



Ludger Lohaus, Patrick Rzeczkowski

**Untersuchungen von  
Kurzzeit-Performance-Eigenschaften  
zur Abschätzung des Langzeitverhaltens  
von Porenbeton**

Ludger Lohaus, Patrick Rzeczkowski

**Untersuchungen von  
Kurzzeit-Performance-Eigenschaften  
zur Abschätzung des Langzeitverhaltens  
von Porenbeton**

**T 3392**

T 3392

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2021

ISBN 978-3-7388-0683-0

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

Thema	Untersuchungen von Kurzzeit-Performance-Eigenschaften zur Abschätzung des Langzeitverhaltens von Porenbeton
Forschungsbericht Nr.	FP 47 03.06.2021
Projektleiter	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus
Bearbeiter	Dipl.-Ing. Patrick Rzeczkowski
Auftraggeber/Förderer	Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) Kolonnenstr. 30 L 10829 Berlin
Auftragsdatum	01.02.2013
Aktenzeichen	DIBt-Az.: P 52-5- 15.102-1449/14

Dieser Bericht umfasst 40 Seiten und 12 Seiten Anhang.

# Inhalt

1	Einleitung .....	4
2	Ziele des Forschungsprojekts .....	5
3	Untersuchungsprogramm .....	6
4	Ergebnisse der Untersuchungen .....	8
4.1	Eingangsprüfungen.....	8
4.2	Dauerstandversuche.....	9
4.3	Auslagerungsversuche .....	10
4.3.1	Wanddruckfestigkeit und Carbonatisierung.....	10
4.3.2	Druckfestigkeit (Stein) und Feuchtegehalt.....	14
4.3.3	Druckfestigkeits- und Carbonatisierungsprofil .....	15
4.4	Schwinduntersuchungen .....	18
4.5	Röntgendiffraktometrie (XRD) .....	21
5	Ringversuch Schwinden und XRD .....	23
5.1	Allgemeines .....	23
5.2	Beteiligte Forschungseinrichtungen.....	23
5.3	Probekörperherstellung .....	23
5.4	Probekörperkonditionierung.....	24
5.5	Probekörperlagerung .....	25
5.6	Versuchsdurchführung.....	25
5.7	Nachträgliche Untersuchungen .....	26
5.8	Ergebnisse .....	27

5.8.1	Schwinden .....	27
5.8.2	XRD .....	29
5.8.3	Thermogravimetrische Analyse .....	30
6	Schlussfolgerungen .....	32
	Literaturverzeichnis .....	34
	Abbildungsverzeichnis .....	36
	Tabellenverzeichnis .....	38
	Anhang .....	39

# 1 Einleitung

Der vorliegende Abschlussbericht umfasst die Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Untersuchungen von Kurzzeit-Performance-Eigenschaften zur Abschätzung des Langzeitverhaltens von Porenbeton“ P 52-5- 15.102-1449/14 (interne Bezeichnung FP 47). Das Forschungsvorhaben wurde vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) gefördert.

Die durchgeführten Versuche stehen im Kontext der Untersuchungen der Vorgängerprojekte, die im Folgenden aufgeführt sind.

- Dauerstandverhalten von Mauerwerk aus Porenbeton-Plansteinen mit Rohdichten  $< 0,4 \text{ kg/dm}^3$  [1]
- Auswirkung der Carbonatisierung auf die Druckfestigkeit und Verformung von Porenbeton-Plansteinen [2]
- Dauerhaftigkeit von Porenbeton-Plansteinen unter realitätsnahen Bedingungen [3]

## 2 Ziele des Forschungsprojekts

Im Rahmen der zuvor genannten Forschungsvorhaben zur Dauerhaftigkeit von Porenbeton-Plansteinen wurde von allen seinerzeit in Deutschland produzierenden Porenbetonherstellern ein Hersteller identifiziert, dessen Porenbetonsteine extreme Druckfestigkeitsverluste nach 18-monatiger Lagerung unter „normaler“ Außenluft aufwiesen. Es traten dabei Verluste von etwa 50 % im Vergleich zum Anlieferungszustand auf. Bislang besteht eine große Unsicherheit, wie eine klare Identifizierung solcher kritischen Steine im Anlieferungszustand gelingen kann. Als Möglichkeit, solche risikobehafteten Porenbetone mit einfachen Mitteln schnell prüftechnisch identifizieren zu können, wurde das Gesamtschwindmaß  $\epsilon_{cs,tot}$  nach DIN EN 680:2006-03 [4] vorgeschlagen. Aus den bisherigen Untersuchungen wurde als Grenzwert für das Gesamtmaß des Trocknungsschwindens 0,4 mm/m hergeleitet.

In den deutschen Anwendungsregeln DIN 20000-404:2018-04 [5] für die Verwendung von dampfgehärtetem Porenbeton nach DIN EN 771-4:2015-11 [6] wurde dieser Grenzwert des Trocknungsschwindens zur Feststellung der Langzeitbeständigkeit gegenüber Carbonatisierung festgelegt. Solche Schwinduntersuchungen dienen also dem Ziel, kritische von unkritischen Porenbetonsteinen unterscheiden zu können. Letztlich ist für eine Gefährdungsbeurteilung risikobehafteter Steine jedoch das Dauerstandverhalten maßgebend. Insofern stellen solche Schwinduntersuchungen eine Art Stellvertreterprüfung dar.

Ziel des Forschungsvorhabens ist, die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den vorangegangenen Forschungsvorhaben auf aktuelle Produkte aus Deutschland und aus dem Ausland zu überprüfen. Zusätzlich ist der zuvor genannte Grenzwert mit Hilfe weiterer Kurzzeit-Performance-Größen zu überprüfen und in Relation zu den vorhandenen Ergebnissen zu stellen. Von diesen Ergebnissen sollen mögliche Bedarfe für die weitere nationale und europäische Normung diskutiert werden.

### 3 Untersuchungsprogramm

Es wurden Proben von drei Herstellern aus vier Herstellwerken untersucht. Dabei handelt es sich um drei deutsche Herstellwerke und ein englisches. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Proben des Herstellers A noch vor der Änderung der deutschen Anwendungsnorm DIN 20000-404:2018-04 [5] entnommen wurden. Eine Übersicht der untersuchten Porenbetonsorten und der durchgeführten Untersuchungen ist Tabelle 1 zu entnehmen. Darüber hinaus wurde ein Ringversuch zum Trocknungsschwinden sowie zur Mineralphasenbestimmung mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) durchgeführt, an dem sich vier Forschungslaboratorien beteiligt haben (vgl. Tabelle 1). Anpassungen des Untersuchungsprogramms wurden im Laufe des Forschungsvorhabens mit dem DIBt abgestimmt.

Tabelle 1: Übersicht Untersuchungsprogramm

Zu untersuchende Steine	Untersuchungen		Ringversuch
	Anlieferungszustand	nach 18 M. Außenlagerung	
Porenbetone aus Deutschland: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hersteller A, Werk 1 → PP2 aus 2013</li> <li>• Hersteller A, Werk 1 → PP4 aus 2013</li> <li>• Hersteller A, Werk 2 → PP2 aus 2013</li> <li>• Hersteller A, Werk 2 → PP4 aus 2013</li> <li>• Hersteller B, Werk 3 → PP2 aus 2016</li> <li>• Hersteller B, Werk 3 → PP4 aus 2016</li> </ul> Porenbetone aus England: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hersteller C, Werk 4 → 3,6 N/mm<sup>2</sup> und 600 kg/m<sup>3</sup> aus 2018</li> <li>• Hersteller C, Werk 4 → 2,9 N/mm<sup>2</sup> und 460 kg/m<sup>3</sup> aus 2018</li> </ul>	Trockenrohddichte Feuchte Druckfestigkeit (Stein, Prisma)  TGA CaO Sulfat XRD  Schwinden (zusätzl. Untersuchungen zur Abhängigkeit der Lagerung)  Dauerstand <ul style="list-style-type: none"> <li>• 75 % und 65 % (nur Hersteller A)</li> <li>• Kurzzeitfestigkeit als Referenz</li> </ul> 1 Wand als Referenz (nur PB aus Deutschland)	Trockenrohddichte Feuchte Druckfestigkeit (Stein) Druckfestigkeits- und Carbonatisierungsprofil  TGA (Carbonatisierungsprofil in 1cm Schritten)  1 Wand (nur PB aus Deutschland)	Schwinden XRD  <u>Teilnehmer:</u> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Leibniz Universität Hannover</li> <li>• RWTH Aachen</li> <li>• MPA Stuttgart</li> <li>• Xella Brück</li> </ul> <u>Umfang:</u> Vier Porenbetonsorten  Anschließende TGA der Proben aus dem Ringversuch

Die Proben für die 18-monatige Außenlagerung wurden in einem zweiseitig offenen, überdachten Lager gelagert. Einzelne Proben wurden in Regalen gelagert, während die Proben für die Wandprüfungen während der Lagerungszeit trocken aufgemauert und von einem Holzgestell zusammengehalten wurden (vgl. Abbildung 1).



Abbildung 1: Außenlagerung in einem zweiseitig offenen, überdachten Lager

Eine Übersicht der untersuchten Porenbetonsorten aus dem Hauptversuchsprogramm sowie dem Ringversuch und die dazugehörige Bezeichnung im folgenden Bericht ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Porenbetonsorten

Sorte	Hersteller	Werk	Klasse	Maße B x T x H [mm]	Bezeichn. Bericht	Hauptvers.	Ringvers.
1	A	1	PP2-0,35	624 x 240 x 249	<b>A_1_PP2</b>	X	
2	A	1	PP4-0,50	624 x 300 x 249	<b>A_1_PP4</b>	X	
3	A	2	PP2-0,35	624 x 240 x 249	<b>A_2_PP2</b>	X	X
4	A	2	PP4-0,50	624 x 240 x 249	<b>A_2_PP4</b>	X	X
5	B	3	PP2-0,35	624 x 300 x 249	<b>B_3_PP2</b>	X	
6	B	3	PP4-0,50	624 x 300 x 249	<b>B_3_PP4</b>	X	X
7	C	4	2.9N	440 x 100 x 215	<b>C_4_2.9N</b>	X	X
8	C	4	3.6N	440 x 215 x 215	<b>C_4_3.6N</b>	X	

## 4 Ergebnisse der Untersuchungen

### 4.1 Eingangsprüfungen

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Eingangsprüfungen als Mittelwerte aufgeführt. Sie dienen als Referenzwerte für die Untersuchungen im weiteren Verlauf. Eine detaillierte Aufstellung der Einzelwerte ist den Anhängen 1 bis 5 zu entnehmen. Die Druckfestigkeiten wurden an Prismen (120 mm x 120 mm x 240 mm) bestimmt. Bei allen Proben des Herstellers A wurden die Mindestwerte nach DIN EN 771-4:2015-11 [6] in Verbindung mit DIN 20000-404:2018-04 [5], unterschritten. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Norm die Prüfung an Würfeln mit 100 mm Kantenlänge oder am ganzen Stein vorsieht. Hier wurden jedoch Prismen geprüft, da sie als Referenzwert für die Dauerstandversuche, bei denen ebenfalls Prismen verwendet wurden, herangezogen werden sollten.

Tabelle 3: Ergebnisse der Eingangsprüfungen für die Hauptversuche

Porenbetonsorte	Mittelwert				
	Druckfestigkeit	Feuchtegehalt	Trockenrohddichte	Feuchtegehalt	CaO-Gehalt
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[M.-%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[M.-%]	[M.-%]
A_1_PP2	2,52	5,0	336	21,9	31,9
A_1_PP4	4,26	6,8	474	33,9	26,1
A_2_PP2	2,01	4,1	342	28,9	31,9
A_2_PP4	3,76	5,0	501	27,0	24,4
B_3_PP2	2,73	6,1	332	51,9	30,3
B_3_PP4	4,50	8,2	481	43,1	29,3
C_4_2.9N	3,89	5,1	516	37,7	28,8
C_4_3.6N	4,60	6,2	632	45,5	23,2

In Tabelle 4 sind zudem die Ergebnisse der Sulfatuntersuchungen zusammengefasst. Der Sulfatgehalt wird als ein wesentlicher Parameter für die Dauerhaftigkeit von Porenbeton angesehen [7].

Tabelle 4: Sulfatgehalt

Porenbetonsorte	Sulfatgehalt		SO <sub>3</sub> im Feststoff	als CaSO <sub>4</sub> im Feststoff	als Gips im Feststoff
	SO <sub>4</sub> in der Lsg.	SO <sub>4</sub> im Feststoff			
	[mg/l]	[M.-%]			
A_1_PP2	351	0,44	0,37	0,62	0,79
A_1_PP4	329	0,41	0,34	0,58	0,74
A_2_PP2	321	0,40	0,33	0,57	0,72
A_2_PP4	213	0,27	0,22	0,38	0,48
B_3_PP2	1160	2,90	2,41	4,10	5,19
B_3_PP4	847	2,11	1,76	3,00	3,79
C_4_2.9N	313	1,56	1,30	2,21	2,80
C_4_3.6N	589	0,74	0,61	1,04	1,32

In den vier Porenbetonsorten von Hersteller A lag ein deutlich geringerer Sulfatgehalt im Vergleich zu den beiden Porenbetonsorten von Hersteller B vor. Der Porenbeton aus England mit Flugasche wies zwar einen höheren Sulfatgehalt auf als die Sorten des Herstellers A, lag aber ebenfalls deutlich unter dem des Herstellers B. Üblicherweise wird für den Herstellungsprozess von Porenbeton Gips zur Verbesserung der Produkteigenschaften verwendet [8]. Ein geringer Sulfatanteil im Porenbeton kann sich negativ auf das Druckfestigkeits- und Schwindverhalten auswirken [9].

## 4.2 Dauerstandversuche

In Abbildung 2 sind die Ergebnisse der Dauerstandversuche für die Porenbetonproben des Herstellers A dargestellt. In vorangegangenen Untersuchungen wurden bereits Versuche bei 90 % und 85 % der Kurzzeitfestigkeit durchgeführt. Die Proben versagten bei dieser Belastung jedoch größtenteils kurz nach Versuchsbeginn, sodass die Versuche bei 65 % und 75 % der Kurzzeitfestigkeit fortgesetzt wurden. Dabei wurden die verbliebenen Proben PP2-0,35 des Herstellers A, Werk 2 nach ca. einem Jahr ausgebaut, da sie nach dieser langen Prüfdauer noch nicht versagt hatten. Die Proben PP4-0,50 des Herstellers A, Werk 1 versagten bei 65 % bezogener Belastung im Mittel nach etwa 2000 Stunden, während die Standzeit bei 75 % im Durchschnitt nur etwa 500 Stunden betrug. Ein großer Unterschied zwischen den Belastungsstufen liegt bei den Proben PP2-0,35 des Herstellers A, Werk 1 vor. Während die Proben bei 65% im Schnitt etwa 4500 Stunden der Belastung standhielten, versagten die Proben bei 75 % bereits innerhalb der ersten Stunde. Die Proben PP4-0,50 des Herstellers A, Werk 2 versagten bei beiden Belastungsstufen bereits innerhalb der ersten 20 Stunden.

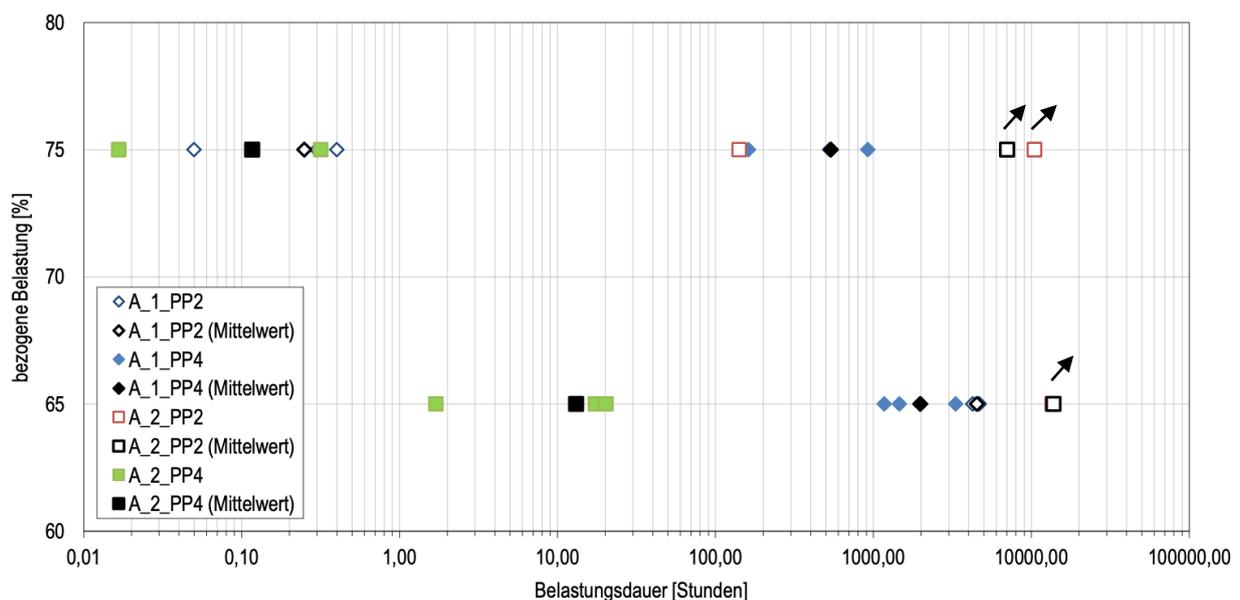


Abbildung 2: Ergebnisse der Dauerstandversuche (Pfeile kennzeichnen Durchläufer)

Insgesamt zeigte sich bei allen Steinen des Herstellers A aus beiden Werken ein völlig unzureichendes Dauerstandverhalten. Eine tabellarische Aufstellung der Einzelwerte ist den Anhängen 2 und 3 zu entnehmen.

## 4.3 Auslagerungsversuche

### 4.3.1 Wanddruckfestigkeit und Carbonatisierung

Für die drei deutschen Herstellwerke wurden die Wanddruckfestigkeiten mit Porenbetonsteinen im Anlieferungszustand und nach 18-monatiger Lagerung untersucht. Neben der im Versuch erreichten Festigkeit wurden auch die mindestens zu erwartenden rechnerischen Mauerwerksdruckfestigkeiten nach DIN EN 1996-1-1:2013-02 [10] in Kombination mit dem nationalen Anhang DIN EN 1996-1-1/NA:2019-12 [11] ermittelten charakteristischen Werte  $f_k$  der Mauerwerkdruckfestigkeit mit folgender Formel bestimmt.

$$f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta$$

Dabei ist

$f_k$  die charakteristische Druckfestigkeit von Mauerwerk in N/mm<sup>2</sup>;

$K$  eine Konstante zur Ermittlung der Druckfestigkeit;

$\alpha, \beta$  Konstanten zur Ermittlung der Druckfestigkeit

$f_b$  die normierte Mauersteinfestigkeit in Lastrichtung in N/mm<sup>2</sup>

$f_m$  die Druckfestigkeit des Mauermörtels in N/mm<sup>2</sup>

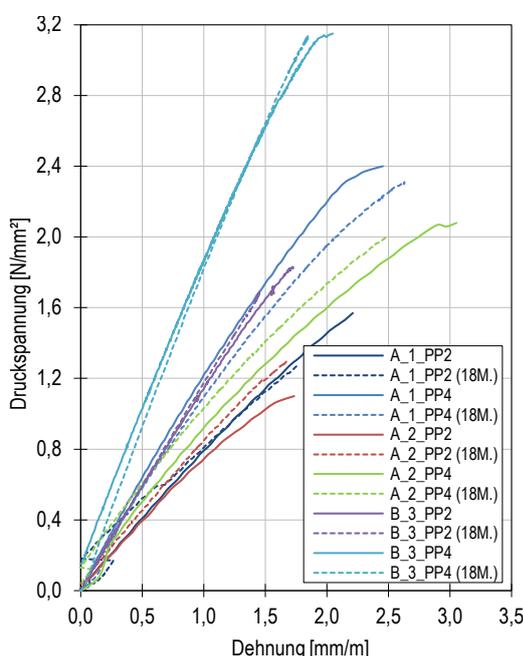
Nach DIN EN 1996-1-1/NA:2019-12 [11] ist  $f_b$  durch die umgerechnete mittlere Steindruckfestigkeit  $f_{st}$  zu ersetzen. Der Beiwert  $f_m$  kann aufgrund der Verwendung eines Dünnbettmörtels unbeachtet bleiben, bzw. zu 1,0 gesetzt werden. Die Konstanten sind dem nationalen Anhang (vgl. Tabelle 5) zu entnehmen.

Tabelle 5: Parameter zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Einsteinmauerwerk aus Porenbeton mit Dünnbettmörtel [11]

Steinart	Mittlere Steindruckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Mörtelart Dünnbettmörtel	Parameter		
			K	$\alpha^a$	$\beta$
Vollsteine aus Porenbeton	$2,5 \leq f_{st} < 5,0$	DM	0,90	0,76	-
	$5,0 \leq f_{st} \leq 10,0$			0,75	

<sup>a</sup> Für die Steindruckfestigkeitsklasse-Rohdichtekombination 4-0,5 gilt  $\alpha = 0,66$ .  
Für die Steindruckfestigkeitsklasse-Rohdichtekombination 6-0,6 gilt  $\alpha = 0,70$ .

In DIN EN 1996-1-1/NA:2012-05 [12] wurde für die Steindruckfestigkeitsklasse-Rohdichtekombination PP4-0,5 die Konstante  $\alpha$  mit 0,75 angesetzt, während in DIN EN 1996-1-1/NA:2019-12 [11] die Konstante  $\alpha$  nur noch mit 0,66 angesetzt wird. Dadurch ändert sich die charakteristische Mauerdruckfestigkeit  $f_k$  von 3,01 N/mm<sup>2</sup> auf 2,60 N/mm<sup>2</sup>. Die Ergebnisse der Wandprüfungen, die normativ erforderlichen charakteristischen Werte  $f_k$  der Mauerwerkdruckfestigkeit sowie die Abweichungen der ermittelten Druckfestigkeit zu den normativ erforderlichen Werten sind der Abbildung 3 zu entnehmen.



Wand	Lagerung	Festigkeit	$f_k$	Abweichung
		[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
A_1_PP2	Anlieferungszust.	1,60	1,81	-11,6
A_1_PP2	18 M. Außenlag.	1,29	1,81	-28,7
A_1_PP4	Anlieferungszust.	2,40	2,60	-7,7
A_1_PP4	18 M. Außenlag.	2,31	2,60	-11,2
A_2_PP2	Anlieferungszust.	1,11	1,81	-38,7
A_2_PP2	18 M. Außenlag.	1,32	1,81	-27,1
A_2_PP4	Anlieferungszust.	2,10	2,60	-19,2
A_2_PP4	18 M. Außenlag.	2,01	2,60	-22,7
B_3_PP2	Anlieferungszust.	1,84	1,81	1,7
B_3_PP2	18 M. Außenlag.	1,69	1,81	-6,6
B_3_PP4	Anlieferungszust.	3,15	2,60	21,2
B_3_PP4	18 M. Außenlag.	3,14	2,60	20,8

Abbildung 3: Spannungs-Dehnungs-Linien der Wandprüfungen (links) und Übersicht Wanddruckfestigkeiten (rechts)

Die erreichten Druckfestigkeiten liegen bei den durchgeführten Wandprüfungen für die Werke 1 und 2 des Herstellers A unter den charakteristischen Werten. Dies gilt auch für die Prüfungen im Anlieferungszustand und konnte bereits bei den Eingangsprüfungen (vgl. Tabelle 3) beobachtet werden. Für Hersteller A liegen die Abweichungen zu den charakteristischen Werten zwischen

7,7 % und 38,7 % im Anlieferungszustand und zwischen 11,2 % und 28,7 % nach 18-monatiger Außenlagerung. Demgegenüber erreichten die beiden Porenbetonsorten aus Werk 3 im Anlieferungszustand eine ausreichende Druckfestigkeit. Nach 18-monatiger Außenlagerung zeigte sich beim PP4 praktisch keine Veränderung, während der PP2 aus Werk 3, der bereits bei der Eingangsprüfung nur knapp oberhalb des zulässigen Grenzwerts lag, mit -6,6 % Abweichung den charakteristischen Wert nicht erreichte. Auffällig ist darüber hinaus, dass bei der Steinsorte A\_2\_PP2 die Mauerwerksdruckfestigkeit nach 18 Monaten Außenlagerung höher war als im Anlieferungszustand. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Steine offensichtlich bereits im Anlieferungszustand stark geschädigt waren und mit fast 40% dramatisch unter dem charakteristischen Wert lagen.

Begleitend zur Bestimmung der Wanddruckfestigkeiten wurden im Anlieferungszustand Proben aus der Mitte der Steine der jeweiligen Porenbetonsorten thermogravimetrisch untersucht, um den Referenzwert im Ausgangszustand festzustellen. Weiterhin wurden nach 18-monatiger Außenlagerung Proben nach abgeschlossener Prüfung aus den Steinen für die Wandversuche jeweils aus der Mitte und dem Randbereich der Steine entnommen. In Abbildung 4 sind exemplarisch die Verläufe der Thermogravimetrischen Analysen (TGA) der untersuchten Proben aus der Mitte dargestellt. Die Proben aus dem Randbereich weisen noch größere Veränderungen im Vergleich zum Ausgangszustand auf (vgl. Anhänge 6 und 7).

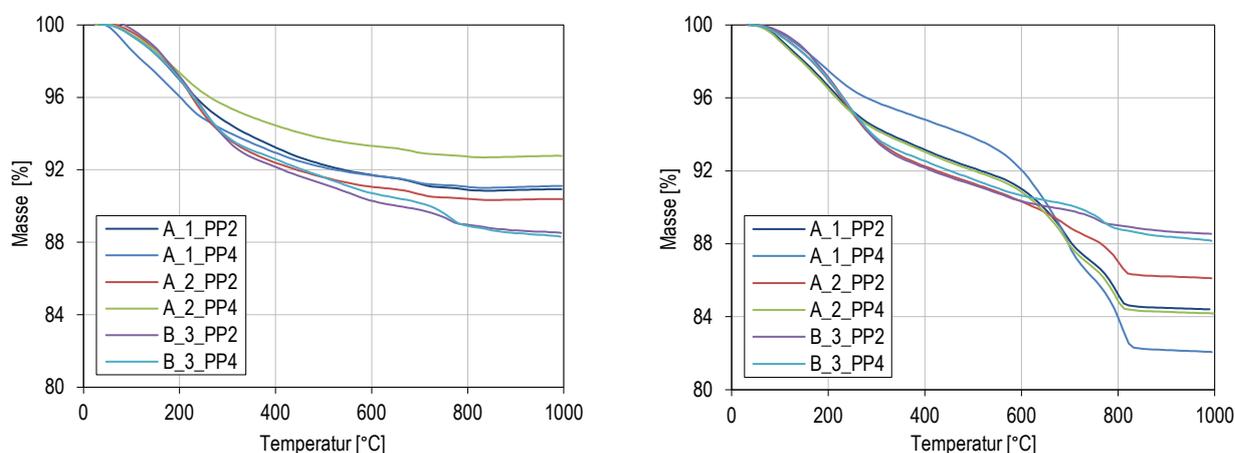


Abbildung 4: TGA (Masseverlust) im Anlieferungszustand (links) und nach 18-monatiger Außenlagerung aus der Mitte der Wand (rechts)

Für diese Untersuchungen ist der Bereich bei etwa 600 °C bis 800 °C relevant [13], in dem CO<sub>2</sub> ausgetrieben wird. Daraus lassen sich Rückschlüsse auf das Carbonatisierungsverhalten des Porenbetons ziehen. Insbesondere kann für die Proben des Herstellers A anhand der Verläufe eine deutliche Aufnahme von CO<sub>2</sub> erkannt werden. Dies wird besonders deutlich, wenn man den Masseverlust über die Temperaturzunahme als erste Ableitung darstellt (vgl. Abbildung 5).

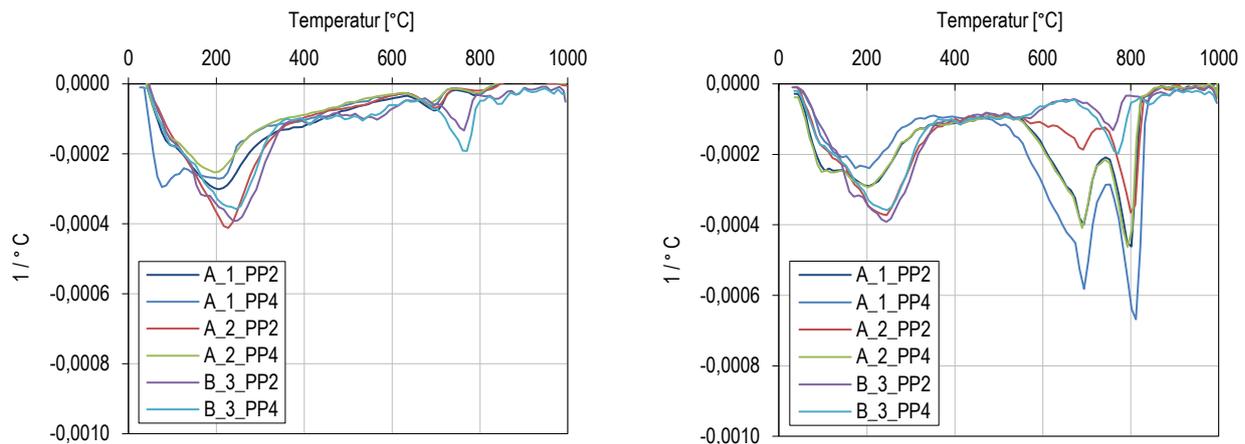


Abbildung 5: TGA (1. Ableitung) im Anlieferungszustand (links) und nach 18-monatiger Außenlagerung aus der Mitte der Wand (rechts)

Neben der qualitativen Beurteilung der Carbonatisierung anhand der Kurven der TGA, wurden die Carbonatisierungszustände auch quantitativ ausgewertet und verglichen. Zur einheitlichen Ermittlung des Carbonatisierungsgrads wurde der Ansatz nach MATSUSHITA et al. [13] verwendet. Sie definieren den Carbonatisierungsgrad von Porenbeton  $D_c$  in % als

$$D_c = \frac{(C - C_0)}{C_{max} - C_0} \cdot 100$$

$C$ ,  $C_0$  und  $C_{max}$  sind die Masseanteile von  $CO_2$  in der jeweiligen Probe, in der nicht carbonatisierten Referenzprobe und der Anteil an  $CO_2$ , der theoretisch erforderlich ist, um das gesamte Kalziumoxid in  $CaCO_3$  umzuwandeln. MATSUSHITA et al. [13] ermitteln die Masseanteile  $C$  und  $C_0$  als Masseverlust zwischen  $600\text{ °C}$  und  $800\text{ °C}$  in der TGA. Sie legen zu Grunde, dass in diesem Temperaturbereich ausschließlich und vollständig der  $CO_2$ -Anteil aus  $CaCO_3$  ohne Freikalk und ohne den Anteil aus Magnesiumcarbonat ermittelt wird. Den Gesamtanteil an  $CaO$  ermitteln sie mit Hilfe der Ionenchromatographie (ICP). Über das Molmassenverhältnis zwischen  $CO_2$  und  $CaO$  von 22 zu 28 kann  $C_{max}$  aus  $CaO$  errechnet werden. Die dafür benötigten Kenngrößen wurden mittels TGA in Verbindung mit komplexometrischer Titration bestimmt. Die so ermittelten  $CaO$ -Anteile sind Tabelle 3 in Abschnitt 4.1 zu entnehmen.

Die Auswertung des Carbonatisierungsgrads ist in Abbildung 6 aufgeführt. Dabei ist der Carbonatisierungsgrad als Mittelwert der beiden Messungen je Porenbetonart nach 18-monatiger Außenlagerung bestimmt worden.

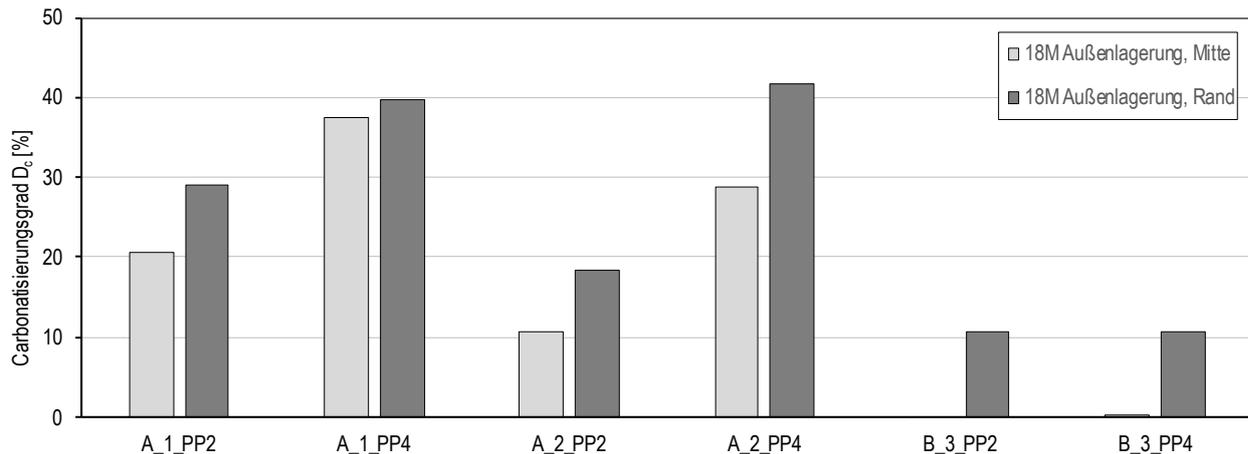


Abbildung 6: Carbonatisierungsgrade (Mitte und Rand) an den Wandproben nach 18-monatiger Außenlagerung

Die untersuchten Porenbetonwände wiesen nach 18-monatiger Außenlagerung erwartungsgemäß alle einen höheren Carbonatisierungsgrad im Randbereich auf als in der Mitte. Den höchsten Carbonatisierungsfortschritt wiesen die Porenbetonsorten mit der höheren Rohdichteklasse von Hersteller A auf, mit Werten von über 40 Prozent im Randbereich. Die Porenbetonsorten des Herstellers A mit der niedrigeren Rohdichteklasse wiesen deutlich geringere Carbonatisierungsgrade auf, jedoch auch bis zu 30 Prozent im Randbereich und bis zu 20 Prozent in der Mitte. Die beiden Porenbetonsorten von Hersteller B verhielten sich unabhängig von der Rohdichteklasse. In der Mitte konnte nahezu keine Carbonatisierung festgestellt werden, während im Randbereich beide Porenbetonwände zu etwas über 10 Prozent carbonatisiert waren.

#### 4.3.2 Druckfestigkeit (Stein) und Feuchtegehalt

Es wurden Druckfestigkeitsuntersuchungen am ganzen Stein nach 18-monatiger Außenlagerung für die beiden Herstellwerke des Herstellers A sowie für Hersteller B und C durchgeführt. Gemäß den Anforderungen nach DIN EN 771-4:2015-11 [6] in Verbindung mit DIN 20000-404:2018-04 [5], müssen Porenbetonplansteine der Festigkeitsklasse 2 und 4 unter Einbeziehung des Abminderungsfaktors  $k_1$  (nach DIN 20000-404  $k_1 = 1$  für  $A_L = 0$  %) bei Prüfungen am ganzen Stein Mindestwerte von 2,5 N/mm<sup>2</sup> bzw. 4,1 N/mm<sup>2</sup> für eine Steinhöhe von  $\geq 248$  mm und 2,5 N/mm<sup>2</sup> bzw. 4,5 N/mm<sup>2</sup> für eine Steinhöhe zwischen 174 mm und 248 mm erreichen. Zusätzlich wurden die Feuchtegehalte zum Zeitpunkt der Prüfung durch anschließendes Trocknen der Proben bei 105 °C bis zur Massekonstanz bestimmt. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Druckfestigkeiten (Stein) und Feuchtegehalte nach 18-monatiger Außenlagerung

Porenbetonsorte	18-monatige Außenlagerung				Mindestwert nach DIN 20000-404	Abweichung zur Norm
	Feuchteg.	Mittelwert	Festigkeit	Mittelwert		
	[M.-%]		[N/mm <sup>2</sup> ]			
A_1_PP2	6,3	6,7	2,03	2,21	2,5	-11,6
	7,1		2,39			
A_1_PP4	5,1	5,6	2,71	3,31	4,1	-19,3
	6,2		3,91			
A_2_PP2	5,6	5,5	2,14	2,06	2,5	-17,6
	5,5		1,99			
A_2_PP4	2,8	3,3	3,34	3,23	4,1	-21,2
	3,7		3,11			
B_3_PP4	13,4	12,1	4,81	4,80	4,1	17,1
	10,8		4,79			
C_4_2.9N	7,1	7,1	3,80	3,34	-	-
	7,2		2,89			
C_4_3.6N	7,5	7,6	5,13	5,01	-	-
	7,7		4,90			

Die Festigkeitswerte des Herstellers A lagen deutlich zu niedrig und wichen deutlich von den Mindestwerten nach DIN 20000-404 [5] ab, was sich mit den Ergebnissen aus den Eingangsprüfungen (vgl. Abschnitt 4.1) und den Wandprüfungen (vgl. Abschnitt 4.3.1) deckt. Die Sorte B\_3\_PP4 übertraf mit einem Mittelwert von 4,80 N/mm<sup>2</sup> den normativ geforderten Mindestwert von 4,1 N/mm<sup>2</sup> deutlich. Die Porenbetonsorten von Hersteller C entsprechen nicht der deutschen Norm, erreichen jedoch die in den jeweiligen Produktdatenblättern angegebenen Druckfestigkeiten (2,9 N/mm<sup>2</sup> und 3,6 N/mm<sup>2</sup>).

#### 4.3.3 Druckfestigkeits- und Carbonatisierungsprofil

Zusätzlich zu den Druckfestigkeitsuntersuchungen an ganzen Porenbetonsteinen aus Abschnitt 4.3.2 wurden Carbonatisierungsuntersuchungen an den Porenbetonsteinen nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager durchgeführt. Die Steine wurden dafür so in Aluminiumfolie gewickelt und abgeklebt, dass wie bei realem Mauerwerk ausschließlich die Wandflächenseiten der Porenbetonsteine bewittert wurden. Dabei wurde ein Carbonatisierungsprofil in 1 cm Schritten vom Rand bis zur Mitte der Steine erstellt. Um eine möglichst hohe Auflösung zu erhalten und eine Korrelation zu den Carbonatisierungswerten untersuchen zu können, wurden Druckfestigkeitsuntersuchungen an Würfeln mit 40 mm Kantenlänge über die Tiefe durchgeführt. Es wurde jeweils eine Probe zentrisch in der Mitte entnommen, um den günstigsten Wert für die jeweilige Geometrie zu erhalten. Das Entnahmeschema ist exemplarisch für alle Sorten mit einer Steindicke von 300 mm in Abbildung 7 dargestellt. Die Entnahmeschemata für die anderen untersuchten Steinabmessungen sind den Anhängen 8 bis 10 zu entnehmen. Die Anzahl der

TGA- und Druckfestigkeitsproben variierte dabei in Abhängigkeit von der Steindicke. Für eine bestimmte Tiefe im Stein wurden jeweils drei Druckfestigkeitsproben entnommen. Hierzu wurden die Proben in Anlehnung an DIN EN 679:2015-09 [14] in Treibrichtung verteilt aus jeweils einem Drittel des Steins entnommen (vgl. Abbildung 7).

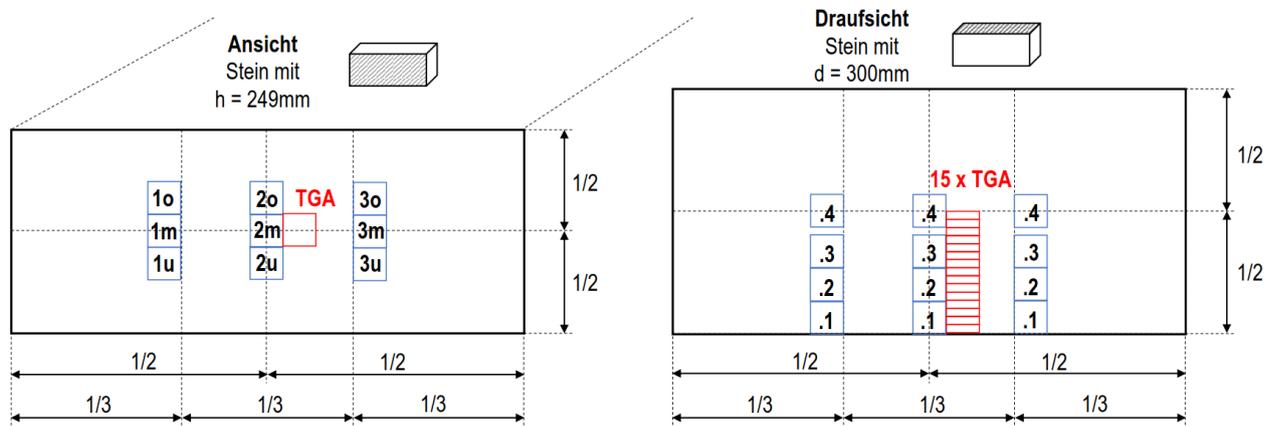


Abbildung 7: Entnahmeschema für die Druckfestigkeits- und TGA-Proben nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten A\_1\_PP4, B\_3\_PP2 und B\_3\_PP4

Die Ergebnisse der TGA und Druckfestigkeitsuntersuchungen sind den Tabellen in den Anhängen 11 bis 15 zu entnehmen. In den Abbildungen 8 bis 14 sind die ermittelten Carbonatisierungsgrade und Druckfestigkeiten über die Tiefe des Steins aufgetragen. Bei den Druckfestigkeiten handelt es sich um Mittelwerte aus drei Proben in Treibrichtung bei Feuchtegehalten zwischen 6,0 M.-% und 8,3 M.-%.

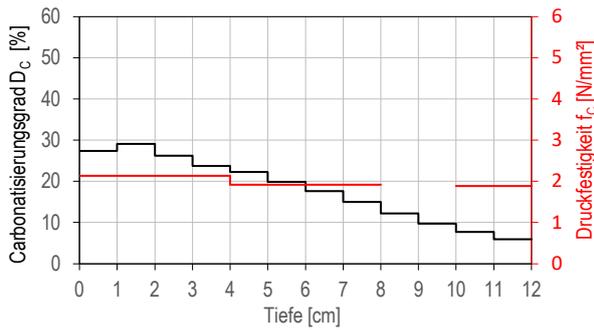


Abbildung 8: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte A\_2\_PP2

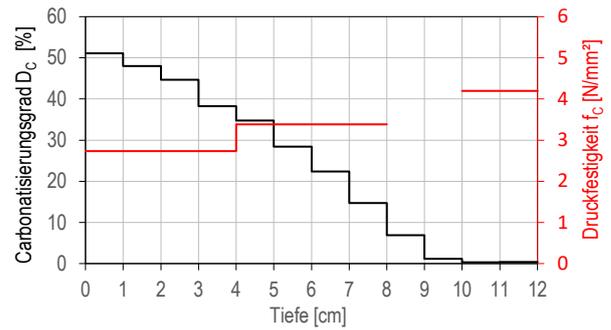


Abbildung 9: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte A\_2\_PP4

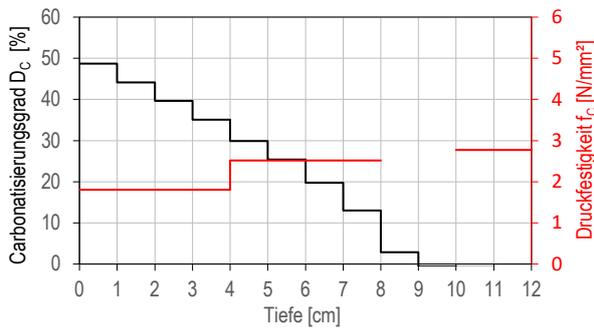


Abbildung 10: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte A\_1\_PP2

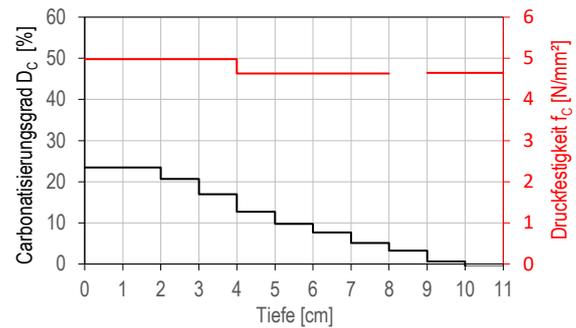


Abbildung 11: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte C\_4\_3.6N

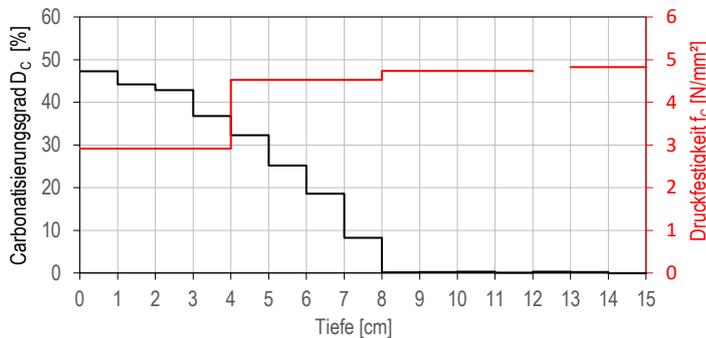


Abbildung 12: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte A\_1\_PP4

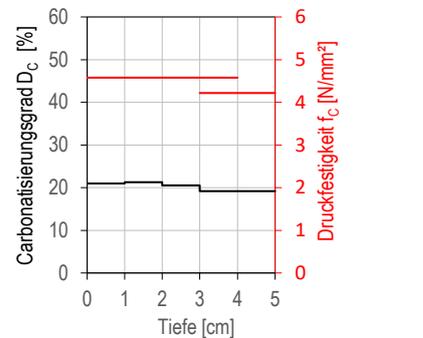


Abbildung 13: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte C\_4\_2.9N

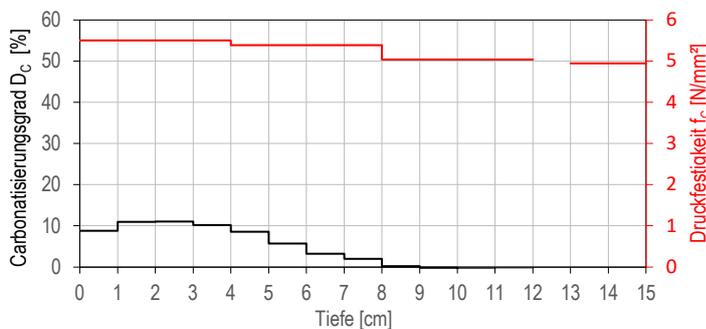


Abbildung 14: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte B\_3\_PP4

Die Porenbetonsorten A\_1\_PP2, A\_1\_PP4 und A\_2\_PP4 des Herstellers A wiesen nach 18-monatiger Außenlagerung hohe Carbonatisierungsgrade von etwa 50 % im Randbereich auf. Die Werte nahmen mit zunehmender Steintiefe ab. In der Mitte der Steine konnte keine Carbonatisierung mehr festgestellt werden. Betrachtet man die Druckfestigkeit in der Steinmitte als Referenz, so nahmen die Druckfestigkeiten dieser Sorten mit zunehmender Carbonatisierung nach außen drastisch ab. Die Sorte A\_2\_PP2 bildet eine Ausnahme mit relativ konstanten Druckfestigkeiten über den Steinquerschnitt. Die Druckfestigkeiten nahmen hier sogar tendenziell geringfügig zu bei einem Carbonatisierungsgrad von etwa 30 % außen und etwa 6 % in der Mitte des Steins. Auch bei den Carbonatisierungsgraden und bei den Wandversuchen zeigte sich ein geringerer Effekt der Auslagerung. Ebenfalls wiesen die Porenbetonsorten C\_4\_2.9N und C\_4\_3.6N des Herstellers C nur geringe Veränderungen auf, jedoch mit deutlich geringeren Carbonatisierungsgraden von etwa 20 % im Randbereich. Aufgrund der geringen Steindicke von 10 cm, wies die Probe C\_4\_2.9N in Steinmitte auch einen Carbonatisierungsgrad von etwa 20 % auf. Die Probe B\_3\_PP4 des Herstellers B wies mit einem Carbonatisierungsgrad von 10 % im Randbereich von allen untersuchten Porenbetonsorten die geringsten Werte auf. Die Druckfestigkeit nahm nach außen etwa um 10 % zu.

#### 4.4 Schwinduntersuchungen

In Abbildung 15 sind die Schwindverläufe aller geprüften Porenbetonsorten dargestellt. Die beiden Proben aus Werk 3 und der englische Porenbeton aus Werk 4 blieben unter dem Grenzwert der Norm von 0,4 mm/m und stellten sich etwa bei einem Gesamtmaß des Trocknungsschwindens von 0,3 mm/m ein, wobei der englische Porenbeton zunächst in der Anfangsphase des Schwindens nahezu auf einen Wert von 0,4 mm/m anstieg und dann wieder abfiel. Qualitativ ähnliche Verläufe wurden auch schon im Vorgängerprojekt an anderen Porenbetonsteinen beobachtet [3].

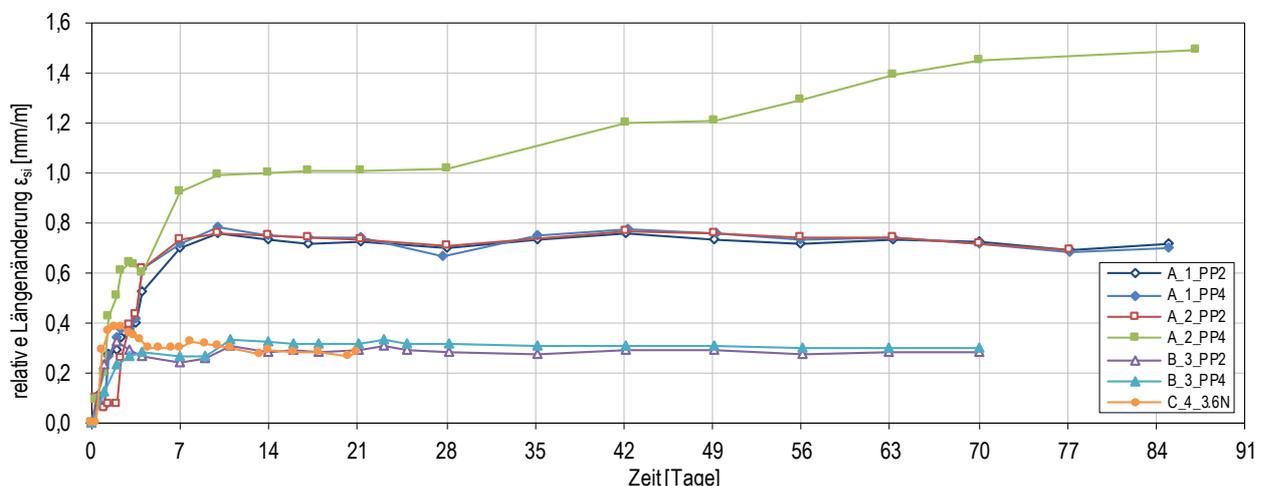


Abbildung 15: Verläufe der Schwinduntersuchungen nach DIN EN 680

Die Proben der Werke 1 und 2 überschritten den Grenzwert von 0,4 mm/m deutlich. Besonders auffällig zeigt sich der Schwindverlauf der Porenbetonprobe PP4-0,50 des Herstellers A, Werk 2. Bei dieser Probe stiegen die Schwindwerte über den gesamten Messzeitraum kontinuierlich an. Ein Endwert war auch nach fast drei Monaten nicht festzustellen.

Es wurden weiterführende Untersuchungen zum Schwindverhalten durchgeführt. Dabei wurde mit den Porenbetonsorten 1 bis 6 und 8 aus Tabelle 2 eine weitere Versuchsreihe angesetzt, um den Einfluss der in DIN EN 680 zugelassenen Lagerungsbedingungen auf das Schwindverhalten der Porenbetonproben zu untersuchen. Hierzu wurden die Proben in einem Raum sowie einem Klimaschrank mit Temperatur- und Feuchteregelung gelagert. Steine der Porenbetonsorte 7 wurden erst zu einem späteren Zeitpunkt geliefert und waren deshalb nicht Bestandteil dieser Schwinduntersuchungen.

Die Schwindwerte sind in Abbildung 16 in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die Proben B\_3\_PP2, B\_3\_PP4 und C\_4\_3.6N wiesen unter beiden Lagerungsbedingungen ähnliche Schwindverläufe auf und auch nahezu identische Gesamtwerte des Trocknungsschwindens nach 21 Tagen. Nur in der Anfangsphase wiesen die Proben aus dem Klimaschrank durch eine schnellere Austrocknungsgeschwindigkeit einen steileren Anstieg der Schwindverläufe auf. Auffällig sind die unterschiedlichen Schwindverläufe bei den Proben A\_1\_PP2, A\_1\_PP4 und A\_2\_PP4 in Abhängigkeit der Lagerungsbedingungen. Die im Klimaschrank gelagerten Proben A\_1\_PP2 und A\_1\_PP4 scheinen sich asymptotisch einem Wert zu nähern, während die Proben aus dem Klimaraum anscheinend weiter schwinden. Probe A\_2\_PP4 wies die höchsten Schwindverformungen auf und zeigte auch trotz Lagerung im Klimaschrank weiter zunehmende Schwindverformungen, wenn auch geringer als im Klimaraum.

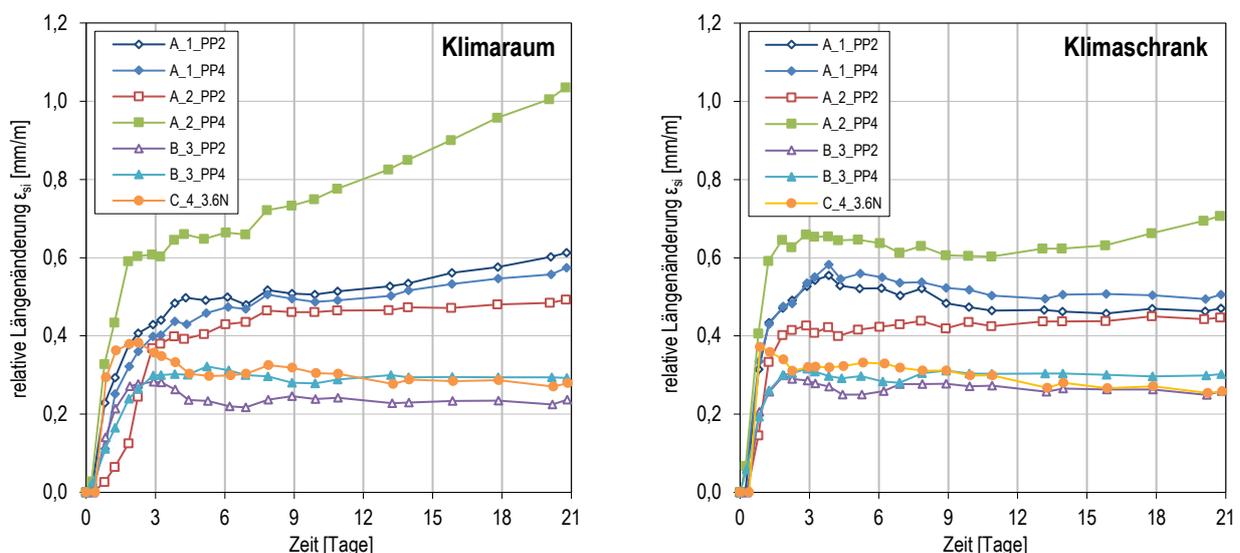


Abbildung 16: Schwindverläufe (links: Lagerung im Klimaraum, rechts: Lagerung im Klimaschrank)

Zusätzlich zu den beiden Lagerungsbedingungen wurden die Proben einerseits nach DIN EN 680:2006-03 [4] und andererseits nach RILEM [15] konditioniert. Dabei konnte kein nennenswerter Einfluss der Konditionierung auf das Ergebnis der Untersuchung festgestellt werden. Dies gilt sowohl für die im Klimaraum als auch für die im Klimaschrank geprüften Proben. Daher wird die Art der Vorlagerung in diesem Bericht als gleichwertig angesehen und nicht weiter thematisiert. Für weitere Schwinduntersuchungen, z.B. im Rahmen des Ringversuchs (vgl. Abschnitt 5) konnte daher problemlos auf die RILEM-Lagerung zurückgegriffen werden.

Begleitend zu den Schwinduntersuchungen wurde zu Beginn der CaO-Gehalt der Porenbetonproben in der Mitte des Steins bestimmt sowie eine thermogravimetrische Analyse durchgeführt. Eine genauere Erläuterung zur Bestimmung des Carbonatisierungsgrads findet sich in Abschnitt 4.3.1. Weitere Messungen wurden nach 21, 63, 154, 259 und 365 Tagen durchgeführt. Die daraus bestimmten Carbonatisierungsgrade sind in Abbildung 17 dargestellt.

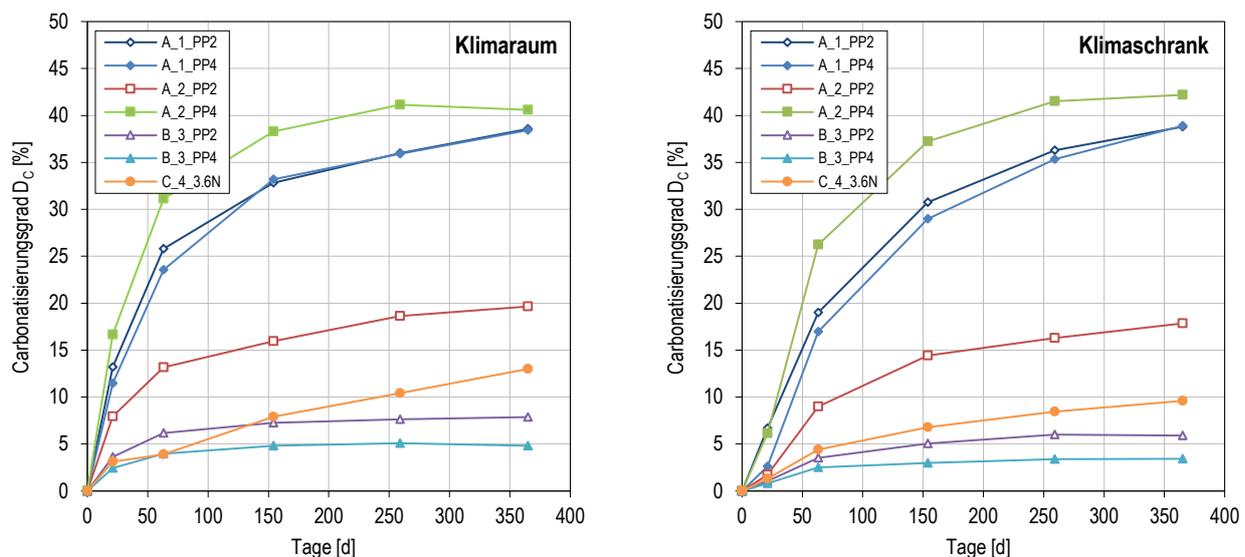


Abbildung 17: Carbonatisierungsgrade in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer und den Lagerungsbedingungen (links: Lagerung im Klimaraum, rechts: Lagerung im Klimaschrank)

Der Carbonatisierungsgrad der Proben ist stark abhängig von den Lagerungsbedingungen. Die im Klimaraum gelagerten Proben wiesen durchweg, besonders nach 21 und 63 Tagen, deutlich höhere Carbonatisierungsgrade auf. Dies gilt besonders für die Proben A\_1\_PP2, A\_2\_PP2, A\_1\_PP4 und A\_2\_PP4. Diese Proben zeigten ein auffälliges Schwindverhalten (vgl. Abbildung 16). Wie zu erwarten, ist eine gewisse Korrelation zwischen dem Gesamtschwindmaß und dem Carbonatisierungsgrad zu erkennen. Besonders bei den Porenbetonproben von Hersteller A stieg das Gesamtschwindmaß mit zunehmendem Carbonatisierungsgrad (vgl. Abbildung 18). In der Anfangsphase war ein höherer Anstieg zu verzeichnen, der damit zu erklären ist, dass in dieser Phase offensichtlich das Trocknungsschwinden der vorherrschende Einfluss ist. Nachdem sich

ein konstanter Feuchtegehalt der Proben eingestellt hat, können die weiteren Schwindverformungen auf die Carbonatisierung der Proben zurückgeführt werden.

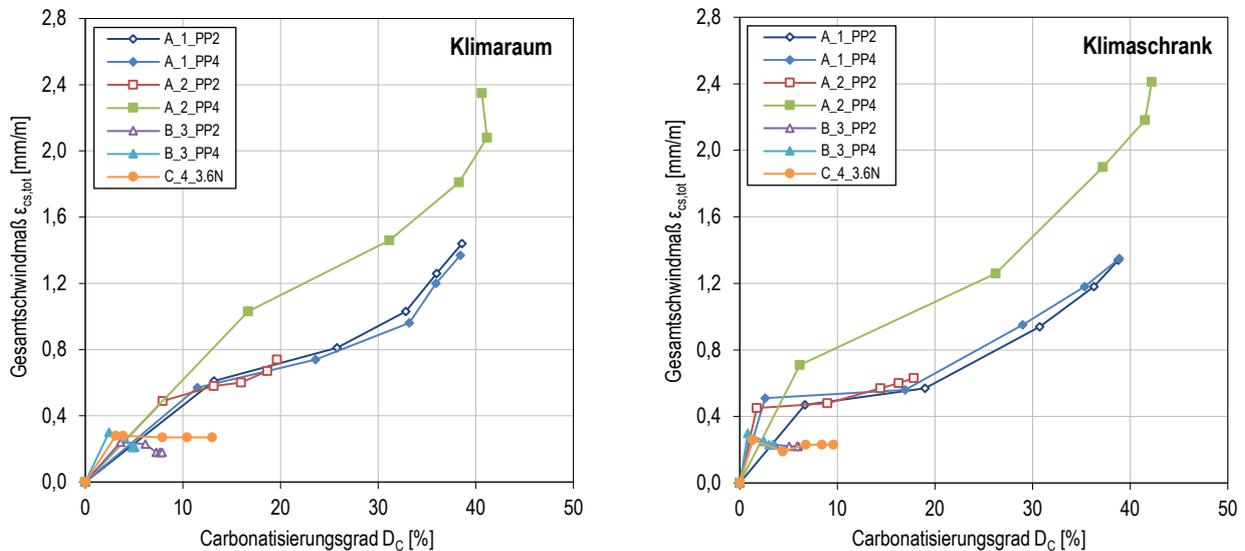


Abbildung 18: Gesamtschwindmaße und Carbonatisierungsgrade (links: Lagerung im Klimaraum, rechts: Lagerung im Klimaschrank)

Ein Teil der zuvor behandelten Ergebnisse wurde auf der 6. Internationalen Porenbetonkonferenz in Potsdam vorgestellt und im Artikel „Testing boundary conditions determining the drying shrinkage behaviour of AAC“ [16] veröffentlicht.

#### 4.5 Röntgendiffraktometrie (XRD)

In Tabelle 7 sind die Phasenzusammensetzungen von sechs Porenbetonarten aus dem Hauptversuchsprogramm aufgeführt. Dabei wurden alle Sorten des Herstellers A sowie jeweils eine Sorte von Hersteller B und C untersucht. Die Anteile der einzelnen Phasen wurden mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) mit Rietveld-Analyse ermittelt. Das XRD-Diagramm ist dem Anhang 16 zu entnehmen. Die Durchführung wird in Abschnitt 5.6 im Rahmen des Ringversuchs detaillierter beschrieben.

Tabelle 7: Phasenzusammensetzung mittels XRD mit Rietveld-Analyse

Phasen	A_1_PP2	A_1_PP4	A_2_PP2	A_2_PP4	B_3_PP4	C_4_2.9N
	Anteil [M.-%]					
Quartz	12	16	10	14	8	6
Tobermorit	50	48	61	48	66	68
Forshagit	-	7	-	-	-	-
Amorph	30	25	25	33	19	19
Kalzit	7	2	4	3	4	3
Aragonit	< 1	2	< 1	< 1	< 1	< 1
Vaterit	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Katoit	-	-	-	-	-	4
unbekannt	-	-	-	2	-	-

Aus mineralogischer Sicht besteht Porenbeton aus der kristallinen Calcium-Silikat-Hydrat-Phase (CSH-Phase) Tobermorit, amorphen CSH-Phasen, nicht reagiertem Quarz und Anhydrit [7]. Bei der Carbonatisierung von Porenbeton, wandeln sich die CSH-Phasen in Carbonatphasen (v.a. Kalzit, Aragonit, Vaterit, Katoit) und in gelförmiges und wasserhaltiges Siliziumdioxid um.

Die Phasenzusammensetzungen variierten zwischen den Herstellern sehr deutlich. Die Porenbetone des Herstellers A wiesen durchweg einen deutlich geringeren Tobermoritgehalt und einen höheren Gehalt an amorphen CSH-Phasen auf als die der Hersteller B und C. Die Sorte A\_2\_PP4 wies im Vergleich zu den anderen Sorten des Herstellers A einen etwas höheren Anteil an amorphen CSH-Phasen auf. Bei der Sorte A\_1\_PP4 lag der Tobermoritgehalt mit 61 % deutlich höher als bei den anderen Sorten desselben Herstellers mit 48 % bis 50 %. Er war damit fast so hoch wie bei den Herstellern B und C mit 66 % bzw. 68 %. Bis auf das bei Hersteller C vorhandene Katoit waren die Phasenzusammensetzungen zwischen den Sorten der Hersteller B und C sehr ähnlich. Mit einem Anteil an amorphen CSH-Phasen von 19 % wiesen diese Sorten niedrigere Gehalte auf als die des Herstellers A.

## 5 Ringversuch Schwinden und XRD

### 5.1 Allgemeines

Die europäische Produktnorm DIN EN 771-4:2015-11 [6] regelt die Anforderungen von Porenbetonsteinen. Diese Norm beinhaltet jedoch keine Aussagen zum Carbonatisierungsverhalten. Um die darin beschriebenen Produkte in Deutschland zur Anwendung zu bringen, sind die Regelungen der so genannten Anwendungsnorm DIN 20000-404:2018-04 [5] zu beachten. Demnach darf der Gesamtwert des Trocknungsschwindens  $\varepsilon_{cs,tot}$  nach DIN EN 680:2006-03 [4] einen Wert von 0,40 mm/m nicht überschreiten. Dieser Grenzwert beruht auf umfangreichen Untersuchungen, die am Institut für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover zu carbonatisierungsbedingten Veränderungen von Porenbetoneigenschaften durchgeführt wurden [1, 2, 3]. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollte dieser Grenzwert in einem Ringversuch mit mehreren Prüflaboren überprüft werden. Darüber hinaus sollte ermittelt werden, ob risikobehaftete Produkte über den Mineralphasenbestand mittels Röntgenbeugung (z.B. im Rahmen der Qualitätssicherung des Herstellers) praktikabel identifizierbar sind. In diesem Zusammenhang wurde ein Ringversuch durchgeführt, um die Trennschärfe und Reproduzierbarkeit der beiden Messverfahren (Schwinden und XRD) zu beurteilen.

### 5.2 Beteiligte Forschungseinrichtungen

Folgende Forschungseinrichtungen haben sich am Ringversuch beteiligt:

- RWTH Aachen – Institut für Baustoffforschung
- Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
- Leibniz Universität Hannover – Institut für Baustoffe
- Xella Technologie- und Forschungszentrum Brück

Der Ringversuch wurde vom Institut für Baustoffe Hannover koordiniert. Die Ergebnisse wurden dort zusammengefasst und ausgewertet.

### 5.3 Probekörperherstellung

Die Untersuchungen im Rahmen des Ringversuchs wurden an vier Porenbetonsorten durchgeführt. Die Probekörper wurden zuvor am Institut für Baustoffe in Hannover aus ganzen Porenbetonsteinen herausgesägt. Als Probekörper für die Schwinduntersuchungen wurden Prismen mit den Maßen 40 mm x 40 mm x 160 mm hergestellt. Pro Stein wurden sechs Probekörper hergestellt, von denen drei für die Durchführung der Schwinduntersuchungen zu verwenden waren und drei als Reserve dienten. Zusätzlich wurde aus jedem Stein eine Probe für

die XRD-Analyse entnommen. Das genaue Entnahmeschema ist in Abbildung 19 dargestellt. Direkt im Anschluss wurden die Proben eingeschweißt und an die am Ringversuch teilnehmenden Forschungseinrichtungen versendet.

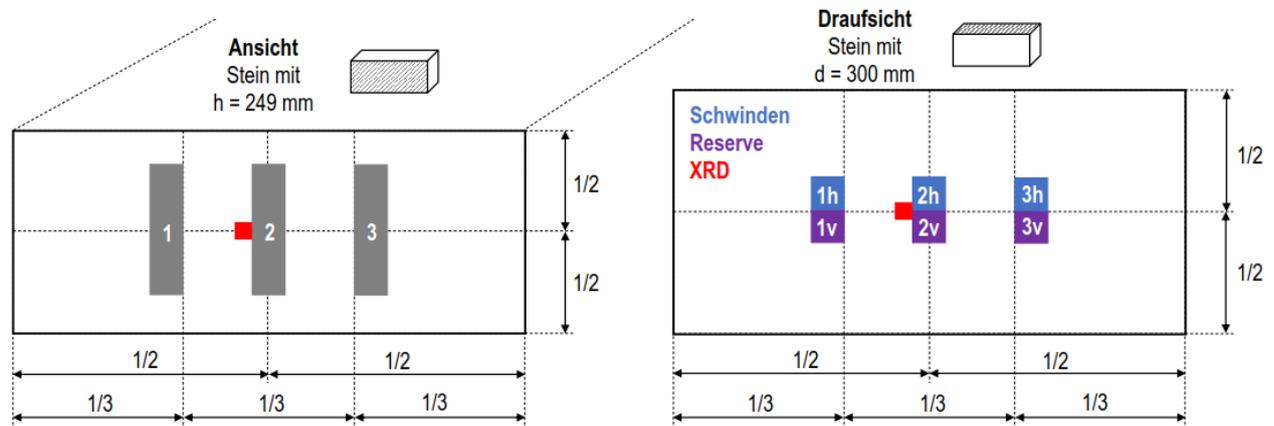


Abbildung 19: Entnahmeschema für die Schwind- und XRD-Proben aus dem Ringversuch

## 5.4 Probekörperkonditionierung

DIN EN 680:2006-03 [4] sieht vor, die Probekörper vor der Schwindprüfung durch eine mindestens 72 Stunden dauernde Lagerung bei  $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$  zu konditionieren. Davon sollen die Proben 24 Stunden ein Drittel, 24 Stunden zwei Drittel und 24 Stunden komplett unter Wasser gelagert werden. Anschließend sind die Probekörper für weitere 24 Stunden in Plastikfolie eingehüllt zu lagern, bevor die eigentlichen Schwindmessungen durchgeführt werden. Beginnt die Konditionierung an einem Montag, hat die tägliche Manipulation zur Folge, dass die erste Schwindmessung an einem Freitag beginnt. Im regulären Laborbetrieb könnte die nächste Messung frühestens drei Tage später durchgeführt werden. Bei der späteren Auswertung sollte jedoch die Trocknungsgeschwindigkeit der Proben berücksichtigt werden, sodass eine höhere Auflösung in den ersten Tagen der Schwindmessungen anzustreben ist.

Bei der sehr ähnlichen Konditionierung nach RILEM [15] werden die Proben für 72 Stunden in ein Wasserbad gelegt. Nach zwei Stunden sind die Proben zu beschweren, um die restlichen 70 Stunden unter Wasser zu lagern. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, an einem Freitag mit der Konditionierung zu beginnen und 72 Stunden später, also an einem Montag, die ersten Schwindmessungen durchzuführen. Für den Ringversuch wurden die Proben daher nach RILEM [15] konditioniert. Voruntersuchungen haben gezeigt (vgl. Abschnitt 4.4), dass diese Art der Konditionierung im Vergleich zum Verfahren nach DIN EN 680 keinen nennenswerten Einfluss auf das Schwindverhalten der Porenbetonproben ausübt [16].

## 5.5 Probekörperlagerung

Laut DIN EN 680 sind die Proben nach der Konditionierung während der Messungen an der Luft bei  $(20 \pm 2) \text{ °C}$  und  $(45 \pm 5) \%$  relativer Luftfeuchte zu lagern. Die Proben dürfen laut Norm entweder in einem Raum oder einem Schrank mit Temperatur- und Feuchteregelung gelagert werden. Diese Freiheit in der Prüfdurchführung kann jedoch insbesondere bei unterschiedlichen Luftbewegungen im Bereich der Proben zu abweichenden Trocknungsgeschwindigkeiten führen, die sich auf das Schwindverhalten der Porenbetonproben auswirken können [16]. Die Art der Lagerung wurde in den Protokollen vermerkt, um sie bei der späteren Auswertung berücksichtigen zu können.

## 5.6 Versuchsdurchführung

Die Schwindmessungen wurden nach DIN EN 680:2006-03 [4] durchgeführt. Laut Norm kann die Schwinduntersuchung abgebrochen werden, wenn zwischen 21 und 28 Tagen die relative Längenänderung um nicht mehr als 0,02 mm/m zunimmt. Ansonsten sind die Messungen fortzusetzen, bis die Zunahme der Längenänderung innerhalb von sieben Tagen diesen Wert nicht mehr überschreitet. Die Messungen innerhalb des Ringversuchs wurden unabhängig von der Zunahme der Längenänderung 35 Tage lang durchgeführt.

Anschließend wurden die Probekörper zur Bestimmung der Trockenrohichte und des Feuchtegehalts getrocknet. Hierzu wurden sie laut Norm in einem belüfteten Trockenschrank bei  $105 \pm 5 \text{ °C}$  bis zum Erreichen der Massekonstanz gelagert. Nach Versuchsende wurden die Proben einzeln eingeschweißt und zurück nach Hannover für anschließende TGA geschickt.

Die Phasenzusammensetzungen wurden mittels XRD mit Rietveld-Analyse ermittelt. Für die Messungen sollten die Pulverproben wie folgt vorbereitet werden:

- Trocknung des Porenbetons bei  $40 \text{ °C}$  auf Massekonstanz
- Zerkleinerung auf eine Korngröße kleiner  $32 \text{ }\mu\text{m}$ .

Die aufbereitete Probe sollte mit innerem Standard Zinkoxid gemessen werden, um Aussagen zum röntgenamorphen Anteil zu erhalten. Die qualitativ bestimmten Phasen sollten in die Quantifizierung (Rietveld-Berechnung) einbezogen werden. Dazu sollten die verwendeten Strukturdaten (ICSD-Nummer) ebenfalls angegeben werden. Neben dem XRD-Diagramm sollten im Protokoll prozentual folgende Bestandteile der Phasenzusammensetzung angegeben werden:

- Quarz
- Tobermorit

- Calcit
- Aragonit
- Vaterit

Zusätzlich sollten Angaben zur Versuchsdurchführung sowie zum Messgerät im Protokoll aufgeführt werden, die der folgenden Tabelle 8 zu entnehmen sind.

Tabelle 8: Angaben zur Versuchsdurchführung sowie zum Messgerät für die XRD-Messungen

Angaben zur Durchführung	B	A	S	H
Probenvorbereitung	- Gewinnung der Probe mittels Bohren - Trocknung des Pulvers bei 40°C auf Massekonstanz - 10% innerer Standard (ZnO) zugesetzt - Nassmahlung in Mikronenmühle - in Achatmörser homogenisiert - zu Pulvertablette verpresst (Backloading-Verfahren)	- 40 °C bis Massekonstanz in Vakuum-Trockenschrank - mahlen auf Korngröße < 32 µm - mit definierter Menge Zinkoxid versetzt (ICDD-Datenbank 01-072-0503) als interner Standard - zu homogenem Gemisch präpariert - Einbringen der Proben im Backloading-Verfahren in die Probenträger	- Trocknung bei 40°C - Probe zerkleinern und von Hand im Achatmörser gemahlen - Einwaage Porenbetonpulver und interner Standard ZnO - in Achatmörser homogenisiert und auf Endfeinheit gemahlen - Präparation in Backloading Probenträger	- Trocknung bei 40°C - Probe im Achatmahlsbecher auf "Standard-Größe" homogenisiert - Präparation im Backloading in Standardformat
Diffraktometer	PANalytical X'Pert PRO	X'Pert Powder Pro	Bruker AXS D8	Bruker AXS D4/D8
Geometrie	-	Bragg-Brentano-Optik (Theta-Theta)	Bragg-Brentano	Bragg-Brentano
Detektor	X'Celerator (128 Kanäle)	X'Celerator	Halbleiterdetektor Sol-X	Scintillationszähler / Graphitmonochromator
Wellenlänge	-	Cu-Kα = 1.54060 Å, Cu-Kα2 =	1.5406 nm	CuKα1/α2
Messbereich	5 - 80° 2Theta	5,00836 °2θ - 69,99850 °2θ	5 - 65 ° 2Theta	5 - 80° 2Theta
Schrittweite	0,017 °2 Theta	0,01671 °2θ	0.02°	0.02° 2Theta
Messzeit	45 s/Schritt	184 Minuten (350 s/Schritt)	6 sec pro step, rund 6h	15 sec/Schritt, 15h
Software	HighScore Plus 3.0e (qualitativ) TOPAS, Version 5 (quantitativ)	PANalytical HighScore Plus 4.6a	Bruker Topaz 4.2	Topas 6.0 (krist) Opus (krist/amorph)
B = Xella Brück, A = RWTH Aachen, S = MPA Stuttgart, H = Leibniz Universität Hannover				

## 5.7 Nachträgliche Untersuchungen

Nach Beendigung der Schwindmessungen und dem anschließenden Trocknen der Probekörper zur Bestimmung der Trockenrohddichte und des Feuchtegehalts wurden die Prismen luftdicht in Folie verpackt und an das Institut für Baustoffe für weitere Untersuchungen zurückgeschickt. Hier wurden dann noch thermogravimetrische Analysen durchgeführt, um den Carbonatisierungsgrad der Proben nach den Schwinduntersuchungen zu überprüfen.

## 5.8 Ergebnisse

### 5.8.1 Schwinden

In den Abbildungen 20 bis 23 sind die Verläufe und Feuchtegehalte aus den Schwinduntersuchungen der Ringversuchsteilnehmer zusammengefasst. Während in Stuttgart und in Brück die Versuche in einem Klimaschrank durchgeführt wurden, wurde in Aachen ein (kleiner) Klimaraum verwendet. In Hannover wurde der Ringversuch parallel sowohl im Klimaschrank als auch in einem Klimaraum durchgeführt.

Qualitativ betrachtet weisen die Schwindverläufe der Porenbetonsorte A\_2\_PP2 einen ähnlichen Verlauf auf (vgl. Abbildung 20). Während die Schwindwerte nach 7 Tagen zwischen 0,39 mm/m und 0,46 mm/m noch relativ dicht beieinander lagen, variierte die relative Längenänderung nach 35 Tagen deutlich stärker, etwa zwischen 0,4 mm/m und 0,6 mm/m. Bei dem ansteigenden Verlauf der Kurven, insbesondere derjenigen aus Hannover, wird deutlich, dass die Verformungen auch nach 35 Tagen noch nicht abgeschlossen sind. Da sich jedoch in allen Laboren nach spätestens sieben Tagen bei den Proben ein konstanter Feuchtegehalt eingestellt hatte, kann der weiter ansteigende Kurvenverlauf nur auf carbonatisierungsbedingte Schwindverformungen zurückgeführt werden. Betrachtet man den Feuchtegehalt über die Zeit, wird deutlich, dass die Proben unterschiedlich schnell trockneten. Dies spiegelt sich auch im ersten Anstieg bei den dazugehörigen Schwindverläufen wider.

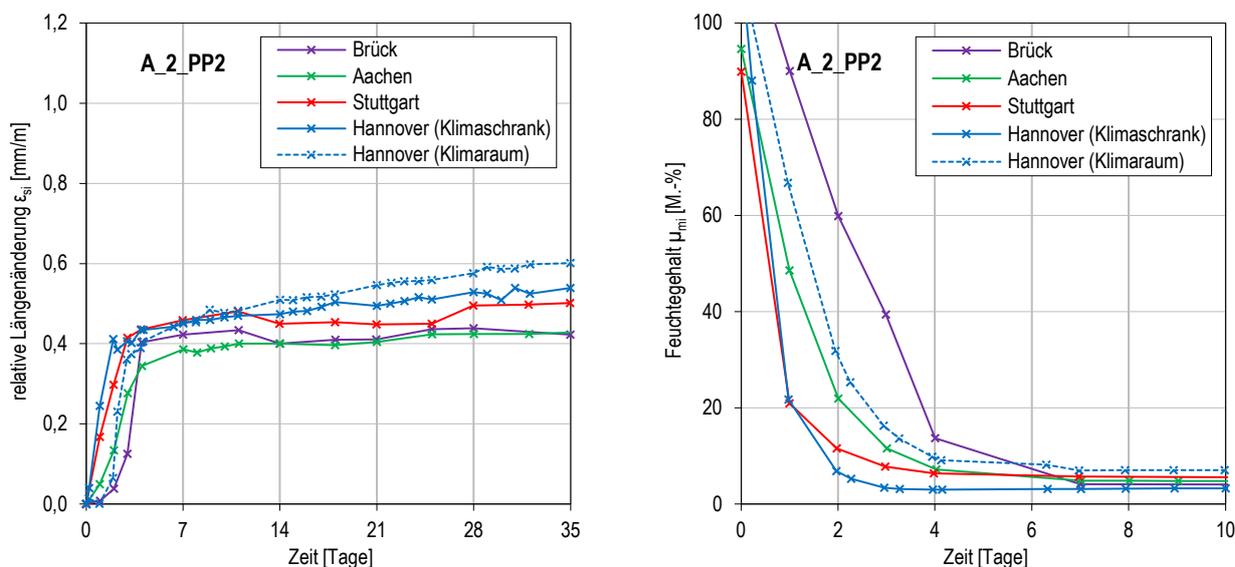


Abbildung 20: Schwindverläufe (links) und Feuchtegehalte (rechts) für die Porenbetonsorte A\_2\_PP2

Bei den Schwindverläufen der Porenbetonsorte A\_2\_PP4 (vgl. Abbildung 21) waren die Verformungen nach 35 Tagen ebenfalls noch nicht abgeschlossen. Hier waren sowohl die

carbonatisierungsbedingten Steigerungen, aber auch die ermittelten Absolutwerte deutlich größer als bei der zuvor betrachteten Porenbetonsorte A\_2\_PP2. Eine Ausnahme bildete die Probe aus Brück. Sie scheint im Gegensatz zu den anderen Proben keine carbonatisierungsbedingten Schwindverformungen aufzuweisen. Ob dies möglicherweise auf einen anderen Luftaustausch im Klimaschrank zurückzuführen ist, muss noch geklärt werden. Bei den Proben aus Brück und aus Stuttgart stellte sich in der Trocknungsphase im Vergleich zu den anderen Prüflaboren ein deutlich höherer Wert ein, der sich bei den Proben aus Brück nach 7 Tagen kaum noch veränderte. Demgegenüber nahmen die Verformungen bei den Proben aus Stuttgart nach einer Pause von etwa 7 Tagen wieder zu. Auch hier dauert die Ursachenklärung noch an.

Bei den dargestellten Schwindverläufen handelt es sich jeweils um Mittelwerte aus drei Proben. Eine Probe aus Aachen wich teilweise um bis zu 0,6 mm/m von den anderen beiden Proben ab. Daher wurde in Abbildung 21 zusätzlich eine korrigierte Kurve ohne den Ausreißer aufgenommen.

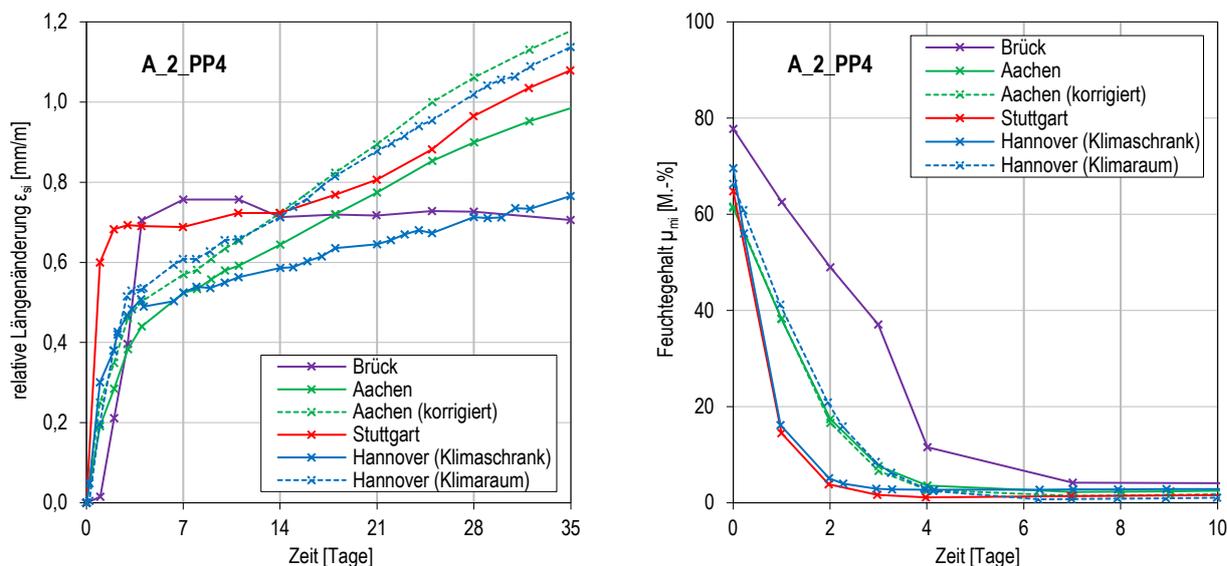


Abbildung 21: Schwindverläufe (links) und Feuchtegehalte (rechts) für die Porenbetonsorte A\_2\_PP4

Die Schwindverläufe der Porenbetonsorte B\_3\_PP4 (vgl. Abbildung 22) zeigen qualitativ einen annähernd gleichen Verlauf und erreichten nach kurzer Zeit einen konstanten Wert. Auch quantitativ weichen die Werte nach 35 Tagen nur geringfügig voneinander ab. Sie liegen zu diesem Zeitpunkt ausschließlich zwischen 0,26 mm/m und 0,30 mm/m, obwohl auch hier unterschiedliche Trocknungsgeschwindigkeiten vorhanden waren.

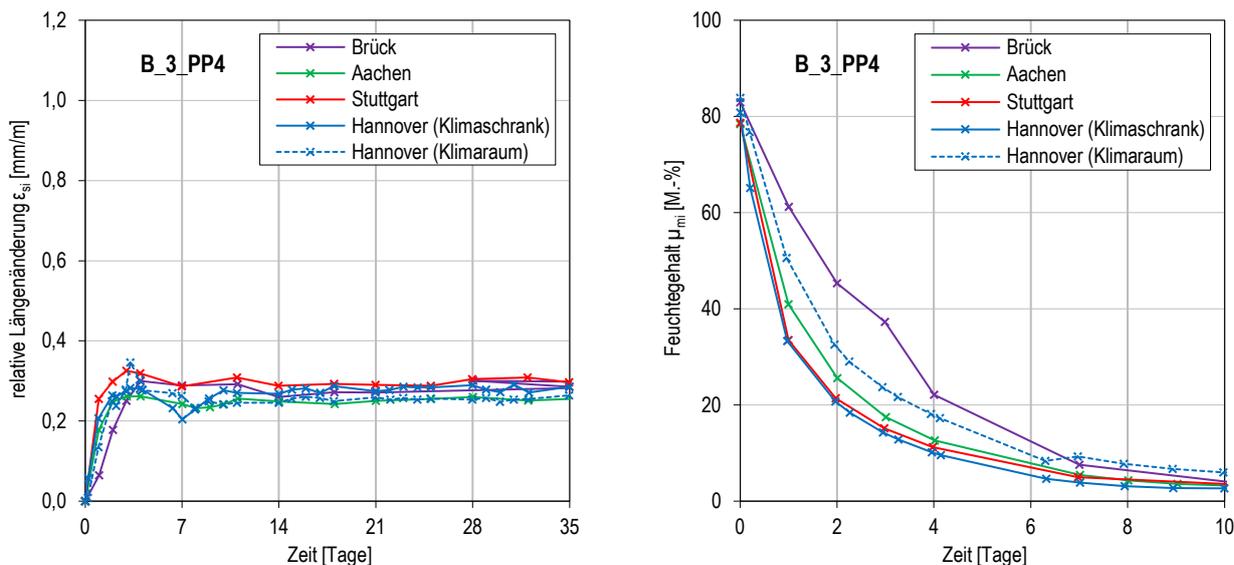


Abbildung 22: Schwindverläufe (links) und Feuchtegehalte (rechts) für die Porenbetonsorte B\_3\_PP4

Vergleichbares gilt für die Schwindverläufe der Porenbetonsorte C\_4\_2.9N aus Abbildung 23. Das Gesamtschwindmaß lag bei dieser Sorte zwischen 0,20 mm/m und 0,27 mm/m.

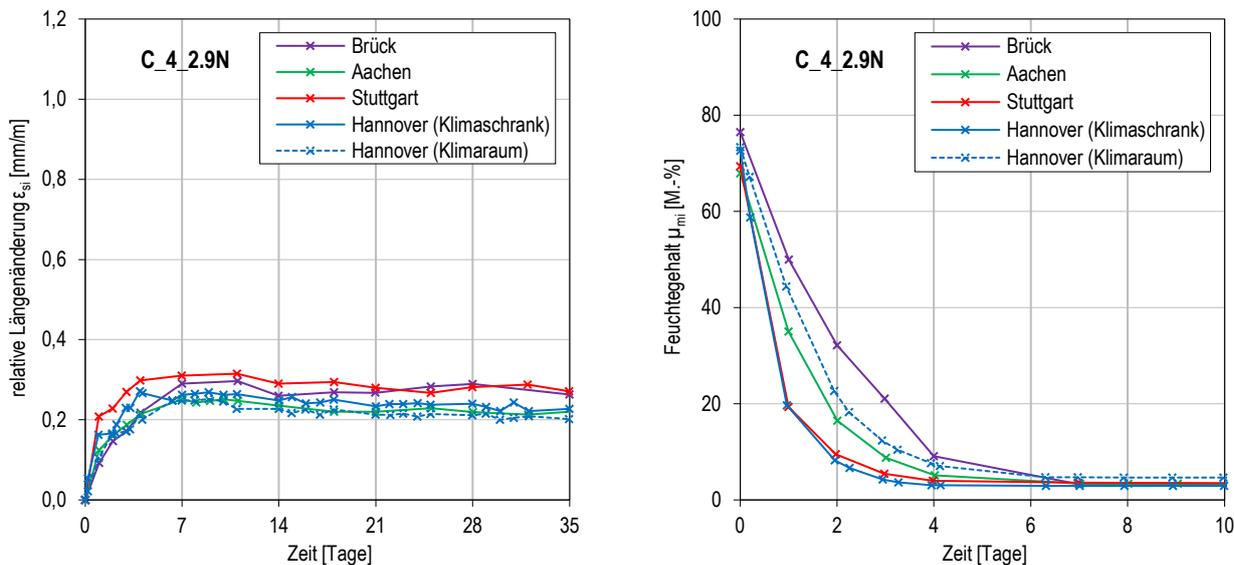


Abbildung 23: Schwindverläufe (links) und Feuchtegehalte (rechts) für die Porenbetonsorte C\_4\_2.9N

### 5.8.2 XRD

In Tabelle 9 sind die Phasenzusammensetzungen der vier Porenbetonsorten für jede Forschungseinrichtung aus dem Ringversuch gegenübergestellt. Die Anteile der einzelnen Phasen wurden mittels XRD mit Rietveld-Analyse ermittelt.

Tabelle 9: Übersicht zur Phasenzusammensetzung mittels XRD mit Rietveld-Analyse

Phasen	A_2_PP2				A_2_PP4				B_3_PP4				C_4_2.9N			
	Anteil [M.-%]															
	B	A	S	H	B	A	S	H	B	A	S	H	B	A	S	H
Quartz	21	3,3	14,14	10	35	17,1	41,61	14	15	9,9	14,25	8	7	3,2	7,02	6
Tobermorit	48	54,8	62,73	61	22	28,7	30,83	48	42	59,7	49,66	66	24	29,4	29,54	68
Amorph	28	33,8	17,51	25	28	38,5	17,00	33	29	20,3	28,40	19	44	33,5	36,41	19
Kalzit	3	7,3	4,74	4	5	10,4	9,75	3	4	5,8	0,19	4	3	6,0	3,28	3
Aragonit	-	-	0,33	< 1	-	5,0	< 0,10	< 1	-	-	0,19	< 1	-	-	1,03	< 1
Vaterit	-	0,4	0,54	< 1	-	0,3	0,76	< 1	-	0,1	1,37	< 1	-	-	0,40	< 1
Katoit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14	16,0	22,33	4,0
Mullit	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	11,8	-	-
Mikroclin	-	-	-	-	4	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-
Albit	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Muskowit	-	-	-	-	1	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-
Dolomit	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
Anhydrit	-	0,3	-	-	-	-	-	-	2	4,2	1,81	-	-	0,2	-	-
unbekannt	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-

B = Xella Brück, A = RWTH Aachen, S = MPA Stuttgart, H = Leibniz Universität Hannover

Besonders auffällig sind die großen Unterschiede in Abhängigkeit vom Prüflabor. Vor allem bei den Porenbetonsorten von Hersteller A wurden deutliche Unterschiede im Quarzgehalt festgestellt. Eine mögliche Erklärung für diese Streuungen sind Inhomogenitäten im Material, die angesichts der kleinen Probenmengen zu deutlichen Unterschieden im Quarzgehalt führen können. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Aufbereitungstechnik der Proben und in der gerätespezifisch eingesetzten Auswertesoftware. Demnach könnten sich die jeweils ermittelten Quarzanteile innerhalb der Proben auch auf die quantitative Bestimmung des Tobermorits sowie der amorphen CSH-Phasen ausgewirkt haben.

### 5.8.3 Thermogravimetrische Analyse

Direkt nach den 35-tägigen Schwinduntersuchungen wurden die Proben luftdicht in Folie verpackt. Anschließend wurde in Hannover analog zu Abschnitt 4.3.1 der Carbonatisierungsgrad außen und in der Mitte der Probe bestimmt. Die Ergebnisse sind der folgenden Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Carbonatisierungsgrade nach Abschluss der Schwinduntersuchungen

Position	A_2_PP2				A_2_PP4				B_3_PP4				C_4_2.9N			
	Carbonatisierungsgrad $D_c$ [%]															
	B	A	S	H	B	A	S	H	B	A	S	H	B	A	S	H
mittig	0,2	-	23,8	2,4	1,0	-	14,7	24,4	0,0	-	1,0	1,2	0,2	-	2,1	1,6
außen	2,7	-	25,7	7,9	3,9	-	19,3	26,5	1,0	-	0,8	1,4	1,3	-	2,8	2,0

B = Xella Brück, A = RWTH Aachen, S = MPA Stuttgart, H = Leibniz Universität Hannover

Die von den einzelnen Forschungseinrichtungen für die Hersteller B und C ermittelten Carbonatisierungsgrade sind unauffällig. Sie weichen nur geringfügig voneinander ab und können plausibel mit den Schwindverläufen aus Abschnitt 5.8.1 in Einklang gebracht werden. Bei den Carbonatisierungsgraden der Proben des Herstellers A wurden jedoch große Unterschiede beobachtet. Besonders auffällig sind die geringen Carbonatisierungsgrade der Proben A\_2\_PP2 und A\_2\_PP4 aus Brück. Diese lagen zwischen 0,2 % und 3,9 % und wichen deutlich von den Werten der anderen Forschungseinrichtungen ab. Für die Richtigkeit dieser Werte sprechen jedoch die Schwindverläufe aus den Abbildungen 20 und 21, die beide vermuten lassen, dass hier kein carbonatisierungsbedingtes Schwinden stattgefunden hat. Weiterhin sind die großen Unterschiede zwischen den in Stuttgart und Hannover ermittelten Carbonatisierungsgraden der Proben A\_2\_PP2 und A\_2\_PP4 auffällig. Auch wenn die einzelnen Zahlenwerte für sich allein betrachtet große Abweichungen aufweisen, wird jedoch die generelle Tendenz, dass die Porenbetonsorten des Herstellers A offensichtlich stärker carbonatisieren als die anderen Porenbetonproben, durchaus deutlich.

## 6 Schlussfolgerungen

Zusätzlich zu Porenbetonen aus deutschen Herstellwerken wurden in diesem Forschungsprojekt zwei weitere Porenbetonsorten mit Flugasche aus England untersucht. Untersuchungen anderer Forscher haben gezeigt, dass Porenbeton mit Flugasche deutlich erhöhte Schwindmaße von bis zu 0,65 mm/m aufweisen kann [17]. Dies konnte bei den in diesem Forschungsprojekt untersuchten Sorten nicht bestätigt werden. Die schwindbedingten Verformungen erreichten zunächst einen Wert sehr nahe dem Grenzwert von 0,4 mm/m, fielen jedoch wieder auf einen Wert von etwa 0,3 mm/m ab (C\_4\_3.6N) oder sie erreichten direkt einen Wert von ca. 0,3 mm/m (C\_4\_2.9N). Auch im Ringversuch zeigten die untersuchten flugaschehaltigen Porenbetone ähnliche Schwindwerte.

Die flugaschehaltigen Porenbetone aus England zeigten hinsichtlich möglicher Druckfestigkeitsverluste weder bei den Eingangsprüfungen noch bei den Auslagerungsversuchen irgendwelche Auffälligkeiten. Beide Sorten erreichten jedoch während ihrer Auslagerung teilweise Carbonatisierungsgrade von knapp über 20 %. Vorherige Forschungsprojekte und Untersuchungen haben gezeigt, dass signifikante Festigkeitsverluste teilweise erst bei Carbonatisierungsgraden von deutlich über 20 % auftreten. Daher kann derzeit nicht ausgeschlossen werden, dass es auch bei den flugaschehaltigen Porenbetonen trotz ihres hier beobachteten unauffälligen Verhaltens bei längerer Auslagerung und weiter zunehmender Carbonatisierung ebenfalls zu Druckfestigkeitsverlusten kommen könnte. Solche Fragen lassen sich aber wohl nur in beschleunigten Zeitrafferversuchen mit verschärften Prüfrandbedingungen klären.

Die Porenbetonsorten des Herstellers A wurden bereits in Vorgängerprojekten als kritisch identifiziert und zeigten auch in diesem Projekt erhebliche Carbonatisierungsfortschritte bei den Auslagerungs- und Schwinduntersuchungen von teilweise sogar über 50 % im Randbereich. Der Grenzwert für das Schwinden von 0,4 mm/m wurde bei allen Sorten des Herstellers A deutlich überschritten. Bereits zu Beginn der Auslagerung waren die Festigkeiten teilweise deutlich zu gering. Sie nahmen zudem mit zunehmender Carbonatisierung durch Auslagerung weiter ab. Die Druckfestigkeitsverluste waren jedoch meist geringer als bei den Vorgängerprojekten. Die Porenbetonsorte A\_2\_PP2 wies im Vergleich zu den anderen drei Sorten des Herstellers A bereits im Anlieferungszustand eine noch deutlich geringere Druckfestigkeit auf, im weiteren Carbonatisierungsverlauf dafür jedoch prozentual betrachtet deutlich geringere Festigkeitsverluste. Dies deutet darauf hin, dass ein deutlicher Einfluss der jeweiligen Liefercharge vorhanden ist.

Die Porenbetonsorten des Herstellers B wiesen nach 18-monatiger Außenlagerung lediglich Carbonatisierungsgrade im Bereich von 10 % auf. Beim Hersteller B zeigte sich in den

Wandversuchen nach 18-monatiger Außenluftlagerung eine Festigkeitsreduktion unter den charakteristischen Wert, die mit 6,6% noch relativ gering ausfiel. In wie weit hier ein mögliches carbonatisierungsbedingtes Risiko bei längerfristiger Bewitterung besteht, bleibt offen. Bei den übrigen durchgeführten Untersuchungen konnten jedenfalls keinerlei Auffälligkeiten mit dieser Porenbetonsorte festgestellt werden.

Der Ringversuch hat gezeigt, dass die Auswirkungen einer Carbonatisierung während des Schwindversuchs bei den Porenbetonsorten der Hersteller B und C vernachlässigbar sind. Es ist jedoch durch die nachträglichen TGA der Einfluss der Prüfrandbedingungen auf den Schwindverlauf der carbonatisierungsempfindlichen Porenbetonsorten von Hersteller A deutlich geworden. Wird eine Carbonatisierung der Proben während der Schwindversuche unterbunden, sind auch bei den Schwindkurven carbonatisierungsempfindlicher Porenbetone asymptotisch verlaufende Schwindkurven mit entsprechend geringeren Endwerten zu erwarten. Insgesamt wäre für ein normatives Abnahmekriterium die Klimaraumlagerung zu bevorzugen. Eine solche Forderung wäre jedoch nur schwer umzusetzen, weil die meisten Prüfstellen aus Gründen des Platzbedarfs und der Kosten standardmäßig auf Klimaschränke zurückgreifen (müssen). Ggf. könnte eine ausreichende Belüftung des Klimaschranks ausreichen. Hierfür wäre eine Anpassung der Prüfnorm (europäische Norm) wünschenswert.

Bei den XRD-Untersuchungen variierten die Phasenzusammensetzungen zwischen den Herstellern teilweise sehr ausgeprägt. Die carbonatisierungsempfindlichen Porenbetonsorten von Hersteller A weisen deutlich geringere Tobermoritgehalte und einen höheren Gehalt an amorphen CSH-Phasen auf als die von Hersteller B und C. Es zeigten sich jedoch auch deutliche Unterschiede innerhalb der einzelnen Porenbetonsorten in Abhängigkeit vom Prüflabor. Diese Unterschiede können möglicherweise auf Inhomogenitäten im Material, auf die Probengewinnung (es werden jeweils nur weniger als 100 mg an Probenmenge benötigt) oder auf die unterschiedliche gerätespezifische Auswertesoftware zurückgeführt werden. Insofern erscheint die XRD-Untersuchung für ein normativ geregeltes Abnahmekriterium nicht geeignet. Im Rahmen der Qualitätssicherung innerhalb eines Herstellwerks mit immer den gleichen Laboranten, Geräten und Probenpräparationen mögen die Verhältnisse zur Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse deutlich günstiger liegen.

Insgesamt erscheint die Bestimmung des Gesamtschwindmaßes  $\epsilon_{cs,tot}$  nach DIN EN 680:2006-03 das am ehesten geeignete Verfahren zu sein, um mit überschaubarem Aufwand Porenbetonsteine zu identifizieren, die ein erhöhtes carbonatisierungsbedingtes Risiko aufweisen. Der in DIN V 20000-404:2018-04 festgelegte Grenzwert von 0,4 mm/m erscheint ebenfalls zielführend. Gleichwohl wären weitere Forschungen zur Carbonatisierung von Porenbeton wünschenswert, um mögliche Dauerhaftigkeitsrisiken ausschließen zu können.

## 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 Auf-trag 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, Abschlussberichts zu den Forschungsvorhaben ZP 52-5-15.61-1113/04 und Forschungsvorhaben ZP 52-5-15.61.1-1150/05 im Auftrag des Deutschen Instituts für Bau,“ 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] 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.
- [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 771-4:2015-11, Festlegung für Mauersteine - Teil 4: Porenbetonsteine; Deutsche Fassung EN 771-4:2011+A1:2015*, Berlin: Beuth Verlag, 2015.
- [7] T. Schoch, B. Straube und A. Stumm, „Dauerhaftigkeit von Porenbeton bei hoher CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung,“ *Bauphysik* 33, Heft 5, 2011.
- [8] M. Homann, *Porenbeton Handbuch*, Gütersloh: Bauverlag, 2008.

- [9] M. Małeck, W. Kurdowski und P. Walczak, „Influence of gypsum and limestone, used as mineral additives, on autoclaved aerated concrete properties,“ *6th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, ce/papers*, Bd. 2, Nr. 4, pp. 231-234, 2018.
- [10] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 1996-1-1:2013-02, Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk; Deutsche Fassung EN 1996-1-1:2005+A1:2012*, Berlin: Beuth Verlag, 2013.
- [11] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 1996-1-1/NA:2019:12, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*, Berlin: Beuth Verlag, 2019.
- [12] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 1996-1-1/NA:2012-05, Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten - Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*, Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [13] 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.
- [14] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN EN 679:2005-09, Bestimmung der Druckfestigkeit von dampfgehärtetem Porenbeton; Deutsche Fassung EN 679:2005*, Berlin: Beuth Verlag, 2005.
- [15] „RILEM AAC 5.1 Determination of drying shrinkage of AAC, 1992,“ *RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials*, 1994.
- [16] P. Rzekowski und L. Lohaus, „Testing boundary conditions determining the drying shrinkage behaviour of AAC,“ *6th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, ce/papers*, Bd. 2, Nr. 4, pp. 581-587, 2018.
- [17] B. Winkles, H. Nebel und M. Raupach, „Carbonation of autoclaved aerated concrete containing fly ash,“ *6th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, ce/papers*, Bd. 2, Nr. 4, pp. 47-51, 2018.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Außenlagerung in einem zweiseitig offenen, überdachten Lager .....	7
Abbildung 2: Ergebnisse der Dauerstandversuche (Pfeile kennzeichnen Durchläufer).....	9
Abbildung 3: Spannungs-Dehnungs-Linien der Wandprüfungen (links) und Übersicht Wanddruckfestigkeiten (rechts).....	11
Abbildung 4: TGA (Masseverlust) im Anlieferungszustand (links) und nach 18-monatiger Außenlagerung aus der Mitte der Wand (rechts).....	12
Abbildung 5: TGA (1. Ableitung) im Anlieferungszustand (links) und nach 18-monatiger Außenlagerung aus der Mitte der Wand (rechts).....	13
Abbildung 6: Carbonatisierungsgrade (Mitte und Rand) an den Wandproben nach 18-monatiger Außenlagerung.....	14
Abbildung 7: Entnahmeschema für die Druckfestigkeits- und TGA-Proben nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten A_1_PP4, B_3_PP2 und B_3_PP4 .....	16
Abbildung 8: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte A_2_PP2 .....	17
Abbildung 9: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte A_2_PP4 .....	17
Abbildung 10: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte A_1_PP2 .....	17
Abbildung 11: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte C_4_3.6N .....	17
Abbildung 12: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte A_1_PP4 .....	17
Abbildung 13: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte C_4_2.9N .....	17
Abbildung 14: Carbonatisierungsgrad und Druckfestigkeit für die Sorte B_3_PP4 .....	17
Abbildung 15: Verläufe der Schwinduntersuchungen nach DIN EN 680 .....	18
Abbildung 16: Schwindverläufe (links: Lagerung im Klimaraum, rechts: Lagerung im Klimaschrank) .....	19
Abbildung 17: Carbonatisierungsgrade in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer und den Lagerungsbedingungen (links: Lagerung im Klimaraum, rechts: Lagerung im Klimaschrank) ...	20

Abbildung 18: Gesamtschwindmaße und Carbonatisierungsgrade (links: Lagerung im Klimaraum, rechts: Lagerung im Klimaschrank).....	21
Abbildung 19: Entnahmeschema für die Schwind- und XRD-Proben aus dem Ringversuch .....	24
Abbildung 20: Schwindverläufe (links) und Feuchtegehalte (rechts) für die Porenbetonsorte A_2_PP2.....	27
Abbildung 21: Schwindverläufe (links) und Feuchtegehalte (rechts) für die Porenbetonsorte A_2_PP4.....	28
Abbildung 22: Schwindverläufe (links) und Feuchtegehalte (rechts) für die Porenbetonsorte B_3_PP4.....	29
Abbildung 23: Schwindverläufe (links) und Feuchtegehalte (rechts) für die Porenbetonsorte C_4_2.9N.....	29

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Untersuchungsprogramm.....	6
Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Porenbetonsorten.....	7
Tabelle 3: Ergebnisse der Eingangsprüfungen für die Hauptversuche.....	8
Tabelle 4: Sulfatgehalt .....	8
Tabelle 5: Parameter zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Einsteinmauerwerk aus Porenbeton mit Dünnbettmörtel [12].....	11
Tabelle 6: Druckfestigkeiten (Stein) und Feuchtegehalte nach 18-monatiger Außenlagerung ...	15
Tabelle 7: Phasenzusammensetzung mittels XRD mit Rietveld-Analyse .....	22
Tabelle 8: Angaben zur Versuchsdurchführung sowie zum Messgerät für die XRD-Messungen .....	26
Tabelle 9: Übersicht zur Phasenzusammensetzung mittels XRD mit Rietveld-Analyse .....	30
Tabelle 10: Carbonatisierungsgrade nach Abschluss der Schwinduntersuchungen .....	31

## Anhang

- Anhang 1 Rohdichte und Feuchtegehalt im Anlieferungszustand für die Porenbetonsorten aus dem Hauptversuchsprogramm
- Anhang 2 Druckfestigkeit und Dauerstand für die Porenbetonsorten von Hersteller A, Werk 1
- Anhang 3 Druckfestigkeit und Dauerstand für die Porenbetonsorten von Hersteller A, Werk 2
- Anhang 4 Druckfestigkeit für die Porenbetonsorten von Hersteller B
- Anhang 5 Druckfestigkeit für die Porenbetonsorten von Hersteller C
- Anhang 6 TGA (Masseverlust) im Anlieferungszustand (links) und nach 18-monatiger Außenlagerung aus dem Randbereich der Wand (rechts)
- Anhang 7 TGA (1. Ableitung) im Anlieferungszustand (links) und nach 18-monatiger Außenlagerung aus dem Randbereich der Wand (rechts)
- Anhang 8 Entnahmeschema für die Druckfestigkeits- und TGA-Proben nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten A\_1\_PP2, A\_2\_PP2 und A\_2\_PP4
- Anhang 9 Entnahmeschema für die Druckfestigkeits- und TGA-Proben nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten C\_4\_2.9N
- Anhang 10 Entnahmeschema für die Druckfestigkeits- und TGA-Proben nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten C\_4\_3.6N
- Anhang 11 Druckfestigkeit und Feuchtegehalt nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten von Hersteller A
- Anhang 12 Druckfestigkeit und Feuchtegehalt nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten von Hersteller B und C
- Anhang 13 Carbonatisierungsgrad  $D_c$  nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten von Hersteller A, Werk 1
- Anhang 14 Carbonatisierungsgrad  $D_c$  nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten von Hersteller A, Werk 2

Anhang 15 Carbonatisierungsgrad  $D_c$  nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten von Hersteller A und B

Anhang 1 – Rohdichte und Feuchtegehalt im Anlieferungszustand für die Porenbetonsorten  
 aus dem Hauptversuchsprogramm

Porenbetonsorte	Teilprobe	Länge			Breite			Höhe	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Masse (feucht)		Masse (trocken)		Trockenrohndichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Mittelwert	Feuchtegehalt			Mittelwert
		[mm]	[mm]	[mm]	[kg]	[kg]	[kg]			[kg]	[kg]	[kg]	[kg]			[%]	[%]	[%]	
A_1_PP2	1	101,04	100,79	100,99	0,00102846	0,4241	0,3499	340	336	21,2	21,9	21,2	21,9	21,2	21,9	21,2	21,9	21,2	21,9
	2	100,96	101,40	101,37	0,00103776	0,4279	0,3488	336	336	22,7	21,9	22,7	21,9	336	22,7	21,9	22,7	21,9	21,9
	3	100,11	100,78	101,16	0,00102061	0,4117	0,3380	331	331	21,8	33,9	21,8	33,9	336	21,8	33,9	21,8	33,9	33,9
A_1_PP4	1	101,64	102,15	101,83	0,00105725	0,6893	0,5080	480	473	35,7	33,9	35,7	33,9	474	35,7	33,9	35,7	33,9	33,9
	2	100,98	100,72	100,81	0,00102531	0,6475	0,4849	473	473	33,5	33,9	33,5	33,9	474	33,5	33,9	33,5	33,9	33,9
	3	101,82	99,62	99,64	0,00101068	0,6265	0,4726	468	468	32,6	33,9	32,6	33,9	474	32,6	33,9	32,6	33,9	33,9
A_2_PP2	1	100,61	101,30	101,23	0,00103172	0,4474	0,3500	339	339	27,8	28,9	27,8	28,9	342	27,8	28,9	27,8	28,9	28,9
	2	100,63	101,43	101,24	0,00103335	0,4396	0,3395	329	329	29,5	28,9	29,5	28,9	342	29,5	28,9	29,5	28,9	28,9
	3	100,78	101,17	100,83	0,00102805	0,4777	0,3691	359	359	29,4	28,9	29,4	28,9	342	29,4	28,9	29,4	28,9	28,9
A_2_PP4	1	100,46	99,02	99,60	0,00099078	0,6440	0,5049	510	510	27,6	27,0	27,6	27,0	501	27,6	27,0	27,6	27,0	27,0
	2	100,62	98,97	99,53	0,00099116	0,6319	0,4964	501	501	27,3	27,0	27,3	27,0	501	27,3	27,0	27,3	27,0	27,0
	3	100,90	98,56	99,30	0,00098751	0,6129	0,4864	493	493	26,0	27,0	26,0	27,0	501	26,0	27,0	26,0	27,0	27,0
B_3_PP2	1	103,26	100,16	101,07	0,00104532	0,5416	0,3566	341	341	51,9	51,9	51,9	51,9	332	51,9	51,9	51,9	51,9	51,9
	2	102,98	100,56	100,98	0,00104572	0,5222	0,3465	331	331	50,7	51,9	50,7	51,9	332	50,7	51,9	50,7	51,9	51,9
	3	102,08	100,39	101,12	0,00103626	0,5147	0,3361	324	324	53,2	51,9	53,2	51,9	332	53,2	51,9	53,2	51,9	51,9
B_3_PP4	1	100,78	100,12	101,51	0,00102425	0,7181	0,5017	490	490	43,2	43,1	43,2	43,1	481	43,2	43,1	43,2	43,1	43,1
	2	100,27	100,28	100,23	0,00100782	0,6956	0,4855	482	482	43,3	43,1	43,3	43,1	481	43,3	43,1	43,3	43,1	43,1
	3	100,68	101,08	100,84	0,00102622	0,6922	0,4845	472	472	42,9	43,1	42,9	43,1	481	42,9	43,1	42,9	43,1	43,1
C_4_2.9N	1	105,28	100,71	105,66	0,00112029	0,7836	0,5748	513	513	36,3	37,7	36,3	37,7	516	36,3	37,7	36,3	37,7	37,7
	2	104,25	100,25	104,83	0,00109558	0,7954	0,5656	516	516	40,6	37,7	40,6	37,7	516	40,6	37,7	40,6	37,7	37,7
	3	104,63	99,80	103,72	0,00108305	0,7637	0,5613	518	518	36,1	37,7	36,1	37,7	516	36,1	37,7	36,1	37,7	37,7
C_4_3.6N	1	103,16	104,06	102,62	0,00110161	1,0218	0,7051	640	640	44,9	45,5	44,9	45,5	632	44,9	45,5	44,9	45,5	45,5
	2	104,00	103,20	104,15	0,00111782	1,0377	0,7112	636	636	45,9	45,5	45,9	45,5	632	45,9	45,5	45,9	45,5	45,5
	3	104,49	103,46	105,06	0,00113575	1,0240	0,7025	619	619	45,8	45,5	45,8	45,5	632	45,8	45,5	45,8	45,5	45,5

Anhang 2 – Druckfestigkeit und Dauerstand für die Porenbetonsorten von Hersteller A, Werk 1

Porenbetonsorte	Probe	Druckfestigkeit						Dauerstand						Bemerkungen						
		Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Feuchtegehalt [M.-%]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Belastung [%]	[s]	Standzeit [h]		[d]	Mittelwert [h]				
A_1_PP2	1	120,9	117,4	243,2	2,5	2,89	2,52	120,9	119,5	242,7	75	180	0	0	0	-				
	2	120,5	117,6	242,8	2,7	2,63		119,4	119,3	242,7		1080	0	0		-				
	3	120,4	117,8	242,9	4,3	2,47		120,6	119,0	242,7		1440	0	0		-				
	4	118,7	118,0	244,8	2,6	2,76		119,2	119,6	245,3		16815600	4671	195		-				
	5	119,3	118,2	244,9	2,8	2,60		119,4	119,1	245,1		15304800	4251	177		4531				
	6	119,1	118,6	244,6	2,8	2,29		119,1	119,2	245,3		16815600	4671	195		-				
	7	119,4	118,0	244,6	8,1	2,49		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	
	8	122,2	118,7	244,2	8,7	2,11		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	-
	9	122,2	118,5	244,6	9,5	2,37		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	-
	10	122,1	119,5	244,6	4,5	2,58		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	-
	11	122,0	119,5	244,7	4,9	2,56		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	-
	12	122,1	119,1	245,8	6,4	2,43		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	-
A_1_PP4	1	120,9	119,0	243,5	7,3	4,35	4,26	120,0	118,7	243,1	75	3321300	923	38	538	-				
	2	120,3	118,8	243,1	7,4	4,28		120,4	118,9	243,2		1904400	529	22		-				
	3	120,4	118,3	243,1	6,1	4,18		120,5	119,1	243,1		584400	162	7		-				
	4	120,0	119,6	245,4	6,2	4,63		121,3	119,4	244,9		11962800	3323	138		-				
	5	119,7	119,1	244,8	6,4	3,99		120,8	119,3	245,1		4222680	1173	49		1985				
	6	119,3	119,0	245,3	5,6	4,13		120,7	119,3	245,0		5252040	1459	61		-				
	7	121,8	122,1	245,7	6,0	4,81		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	
	8	121,4	122,3	245,9	5,4	3,99		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	
	9	121,7	122,4	246,1	5,5	3,85		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	
	10	122,3	121,5	245,8	8,7	4,48		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	
	11	122,2	120,9	245,9	8,8	4,26		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	
	12	121,6	122,4	245,5	8,4	4,11		-	-	-		-	-	-		-	-	-	-	

## Anhang 3 – Druckfestigkeit und Dauerstand für die Porenbetonsorten von Hersteller A, Werk 2

Porenbetonsorte	Probe	Druckfestigkeit						Dauerstand						Bemerkungen				
		Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Feuchtegehalt [M.-%]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Belastung [%]	[s]	[h]		[d]	Mittelwert [h]		
A_2_PP2	1	120,3	120,1	242,8	1,9	2,50	2,01	120,4	117,2	243,3	75	37720800	10478	437	7033	Durchläufer		
	2	120,1	120,4	243,2	2,0	2,35		120,4	117,1	243,1		37720800	10478	437		Durchläufer		
	3	120,9	120,5	242,9	2,8	2,18		120,6	116,9	243,1		509520	142	6		-		
	4	118,6	118,8	245,0	3,7	2,11		118,9	119,4	245,0	65	50021400	13895	579	Durchläufer			
	5	118,7	119,1	245,0	4,4	2,20		118,8	119,2	245,0		50021400	13895	579	Durchläufer			
	6	119,7	119,4	244,9	4,4	1,60		118,3	119,4	245,4		48894600	13582	566	Durchläufer			
	7	122,0	117,1	245,9	4,7	2,08		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	8	122,0	117,0	246,6	4,6	1,81		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	122,1	117,1	246,7	7,0	1,64		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	120,8	123,2	245,1	4,8	2,06		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	120,7	122,7	246,7	4,9	1,84		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	122,0	121,0	247,7	3,5	1,68		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A_2_PP4	1	119,1	120,4	243,2	6,1	3,72	3,76	117,5	120,4	243,1	75	1140	0	0	0	-		
	2	119,4	120,9	243,1	6,3	3,22		117,4	120,4	243,1		60	0	0		-		
	3	119,8	120,1	243,0	6,0	3,48		117,1	120,4	243,1		60	0	0		-		
	4	118,1	119,1	245,1	2,9	3,86		120,1	118,8	245,0	65	62760	17	1	13	-		
	5	118,3	119,6	245,0	3,3	3,52		119,4	118,4	245,1		6120	2	0		-		
	6	118,8	119,1	245,2	2,4	3,81		118,4	119,1	245,0		73020	20	1		-		
	7	122,1	116,6	245,9	5,3	4,03		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	122,0	116,9	244,9	5,8	3,65		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	122,4	116,9	245,9	4,9	3,98		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	10	122,4	121,3	246,2	6,1	4,19		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	11	122,3	120,9	246,1	6,2	3,92		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12	122,7	120,5	246,0	5,0	3,69		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

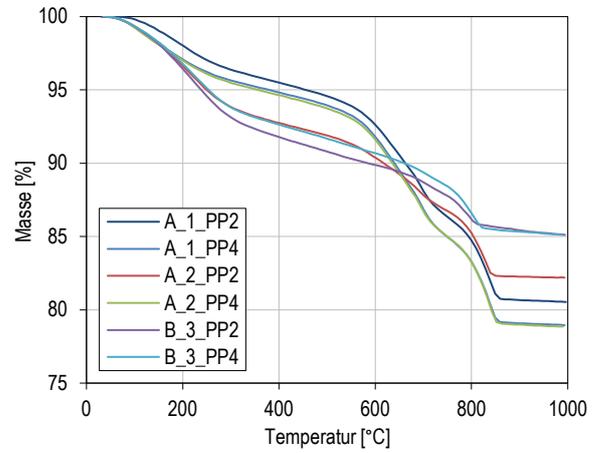
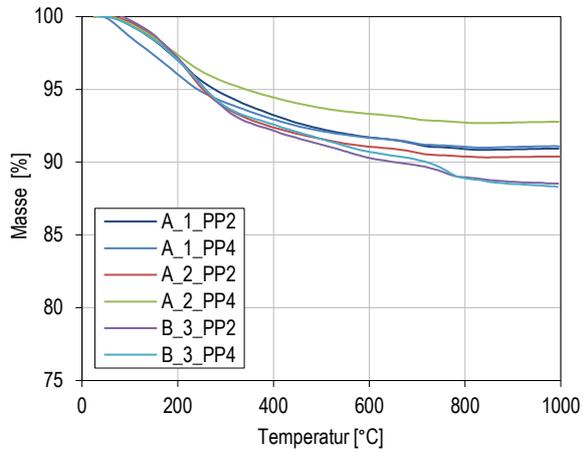
## Anhang 4 – Druckfestigkeit für die Porenbetonsorten von Hersteller B

Porenbetonsorte	Probe	Länge	Breite	Höhe	Feuchte- gehalt	Druckfes- tigkeit	Mittel- wert
		[mm]	[mm]	[mm]	[M.-%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
B_3_PP2	1	122,3	122,0	247,5	5,9	3,05	2,73
	2	122,3	122,8	247,4	6,3	2,74	
	3	122,3	121,6	246,9	7,3	2,41	
	4	123,3	124,8	247,7	6,1	3,00	
	5	121,7	127,0	247,5	6,3	2,82	
	6	121,9	126,9	247,4	7,7	2,35	
	7	122,5	123,1	246,9	7,1	2,80	
	8	121,4	122,0	246,8	5,8	2,75	
	9	121,3	121,8	248,1	5,7	2,51	
	10	121,8	125,3	247,3	5,7	2,81	
	11	121,5	125,7	247,6	4,2	2,80	
	12	121,1	124,8	247,7	5,5	2,77	
B_3_PP4	1	120,4	120,9	247,0	7,2	4,81	4,50
	2	120,2	121,0	248,0	6,2	4,53	
	3	120,7	120,8	247,2	7,2	4,14	
	4	121,6	120,6	246,9	7,8	4,62	
	5	121,0	121,9	248,0	8,1	4,55	
	6	122,1	121,3	248,0	7,6	4,41	
	7	120,4	121,6	247,7	9,6	4,50	
	8	121,7	121,2	247,1	10,3	4,58	
	9	122,1	120,5	246,7	5,3	4,26	
	10	124,8	120,5	247,2	14,3	4,84	
	11	120,8	122,2	247,2	7,4	4,44	
	12	121,1	122,3	247,0	7,0	4,36	

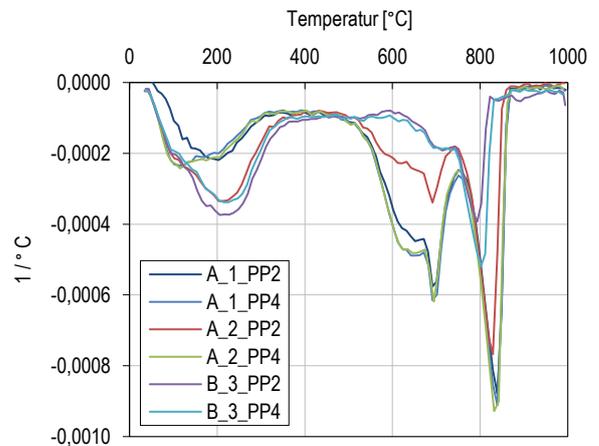
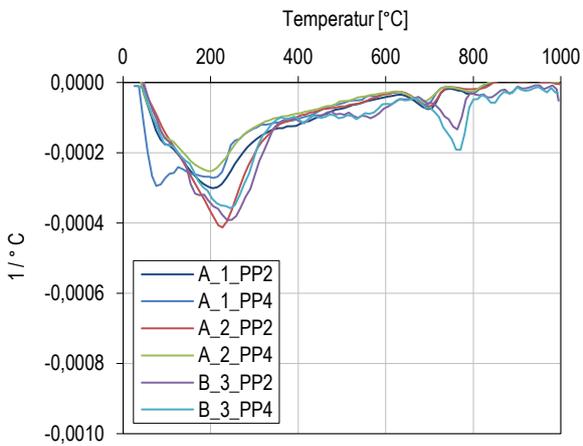
## Anhang 5 – Druckfestigkeit für die Porenbetonsorten von Hersteller C

Porenbetonsorte	Probe	Länge	Breite	Höhe	Feuchte- gehalt	Druckfes- tigkeit	Mittel- wert
		[mm]	[mm]	[mm]	[M.-%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]
C_4_2.9N	1	99,8	99,8	210,8	4,6	3,93	3,89
	2	100,2	100,2	211,6	4,4	3,88	
	3	100,2	100,5	210,9	4,1	4,14	
	4	99,2	100,0	212,4	5,1	3,93	
	5	99,2	101,1	212,3	5,3	3,84	
	6	99,3	100,4	211,1	4,8	4,19	
	7	100,0	99,8	212,4	5,5	3,79	
	8	100,1	99,9	212,6	5,3	3,93	
	9	100,7	99,8	212,5	5,6	3,99	
	10	100,4	99,5	212,3	5,7	3,62	
	11	100,3	99,5	212,2	5,2	3,53	
	12	100,5	99,5	211,0	5,4	3,92	
C_4_3.6N	1	101,9	101,8	212,3	7,4	4,63	4,60
	2	101,8	102,0	213,1	6,9	3,86	
	3	101,4	102,1	211,7	5,3	4,52	
	4	101,0	101,3	211,6	6,7	4,63	
	5	102,9	101,6	211,6	6,2	4,48	
	6	102,1	102,1	212,3	8,0	4,68	
	7	101,1	104,7	213,1	6,8	4,58	
	8	101,7	104,6	212,7	5,5	4,53	
	9	101,8	104,7	212,3	4,8	4,91	
	10	102,0	102,8	211,9	6,7	4,80	
	11	102,2	103,6	211,2	6,0	4,57	
	12	101,5	104,1	211,3	4,5	4,95	

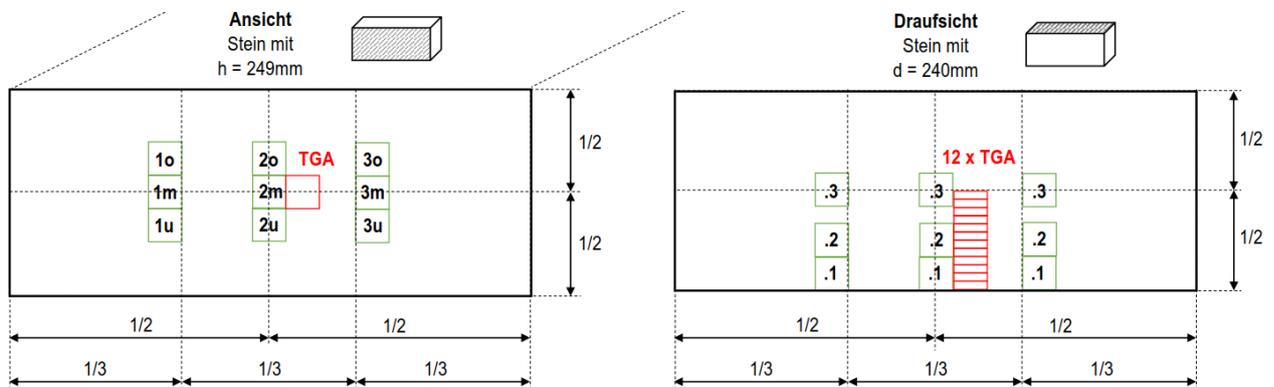
Anhang 6 – TGA (Masseverlust) im Anlieferungszustand (links) und nach 18-monatiger Außenlagerung aus dem Randbereich der Wand (rechts)



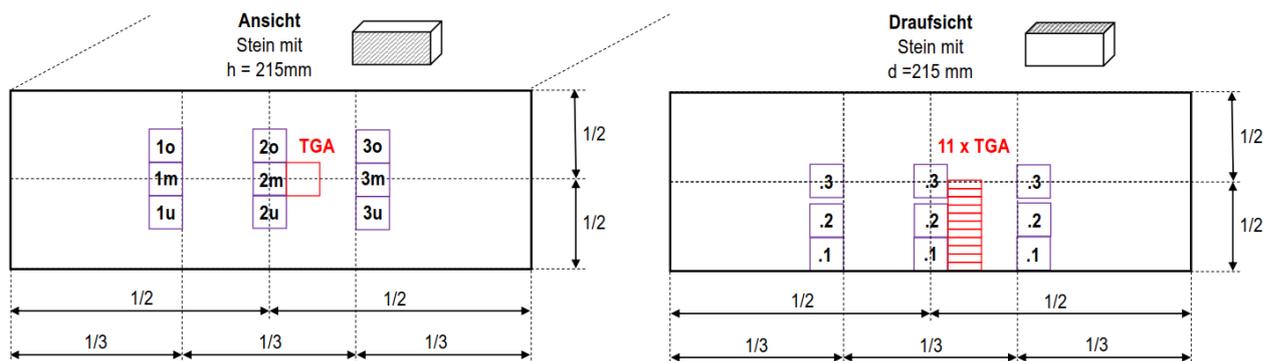
Anhang 7 – TGA (1. Ableitung) im Anlieferungszustand (links) und nach 18-monatiger Außenlagerung aus dem Randbereich der Wand (rechts)



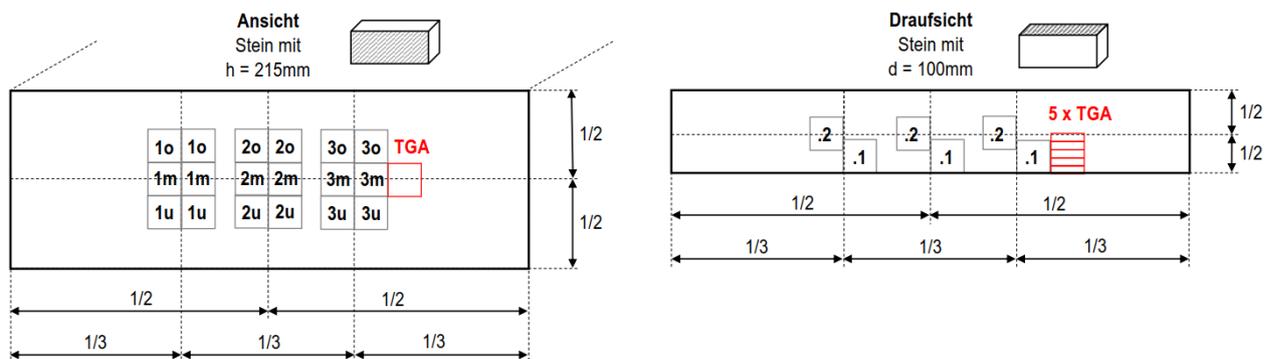
Anhang 8 – Entnahmeschema für die Druckfestigkeits- und TGA-Proben nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten A\_1\_PP2, A\_2\_PP2 und A\_2\_PP4



Anhang 9 – Entnahmeschema für die Druckfestigkeits- und TGA-Proben nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten C\_4\_2.9N



Anhang 10 – Entnahmeschema für die Druckfestigkeits- und TGA-Proben nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager für die Porenbetonsorten C\_4\_3.6N



Anhang 11 – Druckfestigkeit und Feuchtegehalt nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager  
 für die Porenbetonsorten von Hersteller A

Porenbetonsorte	Position	Tiefe	Druckfestigk.	Mittelwert	Feuchtegeh.	Mittelwert
			[N/mm <sup>2</sup> ]		[M.-%]	
A_1_PP2	1m	.1	2,1	1,8	7,6	7,7
	2m		1,5		7,9	
	3m		1,8		7,6	
	1m	.2	2,7	2,5	8,0	8,2
	2m		2,5		8,3	
	3m		2,3		8,1	
	1m	.3	2,8	2,8	8,2	8,1
	2m		2,9		8,1	
	3m		2,6		7,9	
A_1_PP4	1m	.1	3,1	2,9	7,5	7,5
	2m		2,8		7,5	
	3m		2,8		7,3	
	1m	.2	4,7	4,5	7,8	7,8
	2m		4,6		7,8	
	3m		4,4		7,8	
	1m	.3	4,9	4,7	7,6	7,5
	2m		4,8		7,6	
	3m		4,5		7,4	
	1m	.4	5,0	4,8	7,5	7,5
	2m		4,8		7,5	
	3m		4,6		7,4	
A_2_PP2	1m	.1	2,2	2,1	7,1	6,8
	2m		2,2		6,7	
	3m		2,0		6,5	
	1m	.2	1,7	1,9	7,4	7,3
	2m		2,0		7,3	
	3m		2,1		7,2	
	1m	.3	1,8	1,9	7,4	7,4
	2m		2,0		7,3	
	3m		1,9		7,5	
A_2_PP4	1m	.1	2,8	2,7	7,6	7,5
	2m		2,7		7,6	
	3m		2,7		7,5	
	1m	.2	3,3	3,4	8,0	7,7
	2m		3,5		7,7	
	3m		3,4		7,6	
	1m	.3	4,1	4,2	8,0	8,0
	2m		4,3		8,1	
	3m		4,1		8,0	

Anhang 12 – Druckfestigkeit und Feuchtegehalt nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager  
für die Porenbetonsorten von Hersteller B und C

Porenbetonsorte	Position	Tiefe	Druckfestigk.	Mittelwert	Feuchtegeh.	Mittelwert
			[N/mm <sup>2</sup> ]		[M.-%]	
B_3_PP4	1m	.1	5,7	5,5	6,7	6,6
	2m		5,5		6,7	
	3m		5,3		6,4	
	1m	.2	5,5	5,4	6,7	6,5
	2m		5,4		6,5	
	3m		5,2		6,3	
	1m	.3	5,1	5,0	6,7	6,6
	2m		5,1		6,5	
	3m		4,9		6,5	
	1m	.4	5,1	4,9	6,6	6,5
	2m		5,0		6,6	
	3m		4,8		6,4	
C_4_2.9N	1m	.1	4,6	4,6	7,4	7,4
	2m		4,4		7,4	
	3m		4,8		7,3	
	1m	.2	4,4	4,2	7,2	7,1
	2m		4,3		7,1	
	3m		4,0		7,0	
C_4_3.6N	1m	.1	4,9	5,0	7,2	7,1
	2m		5,1		7,1	
	3m		4,9		7,2	
	1m	.2	4,8	4,6	6,4	6,9
	2m		4,6		7,2	
	3m		4,5		7,2	
	1m	.3	4,9	4,6	6,1	6,0
	2m		4,5		6,0	
	3m		4,5		6,1	

Anhang 13 – Carbonatisierungsgrad  $D_C$  nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager  
für die Porenbetonsorten von Hersteller A, Werk 1

Porenbetonsorte	Tiefe	Carbonatisierungsgrad $D_C$
	[cm]	[%]
A_1_PP2	0 - 1	48,7
	1 - 2	44,1
	2 - 3	39,6
	3 - 4	35,1
	4 - 5	29,9
	5 - 6	25,4
	6 - 7	19,7
	7 - 8	13,0
	8 - 9	2,9
	9 - 10	-0,6
	10 - 11	-0,8
	11 - 12	-1,2
A_1_PP4	0 - 1	47,3
	1 - 2	44,2
	2 - 3	42,9
	3 - 4	36,8
	4 - 5	32,3
	5 - 6	25,2
	6 - 7	18,6
	7 - 8	8,3
	8 - 9	0,1
	9 - 10	0,3
	10 - 11	0,3
	11 - 12	0,1
	12 - 13	0,3
	13 - 14	0,2
14 - 15	0,0	

Anhang 14 – Carbonatisierungsgrad  $D_C$  nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager  
für die Porenbetonsorten von Hersteller A, Werk 2

Porenbetonsorte	Tiefe	Carbonatisierungsgrad $D_C$
	[cm]	[%]
A_2_PP2	0 - 1	27,4
	1 - 2	29,1
	2 - 3	26,2
	3 - 4	23,8
	4 - 5	22,3
	5 - 6	19,9
	6 - 7	17,6
	7 - 8	15,0
	8 - 9	12,2
	9 - 10	9,7
	10 - 11	7,7
	11 - 12	5,9
A_2_PP4	0 - 1	51,1
	1 - 2	48,0
	2 - 3	44,7
	3 - 4	38,3
	4 - 5	34,8
	5 - 6	28,4
	6 - 7	22,4
	7 - 8	14,7
	8 - 9	6,9
	9 - 10	1,2
	10 - 11	0,4
	11 - 12	0,4

Anhang 15 – Carbonatisierungsgrad  $D_C$  nach 18-monatiger Lagerung im Außenlager  
für die Porenbetonsorten von Hersteller A und B

Porenbetonsorte	Tiefe	Carbonatisierungsgrad $D_C$
	[cm]	[%]
B_3_PP4	0 - 1	8,8
	1 - 2	11,0
	2 - 3	11,1
	3 - 4	10,2
	4 - 5	8,5
	5 - 6	5,7
	6 - 7	3,2
	7 - 8	2,0
	8 - 9	0,2
	9 - 10	-0,2
	10 - 11	-0,6
	11 - 12	-0,7
	12 - 13	-1,0
	13 - 14	-1,1
14 - 15	-0,8	
C_4_2.9N	0 - 1	21,0
	1 - 2	21,3
	2 - 3	20,6
	3 - 4	19,2
	4 - 5	19,2
C_4_3.6N	0 - 1	23,4
	1 - 2	23,5
	2 - 3	20,7
	3 - 4	17,0
	4 - 5	12,7
	5 - 6	9,8
	6 - 7	7,7
	7 - 8	5,1
	8 - 9	3,3
	9 - 10	0,6
10 - 11	-0,7	