich der Angaben zum Kriechen in DIN EN 1520 mit Messwerten	52
11	Zusammenfassung	54
12	Danksagung	56
13	Zitierte Normen	57
14	Literatur	59
15	Anhang	60
15.1	Betonrezeptur UniBw	60
15.2	Festbetondaten	60

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Mit der Einführung der DIN EN 1520 wird der mögliche Anwendungsbereich des haufwerksporigen Leichtbetons gegenüber den bisher geltenden Vorschriften in DIN 4028 und DIN 4232 deutlich ausgeweitet. Dies gilt sowohl für die technischen Einsatzgebiete, als auch für die Möglichkeit, haufwerksporigen Leichtbeton bis zu einer Festigkeitsklasse LAC 25 zu fertigen. In Deutschland liegen großtechnische Erfahrungen bisher nur bis zu Festigkeitswerten vor, die etwa der Festigkeitsklasse LAC 12 entsprechen. Für höhere Festigkeitsanforderungen wird gefügedichter Leichtbeton nach DIN 1045-1 eingesetzt.

Als weitere Neuerung kommen beim Nachweis der Festigkeitswerte des haufwerksporigen Leichtbetons neue Prüfvorschriften zur Anwendung, die von den bisher üblichen Regelungen abweichen. Dies gilt insbesondere für die Verlagerung des Referenzprobekörpers für den Festigkeitsnachweis auf Proben, die direkt aus den Elementen entnommen werden, während bisher der Nachweis an separat hergestellten Proben geführt wurde.

Dieses Gutachten soll die Regelungen für die Baustoffe in DIN EN 1520 anhand vorliegender Daten aus der Praxis überprüfen. Weiterhin sind die Vorschriften der DIN EN 1520 mit den entsprechenden Bestimmungen der DIN 1045-1 zu vergleichen.

Für viele Umrechnungen standen nur sehr wenig Daten zur Verfügung. Deshalb wurde für diesen Bericht ein haufwerksporiger Leichtbeton hergestellt, um eine Reihe von Umrechnungen exemplarisch überprüft zu können. Dieser punktuelle Vergleich hat nur orientierenden Charakter.

1.2 Allgemeines

Für die Herstellung von Leichtbetonelementen aus haufwerksporigem Leichtbeton sind zwei grundsätzlich unterschiedliche Verdichtungsverfahren üblich [Lit 6]. Die klassische Methode ist die Verdichtung des haufwerksporigen Leichtbetons mit Rüttelwalzen (Bild 1). Die Struktur des haufwerksporigen Leichtbetons ähnelt bei diesem Herstellverfahren der Betonstruktur, die von Leichtbeton-Mauersteinen bekannt ist (Bild 2 links).

Das Verdichtungsverfahren mit Rüttelwalzen kann an Laborproben nicht ohne weiteres nachgestellt werden. Eine mögliche Alternative für das Labor ist das Verdichten der Laborproben mit gezielt gewählter Auflast.

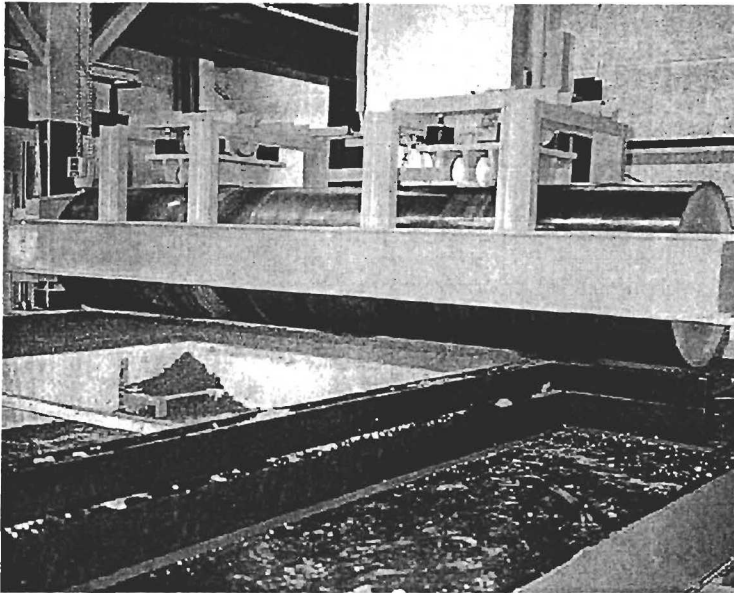


Bild 1: Rüttelwalze [Lit 7]

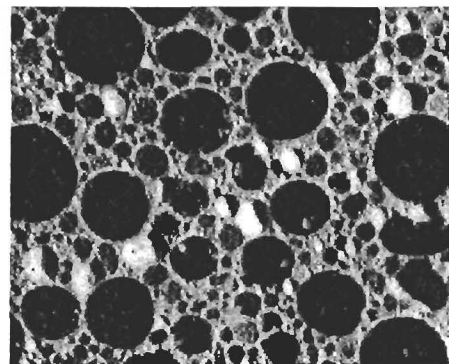
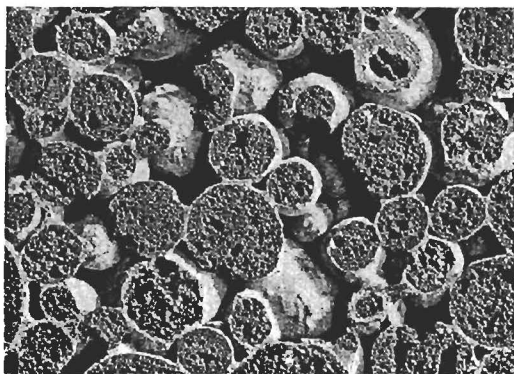


Bild 2: Betonstruktur eines klassisch haufwerksporigen Leichtbetons (links) und eines haufwerksporigen Leichtbetons mit geschäumter Matrix (rechts)

Eine Fortentwicklung der klassisch haufwerksporigen Leichtbetone stellen die haufwerksporigen Leichtbetone mit geschäumter Matrix dar. Die Struktur des haufwerksporigen Leichtbetons mit geschäumter Matrix ähnelt bei oberflächlicher Betrachtung der Betonstruktur von gefügedichtem Leichtbeton. Das Nachrechnen des Stoffraums dieser Betone bestätigt jedoch, dass es sich tatsächlich um haufwerksporige Leichtbetone handelt. Die Gesamtporosität ist allerdings auf viele kleine Kugelporen verteilt und fällt daher nicht sofort ins Auge (Bild 2 rechts).

Haufwerksporige Leichtbetone mit geschäumter Matrix werden seit etwa 15 Jahren hergestellt, weil sie einige Vorteile im Vergleich zum klassisch haufwerksporigen Leichtbeton bieten [Lit 6]. Sie werden in DIN EN 1520 explizit aufgeführt.

Im Gegensatz zur Walzenverdichtung kann für haufwerksporigen Leichtbeton mit geschäumter Matrix die übliche Rüttel- oder Schütteltechnik zum Verdichten der Elemente eingesetzt werden. Diese Art der Verdichtung kann im Labor problemlos nachgestellt werden. Unterschiede zwischen Laborprobe und Element können hinsichtlich des Verdichtungsgrades bestehen.

1.3 Abgrenzung der unterschiedlichen Leichtbetone

Die Unterschiede zwischen klassisch haufwerksporigem Leichtbeton und haufwerksporigem Leichtbeton mit geschäumter Matrix auf der einen Seite und gefügedichten Leichtbeton auf der anderen Seite, werden anhand exemplarischer Stoffraumrechnungen deutlich. Wie aus Tabelle 1 zu ersehen ist, wird durch das bessere Verdichtungsverhalten im Fall der geschäumten Matrix zunächst mehr leichte Gesteinskörnung (4/8 mm) als für den klassisch haufwerksporigen Leichtbeton benötigt. Durch den Einsatz des Betonzusatzmittels entfällt der Leichtsand als Stützkorn in der geschäumten Matrix. Durch die bessere Packung der groben leichten Gesteinskörnung verfügt der haufwerksporige Leichtbeton mit geschäumter Matrix in Summe sogar über einen kleineren Porenraum. Der niedrige Zementgehalt beider Leichtbetone macht zusammen mit dem großen Porenvolumen von etwa 12 bis 16 % einen gesonderten Korrosionsschutz der Bewehrung erforderlich. Der Porenraum entsteht in beiden Fällen durch die Haufwerksporen zwischen den leichten Gesteinskörnungen. Die geschäumte Matrix füllt diese ohnehin vorhandenen Poren lediglich und kreierte keinen neuen Porenraum. In beiden Fällen erfolgt der Lastabtrag primär von Korn zu Korn. Die angeführten Rezepturen liefern beide Leichtbetone etwa der Klasse LAC2 / 0,7.

Tabelle 1: Exemplarische Zusammensetzungen von klassisch haufwerksporigem Leichtbeton und haufwerksporigem Leichtbeton mit geschäumter Matrix

Material	klassisch haufwerksporigem Leichtbeton			haufwerksporigem Leichtbeton mit geschäumter Matrix		
	Stoffraum	Rohdichte	Einwaage (trocken)	Stoffraum	Rohdichte	Einwaage (trocken)
	dm ³ /m ³	kg/m ³	kg/m ³	dm ³ /m ³	kg/m ³	kg/m ³
Leichte Gesteinskörnung 4/8 mm	640	0,61	390	671	0,61	409
Leichte Gesteinskörnung (Leichtsand) 0/4 mm	37	1,23	45	-	-	-
CEM I 42,5 R	65	3,1	200	65	3,1	200
Wasser	100	1,0	100	140	1,0	140
Zusatzmittel	-	-	-	-	-	0,65
Porenraum	158	-	-	124	-	-
Summe	1000		725	1000		710

Im Gegensatz zum haufwerksporigen Leichtbeton mit geschäumter Matrix wird bei einem Schaum- oder Porenleichtbeton durch eine hohe Schaumzugabe gezielt zusätzliches Volumen erzeugt. Eventuell enthaltene leichte Gesteinskörnung „schwimmt“ in diesem Schaum. Daher kann der Lastabtrag nicht mehr von Korn zu Korn erfolgen. Die Folge ist neben einer geringeren Festigkeit ein signifikant höheres Trocknungsschwinden des Schaum- oder Porenleichtbetons im Vergleich mit dem haufwerksporigen

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

Leichtbeton. Die Eigenschaften von Schaum- oder Porenleichtbeton werden nachfolgend nicht behandelt.

Im Gegensatz zu den vorgenannten haufwerksporigen Leichtbetonen zeichnet sich der gefügedichte Leichtbeton (Tabelle 2) durch eine stetige Sieblinie aus. Dies führt zu einer deutlichen Verschiebung bei den Stoffraumanteilen der leichten Gesteinskörnung. Hinzu kommt der erheblich höhere Zementgehalt und das für einen W/Z-Wert von 0,50 erforderliche Anmachwasser. In Summe hat dieser Leichtbeton einen verbleibenden Porenraum von weniger als 2 %. Die angeführte Rezeptur liefert einen Leichtbeton etwa der Klasse LC12/13, D1,2.

Tabelle 2: Exemplarische Zusammensetzung eines gefügedichten Leichtbetons

Material	gefügedichter Leichtbeton		
	Stoffraum	Rohdichte	Einwaage (trocken)
	dm ³ /m ³	kg/m ³	kg/m ³
Leichte Gesteinskörnung 4/8 mm	400	0,61	244
Leichte Gesteinskörnung (Leichtsand) 0/4 mm	280	1,23	344
CEM I 42,5 R	119	3,1	370
Wasser	185	1,0	185
Zusatzmittel	-	-	-
Porenraum	16	-	-
Summe	1000		1143

2 Rohdichte

2.1 Angaben zur Rohdichte in den Normen

2.1.1 DIN EN 1520

DIN EN 1520 gilt für Trockenrohddichten $\geq 400 \text{ kg/m}^3$ und $\leq 2000 \text{ kg/m}^3$. Die Norm sieht zwei Möglichkeiten vor, die Trockenrohddichte des LAC zu deklarieren. Entweder deklariert der Hersteller einen Mittelwert und hält die Vorgaben der Tabelle 3 ein oder er deklariert eine Rohdichteklasse nach Tabelle 4. In letzterem Fall dürfen Einzelwerte bis zu 50 kg/m^3 außerhalb der angegebenen Grenzen liegen.

Die Trockenrohddichte ist nach DIN EN 992 zu ermitteln. Da diese Norm explizit nur für Proben gilt, die als Bohrkern oder Würfel aus Elementen entnommen werden, fehlt eine Regelung für separat hergestellte Probekörper. Die Prüfung von Bruchstücken, wie sie zum Beispiel für die Bestimmung der Trockenrohddichte im Anschluss an Festigkeitsuntersuchungen geeignet wäre, ist nicht vorgesehen.

Tabelle 3: Grenzabweichungen der Trockenrohddichte von LAC vom deklarierten Mittelwert nach DIN EN 1520

Deklariertes Mittelwert der Trockenrohddichte	≤ 1000	> 1000
Größte Abweichung des tatsächlichen Mittelwerts einer Probe vom deklarierten Mittelwert [kg/m^3]	50	100
Größte Abweichung der Einzelwerte einer Probe vom deklarierten Mittelwert [kg/m^3]	100	150

Tabelle 4: 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	≥ 400	> 500	> 600	> 700	> 800	> 900	> 1000	> 1200	> 1400	> 1600	> 1800
[kg/m^3]	≤ 500	≤ 600	≤ 700	≤ 800	≤ 900	≤ 1000	≤ 1200	≤ 1400	≤ 1600	≤ 1800	≤ 2000

2.1.2 DIN 4028

DIN 4028 gilt für Rohdichten $\geq 0,60 \text{ kg/dm}^3$ und $\leq 2,00 \text{ kg/dm}^3$. Die Norm unterscheidet zwischen Beton-Trockenrohddichte und Platten-Rohddichte. Letztere gilt nur für Hohldielen.

Die Beton-Trockenrohddichte ist an den auf Druckfestigkeit geprüften Würfeln zu ermitteln. Als Probe kommen entweder die ganzen Würfel oder mehrere Bruchstücke aus dem Kern in Frage, die bis zur Gewichtskonstanz bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet werden. Die Übereinstimmung der am Würfel ermittelten Beton-Trockenrohddichte mit der der Die-

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

len ist nachzuweisen. Die mittlere Beton-Trockenrohddichte muss innerhalb der Grenzen nach Tabelle 5 liegen. Einzelwerte der Beton-Trockenrohddichte dürfen um maximal $0,05 \text{ kg/dm}^3$ außerhalb der angegebenen Grenzen liegen. Ein Vergleich der Rohdichten der Proben mit den Rohdichtewerten des Bauteils wird nicht gefordert.

Tabelle 5: Beton-Rohdichteklassen nach DIN 4028

Beton-Rohdichteklasse	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Grenzen des Mittelwerts der Beton-Trockenrohddichte $\rho_{b,d}$ [kg/dm ³]	0,60 bis 0,80	0,81 bis 0,90	0,91 bis 1,00	1,01 bis 1,20	1,21 bis 1,40	1,41 bis 1,60	1,61 bis 1,80	1,81 bis 2,00

Die Platten-Rohddichte ist der Quotient aus der Trockenmasse und dem Volumen der Platte. Die Trockenmasse wird an Abschnitten oder Bruchstücken ermittelt, die bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet werden. Die mittlere Beton-Trockenrohddichte muss innerhalb der Grenzen nach Tabelle 6 liegen. Einzelwerte der Platten-Rohddichte dürfen um maximal $0,05 \text{ kg/dm}^3$ außerhalb der angegebenen Grenzen liegen.

Tabelle 6: Platten-Rohdichteklassen nach DIN 4028

Rohdichteklasse	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Grenzen des Mittelwerts der Platten-Rohddichte $\rho_{p,d}$ [kg/dm ³]	0,60 bis 0,80	0,81 bis 0,90	0,91 bis 1,00	1,01 bis 1,20	1,21 bis 1,40	1,41 bis 1,60	1,61 bis 1,80	1,81 bis 2,00

2.1.3 DIN 4232

DIN 4232 gilt für Rohdichten $\geq 0,41 \text{ kg/dm}^3$ und $\leq 2,00 \text{ kg/dm}^3$. Die Einteilung in Rohdichteklassen erfolgt nach Tabelle 7. Probekörper sind entweder die auf Druckfestigkeit geprüften kompletten Würfel oder mehrere Bruchstücke aus dem Kern und aus dem Randbereich, die bis zur Gewichtskonstanz bei $105 \text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet werden. Ein Vergleich der Rohdichten der Proben mit den Rohdichtewerten des Bauteils wird nicht gefordert.

Tabelle 7: Rohdichteklassen nach DIN 4232

Rohdichteklasse	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Grenzen des Mittelwerts der Beton-Trockenrohddichte ρ_d [kg/dm ³]	0,41 bis 0,50	0,51 bis 0,60	0,61 bis 0,70	0,71 bis 0,80	0,81 bis 0,90	0,91 bis 1,00	1,01 bis 1,20	1,21 bis 1,40	1,41 bis 1,60	1,61 bis 1,80	1,81 bis 2,00

2.1.4 DIN 1045-1

DIN 1045-1 gilt für gefügedichten Beton. Die Norm definiert Leichtbeton als Beton mit einer Trockenrohddichte von nicht weniger als 800 kg/m^3 und nicht mehr als 2000 kg/m^3 , der unter Verwendung von grobem Leichtzuschlag hergestellt wird. Nach DIN EN 206-1 darf die Rohddichte auch durch einen Zielwert festgelegt werden. Die Trockenrohddich-

te wird nach DIN EN 12390-7 durch Trocknen bei 105 °C bis zur Massekonstanz ermittelt. DIN 1045-1 und DIN EN 206-1 fordern nicht den Nachweis von Festigkeit und Rohdichte am gleichen Probekörper.

Tabelle 8: Rohdichteklassen von Leichtbeton nach DIN 1045-1

Rohdichteklasse	D1,0	D1,2	D1,4	D1,6	D1,8	D2,0
Rechenwert ρ der Trockenrohddichte zur Bestimmung der Baustoffeigenschaften [kg/m ³]	801 bis 1000	1001 bis 1200	1201 bis 1400	1401 bis 1600	1601 bis 1800	1801 bis 2000

2.2 Vergleich der Angaben zur Rohdichte in DIN EN 1520 mit den anderen Normen

Die Regelungen für die Rohdichteklassen in DIN EN 1520 decken sich mit den Angaben in DIN 4028 und DIN 4232. Die Möglichkeit eines deklarierten Mittelwertes wird in ähnlicher Form in DIN 1045-1 für gefügedichten Leichtbeton eröffnet. Die zulässigen Grenzabweichungen des deklarierten Mittelwertes passen zu den Vorgaben für die Rohdichteklassen.

Die zugehörige Prüfnorm DIN EN 992 berücksichtigt keine separat hergestellten Probekörper. Ebenso ist die Prüfung von Bruchstücken nicht vorgesehen, wie sie zum Beispiel für die Bestimmung der Trockenrohddichte im Anschluss an Festigkeitsuntersuchungen üblich sind. Hier wäre eine Klarstellung im Rahmen einer Überarbeitung der Norm erforderlich.

Ein Vergleich der Rohdichten der getrennt hergestellten Proben mit den Rohdichtewerten des Bauteils wird im Zusammenhang mit den Druckfestigkeitsuntersuchungen in DIN EN 1354 (vgl. 3.1.1.1.2) gefordert. Danach ist der Beton so zu verdichten, dass die Frischbetonrohddichte um nicht mehr als +3 % / -10 % bei einzelnen Probekörpern bzw. +1 % / -5 % beim Mittelwert von der Rohdichte des zugehörigen Bauteils abweicht. DIN EN 1520 stellt somit eine Verbesserung gegenüber den alten Normen DIN 4028 und DIN 4232 dar.

3 Druckfestigkeit

3.1 Angaben zur Druckfestigkeit in den Normen

3.1.1 DIN EN 1520

Die Druckfestigkeit von LAC kann nach DIN EN 1520 vom Hersteller entweder als deklarierte charakteristische Druckfestigkeit oder als deklarierte Festigkeitsklasse angegeben werden (Tabelle 9). Die Norm gestattet eine statistische Auswertung der Ergebnisse. Die in enthaltenen DIN EN 1520 K_n -Werte passen zu den Angaben in DIN 1084, Teil 1.

Referenzprobekörper für die Druckfestigkeit sind Bohrkern mit einer ihrem Durchmesser entsprechenden Länge oder Würfel, in beiden Fällen mit einer kleinsten Abmessung von 100 mm, die aus vorgefertigten Elementen entnommen werden. Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgt nach DIN EN 1354.

Tabelle 9: Festigkeitsklassen und Festigkeitsanforderungen für LAC nach DIN EN 1520

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	≥ $f_{ck} + K_n \times s_n$ ^d								
f_{cmin} ^c für $n < 6$	≥ 1,5	≥ 3,5	≥ 5,5	≥ 7,0	≥ 9,0	≥ 11	≥ 14	≥ 19	≥ 24
f_{cmin} ^c für $6 \leq n \leq 9$	≥ 1,5	≥ 3,0	≥ 4,5	≥ 6,0	≥ 7,5	≥ 9,0	≥ 12	≥ 17	≥ 22
f_{cmin} ^c für $n \geq 10$	≥ 1,5	≥ 3,0	≥ 4,0	≥ 5,5	≥ 7,0	≥ 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.								

Die Norm sieht verschiedene Abminderungs- und Umrechnungsfaktoren vor, die folgende Einflüsse berücksichtigen:

- abweichende (kleinere) Probengröße (Tabelle 10),

- den Unterschied zwischen aus einem Bauteil entnommenen und separat hergestellten Proben ($f_{\text{Bauteilprobe}} = 0,85 \cdot f_{\text{separater Probekörper}}$), sowie
- bei separat hergestellten Proben
 - die abweichende Probengeometrie (Tabelle 11) und
 - für Zylinder deren charakteristische Festigkeit (Tabelle 11).

Tabelle 10: Abminderungsfaktoren für die Druckfestigkeit von Bohrkernen mit einer dem Durchmesser entsprechenden Länge oder von Würfeln unterschiedlicher Größe

Durchmesser oder Länge [mm]	Abminderungsfaktor
> 100	1,00
90	0,98
80	0,96
70	0,94
60	0,92
50	0,90
40	0,88

Tabelle 11: Umrechnungsfaktoren für die Umrechnung von Prüfergebnissen, die an in Formen hergestellten Probekörpern gewonnen wurden, auf die Festigkeit der Referenzprobekörper (Bohrkerne mit 100 mm Durchmesser und ebensolcher Länge oder Würfel mit 100 mm Kantenlänge)

Gestalt und Größe der in Formen hergestellten Probekörper	Umrechnungsfaktor
Würfel - 150 mm	1,00
Würfel - 200 mm	1,05
Zylinder 150 mm/300 mm, in Abhängigkeit von der Festigkeit [MPa]	
2	1,05
4	1,05
6	1,06
8	1,07
10	1,08
12	1,10
15	1,12
20	1,15
25	1,18

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

3.1.1.1 Herstellung und Lagerung der Probekörper

3.1.1.1.1 Probekörper aus Elementen

Die Probekörper sind innerhalb von 1 Tag bis 7 Tagen vor der Druckprüfung aus den Elementen herauszubohren oder herauszuschneiden. Bis zur Prüfung sind sie bei $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $(50 \pm 15)\%$ zu lagern. Der massenbezogene Feuchtegehalt der Probekörper muss zum Zeitpunkt der Prüfung 4 % betragen. Ein geringerer Feuchtegehalt ist durch Befeuchten und mindestens eintägiges Trocknen vor der Prüfung auszugleichen.

3.1.1.1.2 Separat hergestellte Probekörper

Separat hergestellte Probekörper sind so zu verdichten, dass die Frischbetonrohddichte um nicht mehr als +3 % / -10 % (einzelner Probekörper) bzw. +1 % / -5 % (Mittelwert des Prüfsatzes) von der Frischbetonrohddichte des vorgefertigten Bauteils abweicht, das die Probekörper repräsentieren. Die Proben sind innerhalb von 7 Tagen zu entformen. Während der ersten 7 Tage sind sie in einer feuchtegesättigten Atmosphäre zu lagern und vor Austrocknen zu schützen. Bis zur Prüfung sind sie dann bei $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $(50 \pm 15)\%$ zu lagern. Der massenbezogene Feuchtegehalt der Probekörper muss zum Zeitpunkt der Prüfung 4 % betragen.

3.1.1.2 Prüfung der Druckfestigkeit

Für die Prüfung der Druckfestigkeit können die Proben geschliffen oder abgeglichen werden. Anderenfalls ist eine Ausgleichsschicht aus Weichfaserplatten einzulegen.

3.1.2 DIN 4028

DIN 4028 umfasst drei Festigkeitsklassen (Tabelle 12). Referenzprobekörper sind Würfel mit 200 mm Kantenlänge. Die Herstellung, Lagerung und Prüfung erfolgt nach DIN 1048, Teil 1 bzw. Teil 5. Die Festigkeitsanforderungen sind erfüllt, wenn die mittlere Druckfestigkeit jeder Würfelserie mindestens den Wert β_{WS} nach Tabelle 12 und die Druckfestigkeit jedes einzelnen Würfels die Nennfestigkeit β_{WN} erreicht. Bei 9 aufeinander folgenden Würfeln darf die Nennfestigkeit β_{WN} um maximal 20 % unterschritten werden. Der gleitende Mittelwert aus 3 aufeinander folgenden Würfeln muss jedoch mindestens die Serienfestigkeit erreichen. Eine statistische Auswertung der Ergebnisse nach DIN 1084 Teil 1 ist zulässig.

Tabelle 12: Festigkeitsklassen des Leichtbetons nach DIN 4028

Festigkeitsklasse des Leichtbetons	Nennfestigkeit β_{WN} (Mindestdruckfestigkeit für die Druckfestigkeit β_{W28} jedes Würfels [N/mm^2])	Serienfestigkeit β_{WS} (Mindestdruckfestigkeit für die mittlere Druckfestigkeit β_{Wm} [N/mm^2])
LB 5	5,0	8,0
LB 8	8,0	11,0
LB 10	10,0	13,0

3.1.3 DIN 4232

DIN 4232 umfasst drei Festigkeitsklassen (Tabelle 13). Referenzprobekörper sind Würfel mit 200 mm Kantenlänge. Alternativ bietet die Norm die Möglichkeit, den Nachweis der Druckfestigkeit an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge zu führen. In diesem Fall darf die Festigkeit nach Gleichung (1) umgerechnet werden. Die Herstellung, Lagerung und Prüfung erfolgt nach DIN 1048, Teil 1 bzw. Teil 5. Die Festigkeitsanforderungen sind erfüllt, wenn die mittlere Druckfestigkeit jeder Würfelserie mindestens den Wert β_{WS} nach Tabelle 13 und die Druckfestigkeit jedes einzelnen Würfels die Nennfestigkeit β_{WN} erreicht. Eine statistische Auswertung der Ergebnisse nach DIN 1084, Teil 1 ist nicht explizit gestattet. Durch den Verweis auf den Nachweis der Festigkeiten nach DIN 1045/12.78 ist sie über den dortigen Verweis letztlich implizit zulässig.

$$\beta_{W200} = 0,95\beta_{W150} \quad (1)$$

Tabelle 13: Festigkeitsklassen des Leichtbetons nach DIN 4232

Festigkeitsklasse des Leichtbetons	Nennfestigkeit β_{WN} (Mindestdruckfestigkeit für die Druckfestigkeit β_{W28} jedes Würfels) [N/mm ²]	Serienfestigkeit β_{WS} (Mindestdruckfestigkeit für die mittlere Druckfestigkeit β_{Wm}) [N/mm ²]
LB 2	2,0	4,0
LB 5	5,0	8,0
LB 8	8,0	11,0

Der Nachweis der Festigkeit erfolgt üblicherweise im Alter von 28 Tagen. Ein Nachweis im jüngeren Alter von mindestens 7 Tagen ist gestattet, wenn der Zusammenhang der Druckfestigkeit in diesem Prüfalter mit der Druckfestigkeit nach 28 Tagen nachgewiesen wurde.

3.1.4 DIN 1045-1

Den Festigkeitsklassen dieser Norm liegt die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit f_{lck} wassergelagerter Proben nach 28 Tagen zugrunde. Die Festigkeit muss entweder an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge oder an 300 mm langen Zylindern mit 150 mm Durchmesser geprüft werden, die DIN EN 12390-1 entsprechen und nach DIN EN 12390-2 hergestellt und gelagert sind und die von Proben stammen, die nach DIN EN 12350-1 entnommen sind. Für Leichtbeton ist in DIN EN 206-1 der Zylinder explizit als Referenzprobekörper genannt. Für gefügedichten Leichtbeton ergibt sich aus der Zuordnung der Zylinder- und der Würfeldruckfestigkeitswerte für die Bezeichnung der Festigkeitsklassen (Tabelle 14) folgende Umrechnung:

$$f_{lck,cyl} = f_{lck,cube} / 1,10 \quad (2)$$

Tabelle 14 ist ein Auszug aus der entsprechenden Tabelle in DIN EN 206-1. Sie enthält nur die Festigkeitsklassen, die für den Vergleich mit DIN EN 1520 relevant sind.

Tabelle 14: Druckfestigkeitsklassen für gefügedichten Leichtbeton

Druckfestigkeitsklasse	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Zylindern $f_{1ck,cyl}$ [N/mm ²]	Charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Würfeln $f_{1ck,cube}$ [N/mm ²]
LC8/9*	8	9
LC12/13	12	13
LC16/18	16	18
LC20/22	20	22
LC25/28	25	28

* Die Festigkeitsklasse LC8/9 ist in DIN EN 206-1 aber nicht in DIN 1045-1 enthalten.

Die Druckfestigkeit bei Lagerung nach dem Referenzverfahren unter Wasser nach DIN EN 12390-2 ($f_{c,cube}$) darf aus der Druckfestigkeit bei Lagerung nach DIN EN 12390-2, Anhang NA, ($f_{c,dry}$) für den hier interessierenden Festigkeitsbereich nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$f_{c,cube} = 0,92 \cdot f_{c,dry} \quad (3)$$

Diese Beziehung gilt nur für die Umrechnung von Würfeldruckfestigkeiten und berücksichtigt ausschließlich die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen.

Werden anstelle von Würfeln mit 150 mm Kantenlänge solche mit 100 mm Kantenlänge verwendet, dann dürfen die Werte nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$f_{c,dry(150mm)} = 0,97 \cdot f_{c,dry(100mm)} \quad (4)$$

Das Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerksbeton zur charakteristischen Druckfestigkeit von separat hergestellten, genormten Probekörpern darf nach prEN 13791:2003 nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$f_{Bauteilprobe} = 0,85 \cdot f_{separater\ Probekörper} \quad (5)$$

Wird die Druckfestigkeit von Bauwerksbeton nach prEN 13791:2003 an Bohrkernen bestimmt,

- so entspricht das Ergebnis der Druckfestigkeitsprüfung von Bohrkernen gleicher Länge und mit einem Nenndurchmesser von 100 mm bis 150 mm, derjenigen Druckfestigkeit eines unter denselben Bedingungen hergestellten Würfels von 150 mm Kantenlänge;
- so ergibt die Prüfung von Bohrkernen mit einem Nenndurchmesser von mindestens 100 mm und nicht mehr als 150 mm und mit einem Verhältnis von Länge zu Durchmesser gleich 2,0 einen Wert für die Druckfestigkeit, der dem der Druckfestigkeit eines unter denselben Bedingungen hergestellten Zylinders mit den Maßen 150 × 300 entspricht.

Die verschiedenen Umrechnungsfaktoren wurden jeweils für Normalbeton hergeleitet, werden jedoch auch für Leichtbeton eingesetzt.

3.2 Vergleich der Angaben zur Druckfestigkeit in DIN EN 1520 mit den anderen Normen

DIN EN 1520 beinhaltet Festigkeitsklassen, für die im Zusammenhang mit Elementen aus haufwerksporigem Leichtbeton in Deutschland keine Erfahrungen vorliegen. Dies trifft grundsätzlich auf die Festigkeitsklassen LAC 15 bis LAC 25 zu. Es gilt ebenfalls für Biegetragglieder der Festigkeitsklassen LAC 2 und LAC 4. Diese niedrigeren Festigkeitsklassen kamen bisher nur für Wandelemente nach DIN 4232 zum Einsatz.

Die Umrechnungsfaktoren für die Druckfestigkeit der DIN EN 1520 stimmen zum Teil mit Umrechnungswerten aus anderen Normen überein. Dies gilt für folgende Umrechnungen:

- separat hergestellter Probekörper → aus einem Bauteil entnommener Probekörper und
- separat hergestellter 150-mm-Würfel → separat hergestellter 200-mm-Würfel.

Für die folgenden Umrechnungen wird abweichend von den anderen hier betrachteten Normen kein Einfluss der Probekörpergröße unterstellt:

- aus einem Bauteil entnommen: 100-mm-Würfel → 150-mm-Würfel → 200-mm-Würfel und
- aus einem Bauteil entnommener 100-mm-Würfel → separat hergestellter 150-mm-Würfel (abgesehen von der Umrechnung Bauteil → separat hergestellter Probekörper).

Aus diesen Annahmen leitet sich dann auch der Umstand ab, dass es bei der Umrechnung der Druckfestigkeit eines 50-mm-Bohrkerns in die Druckfestigkeit eines separat hergestellten 200-mm-Würfels zwischen gefügedichtem Beton und haufwerksporigem Leichtbeton nach DIN EN 1520 zu abweichenden Faktoren kommt:

$$f_{c,200mm\text{ Würfel}} = k_k / (k_W \cdot k_B) \cdot f_{c,50mm\text{ Kern}} \quad (6)$$

mit

k_k Abminderungsfaktor für kleinere Bohrkerne (Tabelle 10): $k_k = 0,90$

k_W Umrechnung 100-mm-Würfel → 200-mm-Würfel (Tabelle 11): $k_W = 1,05$

k_B Umrechnung Bohrkerne → separat hergestellter 100-mm-Würfel (Tabelle 11): $k_B = 0,85$

$$f_{c,200mm\text{ Würfel}} = 0,90 \cdot f_{c,50mm\text{ Kern}} \quad \text{nach DIN 1048-2} \quad (7)$$

$$f_{c,200mm\text{ Würfel}} = 0,90 / (0,85 \cdot 1,05) \cdot f_{c,50mm\text{ Kern}} \quad \text{nach DIN EN 1520} \quad (8)$$

Zieht man die Werte der Tabelle 11 heran, dann ändert sich der Umrechnungsfaktor zwischen 150-mm-Würfeln und Zylindern mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Länge von 1,05 für die Festigkeitsklasse LAC 2 auf 1,18 für die Festigkeitsklasse LAC 25. Im Gegensatz dazu gilt für gefügedichten Leichtbeton unabhängig von der Festigkeitsklasse ein Umrechnungsfaktor von 1,10 (siehe Gleichung (2)).

Der Umrechnungsfaktor k_B zwischen den aus einem Bauteil entnommenen Proben und separat hergestellten Proben in DIN EN 1520 und DIN 1045-1 ist identisch. Es besteht

jedoch ein gravierender Unterschied darin, welche Probe als Bezugsgröße herangezogen wird. Dies ist bei einem Vergleich beider Normen zu beachten.

3.3 Vergleich der Angaben zur Druckfestigkeit in DIN EN 1520 mit Messwerten

Es gibt wenig Literatur zum Thema haufwerksporiger Leichtbeton. Diese Literaturstellen beschränken zumeist auf die Angabe der Festigkeit und der Rohdichte der untersuchten Leichtbetone. Die Angaben zur Festigkeit werden dabei jeweils nur für den Vergleichsprobekörper geliefert. Aus diesem Grund musste für den Vergleich der DIN EN 1520 mit Messwerten auf Angaben aus dem Kreis der Hersteller zurückgegriffen werden. Leider beschränken sich auch hier die Informationen mit wenigen Ausnahmen (vgl. [Lit 1, Lit 2 und Lit 3]) auf das Messen der Festigkeit am Referenzprobekörper und auf das Ermitteln der Trockenrohichte. Die geringe Datenbasis ist nicht geeignet, um Umrechnungsfaktoren herzuleiten oder statistisch abzusichern. Als weiteres Manko kommen Rohdichteunterschiede zwischen den verschiedenen Probekörpern hinzu, die nur selten die Kriterien der DIN EN 1354 erfüllen (vgl. Kapitel 3.1.1.1.2). Vor diesem Hintergrund müssen die Vergleiche in Bild 3 bis Bild 7 als tendenzielle Aussagen betrachtet werden.

In Bild 3 werden die Druckfestigkeitswerte von 100-mm-Bohrkernen (Referenzkörper) mit separat hergestellten 150-mm-Würfeln verglichen. Aufgrund der wenigen vorhandenen Datensätze sind Einzelwerte wiedergegeben. Bei der Beurteilung ist zu beachten, dass viele Wertepaare nicht die Anforderung an die Rohdichtetoleranz einhalten (vgl. Kapitel 3.1.1.1.2). Die im Bild 3 dargestellte Linie repräsentiert mit einer Steigung von 0,85 den Umrechnungsfaktor nach Gleichung (5). Die vorhandenen Daten sind recht gleichmäßig um diese Linie angeordnet.

Bild 4 führt einen ähnlichen Vergleich durch. Hier sind die Werte der Druckfestigkeit von 150-mm-Bohrkernen (Referenzkörper) denen von separat hergestellten 150-mm-Würfeln gegenübergestellt. Die dargestellte Linie berücksichtigt die Umrechnungsfaktoren aus Tabelle 10 und Tabelle 11. Die Bauteilfestigkeit wird hier durch die separat hergestellten Proben eher unterschätzt. Bild 5 zeigt den entsprechenden Vergleich der Druckfestigkeit von 200-mm-Bohrkernen mit separat hergestellten 200-mm-Würfeln. In diesem Fall trifft die Umrechnung nahezu ideal zu.

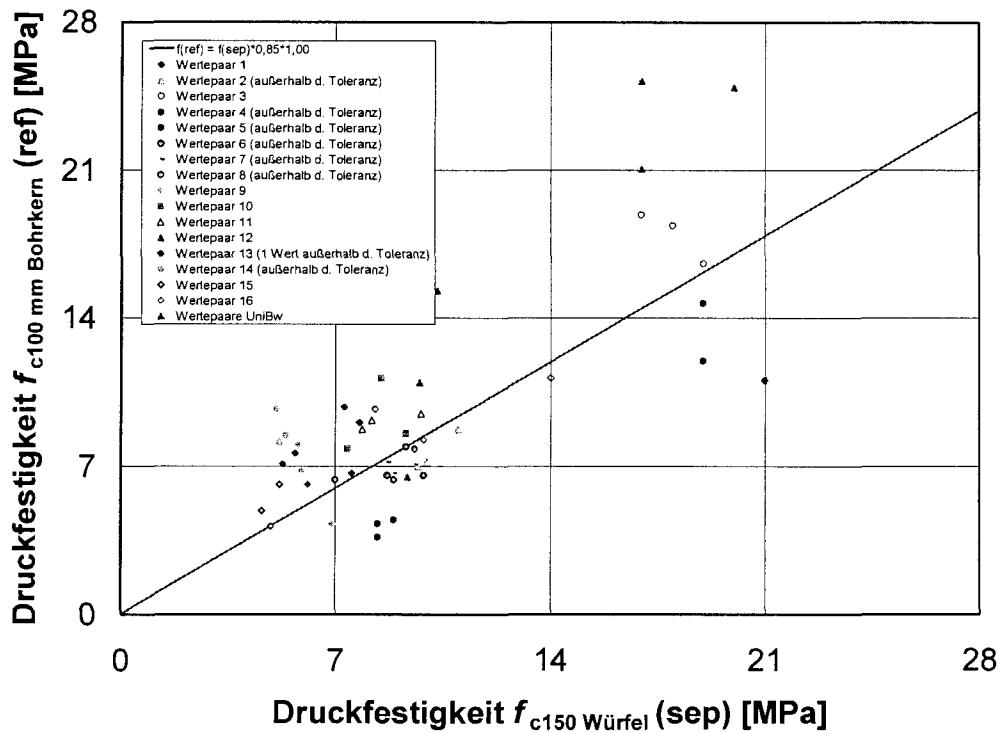


Bild 3: Vergleich der Druckfestigkeit von 100-mm-Bohrkernen (Referenzkörper) mit separat hergestellten 150-mm-Würfeln

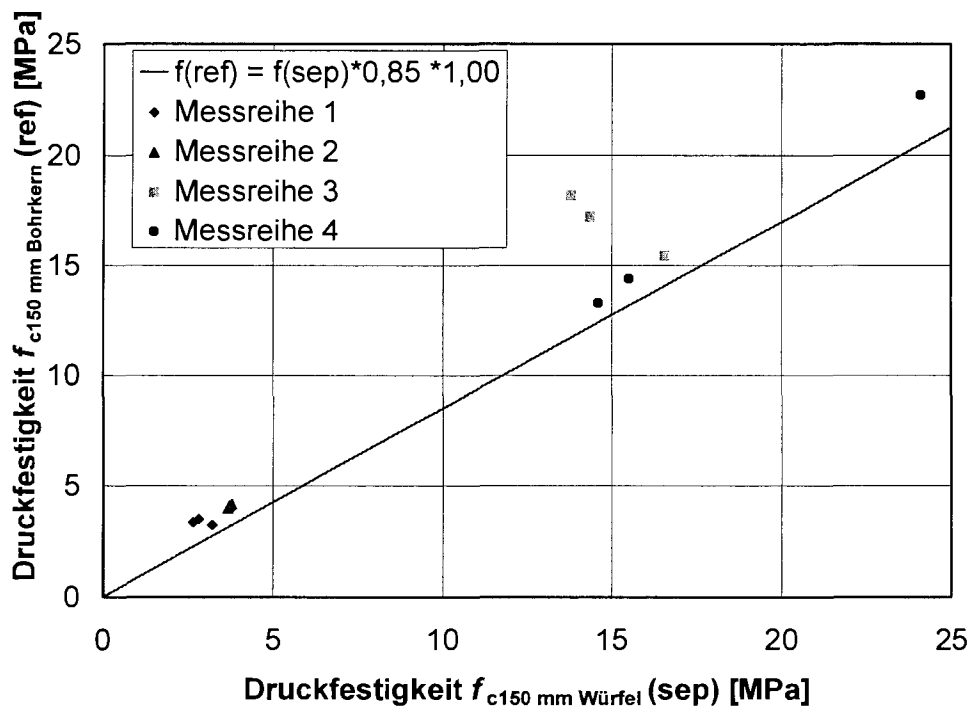


Bild 4: Vergleich der Druckfestigkeit von 150-mm-Bohrkernen (Referenzkörper) mit separat hergestellten 150-mm-Würfeln

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

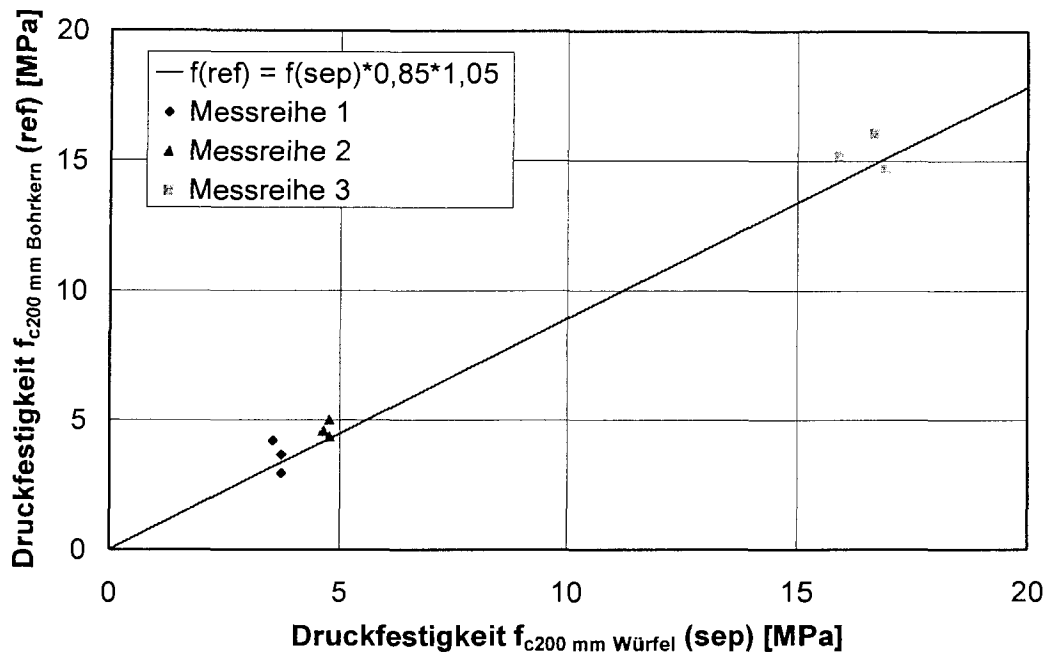


Bild 5: Vergleich der Druckfestigkeit von 200-mm-Bohrkernen mit separat hergestellten 200-mm-Würfeln

Bild 6 bestätigt die Angabe der DIN EN 1520, dass keine Umrechnung der Druckfestigkeit für Bohrkerne mit einem Durchmesser ≥ 100 mm erforderlich ist (vgl. Tabelle 10).

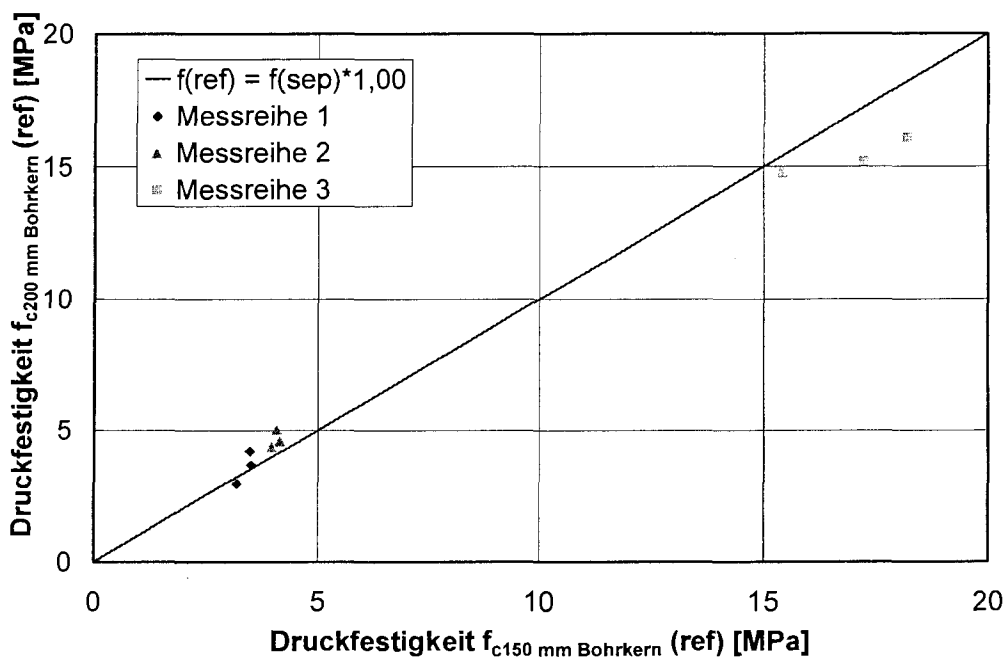


Bild 6: Vergleich der Druckfestigkeit von 200-mm-Bohrkernen mit 150-mm-Bohrkernen

Der Umrechnungsfaktor 1,05 für die Druckfestigkeit von separat hergestellten 200-mm-Würfeln mit separat hergestellten 150-mm-Würfeln nach Tabelle 11 wird durch den Vergleich in Bild 7 nicht bestätigt. Die wenigen Daten deuten vielmehr darauf hin, dass keine Umrechnung zwischen den beiden Würfelgrößen erforderlich ist. Dies wäre eine Übereinstimmung mit den Bohrkernen. Die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Messungen mit drei Würfelgrößen enthält Tabelle 15. Je kleiner die Würfel werden, desto niedriger fällt die Festigkeit aus. Die geringe Datenbasis lässt keine Begründung für die Ergebnisse zu.

Tabelle 15: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung an separat hergestellten und gesägten Würfeln unterschiedlicher Größe nach DIN EN 1354 (Messung UniBw)

	Separat hergestellte Würfel			Block A	Block B
	$f_{c,200}$	$f_{c,150}$	$f_{c,100}$	$f_{c,100}$	$f_{c,100}$
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Einzelwerte	11,5	10,3	8,91	15,1	9,18
	10,2	9,76	8,57	12,5	10,2
	11,2	9,34	9,75	8,51	12,5
Mittelwert	11,0	9,81	9,07	12,0	10,6

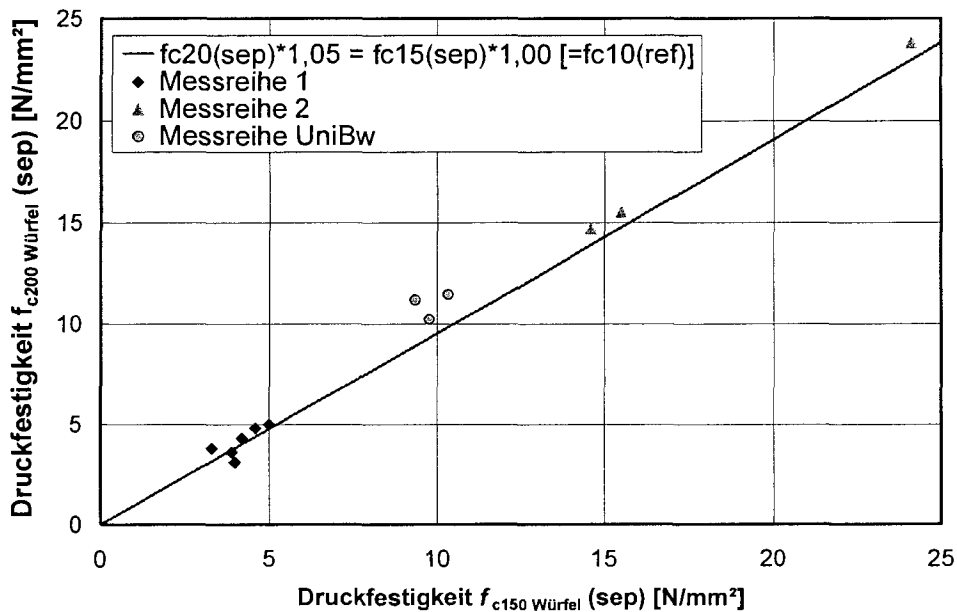


Bild 7: Vergleich der Druckfestigkeit von separat hergestellten 200-mm-Würfeln mit separat hergestellten 150-mm-Würfeln

Zur Überprüfung der Angaben in Tabelle 10 wurden Bohrkern der Durchmesser 100 mm, 70 mm, 50 mm und 30 mm aus zwei Blöcken entnommen, die mit Auflast (Block A) und ohne Auflast (Block B) verdichtet wurden, um den Einfluss der Verdich-

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

tung zu überprüfen. Die Ergebnisse der 30-mm-Bohrkerne kann in die Auswertung nicht einbezogen werden, da die Proben durch das Bohren zu sehr in Mitleidenschaft gezogen wurden.

Die Ergebnisse zeigen für beide Blöcke ein Abnehmen der Festigkeit je kleiner der Durchmesser der Bohrkerne wird (Tabelle 16). Das Ergebnis steht damit im Widerspruch zu Tabelle 10, stimmt allerdings mit den Erkenntnissen überein, die den an separat hergestellten Würfeln ermittelt wurden (Tabelle 15). Als mögliche Ursache für die geringere Festigkeit der kleineren Proben kommt eine Störung des Gefüges bei der Entnahme der Proben in Frage. Diese wurde augenfällig bei den 30-mm-Bohrkernen. Für die Annahme spricht auch die deutlich größeren Festigkeitsunterschiede innerhalb einer Probeserie bei den herausgesägten bzw. herausgebohrten Proben (Tabelle 16) im Vergleich mit den separat hergestellten Proben (Tabelle 15).

Die Festigkeit der separat hergestellten Zylinder liegt unterhalb der Werte für die Bohrkerne. Ein Vergleich mit den Angaben der Tabelle 11 ist daher nicht zielführend.

Tabelle 16: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung an separat hergestellten Zylindern und Bohrkerne unterschiedlicher Größe nach DIN EN 1354, entnommen aus zwei unterschiedlichen Blöcken (Messung UniBw)

	Zylinder 150/300 mm		Bohrkern 100 mm		Bohrkern 70 mm		Bohrkern 50 mm	
	$f_{c,cyl,150}$		$f_{c,100}$		$f_{c,70}$		$f_{c,50}$	
	MPa		MPa		MPa		MPa	
Block	-	-	A	B	A	B	A	B
Einzelwerte	8,47	8,28	15,3	15,5	14,8	14,0	13,5	13,0
	7,00	8,98	10,9	10,5	9,82	11,1	12,2	13,8
	11,3		6,49	8,09	7,48	8,52	8,25	8,96
							9,93	10,1
							6,82	6,11
							7,84	8,61
Mittelwert	8,93	8,63	10,9	11,4	10,7	11,2	9,77	10,1
gemessen $\frac{f_{c,100}}{f_{c,Durchmesser}}$			1,00	1,00	1,02	1,02	1,12	1,12
Umrechnungsfaktor nach Tabelle 10			1,00	1,00	0,94	0,94	0,90	0,90

4 Biegezugfestigkeit

4.1 Angaben zur Biegezugfestigkeit in den Normen

4.1.1 DIN EN 1520

Die Biegezugfestigkeit darf rechnerisch aus der Druckfestigkeit wie folgt abgeschätzt werden:

$$f_{t,flk} = 0,42 f_{ck}^{2/3} \cdot \eta_1 \quad (9)$$

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6(\rho / 2200) \quad \text{für } \rho > 1400 \text{ kg/m}^3 \quad (10)$$

$$\eta_1 = 0,78 \quad \text{für } \rho \leq 1400 \text{ kg/m}^3 \quad (11)$$

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 3.1) [MPa].

Die Biegezugfestigkeit kann alternativ experimentell nach DIN EN 1521 an aus dem Bauteil entnommenen Proben mit den Abmessungen $h/b/L = 100/100/400 \text{ mm}^3$ im 4-Punkt-Biegeversuch ermittelt werden. Die Stützweite beträgt im Versuch 300 mm. Die Norm lässt andere Abmessungen, allerdings keine separat hergestellten Probekörper zu.

4.1.2 DIN 4028

Die Norm enthält keine Angaben zur Biegezugfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons.

4.1.3 DIN 4232

Die Norm enthält keine Angaben zur Biegezugfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons.

4.1.4 DIN 1045-1

Die Norm enthält keine Angaben zur Biegezugfestigkeit. Die mittlere zentrische Betonzugfestigkeit f_{lctm} wird für die hier interessierenden Festigkeitsklassen des LC über die nachfolgende Gleichung aus der charakteristischen Betondruckfestigkeit f_{lck} abgeschätzt:

$$f_{lctm} = \eta_1 \cdot 0,30 f_{lck}^{(2/3)} \quad (12)$$

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6(\rho / 2200) \quad (13)$$

Darin ist:

f_{lck} charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Leichtbetons [MPa];

ρ Trockenrohddichte des Leichtbetons [kg/m^3].

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

Zwischen der mittleren und der charakteristischen Zugfestigkeit gilt der Zusammenhang nach Gleichung (14):

$$f_{lctk;0,05} = 0,70 f_{lctm} \quad (14)$$

Die zentrische Zugfestigkeit f_{lct} darf aus der experimentell nach DIN EN 12390-6 bestimmten Spaltzugfestigkeit $f_{lct,sp}$ näherungsweise berechnet werden zu:

$$f_{lct} = 0,9 f_{lct,sp} \quad (15)$$

Die Bestimmung der Biegezugfestigkeit von konstruktivem Leichtbeton kann nach DIN EN 12390-5 erfolgen. Als Probekörper kommen entweder separat hergestellte oder gesägte Prismen in Frage. Die Abmessungen sind nicht fest vorgegeben, allerdings soll $h = d$ und $L \geq 3,5 d$ sein. Die Prüfung erfolgt im 4-Punkt-Biegeversuch mit einer Stützweite von $l = 3 d$.

Nach [Lit 4] kann die zentrische Zugfestigkeit β_{Zm} aus der experimentell bestimmten Biegezugfestigkeit β_{BZm} näherungsweise berechnet werden zu:

$$\beta_{Zm} = 0,53 \beta_{BZm} \quad (16)$$

In ÖNORM B 3303 wird die Relation der Biegezugfestigkeit zur axialen Zugfestigkeit folgendermaßen beschrieben:

$$\beta_Z = 0,45 \dots 0,55 \beta_{BZ} \quad (17)$$

4.2 Vergleich der Angaben zur Biegezugfestigkeit in DIN EN 1520 mit denen in DIN 1045-1

DIN EN 1520 stellt einen direkten Bezug zwischen der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit von Proben her, die aus Elementen entnommen wurden. Im Gegensatz dazu stellt DIN 1045-1 einen Bezug zwischen der Druckfestigkeit und der Zug- bzw. Spaltzugfestigkeit wassergelagerter separat hergestellter Proben her. Für die Umrechnung auf die Biegezugfestigkeit muss z. B. auf [Lit 4] zurückgegriffen werden.

Für den Vergleich müssen zunächst die nach DIN EN 1520 gemessenen Festigkeitswerte in Zylinderdruckfestigkeiten nach DIN 1045-1 umgerechnet nach Gleichung (18) werden.

$$\text{rechn. } f_{ck,DIN1045-1} = \frac{k_L}{k_{Zyl} \cdot k_B} \cdot f_{ck,DIN EN1520} \quad (18)$$

mit

- k_L Umrechnung Wasserlagerung → Trockenlagerung (Tabelle 10): $k_L = 0,92$
- k_{Zyl} Umrechnung 100-mm-Bohrkern → 150-mm-Zylinder (Tabelle 11)
- k_B Umrechnung Bohrkerne → separat hergestellte Probekörper: $k_B = 0,85$

Der Umrechnungsfaktor für die Wasserlagerung wurde berücksichtigt, obwohl er explizit eigentlich nur für Würfel gilt. Die Gleichungen (12) und (13) liefern dann zusammen mit (14) und (16) die charakteristische rechnerische Biegezugfestigkeit. Die Vergleichswerte nach DIN EN 1520 liefern die Gleichungen (9) bis (11). Als Basis für den Vergleich werden die an haufwerksporigen Elementen bestimmten Festigkeitswerte aus [Lit 3] herangezogen. Das Ergebnis Bild 8 gibt wider. Die Berechnung nach DIN 1045-1 führt im Mittel zu etwa 10 % kleineren Werten. Dieser Unterschied geht zurück auf die unterschiedlichen Vorfaktoren und die Umrechnung der Lagerungsbedingungen beim

Ansatz der charakteristischen Druckfestigkeitswerte.

In Bild 9 ist der Quotient der berechneten charakteristischen Biegezugfestigkeitswerte nach DIN 1045-1 und DIN EN 1520 in Abhängigkeit von den zugrunde liegenden Druckfestigkeitswerten dargestellt. Danach nimmt das Verhältnis der Biegezugfestigkeitswerte mit zunehmender Festigkeit ab. Abweichungen ergeben sich im Bereich niedrigerer Druckfestigkeitswerte bis etwa 14 MPa.

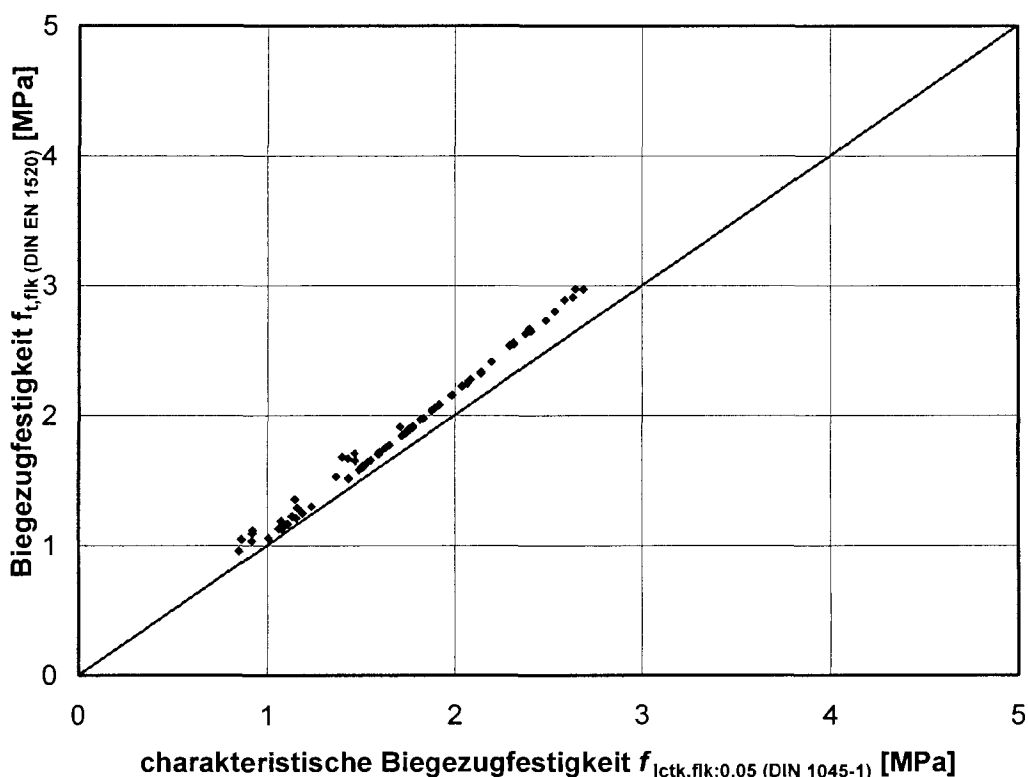


Bild 8: Vergleich gerechneter charakteristischer Biegezugfestigkeitswerte nach DIN EN 1520 mit den nach DIN 1045-1 berechneten Werten

Die Abweichungen in Bild 9 sind in erster Linie auf die unterschiedlichen Korrekturfaktoren für Rohdichten $\leq 1400 \text{ kg/m}^3$ zurückzuführen. Bild 10 zeigt den Quotienten der berechneten charakteristischen Biegezugfestigkeitswerte nach DIN 1045-1 und DIN EN 1520 in Abhängigkeit von den gemessenen Rohdichtewerten. Das Maximum bei 1400 kg/m^3 korrespondiert mit dem in DIN EN 1520 vorgesehenen Wechsel zwischen den Korrekturfunktionen nach den Gleichungen (10) und (11).

Als Ergänzung zu den theoretischen Vergleichen wurden an der UniBw Versuche mit Probekörpern nach DIN 1048 und Probekörpern nach DIN EN 1521 durchgeführt. Die Probekörper für die Prüfung nach DIN EN 1521 wurden aus zwei Blöcken herausgesägt. Ein Block wurde ohne Auflast, der andere mit Auflast betoniert, um Unterschiede aufzudecken, die sich aus einer unterschiedlichen Verdichtung ergeben können. Im Anschluss an die Prüfung der Biegezugfestigkeit wurde an den Balkenresten jeweils die Spaltzugfestigkeit geprüft. Die Ergebnisse enthält Tabelle 17 als Einzelwerte und Mittelwerte. In Bild 11 sind die gemessenen Werte der Spaltzugfestigkeit über den entspre-

chenden Werten der Biegezugfestigkeit aufgetragen. Für diesen Leichtbeton liefert die Prüfung an den separat hergestellten Balken nach DIN 1048 niedrigere Werte als an den aus Blöcken herausgesägten Balken gemessen wurde. Dies gilt für die Spaltzugfestigkeit und die Biegezugfestigkeit. Das Verhältnis Spaltzugfestigkeit zu Biegezugfestigkeit stimmt für alle Prüfungen akzeptabel überein. Es liegt deutlich höher, als aufgrund einer Umrechnung nach Gleichung (15) und (16) bzw. aufgrund einer Umrechnung nach Gleichung (16) und Gleichung (17) zu erwarten war. Im vorliegenden Fall werden also die Werte der Biegezugfestigkeit unterschätzt, wenn die Werte der Spaltzugfestigkeit zugrunde gelegt werden.

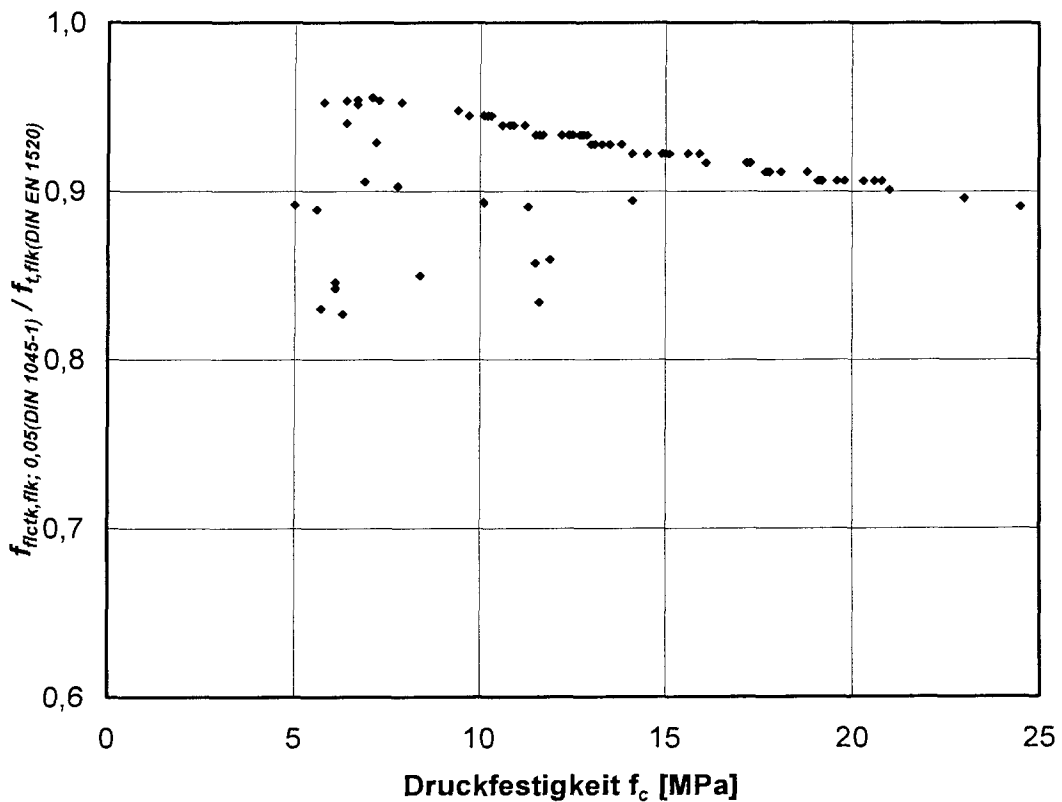


Bild 9: Quotient der berechneten charakteristischen Biegezugfestigkeitswerte nach DIN 1045-1 und DIN EN 1520 in Abhängigkeit von den zugrunde liegenden Druckfestigkeitswerten

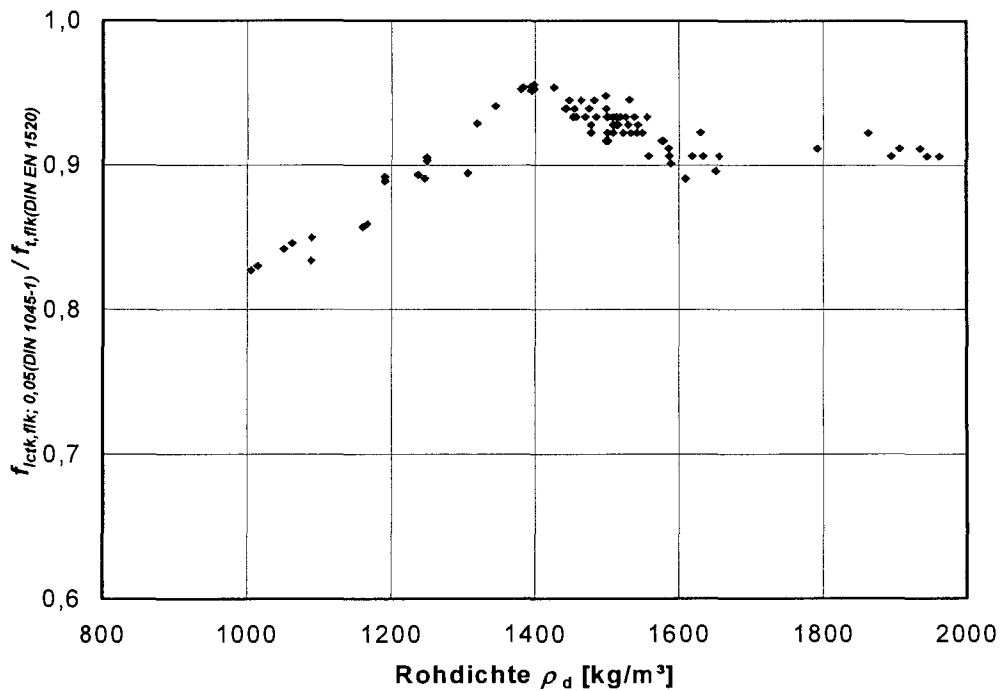


Bild 10: Quotient der berechneten charakteristischen Biegezugfestigkeitswerte nach DIN 1045-1 und DIN EN 1520 in Abhängigkeit von den zugrunde liegenden Rohdichtewerten

Tabelle 17: Ergebnisse der Biegezug- und Spaltzugfestigkeitsprüfung nach DIN 1048 bzw. DIN EN 1521 (Messreihe UniBw)

	DIN 1048			DIN EN 1521					
				mit Auflast			ohne Auflast		
	β_{BZ}	β_{SZ}	$\frac{\beta_{SZ}}{\beta_{BZ}}$	$f_{t,flk}$	$f_{t,sp}$	$\frac{f_{t,sp}}{f_{t,flk}}$	$f_{t,flk}$	$f_{t,sp}$	$\frac{f_{t,sp}}{f_{t,flk}}$
	N/mm ²	N/mm ²		MPa	MPa		MPa	MPa	
Messwerte	1,83	1,32	0,72	2,90*	1,82*	-	2,13	2,37	1,11
		1,51	0,83		1,71*	-		1,89	0,89
	1,57	1,47	0,94	1,83	1,66	0,90	1,94	1,57	0,81
		1,19	0,76		1,50	0,82		1,86	0,96
	1,61	1,17	0,73	1,81	1,57	0,87	1,81	1,47	0,81
		1,38	0,86		1,30	0,72		1,45	0,80
Mittelwert	1,67	1,34	0,81	1,82	1,51	0,83	1,96	1,77	0,90

* Wird wegen der signifikanten Abweichung der Biegezugfestigkeit bei der Mittelwertbildung und in Bild 11 nicht berücksichtigt.

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

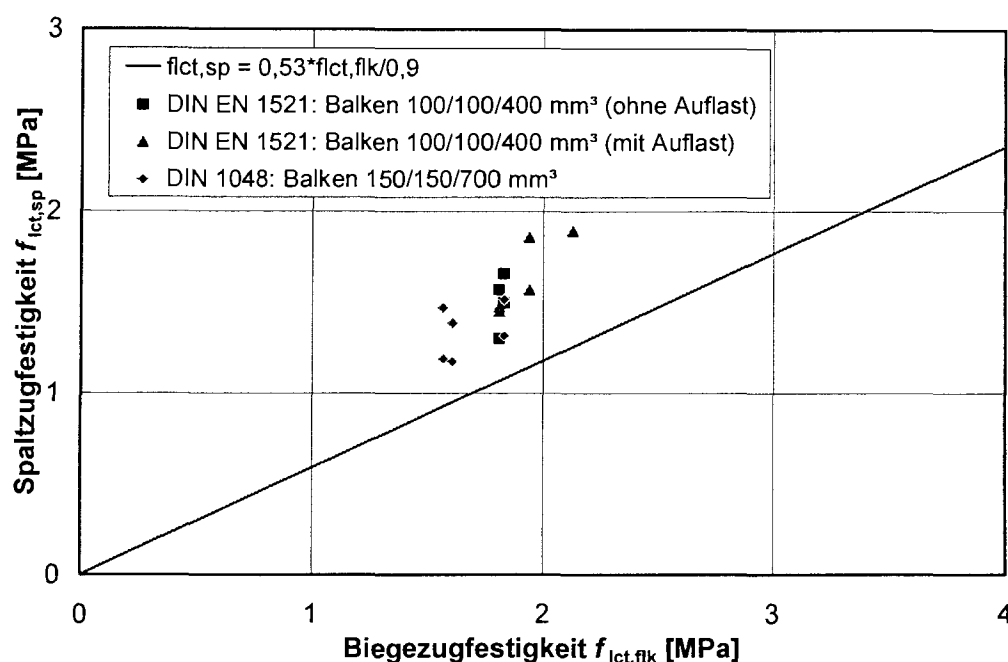


Bild 11: Vergleich der gemessenen Biegezugfestigkeit und der gemessenen Spaltzugfestigkeit des haufwerksporigen Leichtbetons (Messreihe UniBw)

4.3 Vergleich der Angaben zur Biegezugfestigkeit in DIN EN 1520 mit Messwerten

Bild 12 gibt einen Überblick über die für die Auswertung zur Verfügung stehenden Daten. Das Diagramm wird dominiert von den Daten aus [Lit 3]. Darüber hinaus liegen nur wenige Wertepaare im Bereich der unteren Festigkeitsklassen vor. Lediglich die Werte der zusätzlichen Versuche (UniBw) liegen in einem höheren Festigkeitsbereich.

Die Messwerte der Biegezugfestigkeit sind in Bild 13 den rechnerisch mit den Gleichungen (9) bis (11) aus den jeweiligen Druckfestigkeiten ermittelten Biegezugfestigkeitswerten gegenübergestellt. Der rechnerische Ansatz bildet nahezu eine obere Grenzlinie und stellt somit einen konservativen Ansatz dar. Lediglich eine kleinere Versuchsserie (Messreihe 3) weicht mit größeren berechneten Biegezugfestigkeitswerten deutlich ab.

Die Messreihen 5 und 6 in Bild 12 und Bild 13 stammen von haufwerksporigen Leichtbetonen mit geschäumter Matrix. Zu diesen beiden Messreihen gehören die parallel durchgeführten Untersuchungen mit klassisch haufwerksporigen Leichtbetonen, die in den beiden Bildern als Messreihen 3 und 4 bezeichnet sind.

In Bild 14 werden die Messwerte der Biegezugfestigkeit aus [Lit 3] mit den rechnerisch nach DIN 1045-1 ermittelten charakteristischen Biegezugfestigkeitswerten verglichen. Hierzu wurden die in Kapitel 4.2 beschriebenen Umrechnungen auf die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen etc. berücksichtigt, obwohl diese explizit nur für Würfel gilt.

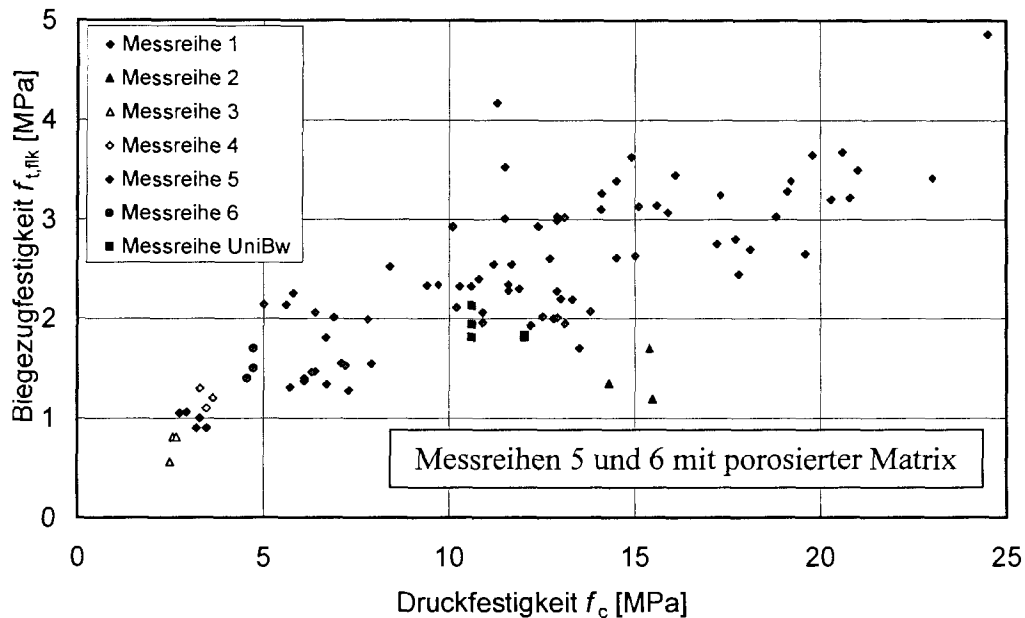


Bild 12: Vergleich gemessener Biegezugfestigkeitswerte mit den Werten der Druckfestigkeit

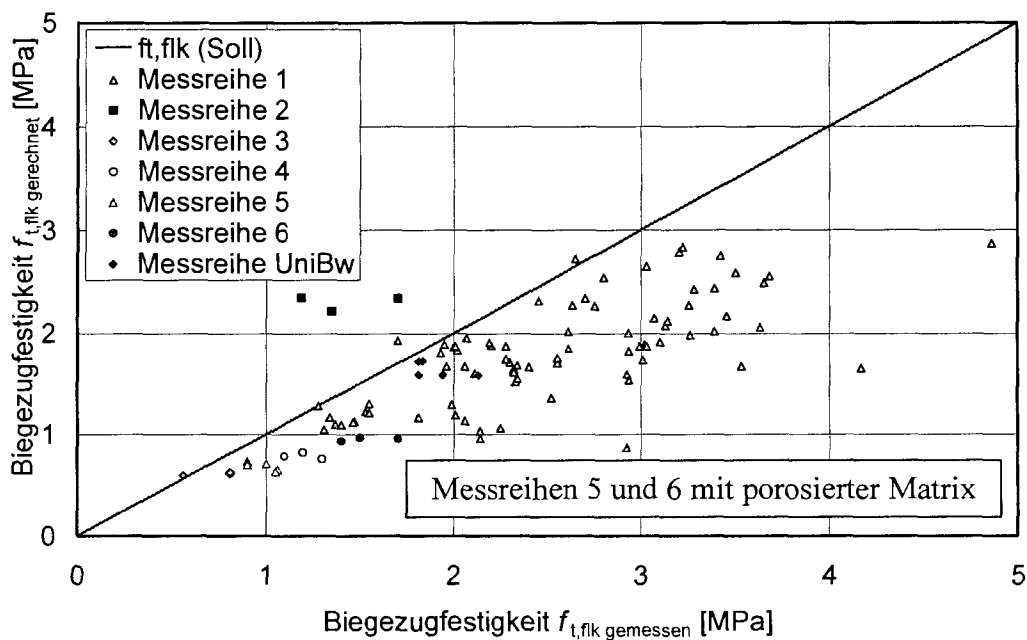


Bild 13: Vergleich gemessener Biegezugfestigkeitswerte mit den nach DIN EN 1520 berechneten charakteristischen Werten

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

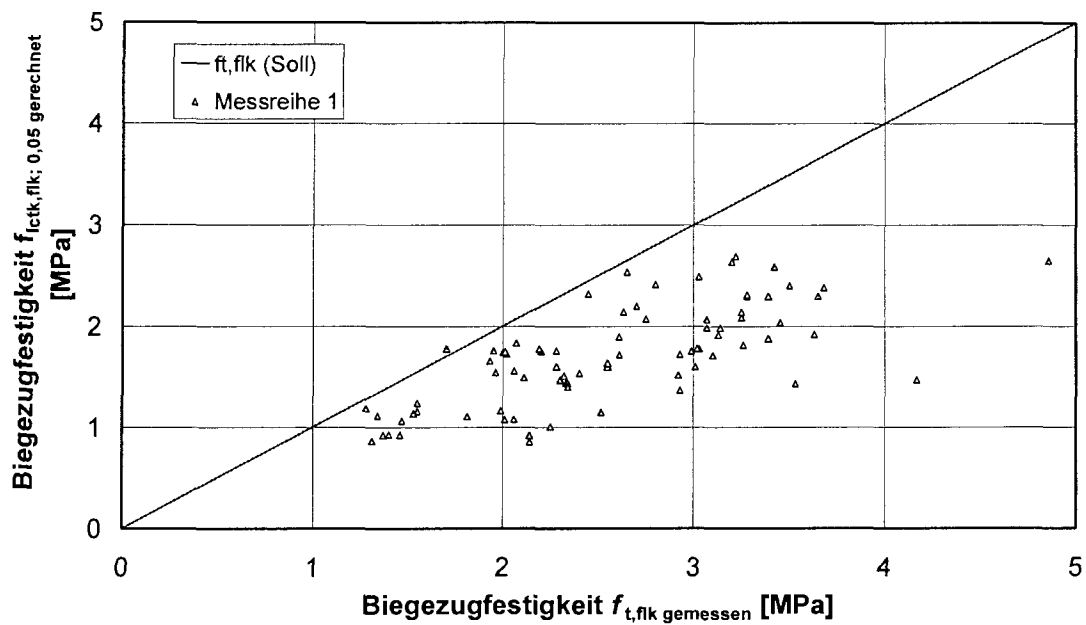


Bild 14: Vergleich gemessener Biegezugfestigkeitswerte mit den nach DIN 1045-1 berechneten charakteristischen Werten

5 Spannungsdehnungslinie

5.1 Angaben zur Spannungsdehnungslinie in den Normen

5.1.1 DIN EN 1520

Bild 15 zeigt die idealisierte bilineare Spannungsdehnungslinie des LAC. Der Höchstwert der Stauchung ε_{cu} wird nach Gleichung (19) in Abhängigkeit von der Trockenroh-dichte begrenzt.

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035 \cdot \eta_1 \geq 0,002 \quad (19)$$

mit

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6(\rho / 2200) \quad (\text{vgl. Gleichung (2)}) \quad (20)$$

Für den Faktor η_1 wird auf Gleichung (2) Bezug genommen. Dies ist irreführend, weil zu dieser Gleichung auch ein Gültigkeitsbereich für die Rohdichte angegeben wird ($\rho > 1400 \text{ kg/m}^3$), dieser Gültigkeitsbereich aber für die Spannungsdehnungslinie fehlt. Damit ergibt sich eine unterschiedliche Eingrenzung je nachdem, ob der Gültigkeitsbereich berücksichtigt wird oder nicht

$0,0027 \leq \varepsilon_{cu} \leq 0,0033$ mit Berücksichtigung der Begrenzung ($\rho > 1400$) bzw.

$0,0020 \leq \varepsilon_{cu} \leq 0,0033$ ohne Berücksichtigung der Begrenzung ($\rho > 1400$).

Im letztgenannten Fall wird die untere Grenze bei einer Trockenroh-dichte von 629 kg/m^3 erreicht. Die im Bild 15 angegebene obere Grenze wird in keinem Fall erreicht, weil die Bezugsgröße für die Trockenroh-dichte 2200 kg/m^3 ist. Diese Unstimmigkeit ist auch in DIN 1045-1 zu finden.

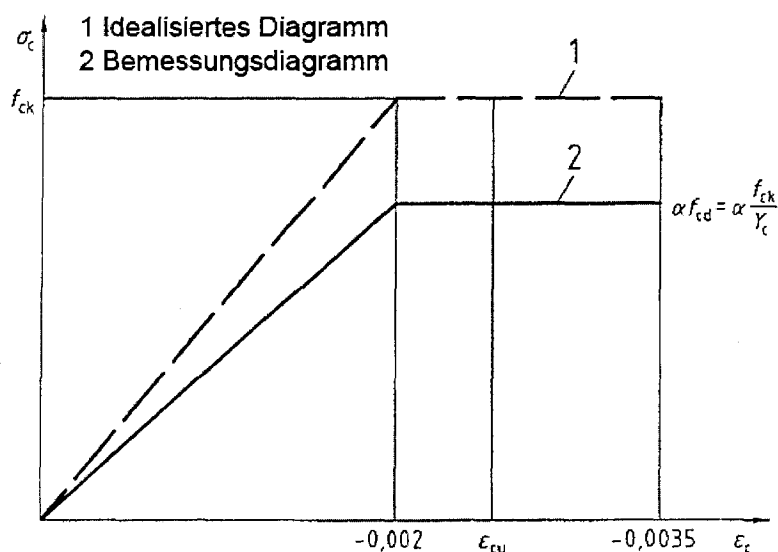


Bild 15: Bilineares Spannungsdehnungsdiagramm für druckbeanspruchten LAC zur Querschnittsbemessung

Langzeiteinflüsse werden über den Beiwert α berücksichtigt, der gemäß der Norm im Allgemeinen zu $0,80$ angenommen werden darf. Der Sicherheitsbeiwert γ_c wird national in DIN 4213 festgelegt (Tabelle 18).

Tabelle 18: Teilsicherheitsbeiwerte γ_c für die Materialeigenschaften des LAC

Teilsicherheitsbeiwert		Grenzzustand der Tragfähigkeit ULS	Außergewöhnliche Einwirkungen
LAC	bewehrte Bauteile	1,40	1,20
	unbewehrte Bauteile oder Bauteile mit statisch nicht anrechenbarer Bewehrung	1,70	1,40

5.1.2 DIN 4028

Die Norm enthält eine lineare Spannungsdehnungslinie für die Ermittlung der Bruchschnittgrößen. Für die Biegebemessung werden die Werte durch den Sicherheitsbeiwert $\gamma = 2,1$ geteilt. Für ungünstige Beanspruchungen bis zum Einbau beträgt der Sicherheitsbeiwert $\gamma = 1,3$.

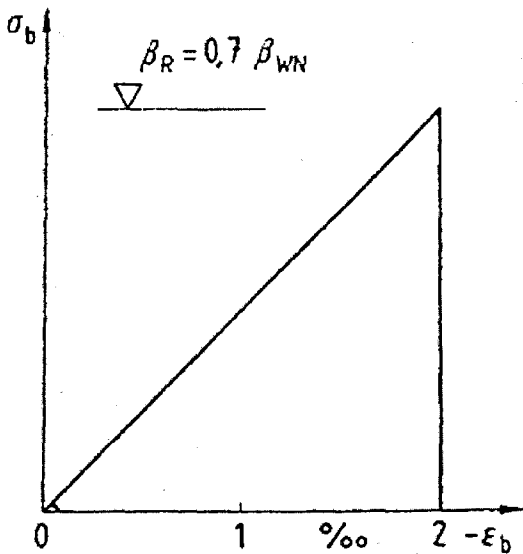


Bild 16: Rechnerische Spannungsverteilung in der Biegedruckzone der Dielen im Bruchzustand

5.1.3 DIN 4232

Die Norm enthält keine Angaben zur Spannungsdehnungslinie des haufwerksporigen Leichtbetons.

5.1.4 DIN 1045-1

In DIN 1045-1 ist der Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit der Wert f_{lcd} zugrunde zu legen:

$$f_{lcd} = \alpha \cdot f_{lck} / \gamma_c \quad (21)$$

Die Sicherheitsbeiwerte für bewehrten und unbewehrten Leichtbeton enthält Tabelle 19.

Tabelle 19: Teilsicherheitsbeiwerte γ_c für die Materialeigenschaften des LC

Teilsicherheitsbeiwert		Ständige und vorübergehende Bemessungssituation	Außergewöhnliche Bemessungssituation
LC	bewehrte Bauteile	1,5	1,3
	unbewehrte Bauteile oder Bauteile mit statisch nicht anrechenbarer Bewehrung	1,8	1,55
	Fertigteile	1,35	

Die Norm lässt drei Spannungsdehnungslinien zu (Bild 17 bis Bild 19). Im Gegensatz zum Normalbeton wird der Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Druckfestigkeit niedriger gewählt. Der Beiwert α für Leichtbeton ist bei Verwendung des Parabel-Rechteck-Diagramms (Bild 17) oder des Spannungsblocks nach Bild 18, $\alpha = 0,75$, bei Verwendung des bilinearen Diagramms nach Bild 19, $\alpha = 0,80$ zu setzen.

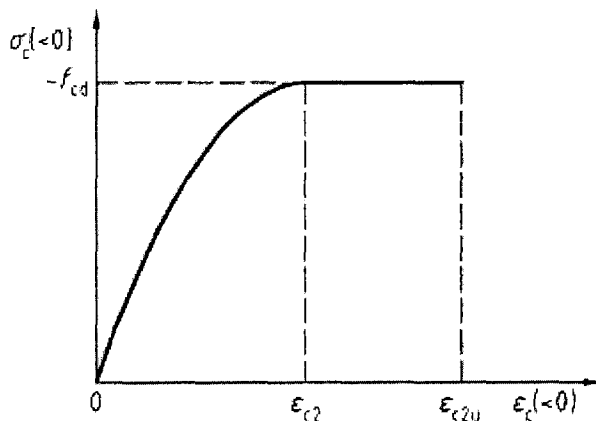


Bild 17: Parabel-Rechteck-Diagramm nach DIN 1045-1

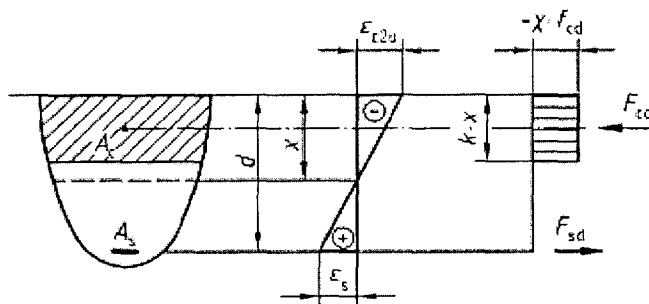


Bild 18: Spannungsblock nach DIN 1045-1

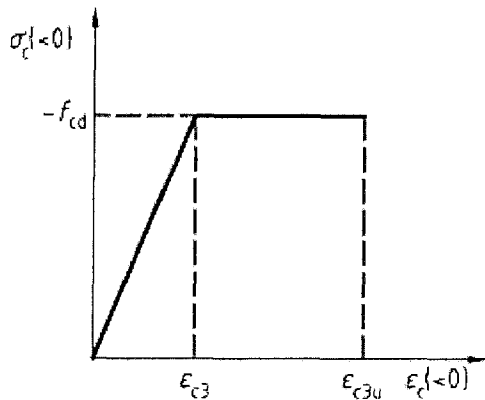


Bild 19: Bilineare Spannungsdehnungslinie nach DIN 1045-1

Der Kurvenverlauf der bilinearen Spannungsdehnungslinie (Bild 19) hat für die Dehnung bei Erreichen der Festigkeitsgrenze einen festen Wert von $\varepsilon_{lc3} = -1,8 \text{ mm/m}$. Die Maximaldehnung wird durch die Gleichungen (22) und (23) in Abhängigkeit von der Trockenrohddichte beschrieben:

$$\varepsilon_{lc3u} = -3,5\eta_1 \geq \varepsilon_{c3u} \quad (22)$$

mit

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6(\rho/2200) \quad (23)$$

5.2 Vergleich der Angaben zur Spannungsdehnungslinie in DIN EN 1520 mit denen in den anderen Normen

Die Spannungsdehnungslinie stimmt nur für niedrige Rohdichten ($< 629 \text{ kg/m}^3$) mit dem Diagramm in DIN 4028 (Bild 16) überein. Diese Rohdichten sind in DIN 4028 nicht enthalten.

Die Formulierung der Spannungsdehnungslinie in DIN EN 1520 gleicht dem Ansatz in DIN 1045-1. Unterschiede gibt es bei den Sicherheitsbeiwerten. Sie sind für bewehrte und unbewehrte Bauteile in DIN EN 1520 niedriger als in DIN 1045-1. Allerdings enthält DIN 1045-1 zusätzlich für Fertigteile einen Sicherheitsbeiwert, der wiederum unter den Vorgaben der DIN EN 1520 liegt und mit der Auflage zusätzlicher Überwachungsmaßnahmen verbunden ist.

5.3 Vergleich der Angaben zur Spannungsdehnungslinie in DIN EN 1520 mit Messwerten

Spannungsdehnungslinien des haufwerksporigen Leichtbetons konnten weder aus der Umfrage unter den Produzenten von Elementen aus haufwerksporigem Leichtbeton erhalten, noch in der Literatur gefunden werden. Aus diesem Grund wurden Versuche an der UniBw an Zylindern 150/300 mm durchgeführt. Diese in Bild 20 gezeigten Kurven zeigen nicht den nahezu linearen Verlauf bis zu Maximum, wie er für gefügedichte Leichtbetone typisch ist, die mit einer Leichtsandmatrix hergestellt wurden. Die gemessenen Spannungsdehnungslinien ähneln eher den Kurven von Normalbeton, wenn man von der geringeren Bruchdehnung absieht.

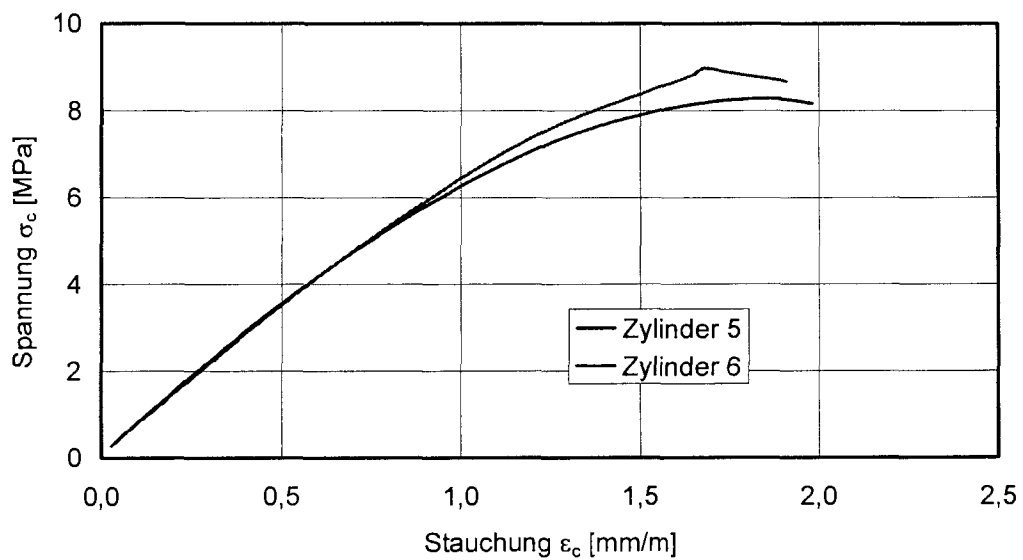


Bild 20: Spannungsdehnungslinien von haufwerksporigem Leichtbeton (Messreihe UniBw)

6 Elastizitätsmodul

6.1 Angaben zum Elastizitätsmodul in den Normen

6.1.1 DIN EN 1520

Der Elastizitätsmodul darf aus der Druckfestigkeit wie folgt abgeleitet werden:

$$E_{cm} = 10000 f_{ck}^{1/3} \cdot \eta_2 \quad (24)$$

mit

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

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

$$\eta_2 = (\rho / 2200)^2 \quad \text{für } \rho > 1400 \text{ kg/m}^3 \quad (25)$$

$$\eta_2 = 0,64 (\rho / 2200) \quad \text{für } \rho \leq 1400 \text{ kg/m}^3 \quad (26)$$

Der Elastizitätsmodul kann alternativ experimentell nach DIN EN 1352 an aus dem Bauteil entnommenen Proben mit den Abmessungen $h/b/L = 100/100/300 \text{ mm}^3$ ermittelt werden. Die Probekörper sind so zu entnehmen, dass ihre Längsachse in der Ebene der nach dem Einbau wirkenden Druckkraft liegt. Die Norm lässt andere Abmessungen mit Schlankheiten $2 \leq L/D \leq 4$ zu, allerdings sind keine separat hergestellten Probekörper vorgesehen. Die Proben müssen einen massebezogenen Feuchtegehalt von mindestens 4 % haben.

Aus dem Versuch wird der Elastizitätsmodul nach Gleichung (27) bestimmt. Die Belastungsgeschwindigkeit entspricht der für die Bestimmung der Druckfestigkeit nach DIN EN 1354. Dazu werden vor und nach dem dritten Belasten die Beanspruchungen $\sigma_a (= 0,05 f_{ck})$ beziehungsweise $\sigma_b (= f_{ck}/3)$ 30 s konstant gehalten und die zugehörigen Stauungen ε_a und ε_b während der jeweils folgenden 30 s abgelesen (Bild 21). Danach ist die Probe zu entlasten. Wenn die Stauchungsdifferenzen der einzelnen Messstrecken um mehr als 40 % vom Mittelwert abweichen, ist die Probe neu auszurichten und der Versuch zu wiederholen.

$$E_c = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \quad (27)$$

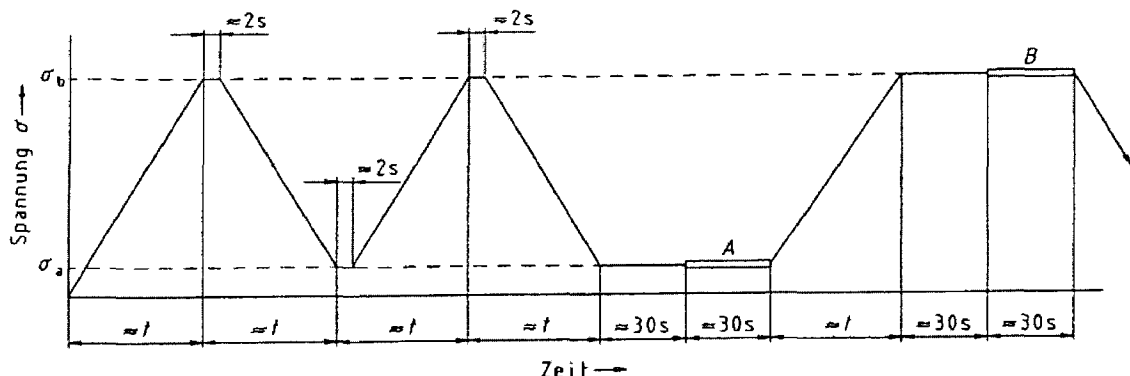


Bild 21: Belastungsschema für die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls nach DIN EN 1352

6.1.2 DIN 4028

Die Norm enthält keine Angaben zum Elastizitätsmodul des haufwerksporigen Leichtbetons.

6.1.3 DIN 4232

Die Norm enthält Angaben zum Elastizitätsmodul des Leichtbetons. Diese sind nur für den Nachweis der räumlichen Steifigkeit und Stabilität bestimmt.

Tabelle 20: Rechenwert für den Elastizitätsmodul beim Nachweis der räumlichen Steifigkeit und Stabilität nach DIN 4232

Festigkeitsklasse des Leichtbetons	Elastizitätsmodul E_{lb} [N/mm ²]
LB 2	2000
LB 5	4000
LB 8	6000

6.1.4 DIN 1045-1

Der Elastizitätsmodul stellt nach dieser Norm die Sekante bei $|\sigma_{lc}| \approx 0,4 f_{lcm}$ dar. Der Wert des Elastizitätsmoduls hängt von der Betondruckfestigkeit und der Trockenroh-dichte entsprechend der folgenden Gleichung ab:

$$E_{lcm} = \eta_E \cdot 9500 (f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (28)$$

mit

$$\eta_E = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2 \quad \rho \text{ in kg/m}^3 \quad (29)$$

6.2 Vergleich der Angaben zur Druckfestigkeit in DIN EN 1520 mit den anderen Normen

Der Elastizitätsmodul des haufwerksporigen Leichtbetons hängt nach DIN 4232 nur von der Festigkeitsklasse ab. Im Gegensatz dazu geht in DIN EN 1520 die charakteristische Festigkeit und die Trockenroh-dichte ein. Bild 22 zeigt einen Vergleich der rechnerischen Werte des Elastizitätsmoduls nach DIN EN 1520 gemäß Gleichung (24) mit den Angaben in DIN 4232. Die Nennfestigkeiten in DIN 4232 wurden für den Vergleich mit dem Faktor 0,85 auf Bauteilfestigkeiten umgerechnet, um eine einheitliche Basis zu erhalten. Gleichung (24) wurde nur für realistische Kombinationen aus Festigkeit und Rohdichte ausgewertet. Der Vergleich macht deutlich, dass die Angaben in DIN 4232 quasi eine untere Grenze des Elastizitätsmoduls beschreiben.

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

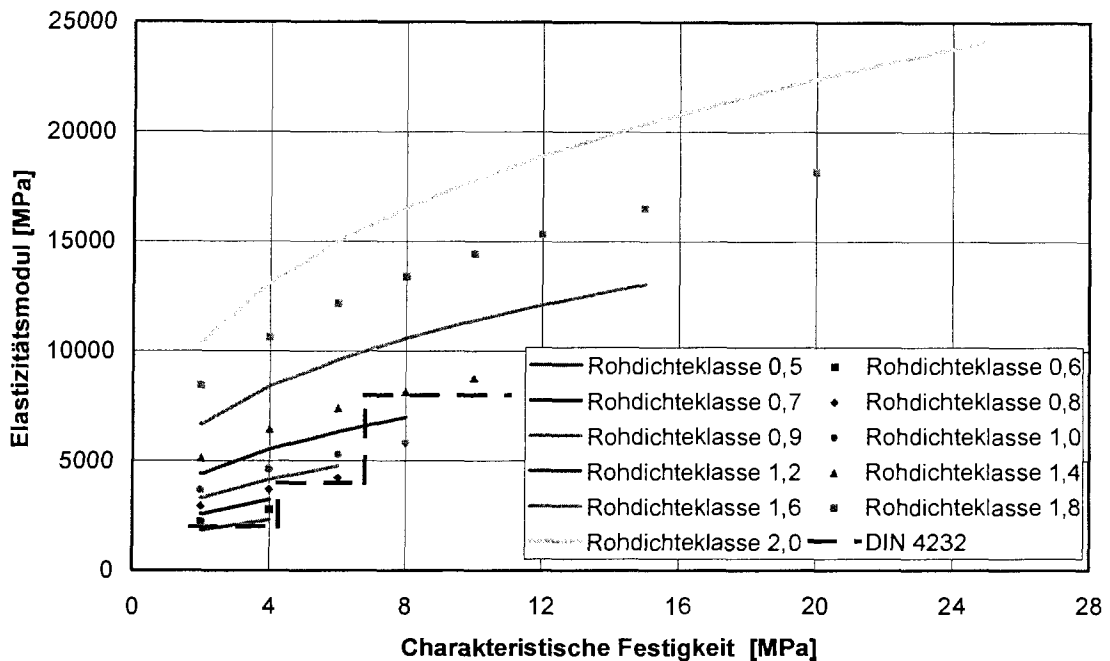


Bild 22: Vergleich der rechnerischen Werte des Elastizitätsmoduls nach DIN EN 1520 mit den Angaben in DIN 4232

Für einen Vergleich der rechnerischen Werte des Elastizitätsmoduls nach DIN EN 1520 bzw. nach DIN 1045-1 ist es zunächst erforderlich, für beide Normen eine vergleichbare Basis zu schaffen. Es bietet sich an, von der charakteristischen Festigkeit nach DIN EN 1520, $f_{ck, \text{DIN EN 1520}}$, auszugehen. Mit Hilfe der Gleichungen (5) und (3) sowie der Tabelle 11 wird eine Festigkeit *rechn.* $f_{ck, \text{DIN 1045-1}}$ berechnet, die für die Berechnung nach DIN 1045-1 genutzt werden kann (Gleichung (30)).

$$\text{rechn. } f_{ck, \text{DIN 1045-1}} = \frac{k_L}{k_{Zyl} \cdot k_B} \cdot f_{ck, \text{DIN EN 1520}} \quad (30)$$

mit

k_L Umrechnung Wasserlagerung → Trockenlagerung (Tabelle 10): $k_L = 0,92$

k_{Zyl} Umrechnung 100-mm-Würfel → 150-mm-Zylinder (Tabelle 11)

k_B Umrechnung Bohrkerne → separat hergestellter Probekörper: $k_B = 0,85$

k_L gilt prinzipiell nur für Würfel, wird hier jedoch auch für Zylinder angesetzt. Diese Schritte wurden im linken Teil der Tabelle 21 für alle Festigkeitsklassen der DIN EN 1520 umgesetzt. Die in Tabelle 21 gewählten Rohdichten korrespondieren mit den Maximalwerten der Kurven in Bild 22. Die Rohdichten wurden so gewählt, dass die zugehörige Festigkeitsklasse noch erreicht werden kann.

Die Korrekturfaktoren η_E werden nach den Gleichungen (25) und (26) für DIN EN 1520 bzw. nach Gleichung (29) für DIN 1045-1 berechnet. Die rechnerischen Werte des Elastizitätsmoduls nach DIN EN 1520 werden über Gleichung (24) ermittelt. Für DIN 1045-1 wird Gleichung (28) benutzt. Der Quotient der so ermittelten rechnerischen Elastizitätsmoduln steht in der letzten Spalte von Tabelle 21.

Die Fallunterscheidung bei der Berechnung des Korrekturfaktors nach DIN EN 1520 entsprechend den Gleichungen (25) und (26) führt bei den gewählten (Extrem-)Kombinationen aus Rohdichte und erzielbarer Festigkeit zu einem höheren Wert für den Elastizitätsmodul, als sich für gefügedichten Leichtbeton nach DIN 1045-1 ergibt (Bild 23). Bei diesem Vergleich darf nicht übersehen werden, dass die Unterschiede in Festigkeitsklassen bzw. Rohdichtebereichen auftreten, für die DIN 1045-1 nicht gilt.

Tabelle 21: Vergleich der rechnerischen Werte des Elastizitätsmoduls nach DIN EN 1520 bzw. DIN 1045-1

$f_{ck, DIN EN 1520}$	k_B (Gl. (5))	k_L (Gl. (3))	k_{Zyl} Tabelle 11	rechn. $f_{ck, DIN 1045-1}$	ρ_d	η_E , DIN EN 1520	η_E , DIN 1045-1	$E_{DIN EN 1520}$	$E_{DIN 1045-1}$	$\frac{E_{DIN EN 1520}}{E_{DIN 1045-1}}$
[MPa]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[kg/m ³]	[-]	[-]	[GPa]	[GPa]	[-]
2	0,85	0,92	1,05	2,1	500	0,15	0,05	1,8	1,1	1,73
4	0,85	0,92	1,05	4,1	800	0,23	0,13	3,7	2,9	1,28
6	0,85	0,92	1,06	6,1	1100	0,32	0,25	5,8	5,7	1,01
8	0,85	0,92	1,07	8,1	1300	0,38	0,35	7,6	8,4	0,90
10	0,85	0,92	1,08	10,0	1400	0,41	0,40	8,8	10,1	0,87
12	0,85	0,92	1,10	11,8	1500	0,46	0,46	10,6	11,9	0,89
15	0,85	0,92	1,12	14,5	1600	0,53	0,53	13,0	14,2	0,92
20	0,85	0,92	1,15	18,8	1750	0,63	0,63	17,2	18,0	0,95
25	0,85	0,92	1,18	22,9	1900	0,75	0,75	21,8	22,2	0,98

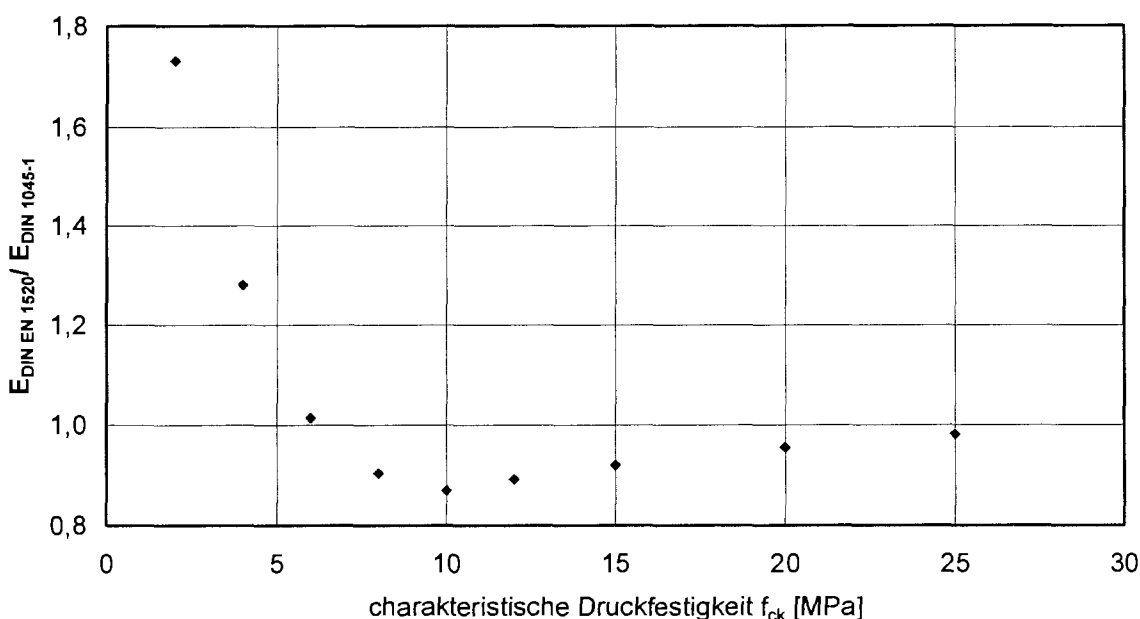


Bild 23: Quotient des rechnerischen Elastizitätsmoduls nach DIN EN 1520 und nach DIN 1045-1 in Abhängigkeit von der Festigkeitsklasse

Ab einer Festigkeitsklasse 8 spiegeln die Gleichungen die normalen Erwartungen wider und liefern für gefügedichten Leichtbeton höhere Werte des Elastizitätsmoduls als für haufwerksporigen Leichtbeton. Wie Bild 24 belegt, machen sich die numerischen Ungereimtheiten bei höheren Rohdichten (in diesem Fall Rohdichteklasse 2,0) nicht bemerkbar.

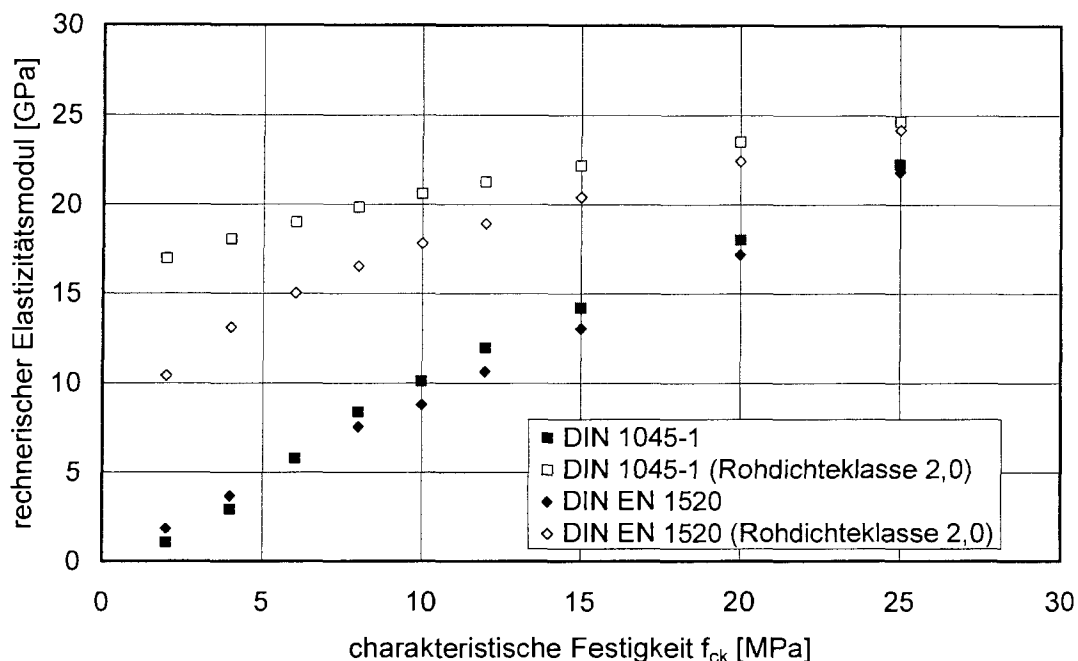


Bild 24: Auswertung der Gleichungen (24) und (28) für praktikable untere Rohdichteklassen und die obere Rohdichteklasse 2,0

6.3 Vergleich der Angaben zum Elastizitätsmodul in DIN EN 1520 mit Messwerten

In Dänemark wurden umfangreiche Untersuchungen zu den mechanischen Kennwerten des haufwerksporigen Leichtbetons durchgeführt [Lit 1]. Im Zuge dieser Untersuchungen wurden Proben gemäß der dänischen Norm DS434 geprüft, die mit den entsprechenden Prüfungen für die Kennwerte in DIN EN 1520 weitgehend übereinstimmen [Lit 1]. Die zusammengehörigen Proben (f_c und E) wurden für diese Untersuchung jeweils aus dem gleichen Element entnommen. An den Proben für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls wurde anschließend noch die Festigkeit ermittelt. Der Zusammenhang $f_c - \rho$ dieser Werte stimmte mit dem Verlauf der nur auf Festigkeit geprüften Probekörper überein.

Bild 25 zeigt den Vergleich der normgemäß experimentell ermittelten Werte des Elastizitätsmoduls mit den nach Gleichung (24) rechnerisch vorhergesagten Werten. Der Eingangswert f_c stammt direkt von den Proben für die Bestimmung des Elastizitätsmoduls, um Abweichungen durch unterschiedliche Rohdichten bei diesem Vergleich auszuschließen. Die Auswertung deutet auf eine konservative Prognose des tatsächlichen gemessenen Elastizitätsmoduls hin. Die gemessenen Werte werden bei niedrigen Festig-

keiten (Bild 26) und insbesondere bei niedrigen Rohdichten (Bild 27) deutlich unterschätzt.

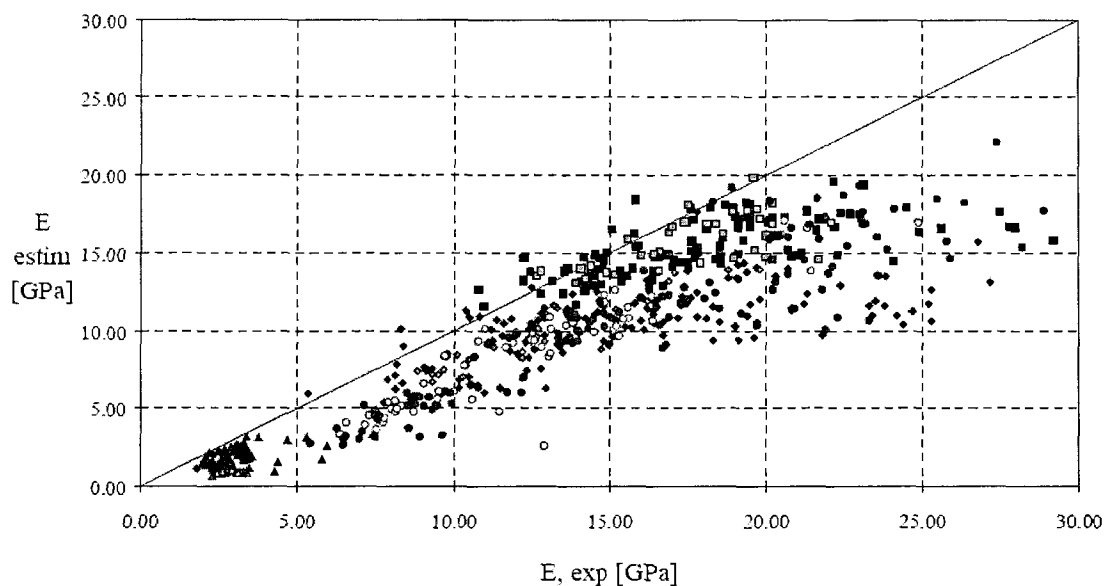


Bild 25: Vergleich experimentell ermittelter Werte des Elastizitätsmoduls mit den rechnerisch vorhergesagten Werten nach Gleichung (24) [Lit 1]

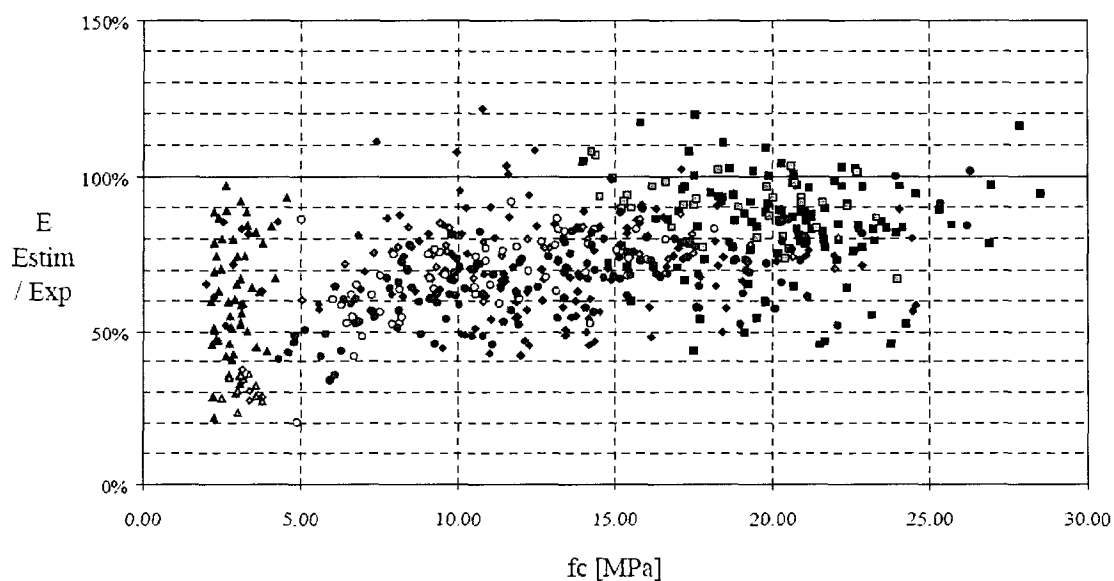


Bild 26: Quotient der rechnerischen und der experimentell ermittelten Werte des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Festigkeit [Lit 1]

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

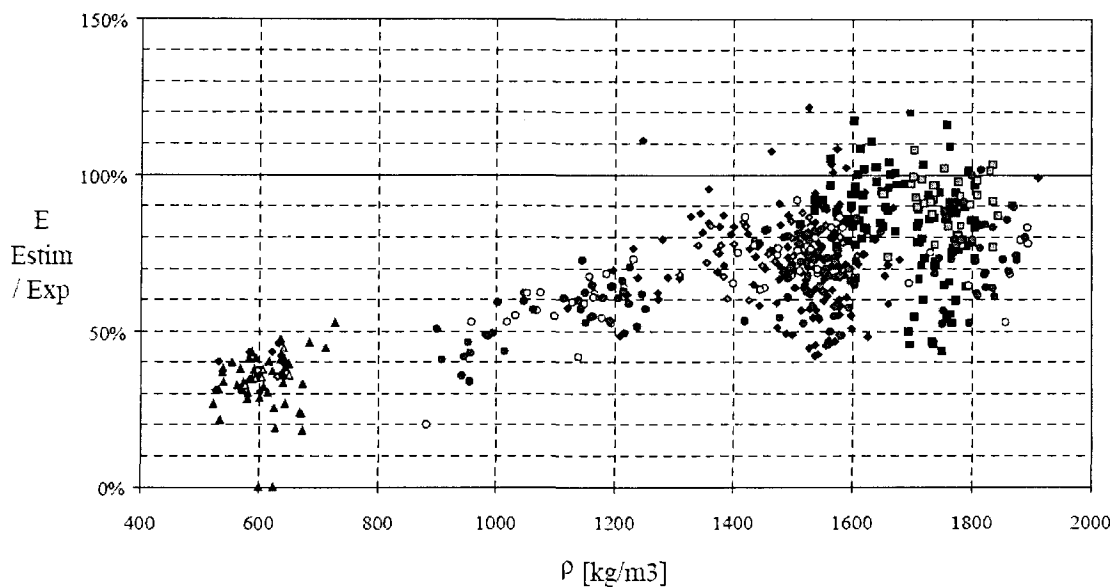


Bild 27: Quotient der rechnerischen und der experimentell ermittelten Werte des Elastizitätsmoduls in Abhängigkeit von der Rohdichte [Lit 1]

Bei den wenigen Elastizitätsmodulwerten, die an separat hergestellten Proben ermittelt wurden, liegt im Bereich kleiner Werte eine gute Übereinstimmung vor. In einer Serie (Messreihe 5) werden die gemessenen Werte durch die Rechnung überschätzt. Die Leichtbetone der Messreihen 3 und 4 hatten eine porosierte Matrix. Die Messreihen 1 und 2 wurden an den korrespondierenden klassisch haufwerksporigen Leichtbetonen ermittelt.

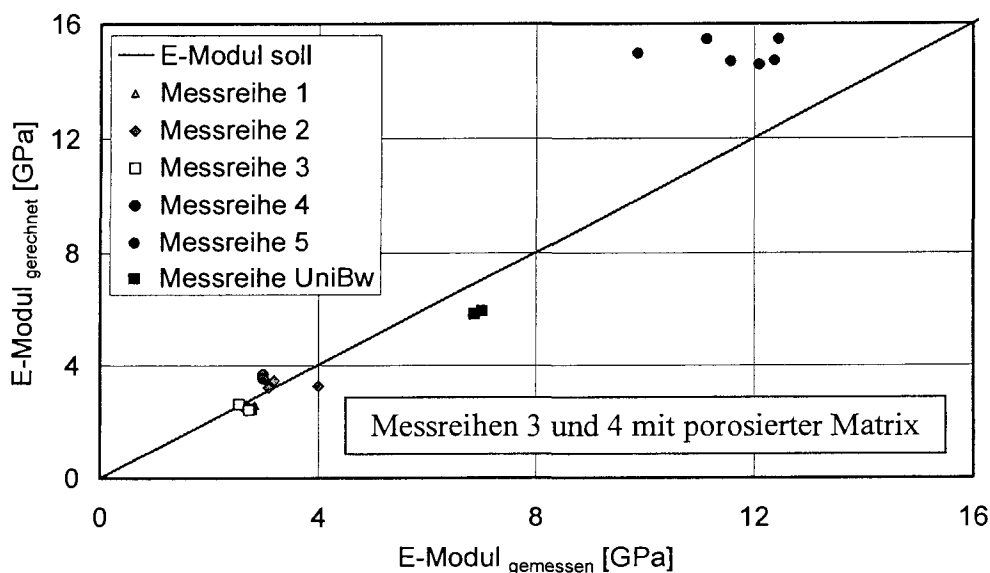


Bild 28: Vergleich von Elastizitätsmodulen, die an separat hergestellten Proben bestimmt wurden, mit berechneten Elastizitätsmodulen (auf Basis separat hergestellter Proben)

7 Querdehnzahl

7.1 Angaben zur Querdehnzahl in den Normen

7.1.1 DIN EN 1520

Für Bemessungszwecke darf die Querdehnzahl für elastische Dehnungen zu 0,2 angenommen werden. Wenn eine Rissbildung in zugbeanspruchtem Beton zulässig ist, darf die Querdehnzahl zu Null gesetzt werden.

7.1.2 DIN 4028

Die Norm enthält keine Angaben zur Querdehnzahl des haufwerksporigen Leichtbetons.

7.1.3 DIN 4232

Die Norm enthält keine Angaben zur Querdehnzahl des haufwerksporigen Leichtbetons.

7.1.4 DIN 1045-1

Für Bemessungszwecke darf die Querdehnzahl für elastische Dehnungen näherungsweise zu Null angenommen werden.

8 Wärmedehnzahl

8.1 Angaben zur Wärmedehnzahl in den Normen

8.1.1 DIN EN 1520

Für Bemessungszwecke darf die Wärmedehnzahl zu $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ angenommen werden.

8.1.2 DIN 4028

Die Norm enthält keine Angaben zur Wärmedehnzahl des haufwerksporigen Leichtbetons.

8.1.3 DIN 4232

Die Norm enthält keine Angaben zur Wärmedehnzahl des haufwerksporigen Leichtbetons.

8.1.4 DIN 1045-1

Für Bemessungszwecke darf die Wärmedehnzahl zu $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ angenommen werden. Der Unterschied zwischen den Wärmedehnzahlen von Stahl und Leichtbeton darf bei der Bemessung vernachlässigt werden.

9 Trocknungsschwinden

9.1 Angaben zum Trocknungsschwinden in den Normen

9.1.1 DIN EN 1520

Der Bemessungswert des Endwertes des Trocknungsschwindens $\varepsilon_{s\infty}$ darf angenommen werden zu:

$$\varepsilon_{s\infty} = \varepsilon_{s0} \cdot \eta_3 \quad (31)$$

mit

$\varepsilon_{s\infty}$ der Endwert des Trocknungsschwindens von LAC [mm/m];

ε_{s0} der Grundwert des Trocknungsschwindens von Normalbeton nach Tabelle 22 [mm/m];

η_3 Beiwert nach Tabelle 23

Tabelle 22: Grundwert des Trocknungsschwindens ε_{s0} von Normalbeton [mm/m]

Lage des Bauteils	Relative Luftfeuchtigkeit [%]	Wirksame Dicke $2 A_c/u$ [mm]	
		≤ 150	600
Innen	50	0,6	0,5
Außen	80	0,33	0,28

A_c ist die Netto-Querschnittsfläche des Betons (bei Hohlplatten ohne die Querschnittsfläche der Hohlräume) [mm²]

u ist der der umgebenden Atmosphäre ausgesetzte Umfang des Bauteils (bei Hohlplatten ohne die Querschnittsfläche der Hohlräume) [mm]

Tabelle 23: Beiwert η_3 zur Bestimmung des Endwertes des Trocknungsschwindens von LAC

Festigkeitsklasse	LAC 2	LAC 4	LAC 6	LAC 8	LAC 10	LAC 12	LAC 15	LAC 20	LAC 25
η_3	2,0	2,0	2,0	1,8	1,8	1,5	1,5	1,2	1,2

Das Schwinden darf experimentell nach DIN EN 1355 an aus dem Bauteil entnommenen Prismen mit den Abmessungen $h/b/L = 100/100/300 \text{ mm}^3$ ermittelt werden. Die Probekörper sind so zu entnehmen, dass ihre Längsachse in der Ebene der nach dem Einbau wirkenden Druckkraft liegt. Die Norm lässt Proben mit anderen Abmessungen zu, für die eine Korrelation der Ergebnisse sicherzustellen ist. Es sind keine separat hergestellten Probekörper vorgesehen.

Nach DIN EN 1355 wird das Schwinden als Vergleichsmessung zu Kriechversuchen durchgeführt. Die Probenkonditionierung stimmt daher überein. Die Probekörper sind vor dem Versuch bei maximal 60 °C zu konditionieren, bis ihr massenbezogener Feuchtegehalt $(6 \pm 2) \%$ beträgt. Nach Erreichen des gewünschten Feuchtegehalts sind die

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

Proben für mindestens 72 h bei $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ zu lagern, um eine gleichmäßige Feuchteverteilung zu gewährleisten. Der eigentliche Versuch erfolgt bei $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $(60 \pm 5) \%$.

9.1.2 DIN 4028

Die Norm enthält keine Angaben zum Schwinden des haufwerksporigen Leichtbetons.

9.1.3 DIN 4232

Die Norm enthält keine Angaben zum Schwinden des haufwerksporigen Leichtbetons.

9.1.4 DIN 1045-1

Die in dieser Norm angegebenen Schwinddehnungen $\varepsilon_{lc\infty}$ gelten für Konstruktionsleichtbetone, die nicht länger als 14 Tage feucht nachbehandelt werden und die üblichen Umgebungsbedingungen mit einer mittleren relativen Luftfeuchte zwischen 40 % und 100 % und mittleren Temperaturen zwischen $10 \text{ }^\circ\text{C}$ und $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ausgesetzt sind. Die Schwinddehnung des gefügedichteten Leichtbetons setzt sich aus den Anteilen Schrumpfdéhnung und Trocknungsschwinddehnung zusammen und darf für den Zeitpunkt $t = \infty$ wie folgt berechnet werden, sofern keine Versuchsergebnisse vorliegen:

$$\varepsilon_{lc\infty} = (\varepsilon_{cas\infty} + \varepsilon_{cds\infty}) \cdot \eta_3 \quad (32)$$

mit

$\varepsilon_{lc\infty}$ der Schwinddehnung des Betons zum Zeitpunkt $t = \infty$ [mm/m];

$\varepsilon_{cas\infty}$ der Schrumpfdéhnung zum Zeitpunkt $t = \infty$ nach [mm/m];

$\varepsilon_{cds\infty}$ der Trocknungsschwinddehnung zum Zeitpunkt $t = \infty$ [mm/m];

$\eta_3 = 1,6$ für LC12/13 und LC16/18

$= 1,2$ ab LC20/22

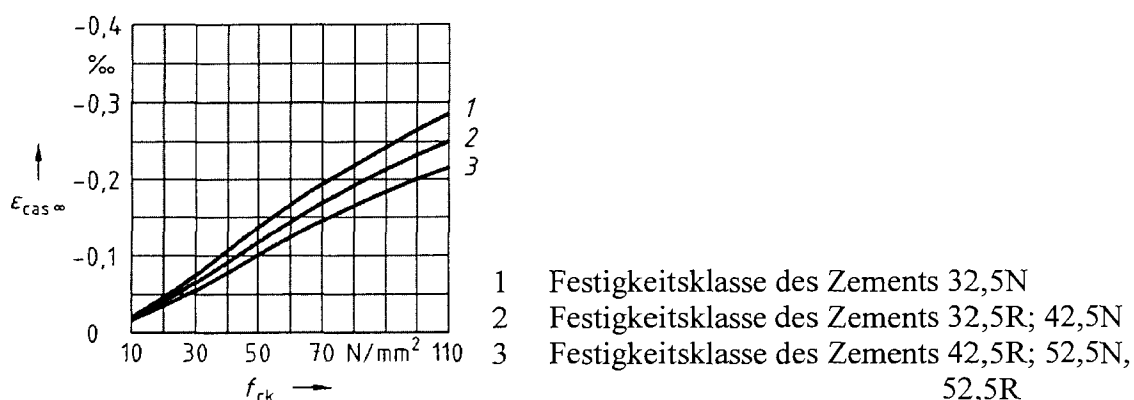


Bild 29: Schrumpfdéhnung zum Zeitpunkt $t = \infty$ für Normalbeton

Eine Norm für die Durchführung von Schwindversuchen an gefügedichtem Leichtbeton liegt nicht vor.

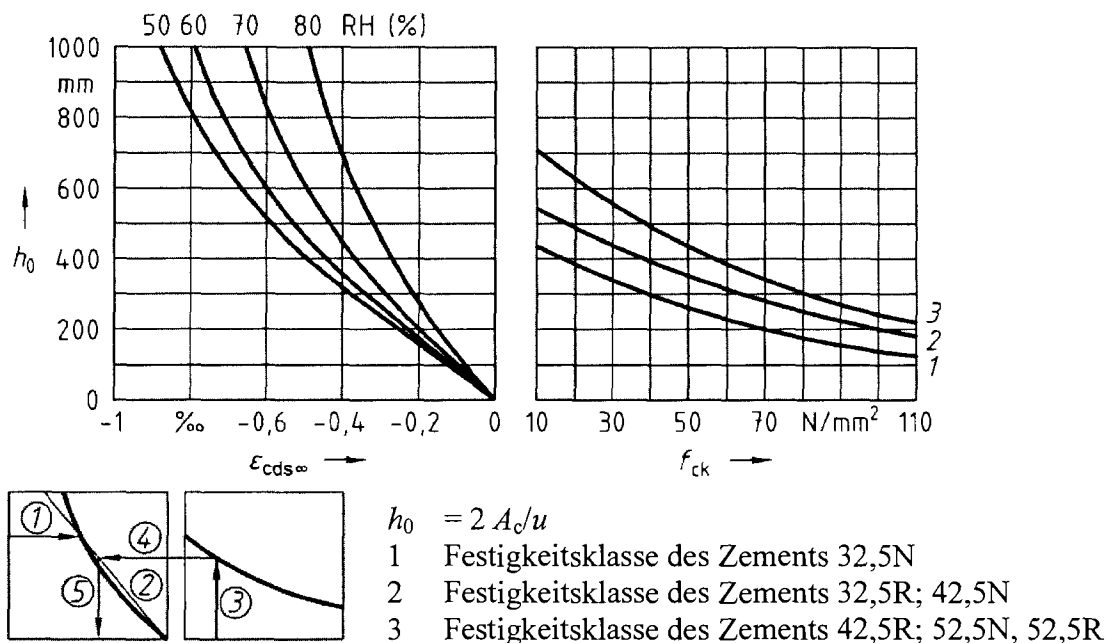


Bild 30: Trocknungsschwinddehnung $\epsilon_{c_{ds\infty}}$ zum Zeitpunkt $t = \infty$ für Normalbeton

9.2 Vergleich der Angaben zum Schwinden in DIN EN 1520 mit denen in DIN 1045-1

DIN EN 1520 nimmt beim Ansatz für das Schwinden Bezug auf Regelungen für Normalbeton. Der Schwindansatz in DIN EN 1520 (Gleichung (31)) berücksichtigt dabei nicht den bei gefügedichteten Betonen vorhandenen Anteil der Schrumpfdehnung (Gleichung (32) und Bild 29). DIN EN 1520 stellt für das Abschätzen des Trocknungsschwindens in Tabelle 22 ausgewählte Eckwerte für zwei Lagerungsbedingungen und zwei wirksame Dicken zur Verfügung, während in DIN 1045-1 das Trocknungsschwinden aus einem Nomogramm abgelesen wird (Bild 30).

Ein Vergleich der in Tabelle 22 aufgeführten Grundwerte des Trocknungsschwindens liefert für die Festigkeit $f_{ck} = 10$ MPa sowohl bei 50 % r. F. als auch bei 80 % r. F. übereinstimmende Werte für eine wirksame Dicke von 600 mm. Diese Abmessung ist für die hier betrachteten Fertigteile sicherlich zu hinterfragen, da die maximal üblichen Wanddicken in Deutschland nur 365 mm und in Österreich 380 mm betragen. Für höhere Festigkeitsklassen liefert DIN 1045-1 niedrigere Schwindwerte; niedrigere Festigkeit (< 10 MPa) können im Nomogramm nicht erfasst werden.

Ein Vergleich für Bauteile mit einer wirksamen Dicke von 150 mm ist nicht möglich, da aus dem Nomogramm in DIN 1045-1 im Festigkeitsbereich < 25 MPa erst Werte oberhalb einer Wanddicke von etwa 380 mm abgelesen werden können.

Die Angaben in DIN 1045-1 gelten für Betone, die üblichen Bedingungen ausgesetzt sind (vgl. Kapitel 9.1.4). Aus den Lagerungsbedingungen für die Probekörper nach DIN EN 1355 geht für den haufwerksporigen Leichtbeton hervor, dass dort die Bedingungen der Fertigteilproduktion (Härtekammer) simuliert werden. Es ist folglich mit einem abweichenden Schwindverhalten zu rechnen. Weiter decken die Prüfbedingungen nach DIN EN 1355 nur einen Teilbereich ($d_{ef} < 150$ mm; 50 % r.F) der Tabelle 22 ab.

Die Werte der Tabelle 22 übertreffen die entsprechenden Angaben in Tabelle 7 der DIN 4227-1:12/1979.

Im Gegensatz zu DIN 1045-1 wird der Einfluss der Festigkeitsklasse des Zements nicht beachtet. In [Lit 5] wurde ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem verwendeten Zement und dem Gesamtschwinden der untersuchten haufwerksporigen Leichtbetone mit Schaummörtelbindung festgestellt. Da diese Leichtbetone den hier behandelten sehr ähnlich sind, erscheint ein differenzierter Ansatz des Schwindens erforderlich zu sein.

9.3 Vergleich der Angaben zum Schwinden in DIN EN 1520 mit Messwerten

Untersuchungen zum Schwinden des haufwerksporigen Leichtbetons liegen aus verschiedenen Prüfungen an Wänden ($d=300\text{ mm}$) der Festigkeitsklasse LB 2 in der Rohdichteklasse 0,7 vor. Die Leichtbetone wurden mit einem CEM I 32,5R hergestellt. Untersucht wurden Leichtbetone sowohl mit einer klassisch haufwerksporigen Struktur als auch mit einer porosierten Matrix. Neben den Wänden wurden jeweils Zylinder (150/300 mm) geprüft. Die Leichtbetone waren zum Zeitpunkt der Messung 300 Tage (Wand 1/Zylinder 1) bzw. deutlich über 500 Tage alt. Die Schwindkurven der Zylinder verliefen nach 500 Tagen nahezu horizontal. Die Wände 2 und 3 erreichten auch nach fast 5 Jahren keine größeren Schwindverformungen als die in Bild 31 Aufgeführten. Die Messwerte sind in Bild 31 den berechneten Schwinddehnungen nach DIN EN 1520 gegenübergestellt.

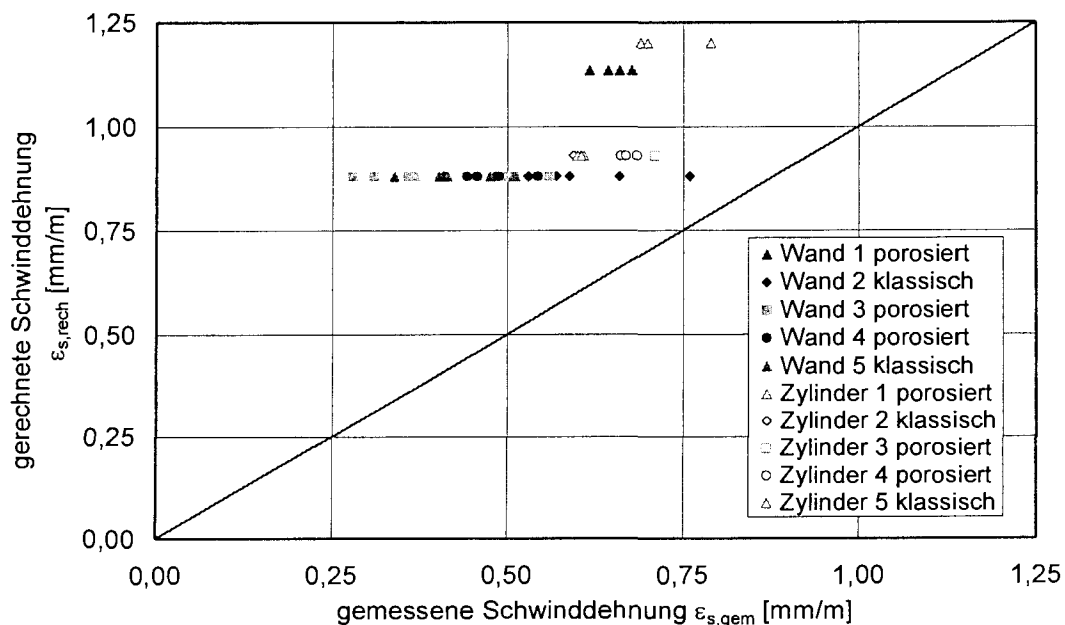


Bild 31: Vergleich nach DIN EN 1520 gerechneter Werte des Elastizitätsmoduls mit gemessenen Werten

Der Vergleich zeigt, dass die Schwinddehnungen durch den Ansatz in der Norm überschätzt werden. Dies gilt insbesondere, wenn man die nach DIN EN 1355 vorgesehene Probenkonditionierung beachtet, die bei den hier vorliegenden Versuchen nicht zur

Anwendung kam. Die Messungen an Wand 1/Zylinder 1 begannen direkt nach dem Entschalen im Alter von 3 Tagen. Bei den anderen Proben begann das Austrocknen und die Schwindmessung nach 7 Tagen. Dem ging eine normale Konditionierung im Klimaraum voran. In beiden Fällen sind folglich Schwinddehnungen zu erwarten, die deutlich über den ε_s -Werten liegen, die bei einer Prüfung nach DIN EN 1355 zu erwarten wären.

Die deutlicheren Abweichungen bei den Wänden deuten auf eine Fehleinschätzung des Einflusses der wirksamen Dicke hin.

10 Kriechen

10.1 Angaben zum Kriechen in den Normen

10.1.1 DIN EN 1520

Der Bemessungswert der Endkriechzahl $\varphi(\infty, t_0)$ kann als das Produkt von $\varphi_0(\infty, t_0)$ und den Beiwerten η_2 und η_4 berechnet werden zu:

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_0(\infty, t_0) \cdot \eta_2 \cdot \eta_4 \quad (33)$$

$\varphi_0(\infty, t_0)$ wird aus Tabelle 24 entnommen, η_2 aus den Gleichungen (25) bzw. (26) berechnet und η_4 aus Tabelle 25 abgelesen.

Tabelle 24: Endkriechzahl $\varphi_0(\infty, t_0)$ von Normalbeton

Alter bei der Belastung t_0	Wirksame Dicke $2 A_c/u$ [mm]					
	50	150	600	50	150	600
	Trockene atmosphärische Bedingungen (innen)			Feuchte atmosphärische Bedingungen (außen)		
	(RH 50 %)			(RH 80 %)		
1	5,5	4,6	3,7	3,6	3,2	2,9
7	3,9	3,1	2,6	2,6	2,3	2,0
28	3,0	2,5	2,0	1,9	1,7	1,5
90	2,4	2,0	1,6	1,5	1,4	1,2
365	1,8	1,5	1,2	1,1	1,0	1,0

A_c ist die Netto-Querschnittsfläche des Betons (bei Hohlplatten ohne die Querschnittsfläche der Hohlräume) [mm²]

u ist der der umgebenden Atmosphäre ausgesetzte Umfang des Bauteils (bei Hohlplatten ohne die Querschnittsfläche der Hohlräume) [mm]

Tabelle 25: Beiwert η_4 zur Bestimmung der Endkriechzahl von LAC

Festigkeitsklasse	LAC 2	LAC 4	LAC 6	LAC 8	LAC 10	LAC 12	LAC 15	LAC 20	LAC 25
η_4	1,8	1,8	1,8	1,5	1,5	1,3	1,3	1,0	1,0

Das Kriechen darf experimentell nach DIN EN 1355 an aus dem Bauteil entnommenen Prismen mit den Abmessungen $h/b/L = 100/100/300 \text{ mm}^3$ ermittelt werden. Die Probekörper sind so zu entnehmen, dass ihre Längsachse in der Ebene der nach dem Einbau wirkenden Druckkraft liegt. Die Norm lässt Proben mit anderen Abmessungen zu, für die eine Korrelation der Ergebnisse sicherzustellen ist. Es sind keine separat hergestellten Probekörper vorgesehen.

Für das Kriechen sind die Probekörper vor dem Versuch bei maximal 60 °C zu konditionieren, bis ihr massenbezogener Feuchtegehalt $(6 \pm 2) \%$ beträgt. Nach Erreichen des gewünschten Feuchtegehalts sind die Proben für mindestens 72 h bei $(20 \pm 2) \text{ °C}$ zu lagern, um eine gleichmäßige Feuchteverteilung zu gewährleisten. Der eigentliche Versuch erfolgt bei $(20 \pm 2) \text{ °C}$ und einer relativen Luftfeuchte von $(60 \pm 5) \%$.

10.1.2 DIN 4028

Die Norm enthält keine Angaben zum Kriechen des haufwerksporigen Leichtbetons.

10.1.3 DIN 4232

Die Norm enthält keine Angaben zum Kriechen des haufwerksporigen Leichtbetons.

10.1.4 DIN 1045-1

Die in dieser Norm angegebenen Endkriechzahlen $\varphi(\infty, t_0)$ gelten für Konstruktionsleichtbetone, die nicht länger als 14 Tage feucht nachbehandelt werden und die üblichen Umgebungsbedingungen mit einer mittleren relativen Luftfeuchte zwischen 40 % und 100 % und mittleren Temperaturen zwischen 10 °C und 30 °C ausgesetzt sind. Die angegebenen Werte gelten für kriecherzeugende Betondruckspannungen von nicht mehr als $0,45 f_{lckj}$; dabei ist f_{lckj} die Zylinderdruckfestigkeit des Leichtbetons zum Zeitpunkt des Aufbringens der kriecherzeugenden Spannung.

Die Kriechdehnung des Leichtbetons $\varepsilon_{lcc}(\infty, t_0)$ zum Zeitpunkt $t = \infty$ darf bei zeitlich konstanter kriecherzeugender Spannung wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_{lcc}(\infty, t_0) = \varphi(\infty, t_0) \frac{\sigma_{lc}}{E_{lc0}} \cdot \eta_2 \quad (34)$$

Dabei ist

$\varphi(\infty, t_0)$ die Endkriechzahl; diese darf in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte vereinfachend Bild 32 oder Bild 33 entnommen werden; für mittlere relative Luftfeuchten unter 50 % und zwischen 50 % und 80 % darf linear extrapoliert bzw. linear interpoliert werden.

E_{lc0} der Elastizitätsmodul des Leichtbetons als Tangente im Ursprung der Spannungs-Dehnungs-Linie nach 28 Tagen. Vereinfachend kann $E_{lc0} = 1,1 E_{lcm}$ angenommen werden; dabei ist $E_{lcm} = \eta_E \cdot E_{cm}$, der mittlere Sekantenmodul des Leichtbetons aus Tabelle 10 der DIN 1045-1

σ_{lc} die zeitlich konstante kriecherzeugende Betonspannung

t_0 das Betonalter bei Belastungsbeginn in Tagen

$\eta_2 = 1,3$ für LC12/13 und LC16/18

$\eta_2 = 1,0$ ab LC20/22

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

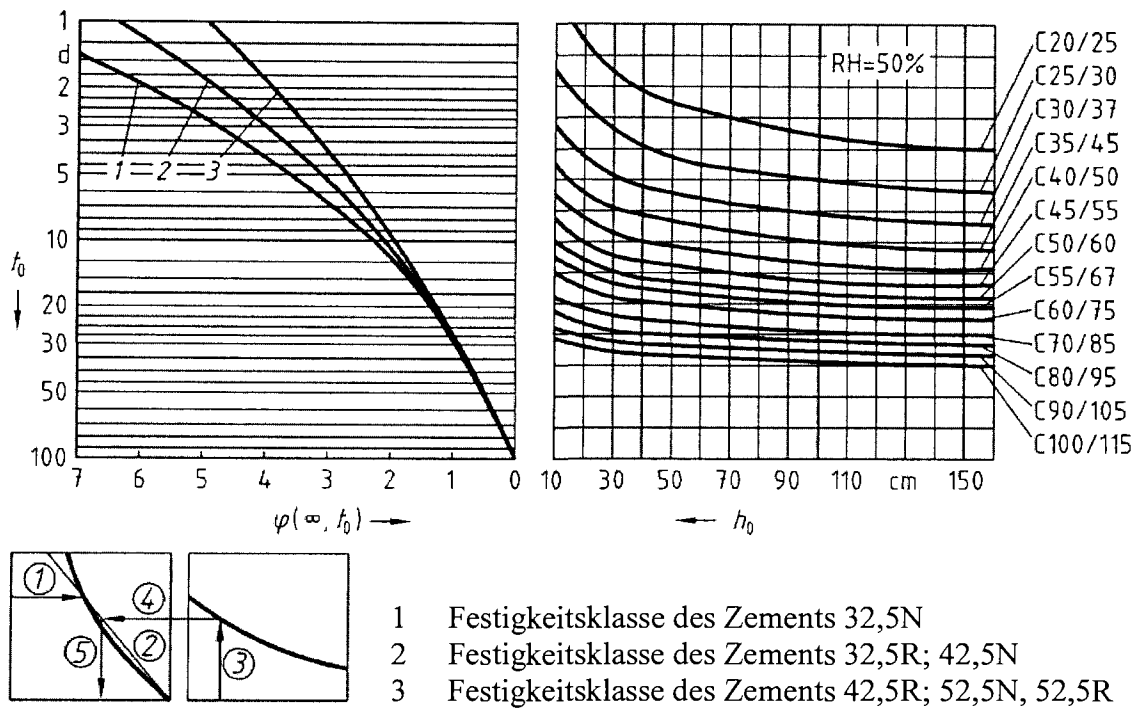


Bild 32: Endkriechzahl $\varphi(\infty, t_0)$ für Normalbeton und trockene Umgebungsbedingungen (trockene Innenräume, relative Luftfeuchte = 50 %)

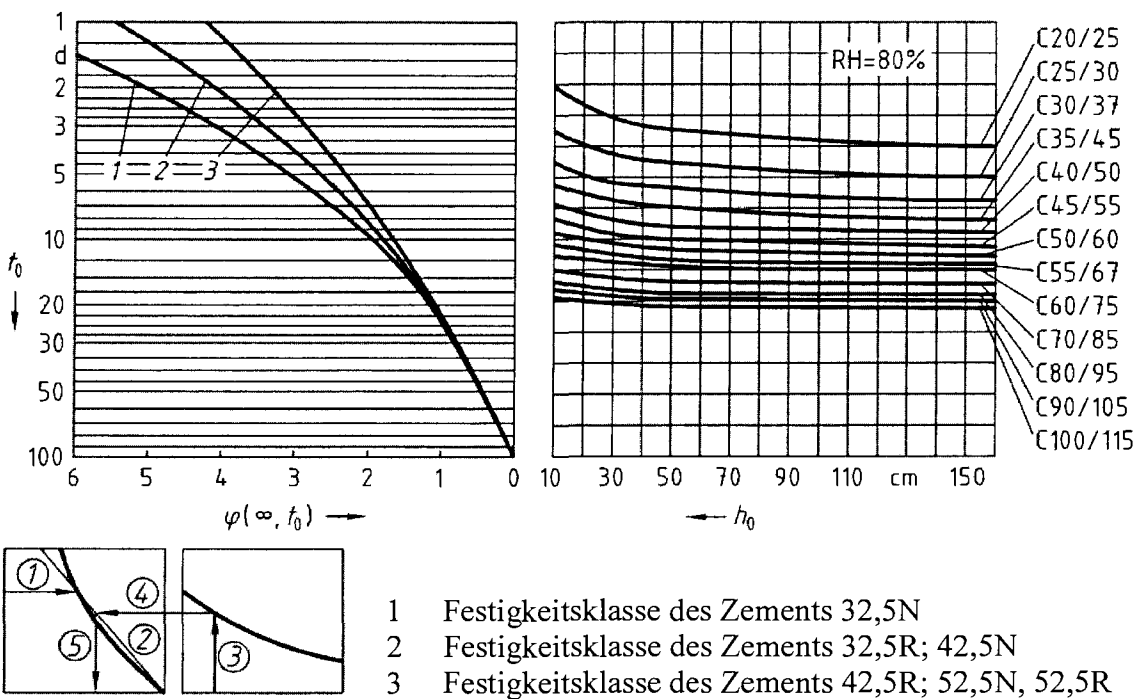


Bild 33: Endkriechzahl $\varphi(\infty, t_0)$ für Normalbeton und trockene Umgebungsbedingungen (Außenluft, relative Luftfeuchte = 80 %)

Eine Norm für die Durchführung von Kriechversuchen an gefügedichtem Leichtbeton liegt nicht vor.

10.2 Vergleich der Angaben zum Kriechen in DIN EN 1520 mit denen in DIN 1045-1

Die Endkriechzahlen in Tabelle 24 beziehen sich auf Normalbeton. Im Gegensatz zu DIN 1045-1 wird kein Unterschied zwischen den eingesetzten Zementen gemacht. Ein direkter Vergleich mit den Nomogrammen in Bild 32 und Bild 33 ist nur zwischen den beiden höchsten Festigkeitsklassen der DIN EN 1520 und den niedrigsten Klassen in den Nomogrammen (C20/25 und C25/30) möglich. Zum besseren Vergleich mit den Angaben in Tabelle 24 enthält Tabelle 26 eine exemplarische Auswertung von Bild 32 und Bild 33 für die Festigkeitsklassen C25/30 und C20/25 (Werte in Klammern) und Zement der Festigkeitsklasse 42,5R, 52,5N oder 52,5R und die Belastungsalter 7 d und 90 d. DIN EN 1520 liefert danach in allen Fällen größere Endkriechzahlen als sich nach DIN 1045-1 ergeben. Die Unterschiede sind am deutlichsten bei einem frühen Belastungsalter und niedriger relativer Luftfeuchtigkeit.

Die Endkriechzahlen werden in beiden Normen in Abhängigkeit von der Rohdichte korrigiert. Der sehr konservative Ansatz des Elastizitätsmoduls bei niedrigen Betonrohdsichten und geringen Festigkeitswerten (vgl. Kapitel 6.3) lässt in diesem Bereich eine weitere Überschätzung der Kriechdehnungen erwarten.

Tabelle 26: Endkriechzahl $\varphi(\infty, t_0)$ für Normalbeton - Auswertung von Bild 32 und Bild 33 für die Festigkeitsklassen C25/30 und C20/25 (Werte in Klammern) und Zement der Festigkeitsklasse 42,5R, 52,5N oder 52,5R

Alter bei der Belastung t_0	Wirksame Dicke $2 A_c/u$ [mm]			
	150	600	150	600
	Trockene atmosphärische Bedingungen (innen)		Feuchte atmosphärische Bedingungen (außen)	
	(RH 50 %)		(RH 80 %)	
7	3,3 (5,5)	2,6 (4,0)	2,5 (2,9)	2,3 (2,6)
90	2,5 (3,1)	2,0 (2,5)	1,6 (1,8)	1,4 (1,6)

A_c ist die Netto-Querschnittsfläche des Betons (bei Hohlplatten ohne die Querschnittsfläche der Hohlräume) [mm²]

u ist der der umgebenden Atmosphäre ausgesetzte Umfang des Bauteils (bei Hohlplatten ohne die Querschnittsfläche der Hohlräume) [mm]

10.3 Vergleich der Angaben zum Kriechen in DIN EN 1520 mit Messwerten

Es liegt nur eine Untersuchung zum Kriechen von haufwerksporigem Leichtbeton bis zu einem Alter von 511 Tagen vor. Hierbei handelt es sich um die Leichtbetone aus Kapitel 9.3. Das Kriechen hatte zum Ende der Versuche noch nicht den Endwert erreicht. In Tabelle 27 sind die experimentell ermittelten Kriechzahlen, $\varphi_{\text{exp}}(t)$, den rechnerischen Endwerten gegenübergestellt. Die Werte liegen zu Versuchsende zum Teil deutlich über den prognostizierten Endkriechzahlen nach DIN EN 1520. Aufgrund der Angaben in DIN 4227-1:12/1979, Bild 1 ist eine weitere Zunahme der Kriechzahlen nach 500 Ta-

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

gen um etwa 15 bis 20 % bis zum Erreichen der Endkriechzahl zu unterstellen, die den vorhandenen Unterschied noch vergrößert.

Tabelle 27: Vergleich der vorliegenden Ergebnisse aus Kriechversuchen mit der rechnerischen Endkriechzahl nach DIN EN 1520

Probe	Alter	$f_{ck, zyl}$	ρ_d	E	σ_k	$\epsilon_{k, exp}$	$\varphi_{exp}(t)$	η_2 , Gl. (26)	η_4 , Tabelle 25	φ_0 , Tabelle 24	$\varphi(\infty, t_0)$ DIN EN 1520
	d	MPa	kg/m ³	GPa	MPa	mm/m					
Zyl 1	511	3,85	630	2,75	1,05	0,715	1,9	0,183	1,8	3,32	1,09
Zyl 2	440	4,03	630	2,69	1,05	0,842	2,2	0,183	1,8	3,32	1,09
Zyl 3	511	2,85	700	2,77	1,05	0,492	1,3	0,204	1,8	3,32	1,22

11 Zusammenfassung

Die Regelungen für die **Rohdichteklassen** in DIN EN 1520 decken sich mit den anderen Normen. Die zugehörige Prüfnorm DIN EN 992 benötigt kleine Ergänzungen, die im Rahmen einer Überarbeitung berücksichtigt werden könnten.

Der Vergleich der Rohdichten der getrennt hergestellten Proben mit den Rohdichtewerten des Bauteils im Zusammenhang mit den Druckfestigkeitsuntersuchungen stellt eine klare Verbesserung gegenüber den alten Normen dar.

Für die Bestimmung der **Druckfestigkeit** können verschiedene Probekörper herangezogen werden. DIN EN 1520 legt für die Umrechnung der Druckfestigkeit zwischen den verschiedenen Probekörpern Umrechnungsfaktoren fest. In mehreren Fällen stimmen die wenigen zur Verfügung stehenden Daten mit diesen Faktoren überein oder liefern Ergebnisse, die zu einer konservativen Prognose führen. Dem stehen andererseits widersprüchliche Ergebnisse aus den eigens durchgeführten Versuchen an einem haufwerksporigen Leichtbeton gegenüber. Die deutlich höhere Streuung der Einzelwerte bei den gebohrten bzw. gesägten Proben im Vergleich zu den separat hergestellten Proben deuten auf mögliche Gefügeschäden bei der Probenahme hin, die sich auf die Messwerte kleinerer Proben verstärkt auswirken können. Für viele Umrechnungsfaktoren wurden offensichtlich die bekannten Werte übernommen, die an gefügedichtem Normalbeton ermittelt wurden. Diese Annahmen liefern Abweichungen, die im Sinne einer kurzfristigen Einführung der Norm toleriert werden können, für die Fortschreibung der Norm jedoch gezielt überprüft werden sollten. Zu klären sind die im Vergleich zu DIN 1045-1 unterschiedlichen Umrechnungsfaktoren zwischen Würfel und Zylinder, sowie die Unterschiede zwischen DIN 1048-2 und DIN EN 1520 in der Umrechnung von Bohrkerne auf Würfel.

Die Abschätzung der **Biegezugfestigkeit** nach DIN EN 1520 liefert sehr konservative Prognosen im Vergleich zu den aktuellen Messwerten. Der Ansatz in DIN 1045-1 weicht um etwa 10 % von der Prognose nach DIN EN 1520 ab. Der Wechsel der Rohdichtefunktion in DIN EN 1520 führt zu starken Abweichungen bei Betonrohddichten unterhalb von 1400 kg/m^3 . Wünschenswert wäre die Aufnahme der Spaltzugprüfung in DIN EN 1520, da sie in vielen Laboren mit der vorhandenen Ausstattung geprüft werden könnte.

Der Ansatz der **Spannungsdehnungslinie** stimmt für Rohdichten unter 629 kg/m^3 mit DIN 4028 überein. Im Vergleich zur bilinearen Spannungsdehnungslinie in DIN 1045-1 gibt es nur Unterschiede bei den Sicherheitsbeiwerten. Die Abweichungen sind vertretbar, bedürften jedoch einer Erläuterung.

Experimentelle Spannungsdehnungslinien des haufwerksporigen Leichtbetons wurden im Rahmen dieses Gutachtens für einen Leichtbeton ermittelt. Sie zeigen eher einen gekrümmten Verlauf, wie er von Normalbeton bekannt ist. Der bilineare Ansatz trägt diesem Verhalten nicht Rechnung, stellt für die kurzfristige Umsetzung jedoch kein Problem dar. Für die Fortschreibung der Norm sollten für die in dieser Norm erfassten Leichtbetone mit haufwerksporigem Gefüge oder geschäumter Matrix Spannungsdeh-

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

nungslinien gezielt ermittelt werden, um die Basis für einen optimalen rechnerischen Ansatz zu legen.

DIN EN 1520 liefert nur eine konservative Prognose des **Elastizitätsmoduls**. Die Abweichungen zu den gemessenen Werten sind bei niedrigen Festigkeitswerten und geringen Rohdichten besonders krass. Die berechneten Werte liegen zum Teil nur zwischen 20 % und 50 % der gemessenen Größen.

Der Vergleich von DIN EN 1520 und DIN 1045-1 offenbart Unstimmigkeiten für geringe Festigkeitswerte und niedrige Rohdichten. Hier hat der haufwerksporige Leichtbeton rechnerisch ein größeres Elastizitätsmodul als gefügedichter Leichtbeton. Ursache ist die abweichende Erfassung des Rohdichteeinflusses unterhalb von 1400 kg/m^3 . Für eine Fortschreibung der Norm sollte dieses Potential durch eine verbesserte Anpassung genutzt werden.

Die Angaben über die **Querdehnzahl** und die **Wärmedehnzahl** stimmen mit den anderen Normen überein, sofern sie erwähnt werden.

Die **Grundwerte des Trocknungsschwindens** stimmen nur für die nicht praxisrelevanten wirksamen Wanddicken mit den Regelungen der DIN 1045-1 überein, obwohl sie sich ausdrücklich auf Normalbeton beziehen. Ein Vergleich beider Normen mit den in der Praxis für haufwerksporigen Leichtbeton üblichen Wanddicken ist nicht möglich, da entsprechende Kombinationen aus wirksamer Dicke und niedriger Festigkeit in DIN 1045-1 nicht enthalten sind. Im Vergleich mit DIN 4227-1 enthält DIN EN 1520 zu hohe Werte.

Der Vergleich mit Messwerten bleibt auf die unterste Festigkeitsklasse beschränkt, weil weiter keine Daten vorliegen. Die gemessenen Schwinddehnungen werden durch den Ansatz in der Norm deutlich überschätzt. Besonders krass sind die Abweichungen bei den Schwindverformungen der Wandelemente. Dies deutet auf eine Fehleinschätzung des Einflusses der wirksamen Dicke hin.

Der Einfluss der Zementart auf das Schwindverhalten wird in DIN EN 1520 ignoriert. Der Einfluss scheint allerdings wie bei gefügedichtem Leichtbeton vorhanden zu sein. Dieses wäre mit einem experimentell abgesicherten Schwindansatz zu verbessern und bei der Fortschreibung der Norm zu berücksichtigen.

DIN EN 1520 liefert in allen Fällen größere **Endkriechzahlen** als sich nach DIN 1045-1 ergeben. Die Unterschiede sind am deutlichsten bei einem frühen Belastungsalter und niedriger relativer Luftfeuchtigkeit. Der sehr konservative Ansatz des Elastizitätsmoduls bei niedrigen Betonrohddichten und geringen Festigkeitswerten führt in der Folge zu einer weiteren Vergrößerung der prognostizierten Kriechdehnungen. Der Vergleich mit den einzigen bisher vorliegenden Daten zeigt jedoch, dass zumindest für diese Versuche die gemessene Kriechdehnung in einem Alter von etwa 500 Tagen die prognostizierten Endkriechdehnungen deutlich übertreffen. Für die Fortschreibung der Norm besteht Klärungsbedarf, um zu einer zutreffenderen und damit sichereren Beschreibung des Kriechens zu gelangen.

12 Danksagung

Die Vergleiche mit Messwerten in diesem Gutachten waren nur möglich, weil Daten aus der Praxis und aus unveröffentlichten Untersuchungsberichten zur Verfügung gestellt wurden. Leider war die Suche nach verwertbaren Daten nicht immer von Erfolg gekrönt, sicherlich aber mit viel Arbeit verbunden. Der Dank für alle Bemühungen gilt in alphabetischer Folge:

ESTELIT Baustoffwerke GmbH & Co. KG, Dülmen

Expan GmbH, Eilsleben

Fachvereinigung Leichtbeton, Neuwied

F.C. Nüdling Fertigteiltechnik, Fulda

Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt

Liapor GmbH & Co. KG, Hallerndorf/Pautzfeld

MPA Braunschweig

MPVA Neuwied

Pinger Wandelemente GmbH & Co. KG, Neuwied

RAMBØLL, Virum (DK)

Röckelein KG, Wachenroth

THERMODUR Leichtbauelemente GmbH, Kottenheim

Veit Dennert KG, Schlüsselfeld

13 Zitierte Normen

- DIN 1045 Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung. Dezember 1978
- DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Juli 2001
- DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Juli 2001
- DIN 1048-1: Prüfverfahren für Beton; Frischbeton. Juni 1991
- DIN 1048-5: Prüfverfahren für Beton; Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Juni 1991
- DIN 1084-1: Überwachung (Güteüberwachung) im Beton- und Stahlbetonbau; Beton B II auf Baustellen. Dezember 1978
- DIN 4028: Stahlbetondielen aus Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge. Anforderungen, Prüfung, Bemessung, Einbau. Januar 1982
- DIN 4213: Anwendung von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton in Bauwerken. Juli 2003
- DIN 4227-1: Spannbeton. Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter Vorspannung oder voller Vorspannung. Dezember 1979
- DIN 4232: Wände aus Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge. Bemessung und Ausführung. September 1987
- DIN EN 206-1: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206-1:2000. Juli 2001
- DIN EN 992: Bestimmung der Trockenrohddichte von haufwerksporigem Leichtbeton. September 1995
- DIN EN 1352: Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls unter Druckbeanspruchung von dampfgehärtetem Porenbeton und von haufwerksporigem Leichtbeton. Deutsche Fassung EN 1352: 1996. Februar 1997
- DIN EN 1355: Bestimmung der Kriechverformung unter Druckbeanspruchung von dampfgehärtetem Porenbeton und von haufwerksporigem Leichtbeton. Deutsche Fassung EN 1355: 1996. Februar 1997
- DIN EN 1521: Bestimmung der Biegezugfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton. Deutsche Fassung EN 1521: 1996. Dezember 1996
- DIN EN 1354: Bestimmung der Druckfestigkeit von haufwerksporigem Leichtbeton. Deutsche Fassung EN 1354: 1996. Februar 1997
- DIN EN 1520: Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton (enthält Berichtigung AC: 2003). Deutsche Fassung EN 1520 + AC 2003. Juli 2003
- DIN EN 12350-1: Prüfung von Frischbeton. Teil 1: Probenahme. Deutsche Fassung EN 12350-1: 1999. März 2000
- DIN EN 12390-1: Prüfung von Festbeton. Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen. Deutsche Fassung EN 12390-1: 2000. Februar 2001
- DIN EN 12390-2: Prüfung von Festbeton. Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen. Deutsche Fassung EN 12390-2: 2000. Juni 2001
- DIN EN 12390-5: Prüfung von Festbeton. Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern. Deutsche Fassung EN 12390-5: 2000. Februar 2001

- DIN EN 12390-6: Prüfung von Festbeton. Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern.
Deutsche Fassung EN 12390-6: 2000. Februar 2001
- DIN EN 12390-7: Prüfung von Festbeton. Teil 7: Dichte von Festbeton. Deutsche Fas-
sung EN 12390-7: 2000. Februar 2001
- DS434.3: Lightweight aggregate concrete components - Compressive strength.
Dänische Norm (in Dänisch), 3. Ausgabe 1989
- DS434.4: Lightweight aggregate concrete components - Bending strength. Dä-
nische Norm (in Dänisch), 2. Ausgabe 1989
- DS434.5: Lightweight aggregate concrete components - Modulus of elasticity.
Dänische Norm (in Dänisch), 3. Ausgabe 1989
- ÖNORM B 3303: Betonprüfungen für Anforderungen gemäß ÖNORM B 4710-1
- prEN 13791: Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in
Bauwerksteilen; Deutsche Fassung prEN 13791:2003. April 2003

14 Literatur

- Lit 1: Goltermann, P.; Larsen, H.; Ingholt, N. U.: Strength and stiffness relations in lightweight aggregate concrete with open structure. Nordic Concrete Research, No. 15, S. 35 – 45, 1994
- Lit 2: Goltermann, P.: Prefabricated floor slabs in roller-compacted lightweight aggregate concrete. Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, S. 531 – 539, Kristiansand, Norway, 18-22 June 2000
- Lit 3: Larsen, H.; Ingholt, N. U.: Letklinkerbeton-Bjælker. Beregning af bæreevne. Betonindustriens Helvægsgruppe (BIH), Dokument 27, 1996
- Lit 4: Rüsç, H.: Die Ableitung der charakteristischen Werte der Betonzugfestigkeit. beton – Herstellung und Verwendung, Heft 25, S. 55 – 58, 1975
- Lit 5: Stark, J.; Seyfarth, K.; Mielke, I.: Dauerhaftigkeit haufwerksporiger Leichtbetone mit Schaummörtelbindung. Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 3-8167-6010-4, 2003
- Lit 6: Thienel, K.-Ch.: Wandelemente aus haufwerksporigem Leichtbeton mit porosierter Matrix. Betonwerk + Fertigteiltechnik, Vol. 60, Nr. 1, S. 62-72, 2000
- Lit 7: Weckenmann Anlagentechnik: Homepage. www.weckenmann.de, 2004

15 Anhang

15.1 Betonrezeptur UniBw

	dm ³ /m ³	kg/m ³
Liapor 6,5 2/10 mm	1050	
Liapor Sand K 0/2 mm	200	
CEM II A-LL 32,5R		180
Wasser		100

15.2 Festbetondaten

Druckfestigkeit von separaten Würfeln nach DIN 1048

	Abmessung	Rohdichte frisch	Trockenrohddichte	Druckfestigkeit
		ρ_{fr}	ρ_d	$f_{c,cube}$
	mm	kg/dm ³	kg/dm ³	MPa
	200	1,178	1,019	11,5
		1,144	0,999	10,2
		1,210	1,048	11,2
Mittelwert		1,177	1,022	11,0
	150	1,136	0,985	10,3
		1,132	0,981	9,76
		1,107	0,969	9,34
Mittelwert		1,125	0,978	9,81
	100	1,118	0,980	8,91
		1,117	0,974	8,57
		1,117	0,979	9,75
Mittelwert		1,117	0,978	9,07

Vergleich der Festlegungen für die Eigenschaften des Leichtbetons in DIN EN 1520 mit den Regelungen in DIN 4028, DIN 4232 und DIN 1045-1

Druckfestigkeit von separaten Zylindern nach DIN 1048

	Abmessung	Rohdichte frisch	Trockenrohddichte	Druckfestigkeit
		ρ_{fr}	ρ_d	$f_{c,cyl}$
	mm	kg/dm ³	kg/dm ³	MPa
	150/300	1,137	0,990	8,47
		1,128	0,978	7,00
		1,196	1,027	11,3
Mittelwert		1,153	0,998	8,93

Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul von separaten Zylindern nach DIN 1048

	Abmessung	Rohdichte frisch	Trockenrohddichte	Druckfestigkeit	Elastizitätsmodul
		ρ_{fr}	ρ_d	$f_{c,cyl}$	E
	mm	kg/dm ³	kg/dm ³	MPa	MPa
	150/300	1,157	0,991	_)	_)
		1,146	0,986	8,28	6880
		1,148	0,979	8,98	7020
Mittelwert		1,150	0,985	8,63	6950

) Zerstört durch Softwarefehler

Druckfestigkeit von gesägten Würfeln nach DIN EN 1354

	Abmessung	Rohdichte frisch	Trockenrohddichte	Druckfestigkeit
		ρ_{fr}	ρ_d	$f_{c,cube}$
	mm	kg/dm ³	kg/dm ³	MPa
Block A	100	1,344	1,149	15,1
		1,197	1,030	12,5
		1,110	0,961	8,51
Mittelwert		1,217	1,047	12,0
Block B	100	1,112	0,956	9,18
		1,151	0,982	10,2
		1,167	0,998	12,5
Mittelwert		1,143	0,978	10,6

Druckfestigkeit von Bohrkernen nach DIN EN 1354 – Block A

	Abmessung	Rohdichte frisch	Trockenrohddichte	Druckfestigkeit
		ρ_{fr}	ρ_d	$f_{c,cyl}$
	mm	kg/dm ³	kg/dm ³	MPa
	100/100	1,384	1,152	15,3
		1,291	1,065	10,9
		1,199	0,983	6,49
Mittelwert		1,310	1,067	10,9
	70/70	1,238	1,095	14,8
		1,168	1,042	9,82
		1,259	1,002	7,48
Mittelwert		1,268	1,046	10,7
	50/50	1,199	1,056	13,5
		1,241	1,069	12,2
		1,186	1,014	8,25
		1,168	1,056	9,93
		1,384	1,005	6,82
		1,291	0,995	7,84
Mittelwert		1,199	1,033	9,77
	30/30	1,113	1)	9,91
		1,093	1)	12,0
		1,062	1)	9,57
			1)	
		1,110	1)	6,51
		1,200	1)	6,93
		1,146	1)	11,0
		1,168	1)	8,32
		1,088	1)	7,87
		1,043	1)	4,03
		1,060	1)	5,71
		1,065	1)	6,25
Mittelwert		1,113		8,01

1) Bestimmung der Trockenrohddichte nicht möglich, weil Proben zu sehr zerstört waren

Druckfestigkeit von Bohrkernen nach DIN EN 1354 – Block B

	Abmessung	Rohdichte frisch	Trockenrohddichte	Druckfestigkeit
		ρ_{fr}	ρ_d	$f_{c,cyl}$
	mm	kg/dm ³	kg/dm ³	MPa
	100/100	1,340	1,096	15,5
		1,310	1,058	10,5
		1,211	0,979	8,09
Mittelwert		1,314	1,044	11,4
	70/70	1,276	1,099	14,0
		1,145	1,055	11,1
		1,265	0,964	8,52
Mittelwert		1,274	1,039	11,2
	50/50	1,182	1,067	13,0
		1,226	1,078	13,8
		1,106	1,018	8,96
		1,149	1,047	10,1
		1,340	0,951	6,11
		1,310	0,995	8,61
Mittelwert		1,211	1,026	10,1
	30/30	1,153	1)	7,22
		1,170	1)	7,68
		1,138	1)	6,69
		1,186	1)	4,89
		1,106	1)	6,38
		1,128	1)	8,12
		1,070	1)	6,53
		1,104	1)	5,85
		1,033	1)	6,00
		1,031	1)	5,51
		1,038	1)	5,79
		1,045	1)	5,17
Mittelwert		1,153		6,32

¹⁾ Bestimmung der Trockenrohddichte nicht möglich, weil Proben zu sehr zerstört waren

Biegezug- und Spaltzugfestigkeit nach DIN 1048

	Abmessung	Rohdichte frisch	Trockenrohddichte	Biegezugfestigkeit	Spaltzugfestigkeit	
		ρ_{fr}	ρ_d	β_{BZ}	β_{SZ}	
	mm	kg/dm ³	kg/dm ³	MPa	MPa	
	150*150*700	1,123	0,999	1,83	1,32	
					1,51	
		1,154	0,965	1,57	1,47	
					1,19	
		1,144	0,995	1,61	1,17	
					1,38	
Mittelwert			1,141	0,986	1,67	1,34

Biegezugfestigkeit nach DIN EN 1521 und zugehörige Spaltzugfestigkeit

	Abmessung	Rohdichte frisch	Trockenrohddichte	Biegezugfestigkeit	Spaltzugfestigkeit
		ρ_{fr}	ρ_d	$f_{ct, flk}$	$f_{ct, sp}$
	mm	kg/dm ³	kg/dm ³	MPa	MPa
Block A	100*100*400	1,303	1,086	(2,90)	1,82
					1,71
		1,302	1,082	1,83	1,66
					1,50
		1216	1,012	1,81	1,57
					1,30
Mittelwert		1,274	1,060	1,82	1,59
Block B	100*100*400	1,272	1,053	2,13	2,37
					1,89
		1,258	1,039	1,94	1,57
					1,86
		1,194	0,984	1,81	1,47
					1,45
Mittelwert		1,241	1,025	1,96	1,77