

Zusatzuntersuchungen zum Druckfestigkeits-
und Schwindverhalten an Porenbetonproben
PP2-0,35 und PP4-0,50



Leibniz
Universität
Hannover

Thema	Interne Zusatzuntersuchungen als Ergänzung zum Forschungsvorhaben des DIBt: „Untersuchungen von Kurzzeit-Performance-Eigenschaften zur Abschätzung des Langzeitverhaltens von Porenbeton“ DIBt-Aktenzeichen: P 52-5- 15.102-1449/14
Projektleiter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus
Bearbeiter	Dipl.-Ing. Patrick Rzeczkowski
Stand	19. Mai 2021

Dieser Bericht umfasst 13 Seiten.



Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
Institut für Baustoffe
Appelstraße 9A und Nienburger Straße 3
D-30167 Hannover

Inhalt

1	Veranlassung und Gegenstand der Untersuchungen.....	3
2	Prüfergebnisse.....	5
2.1	Schwindprismen.....	5
2.2	Druckfestigkeitsuntersuchungen.....	6
2.3	Thermogravimetrische Untersuchungen.....	7
3	Bewertung.....	8
	Literaturverzeichnis.....	11
	Abbildungsverzeichnis.....	13
	Tabellenverzeichnis.....	13

1 Veranlassung und Gegenstand der Untersuchungen

Seit vielen Jahren werden am Institut für Baustoffe (IfB) der Leibniz Universität Hannover umfangreiche Forschungsarbeiten zu carbonatisierungsbedingten Veränderungen von Porenbetonen hinsichtlich Festigkeit, Dauerstand- und Schwindverhalten durchgeführt [1, 2, 3, 4]. Diese Untersuchungen beinhalteten darüber hinaus auch chemisch-mineralogische Untersuchungen zur Erfassung von Phasenausbildungen und Strukturveränderungen. Dabei konnten Hinweise auf ein möglicherweise sicherheitsproblematisches Verhalten mancher Porenbetone eines Herstellers gefunden werden. Zur Vermeidung möglicher Sicherheitsprobleme wurde in Deutschland in DIN 20000-404:2018-04 [5] auf Basis der vorgenannten Untersuchungen die Bestimmung des Gesamtschwindmaßes $\epsilon_{cs,tot}$ nach DIN EN 680:2006-03 [6] vorgeschrieben. Zuvor waren mögliche carbonatisierungsbedingte Risiken weder bei den normativ beschriebenen Eigenschaften, noch bei den üblichen Zulassungsprüfungen vorgeschrieben und konnten demnach auch nicht bei den vorgeschriebenen Prüfungen der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) oder im Rahmen der Fremdüberwachung entdeckt werden. Infolge der Einführung der Prüfung des Gesamtschwindmaßes im Rahmen der WPK wurden die in den vorgenannten Untersuchungen als besonders kritisch identifizierten Porenbetonsteine vom Markt genommen und durch geänderte Zusammensetzungen ersetzt.

Über Jahrzehnte hinweg wurden keinerlei Schadensfälle an Porenbetonen bekannt, die auf carbonatisierungsbedingte Ursachen hindeuteten. Erst seit dem Jahr 2019 wird über mehrere Schadensfälle in Baden-Württemberg berichtet [7]. Soweit überhaupt möglich, konnten die Schäden ausschließlich auf Porenbetonsteine zurückgeführt werden, die von dem bereits als kritisch identifizierten Hersteller stammten. Daraufhin wurden am IfB in Hannover Zusatzuntersuchungen an Porenbetonproben durchgeführt, die aus früheren Forschungsarbeiten noch im Klimaraum lagerten. Neben den als kritisch identifizierten Porenbetonsteinen des Herstellers A wurden Proben aus zwei deutschen Werken namhafter Porenbetonhersteller untersucht. Eine Übersicht der untersuchten Porenbetonsorten ist der folgenden Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Übersicht der Porenbetonsorten für die Zusatzuntersuchungen

Hersteller	Werk	Klasse	Maße B x H x T [mm]	Bezeichnung
A	1	PP2-0,35	624 x 240 x 249	A_1_PP2
A	1	PP4-0,50	624 x 300 x 249	A_1_PP4
A	2	PP2-0,35	624 x 240 x 249	A_2_PP2
A	2	PP4-0,50	624 x 240 x 249	A_2_PP4
B	3	PP2-0,40	500 x 365 x 250	B_3_PP2b
D	5	PP2-0,35	624 x 300 x 250	D_5_PP2

Die aus früheren Untersuchungen noch vorhandenen Schwindprismen (Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm) wurden neu vermessen (die alten Längenwerte waren noch bekannt). Anschließend wurden aus den Prismen jeweils drei kleine Probewürfel (Kantenlänge 40 mm) präpariert, um daran die Druckfestigkeit zu ermitteln. Diese Untersuchungen wurden durch thermogravimetrische Analysen (TGA) und die Bestimmung des CaO-Gehalts begleitet, um den Carbonatisierungsgrad quantitativ auswerten zu können.

2 Prüfergebnisse

2.1 Schwindprismen

In den vorangegangenen Forschungsarbeiten wurden ursprünglich je Porenbetonsorte sechs Prismen (160mm x 40mm x 40mm) für Schwinduntersuchungen nach DIN EN 680:2006-03 [6] präpariert und im Schwindmessraum (20 °C, 45 % rel. LF) untersucht. Nach Abbruch dieser Untersuchungen nach ca. 500 Tagen wurden die Proben in einen Klimaraum mit 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte überführt und dort weiter gelagert. Nach Bekanntwerden der o.g. Schadensfälle wurden erneut Schwindmessungen durchgeführt. In der folgenden Abbildung 1 sind die ermittelten relativen Längenänderungen der untersuchten Porenbetone über die Zeit der Lagerungen aufgetragen

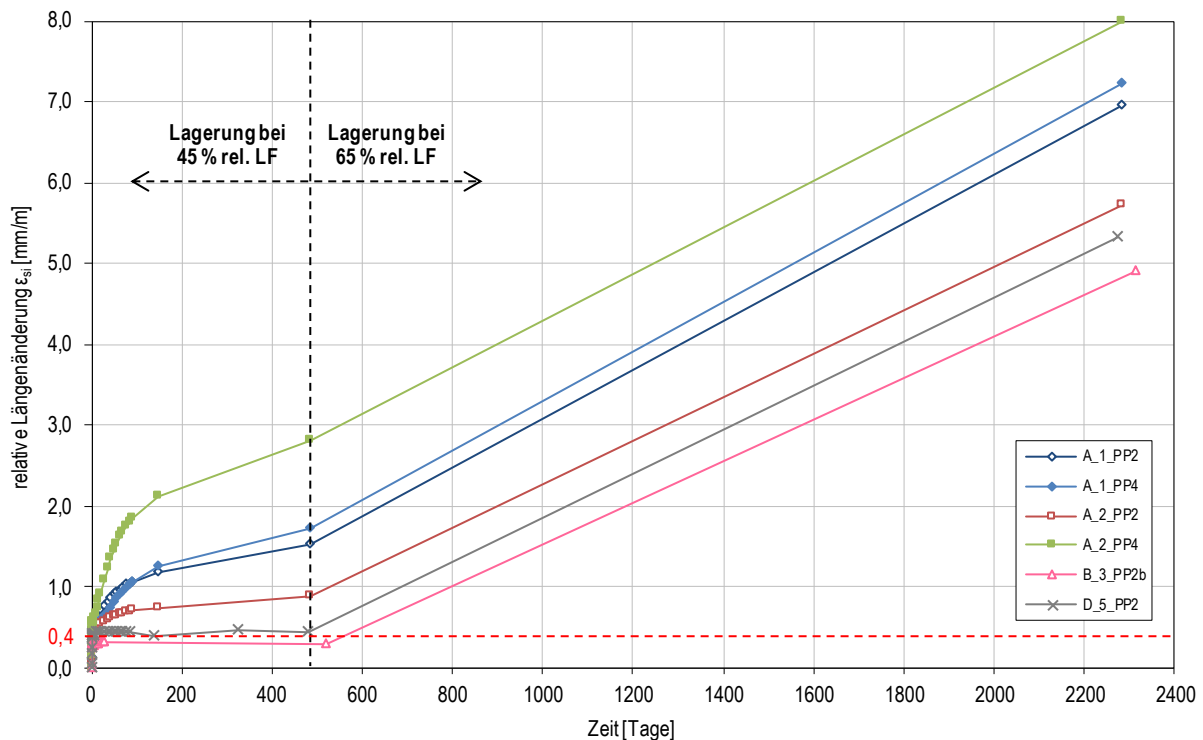


Abbildung 1: Relative Längenänderungen über die Lagerungszeit bei 45 % und 65 % rel. LF

Aus den Ergebnissen der rel. Längenänderungen kann in Anlehnung an DIN EN 680:2006-03 [6] ein Gesamtwert des Trocknungsschwindens $\epsilon_{cs,tot}$ auch für die vorliegenden extrem langen Prüfdauern errechnet werden. Im eigentlichen Sinne ist es dann kein Trocknungsschwinden mehr, sondern es beinhaltet vor allem die Anteile aus Carbonatisierungsschwinden. Das Trocknungsschwinden war bereits abgeschlossen, lange bevor die Proben in den Klimaraum (20 °C / 65 % rel. LF) eingelagert wurden. Zudem ist das Lagerungsklima im Klimaraum mit 20 °C und 65 % rel. Feuchte deutlich feuchter als das Klima zur Bestimmung des Trocknungsschwindens. Bei allen untersuchten Proben traten große Längenänderungen

(Verkürzungen) der Proben auf (vgl. Abbildung 1). Dabei kann es sich nur um carbonatisierungsbedingte Schwindverformungen handeln. Zwar ist aus den späten Messungen kein zeitlicher Verlauf des Carbonatisierungsschwindens ableitbar, jedoch erstaunt die Größe der festgestellten Verkürzungen sehr. Wenn man unterstellt, dass das eigentliche Trocknungsschwinden bei etwa 0,4 mm/m begrenzt ist, ist Carbonatisierungsschwinden offensichtlich in einer Größenordnung von ca. 45 mm/m bis etwa 75 mm/m aufgetreten, also etwa 10 mal bis 20 mal größer als das Trocknungsschwinden.

2.2 Druckfestigkeitsuntersuchungen

Nach einer Gesamtlagerungsdauer von mehr als sechs Jahren wurden an drei Prismen je Porenbetonsorte Druckfestigkeitsuntersuchungen in Anlehnung an DIN EN 772-1 [8] durchgeführt. Dafür wurden je Prisma drei Würfel mit 40 mm Kantenlänge präpariert und somit je Porenbetonsorte neun Würfel geprüft. Nachfolgend sind in Tabelle 2 die ermittelten Druckfestigkeiten dargestellt. Ergänzend dazu sind die Druckfestigkeiten derselben Porenbetone vor Beginn der Schwinduntersuchungen aufgeführt, jeweils geprüft an Prismen der Abmessungen 120 mm x 120 mm x 240 mm. Dabei sind jeweils nur die Mittelwerte für jede Porenbetonsorte angegeben. Zusätzlich sind in Tabelle 2 die Mindestwerte der Würfeldruckfestigkeit für die Zuordnung zu der jeweiligen Steinfestigkeitsklasse nach DIN 20000-404:2018-04 [5] aufgelistet.

Tabelle 2: Druckfestigkeiten (Mittelwerte) nach mehr als 6-jähriger Lagerungsdauer verglichen mit der Druckfestigkeit vor Beginn der Carbonatisierungsuntersuchungen sowie den Mindestwürfeldruckfestigkeiten nach DIN 20000-404:2018-04 [5]

Porenbetonsorte	Mittelwert				Abweichung [%]	Normdruckfestigkeit ³ [N/mm ²]
	Feuchtegehalt	Rohdichte	Druckfestigkeit ¹	Druckfestigkeit ²		
	[M.-%]	[kg/m ³]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		
A_1_PP2	3,3	399	1,72	2,52	-31,7	2,6
A_1_PP4	3,0	554	2,98	4,26	-30,0	4,4
A_2_PP2	3,8	367	1,60	2,01	-20,4	2,6
A_2_PP4	3,0	573	2,51	3,76	-33,2	4,4
B_3_PP2b	3,8	377	1,94	2,76	-29,7	2,6
D_5_PP2	4,8	318	1,74	2,47	-29,6	2,6

¹ nach mehr als 6 Jahren an Würfeln 40 mm x 40 mm x 40 mm
² Eingangsuntersuchungen an Prismen 120 mm x 120 mm x 240 mm
³ Mindestwert nach DIN 20000-404:2018-04 [5]

2.3 Thermogravimetrische Untersuchungen

Zusätzlich wurde an jeweils einem Prisma der Carbonatisierungsgrad innen und außen bestimmt. Dafür wurde eine Scheibe (4cm x 4cm x 1cm) aus den Prismen gesägt und untersucht. Für jede präparierte Probe wurden außen (0 cm bis 1 cm) und innen (1 cm bis 2 cm) jeweils zwei Messungen durchgeführt. Zur Ermittlung des Carbonatisierungsgrads wurde der Ansatz nach MATSUSHITA et al. [9] verwendet. Nachfolgend sind in Tabelle 3 die Ergebnisse zum Carbonatisierungsgrad dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse zum Carbonatisierungsgrad D_C nach etwa 6-jähriger Lagerung

Porenbetonsorte	Lagerungsbedingungen	$D_{C,Mitte}$	Mittelwert	$D_{C,Rand}$	Mittelwert
		[%]			
A_1_PP2	486d (20°C, 45% rel. LF) + 1796d (20°C, 65% rel. LF)	58,6	59,0	56,4	56,2
		59,3		55,9	
A_1_PP4	486d (20°C, 45% rel. LF) + 1796d (20°C, 65% rel. LF)	61,1	62,0	60,7	61,0
		62,8		61,3	
A_2_PP2	486d (20°C, 45% rel. LF) + 1796d (20°C, 65% rel. LF)	37,2	37,2	33,7	33,6
		37,2		33,4	
A_2_PP4	486d (20°C, 45% rel. LF) + 1796d (20°C, 65% rel. LF)	55,9	56,1	55,8	55,9
		56,2		55,9	
B_3_PP2b	520d (20°C, 45% rel. LF) + 1760d (20°C, 65% rel. LF)	20,2	20,2	17,6	17,5
		20,1		17,4	
D_5_PP2	479d (20°C, 45% rel. LF) + 1796d (20°C, 65% rel. LF)	15,1	15,1	12,6	12,7
		15,0		12,7	

Die Carbonatisierungsgrade sind bei allen Proben in Tabelle 3 im Randbereich niedriger als in Probenmitte. Zu erwarten wäre aber ein umgekehrtes Verhalten gewesen. Als Erklärungsversuch dafür kommen die im Laufe der langen Versuchsdauer häufigen Bewegungen (Umlagerungen) der Probekörper in Frage. Das häufige Anfassen, Einbauen in die Messapparatur, Umräumen im Probenraum, usw. führt zu einem gewissen Abrieb von Phasen im Randbereich. Da weniger feste carbonatisierte Phasen sich leichter abreiben lassen als die festeren nicht carbonatisierten, könnte dadurch ein geringerer Masseverlust in der TGA hervorgerufen werden, was zu einem geringeren rechnerisch ermittelten Carbonatisierungsgrad führt. Eine Verwechslung von Rand- und Innenbereich konnte durch mehrfaches Überprüfen ausgeschlossen werden. Bei allen Steinen des Herstellers A wurden deutlich höhere Carbonatisierungsgrade festgestellt als bei den Proben der Herstellern B und D. So lassen sich die einzelnen Porenbetonsorten erkennbar voneinander unterscheiden.

3 Bewertung

Die unter 2.1 dargestellten Ergebnisse der Schwinduntersuchungen zeigen, dass alle Porenbetonsorten des Herstellers A den in DIN 20000-404 [5] geforderten maximalen Gesamtwert des Trocknungsschwindens $\epsilon_{cs,tot}$ nach DIN EN 680:2006-03 [6] von 0,40 mm/m deutlich überschreiten (vgl. Abbildung 1). Hersteller B bleibt unter diesem Grenzwert, während Hersteller D sich knapp darüber befindet. Die Verkürzungen der Probekörper bei den Porenbetonsorten des Herstellers A sind sogar nach ca. 500 Tagen im Schwindmessraum (20 °C, 45 % rel. LF) noch nicht abgeschlossen, während sich bei den Porenbetonsorten der Hersteller B und D bereits nach deutlich weniger als 28 Tagen ein konstanter Wert eingestellt hat. Nach der Umlagerung in einen Klimaraum mit 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte wurden die Proben nach ca. 1800 weiteren Tagen erneut vermessen. Dabei wurden bei allen Porenbetonsorten, auch bei denen von Hersteller B und D, extrem große relative Längenänderungen (Verkürzungen) festgestellt (vgl. Abbildung 1). Die Porenbetone des Herstellers A erreichten rechnerische Gesamtwerte des Trocknungsschwindens von bis zu 8 mm/m im Mittel. Die zusätzlich untersuchten Proben der Hersteller B und D erreichten mit 4,9 mm/m bis 5,3 mm/m ebenfalls sehr hohe Werte, obwohl sie sich bei den Schwinduntersuchungen im trockeneren Klima (20 °C, 45 % rel. LF) nach DIN EN 680:2006-03 [6] völlig unauffällig verhielten. Die genauen Vorgänge für dieses Baustoffverhalten sind bislang nicht geklärt.

Hinsichtlich der beobachteten Druckfestigkeitsverluste zeigt sich ein durchaus dramatisches Bild. Um die jeweils ermittelten Mittelwerte der Druckfestigkeiten vergleichen zu können, wurden diese zusammen mit den Druckfestigkeiten aus Tabelle 1 in Abbildung 2 dargestellt.

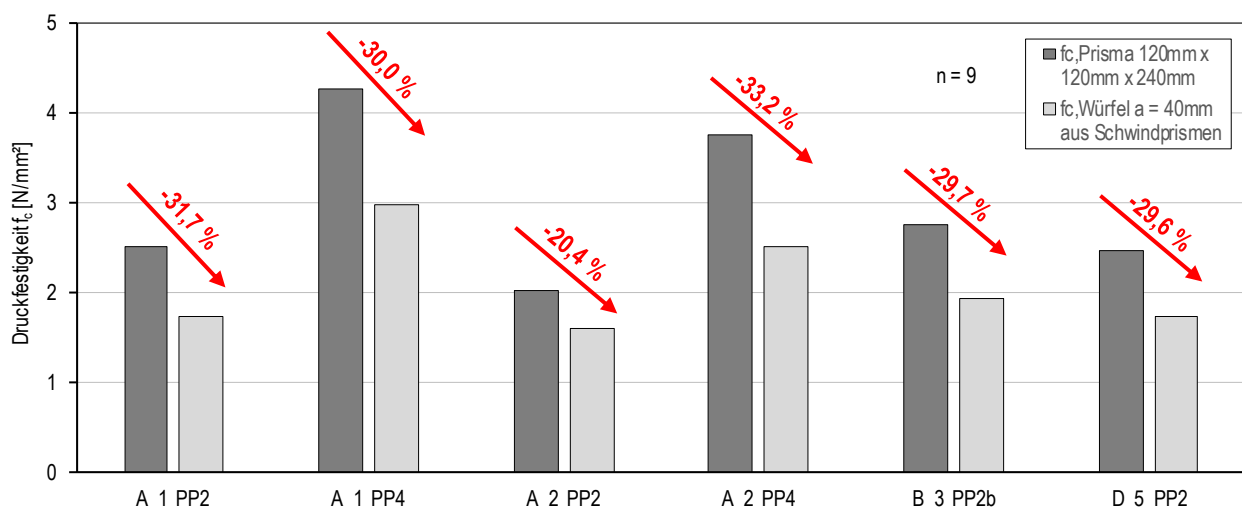


Abbildung 2: Druckfestigkeit von Würfeln mit 40 mm Kantenlänge aus Schwindprismen (Lagerung zunächst bei 45 rel. LF und anschließend bei 65 % rel. LF) im Vergleich zur Druckfestigkeit vor Beginn der Lagerung (geprüft an Prismen 120 mm x 120 mm x 240 mm)

Die Druckfestigkeiten an aus den Schwindprismen präparierten Würfeln mit einer Kantenlänge von 40 mm zeigen für alle untersuchten Porenbetonsorten dramatische Festigkeitsverluste von 20,4 % bis 33,2 % (vgl. Abbildung 2). Es ist jedoch zu beachten, dass die Eingangsprüfung vor Beginn der Auslagerung an Prismen (120mm x 120mm x 240mm) durchgeführt wurde. Nach DIN EN 772-1:2016-05 [8] ist zur Einstufung der Festigkeitsklasse die Druckfestigkeit an Würfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm durchzuführen. So führt die höhere Schlankheit von prismenförmigen Prüfkörpern im Vergleich zu würfelförmigen Prüfkörpern mit der gleichen Grundfläche zu niedrigeren Prüfwerten [10, 11]. Neben der Schlankheit hat auch das Größenformat der Prüfkörper einen Einfluss auf den Prüfwert der Druckfestigkeit. Beim Vergleich von Würfeln mit 100 mm und 200 mm Kantenlänge zeigten Untersuchungen, dass Würfel mit der kleineren Kantenlänge höhere Prüfwerte aufwiesen [11]. Beim Vergleich von Würfeln mit 40 mm und 100 mm Kantenlänge gab es jedoch widersprüchliche Ergebnisse. So wies die untersuchte Porenbetonsorte der Klasse PP2 bei Würfeln mit der Kantenlänge 40 mm im Vergleich zu Würfeln mit der Kantenlänge 100 mm niedrigere Prüfwerte auf. Bei der untersuchten Porenbetonsorte der Klasse PP6 verhielt es sich gegensätzlich und somit erwartungsgemäß [11]. Im Rahmen der hier betrachteten großen Festigkeitsverluste wurde auf einen Umrechnungsfaktor verzichtet.

Gemäß den Anforderungen nach DIN EN 771-4:2015-11 [12] in Verbindung mit DIN 20000-404:2018-04 [5], müssen Porenbetonplansteine der Festigkeitsklasse PP2 und PP4 unter Einbeziehung des Abminderungsfaktors k_1 (nach DIN 20000-404 $k_1 = 1$ für $A_L = 0$ %) einen Mindestwert von 2,6 N/mm² (PP2) bzw. 4,4 N/mm² (PP4) für eine Steinhöhe von ≥ 248 mm erreichen. Ließe man die Formeinflüsse außer Betracht, würde nur die Sorte des Herstellers B mit 2,76 N/mm² diese Anforderung erfüllen. Die Sorten A_1_PP2 und D_5_PP2 mit 2,52 N/mm² und 2,47 N/mm² sowie A_1_PP4 mit 4,26 N/mm² verfehlten den Mindestwert für die Festigkeitsklasse knapp. Wir gehen jedoch davon aus, dass der normativ geforderte Mindestwert an Würfeln mit 100 mm Kantenlänge erreicht worden wäre. Die beiden anderen Porenbetonsorten des Herstellers A (A_2_PP2 und A_2_PP4) wichen mit 2,01 N/mm² und 3,76 N/mm² deutlich von dem jeweiligen Mindestwert ab. In Abbildung 3 sind daher die Mittelwerte der ermittelten Druckfestigkeiten an Würfeln mit 40 mm Kantenlänge den normativ geforderten Festigkeiten gegenübergestellt.

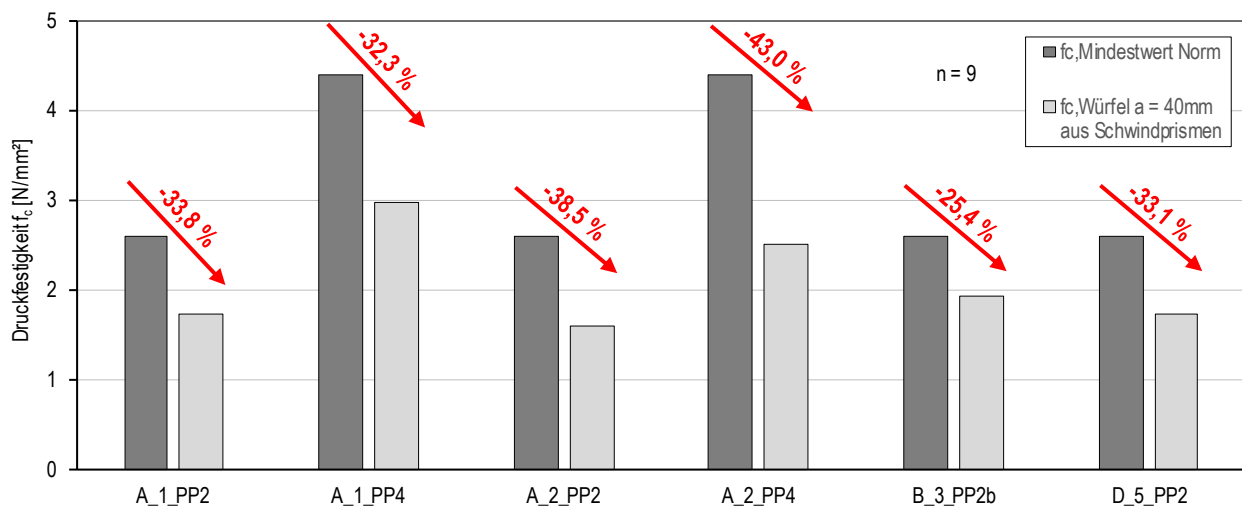


Abbildung 3: Druckfestigkeit von Würfeln mit 40 mm Kantenlänge aus Schwindprismen (Lagerung zunächst bei 45 rel. LF und anschließend bei 65 % rel. LF) im Vergleich zum Mindestwert nach DIN EN 771-4:2015-11 [12] in Verbindung mit DIN 20000-404:2018-04 [5] (Würfel mit 100 mm Kantenlänge).

Die thermogravimetrischen Untersuchungen zeigen besonders bei den Porenbetonsorten des Herstellers A hohe Carbonatisierungsgrade von bis zu 62 %, die damit eine Erklärung für die hohen Schwindmaße und großen Druckfestigkeitsverluste liefern. Untersuchungen durch Matsushita [13] zeigen, dass sich bei der Carbonatisierung von Porenbeton maximal ein Carbonatisierungsgrad von ca. 60 % einstellt. Dieser Wert wird durch die vorliegenden Untersuchungen bestätigt. Demgegenüber wiesen die Proben der Hersteller B und D mit 12,7 % bis 20,2 % deutlich geringere Carbonatisierungsgrade auf als Hersteller A. Dennoch wurden auffällig große Längenänderungen und Druckfestigkeitsverluste beobachtet.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sehr langanhaltende übliche Carbonatisierungsbedingungen (20°C / 65% rel. LF) offensichtlich auch bei bislang als unkritisch angesehenen Porenbetonen zu erheblichen Festigkeitsverlusten bis deutlich unter die charakteristische Festigkeit führen können. Bei den vorliegenden Untersuchungen ist zu berücksichtigen, dass die geringe Probengröße und der üblicherweise in der Baupraxis vorhandene Putz oder Anstrich hier zu deutlich stärkeren Carbonatisierungsvorgängen geführt haben, als sie in der Praxis zu erwarten sind. Gleichwohl zeigen sie ein mögliches carbonatisierungsbedingtes Risiko an. Das daraus für die Baupraxis möglicherweise tatsächlich vorhandene Sicherheitsrisiko sowie möglicherweise erforderliche Vermeidungsstrategien gilt es, durch weitere Untersuchungen näher zu bewerten.

Literaturverzeichnis

- [1] L. Lohaus und K. Brummermann, „Dauerstandverhalten von Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen mit Rohdichten $< 0,4 \text{ kg/dm}^3$, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben P 32-5-15.46-1023/02 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik,“ in *Bauforschung*, Nr. T 3126, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2006.
- [2] L. Lohaus, T. Steinborn, K. Brummermann, F. López und A. Hartmann, „Auswirkungen der Carbonatisierung auf Druckfestigkeit und Verformungen von Porenbeton-Plansteinen, Abschlussbericht zu den Forschungsvorhaben ZP 52-5-15.61-1111/04 und ZP 52-5-15.61.1-1150/05 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik,“ Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover, 2008 (Bericht nicht zur Veröffentlichung freigegeben).
- [3] L. Lohaus, T. Steinborn, K. Brummermann, F. López und A. Hartmann, „Dauerhaftigkeit von Porenbeton-Plansteinen unter realitätsnahen Bedingungen, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben ZP 52-5- 15.77-1213/06 und ZP 52-5- 15.77.1-1261/07 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik,“ in *Bauforschung*, Nr. T 3293, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 2013.
- [4] L. Lohaus und P. Rzeczkowski, „Untersuchungen von Kurzzeit-Performance-Eigenschaften zur Abschätzung des Langzeitverhaltens von Porenbeton, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben P 52-5-15.102-1449/14 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik,“ Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover, 2021 (Bericht nicht zur Veröffentlichung freigegeben).
- [5] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 20000-404:2018-04, Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken - Teil 404: Regeln für die Verwendung von Porenbetonsteinen nach DIN EN 771-4:2015-11*, Berlin: Beuth Verlag, 2018.
- [6] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 680:2006-03, Bestimmung des Schwindens von dampfgehärtetem Porenbeton; Deutsche Fassung EN 680:2005*, Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [7] R. Mühlebach, „Eigentümer müssen wegen Baupfusch ausziehen,“ 10 August 2019. [Online]. Available: <https://www.bild.de/regional/stuttgart/stuttgart-aktuell/reichenbach-eigentuemmer-muessen-wegen-baupfusch-ausziehen-63864244.bild.html>. [Zugriff am 22 Dezember 2020].

- [8] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 772-1:2016-05, Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit; Deutsche und Englische Fassung EN 772-1:2011+A1:2015*, Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- [9] F. Matsushita, Y. Aono und S. Shibata, „Carbonation degree of autoclaved aerated concrete,“ *Cement and Concrete Research*, Bd. 30, Nr. 11, pp. 1741-1745, 2000.
- [10] I. Beer und P. Schubert, „Zum Einfluss der Steinformate auf die Mauerdruckfestigkeit - Formfaktoren für Mauersteine,“ in *Mauerwerk-Kalender 30*, Berlin, Ernst & Sohn, 2014, pp. 89-126.
- [11] W. Brameshuber und M. Graubohm, „Formfaktoren für Mauersteine,“ in *Mauerwerk 18*, Berlin, Ernst & Sohn, 2014, pp. 15-26.
- [12] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 771-4:2015-11, Festlegung für Mauersteine - Teil 4: Porenbetonsteine; Deutsche Fassung EN 771-4:2011+A1:2015*, Berlin: Beuth Verlag, 2015.
- [13] F. Matsushita, Y. Aono und S. Shibata, „Carbonation shrinkage of Autoclaved Aerated Concrete,“ *Autoclaved aerated concrete*, pp. 195-202, 2005.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Relative Längenänderungen über die Lagerungszeit bei 45 % und 65 % rel. LF	5
Abbildung 2: Druckfestigkeit von Würfeln mit 40 mm Kantenlänge aus Schwindprismen (Lagerung zunächst bei 45 rel. LF und anschließend bei 65 % rel. LF) im Vergleich zur Druckfestigkeit vor Beginn der Lagerung (geprüft an Prismen 120 mm x 120 mm x 240 mm)	8
Abbildung 3: Druckfestigkeit von Würfeln mit 40 mm Kantenlänge aus Schwindprismen (Lagerung zunächst bei 45 rel. LF und anschließend bei 65 % rel. LF) im Vergleich zum Mindestwert nach DIN EN 771-4:2015-11 [12] in Verbindung mit DIN 20000-404:2018-04 [5] (Würfel mit 100 mm Kantenlänge).....	10

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Porenbetonsorten für die Zusatzuntersuchungen.....	3
Tabelle 2: Druckfestigkeiten (Mittelwerte) nach mehr als 6-jähriger Lagerungsdauer verglichen mit der Druckfestigkeit vor Beginn der Carbonatisierungsuntersuchungen sowie den Mindestwürfeldruckfestigkeiten nach DIN 20000-404:2018-04 [5].....	6
Tabelle 3: Ergebnisse zum Carbonatisierungsgrad D_C nach etwa 6-jähriger Lagerung.....	7