

Luftporenbeton mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) Teil 2

Festbetoneigenschaften

Superabsorbierende Polymere (SAP) stellen als multifunktionales, pulverförmiges Betonzusatzmittel eine Alternative zu klassischen LP-Bildnern zur Einführung eines künstlichen Luftporensystems in den Festbeton dar. Neben einer Steigerung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands führt das künstlich eingeführte Luftporensystem auch zu veränderten mechanischen und dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften. Dabei gilt es, besonders das von den SAP gespeicherte und während der Hydratation langsam abgegebene Wasser zu beachten. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden systematische Untersuchungen zur Anwendung von superabsorbierenden Polymeren in Luftporenbeton als Alternative zum klassischen LP-Bildner beschrieben und diskutiert. Es werden sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die Dauerhaftigkeit der Betone betrachtet. Mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) können bei einer zusätzlichen Saugwasserdosierung von 50 M.-% der maximalen Sorptionsfähigkeit der SAP Luftporenbetone mit vergleichbaren bis hin zu verbesserten mechanischen und dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften gegenüber Betonen mit klassischem Luftporenbildner (auf Basis von Wurzelharz) hergestellt werden.

Stichworte Superabsorbierende Polymere; Luftporenbeton; Festbetoneigenschaften; Dauerhaftigkeit

1 Einleitung

Die spezifischen Eigenschaften von superabsorbierenden Polymeren (SAP) ermöglichen einen Einsatz als innovatives Zusatzmittel für unterschiedlichste Anwendungsgebiete zur Optimierung der Betoneigenschaften [1]. Bei Kontakt mit Wasser können SAP ein Vielfaches ihres Trockengewichts an Flüssigkeit aufnehmen, aufquellen und Hydrogele bilden. Im Laufe der Hydratation des Betons geben die Polymere das aufgenommene Wasser wieder ab und bilden ein wirksames künstliches Luftporensystem, z. B. zur Steigerung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands [2–5]. Darüber hinaus wird in der Literatur vielfach der Einsatz von SAP zur inneren Nachbehandlung von Beton [1, 3] sowie zur gezielten Anpassung der rheologischen Eigenschaften des Frischbetons beschrieben [6–9].

Aus Sicht der Autoren können SAP eine Alternative zum klassischen LP-Bildner (z. B. auf Basis von Wurzelharz) zur Einführung eines künstlichen Luftporensystems in den Festbeton und somit zur Sicherstellung eines ausreichenden Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands darstel-

Air entraining concrete with superabsorbent polymers (SAP) – Part 2: hardened concrete properties

Superabsorbent polymers (SAP) offer a new alternative multi-functional powdered concrete admixture for air-entrained concrete. An effective artificial air void system can be integrated and the water balance can be precisely regulated. In addition to increasing the frost and freeze-thaw resistance, the artificially introduced air void system leads to changes in mechanical and durability-relevant properties. This paper at hand discusses systematic investigations into the use of superabsorbent polymers in air-entrained concrete as an alternative to the classical air-entraining agent. In this Part 2, the results of the experimental investigations regarding the hardening properties of concretes using SAP are discussed. Both the mechanical properties and the durability of the concretes are considered. Superabsorbent polymers (SAP) can be used to produce air-entrained concretes with comparable or even improved mechanical and durability properties compared to concretes with classic air-entraining agent by adding 50 wt % of the maximum sorption capacity of SAP.

Keywords superabsorbent polymers; air entraining concrete; hardened concrete properties; durability

len. Die aus der nachträglichen Wasserabgabe der SAP resultierende erhöhte Porosität im Festbeton wirkt sich zwar negativ auf die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu Normalbeton aus, im Vergleich zu Luftporenbeton mit standardmäßigen Luftporenbildnern (z. B. auf Basis von Wurzelharz) ist die Reduktion der Druckfestigkeit jedoch auf vergleichbarem Niveau [2, 5]. Insbesondere im massiven Wasserbau sind Bauteile mit Luftporenbeton, wie z. B. Schleusenkammerwände [10] oder Regenrückhaltebecken [11], neben dem Frost- und Frost-Tausalz-Angriff (XF) weiteren dauerhaftigkeitsrelevanten Expositionen ausgesetzt, wie z. B. der CO₂-induzierten Karbonatisierung des Betons (XC). Darüber hinaus gilt es, bei Meerwasserbauwerken die Beanspruchung von Chloriden (XS) zu beachten [10]. In der Literatur sind neben dem Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand bisher nur wenige Untersuchungen in Bezug auf weitere dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften von Normalbetonen unter Anwendung von SAP vorhanden [12–14]. In der Literatur wurden die meisten Untersuchungen mit Betonen mit sehr niedrigen w/z-Werten ($\leq 0,42$) im Hinblick auf die Verringerung des autogenen Schwindens durchgeführt [1, 15–17]. Nur wenige systematische Studi-

en befassen sich bisher mit Betonen mit einem höheren w/z-Wert von 0,42 [2, 14, 18].

Im Rahmen dieses Beitrags werden systematische Untersuchungen zur Anwendung von superabsorbierenden Polymeren in Luftporenbeton als Alternative zum klassischen LP-Bildner beschrieben und diskutiert. Als Referenz werden Betone mit klassischem Luftporenbildner auf Basis von Wurzelharz herangezogen. In diesem Teil 2 des Beitrags werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der Festbetoneigenschaften von Betonen unter Anwendung von SAP beschrieben und diskutiert. Es werden sowohl die mechanischen Eigenschaften als auch die Dauerhaftigkeit der Betone betrachtet. In Teil 1 dieses Beitrags [19] wurden bereits die Frischbetoneigenschaften der untersuchten Betonzusammensetzungen beschrieben. Darüber hinaus wurden die resultierenden Auswirkungen der notwendigen zusätzlichen Wasserdosierung bei Anwendung von SAP auf die volumetrische Verteilung der Bestandteile im Bindemittel vorgestellt. In einem weiteren Teil 3 [20] wird die Robustheit gegenüber stofflichen und umgebungsbedingten Schwankungen der Betone mit SAP beschrieben und diskutiert.

2 Untersuchungsmethodik

2.1 Ausgangsstoffe

Die Eigenschaften der verwendeten Ausgangsstoffe sind detailliert in Teil 1 dieses Beitrags [19] beschrieben. Als Bindemittel wurde CEM III/A 42,5 N gemäß DIN EN 197-1 [21] sowie vereinzelt Steinkohlenflugasche gemäß DIN EN 450 [22] als Zusatzstoff eingesetzt. Als Gesteinskörnung wurde natürlicher runder Flusssand und -kies (Weser) mit einem Größtkorn von 32 mm und einer Korngrößenverteilung entsprechend A/B 32 verwendet. Für die klassischen Luftporenbetone (Referenz) wurde ein auf Wurzelharz basierender Luftporenbildner (MasterAir 125, Master Builders Solutions Deutschland GmbH) eingesetzt. Darüber hinaus wurden superabsorbierende Polymere (MasterSphere 2000 [23], Master Builders Solutions Deutschland GmbH) mit einer runden Partikelform verwendet. Das mit dem „Teebeuteltest“

(Verfahrensbeschreibung vgl. [24]) in Filtratwasser (Zementsuspension aus CEM I 42,5 mit einem w/z-Wert von 5) ermittelte Absorptionsvermögen der SAP beträgt nach 10 min $33 \pm 3 \text{ g/g}_{\text{SAP}}$ sowie nach 60 min $39 \pm 3 \text{ g/g}_{\text{SAP}}$ [23].

2.2 Betonzusammensetzungen

Die untersuchten Betonzusammensetzungen orientieren sich an den unteren Grenzwerten der DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile“ [25] für die Expositionsklassen XF3 und XF4, sodass die Leistungsfähigkeit der SAP unter pessimalen Bedingungen bewertet werden konnte. So wurden möglichst kritische Szenarien sowohl für die Frostbeständigkeit (hoher w/z-Wert) als auch für die Verarbeitbarkeit (geringer Leimgehalt) betrachtet. Jeder Beton wurde zum einen mit klassischem LP-Bildner (Referenz) sowie zum anderen mit SAP hergestellt. Für die Referenzmischungen wurde der LP-Gehalt so eingestellt, dass ein Mindestluftporengehalt von 4,0 Vol.-% gemäß DIN 1045-2 [26] sichergestellt war. Für die SAP-Mischungen wurde im Rahmen von Vorversuchen eine Zugabemenge von $1,0 \text{ kg/m}^3$ SAP verbunden mit der Zugabe von 18 kg/m^3 Saugwasser (entspricht ca. 50 % des Absorptionsvermögens der SAP, vgl. Abschn. 2.1) identifiziert. Diese zusätzlich (zum Zugabewasser) zugegebene Wassermenge entspricht der maximal zulässigen Menge gemäß [23] und wurde weder auf den w/z-Wert angerechnet, noch bei der Stoffraumberechnung im Rahmen der Ermittlung des Gehalts der restlichen Ausgangsstoffe berücksichtigt. Tab. 1 zeigt zusammenfassend die untersuchten Betonzusammensetzungen. Weitere Details zu den untersuchten Betonzusammensetzungen sind im Teil 1 dieses Beitrags [19] enthalten.

2.3 Untersuchungsmethoden

Die Druckfestigkeit wurde gemäß DIN EN 12390-3 [27] an würfelförmigen Probekörpern mit den Abmessungen $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ nach 2, 7, 28, 56 und 91 d bestimmt. Die Probekörper wurden 24 h bei $20 \pm 2^\circ \text{C}$ in der Schalung und anschließend bis zur Prüfung unter Wasser ($20 \pm 2^\circ \text{C}$) gelagert. Der Elastizitätsmodul wurde gemäß

Tab. 1 Betonzusammensetzungen
Concrete mixtures

Bezeichnung	Zement	SFA	Wasser	GK	SAP	SAP-Saugwasser	LP	FM
	(kg/m ³)						(M.-% v. Zem.)	
XF3-LP	300	–	165	1840	–	–	0,20	0,16
XF3-SAP	300	–	165	1840	1,0	18	–	0,96
XF4-LP	300	–	150	1880	–	–	0,20	0,51
XF4-SAP	300	–	150	1880	1,0	18	–	3,20
XF4-LP-SFA	270	75	150	1820	–	–	0,19	0,75
XF4-SAP-SFA	270	75	150	1820	1,0	18	–	2,20

SFA=Steinkohlenflugasche; LP=Luftporenbildner; FM=verfl. Zusatzmittel

DIN EN 12390-13 [28] an zylindrischen Probekörpern mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm im Alter von 28 d ermittelt. Die Lagerungsbedingungen der Probekörper waren identisch zu den zuvor beschriebenen Bedingungen bei der Druckfestigkeitsprüfung.

Der Widerstand gegenüber CO₂-induzierter Karbonatisierung wurde mit dem beschleunigten Prüfverfahren gemäß DIN EN 12390-12 [29] untersucht. Hierfür wurden Probekörper mit den Abmessungen 100×100×100 mm³ hergestellt, nach 24 h entformt und anschließend bis zum Alter von 28 d unter Wasser (20 ± 2 °C) gelagert. Danach wurden die Probekörper aus der Wasserlagerung entnommen und bis zum Alter von 42 d trockenen Bedingungen bei 20 ± 2 °C und 65 ± 3 % rel. LF ausgesetzt. Anschließend wurden die Probekörper für 28 d einer erhöhten CO₂-Konzentration von 3,0 ± 0,5 Vol.-% bei 20 ± 2 °C und 57 ± 3 % rel. LF ausgesetzt. Im Anschluss daran erfolgte die Ermittlung der Karbonatisierungstiefe, indem die Proben entlang der Längsachse in Scheiben gespalten wurden und Phenolphthalein auf die Oberflächen der frisch freigelegten Oberflächen aufgetragen wurde. Die Karbonatisierungstiefe wurde durch Messung von der Außenkante nach innen an drei Punkten an jeder der vier Kanten der Scheiben bestimmt. Aus den resultierenden zwölf Messungen wurde für jede Probe der Mittelwert der Karbonatisierungstiefe gebildet.

Der Chlorideindringwiderstand wurde mit dem RCM-Test gemäß [30] bestimmt. Dafür wurden würfelförmige Probekörper mit den Abmessungen 150×150×150 mm³ hergestellt, nach 24 h entformt und bis zum Zeitpunkt der Prüfung unter Wasser (20 ± 2 °C) gelagert. Nach 14 d wurden zylindrische Probekörper gebohrt und Probekörper mit einem Durchmesser von 100 ± 1 mm und einer Höhe von 50 ± 5 mm durch Sägen hergestellt und weiterhin unter Wasser gelagert. An den zylindrischen Proben wurde im Alter von 35 d der Chlorideindringwiderstand ermittelt. Als Anodenlösung wurden 0,2 N Kaliumhydroxidlösung (KOH) und als Kathodenlösung wurde 0,2 N Kaliumhydroxidlösung + 10 % NaCl verwendet. Zur Bewertung des Chlorideindringwiderstands wurden die Proben entlang der vertikalen Achse in zwei Hälften geteilt und zuerst Fluoresceinlösung und dann Silbernitratlösung auf die Oberflächen der frisch freigelegten Oberflächen aufgetragen. Die Chlorideindringtiefe wurde durch Messung von der Unterkante nach innen an elf Punkten be-

stimmt. Der Mittelwert der Chlorideindringtiefe für jede Probe wurde aus neun Messungen berechnet (die beiden äußeren Werte wurden nicht berücksichtigt). Unter Verwendung des Mittelwerts und der experimentellen Randbedingungen wurde der Chloridmigrationskoeffizient D_{Cl} gemäß [30] berechnet.

Zur Beurteilung des Frost-Widerstands wurde der CIF-Test gemäß [31] durchgeführt. Dabei wurden das kapillare Saugverhalten, die innere Schädigung und die Abwitterung im Zeitverlauf ermittelt. Für diese Prüfung wurden Probekörper mit den Abmessungen 150×150×150 mm³ hergestellt. Als Schalungsmaterial für die Prüfflächen wurde Teflon verwendet. Die Probekörper wurden nach 24 h entformt und 6 d lang unter Wasser (20 ± 2 °C) gelagert. Nach 7 d wurden aus jeder Probe Probekörper mit den Abmessungen 150×100×70 mm³ gesägt. Die vorbereiteten Probekörper wurden bis zum Alter von 28 d trockenen Bedingungen bei 20 ± 2 °C und 65 ± 3 % rel. LF ausgesetzt. Anschließend wurden die Proben 7 d lang einer einseitigen kontinuierlichen Wasserlagerung unterzogen und das kapillare Saugverhalten bestimmt. Danach wurden Frost-Tau-Zyklen gestartet und der relative dynamische Elastizitätsmodul (innere Schädigung) sowie der Betonabplatzungsbetrag der Proben über die Zeit (28 Frost-Tau-Zyklen) bestimmt. Die genauen Randbedingungen der Frost-Tau-Zyklen und weitere Details zur Probenvorbereitung sind in [31] enthalten. Darüber hinaus wurde der Frost-Tausalz-Widerstand mit dem CDF-Test gemäß [31] ermittelt. Die Vorgehensweise und Randbedingungen sind gegenüber dem CIF-Test identisch, außer dass beim CDF-Test eine NaCl-Lösung als Prüfflüssigkeit eingesetzt wird.

3 Experimentelle Untersuchungsergebnisse

3.1 Frischbetoneigenschaften

Die Frischbetoneigenschaften der untersuchten Betonzusammensetzungen sind detailliert in Teil 1 dieses Beitrags [19] beschrieben. Zur Übersicht sind die maßgeblichen Frischbetoneigenschaften zusammenfassend in Tab. 2 dargestellt. Demnach sind alle untersuchten Betone der Konsistenzklasse F3 zuzuordnen. Der Mindestluftporengehalt im Frischbeton von 4,0 Vol.-% gemäß [26] wird von den Referenz-Luftporenbetonen mit klassischem LP-Bildner erreicht.

Tab. 2 Frischbetoneigenschaften
Fresh concrete properties

Bezeichnung	Ausbreitmaß [cm]	LP-Gehalt [Vol.-%]	Rohdichte [kg/dm ³]	plast. Viskosität [Pa·s]
XF3-LP	44,5	5,4	2280	103
XF3-SAP	45,5	0,9	2360	146
XF4-LP	46,0	5,6	2300	114
XF4-SAP	47,0	0,8	2380	156
XF4-LP-SFA	47,0	4,0	2320	128
XF4-SAP-SFA	47,0	1,2	2370	201

3.2 Druckfestigkeitsentwicklung

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung in einem Alter von 2 d bis 91 d sind in Bild 1 für alle untersuchten Betonzusammensetzungen dargestellt. Unabhängig von den betontechnologischen Eigenschaften (w/z_{eq} -Wert, Zementgehalt etc.) kann bei den Betonen mit SAP ab einem Alter von 28 d jeweils eine höhere Druckfestigkeit als beim vergleichbaren LP-Beton beobachtet werden. Im frühen Stadium der Hydratation bis zu 7 d weist der Beton XF4-SAP-SFA gegenüber dem vergleichbaren LP-Beton XF4-LP-SFA eine leicht geringere Druckfestigkeit auf. Dabei gilt es zu beachten, dass der LP-Beton XF4-LP-SFA im Frischbeton einen recht geringen Luftporengehalt von 4,0 Vol.-% (vgl. Tab. 2) aufweist und demnach bei diesem Beton mit einer leicht erhöhten Druckfestig-

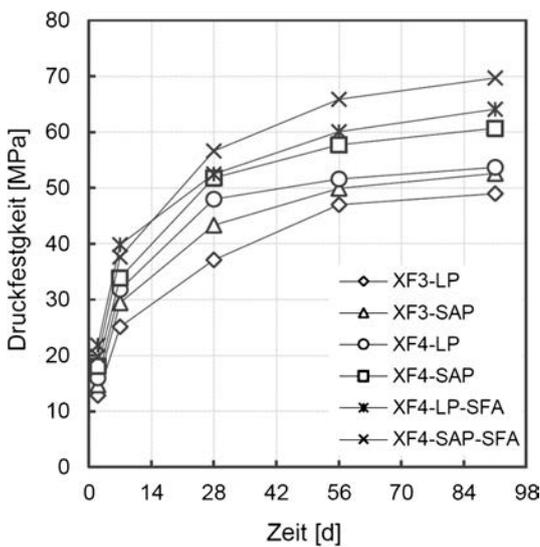


Bild 1 Druckfestigkeit im Alter von 2 d bis 91 d aller untersuchten Betonzusammensetzungen
Compressive strength from 2 days to 91 days of all concrete compositions investigated

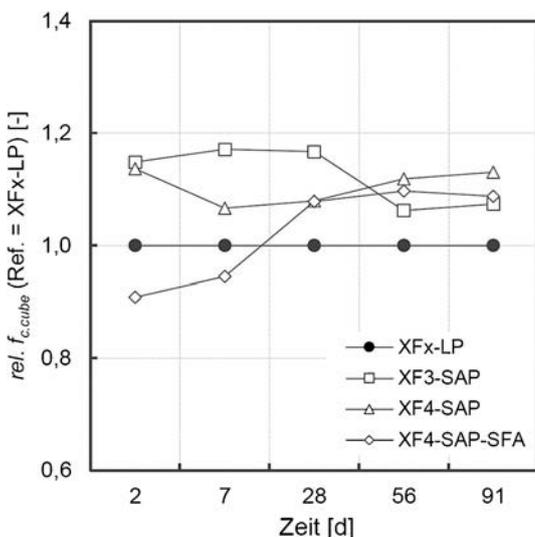


Bild 2 Normierte Druckfestigkeit ($rel. f_{c,cube}$) für die Betonzusammensetzungen mit SAP, bezogen auf die jeweilige korrespondierende LP-Betonzusammensetzung
Standardized compressive strength ($rel. f_{c,cube}$) for the concrete compositions with SAP in relation to the corresponding concrete composition with air entraining agent

keit zu rechnen ist. Zur vergleichbaren Einschätzung der jeweiligen Druckfestigkeiten ist in Bild 2 für die Betone mit SAP die auf die jeweilige des korrespondierenden LP-Betons normierte Druckfestigkeit ($rel. f_{c,cube}$) dargestellt. Die zuvor beschriebene geringfügig verminderte Druckfestigkeit im frühen Stadium beim Beton XF4-SAP-SFA kann deutlich erkannt werden ($rel. f_{c,cube,2d} = 0,91$ und $rel. f_{c,cube,7d} = 0,94$). Auch die erhöhten Druckfestigkeiten unabhängig vom Prüfalalter sind bei den weiteren Betonen mit SAP klar ersichtlich. Ab einem Prüfalalter von 56 d weisen alle SAP-Betone eine relative Druckfestigkeitserhöhung auf vergleichbarem Niveau von 1,07 (XF3-SAP) bis 1,12 (XF4-SAP) gegenüber dem jeweiligen korrespondierenden LP-Beton auf. Bei einem Prüfalalter von 91 d sind nur minimale Veränderungen festzustellen.

Die Druckfestigkeitsentwicklung der Betone kann in Bild 3 bewertet werden. Dort ist das Verhältnis der 2-d-Festigkeit zur 28-d-Festigkeit ($f_{c,cube,2d}/f_{c,cube,28d}$ – entspricht dem r-Wert gemäß [26]) dargestellt. Die Druckfestigkeitsentwicklung ($f_{c,cube,2d}/f_{c,cube,28d}$) ist bei allen Betonen unabhängig von der Zugabe von LP-Bildner oder SAP in einem vergleichbaren Wertebereich von 0,33 (XF4-LP) bis 0,41 (XF4-LP-SFA). Dies entspricht einer mittleren Festigkeitsentwicklung gemäß DIN 1045-2 [26]. Für Betone mit CEM III/A als Bindemittel sind dies gängige Werte und werden von weiteren Untersuchungen an Normalbetonen in der Literatur bestätigt [32, 33].

3.3 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul wurde gemäß DIN EN 12390-13 [28] an zylindrischen Probekörpern mit den Abmessungen $150 \times 300 \text{ mm}^2$ nach 28 d bestimmt. Im Nachgang wurde die Druckfestigkeit an den jeweiligen zylindrischen Probekörpern ermittelt. Bild 4 zeigt den Elastizitätsmo-

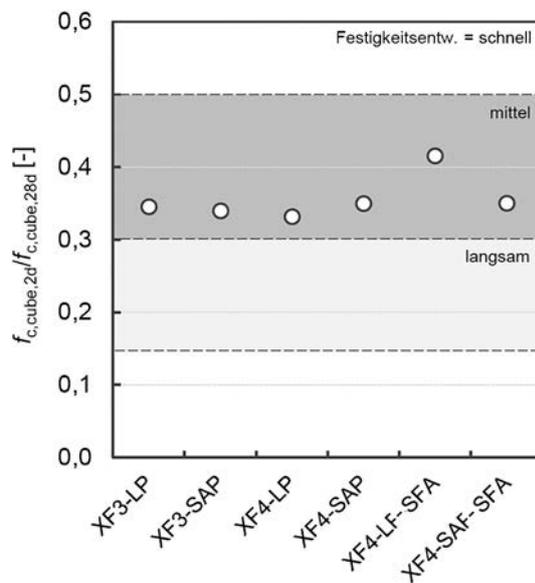


Bild 3 Druckfestigkeitsentwicklung ($f_{c,cube,2d}/f_{c,cube,28d}$) für alle untersuchten Betonzusammensetzungen
Compressive strength development ($f_{c,cube,2d} / f_{c,cube,28d}$) for all concrete compositions investigated

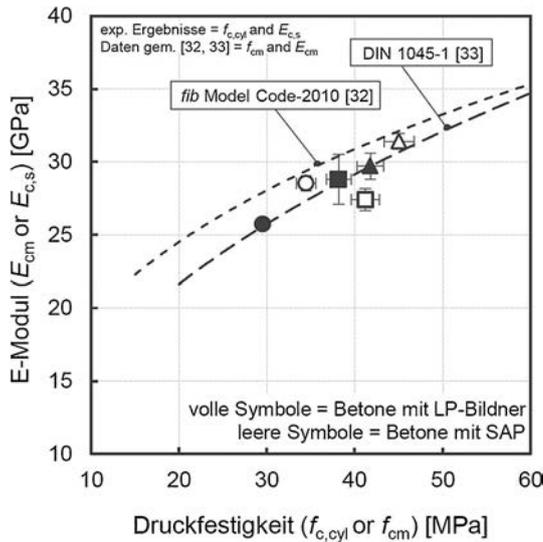


Bild 4 Elastizitätsmodul ($E_{c,s}$) in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit ($f_{c,cyl}$) aller untersuchten Betonzusammensetzungen
 Modulus of elasticity ($E_{c,s}$) as a function of compressive strength ($f_{c,cyl}$) of all concrete compositions investigated

dul der untersuchten Betonzusammensetzungen in einem Alter von 28d in Abhängigkeit von der jeweiligen mittleren Druckfestigkeit (f_{cm} bzw. $f_{c,cyl}$). Zum Vergleich zeigt Bild 4 die Vorhersage des Elastizitätsmoduls entsprechend den Modellen gemäß fib Model Code 2010 [33] und DIN 1045-1 [35].

Die Werte der Elastizitätsmoduln liegen in einem vergleichbaren Wertebereich von 25,7 GPa (XF3-LP) bis 31,4 GPa (XF3-SAP-SFA), unabhängig von der Betonzusammensetzung und auch vom Zusatzmitteltyp (LP oder SAP). Der Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit den modellbasierten Werten gemäß fib Model Code 2010 [34] und DIN 1045-1 [35] zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Mit zunehmender Druckfestigkeit kann eine Zunahme der Elastizitätsmoduln in Näherung der Modellrechnungen gemäß DIN 1045-1 [35] festgestellt werden. Einzige Ausnahme stellt der Beton XF4-SAP dar, dieser zeigt bei einer höheren Druckfestigkeit einen geringfügig verminderten Wert für den Elastizitätsmodul auf als der vergleichbare Beton mit klassischem LP-Bildner. Im Vergleich zu den modellbasierten Werten gemäß fib Model Code 2010 [34] zeigen die experimentellen Werte leicht verminderte Werte für die Elastizitätsmoduln bei allen Betonzusammensetzungen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Werte der Elastizitätsmoduln nach 28d ermittelt wurden. Insbesondere bei Betonen mit Hochofenzementen (hier: CEM III/A) ist nach 28d noch mit einem signifikanten Anstieg sowohl der Druckfestigkeit als auch des Elastizitätsmoduls infolge des Nacherhärtungspotenzials des Hüttensands zu rechnen [36].

3.4 Karbonatisierungswiderstand

Zur Prüfung und Bewertung des Karbonatisierungswiderstands wurde das beschleunigte Prüfverfahren gemäß DIN EN 12390-12 [29] angewendet. Die nach 28d Lage-

rung bei erhöhter CO_2 -Konzentration ermittelten Karbonatisierungstiefen aller untersuchten Betone sind in Bild 5 dargestellt. Erwartungsgemäß zeigen die Betonzusammensetzungen mit dem höchsten w/z-Wert von 0,55 (XF3) die größten Karbonatisierungstiefen unabhängig vom Zusatzmittel (LP oder SAP). Bei Anwendung der SAP zeigen die Betone jeweils immer geringere Karbonatisierungstiefen als die korrespondierenden LP-Betone. So sinkt die ermittelte Karbonatisierungstiefe bei dem Beton mit einem w/z-Wert = 0,55 von 8,8 mm (XF3-LP) auf 6,8 mm (XF3-SAP). Im Mittel ist eine prozentuale Reduktion der Karbonatisierungstiefe um ca. 20 % bei Anwendung der SAP gegenüber den klassischen LP-Betonen festzustellen.

Bild 6 gibt einen Überblick über die Anforderungen zur Bewertung des Karbonatisierungswiderstands von Betonen in Anlehnung an [37]. Dargestellt ist die Karbonatisierungstiefe nach 140d ($d_{c,140d}$ – Lagerung unter natürlicher CO_2 -Konzentration) in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit ($f_{c,cube(150mm),28d}$). Die Umrechnung der unter beschleunigten Bedingungen ermittelten Werte der Karbonatisierungstiefe (vgl. Bild 5) auf natürliche CO_2 -Bedingungen wurde gemäß [38] durchgeführt. Ein Einfluss des CO_2 -Gehalts auf die ermittelte Karbonatisierungstiefe oder das Gefüge des Betons, wie in [39, 40] beschrieben, wurde dabei vernachlässigt. In Bild 6 kann erkannt werden, dass alle Betone unabhängig vom Zusatzmittel (LP oder SAP) die Anforderungen gemäß [37] erfüllen. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse sind in Bild 6 zusätzlich Ergebnisse von Untersuchungen an Normalbetonen (8mm, w/z = 0,50) mit standardmäßigen Zementen (CEM I–CEM III) dargestellt [41]. Die hier untersuchten Betonzusammensetzungen ordnen sich sehr gut in die Ergebnisse aus der Literatur ein.

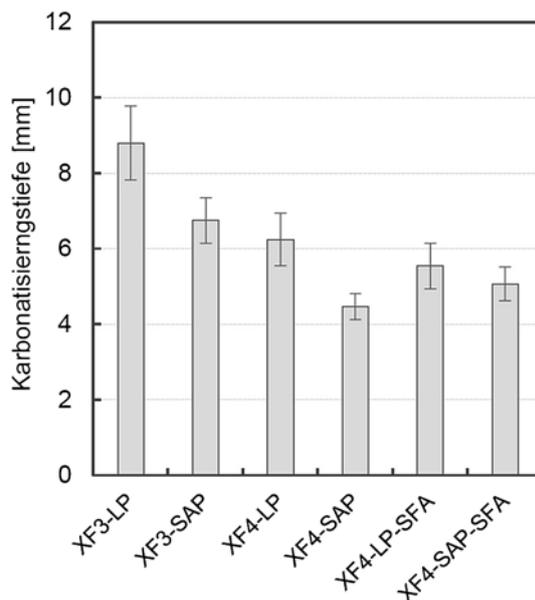


Bild 5 Karbonatisierungstiefe aller untersuchten Betone (ermittelt mit dem Schnellprüfverfahren gemäß DIN EN 12390-12 [29])
 Depth of carbonation of all concrete compositions investigated (determined using the rapid test method acc. to DIN EN 12390-12 [29])

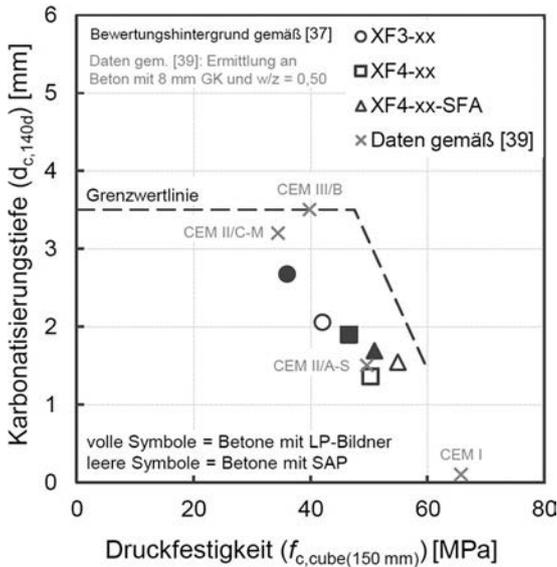


Bild 6 Karbonisierungstiefe ($d_{c,140d}$) in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit ($f_{c,cube(150mm),28d}$) – Bewertungskriterien gemäß [37]
Carbonation depth ($d_{c,140d}$) as a function of compressive strength ($f_{c,cube(150mm),28d}$) – assessment acc. to [37]

3.5 Chlorideindringwiderstand

Bild 7 zeigt die ermittelten Werte der Chloridmigrationskoeffizienten (D_{Cl}) in einem Alter von 35 d für alle untersuchten Betonzusammensetzungen. Unabhängig von der Zusatzmittelart (LP oder SAP) weisen alle Betone einen sehr geringen Chloridmigrationskoeffizienten von unter $5,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ und demnach einen sehr hohen Chlorideindringwiderstand auf. Dieser hohe Chlorideindringwiderstand ist vor allem auf die Verwendung des Hochofenzements (CEM III/A) und den resultierenden hohen Gehalt an Hüttensand zurückzuführen (vgl. z. B. [42,43]). Alle untersuchten Betone unterschreiten dementsprechend den Grenzwert von $5,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ zur Einordnung in die Expositionsklassen XS3 und XD3 gemäß [30].

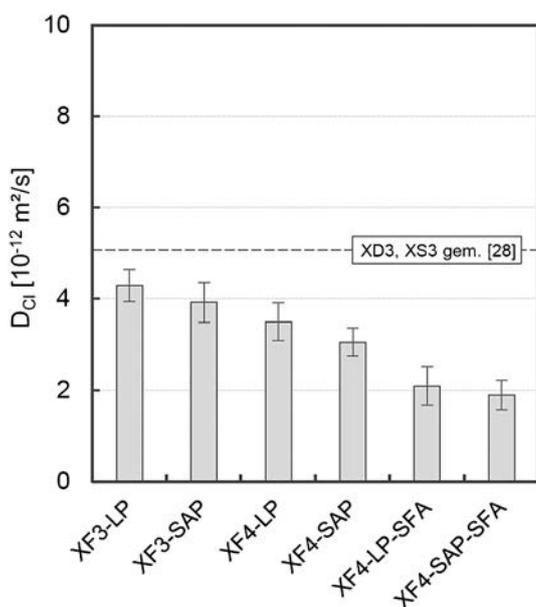


Bild 7 Chloridmigrationskoeffizienten (D_{Cl}) aller untersuchten Betone ermittelt gemäß [30]
Chloride migration coefficient (D_{Cl}) of all concretes investigated acc. to [30]

Beim Vergleich der LP- und SAP-Betone fällt auf, dass die Chloridmigrationskoeffizienten der SAP-Betone allesamt geringfügig geringer sind als die der klassischen LP-Betone. So weist der Beton XF3-LP einen D_{Cl} -Wert von $4,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ und der vergleichbare SAP-Beton einen D_{Cl} -Wert von $3,9 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ auf. Die Unterschiede zwischen den LP- und SAP-Betonen sind demnach auf relativ niedrigem Niveau. Im Mittel ist eine prozentuale Reduktion des Chloridmigrationskoeffizienten um ca. 10 % bei Anwendung der SAP gegenüber den klassischen LP-Betonen festzustellen.

3.6 Luftporenkennwerte im Festbeton

Nur bei einer entsprechenden Menge sowie Verteilung im Festbeton besitzen künstliche Luftporen eine positive Wirkung auf den Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand [44]. Zur Charakterisierung und Bewertung der Wirksamkeit des künstlichen Luftporensystems sind in [45] Grenzwerte an den Mikro-Luftporengehalt A_{300} ($\geq 1,5 \text{ Vol.-%}$ bei der Zulassungsprüfung) sowie den Abstandsfaktor L ($\leq 0,24 \text{ mm}$ bei der Zulassungsprüfung) festgelegt. Gemäß [23] sind bei der Anwendung der im Rahmen dieser Untersuchungen verwendeten SAP ein Mikro-Luftporengehalt $A_{300} \geq 1,8 \text{ Vol.-%}$ einzuhalten. Tab. 3 zeigt die gemäß DIN EN 480-11 [46] ermittelten charakteristischen Kennwerte des künstlichen Luftporensystems im Festbeton aller untersuchten Betonzusammensetzungen. Unabhängig vom Zusatzmittel (LP-Bildner oder SAP) weisen alle Betone einen Mikro-Luftporengehalt A_{300} oberhalb des Grenzwerts von 1,5 Vol.-% bzw. 1,8 Vol.-% gemäß [23,45] auf. Die Betonzusammensetzungen mit SAP zeigen jeweils vergleichbare A_{300} -Werte gegenüber den korrespondierenden Betonen mit LP-Bildner. Einzige Ausnahme stellt der Beton XF4-LP mit einem geringfügig erhöhten Mikro-Luftporengehalt von 4,3 Vol.-% gegenüber dem Beton XF-SAP mit 2,8 Vol.-% dar. Dabei muss berücksichtigt werden, dass ein Wert von 4,3 Vol.-% für den Mikro-Luftporengehalt als sehr hoch einzustufen ist.

Theoretisch bilden die hier untersuchten SAP bei einer maximalen Sorptionskapazität von $36 \text{ kg}/\text{kg}_{\text{SAP}}$ (vgl. Abschn. 2.1) einen künstlichen Porenraum von 3,6 Vol.-%

Tab. 3 Charakteristische Kennwerte des künstlichen Luftporensystems im Festbeton
Characteristic values of artificial entrained air void system in hardened concrete

Bezeichnung	A	A_{300}	L
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mm]
XF3-LP	4,0	2,7	0,17
XF3-SAP	4,7	2,3	0,25
XF4-LP	6,2	4,3	0,12
XF4-SAP	4,5	2,8	0,23
XF4-LP-SFA	4,3	2,4	0,23
XF4-SAP-SFA	5,0	2,1	0,21

im Festbeton. Die Subtraktion des im Frischbeton ermittelten Luftporengehalts (vgl. Tab. 2) vom im Festbeton ermittelten Gesamt-Luftporengehalt A bestätigt die maximale Sorptionskapazität und die resultierende Porenbildung im Festbeton. Für die SAP-Betone ergeben sich so geringfügig erhöhte Porengehalte in einem Wertebereich von 3,7Vol.-% (XF3-SAP) und 3,8Vol.-% (XF3-SAP-SFA).

3.7 Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

Zur Beurteilung des Frost-Widerstands wurde der CIF-Test für die Betone der Expositions-kategorie XF3 und der CDF-Test für die Betone der Expositions-kategorie XF4 gemäß [31] durchgeführt. Als maßgebendes Bewertungskriterium wurde beim CIF-Test der relative dynamische E-Modul und beim CDF-Test die Abwitterungsmenge an der Oberfläche gemäß [31] herangezogen. Es zeigt sich, dass die untersuchten Betone mit w/z-Wert von 0,55 gemäß der Expositions-kategorie XF3 einen hohen Frostwider-

stand unabhängig von der Anwendung von LP-Bildnern oder SAP aufweisen (Bild 8, links). Auch nach 28 Frost-Tau-Zyklen kann bei den Betonen kein Abfall des relativen dynamischen E-Moduls festgestellt werden und zeigen Werte von 1,0 (XF3-LP) und 0,99 (XF3-SAP). Demnach kann mit beiden Varianten (LP oder SAP) ein stabiles künstliches Mikro-Luftporensystem für einen hohen Frostwiderstand in das Betongefüge eingeführt werden. Die ermittelte Oberflächenabwitterung zeigt ebenfalls nur sehr geringe Werte von 256 g/m² (XF3-LP) bzw. 101 g/m² (XF3-SAP) nach 28 Frost-Tau-Zyklen (Bild 8, rechts).

Die Untersuchungsergebnisse des CDF-Tests zeigen, dass alle Betone entsprechend Expositions-kategorie XF4 ein relativ hohes Maß an Abwitterung aufweisen (Bild 9, links). Nach 28 Frost-Tau-Zyklen weisen die Betone XF4-LP (1362 g/m²) und XF4-SAP (1265 g/m²) vergleichbare Werte der Abwitterung knapp unterhalb des Grenzwerts gemäß [31] von 1500 g/m² auf. Die Betone mit Steinkohlenflugasche weisen nach 28 Frost-Tau-Zyklen

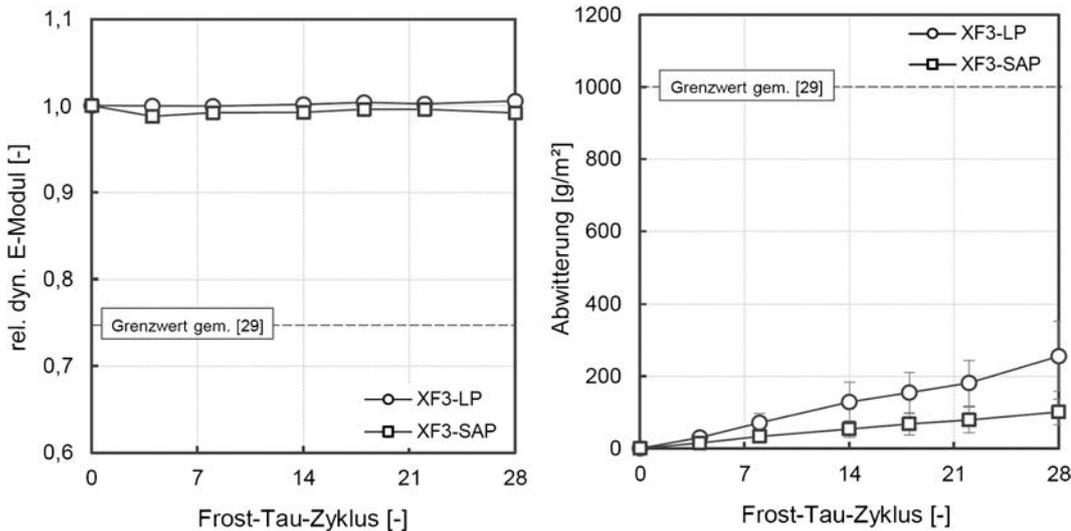


Bild 8 Relativer dynamischer E-Modul (links) und Oberflächenabwitterung (rechts) aller mit dem CIF-Test untersuchten Betone (XF3)
Relative dynamic elastic modulus (left) and concrete spalling (right) of all concretes investigated with the CIF-test (XF3)

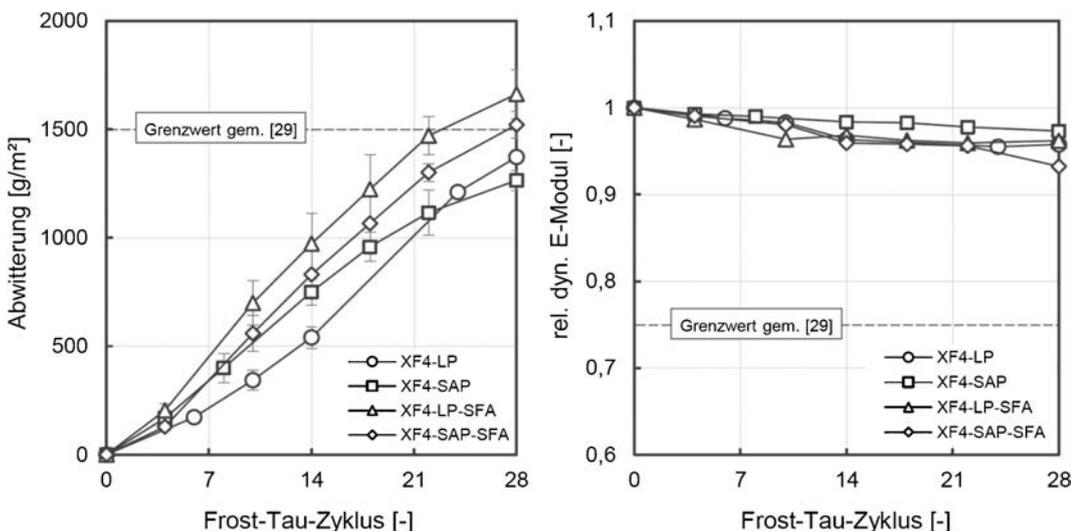


Bild 9 Oberflächenabwitterung (links) und relativer dynamischer E-Modul (rechts) aller mit dem CDF-Test untersuchten Betonzusammensetzungen (XF4)
Concrete spalling (left) and rel. dyn. elastic modulus (right) of all concretes investigated with the CDF-test (XF4)

PLEASE NOTE: This file is for archiving purposes only. Please do not share this file with others than the authors of this paper.

leicht erhöhte Werte der Abwitterung oberhalb des Grenzwerts von 1500 g/m^2 auf. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Betonen mit LP-Bildner und SAP kann bei allen untersuchten Varianten nicht beobachtet werden. Es gilt zu beachten, dass die Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Test) bereits nach 28 d mit einer Wasserlagerung der Probekörper bis zum 7. Tag nach der Herstellung durchgeführt wurden. Insbesondere bei dem verwendeten Hochofenzement ist zu erwarten, dass die Prüfung zu einem späteren Zeitpunkt (z. B. 56 d, wie auch in [31] beschrieben) mit einer verlängerten frühen Wasserlagerung zu deutlich geringeren Abwitterungsmengen, sowohl bei der Variante mit LP-Bildner als auch mit SAP, führt.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Beitrags wurden systematische Untersuchungen zur Anwendung von superabsorbierenden Polymeren in Luftporenbetonen als alternatives Zusatzmittel gegenüber klassischen Luftporenbildnern beschrieben und diskutiert. In diesem Teil 2 des Beitrags wurden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der mechanischen als auch dauerhaftigkeitsrelevanten Festbetoneigenschaften vorgestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Druckfestigkeit ist bei untersuchten Betonen mit SAP ($m_{\text{w.zus.}} = 50\%$ des Absorptionsvermögens der SAP [23]) geringfügig höher als bei vergleichbaren Luftporenbetonen mit klassischem LP-Bildner. Die Festigkeitsentwicklung ($f_{\text{c,cube,2d}}/f_{\text{c,cube,28d}}$) ist auf vergleichbarem Niveau unabhängig vom Zusatzmittel (LP oder SAP).
- Die Elastizitätsmoduln der untersuchten Betone sind bei Anwendung von SAP in einem vergleichbaren Wertebereich wie bei den Betonen mit klassischem LP-Bildner. Die Werte der hier untersuchten Betone ordnen sich gut in die Modellrechnungen gemäß DIN 1045-2 [35] sowie fib Model Code 2010 [34] unabhängig vom verwendeten Zusatzmitteltyp (LP oder SAP) ein.
- Der Karbonatisierungswiderstand ist bei Anwendung der SAP geringfügig höher gegenüber den vergleichbaren LP-Betonen mit klassischem LP-Bildner. Im Mittel

ist bei den hier untersuchten Betonzusammensetzungen eine prozentuale Reduktion der Karbonatisierungstiefe um ca. 20 % bei Anwendung der SAP gegenüber den klassischen LP-Betonen festzustellen.

- Der Chlorideindringwiderstand ist bei Anwendung der SAP geringfügig höher gegenüber den vergleichbaren LP-Betonen mit klassischem LP-Bildner. Im Mittel ist bei den hier untersuchten Betonzusammensetzungen eine prozentuale Reduktion des Chloridmigrationskoeffizienten um ca. 10 % bei Anwendung der SAP gegenüber den klassischen LP-Betonen festzustellen.
- Die charakteristischen Kennwerte des Mikro-Luftporensystems im Festbeton sind bei den hier untersuchten Betonzusammensetzungen auf vergleichbarem Niveau, unabhängig vom Zusatzmitteltyp (LP oder SAP). Die Grenzwerte für einen ausreichenden Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand gemäß [45] bezüglich des Mikro-Luftporengehalts (A_{300}), werden von allen Betonen eingehalten.
- Unabhängig von der Anwendung von LP-Bildner oder SAP weisen die Betone entsprechend der Expositions-kategorie XF3 einen sehr hohen Frostwiderstand auf. Demnach kann mit SAP ein stabiles künstliches Mikro-Luftporensystem für einen hohen Frostwiderstand in das Betongefüge eingeführt werden.
- Unabhängig von der Anwendung von LP-Bildner oder SAP weisen die Betone entsprechend der Expositions-kategorie XF4 einen vergleichbaren Frost-Tausalz-Widerstand auf. Die Abwitterungsmengen sind für alle untersuchten Varianten im Bereich des Grenzwerts gemäß [31]. Dabei gilt es zu beachten, dass die Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Test) bereits nach 28 d durchgeführt wurden. Insbesondere bei dem verwendeten Hochofenzement ist zu erwarten, dass die Prüfung zu einem späteren Zeitpunkt (z. B. 56 d, wie auch in [31] beschrieben) mit einer verlängerten frühzeitigen Wasserlagerung zu deutlich geringeren Abwitterungsmengen, sowohl bei der Variante mit LP-Bildner als auch mit SAP, führt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) Luftporenbetonen mit vergleichbaren bis hin zu verbesserten mechanischen und dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften wie mit klassischen Luftporenbildnern (z. B. auf Basis von Wurzelharz) hergestellt werden können.

Literatur

- [1] Schröfl, C.; Erk, K. A.; Siriawatwechakul, W.; Wyrzykowski, M.; Snoeck, D. (2022) *Recent progress in superabsorbent polymers for concrete*. Cement and Concrete Research 151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106648>
- [2] Reinhardt, H. W.; Mönnig, S. (2008) *Ein Zusatzmittel zur Vergrößerung des Frost-Taumittelwiderstands von normal- und hochfestem Beton*. Beton-Werk International, S. 70–80.
- [3] Brüdern, A.-E.; Mechtcherine, V. (2010) *Multifunctional use of SAP in strain-hardening cement based composites*, in: *Proc. of Int. RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*. Lyngby (DK), pp. 11–22.
- [4] Laustsen, S.; Hasholt, M. T.; Jensen, O. M. (2015) *Void structure of concrete with superabsorbent polymers and its relation to frost resistance of concrete*. Materials and Structures 48, pp. 357–368.
- [5] Mechtcherine, V.; Schröfl, C.; Wyrzykowski, M.; Gorges, M.; et al. (2016) *Effect of superabsorbent polymers (SAP) on the freeze-thaw resistance of concrete: results of a RILEM interla-*

- boratory study*. *Materials and Structures* 50. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0868-7>
- [6] Mechtcherine, V.; Secrieru, E.; Schröfl, C. (2015) *Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars – Development of yield stress and plastic viscosity over time*. *Cement and Concrete Research* 67, pp. 52–65. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.003>
- [7] Secrieru, E.; Mechtcherine, V.; Schröfl, C.; Borin, D. (2016) *Rheological characterisation and prediction of pumpability of strain-hardening cement-based-composites (SHCC) with and without addition of superabsorbent polymers (SAP) at various temperatures*. *Construction and Building Materials* 112, pp. 581–594. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.161>
- [8] Liu, J.; Khayat, K. H.; Shi, C. (2020) *Effect of superabsorbent polymer characteristics on rheology of ultra-high performance concrete*. *Cement and Concrete Composites* 112, 103636. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103636>
- [9] Filho, R. D.; Silva, E. F.; Lopes, A. N.; Mechtcherine, V.; Dudziak, L. (2012) *Effect of superabsorbent polymers on the workability of concrete and mortar*. *Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction: State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP*. Springer, Dordrecht, pp. 39–50. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2733-5_5
- [10] ZTV-W 215 (2012) *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215)*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung Abteilung Wasserstraßen, Schifffahrt.
- [11] Alonso Junghanns, M. T.; Breitenbücher, R.; Günther, M.; Haist, M.; Haus, J. (2023) *Becken aus Beton in Entwässerungsanlagen nach ZTV-ING*. *Beton- und Stahlbetonbau* 118, H. 3, S. 192–200. <https://doi.org/10.1002/best.202200123>
- [12] Beushausen, H.; Gillmer, M.; Alexander, M. (2014) *The influence of superabsorbent polymers on strength and durability properties of blended cement mortars*. *Cement and Concrete Composites* 52, pp. 73–80. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.008>
- [13] Hasholt, M. T.; Jensen, O. M. (2015) *Chloride migration in concrete with superabsorbent polymers*. *Cement and Concrete Composites* 55, pp. 290–297. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.023>
- [14] Assmann, A. (2013) *Physical properties of concrete modified with superabsorbent polymers* [PhD-Thesis]. Universität Stuttgart. <https://doi.org/10.18419/opus-493>
- [15] Mechtcherine, V.; Gorges, M.; Scroefl, C.; Assmann, A. et al. (2013) *Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test*. *Materials and Structures* 47, pp. 541–562. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0078-5>
- [16] Liu, J.; Farzadnia, N.; Khayat, K. H.; Shi, C. (2021) *Effects of SAP characteristics on internal curing of UHPC matrix*. *Construction and Building Materials* 280, 122530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122530>
- [17] Shen, D.; Wang, T.; Chen, Y.; Wang, M.; Jiang, G. (2015) *Effect of internal curing with super absorbent polymers on the relative humidity of early-age concrete*. *Construction and Building Materials* 99, pp. 246–253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.042>
- [18] Snoeck, D.; Schaubroek, D.; Duburel, P.; De Belie, N. (2014) *Effect of high amounts of superabsorbent polymers and additional water on the workability, microstructure and strength of mortars with a water-to-cement ratio of 0.50*. *Construction and Building Materials* 72, pp. 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.012>
- [19] Schack, T.; Dittmar, S.; Schauerte, M.; Mazanec, O.; Haist, M. (2024) *Luftporenbeton mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) – Teil 1: Frischbetoneigenschaften*. *Beton- und Stahlbetonbau* 119, H. 7, S. 468–478. <https://doi.org/10.1002/best.202400011>
- [20] Schack, T.; Dittmar, S.; Schauerte, M.; Mazanec, O.; Haist, M. (2024) *Luftporenbeton mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) Teil 3: Robustheit gegenüber Schwankungen der Ausgangsstoffe und Umgebungsbedingungen*. *Beton- und Stahlbetonbau* 119. <https://doi.org/10.1002/best.202400036>
- [21] DIN EN 197-1:2011-11 (2011) *Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/1758792>
- [22] DIN EN 450:2012-10 (2012) *Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/1880870>
- [23] Deutsches Institut für Bautechnik [Hrsg.] (2023) *Betonzusatzmittel “MasterSphere 2000” aus superabsorbierenden Polymeren zur Herstellung von Luftporenbeton*. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.212.2223. Berlin: Beuth.
- [24] Snoeck, D.; Schroefl, C.; Mechtcherine, V. (2018) *Recommendation of RILEM TC 260-RSC: testing sorption by superabsorbent polymers (SAP) prior to implementation in cement-based materials*. *Materials and Structures* 51. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1375-4>
- [25] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton [Hrsg.] (2010) *Massige Bauteile aus Beton*. Berlin: Beuth.
- [26] DIN 1045-2:2008-09 (2008) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton*. Berlin: Beuth.
- [27] DIN EN 12390-3:2019-10 (2019) *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/3045735>
- [28] DIN EN 12390-13:2021-09 (2021) *Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/3240156>
- [29] DIN EN 12390-12:2020-04 (2020) *Prüfung von Festbeton – Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands von Beton – Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/3097537>
- [30] Bundesanstalt für Wasserbau [Hrsg.] (2012) *BAW Merkblatt Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL)*. Karlsruhe. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).
- [31] Bundesanstalt für Wasserbau [Hrsg.] (2012) *BAW Merkblatt Frostprüfung für Beton (MFB)*. Karlsruhe. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).
- [32] Verein Deutscher Zementwerke e.V. [Hrsg.] (2008) *CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton*. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik GmbH.
- [33] Schack, T.; Deiters, M. Neubaur, K.; Klemm-Albert, K.; Haist, M. (2023) *Roadmap zur klimaoptimierten Transportbetonherstellung – Quantifizierte Betrachtung von Handlungsoptionen zur Steigerung der Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz*. *Beton- und Stahlbetonbau* 118, H. 3. S. 148–166. <https://doi.org/10.1002/best.202200108>
- [34] Fédération internationale du béton (2010) *fib Model Code for Concrete Structures 2010 (MC2010)*.
- [35] DIN 1045-1:2023-08 (2023) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Planung, Bemessung und Konstruktion*. Berlin: Beuth.
- [36] Vollpracht, A.; Soutsos, M.; Kanavaris, F. (2018) *Strength development of GGBS and fly ash concretes and applicability of fib model code’s maturity function – A critical review*. *Construction and Building Materials* 162, pp. 830–84.

- [37] CEN/TR 16563:2014-04 (2014) *Principles of the equivalent durability procedure*. Berlin: Beuth.
- [38] SN 505262:2019-01 (2019) *Concrete Structures – Supplementary specifications*. Berlin: Beuth.
- [39] Cui, H.; Tang, W.; Liu, W.; Dong, Z.; Xing, F. (2015) *Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms*. Construction and Building Materials 93, pp. 522–527. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.007>
- [40] Leemann, A.; Moro, F. (2016) *Carbonation of concrete: the role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity*. Materials and Structures 50. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0917-2>
- [41] Müller, C. (2019) *DURAFOR – Forecast of durability properties of concrete with new clinker beased cements*. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 187 EN.
- [42] Otieno, M.; Beushausen, H.; Alexander, M. (2014) *Effect of chemical composition of slag on chloride penetration resistance of concrete*. Cement and Concrete Composites 46, pp. 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.003>
- [43] Leng, F.; Feng, N.; Lu, X. (2000) *An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete*. Cement and Concrete Research 30, pp. 989–992. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)-00250-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)-00250-7)
- [44] Stark, J.; Wicht, B. (2012) *Dauerhaftigkeit von Beton*. Springer-Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35278-2>
- [45] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [Hrsg.] (2023) *Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton*.
- [46] DIN EN 480-11:2005-12 (2005) *Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren – Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton*. Berlin: Beuth. <https://dx.doi.org/10.31030/9659523>

Autor:innen



Dr.-Ing. Tobias Schack (Korrespondenzautor:in)
t.schack@baustoff.uni-hannover.de
Leibniz Universität Hannover
Institut für Baustoffe
Appelstraße 9 A
30167 Hannover



Dr.-Ing. Oliver Mazanec
oliver.mazanec@masterbuilders.com
Master Builders Solutions Deutschland GmbH
Dr.-Albert-Frank-Straße 32
83308 Trostberg



Dipl.-Ing. Sebastian Dittmar
sebastian.dittmar@masterbuilders.com
Master Builders Solutions Deutschland GmbH
Ernst-Thälmann-Str. 9
39443 Staßfurt



Prof. Dr.-Ing. Michael Haist
haist@baustoff.uni-hannover.de
Leibniz Universität Hannover
Institut für Baustoffe
Appelstraße 9 A
30167 Hannover



Dr.-Ing. Matthias Schauerte
matthias.schauerte@masterbuilders.com
Master Builders Solutions Deutschland GmbH
Ernst-Thälmann-Str. 9
39443 Staßfurt

Zitieren Sie diesen Beitrag

Schack, T.; Dittmar, S.; Schauerte, M.; Mazanec, O.; Haist, M. (2024) *Luftporenbeton mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) Teil 2 – Festbetoneigenschaften*. Beton- und Stahlbetonbau 119, H. 9, S. 648–657. <https://doi.org/10.1002/best.202400012>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 04. März 2024; angenommen: 18. April 2024.