

# Luftporenbeton mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) Teil 1

## Frischbetoneigenschaften

Superabsorbierende Polymere (SAP) besitzen die Fähigkeit, ein Vielfaches ihres eigenen Trockengewichts an wässriger Lösung aufzunehmen und zu speichern. Entsprechend wird in der Literatur vielfach der Einsatz von SAP zur inneren Nachbehandlung von Beton beschrieben. Die SAP speichern Wasser und geben es während der Hydratation langsam ab. Infolge der Wasserabgabe schwinden die Polymere und es verbleiben entsprechende Luftporen im Betongefüge zurück. So stellen SAP gleichzeitig eine Alternative zu klassischen LP-Bildnern zur Steigerung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton dar. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden systematische Untersuchungen zur Herstellung von LP-Betonen mittels superabsorbierender Polymere als Alternative zu klassischen LP-Bildnern beschrieben und diskutiert. In Teil 1 des Beitrags wird der Einfluss der SAP auf die Frischbetoneigenschaften beschrieben. Der Fokus der experimentellen Untersuchungen lag dabei auf den resultierenden Veränderungen der rheologischen Eigenschaften sowie der Entmischungsneigung (Sedimentation der groben Gesteinskörnung und Neigung zur Wasserabsonderung) des Frischbetons bei Anwendung von superabsorbierenden Polymeren. In weiteren Teilen werden die Festbetoneigenschaften (Teil 2) sowie die Robustheit gegenüber stofflichen und umgebungsbedingten Schwankungen (Teil 3) der Betone mit SAP beschrieben und diskutiert.

**Stichworte** Superabsorbierende Polymere; Luftporenbeton; Frischbetoneigenschaften; rheologische Eigenschaften; Entmischungsneigung

## 1 Einleitung

Betonbauwerke oder -bauteile, die einem Frostangriff bzw. Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt sind, werden gemäß DIN 1045-2 [1] in die Expositionsklasse XF3 bzw. XF4 eingeordnet. Dabei ist zur Sicherstellung eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstands ein erhöhter, künstlich eingeführter Luftporengehalt mit räumlich gleichmäßig verteilten Luftporen ( $\varnothing \leq 300 \mu\text{m}$ ) im Festbetongefüge vorgeschrieben (XF4). Derartige Poren wirken im Beton zum einen als Expansionsraum für gefrierendes Wasser und – noch wichtiger – bewirken aufgrund ihrer spezifischen Größe eine Unterbrechung des Kapillartransports in solchen Betonen [2]. Klassische Anwendungsgebiete solcher Betone sind der Straßen- und der (Verkehrs-)Wasserbau. Im letzteren Bereich werden zudem vorzugsweise auch Betone entsprechend der Expositionsklasse XF3 mit künstlich eingeführten Luftporen

## Air entraining concrete with superabsorbent Polymers (SAP) – Part 1: fresh concrete properties

Superabsorbent polymers (SAP) have the ability to absorb many times their own dry weight in aqueous solution. In the literature, thus the usage of SAP for (internal) concrete curing has been described. SAP store water in fresh concrete and release it again during hydration. As a result of the water release, the polymers shrink and corresponding macropores remain in the microstructure. SAP thus offer the chance to be used as an alternative to classical air-void entraining agents for increasing the frost- and freeze-thaw resistance of concretes. The paper at hand describes and discusses systematic investigations on the application of superabsorbent polymers in air-entrained concrete as an alternative to classical air-entraining agents. In Part 1 of the article, the results of the experimental investigations regarding the fresh concrete properties are presented. The focus hereby was laid on studying the resulting changes in the rheological properties and the tendency to segregation (sedimentation of the coarse aggregate and bleeding tendency) of the fresh concrete when superabsorbent polymers are employed. Further parts describe the hardened concrete properties (Part 2) and the robustness against practical material and environmental fluctuations (Part 3) of concretes with SAP.

**Keywords** superabsorbent polymers; air entraining concrete; fresh concrete properties; rheological properties; segregation

verwendet [3]. Zur Erzeugung eines künstlichen Luftporensystems werden in der Regel chemische Zusatzmittel (LP-Bildner) auf Basis von natürlichen Harzen (Wurzelharze) oder synthetischen Alkylsulfaten bzw. -sulfonaten eingesetzt [4,5].

In der Vergangenheit sind bei der Herstellung von Luftporenbeton (LP-Beton) immer wieder Schwierigkeiten aufgetreten. Insbesondere stellt sich die prozesssichere Herstellung des angestrebten notwendigen, künstlich eingeführten Luftporengehalts im Frischbeton über einen vorgegebenen Zeitraum unter bestimmten baupraktischen Randbedingungen als Herausforderung dar. Schwankende Eigenschaften im Luftporengehalt können zum einen zu einer erhöhten Zurückweisung von Lieferungen, zum anderen zu mangelnden Betoneigenschaften im Bauteil führen. Die Einflüsse auf die Luftporenbildung und -stabilität sind vielfältig und resultieren sowohl

aus betontechnologischen, herstellungsbedingten als auch umgebungstechnischen Bedingungen [4–6]. Insbesondere mit Blick auf die immer weiter zunehmende Anzahl von Bindemittelkomponenten sowie Zusatzstoffen, aber auch anderen Zusatzmitteln wie Fließmitteln und Konsistenzhaltern können zahlreiche Wechselwirkungen erwartet werden, die es baupraktisch zu beherrschen gilt [7]. Darüber hinaus werden speziell im Wasserbau Betone mit sehr geringen Leimgehalten verwendet [3], was eine ziel-sichere Einstellung des künstlich eingeführten Luftporengehalts weiter erschwert [7]. Daher gilt es, zukünftig mögliche Systeme bzw. Stoffe einzusetzen, die robust gegenüber schwankenden Herstellbedingungen und Wechselwirkungen mit anderen Ausgangsstoffen reagieren und gleichzeitig eine ausreichende Dauerhaftigkeit der Betonbauwerke sicherstellen. Eine in der Vergangenheit untersuchte und im Markt etablierte Alternative gegenüber klassischen Luftporenbildnern sind Mikrohohlkugeln (MHK) [8]. Hinzu kommen nun superabsorbierende Polymere (SAP), die aus Sicht der Autoren einige sehr interessante Vorzüge gegenüber bestehenden Ansätzen und Lösungen aufweisen.

SAP verfügen über spezifische Eigenschaften, die eine Nutzung als multifunktionales pulverförmiges Betonzusatzmittel bei verschiedensten Anwendungsfällen im Betonbau ermöglichen. Bisher wurden SAP hauptsächlich im Hygiene- oder Medizinbereich eingesetzt, da sie die Fähigkeit besitzen, ein Vielfaches ihres eigenen Trockengewichts an wässriger Lösung aufzunehmen [9]. Die Absorptionskinetik von SAP wird hauptsächlich von der Ionenkonzentration und der Molekularstruktur der SAP selbst beeinflusst [10]. In der Betontechnologie war es bisher das Hauptziel, den Wasserhaushalt und die funktionelle Porengestaltung durch die Zugabe von SAP zu steuern [11, 12]. So wurden SAP für eine interne Nachbehandlung zur Reduktion des autogenen Schwindens von Hochleistungsbetonen oder Ultrahochfesten Betonen eingesetzt [13–15]. Die SAP speichern im Frischbeton Wasser und geben es während der Hydratation wieder ab, was eine innere Nachbehandlung bewirkt. Darüber hinaus wurden SAP u. a. zur Modifizierung der rheologischen Eigenschaften [16, 17] oder zur Selbstheilung von Rissen in Beton verwendet [18–20]. Wie bereits in der Einführung ausgeführt, ermöglicht die Zugabe von SAP auch eine gezielte funktionelle Gestaltung des Porengefüges im Skalenbereich  $> \text{ca. } 50 \mu\text{m}$ , was zur Steigerung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstands von Beton genutzt werden kann [21–23]. Nach der Wasserabgabe hinterlassen die SAP Hohlräume im Gefüge, die wie Luftporen wirken, die von Luftporenbildnern eingeführt wurden [23].

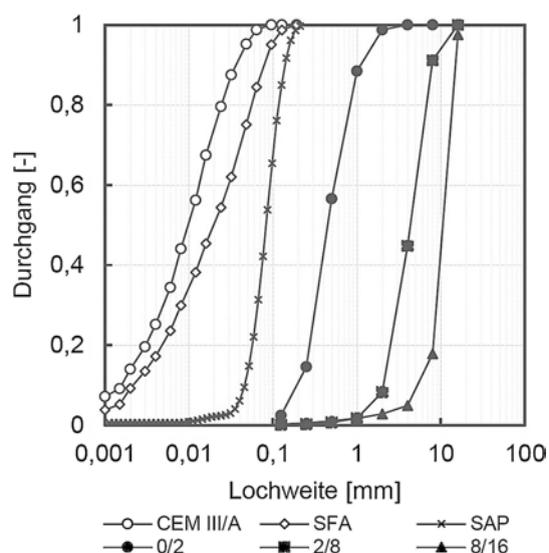
Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden systematische Untersuchungen zur Verwendung von superabsorbierenden Polymeren zur Herstellung von Luftporenbeton als Alternative zu klassischen LP-Bildnern beschrieben und diskutiert. Die untersuchten Betonzusammensetzungen sind dabei an Wasserbaubetonen angelehnt und im unteren Grenzbereich der DAfStb-Richtlinie „Massi-

ge Bauteile aus Beton“ [24] einzuordnen. Sie weisen demnach einen geringen Leimgehalt im Frischbeton von 252 bis  $2751/\text{m}^3$  auf. In Teil 1 des Beitrags werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften von Betonen unter Anwendung von SAP beschrieben und diskutiert. Als Referenz werden LP-Betone, die mit klassischen Luftporenbildnern auf Basis von Wurzelharz hergestellt wurden, herangezogen. Der Fokus der experimentellen Frischbetonuntersuchungen lag dabei auf den resultierenden Veränderungen der rheologischen Eigenschaften sowie der Entmischungsneigung (Sedimentation der groben Gesteinskörnung und Neigung zur Wasserabsonderung) des Frischbetons bei Anwendung von superabsorbierenden Polymeren. In weiteren Teilen werden die Festbetoneigenschaften (Teil 2, [25]) sowie die Robustheit gegenüber stofflichen und umgebungsbedingten Schwankungen (Teil 3, [26]) der Betone mit SAP beschrieben und diskutiert.

## 2 Untersuchungsmethodik

### 2.1 Ausgangsstoffe

Als Bindemittel wurde zur Herstellung aller Betone CEM III/A 42,5 N gemäß DIN EN 197-1 [27] sowie vereinzelt Steinkohlenflugasche gemäß DIN EN 450 [28] 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. Bild 1 zeigt die Korngrößenverteilungen der verwendeten Ausgangsstoffe. Zur Einstellung der Konsistenz kam ein Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (Master Suna SBS 6080, Master Builders Solutions Deutschland GmbH) zum Einsatz. Für die Referenzbetone wurde ein auf Wurzelharz basierender Luftporenbildner (MasterAir 125, Master Builders Solutions Deutschland GmbH) eingesetzt.



**Bild 1** Partikel- bzw. Korngrößenverteilungen der verwendeten Ausgangsstoffe  
Particle size distribution of the raw materials

Die verwendeten superabsorbierenden Polymere (MasterSphere 2000 [29], Master Builders Solutions Deutschland GmbH) bestanden aus Acrylamid, anionischen Monomeren und Vernetzer und wiesen eine runde Partikelform auf. Die Partikelgrößenverteilung der SAP im trockenen Zustand mit einer mittleren Partikelgröße ( $d_{50}$ ) von  $83 \pm 15 \mu\text{m}$  ist in Bild 1 dargestellt. Gemäß [29] beträgt das mit dem sog. „Teebeuteltest“ (Verfahrensbeschreibung vgl. [30]) in Filtratwasser (Filtrat einer Zementsuspension aus CEM1I 42,5 mit einem w/z-Wert von 5) ermittelte Absorptionsvermögen der SAP nach 10 min  $33 \pm 3 \text{ g/g}_{\text{SAP}}$  sowie nach 60 min  $39 \pm 3 \text{ g/g}_{\text{SAP}}$ .

## 2.2 Betonzusammensetzungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden Betone untersucht, deren Zusammensetzung sich an den Grenzwerten der Zusammensetzung gemäß der DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile“ [24] für die Expositionsklassen XF3 und XF4 orientierten. Um die Leistungsfähigkeit der SAP unter möglichst pessimalen Bedingungen bewerten zu können, wurden die Betone mit dem höchstzulässigen w/z-Wert (XF3  $\rightarrow$  0,55 bzw. XF4  $\rightarrow$  0,50) sowie dem Mindestzementgehalt (XF3 und XF4  $\rightarrow$   $300 \text{ kg/m}^3$ ) hergestellt und so möglichst kritische Szenarien sowohl für die Frostbeständigkeit (hoher w/z-Wert) und für die Verarbeitbarkeit (geringer Leimgehalt) betrachtet. Darüber hinaus wurden vereinzelte Betonzusammensetzungen mit Steinkohlenflugasche als Zusatzstoff untersucht. Dabei wurde die Möglichkeit genutzt, den Zementgehalt gemäß ZTV-W LB 215 [3] auf  $270 \text{ kg/m}^3$  für Betonzusammensetzungen der Expositionsklasse XF4 abzusenken.

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 [1] 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  $18 \text{ kg/m}^3$  Saugwasser (entspricht ca. 50 % des Absorptionsvermögens der SAP, vgl. Abschn. 2.1) hergestellt. Diese zusätzlich (zum Zugabewasser) zugege-

**Tab. 2** Volumenanteile und betontechnologische Parameter der Betonzusammensetzungen  
Volume fractions and concrete technological parameters of the concrete compositions

Bezeichnung	LG	$LG_{\text{tot}}$	$LG_{\text{eff}}$	w/z <sub>eq.</sub>	w/z <sub>ex.W.</sub>	w/z <sub>tot.</sub>	w/z <sub>eff.</sub>
	[l/m <sup>3</sup> ]			[-]			
XF3-LP	267	267	267	0,55	–	0,55	0,55
XF3-SAP	267	285	249	0,55	0,06	0,61	0,49
XF4-LP	252	252	252	0,50	–	0,50	0,50
XF4-SAP	252	270	234	0,50	0,06	0,56	0,44
XF4-LP-SFA	275	275	275	0,50	–	0,50	0,50
XF4-SAP-SFA	275	293	257	0,50	0,06	0,56	0,44

bene Wassermenge entspricht der maximal zulässigen Menge gemäß [29] und wurde weder auf den w/z-Wert angerechnet, noch bei der Stoffraumberechnung im Rahmen der Ermittlung des Gehalts der restlichen Ausgangsstoffe berücksichtigt. Durch Zugabe des beschriebenen Fließmittels wurde jeweils eine Konsistenz von  $45 \pm 3 \text{ cm}$  (F3) im Alter von 10 min nach Wasserzugabe eingestellt. Tab. 1 gibt einen Überblick über alle untersuchten Betonzusammensetzungen. Darüber hinaus zeigt Tab. 2 zusammenfassend die resultierenden volumetrischen Anteile des Bindemittelleims sowie ausgewählte betontechnologische Parameter. Unterschieden wird dabei zwischen dem normalen Leimgehalt (LG), dem totalen Leimgehalt ( $LG_{\text{tot}}$ ) und dem effektiven Leimgehalt ( $LG_{\text{eff}}$ ) entsprechend folgenden Gln. (1)–(4).

### Fall 1 – Beton ohne SAP (z. B. LP-Beton)

$$\begin{aligned}
 LG &= V_{\text{Bindemittel}} + V_{\text{Zugabewasser}} \\
 &+ V_{\text{GK} \leq 0,125\text{mm}} + V_{\text{Luftporen}} \\
 \rightarrow LG &= LG_{\text{tot.}} = LG_{\text{eff.}}
 \end{aligned} \quad (1)$$

### Fall 2 – Beton mit SAP

$$\begin{aligned}
 LG &= V_{\text{Bindemittel}} + V_{\text{Zugabewasser}} \\
 &+ V_{\text{GK} \leq 0,125\text{mm}} + V_{\text{Luftporen}}
 \end{aligned} \quad (2)$$

**Tab. 1** Betonzusammensetzungen  
Concrete composition

Bezeichnung	Zement	SFA	Wasser	GK	SAP	SAP-Saugwasser	LP	FM
	(kg/m <sup>3</sup> )							(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

$$\begin{aligned}
 LG_{\text{tot.}} &= V_{\text{Bindemittel}} + V_{\text{Zugabewasser}} \\
 &+ V_{\text{GK} \leq 0,125\text{mm}} + V_{\text{Luftporen}} \\
 &+ V_{\text{SAP-Saugwasser}}
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 LG_{\text{eff.}} &= V_{\text{Bindemittel}} + V_{\text{Zugabewasser}} \\
 &+ V_{\text{GK} \leq 0,125\text{mm}} + V_{\text{Luftporen}} \\
 &- V_{\text{SAP-Saugwasser}} \\
 &\rightarrow LG_{\text{eff.}} < LG < LG_{\text{tot.}}
 \end{aligned} \quad (4)$$

Die einzelnen sowie resultierenden Volumenanteile im Bindemittelleim für Betone ohne und mit superabsorbierenden Polymeren sind schematisch in Bild 2 dargestellt. Eine analoge Einteilung wurde ebenfalls für den  $w/z_{\text{eq.}}$ -Wert vorgenommen. Das zugegebene „Saugwasser“ von  $18 \text{ kg/kg}_{\text{SAP}}$  führt bei den SAP-Betonen theoretisch zu einem erhöhten totalen Leimgehalt ( $LG_{\text{tot.}}$ ). Da diese Wassermenge jedoch nur etwa 50 % des maximalen Absorptionsvermögens der SAP entspricht, wird von den Polymeren im Frischbeton auch „normales“ (aus der  $w/z$ -Wert-Berechnung resultierendes) Zugabewasser aufgenommen und somit der effektive  $w/z$ - bzw.  $w/z_{\text{eq.}}$ -Wert effektiv reduziert. Dementsprechend ist bei den SAP-Betonen ebenfalls ein reduzierter effektiver Leimgehalt ( $LG_{\text{eff.}}$ ) anzunehmen.

Alle Betone wurden in Chargen zu  $50 \text{ dm}^3$  in einem Labor-Tellermischer (Zyklus, Pemat Mischtechnik GmbH) mit einem maximalen Herstellvolumen von  $75 \text{ dm}^3$  unverdichtetem Beton gemischt. Die SAP wurden den trockenen Ausgangsstoffen (Gesteinskörnung und Bindemittelkomponenten) zugegeben und in einem ersten Schritt 30 s vorgemischt, um eine gleichmäßige Verteilung im Mischgut zu ermöglichen. Das SAP-Saugwasser wurde gemeinsam mit dem Anmachwasser dosiert. Für die Referenzbetone galt, dass die LP-Bildner gemeinsam mit dem Zuga-

bewasser zugegeben wurden. Das Fließmittel wurde jeweils im letzten Schritt des Mischvorgangs hinzugegeben.

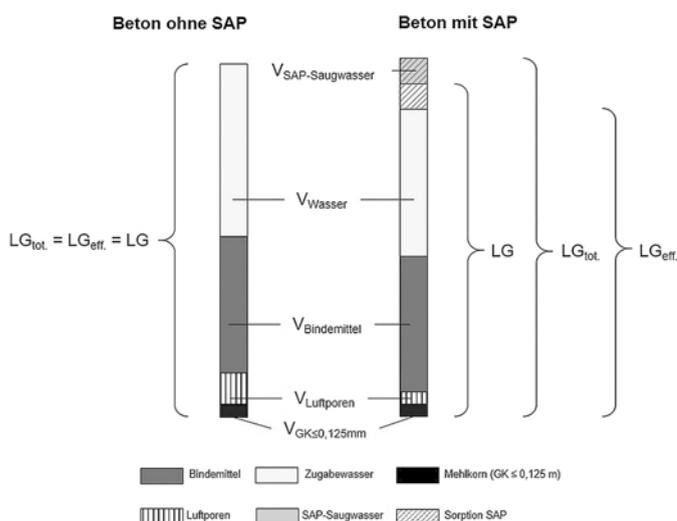
## 2.3 Untersuchungsmethoden

Die Konsistenz jedes Betons wurde 10 min nach Wasserzugabe mit dem Ausbreitmaß gemäß DIN EN 12350-5 [31] bestimmt. Zusätzlich wurden die rheologischen Eigenschaften des Betons 15 min nach der Wasserzugabe mit einem Rheometer (eBT-V, Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH) ermittelt. Details zum Messaufbau finden sich in [32]. Die Fließkurve wurde hinsichtlich der Bingham-Fließgrenze  $\tau_0$  und der plastischen Bingham-Viskosität  $\mu$  mittels linearer Regression im Bereich zwischen 0,03 rps und 0,42 rps und Umrechnung gemäß der Reiner-Riwlin-Gleichung [33,34] ausgewertet. Zur Bestimmung des Luftporengehalts im Frischbeton wurde das Druckausgleichsverfahren gemäß DIN EN 12350-7 [35] angewendet. Darüber hinaus wurde die Dichte des Frischbetons in diesem Prüfgefäß ( $5 \text{ dm}^3$ ) nach DIN EN 12350-6 [36] bestimmt.

Die Neigung zur Wasserabsonderung wurde nach dem in [37] beschriebenen Verfahren („Eimertest“) geprüft. Im Gegensatz zu dem in [37] beschriebenen Verfahren wurde das Prüfgefäß in zwei Lagen gefüllt und auf einem Rütteltisch mit einer konstanten Verdichtungsenergie von  $4500 \text{ U/min}$  für 15 s verdichtet, unabhängig von der Konsistenz des Frischbetons. In bestimmten Intervallen wurde das Wasser auf der Oberfläche des Frischbetons mit einer Pipette aufgefangen und die Masse ermittelt. Nach der Massenermittlung wurde das Wasser wieder auf die Frischbetonoberfläche zurückgegeben. Die erste Messung erfolgte 30 min nach dem Ende des Mischvorgangs und wurde in Abständen von 30 min wiederholt. Die Messung wurde beendet, nachdem keine Veränderung in der Wassermenge an der Oberfläche mehr verzeichnet werden konnte. Mittels der Frischbetondichte und der Probenmasse wurde die Menge des abgesonderten Wassers pro  $\text{m}^3$  berechnet.

Die Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung wurde am Frischbeton in Anlehnung an die in [38] beschriebene Methode bestimmt. Diese Methode basiert auf dem in der DAfStb-Richtlinie für selbstverdichtenden Beton [39] beschriebenen Verfahren (Auswaschversuch). Das Verfahren wurde für die Untersuchung von Rüttelbeton dahingehend angepasst, dass der Beton gezielt einer bestimmten Vibrationsbelastung ausgesetzt wurde, um möglicherweise auftretende Entmischungsprozesse zu beschleunigen [38]. Nachfolgend wird das eingesetzte Prüfverfahren kurz zusammengefasst. Eine detaillierte Beschreibung findet sich z. B. in [40].

Die Prüfvorrichtung besteht aus einem  $450 \text{ mm}$  hohen Zylinder mit einem Durchmesser von  $150 \text{ mm}$  und kann in drei gleich hohe Segmente ( $h_i = 150 \text{ mm}$ ) unterteilt werden. In einem ersten Schritt wird die Segmentschichtung möglichst hohlraumfrei und ohne Verdichtung voll-



**Bild 2** Volumenanteile im Bindemittelleim und resultierende Leimgehalte für Betone ohne und mit superabsorbierenden Polymeren  
Volume distribution in the binder paste and resulting paste contents for concretes without and with superabsorbent polymers

ständig bis zur Oberkante mit Frischbeton befüllt. Anschließend wird die Schalung auf einem Rütteltisch bei einer Frequenz von 4500 U/min und einer Amplitude von 0,25 mm für eine Dauer von 30 s verdichtet. Die Probe wird dann mit einer Metalltrennplatte in drei Segmente getrennt, die Frischbetonmasse in jedem Segment ermittelt, der Frischbeton über ein 11,2-mm-Sieb ausgewaschen und der Anteil der groben Gesteinskörnung größer als 11,2 mm aufgefangen. Die Masse der Gesteinskörnung größer 11,2 mm wird bei mattsfeuchter Oberfläche bestimmt. Zur Beurteilung der Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung werden folgende Kennwerte ermittelt (vgl. Gln. (5)–(7)).

$$m_{1,\text{korr.}} = \frac{m_1}{1 - \frac{a}{150}} \quad (5)$$

$$\bar{m} = \frac{1}{3} \cdot (m_{1,\text{korr.}} + m_2 + m_3) \quad (6)$$

$$\Delta m_i = \left| \left( \frac{m_i}{\bar{m}} - 1 \right) \right| \cdot 100 \quad (7)$$

Die Masse im oberen Segment wird um die Setzung des Frischbetons infolge der Verdichtung korrigiert, indem der Abstand  $a$  der Frischbetonoberfläche nach der Verdichtung zur Oberkante der Schalung in die Berechnung einfließt ( $m_{1,\text{korr.}}$ ). In einem weiteren Schritt wird die mittlere Masse der groben Gesteinskörnung in den Segmenten ( $m$ ) aus der korrigierten Masse des oberen Segments ( $m_{1,\text{korr.}}$ ) und den Massen der beiden übrigen Segmente ( $m_2$  und  $m_3$ ) berechnet. Die Entmischungsneigung kann als prozentuale Abweichung des Grobkornanteils  $\Delta m_i$  im Segment  $i$  vom durchschnittlichen Grobkornanteil berechnet werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird die prozentuale Abweichung des Grobkornanteils im oberen Segment  $\Delta m_{\text{oben}}$  zur Bewertung der Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung herangezogen.

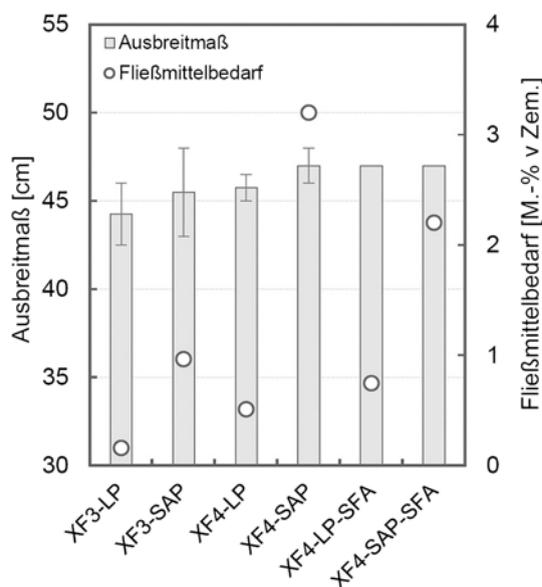
### 3 Experimentelle Untersuchungsergebnisse

#### 3.1 Allgemeines

Jede Betonzusammensetzung wurde mindestens einmal hergestellt und mit den in Abschn. 2.4 beschriebenen Untersuchungsmethoden geprüft. Ausgewählte Betonzusammensetzungen wurden dreimal hergestellt und geprüft. Für diese Betone sind nachfolgend der Mittelwert und die Streuung der Werte als doppelte Standardabweichung für jede Eigenschaft dargestellt.

#### 3.2 Konsistenz und Fließmittelbedarf

Bild 3 zeigt die Konsistenz im Alter von 10 min nach Wasserzugabe aller untersuchten Betonzusammensetzungen. Alle Betone wurden durch Fließmittelzugabe auf ein Ausgangsausbreitmaß von  $45 \pm 3$  cm (F3) eingestellt.

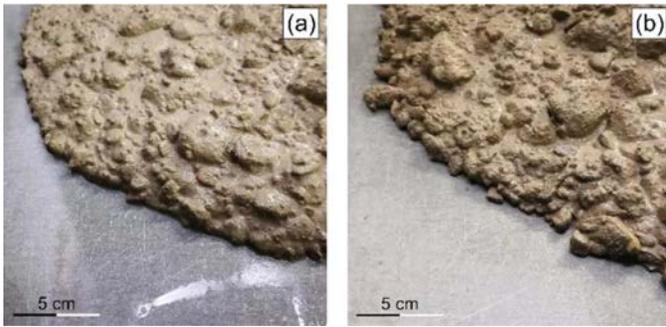


**Bild 3** Konsistenz und Fließmittelbedarf zur Einstellung einer Ausbreitmaßes von  $45 \pm 3$  cm aller untersuchten Betone  
Consistency and superplasticizer demand for a flow diameter of  $45 \pm 3$  cm of all concretes investigated

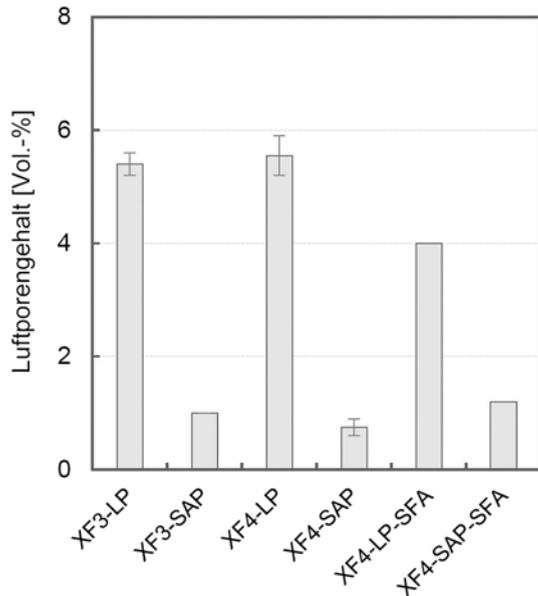
Auffällig ist der deutlich erhöhte Fließmittelbedarf zur Einstellung der Zielkonsistenz bei Verwendung von SAP gegenüber klassischen LP-Betonen. So steigt der Fließmittelbedarf bei Verwendung von SAP bei den Betonen mit SFA von 0,75 M.-% v. Zem. (XF4-LP-SFA) auf 2,20 M.-% v. Zem. (XF4-SAP-SFA) an. Bei dem Beton XF4-SAP ist mit 3,20 M.-% v. Zem. eine sehr hohe Fließmittelmenge zur Einstellung der Konsistenz von 47,0 cm erforderlich. Der Beton XF4-LP mit Luftporenbildner benötigt dagegen für eine vergleichbare Konsistenz von 46,0 cm nur 0,50 M.-% v. Zem. an Fließmittel. Zurückzuführen ist dieser hohe Fließmittelbedarf nach Ansicht der Autoren vor allem auf die Wasseraufnahme der SAP und den daraus resultierenden verringerten effektiven w/z-Wert (vgl. Tab. 2). Weiterhin ist der Leimgehalt mit  $2521/\text{m}^3$  bei diesem Beton (XF4-SAP) sehr gering, der bei Anwendung von SAP infolge des Wassersaugens effektiv noch geringer ausfällt ( $LG_{\text{eff.}} = 2341/\text{m}^3$ ). Auffälligkeiten wie z. B. Entmischungserscheinungen (z. B. ein Leimrand) konnten im ausgebreiteten Frischbeton im Rahmen der Ausbreitmaßprüfung nicht festgestellt werden. Trotz der hohen Fließmittelgehalte zeigten die Betone mit SAP ein vergleichbares Erscheinungsbild gegenüber den Betonen mit Luftporenbildner (Bild 4).

#### 3.3 Luftporengehalt und Frischbetonrohddichte

Gemäß DIN 1045-2 [1] darf der mittlere Luftporengehalt im Frischbeton (XF3 oder XF4) unmittelbar vor dem Einbau bei einem Größtkorn von 32 mm einen Wert von 4,0 Vol.-% nicht unterschreiten. Bild 5 zeigt die Luftporengehalte im Frischbeton aller untersuchten Betone. Der Mindestluftporengehalt gemäß DIN 1045-2 ist bei allen Betonen mit klassischem Luftporenbildner eingehalten, wobei der Beton XF4-LP-SFA genau den Grenzwert von 4,0 Vol.-% aufweist. Die Betone mit SAP weisen deutlich geringere LP-Gehalte im Frischbeton in einem Bereich



**Bild 4** Visuelles Erscheinungsbild der Frischbetonoberfläche nach der Ausbreitmaßprüfung – (a) XF3-LP; (b) XF3-SAP  
Visual appearance of the fresh concrete surface at the flow table test – (a) XF3-LP; (b) XF3-SAP



**Bild 5** Luftporengehalt im Frischbeton aller untersuchten Betone  
Air void content in fresh concrete of all concretes investigated

von 0,80 Vol.-% bis 1,4 Vol.-%, vergleichbar mit Normalbeton ohne Zugabe von LP-Bildner, auf. Zurückzuführen ist dies auf die Absorption von Wasser, welches von den SAP im Frischbeton aufgenommen und zurückgehalten wird. Erst im Festbeton bilden sich Luftporen aufgrund der Wasserabgabe und des resultierenden Schwindvorgangs der ursprünglich gequollenen SAP. Ein zunehmender SAP-Gehalt führt zu einem höheren Gesamtvolumen an Luftporen im Festbeton [23,41]. Zu dem in Bild 5 dargestellten Luftporengehalt im Frischbeton kommt im Festbeton demnach noch das Volumen der Luftporen infolge der SAP hinzu (auf den Luftporengehalt im Festbeton wird im Teil 2 dieses Beitrags näher eingegangen).

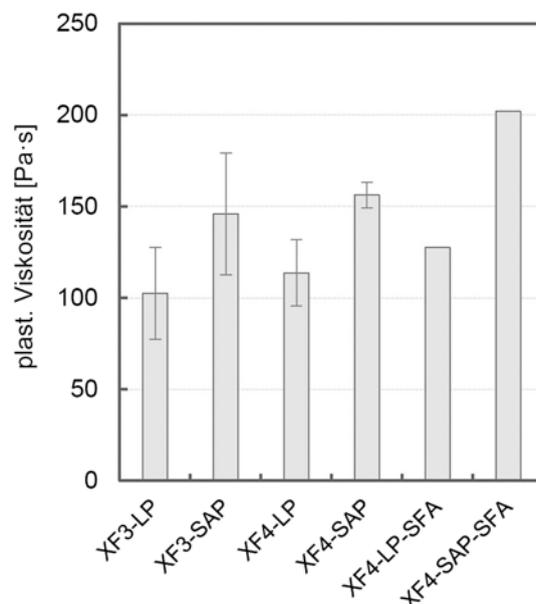
Die Frischbetonrohichte der untersuchten Betone liegt zwischen  $2280 \text{ kg/m}^3$  und  $2370 \text{ kg/m}^3$ . Erwartungsgemäß weisen die Betone mit SAP eine etwas höhere Frischbetonrohichte auf als die untersuchten LP-Betone. Dies ist auf die bereits zuvor beschriebene Wasseraufnahme der SAP und den resultierenden geringeren Luftporengehalt im Frischbetonstadium zurückzuführen.

### 3.4 Rheologische Eigenschaften

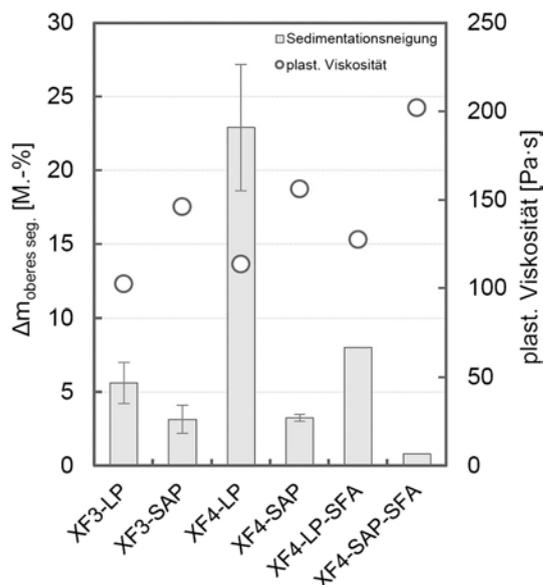
Bild 6 zeigt die Werte der plastischen Viskosität  $\mu$  für alle untersuchten Betonzusammensetzungen. Die Messwerte der Referenzbetone mit Luftporenbildner variieren in einem Bereich von 103 Pa (XF4-LP) bis 128 Pa (XF4-LP-SFA). Im Rahmen dieses Beitrags sollen nicht primär die absoluten Werte der einzelnen Betone betrachtet werden, sondern vielmehr der Einfluss der SAP auf die Entwicklung der plastischen Viskosität im Vergleich zu den Betonen mit Luftporenbildner. Unabhängig von der Betonzusammensetzung zeigen alle Betone mit SAP gegenüber dem jeweiligen (Referenz-)LP-Beton eine deutlich höhere plastische Viskosität. So steigt die plastische Viskosität bei den Betonen der Expositionsklasse XF4 bei der Verwendung von SAP um 37 % (XF4-SAP) bzw. um 58 % (XF4-SAP-SFA) gegenüber den LP-Betonen an. Der Beton XF3-SAP weist eine vergleichbare Steigerung um 42 % auf. Zurückzuführen ist die Veränderung der plastischen Viskosität insbesondere auf die Wasseraufnahme der SAP und die daraus resultierenden veränderten Volumenanteile des Leimgehalts (vgl. Bild 2). Da nur  $18 \text{ kg/kg}_{\text{SAP}}$  als Saugwasser den Betonen hinzugegeben wurden (dies entspricht 50 % der max. Sorptionskapazität der verwendeten SAP), ist der resultierende effektive Leimgehalt ( $LG_{\text{eff}}$ ) im Frischbeton bei den SAP-Betonen reduziert, was zu einem Anstieg der plastischen Viskosität führt. Darüber hinaus können SAP ein oberflächenaktives Verhalten aufweisen bzw. als eine Art stabilisierender Zusatzstoff wirken, was sich auf die rheologischen Eigenschaften auswirkt [12].

### 3.5 Sedimentation der groben Gesteinskörnung

Bild 7 zeigt sowohl die ermittelte Sedimentation der groben Gesteinskörnung als auch die plastische Viskosität (vgl. Abschn. 3.4) aller untersuchten Betone. Die Sedi-



**Bild 6** Plastische Viskosität des Frischbetons aller untersuchten Betone  
Plastic viscosity of fresh concrete of all concretes investigated

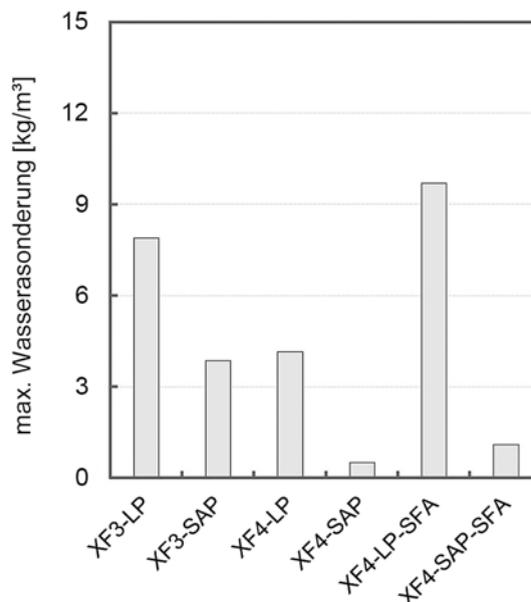


**Bild 7** Sedimentation der groben Gesteinskörnung – prozentuale Abweichung des Grobkornanteils im oberen Segment ( $\Delta m_{\text{oben}}$ ) – aller untersuchten Betone  
Sedimentation of coarse aggregate – percentage deviation of the coarse aggregate content in the upper segment ( $\Delta m_{\text{up}}$ ) – of all concretes investigated

mentationsneigung der groben Gesteinskörnung wurde am Frischbeton in Anlehnung an die in [38] beschriebene Methode bestimmt. Als Bewertungsmerkmal wurde die prozentuale Abweichung des Grobkornanteils im oberen Segment ( $\Delta m_{\text{oben}}$ ) zur Bewertung der Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung herangezogen. Bei Verwendung von SAP zeigen alle Betonzusammensetzungen einen geringeren Wert für  $\Delta m_{\text{oben}}$  und demnach eine höhere Sedimentationsstabilität im Vergleich zu vergleichbaren, klassischen LP-Betonen. So sinkt  $\Delta m_{\text{oben}}$  bei dem Beton mit einem  $w/z_{\text{eq}}$ -Wert von 0,55 von 5,6 M.-% bei dem LP-Beton (XF3-LP) auf 3,2 M.-% beim vergleichbaren Beton mit SAP (XF3-SAP). Der LP-Beton XF4-LP zeigt mit 22,9 M.-% für  $\Delta m_{\text{oben}}$  eine sehr starke Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung. Dagegen ist die Betonzusammensetzung mit SAP (XF4-SAP) mit  $\Delta m_{\text{oben}} = 3,3$  M.-% sehr stabil gegenüber Sedimentation der groben Gesteinskörnung.

### 3.6 Neigung zur Wasserabsonderung

Die Neigung zur Wasserabsonderung wurde nach dem in [37] beschriebenen Verfahren („Eimertest“) geprüft. In den nachfolgenden Ausführungen wird nur die maximal abgesonderte Wassermenge (max. Wasserabsonderung) zur Auswertung herangezogen, unabhängig vom Zeitpunkt, wann die max. Wassermenge erreicht wird, und unabhängig vom zeitlichen Verlauf. Bild 8 zeigt die Werte der maximalen Wasserabsonderung für alle untersuchten Betone. Grundsätzlich kann bei allen Betonen mit SAP eine geringere maximale abgesonderte Wassermenge gegenüber den LP-Betonen beobachtet werden. So reduziert sich die maximale Wassermenge bei dem Beton mit einem  $w/z_{\text{eq}}$ -Wert von 0,55 von  $8,1 \text{ kg/m}^3$  bei dem LP-Beton (XF3-LP) auf  $3,9 \text{ kg/m}^3$  beim vergleichbaren Beton

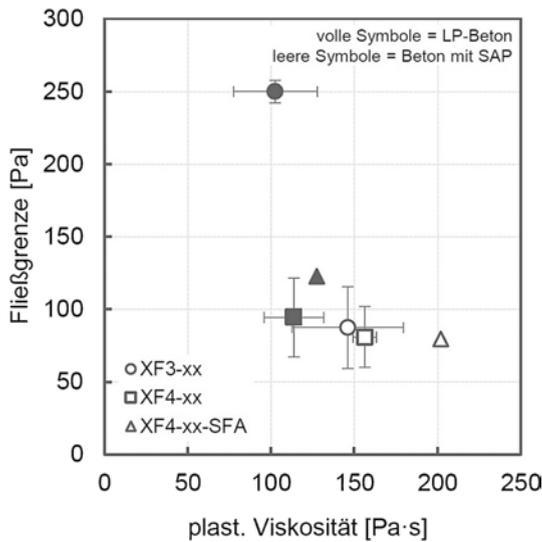


**Bild 8** Maximale Wasserabsonderung des Frischbetons aller untersuchten Betone  
Maximum water separation of fresh concrete of all concretes investigated

mit SAP (XF3-SAP). Die Betone mit einem  $w/z_{\text{eq}}$ -Wert von 0,50 weisen bei Anwendung von SAP nur eine geringfügige Wasserabsonderung bei den durchgeführten Untersuchungen auf. So weist der Beton XF4-SAP eine maximale abgesonderte Wassermenge von  $0,5 \text{ kg/m}^3$  und der Beton XF4-SAP-SFA eine maximale abgesonderte Wassermenge von  $1,1 \text{ kg/m}^3$  auf. Die vergleichbaren LP-Betone zeigen dagegen maximale Werte der Wasserabsonderung von  $4,2 \text{ kg/m}^3$  (XF-LP) und  $9,7 \text{ kg/m}^3$  (XF3-LP-SFA). Die verringerte Neigung der Wasserabsonderung bei Anwendung von SAP ist nach Auffassung der Autoren primär auf die Wasseraufnahme dieser zurückzuführen. Die SAP absorbieren im Frischbeton eine gewisse Menge Wasser (vgl. Abschn. 2.1) und halten dieses im Frischbeton zurück. Der effektive Wassergehalt bzw. effektive  $w/z$ -Wert ist demnach bei diesen SAP-Betonen reduziert, sodass sowohl ein geringerer effektiver Leimgehalt als auch effektiver Wassergehalt im Frischbeton vorhanden ist (vgl. Bild 2). So wurden bei der Anwendung der SAP zwar  $18 \text{ kg/kg}_{\text{SAP}}$  zusätzliches Wasser (ohne Anrechnung auf den  $w/z_{\text{eq}}$ -Wert, vgl. Tab. 1) hinzugefügt, effektiv ist im Frischbeton jedoch ein um etwa  $18 \text{ l/m}^3$  reduzierter Wassergehalt vorhanden.

## 4 Diskussion

Bild 9 zeigt zusammenfassend den Einfluss von SAP auf die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons gegenüber vergleichbaren Betonen, die mit klassischen Luftporenbildnern hergestellt wurden. Die Fließgrenze ist als Funktion der plastischen Viskosität für alle untersuchten Betonzusammensetzungen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die SAP sowohl die Fließgrenze als auch die plastische Viskosität beeinflussen. Die beobachtete Reduktion der Fließgrenze bei den Betonen mit SAP ist vor allem auf den erhöhten Fließmittelgehalt bei diesen Betonen



**Bild 9** Rheograph – Fließgrenze als Funktion der plastischen Viskosität aller untersuchten Betonzusammensetzungen  
 Rheograph – yield stress as a function of plastic viscosity of all concrete compositions investigated

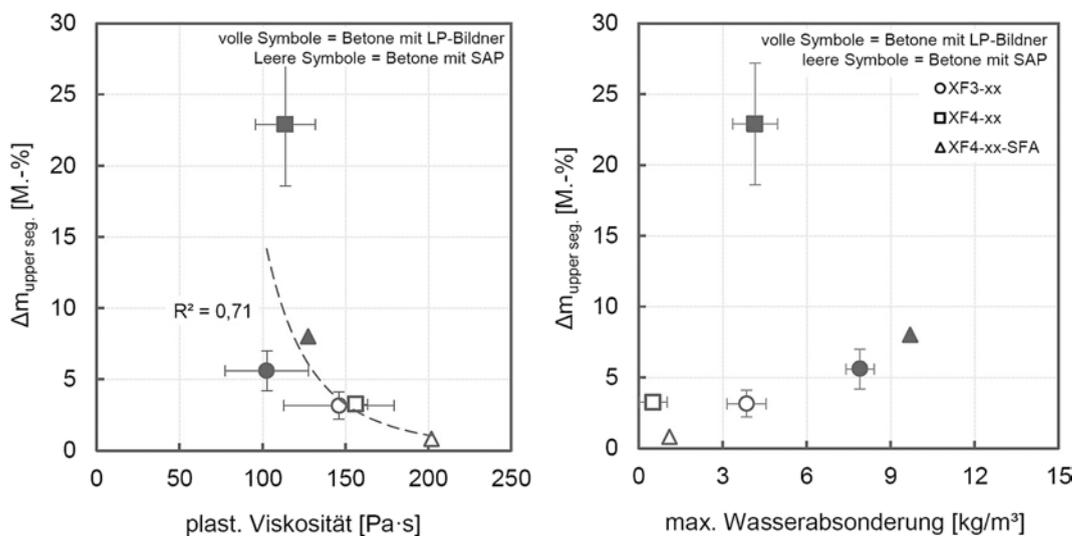
zurückzuführen (vgl. Bild 3). Darüber hinaus ist die in Abschn. 3.4 beschriebene Erhöhung der plastischen Viskosität bei Anwendung von SAP deutlich erkennbar. Die Zugabe von superabsorbierenden Polymeren und die resultierende Wasseraufnahme verändern die Frischbetoneigenschaften, insbesondere die rheologischen Eigenschaften. Diese Frischbetone weisen eine erhöhte plastische Viskosität bzw. Zähigkeit gegenüber vergleichbaren Betonen mit klassischen Luftporenbildnern auf. Diese veränderten Eigenschaften wirken sich auch auf die Entmischungsneigung der Frischbetone aus. So zeigt Bild 10 (links) die Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung ( $\Delta m_{\text{oben}}$ ) in Abhängigkeit von der plastischen Viskosität. Es ist ein Zusammenhang erkennbar, dass die erhöhte Viskosität der SAP-Betone zu deutlich geringeren Werten der Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung gegenüber den vergleichbaren LP-Betonen bei identischer Verdichtungseinwirkung führt. Die

ermittelten Luftporengehalte im Frischbeton (vgl. Bild 5 in Abschn. 3.3) lassen darauf schließen, dass die angewendete Verdichtungsenergie bei den SAP-Betonen zur Entlüftung ausreichend ist. Demzufolge kann den SAP-Betonen ein deutlich erhöhter Sedimentationswiderstand der groben Gesteinskörnung bei Verdichtungseinwirkung zugeordnet werden.

Zur Bewertung der Entmischungsneigung des Frischbetons ist in Bild 10 (rechts) eine Gegenüberstellung der ermittelten Indikatoren – Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung und maximale Wasserabsonderung – dargestellt. Die Wirkung der SAP auf die ermittelten Indikatoren bzw. die Entmischungsneigung ist deutlich ersichtlich. Sowohl die Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung als auch die Neigung zur Wasserabsonderung ist gegenüber den LP-Betonen deutlich reduziert. Neben der erhöhten plastischen Viskosität, die die Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung der SAP-Betone positiv beeinflusst, wirkt sich die Wasseraufnahme positiv auf die Neigung zur Wasserabsonderung der hier untersuchten SAP-Betone aus. Die maximalen Werte von  $\Delta m_{\text{oben,max.}} = 3,3 \text{ M.-%}$  (XF4-SAP) sowie  $WA_{\text{max.}} = 3,9 \text{ kg/m}^3$  (XF3-SAP) deuten im Rahmen dieser Untersuchungen auf sehr stabile Frischbetone bei Anwendung von superabsorbierenden Polymeren hin.

## 5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden systematische Untersuchungen zum Einfluss superabsorbierender Polymere auf die Frischbetoneigenschaften von Wasserbau- und Massenbetonen mit geringen Leimgehalten vorgestellt und mit Betonen, die mit klassischen Luftporenbildnern bei nahezu vergleichbarer sonstiger Zusammensetzung hergestellt wurden, verglichen. Die untersuchten Betonzusammensetzungen wurden dabei im Grenzbereich der DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile aus Beton“ ge-



**Bild 10** Bewertung der Entmischungsindikatoren; links: Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung in Abhängigkeit von der plastischen Viskosität; rechts: Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung in Abhängigkeit von der maximalen Wasserabsonderung  
 Evaluation of the segregation indicators; left: segregation tendency of coarse aggregate as a function of plastic viscosity; right: segregation tendency of coarse aggregate as a function of maximum water separation amount

wählt. Im hier vorliegenden Teil 1 des Beitrags wurden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften vorgestellt. Die Zugabe von superabsorbierenden Polymeren bewirkt eine Veränderung der Frischbetoneigenschaften gegenüber vergleichbaren Frischbetonen mit Luftporenbildner. Diese Veränderungen resultieren insbesondere aus dem Einfluss des Saugverhaltens der SAP und den daraus resultierenden Veränderungen im rheologisch wirksamen Wassergehalt der Betone. Die Wasseraufnahme der SAP führt sowohl zu einem veränderten effektiven Leimgehalt ( $LG_{\text{eff}}$ ) als auch einem veränderten effektiven  $w/z$ -Wert ( $w/z_{\text{eff}}$ ) im Frischbeton. Im Rahmen der Untersuchungen wurde den SAP-Betonen zur Kompensation des Saugverhaltens der SAP jeweils  $18 \text{ kg/kg}_{\text{SAP}}$  Wasser ohne Anrechnung auf den  $w/z_{\text{eq}}$ -Wert zugegeben (dies entspricht ca. 50M.-% der max. Sorptionskapazität der verwendeten SAP [29]). Die daraus resultierenden Veränderungen der Frischbetoneigenschaften im Vergleich zu klassischen LP-Betonen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Zur Einstellung der Fließfähigkeit ist bei Betonen mit SAP gegenüber vergleichbaren LP-Betonen ein signifikant erhöhter Fließmittelbedarf notwendig.
- Die plastische Viskosität des Frischbetons steigt bei Anwendung von SAP gegenüber vergleichbaren LP-Betonen deutlich an.

- Die Verwendung von SAP führt zu stabileren Frischbetonen gegenüber vergleichbaren LP-Betonen. Sowohl die Sedimentationsneigung der groben Gesteinskörnung als auch die Neigung zur Wasserabsonderung ist gegenüber vergleichbaren LP-Betonen deutlich reduziert.

Die Veränderungen der Frischbetoneigenschaften bei Verwendung von SAP beeinflussen die Betonherstellung sowie insbesondere den Betoneinbau bzw. die Betonverarbeitung auf unterschiedliche Weise. So wirken sich die verringerte Neigung zur Wasserabsonderung sowie der erhöhte Sedimentationswiderstand der groben Gesteinskörnung positiv auf die Homogenität des Betons im Bauteil aus. Demgegenüber muss beachtet werden, dass die erhöhte plastische Viskosität bzw. erhöhte Zähigkeit dieser Frischbetone ggf. Veränderungen beim Betoneinbau bedingen und z. B. ein erhöhter Eintrag von Verdichtungsenergie zur Entlüftung des Frischbetons notwendig wird. Darüber hinaus gilt es betonspezifisch zu prüfen, wie sich z. B. der erhöhte Fließmittelbedarf auf die Robustheit der Frischbetone sowohl ggü. Schwankungen der Ausgangsstoffe (z. B. Sand- oder Zementcharge) als auch ggü. Schwankungen in den Umgebungsbedingungen (z. B. Temperatur) auswirken. Auf die Auswirkungen einzelner Schwankungen wird in Teil 3 dieses Beitrags näher eingegangen.

## Literatur

- [1] DIN 1045-2:2023-08 (2023) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton*. Berlin: Beuth.
- [2] Stark, J.; Wicht, B. (2012) *Dauerhaftigkeit von Beton*. Wiesbaden: Springer-Vieweg.
- [3] 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.
- [4] Eickschen, E. (2009) *Wirkungsmechanismen Luftporen bildender Betonzusatzmittel und deren Nachaktivierungspotenzial* [Dissertation]. Schriftenreihe der Zementindustrie.
- [5] Eickschen, E.; Müller, C. (2013) *Luftporenbildung in Labor und Praxis*. beton 12, S. 511–520.
- [6] Feldrappe, V.; Ehrenberg, A. (2020) *Luftporenbeton mit hütensandhaltigen Zementen*. Report des FEHS-Instituts 2/2010. S. 13–17.
- [7] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. [Hrsg.] (2020) *Sachstandbericht Frischbeton – Eigenschaften, Einflüsse und Prüfungen*. Berlin: Beuth.
- [8] Bundesanstalt für Wasserbau [Hrsg.] (2010) *Untersuchungen zum Einsatz von Mikrohohlkugeln in Beton als Alternative zum Luftporenbeton*. FuE-Abschlussbericht A39510370002. Karlsruhe.
- [9] Venkatachalam, D.; Kaliappa, S. (2021) *Superabsorbent polymers: a state-of-art review on their classification, synthesis, physicochemical properties, and applications*. Reviews in Chemical Engineering.
- [10] Schröfl, C.; Mechtcherine, V.; Gorges, M. (2012) *Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage*. Cement and Concrete Research 42, S. 865–873.
- [11] Mechtcherine, V.; Wyrzykowski, M.; Schröfl, C. et al. (2021) *Application of super absorbent polymers (SAP) in concrete construction – update of RILEM state-of-the-art report*. Materials and Structures 54.
- [12] Schröfl, C.; Erk, K. A.; Siriawatwechakul, W.; Wyrzykowski, M.; Snoeck, D. (2022) *Recent progress in superabsorbent polymers for concrete*. Cement and Concrete Research 151.
- [13] Ma, X.; Yuan, Q.; Liu, J.; Shi, C. (2019) *Effect of water absorption of SAP on the rheological properties of cement-based materials with ultra-low w/b ratio*. Construction and Building Materials 195, S. 66–74.
- [14] Shan, 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.
- [15] 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.
- [16] Mechtcherine, V.; Secieru, 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 76, pp. 52–65.
- [17] 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*. in: *Application of Super Absorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction: State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP*. Springer. pp. 39–50.
- [18] Beushausen, H.; Gillmer, M. (2014) *The use of superabsorbent polymers to reduce cracking of bonded mortar overlays*. Cement and Concrete Composites 52, pp. 1–8.

- [19] Snoeck, D.; Tittelboom, K. V.; Steuperaert, S.; de Belie, N. (2014) *Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers*. Journal of Intelligent Material Systems 25, pp. 13.24.
- [20] Kim, J. S.; Schlangen, E. (2010) *Super absorbent polymers to stimulate self healing in ECC*. In: *Proceedings 2nd International Symposium on Service Life Design for Infrastructures (SLD2010)*. Delft, Netherlands.
- [21] Reinhardt, H. W.; Mönnig, S. (2008) *Ein Zusatzmittel zur Vergrößerung des Frost-Taumittelwiderstands von normal- und hochfestem Beton*. Beton-Werk International, S. 70–80.
- [22] Brüdern, A.-E.; Mechtcherine, V. (2010) *Multifunctional use of SAP in strain-hardening cement based composites*. in: Jensen, O. M.; Hasholt, M. T.; Laustsen, S. [eds.] *Proceedings of Int. RILEM Conference on Use of Superabsorbent Polymers and Other New Additives in Concrete*. Lyngby, Denmark. S. 11–22.
- [23] 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, S. 357–368.
- [24] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton [Hrsg.] (2010) *Massige Bauteile aus Beton*. Berlin: Beuth.
- [25] Schack, T.; Dittmar, S.; Schauerte, M.; Mazanec, O.; Haist, M. (2024) *Luftporenbeton mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) – Teil 2: Festbetoneigenschaften*. Beton- und Stahlbetonbau 119. <https://doi.org/10.1002/best.202400012>
- [26] 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, im Review. <https://doi.org/10.1002/best.202400036>
- [27] DIN EN 197-1:2011-11 (2011) *Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*. Berlin: Beuth.
- [28] DIN EN 450:2012-10 (2012) *Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien*. Berlin: Beuth.
- [29] Deutsches Institut für Bautechnik [Hrsg.] (2023) *Betonzusatzmittel “MasterSphere 2000” aus superabsorbierenden Polymeren zur Herstellung von Luftporenbeton*. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.212.2223. Berlin.
- [30] 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.
- [31] DIN EN 12350-5:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß*. Berlin: Beuth.
- [32] Greim, M.; Keller, H. (2017) *eBT-V – A new rheometer for fresh concrete*. Proceedings to Rheology of Building Materials. Regensburg.
- [33] Haist, M.; Link, J.; Nicia, D.; Leinitz, S. et al. (2020) *Interlaboratory study on rheological properties of cement pastes and reference substances: comparability of measurements performed with different rheometers and measurement geometries*. Materials and Structures.
- [34] Feys, D.; Wallevik, J. E.; Yahia, A.; Khayat, K. H.; Wallevik, O. H. (2013) *Extension of the Reiner–Riwlin equation to determine modified Bingham parameters measured in coaxial cylinders rheometers*. Materials and Structures 46, pp. 289–311.
- [35] DIN EN 12350-7:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren*. Berlin: Beuth.
- [36] DIN EN 12350-6:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte*. Berlin: Beuth.
- [37] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V. [Hrsg.] (2014) *Merkblatt – Besondere Verfahren zur Prüfung von Frischbeton*. Berlin: Beuth.
- [38] Bundesanstalt für Wasserbau [Hrsg.] (2019) *Entmischungssensibilität von Beton (MESB)*. Karlsruhe.
- [39] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton [Hrsg.] (2012) *Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie)*. Berlin: Beuth.
- [40] Haist, M.; Breitenbücher, R. (2021) *Beurteilung der Sedimentationsstabilität von Frischbeton*. Gemeinsamer Abschlussbericht zur Phase 2 des Forschungsvorhabens S 019/DBV 318.
- [41] Snoeck, D.; Schaubroeck, D.; Dubruel, 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.

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



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



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



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

**Zitieren Sie diesen Beitrag**

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>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.  
Eingereicht: 29. Februar 2024; angenommen: 18. April 2024.

# 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 multifunctional 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. Schleusenammerwände [10] oder Regenrückhaltebecken [11], neben dem Frost- und Frost-Tausalz-Angriff (XF) weiteren dauerhaftigkeitsrelevanten Expositionen ausgesetzt, wie z. B. der CO<sub>2</sub>-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  $18 \text{ kg/m}^3$  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 <sup>3</sup> )						(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 CO<sub>2</sub>-induzierter Karbonatisierung wurde mit dem beschleunigten Prüfverfahren gemäß DIN EN 12390-12 [29] untersucht. Hierfür wurden Probekörper mit den Abmessungen 100×100×100 mm<sup>3</sup> 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 CO<sub>2</sub>-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 mm<sup>3</sup> 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 mm<sup>3</sup> 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 mm<sup>3</sup> 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

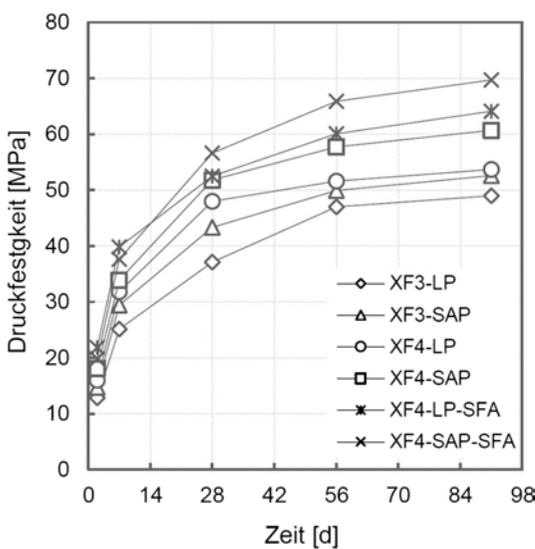
Die Frischbetoneigenschaften der untersuchten Betonzusammensetzungen sind detailliert in Teil 1 dieses Beitrags [19] beschrieben. Zur Übersicht sind die maßgeblichen Frischbetoneigenschaften zusammenfassend in Tab. 2 dargestellt. Demnach sind alle untersuchten Betone der Konsistenzklasse F3 zuzuordnen. 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

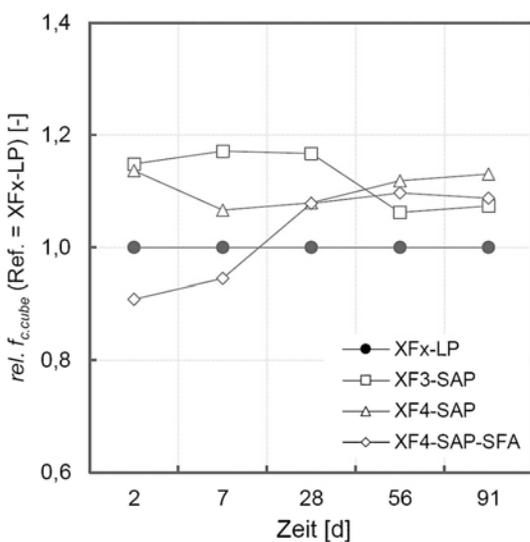
Bezeichnung	Ausbreitmaß [cm]	LP-Gehalt [Vol.-%]	Rohdichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	plast. Viskosität [Pa·s]
XF3-LP	44,5	5,4	2280	103
XF3-SAP	45,5	0,9	2360	146
XF4-LP	46,0	5,6	2300	114
XF4-SAP	47,0	0,8	2380	156
XF4-LP-SFA	47,0	4,0	2320	128
XF4-SAP-SFA	47,0	1,2	2370	201

### 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



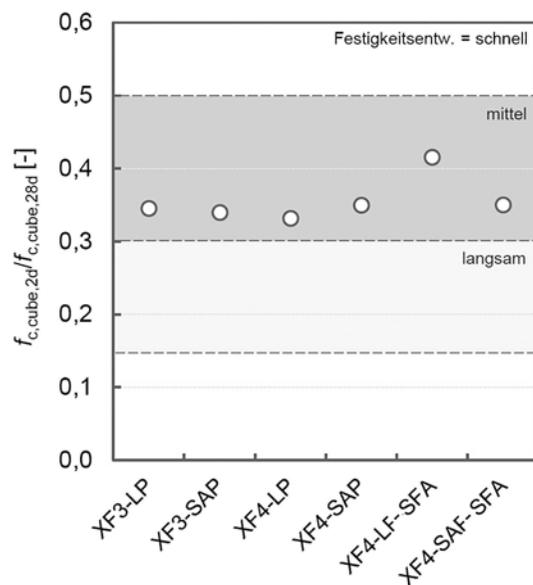
**Bild 2** Normierte Druckfestigkeit (rel.  $f_{c,cube}$ ) für die Betonzusammensetzungen mit SAP, bezogen auf die jeweilige korrespondierende LP-Betonzusammensetzung  
Standardized compressive strength (rel.  $f_{c,cube}$ ) for the concrete compositions with SAP in relation to the corresponding concrete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

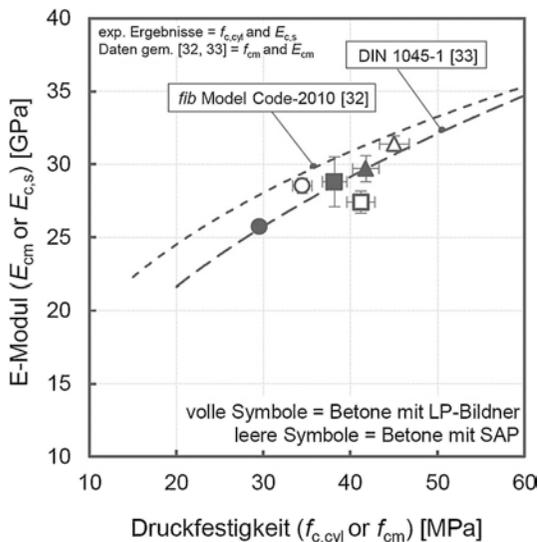
Die Druckfestigkeitsentwicklung der Betone kann in Bild 3 bewertet werden. Dort ist das Verhältnis der 2-d-Festigkeit zur 28-d-Festigkeit ( $f_{c,cube,2d}/f_{c,cube,28d}$  – entspricht dem r-Wert gemäß [26]) dargestellt. Die Druckfestigkeitsentwicklung ( $f_{c,cube,2d}/f_{c,cube,28d}$ ) ist bei allen 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 28 d 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].

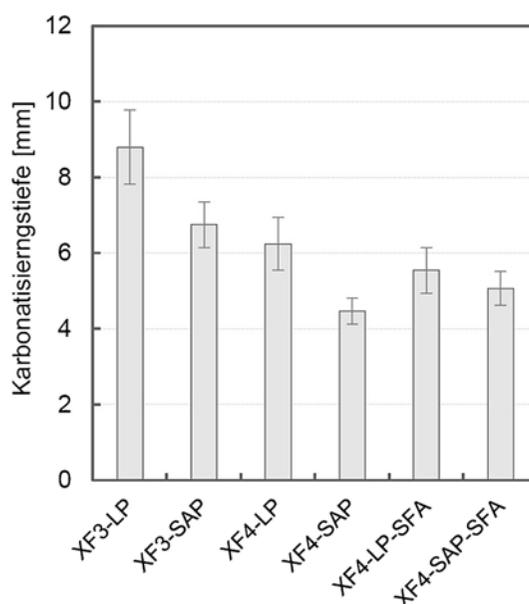
Die Werte der Elastizitätsmoduln liegen in einem vergleichbaren Wertebereich von 25,7 GPa (XF3-LP) bis 31,4 GPa (XF3-SAP-SFA), unabhängig von der Betonzusammensetzung und auch vom Zusatzmitteltyp (LP oder SAP). Der Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit den modellbasierten Werten gemäß fib 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 28 d ermittelt wurden. Insbesondere bei Betonen mit Hochofenzementen (hier: CEM III/A) ist nach 28 d noch mit einem signifikanten Anstieg sowohl der Druckfestigkeit als auch des Elastizitätsmoduls infolge des Nacherhärtungspotenzials des Hüttensands zu rechnen [36].

### 3.4 Karbonatisierungswiderstand

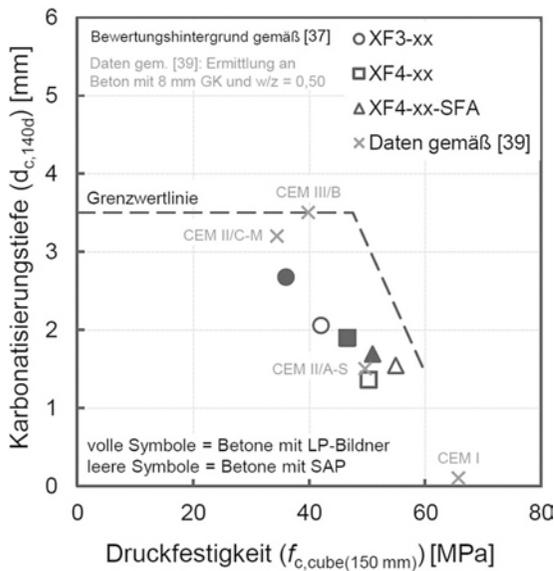
Zur Prüfung und Bewertung des Karbonatisierungswiderstands wurde das beschleunigte Prüfverfahren gemäß DIN EN 12390-12 [29] angewendet. Die nach 28 d Lage-

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 140 d ( $d_{c,140d}$  – 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 (8 mm, 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.



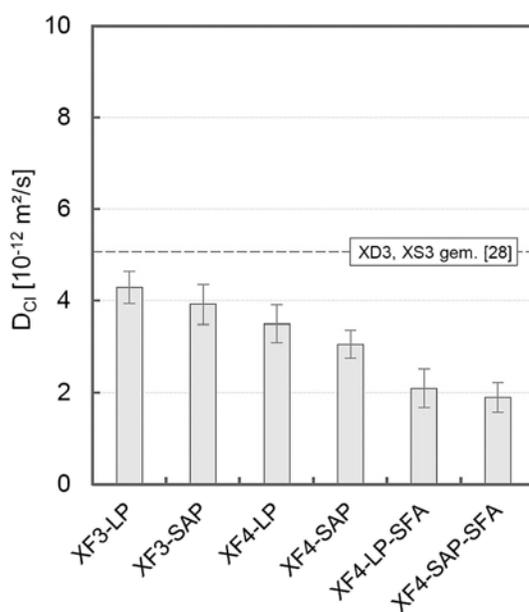
**Bild 5** Karbonatisierungstiefe aller untersuchten Betone (ermittelt mit dem Schnellprüfverfahren gemäß DIN EN 12390-12 [29])  
 Depth of carbonation of all concrete compositions investigated (determined using the rapid test method acc. to DIN EN 12390-12 [29])



**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 Abstands faktor  $L$  ( $\leq 0,24 \text{ mm}$  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  $1,5 \text{ Vol.-%}$  bzw.  $1,8 \text{ Vol.-%}$  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  $4,3 \text{ Vol.-%}$  gegenüber dem Beton XF-SAP mit  $2,8 \text{ Vol.-%}$  dar. Dabei muss berücksichtigt werden, dass ein Wert von  $4,3 \text{ Vol.-%}$  für den Mikro-Luftporengehalt als sehr hoch einzustufen ist.

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

**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

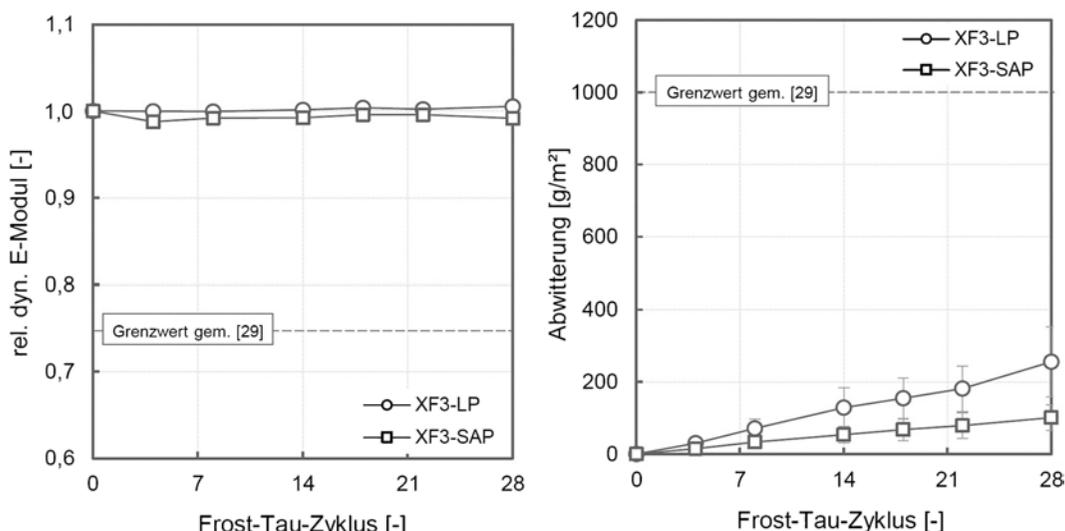
im Festbeton. Die Subtraktion des im Frischbeton ermittelten Luftporengehalts (vgl. Tab. 2) vom im Festbeton ermittelten Gesamt-Luftporengehalt  $A$  bestätigt die maximale Sorptionskapazität und die resultierende Porenbildung im Festbeton. Für die SAP-Betone ergeben sich so geringfügig erhöhte Porengehalte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

### 3.7 Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

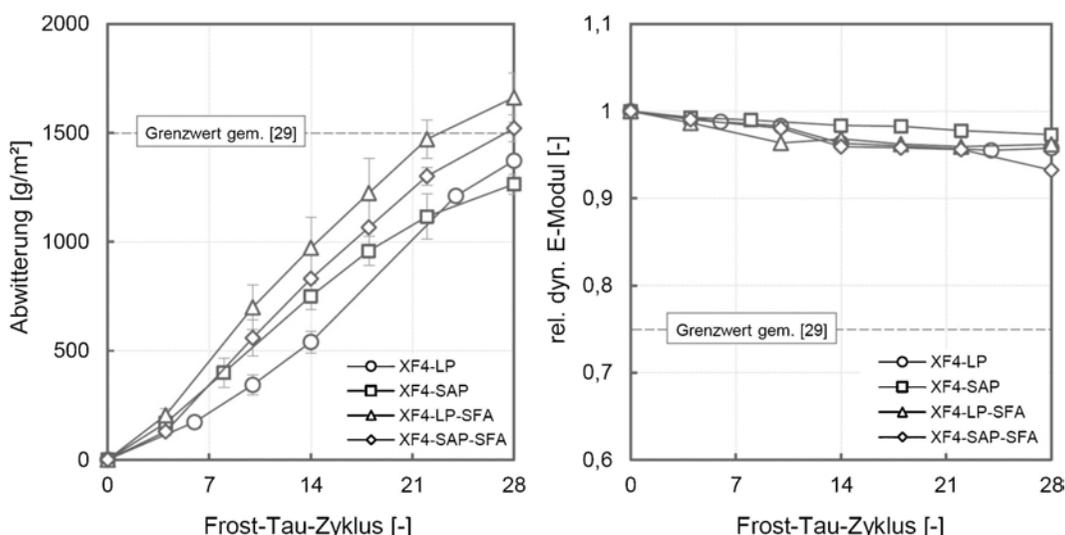
Zur Beurteilung des Frost-Widerstands wurde der CIF-Test für die Betone der Expositionsklasse XF3 und der CDF-Test für die Betone der Expositionsklasse XF4 gemäß [31] durchgeführt. Als maßgebendes Bewertungskriterium wurde beim CIF-Test der relative dynamische E-Modul und beim CDF-Test die Abwitterungsmenge an der Oberfläche gemäß [31] herangezogen. Es zeigt sich, dass die untersuchten Betone mit  $w/z$ -Wert von 0,55 gemäß der Expositionsklasse 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/m<sup>2</sup> (XF3-LP) bzw. 101 g/m<sup>2</sup> (XF3-SAP) nach 28 Frost-Tau-Zyklen (Bild 8, rechts).

Die Untersuchungsergebnisse des CDF-Tests zeigen, dass alle Betone entsprechend Expositionsklasse XF4 ein relativ hohes Maß an Abwitterung aufweisen (Bild 9, links). Nach 28 Frost-Tau-Zyklen weisen die Betone XF4-LP (1362 g/m<sup>2</sup>) und XF4-SAP (1265 g/m<sup>2</sup>) vergleichbare Werte der Abwitterung knapp unterhalb des Grenzwerts gemäß [31] von 1500 g/m<sup>2</sup> 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)

leicht erhöhte Werte der Abwitterung oberhalb des Grenzwerts von  $1500 \text{ g/m}^2$  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 ( $m_{w,zus.} = 50\%$  des Absorptionsvermögens der SAP [23]) geringfügig höher als bei vergleichbaren Luftporenbetonen mit klassischem LP-Bildner. Die Festigkeitsentwicklung ( $f_{c,cube,2d}/f_{c,cube,28d}$ ) 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) Luftporenbetone 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.; Siritwatwechakul, 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.; Mönning, S. (2008) *Ein Zusatzmittel zur Vergrößerung des Frost-Taumittelwiderstands von normal- und hochfestem Beton*. Beton-Werk International, S. 70–80.
- [3] Brüderl, 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](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.; Schaubroeck, 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) *BAWMerkblatt Chlorideindringwiderstand von Beton (MCL)*. Karlsruhe. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).
- [31] Bundesanstalt für Wasserbau [Hrsg.] (2012) *BAWMerkblatt 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> concentration, relative humidity and CO<sub>2</sub> 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) *Merckblatt 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.

# Luftporenbeton mit superabsorbierenden Polymeren (SAP)

## Teil 3: Robustheit gegenüber Schwankungen der Ausgangsstoffe und Umgebungsbedingungen

Die prozesssichere Einführung des angestrebten notwendigen künstlich eingeführten Luftporengehalts im Frischbeton stellt unter bestimmten baupraktischen Randbedingungen eine große Herausforderung dar. Schwankende Eigenschaften im Luftporengehalt können zu einer erhöhten Zurückweisung von Lieferungen und zu mangelnden Betoneigenschaften im Bauteil führen. Die Einflüsse auf die Luftporenbildung und -stabilität sind vielfältig und resultieren aus betontechnologischen, herstellungsbedingten und umgebungstechnischen Bedingungen. Die Robustheit gegenüber baupraktischen Schwankungen von superabsorbierenden Polymeren (SAP) zur Einführung eines künstlichen Luftporensystems in den Festbeton ist bisher noch recht unbekannt. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden aufbauend auf den vorangegangenen Teilen 1 (Frischbetoneigenschaften) und 2 (Festbetoneigenschaften) systematische Untersuchungen zur Robustheit von LP-Betonen sowohl mit superabsorbierenden Polymeren als auch klassischem LP-Bildner gegenüber Schwankungen der Ausgangsstoffe (Zement und feine Gesteinskörnung) und der Umgebungsbedingungen (Temperatur) beschrieben und diskutiert. Die experimentellen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass superabsorbierende Polymere (SAP) im Beton sehr robust gegenüber solchen baupraktischen Einflüssen hinsichtlich der Einführung künstlicher Luftporen und des resultierenden Frost-Widerstands reagieren.

**Stichworte** Superabsorbierende Polymere; Frischbetoneigenschaften; Festbetoneigenschaften; Robustheit; Schwankungen

### 1 Einleitung

Mit der gezielten Einführung von künstlichen Luftporen wird insbesondere der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand von Betonbauwerken bzw. -bauteilen erhöht. Derartige Poren wirken im Beton zum einen als Expansionsraum für gefrierendes Wasser und – noch wichtiger – bewirken aufgrund ihrer spezifischen Größe eine Unterbrechung des Kapillartransports in solchen Betonen [1]. Bei der Anwendung von klassischen Luftporenbildnern, z. B. auf Basis von Wurzelharzen, sind die Einflüsse auf die Luftporenbildung und -stabilität sehr vielfältig und resultieren sowohl aus betontechnologischen, herstellungsbedingten als auch Umgebungsbedingungen [2–4].

Eine ungünstige Wirkung auf die Luftporenbildung von klassischen LP-Bildnern im Frischbeton besitzen beispielsweise erhöhte Frischbetontemperaturen [2,5]. Zurückzuführen ist dies u. a. auf die sinkende Oberflächen-

### Air entraining concrete with superabsorbent polymers (SAP) – Part 3: robustness to fluctuations in raw materials and ambient conditions

The production of the required artificially introduced air void content in fresh concrete poses a major challenge under certain practical construction conditions. Fluctuating properties in the air void content can lead to increased rejection of deliveries as well as to poor concrete properties. The influences on air void formation and stability are manifold and result from concrete technology, production-related and environmental conditions. The robustness of superabsorbent polymers (SAP) against practical variations for the introduction of an artificial air void system into hardened concrete is still relatively unknown. Building on the previous parts 1 (fresh concrete properties) and 2 (hardened concrete properties), this article describes and discusses systematic investigations into the robustness of LP concretes with both superabsorbent polymers and classic LP formers to fluctuations in the starting materials or ambient conditions (temperature). The experimental results show that superabsorbent polymers (SAP) in concrete react very robustly to such practical construction influences with regard to the introduction of artificial air voids and the resulting frost resistance.

**Keywords** superabsorbent polymers; fresh concrete properties; hardened concrete properties; robustness; fluctuations

spannung tensidhaltiger Flüssigkeiten mit erhöhter Temperatur [6]. Systematische Untersuchungen an Frischbetonen zeigen, dass für einen vergleichbaren Luftporengehalt bei einem Anstieg der Frischbetontemperatur von 10°C auf 30°C eine um den Faktor drei erhöhte Dosierung des LP-Bildners nötig war [4]. Demnach können insbesondere tageszeitliche Temperaturänderungen eine prozesssichere Beherrschbarkeit der Eigenschaften von LP-Betonen unter baupraktischen Randbedingungen erschweren. Veränderungen der Ausgangsstoffe oder der Betonzusammensetzung können ebenfalls die Einführung und Stabilität von künstlich eingeführten Luftporen bei Verwendung klassischer LP-Bildner beeinflussen. So beeinflusst u. a. der Mehlkorngel ( $<0,125\text{ mm}$ ) die Stabilität der künstlich eingeführten Luftporen, sodass hohe Mehlkorngelhalte bei gleichbleibender Dosierung des LP-Bildners tendenziell zu einem geringeren Luftporengehalt führen [7]. Außerdem kann sich ein hoher Feinmörtelanteil ( $<0,25\text{ mm}$ ) negativ auf die Wirkung

von klassischem LP-Bildner auswirken, da die für die Einlagerung von Mikro-Luftporen ( $\leq 300 \mu\text{m}$ ) notwendigen Zwischenräume fehlen [8]. Weitere Ausgangsstoffe bzw. Veränderungen der Ausgangsstoffe wie z. B. der Zement oder Zusatzstoffe können ebenfalls zu Wechselwirkungen mit dem LP-Bildner führen. Eine detaillierte Zusammenfassung möglicher stofflicher sowie umgebungs- und verfahrenstechnischer Einflüsse auf die Bildung und Stabilität künstlicher Luftporen im Frischbeton ist u. a. in [8] gegeben.

Die Robustheit gegenüber Schwankungen der Ausgangsstoffe oder den Umgebungsbedingungen von superabsorbierenden Polymeren (SAP) zur Einführung eines künstlichen Luftporensystems in den Festbeton und somit zur Sicherstellung eines ausreichenden Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands ist bisher weitestgehend noch unbekannt. Vereinzelt Untersuchungen in der Literatur berücksichtigten einen möglichen Temperatureinfluss auf die Absorptionskapazität von SAP in Beton. So wurden in [9] Untersuchungen zum Aufnahmeverhalten von SAP bei 10, 20 und 30 °C durchgeführt und die Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften und die Pumpfähigkeit von zementbasierten Verbundkompositen (Strain-hardening cement-based-composites (SHCC)) untersucht [9]. Dabei führte die Zugabe von SAP insbesondere zu einer Erhöhung der plastischen Viskosität unabhängig von der Temperatur. Eine veränderte Absorptionskapazität in Abhängigkeit von der Temperatur konnte bei den verwendeten SAP nicht festgestellt werden.

Im Rahmen dieses Beitrags werden systematische Untersuchungen zum Einfluss von Schwankungen der Ausgangsstoffe oder der Umgebungsbedingungen (Temperatur) auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften von Luftporenbetonen sowohl mit klassischem LP-Bildner als auch SAP beschrieben und diskutiert. Die Untersuchungen bauen auf den bereits in den Teilen 1 und 2 dieses Beitrags vorgestellten Untersuchungen auf. Es wurden systematische Schwankungen der Ausgangsstoffe (Zement und feine Gesteinskörnung) sowie der Umgebungsbedingungen (Temperatur) simuliert und die resultierende Robustheit der Frisch- und Festbetoneigenschaften ermittelt. Der Fokus der Untersuchungen lag dabei auf dem künstlich eingeführten Luftporengehalt sowie dem Frost-Widerstand der Betone.

## 2 Untersuchungsmethodik

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die im Teil 1 (Frischbeton) und Teil 2 (Festbeton) dieses Beitrags beschriebenen Betonzusammensetzungen entsprechend der Expositionsklasse XF3 hinsichtlich der Robustheit gegenüber praxisnahen Schwankungen der Ausgangsstoffe (Zement und feine Gesteinskörnung) sowie der Umgebungsbedingungen (Temperatur) auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften untersucht. Da sich schwankende Temperaturbedingungen der Umgebung direkt auf die Temperaturen der Ausgangsstoffe und demnach auch

auf die Frischbetontemperatur auswirken, wurde dieser Parameter im Rahmen der Untersuchungen systematisch variiert.

### 2.1 Ausgangsstoffe

Als Bindemittel wurden drei Zemente der gleichen Art (CEM III/A 42,5 N nach DIN EN 197-1 [10]) aus verschiedenen Herstellwerken eingesetzt. Tab. 1 zeigt zusammenfassend einzelne physikalische charakteristische Kennwerte der Zemente. Auf eine detaillierte Beschreibung der mineralogischen Zusammensetzung der einzelnen Zemente wird hier verzichtet, da der Fokus der Untersuchungen auf den resultierenden Eigenschaften der Betone bei Zugabe von LP-Bildner oder SAP lag. Veränderungen in der Zusammensetzung des Klinkers oder des Gehaltes an Sulfat können aber aufgrund der unterschiedlichen Produktionsstandorte sicher angenommen werden. Die Gesteinskörnung bestand aus natürlichem rundem Flusskies (Weser) mit einem Größtkorn von 32 mm und einer Korngrößenverteilung entsprechend der Sieblinie A/B 32. Als feine Gesteinskörnung wurden drei verschiedene Sande (Weser, Elbe, Rhein) verwendet. Die Korngrößenverteilungen der unterschiedlichen Sande sind in Bild 1 gezeigt. Tab. 2 gibt zudem einen Überblick über charakteristische physikalische Kennwer-

Tab. 1 Charakteristische Kennwerte der unterschiedlichen Zemente  
Characteristic values of different cements

Bezeichnung	Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	$d_{10}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$d_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	spez. Oberfläche [cm <sup>2</sup> /g]
Zement I	3,039	1,6	9,8	3870
Zement II	3,046	1,5	6,8	3990
Zement III	3,028	1,6	10,2	3580

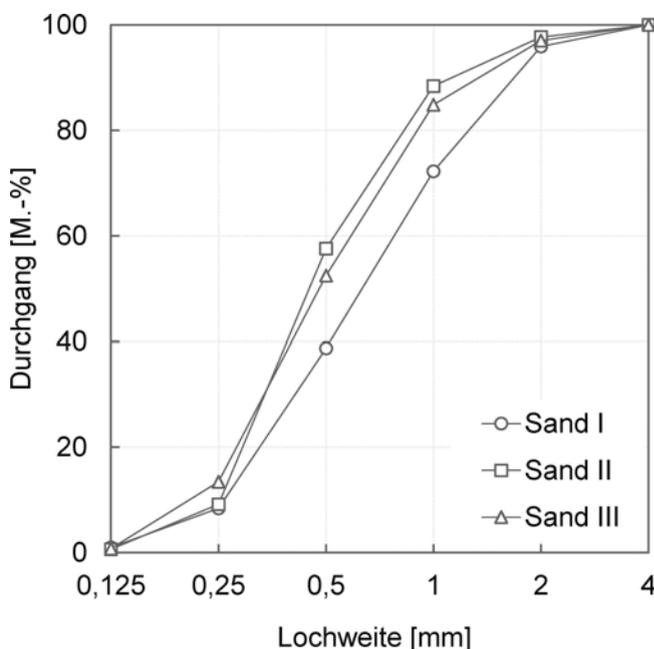


Bild 1 Korngrößenverteilungen der unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen (0/2)  
Grain size distribution of different fine aggregates (0/2)

**Tab. 2** Charakteristische Kennwerte der unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen (0/2)  
Characteristic values of different fine aggregates (0/2)

Bezeichnung	< 0,125 mm	< 0,25 mm	0,25–1,0 mm
	[M.-%]		
Sand I	1,0	8,4	63,8
Sand II	0,6	9,1	79,3
Sand III	0,8	13,4	76,0

te der unterschiedlichen Sande. Für die klassischen Luftporenbetone wurde ein auf Wurzelharz basierender Luftporenbildner (MasterAir 125, Master Builders Solutions Deutschland GmbH) eingesetzt. Darüber hinaus wurden superabsorbierende Polymere (MasterSphere 2000 [11], Master Builders Solutions Deutschland GmbH) mit einer runden Partikelform eingesetzt. Das mit dem „Teebeuteltest“ (Verfahrensbeschreibung siehe [12]) 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  $39 \pm 3 \text{ g/g}_{\text{SAP}}$  [11].

## 2.2 Betonzusammensetzungen

Die in diesem Beitrag untersuchten Betonzusammensetzungen orientieren sich an den unteren Grenzwerten der DAfStb-Richtlinie „Massige Bauteile“ [13] für die Expositionsklasse XF3. Jeder Beton wurde sowohl mit klassischem LP-Bildner als auch mit SAP hergestellt. Für die Referenzmischung wurde der LP-Gehalt so gewählt, dass ein Mindestluftporengehalt von 4,0 Vol.-% nach DIN 1045-2 [14] 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  $18 \text{ kg/m}^3$  Saugwasser (entspricht ca. 50 % des Absorptionsvermögens der SAP, vgl. Abschn. 2.1) festgelegt. Diese zusätzlich (zum Zugabewasser) zugegebene Wassermenge entspricht der maximal zulässigen Menge nach [11] und wurde weder auf den w/z-Wert angerechnet noch bei der Stoffraumberechnung im Rahmen der Ermittlung des Gehalts der restlichen Ausgangsstoffe berücksichtigt. Die Frisch- (Teil 1) sowie Festbetoneigenschaften (Teil 2) der Betone mit den hier als Referenz bezeichneten Ausgangsstoffen (Zement I und Sand I) sind detailliert in den vorherigen Beiträgen beschrieben und diskutiert [15,16]. Tab. 3 zeigt zusammenfassend die Betonzusammensetzungen mit den Referenz-Ausgangsstoff-

**Tab. 3** Betonzusammensetzungen  
Concrete mixtures

Bezeichnung	Zement	SFA	Wasser	GK	SAP	SAP-Saugwasser	LP	FM
	[kg/m <sup>3</sup> ]						[M.-% v. Zem.]	
XF3-LP	300	–	165	1840	–	–	0,20	0,16 <sup>1)</sup>
XF3-SAP	300	–	165	1840	1,0	18	–	0,96 <sup>1)</sup>

LP = Luftporenbildner; FM = verfl. Zusatzmittel

<sup>1)</sup> ggf. geringfügige Anpassung bei Variation des Zements oder der feinen Gesteinskörnung

**Tab. 4** Verwendete Ausgangsstoffe bei den systematischen Schwankungen  
Raw materials used in the systematic fluctuations

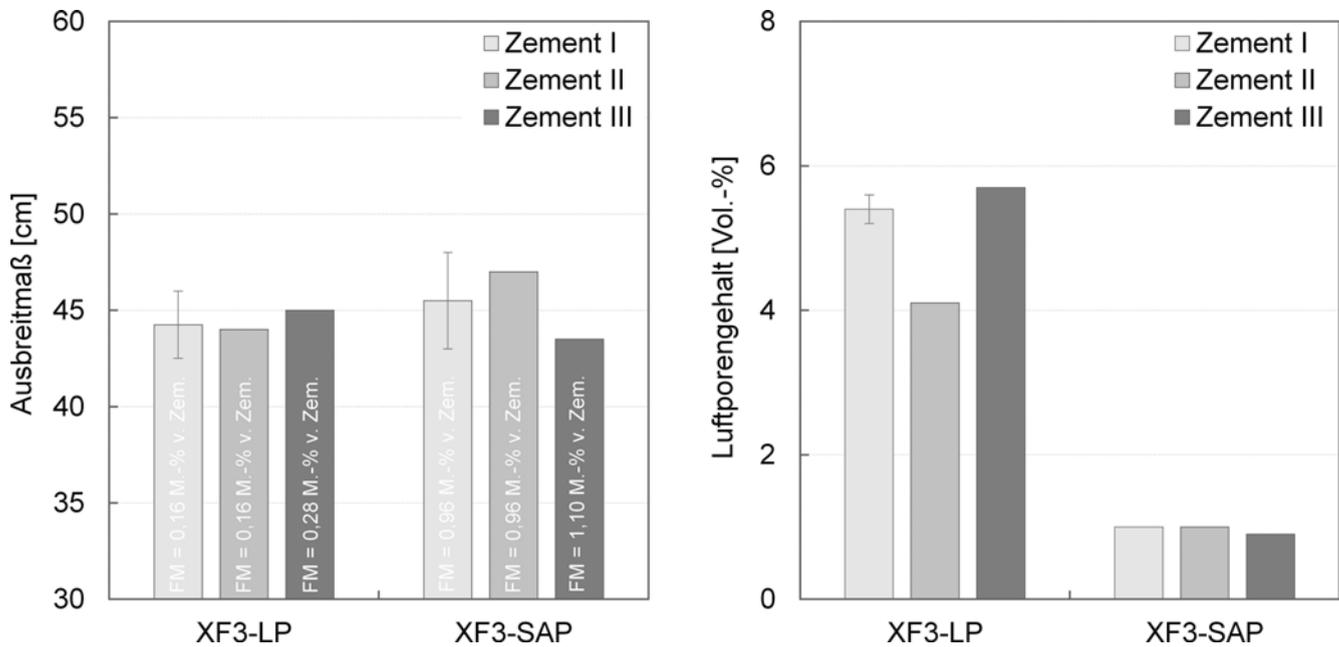
Bezeichnung <sup>1)</sup>	Zement			feine Gesteinskörnung		
	ZI	ZII	ZIII	SI	SII	SIII
XF3-xx-ZI	X			X		
XF3-xx-ZII		X		X		
XF3-xx-ZIII			X	X		
XF3-xx-SI			X	X		
XF3-xx-SII			X		X	
XF3-xx-SIII			X			X
XF3-xx-30			X	X		

<sup>1)</sup> die einzelnen Betone wurden jeweils mit LP-Bildner sowie SAP hergestellt (gekennzeichnet hier mit xx)

fen. Zur Simulation praxisnaher Schwankungen der Ausgangsstoffe wurde zum einen der Zement (gleiche Zementart, unterschiedliches Herstellwerk) als auch die feine Gesteinskörnung (unterschiedliches Abbauggebiet) systematisch ausgetauscht. Darüber hinaus wurde zur Simulation von veränderten Umgebungsbedingungen die Frischbetontemperatur systematisch von  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  auf  $30 \pm 2^\circ\text{C}$  erhöht. Dazu wurden die Ausgangsstoffe (Zement, Gesteinskörnung und Wasser) für 24 h bei erhöhter Temperatur vorgelagert. Die Variationen der Ausgangsstoffe sind in Tab. 4 zusammenfassend dargestellt. Der Gehalt des LP-Bidners oder der SAP blieb jeweils gegenüber der Referenz-Zusammensetzung (XF-xx-ZI mit SI) konstant. Einzig eine geringfügige Anpassung des erforderlichen Fließmittels zur Einstellung der Konsistenz ( $45 \pm 3 \text{ cm}$ ) wurde ggf. vorgenommen.

## 2.3 Untersuchungsmethoden

Die Konsistenz wurde von jedem Beton 10 min nach Wasserzugabe mit dem Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 [17] ermittelt. Zur Bestimmung des Luftporengehaltes im Frischbeton wurde das Druckausgleichsverfahren nach DIN EN 12350-7 [18] angewendet. Darüber hinaus wurde die Dichte des Frischbetons in diesem Prüfgefäß ( $5 \text{ dm}^3$ ) nach DIN EN 12350-6 [19] bestimmt. Die Druckfestigkeit wurde nach DIN EN 12390-3 [20] an würfelförmigen Probekörpern mit den Abmessungen  $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$  nach 2, 7 und 28 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. Zur Beurteilung des



**Bild 2** Ausbreitmaß (links) und Luftporengehalt im Frischbeton (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation des Zements (ZI–ZIII)  
Consistency (left) and air void content in the fresh concrete (right) of the concrete compositions investigated with air entraining agent and SAP under variation of the cement (ZI–ZIII)

Frost-Widerstands wurde der CIF-Test nach [21] durchgeführt. Die Probekörper wurden nach 24 h entformt und 6 d lang unter Wasser ( $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ) gelagert. Nach 7 d wurden aus jeder Probe Probekörper mit den Abmessungen  $150 \times 100 \times 70 \text{ mm}^3$  gesägt. Die vorbereiteten Probekörper wurden bis zum Alter von 28 d trockenen Bedingungen bei  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  und  $65 \pm 3 \%$  rel. LF ausgesetzt. Anschließend wurden die Proben 7 d lang einer einseitigen kontinuierlichen Wasserlagerung unterzogen und das kapillare Saugverhalten bestimmt. Anschließend wurden Frost-Tau-Zyklen gestartet und der relative dynamische Elastizitätsmodul (innere Schädigung) sowie die Oberflächenabwitterung der Proben über die Zeit (28 Frost-Tau-Zyklen) bestimmt. Die charakteristischen Kennwerte des künstlichen Luftporensystems im Festbeton (Gesamt-Luftporengehalt  $A$ , Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  und Abstands faktor  $L$ ) wurden nach DIN EN 480-11 [22] ermittelt. Weitere Details zu den einzelnen Untersuchungsmethoden können Teil 1 (Frischbeton) und Teil 2 (Festbeton) dieses Beitrags entnommen werden.

### 3 Experimentelle Untersuchungsergebnisse

#### 3.1 Robustheit gegenüber Schwankungen im Zement

Bild 2 zeigt das Ausbreitmaß (links) sowie den Luftporengehalt im Frischbeton (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation des Zements (ZI–ZIII). Unabhängig vom verwendeten Zement und vom Zusatzmittel (LP oder SAP) war eine zielsichere Einstellung der Konsistenz von  $45 \pm 3 \text{ cm}$  möglich. Lediglich geringfügige Anpassungen des FM-Gehalts waren notwendig. Dabei zeigte sich bei beiden Zusatzmitteln (LP oder SAP) bei Verwendung von ZIII ein geringfügig erhöhter notwendiger Fließmittelbedarf zur Einstellung der Ziel-

konsistenz. Der Luftporengehalt im Frischbeton ist bei Verwendung von SAP, unabhängig vom Zement in einem relativ konstanten Wertebereich von 0,9 Vol.-% bis 1,0 Vol.-%. Dagegen sind bei Verwendung von LP-Bildner leicht höhere Schwankungen im Luftporengehalt in einem Wertebereich von 4,1 Vol.-% bis 5,7 Vol.-% unter Variation des Zements zu beobachten. Demnach ist der Schwankungsbereich der Luftporengehalte im Frischbeton bei konstanter Dosierung des LP-Bidners unter Variation des Zements deutlich größer. Insbesondere bei Verwendung des Zements ZII ist nur ein sehr geringer Luftporengehalt an der Grenze des Mindestluftporengehalts nach DIN 1045-2 [14] vorhanden.

Der Luftporengehalt im Frischbeton wird zwar als maßgebender Kennwert zur Annahme des Frischbetons herangezogen, zur Sicherstellung eines ausreichenden Frost-Widerstands ist jedoch insbesondere der Mikro-Luftporengehalt im Festbeton entscheidend. Tab. 5 zeigt zusammenfassend die im Festbeton ermittelten charakteristischen Kennwerte des künstlichen Luftporengefüges. Auf-

**Tab. 5** Charakteristische Kennwerte des künstlichen Luftporensystems im Festbeton unter Variation des Zements  
Characteristic values of artificial entrained air void system in hardened concrete

Bezeichnung	$A$ (Vol.-%)	$A_{300}$ (Vol.-%)	$L$ (mm)
XF3-LP-ZI	4,0	2,7	0,17
XF3-SAP-ZI	4,7	2,3	0,25
XF3-LP-ZII	5,0	2,4	0,14
XF3-SAP-ZII	6,5	2,8	0,22
XF3-LP-ZIII	5,4	2,7	0,20
XF3-SAP-ZIII	5,1	2,2	0,25

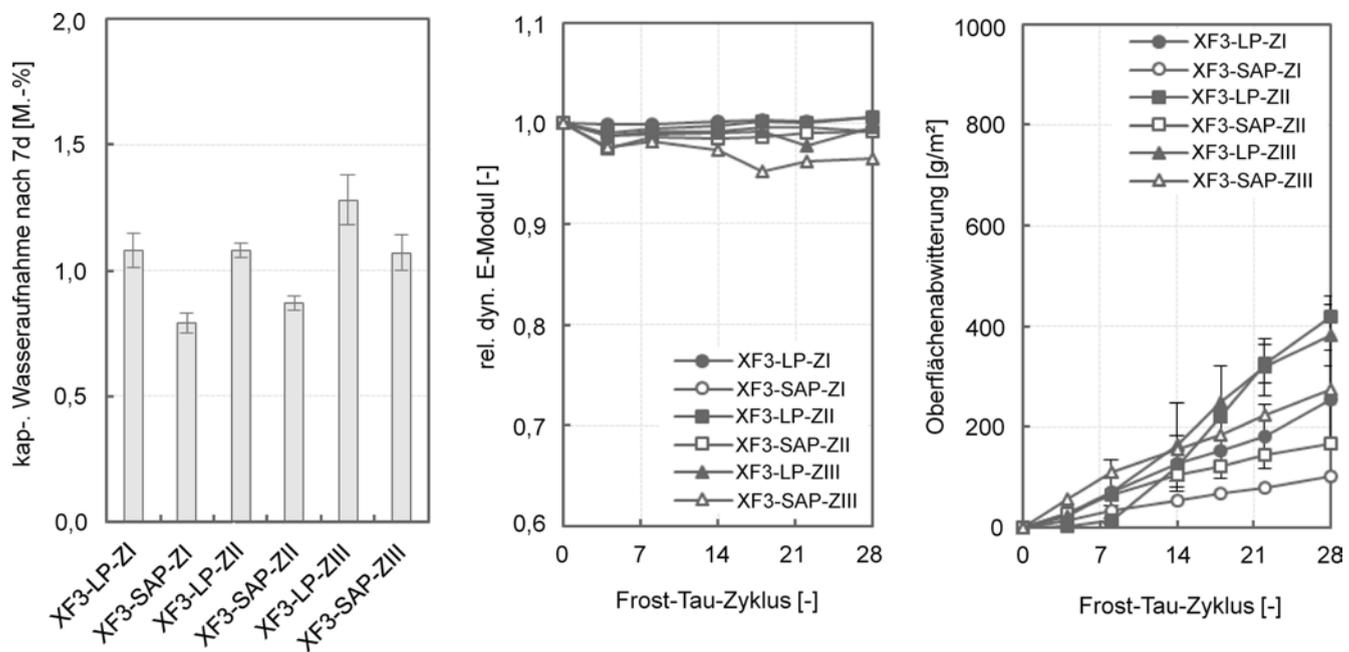
fällig ist, dass der Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  im Festbeton unabhängig vom verwendeten Zusatzmittel (LP oder SAP) Werte in einem relativ engen Bereich von 2,2 Vol.-% (XF3-SAP-ZIII) bis 2,8 Vol.-% (XF3-SAP-ZIII) aufweist. Demnach überschreiten alle Betone die Mindestwerte für den Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  für einen ausreichenden Frost-Widerstand sowohl nach [14] ( $\geq 1,5$  Vol.-% bei der Zulassungsprüfung) als auch nach [11] ( $\geq 1,8$  Vol.-% bei Verwendung von SAP). Diese Kennwerte werden von den Ergebnissen der im CIF-Test ermittelten inneren Schädigung bestätigt (Bild 3 Mitte). Alle Betone zeigen nur einen geringen Abfall des relativen dynamischen E-Moduls mit zunehmender Frost-Tau-Beanspruchung. Unabhängig vom verwendeten Zusatzmittel und Zement weisen alle Betone Werte für den relativen dynamischen E-Modul von über 0,97 nach 28 Frost-Tau-Zyklen auf. Die Oberflächenabwitterung der LP-Betone ist tendenziell geringfügig höher als bei den Betonen mit SAP unabhängig vom verwendeten Zement (Bild 3 rechts). Dabei gilt jedoch zu beachten, dass die Oberflächenabwitterung bei allen Betonen unabhängig vom Zusatzmittel auf geringem Niveau ist (Grenzwert nach [21]  $\rightarrow 1000$  g/m<sup>2</sup>). Auffällig ist darüber hinaus, dass bei allen Betonen mit SAP, unabhängig vom verwendeten Zement eine geringere kapillare Wasseraufnahmekapazität nach 7 d gegenüber den LP-Betonen ermittelt werden kann (Bild 3 links). Dies deutet auf eine erhöhte Gefügedichtigkeit bei den untersuchten Betonen mit SAP hin.

### 3.2 Robustheit gegenüber Schwankungen der feinen Gesteinskörnung

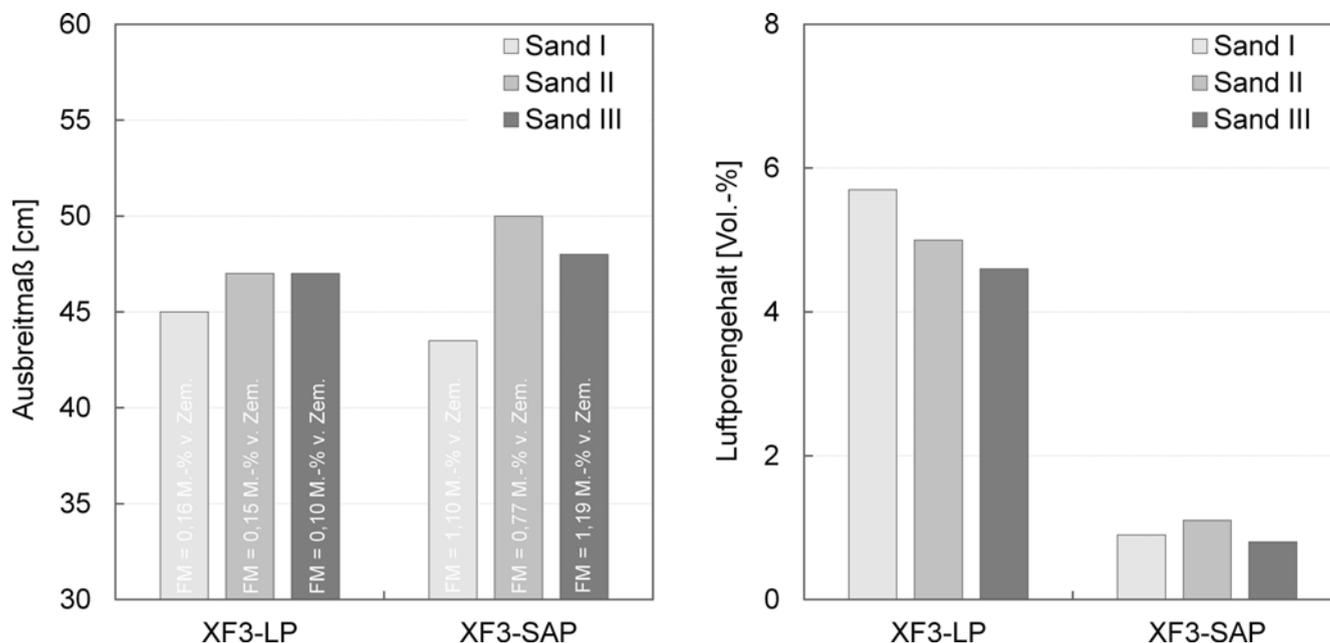
Das Ausbreitmaß (links) sowie der Luftporengehalt im Frischbeton (rechts) der untersuchten Betonzusammen-

setzungen unter Variation der feinen Gesteinskörnung (SI–SIII) sind in Bild 4 dargestellt. Zur Einstellung der Zielkonsistenz von  $45 \pm 3$  cm war jeweils nur eine geringfügige Anpassung des Fließmittelgehaltes bei Austausch der feinen Gesteinskörnung (SI–SIII) notwendig. Insbesondere bei Verwendung von SII und SAP war eine geringere Fließmitteldosierung notwendig. Das erzielte Ausbreitmaß lag mit der geringsten FM-Menge der SAP-Betone leicht über dem Zielbereich mit 50 cm.

Vergleichbar zu den in Abschn. 3.1 beschriebenen Ergebnissen, weisen die SAP-Betone auch bei Variation der feinen Gesteinskörnung Luftporengehalte im Frischbeton in einem konstanten Wertebereich von 0,8 Vol.-% (SIII) bis 1,1 Vol.-% (SII) auf. Bei Verwendung von klassischem LP-Bildner führen die unterschiedlichen Varianten der feinen Gesteinskörnung zu höheren Schwankungen im Luftporengehalt im Frischbeton in einem Wertebereich von 4,6 Vol.-% (SIII) bis 5,7 Vol.-% (SI). Im Festbetongefüge und hier insbesondere im Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  sind die resultierenden Veränderungen infolge der unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen jedoch nicht so stark ausgeprägt (Tab. 6). Unabhängig vom Zusatzmittel (LP oder SAP) und von der feinen Gesteinskörnung (SI–SIII) zeigen die Mikro-Luftporengehalte Werte von 2,2 Vol.-% (XF3-SAP-SII) bis 2,7 Vol.-% (XF3-SAP-ZI). Demnach weisen alle untersuchten Betone einen Mikro-Luftporengehalt oberhalb der in [11 bzw. 14] genannten Grenzwerte für einen ausreichenden Frost-Widerstand auf. Die im CIF-Test ermittelten Ergebnisse bestätigen die ermittelten Luftporenkennwerte im Festbetongefüge (Bild 5). Unabhängig von der feinen Gesteinskörnung weisen sowohl die untersuchten LP-Betone als auch die SAP-Betone einen sehr hohen Frost-Widerstand auf. Nach 28 Frost-Tau-Wechseln ist eine maximale Reduktion des relativen dynamischen



**Bild 3** Kapillare Wasseraufnahmekapazität nach 7 d (links), relativer dynamischer E-Modul (Mitte) und Oberflächenabwitterung (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation des Zements (ZI–ZIII)  
 Capillary water absorption capacity after 7 d (left), relative dynamic elastic modulus (center) and concrete spalling (right) of tested concrete compositions investigated with air entraining agent and SAP under variation of the cement (ZI–ZIII)



**Bild 4** Ausbreitmaß (links) und Luftporengehalt im Frischbeton (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation der feinen Gesteinskörnung (SI–SIII)  
Consistency (left) and air void content in the fresh concrete (right) of the concrete compositions investigated with air entraining agent and SAP under variation of fine aggregates (SI–SIII)

**Tab. 6** Charakteristische Kennwerte des künstlichen Luftporensystems im Festbeton unter Variation der feinen Gesteinskörnung  
Characteristic values of artificial entrained air void system in hardened concrete under variation of fine aggregates

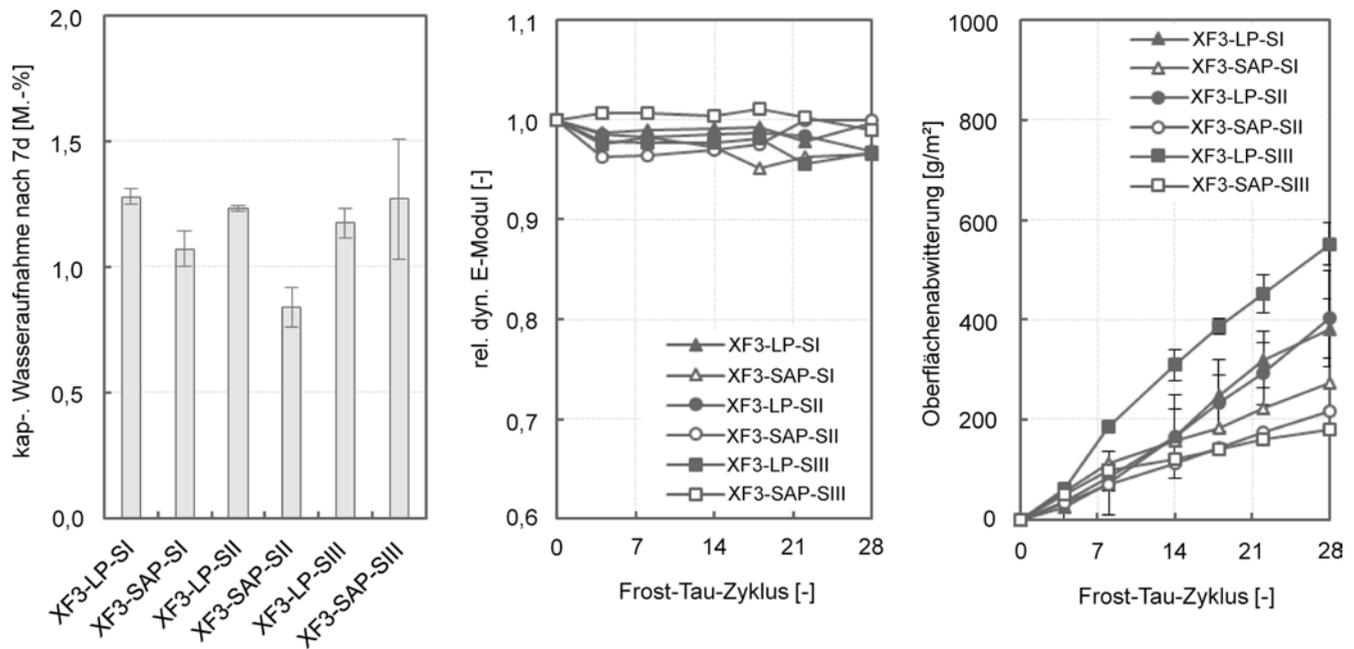
Bezeichnung	A (Vol.-%)	A <sub>300</sub> (Vol.-%)	L (mm)
XF3-LP-SI	5,4	2,7	0,20
XF3-SAP-SI	5,1	2,2	0,25
XF3-LP-SII	4,8	2,4	0,21
XF3-SAP-SII	4,0	2,2	0,24
XF3-LP-SIII	5,3	2,2	0,18
XF3-SAP-SIII	4,6	2,3	0,22

sehen E-Moduls auf 0,97 (XF3-SAP-SI) festzustellen (Bild 5 Mitte). Bei der Oberflächenabwitterung können bei den SAP-Betonen tendenziell geringere Abwitterungsmengen in einem Wertebereich von 181 g/m<sup>2</sup> (SIII) bis 274 g/m<sup>2</sup> (SI) nach 28 Frost-Tau-Wechseln beobachtet werden. Dagegen zeigen die vergleichbaren klassischen LP-Betone Abwitterungsmengen in einem Wertebereich von 382 g/m<sup>2</sup> (SI) bis 552 g/m<sup>2</sup> (SIII) nach 28 Frost-Tau-Wechseln. Ein systematischer Zusammenhang der unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen unter Berücksichtigung der luftporenbildenden Zusatzmittel ist dabei nicht zu erkennen. So zeigt der Beton mit der feinen Gesteinskörnung SI bei Verwendung von SAP die höchste Abwitterung (274 g/m<sup>2</sup>) bei den SAP-Betonen und der LP-Beton die geringste Abwitterung (382 g/m<sup>2</sup>) bei den klassischen LP-Betonen. Bei Verwendung der feinen Gesteinskörnung SIII ist es genau umgekehrt. Generell muss bei den ermittelten Abwitterungsmengen festgehalten werden, dass die untersuchten Betone relativ geringe Abwitterungsmengen unterhalb des Grenzwerts von

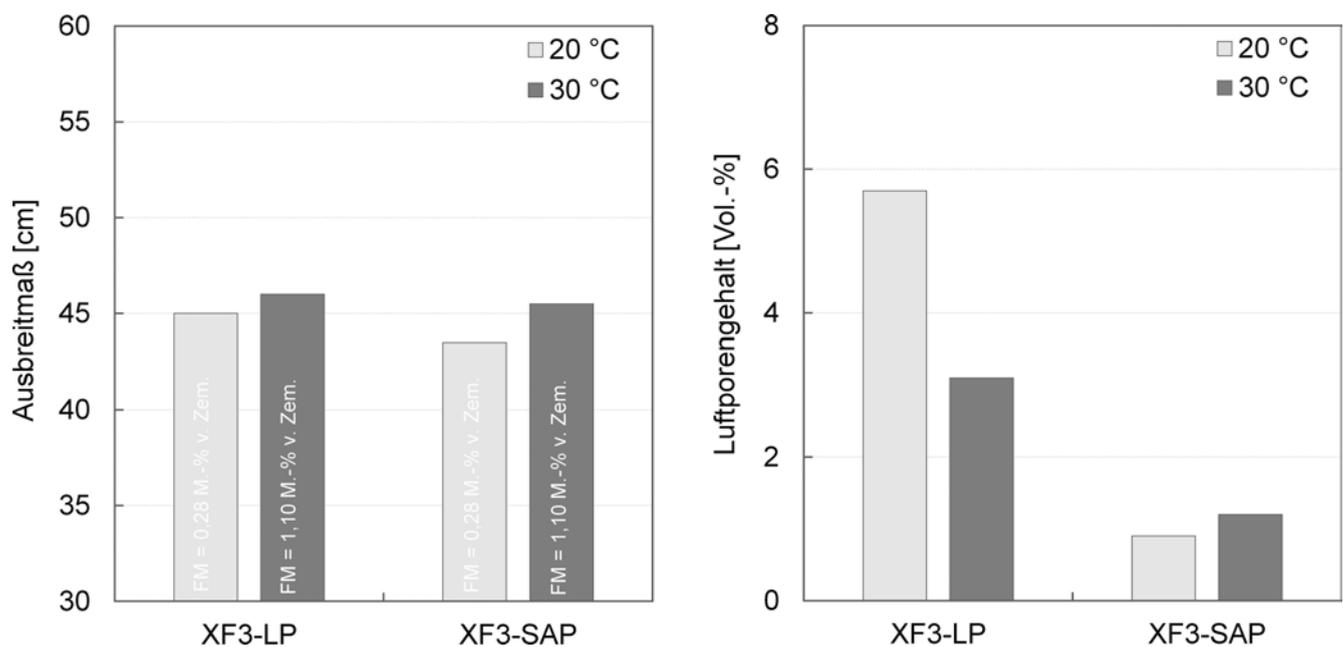
1000 g/m<sup>2</sup> nach [21] aufweisen und somit als frostbeständig einzustufen sind.

### 3.3 Robustheit gegenüber Schwankungen der Frischbetontemperatur

Bild 6 zeigt das Ausbreitmaß (links) und den Luftporengehalt im Frischbeton (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation der Frischbetontemperatur. Die Einstellung der Zielkonsistenz von 45 ± 3 cm war bei allen Betonen unabhängig von der Frischbetontemperatur zielsicher möglich. Dagegen zeigt sich, dass der Luftporengehalt im Frischbeton bei dem klassischen LP-Beton infolge der erhöhten Frischbetontemperatur von 30 °C deutlich reduziert ist gegenüber dem LP-Beton mit 20 °C. So reduziert sich der Luftporengehalt im Frischbeton von 5,7 Vol.-% (XF3-LP-20) auf 3,1 Vol.-% (XF3-LP-30) bei einer identischen Zugabemenge des LP-Bildners. Demnach kann bei einer erhöhten Frischbetontemperatur der Mindest-Luftporengehalt von 4,0 Vol.-% nach [14] nicht eingehalten werden. Im Festbeton zeigen die LP-Betone jedoch unabhängig von der Frischbetontemperatur einen Mikro-Luftporengehalt A<sub>300</sub> von 2,7 Vol.-% (XF3-LP-20) bzw. 2,0 Vol.-% (XF3-LP-30) und demnach jeweils einen Wert oberhalb des Grenzwerts nach [14] für einen ausreichenden Frost-Widerstand (Tab. 7). Bei den SAP-Betonen ist dagegen kein Einfluss der Frischbetontemperatur auf die Luftporenkennwerte, sowohl im Frisch- als auch Festbeton, festzustellen (Bild 6 und Tab. 7). Der Frost-Widerstand ist bei allen untersuchten Betonen unabhängig vom luftporenbildenden Zusatzmittel (LP oder SAP) gegeben (Bild 7). Der relative dynamische E-Modul zeigt nach 28 Frost-Tau-Wechseln Werte in einem Bereich von 0,97 (XF3-SAP-20) bis 1,01 (XF3-LP-30). Bei dem LP-Beton



**Bild 5** Kapillare Wasseraufnahmekapazität nach 7 d (links), relativer dynamischer E-Modul (Mitte) und Oberflächenabwitterung (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation der feinen Gesteinskörnung (SI–SIII)  
 Capillary water absorption capacity after 7 d (left), relative dynamic elastic modulus (center) and concrete spalling (right) of tested concrete compositions investigated with air entraining agent and SAP under variation of fine aggregates (SI–SIII)



**Bild 6** Ausbreitmaß (links) und Luftporengehalt im Frischbeton (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation der Frischbetontemperatur (20°C und 30°C)  
 Consistency (left) and air void content in the fresh concrete (right) of the concrete compositions investigated with air entraining agent and SAP under variation of the temperature (20°C and 30°C)

mit erhöhter Frischbetontemperatur kann jedoch eine deutlich erhöhte Oberflächenabwitterung von 873 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln festgestellt werden.

#### 4 Diskussion

Die experimentellen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass insbesondere der Luftporengehalt im Frischbeton bei Verwendung von klassischem LP-Bildner infolge veränderter Ausgangsstoffeigenschaften (Zement oder feine Gesteinskörnung) oder der Temperatur beeinflusst wer-

den kann. Bei dem Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  im Festbetongefüge konnten dagegen nicht so starke Schwankungen infolge dieser Veränderungen festgestellt werden. Demgegenüber zeigten die SAP-Betone bei allen ermittelten Eigenschaften nur relativ geringe Schwankungen infolge der veränderten Ausgangsstoffeigenschaften oder der Temperatur. Die SAP-Betone reagierten sehr robust auf die systematischen Schwankungen. Infolge der Wasserabgabe der SAP während der Hydratation und Austrocknung des Betons können zielsicher künstliche Luftporen in das Festbetongefüge eingeführt werden. Bild 8 zeigt den Zusammenhang zwi-

**Tab. 7** Charakteristische Kennwerte des künstlichen Luftporensystems im Festbeton der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation der Frischbetontemperatur (20°C und 30°C)

Characteristic values of artificial entrained air void system in hardened concrete under variation of the temperature (20°C and 30°C)

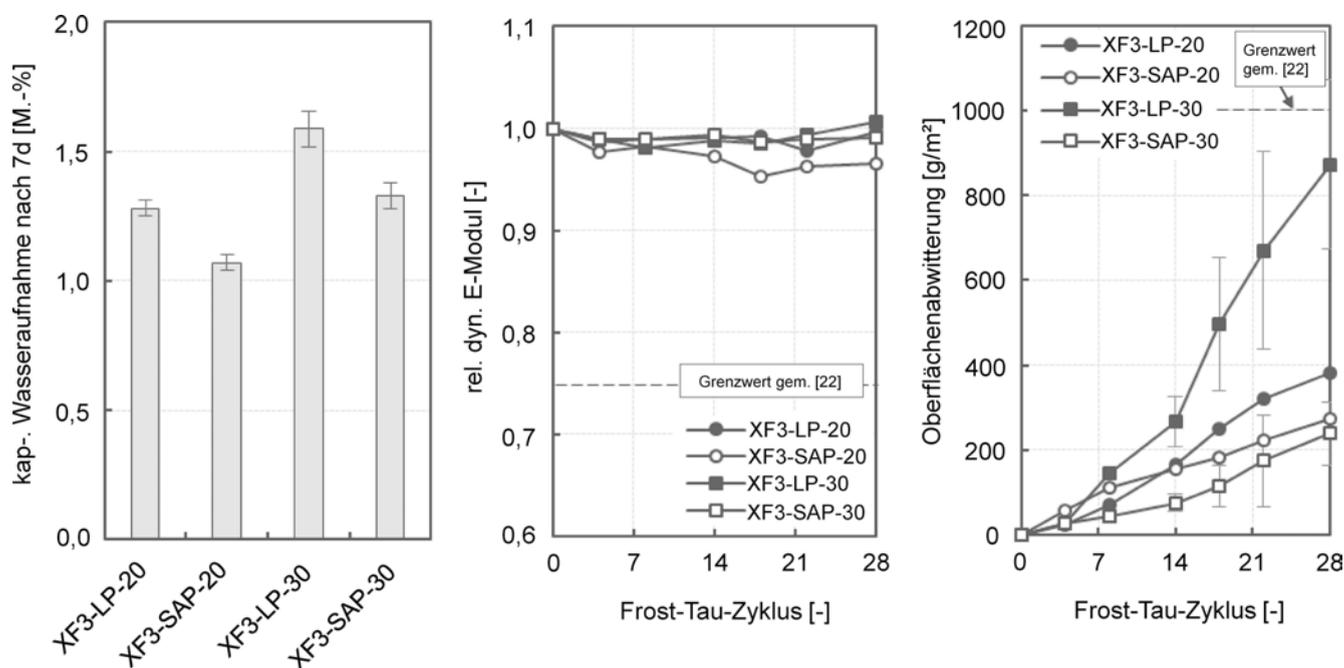
Bezeichnung	A (Vol.-%)	A <sub>300</sub> (Vol.-%)	L (mm)
XF3-LP-20	5,4	2,7	0,20
XF3-SAP-20	5,1	2,2	0,25
XF3-LP-30	3,8	2,0	0,21
XF3-SAP-30	5,5	2,7	0,24

schon dem Luftporengehalt im Frischbeton und dem berechneten theoretischen Porenvolumen ( $\Delta LP_{A-FB}$ ), welches durch die Zugabe der SAP in den Festbeton eingeführt wird. Dazu wurde vom im Festbeton ermittelten Gesamt-Luftporengehalt  $A$  der im Frischbeton ermittelte Luftporengehalt subtrahiert. Da die SAP im Frischbeton mit Wasser gefüllt sind und demnach noch keine Luftporenwirkung zeigen, kann bei den SAP-Betonen im Frischbeton jeweils nur der normale Luftporenanteil ermittelt werden. Bei einem mittleren maximalen Absorptionsvermögen der SAP von  $36 \text{ g/g}_{\text{SAP}}$  und der im Rahmen dieser Untersuchungen verwendeten SAP-Zugabemenge von  $1,0 \text{ kg/m}^3$  muss bei den berechneten  $\Delta LP_{A-FB}$ -Werten theoretisch ein Luftporenanteil von ca. 3,6 Vol.-% rauskommen. Die ermittelten  $\Delta LP_{A-FB}$ -Werte der untersuchten SAP-Betone in Bild 8 zeigen, dass die SAP zielsicher den theoretisch abgeleiteten Luftporengehalt von ca. 3,6 Vol.-% in den Festbeton einführen. Die untersuchten SAP-Betone weisen  $\Delta LP_{A-FB}$ -Werte in einem Wertebereich von 3,2 Vol.-% bis 4,2 Vol.-% auf. Einzig der SAP-Beton XF3-SAP-SII zeigt mit 3,2 Vol.-% einen geringfügig

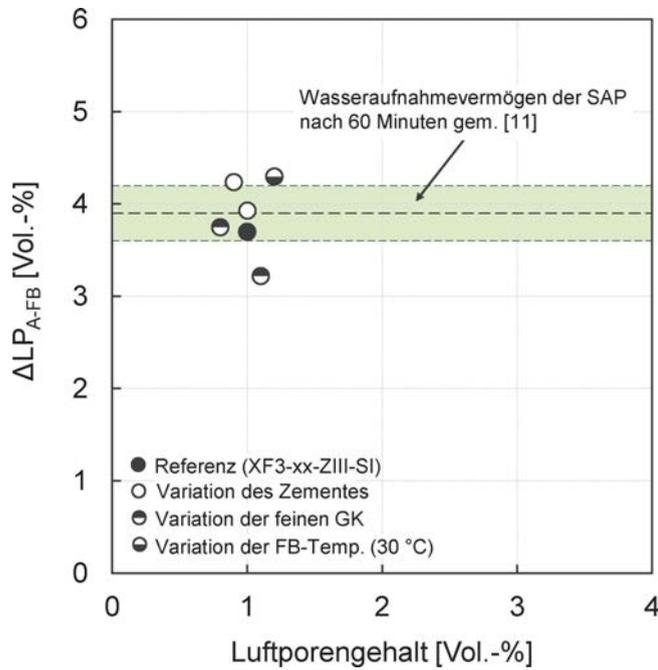
verringerten  $\Delta LP_{A-FB}$ -Wert unterhalb des nach [11] zu erwartenden Wertebereichs bei einer Wasseraufnahme von über 60 min.

Bild 9 zeigt sowohl den Luftporengehalt im Frischbeton als auch den Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  im Festbetongefüge aller untersuchten Betonzusammensetzungen. Der geringere Luftporengehalt im Frischbeton bei den SAP-Betonen, infolge der Aufnahme von Wasser, welches von den SAP im Frischbeton zurückgehalten wird, ist deutlich zu erkennen. Dabei variieren die Werte infolge der systematischen Schwankungen jedoch in einem sehr engen Bereich. Der Schwankungsbereich ist bei den Betonen mit klassischem LP-Bildner dagegen deutlich größer. Insbesondere gilt es dabei zu beachten, dass die Werte dabei sogar in den kritischen Bereich des Mindestluftporengehaltes nach [14] infolge des Austausches vom Zement fallen (hier 4,0 Vol.-%). Bei Erhöhung der Frischbetontemperatur auf 30°C ist dieser Grenzwert sogar deutlich unterschritten. Im Festbetongefüge sind dagegen jeweils unabhängig von der Zusatzmittelart (LP oder SAP) Mikro-Luftporen in vergleichbarer Größenordnung vorhanden. Dies erklärt auch den sehr hohen Frost-Widerstand aller untersuchten Betone. Unabhängig davon sollte jedoch beachtet werden, dass die Annahme des Frischbetons auf der Baustelle ausschließlich anhand des Luftporengehalts im Frischbeton geprüft werden kann und dort schwankende Werte bzw. geringe Luftporengehalte im Frischbeton zu einer Ablehnung des Frischbetons führen können.

Bild 10 zeigt die Druckfestigkeit nach 28 d in Abhängigkeit vom Luftporengehalt im Frischbeton aller untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation des Zements (ZI–ZIII), der feinen Gesteinskörnung (SI–SIII) und der Frischbetontemperatur (20°C und 30°C). Erwar-



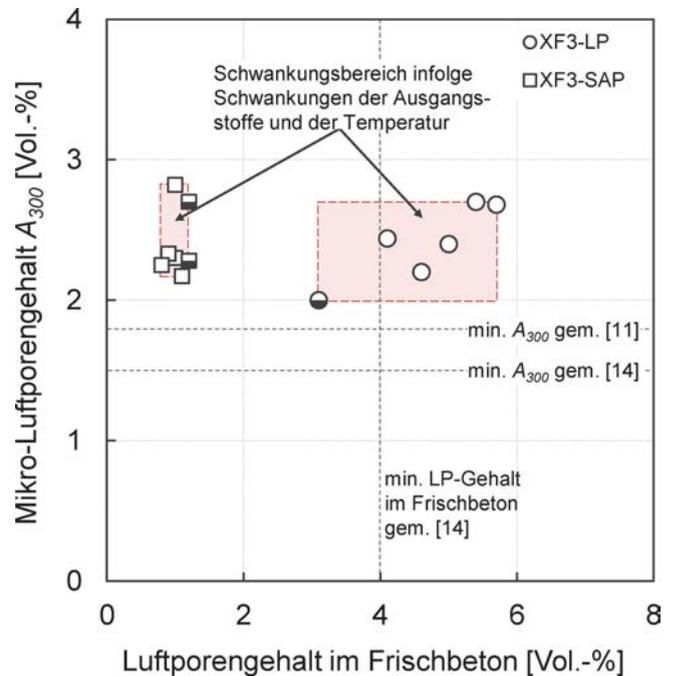
**Bild 7** Kapillare Wasseraufnahmekapazität nach 7 d (links), relativer dynamischer E-Modul (Mitte) und Oberflächenabwitterung (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation der Frischbetontemperatur (20°C und 30°C)  
Capillary water absorption capacity after 7 d (left), relative dynamic elastic modulus (center) and concrete spalling (right) of tested concrete compositions investigated with air entraining agent and SAP under variation of fresh concrete temperature (20°C and 30°C)



**Bild 8** Gegenüberstellung des berechneten  $\Delta LP_{A+FB}$ -Werts (von den SAP in den Festbeton eingeführtes Luftporenvolumen) und des Luftporengehalts im Frischbeton aller untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation der Ausgangsstoffe (Zement oder feine Gesteinskörnung) und der Umgebungsbedingungen (Temperatur)

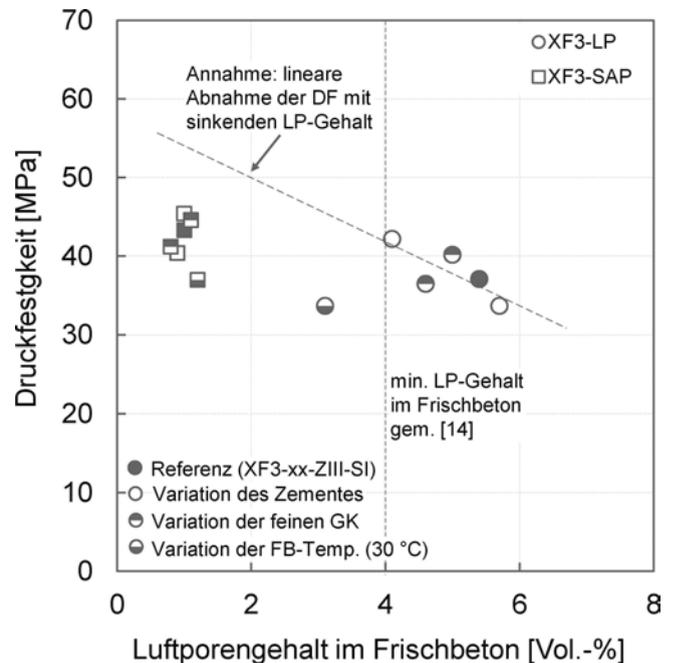
Comparison of the calculated  $\Delta LP_{A+FB}$ -value and the air void content in fresh concrete of all concrete compositions investigated under variation of the raw materials (cement or fine aggregate) and the ambient conditions (temperature)

tungsgemäß ist bei den LP-Betonen mit abnehmendem Luftporengehalt eine nahezu linear zunehmende Druckfestigkeit zu beobachten. Die ermittelten Druckfestigkeiten weisen Werte in einem Bereich von 42,2 MPa bis 33,7 MPa auf. Bei Verwendung von SAP ist die Spanne des Wertebereichs vergleichbar. Die ermittelten Druckfestigkeiten liegen zwischen 37,0 MPa und 45,4 MPa. Im Mittel zeigen die SAP-Betone vergleichbare Druckfestigkeitswerte wie der vergleichbare LP-Beton mit einem Luftporengehalt im Bereich des Mindestluftporengehalts von 4,0 Vol.-% nach [14]. Auffällig in Bild 10 ist zudem der Rückgang der Druckfestigkeit bei erhöhter Frischbetontemperatur von 30 °C bei dem LP-Beton. Trotz eines reduzierten Luftporengehalts von 3,1 Vol.-% im Frischbeton ist eine relativ geringe Druckfestigkeit von 33,7 MPa zu beobachten und demnach auf vergleichbarem Niveau wie bei dem LP-Beton mit 5,7 Vol.-% Luftporen im Frischbeton. Dagegen ist bei dem SAP-Beton mit erhöhter Frischbetontemperatur von 30 °C nur ein geringer Rückgang der Druckfestigkeit feststellbar. Die Druckfestigkeit fällt dabei von 43,0 MPa (Mittelwert der SAP-Betone bei 20 °C) auf 37,0 MPa (XF3-SAP-30). Die Gegenüberstellung des Gesamt-Luftporengehalts  $A$  im Festbeton und der Druckfestigkeit bestätigt die zuvor beschriebenen Tendenzen (Bild 11). Mit zunehmendem Gesamt-Luftporengehalt im Festbeton kann bei den Betonen mit LP-Bildner eine leichte Reduktion der Druckfestigkeit festgestellt werden. Die Druckfestigkeiten der SAP-Betone zeigen dabei bei vergleichbarem Gesamt-Luftporengehalt tendenziell geringfügig höhere Druckfestigkeitswerte. Demnach lässt sich festhalten, dass die



**Bild 9** Gegenüberstellung des Mikro-Luftporengehalts  $A_{300}$  und des Luftporengehalts im Frischbeton aller untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation der Ausgangsstoffe (Zement oder feine Gesteinskörnung) und der Umgebungsbedingungen (Temperatur)

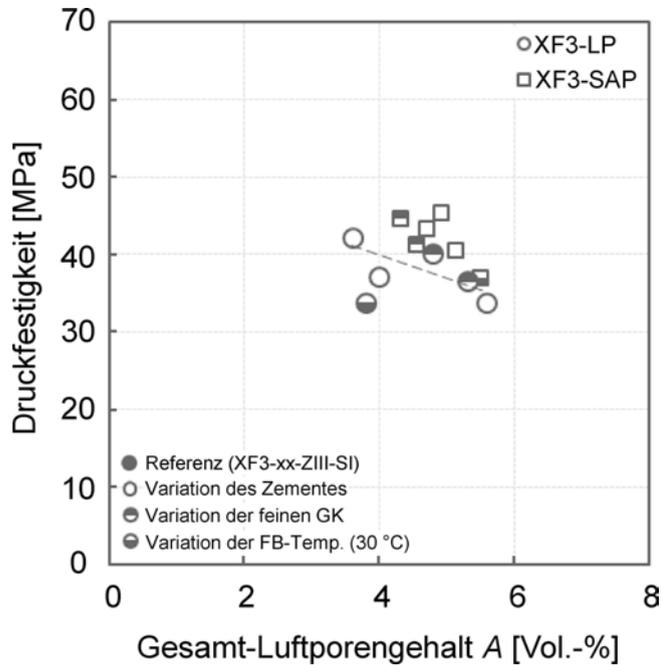
Comparison of the micro air void content  $A_{300}$  and the air void content in fresh concrete of all concrete compositions investigated under variation of the raw materials (cement or fine aggregate) and the ambient conditions (temperature)



**Bild 10** Druckfestigkeit nach 28 d in Abhängigkeit vom Luftporengehalt im Frischbeton aller untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation der Ausgangsstoffe (Zement oder feine Gesteinskörnung) und der Umgebungsbedingungen (Temperatur)

Compressive strength (28 d) as a function of the air void content in the fresh concrete of all concrete compositions investigated under variation of the raw materials (cement or fine aggregate) and the ambient conditions (temperature)

untersuchten Betone bei Zugabe von SAP robust sowohl auf Schwankungen der Ausgangsstoffe als auch der Temperatur hinsichtlich des Gesamt-Luftporengehalts und somit auch der Druckfestigkeit reagieren. Dies zeigte sich



**Bild 11** Druckfestigkeit nach 28 d in Abhängigkeit vom Gesamt-Luftporengehalt  $A$  im Festbeton aller untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation der Ausgangsstoffe (Zement oder feine Gesteinskörnung) und der Umgebungsbedingungen (Temperatur)  
Compressive strength (28 d) as a function of the air void content  $A$  in the hardened concrete of all concrete compositions investigated under variation of the raw materials (cement or fine aggregate) and the ambient conditions (temperature)

auch bei dem bereits zuvor beschriebenen Mikro-Luftporengehalt und dem daraus resultierenden sehr hohen Frost-Widerstand der untersuchten Betone.

## 5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden systematische Untersuchungen zum Einfluss superabsorbierender Polymere auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften unter Variation systematischer Schwankungen der Ausgangsstoffe (Zement und feine Gesteinskörnung) sowie der Umgebungsbedingungen (Temperatur) vorgestellt. Als Referenz wurden Betone mit nahezu vergleichbarer sonstiger Zusammensetzung, die mit klassischem Luftporenbildner hergestellt wurden, herangezogen. Die gewonnenen Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Schwankungen in den Eigenschaften der Ausgangsstoffe (Zement oder feine Gesteinskörnung) können bei klassischen LP-Betonen zu deutlichen Veränderungen des Luftporengehalts im Frischbeton führen. Betone mit SAP reagieren sehr robust im Luftporengehalt

## Literatur

- [1] Stark, J.; Wicht, B. (2012) *Dauerhaftigkeit von Beton*. Wiesbaden: Springer-Vieweg.
- [2] Eickschen, E. (2009) *Wirkungsmechanismen Luftporen bildender Betonzusatzmittel und deren Nachaktivierungspotenzial* [Dissertation]. Universität Bochum.

des Frischbetons gegenüber solchen Schwankungen der Ausgangsstoffe.

- Eine Erhöhung der Frischbetontemperatur (hier: 30 °C) führt bei Anwendung klassischer LP-Bildner (konstante Dosiermenge wie bei 20 °C) zu einer deutlichen Reduktion des Luftporengehalts im Frischbeton. Bei Anwendung von SAP ist dagegen keine Beeinflussung infolge der erhöhten Temperatur festzustellen.
- Unabhängig von den systematischen Schwankungen der Ausgangsstoffe und der Temperatur wird von den SAP der Luftporengehalt im Festbeton entsprechend der Zugabemenge und dem maximalen Absorptionsvermögen zielsicher eingeführt.
- Unabhängig von den systematischen Schwankungen (Zement, feine Gesteinskörnung und Temperatur) und der Art des Zusatzmittels (LP oder SAP) konnte bei allen untersuchten Betonen ein Mikro-Luftporengehalt  $A_{300}$  oberhalb der Grenzwerte nach [11,14] festgestellt werden. Dementsprechend besitzen die untersuchten Betone auch einen sehr hohen Frost-Widerstand unabhängig von der Zusatzmittelart (LP oder SAP).
- Die Druckfestigkeit wird bei klassischen LP-Betonen infolge schwankender Ausgangsstoffeigenschaften und des resultierenden schwankenden Gesamt-Luftporengehalts stärker beeinflusst als bei Anwendung von SAP. Bei vergleichbarem Gesamt-Luftporengehalt im Festbeton zeigen die SAP-Betone tendenziell geringfügig höhere Druckfestigkeiten als die Betone mit klassischem LP-Bildner.
- Bei einer erhöhten Frischbetontemperatur (hier: 30 °C) ist bei dem LP-Beton trotz eines geringen Gesamt-Luftporengehalts im Festbeton eine reduzierte Druckfestigkeit zu beobachten. Ein signifikanter Einfluss der Frischbetontemperatur auf die Druckfestigkeit kann dagegen bei Anwendung von SAP nicht festgestellt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die untersuchten Betone bei Anwendung von superabsorbierenden Polymeren (SAP) sehr robust gegenüber Einflüssen aus schwankenden Ausgangsstoffen (Zement oder feine Gesteinskörnung) und den Umgebungsbedingungen (Temperatur) hinsichtlich der Einführung künstlicher Luftporen und des resultierenden Frost-Widerstands reagieren. Dabei gilt es zu beachten, dass die hier beschriebenen Erkenntnisse nur für die untersuchten Eigenschaften unter den simulierten Randbedingungen gelten. In weiteren Untersuchungen gilt es zu ermitteln, wie sich solche Schwankungen der Ausgangsstoffe oder der Umgebungsbedingungen auf weitere Frisch- und Festbetoneigenschaften bei Anwendung von SAP auswirken.

- [3] Eickschen, E.; Müller, C. (2013) *Luftporenbildung in Labor und Praxis*. beton 12, S. 511–520.
- [4] Feldrappe, V.; Ehrenberg, A. (2020) *Luftporenbeton mit hitteandhaltigen Zementen*. Report des FEhS-Instituts 2/2010. S. 13–17.

- [5] Kottas, R.; Hilsdorf, H. (1979) *Der Einfluss der Temperatur auf die Wirksamkeit von Luftporenbildnern*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Bundesministerium für Verkehr [Hrsg.]. Bonn.
- [6] Wesche, K. (1993) *Baustoffe für tragende Bauteile, Beton – Mauerwerk*. (Bd. 2). Bauverlag GmbH.
- [7] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [Hrsg.] (2004) *Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton*. Arbeitsgruppe Betonstraßen.
- [8] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. [Hrsg.] (2020) *Sachstandbericht Frischbeton – Eigenschaften, Einflüsse und Prüfungen*. Berlin: Beuth.
- [9] Secieru, 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.
- [10] DIN EN 197-1:2011-11 (2011) *Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*. Berlin: Beuth.
- [11] Deutsches Institut für Bautechnik [Hrsg.] (2023) *Betonzusatzmittel “MasterSphere 2000” aus superabsorbierenden Polymeren zur Herstellung von Luftporenbeton*. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.212.2223. Berlin.
- [12] 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.
- [13] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton [Hrsg.] (2010) *Massige Bauteile aus Beton*. Berlin: Beuth.
- [14] DIN 1045-2:2023-08 (2023) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton*. Berlin: Beuth.
- [15] 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>
- [16] Schack, T.; Dittmar, S.; Schauerte, M.; Mazanec, O.; Haist, M. (2024) *Luftporenbeton mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) – Teil 2: Festbetoneigenschaften*. Beton- und Stahlbetonbau 119. <https://doi.org/10.1002/best.202400012>
- [17] DIN EN 12350-5:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß*. Berlin: Beuth.
- [18] DIN EN 12350-7:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren*. Berlin: Beuth.
- [19] DIN EN 12350-6:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohichte*. Berlin: Beuth.
- [20] DIN EN 12390-3:2019-10 (2019) *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. Berlin: Beuth.
- [21] Bundesanstalt für Wasserbau [Hrsg.] (2012) *BAWMerkblatt Frostprüfung für Beton (MFB)*. Karlsruhe. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien).
- [22] DIN EN 480-11:2005-12 (2005) *Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren – Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton*. Berlin: Beuth.

#### Autor:innen



Dr.-Ing. Tobias Schack (Korrespondenzautor:in)  
t.schack@baustoff.uni-hannover.de  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Baustoffe  
Appelstraße 9A  
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 9A  
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. (2025) *Luftporenbeton mit superabsorbierenden Polymeren (SAP) – Teil 3: Robustheit gegenüber Schwankungen der Ausgangsstoffe und Umgebungsbedingungen*. Beton- und Stahlbetonbau 120, H. 1, S. 44–54. <https://doi.org/10.1002/best.202400036>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 23. Mai 2024; angenommen: 21. Juni 2024.