

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 ($< 0,125$ 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 ($< 0,25$ 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 ³]	d_{10} [μm]	d_{50} [μm]	spez. Oberfläche [cm ² /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

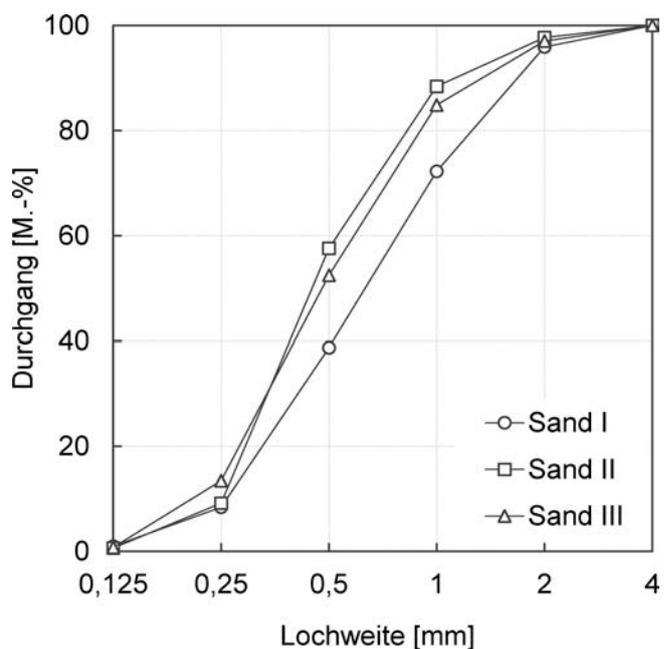


Bild 1 Korngrößenverteilungen der unterschiedlichen feinen Gesteinskörnungen (0/2)
Grain size distribution of different fine aggregates (0/2)

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 Expositions-kategorie 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 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 ³]						[M.-% v. Zem.]	
XF3-LP	300	–	165	1840	–	–	0,20	0,16 ¹⁾
XF3-SAP	300	–	165	1840	1,0	18	–	0,96 ¹⁾

LP = Luftporenbildner; FM = verfl. Zusatzmittel

¹⁾ 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 ¹⁾	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		

¹⁾ 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 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

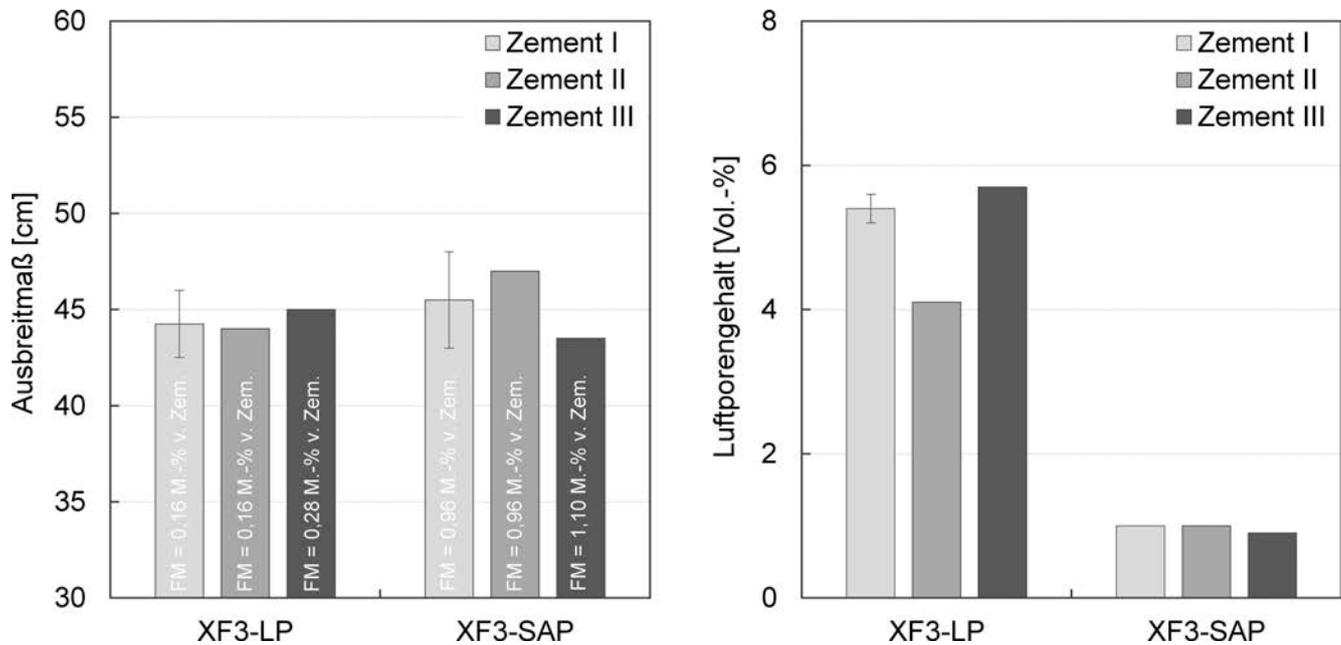


Bild 2 Ausbreitmaß (links) und Luftporengehalt im Frischbeton (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation des Zements (ZI–ZIII)
Consistency (left) and air void content in the fresh concrete (right) of the concrete compositions investigated with air entraining 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 Abstandsfaktor 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-Belastung. 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/m²). 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 ± 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

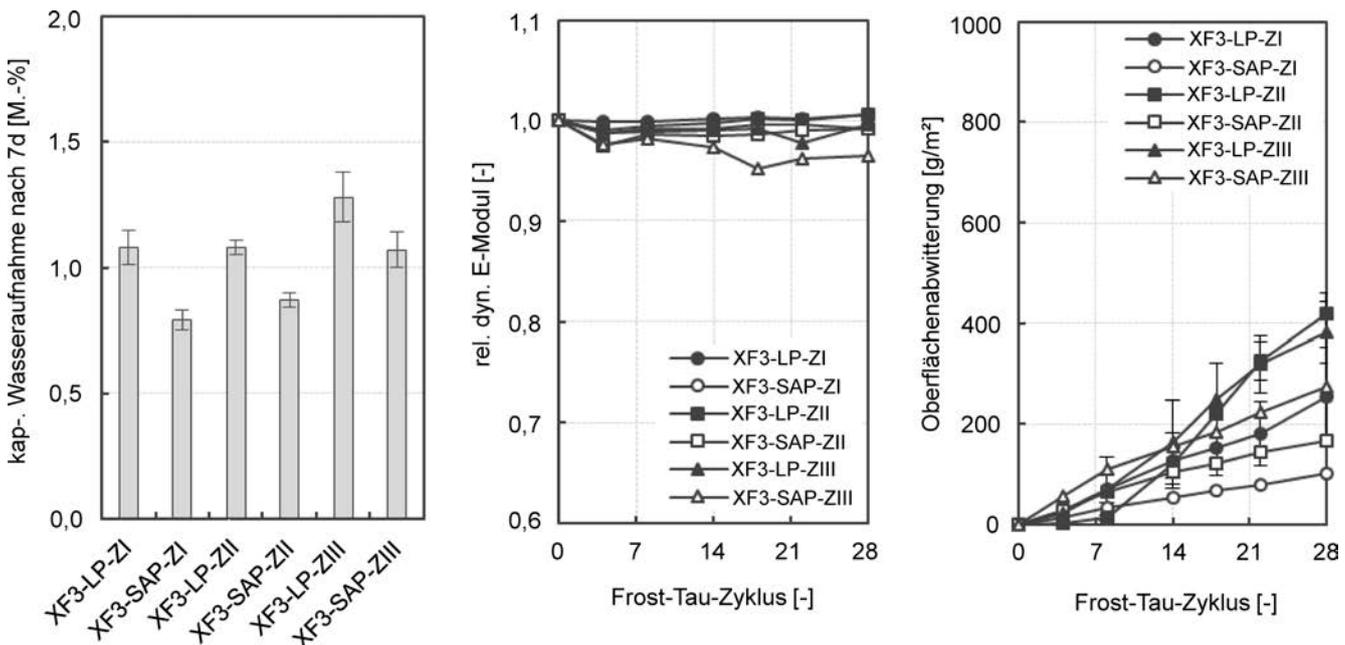


Bild 3 Kapillare Wasseraufnahmekapazität nach 7 d (links), relativer dynamischer E-Modul (Mitte) und Oberflächenabwitterung (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation des Zements (ZI–ZIII)
 Capillary water absorption capacity after 7 d (left), relative dynamic 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)

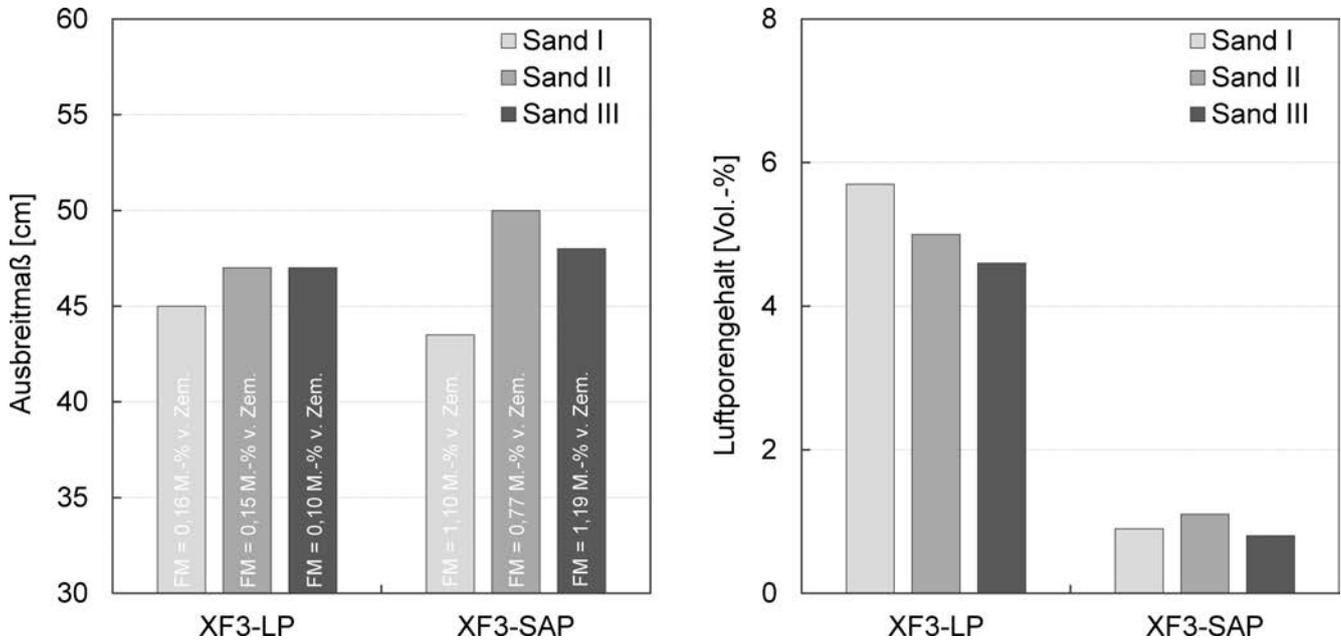


Bild 4 Ausbreitmaß (links) und Luftporengehalt im Frischbeton (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation der feinen Gesteinskörnung (SI-SIII)
 Consistency (left) and air void content in the fresh concrete (right) of the concrete compositions investigated with 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 ₃₀₀ (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

schen 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/m² (SIII) bis 274 g/m² (SI) nach 28 Frost-Tau-Wechseln beobachtet werden. Dagegen zeigen die vergleichbaren klassischen LP-Betone Abwitterungsmengen in einem Wertebereich von 382 g/m² (SI) bis 552 g/m² (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/m²) bei den SAP-Betonen und der LP-Beton die geringste Abwitterung (382 g/m²) 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/m² 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 A₃₀₀ 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

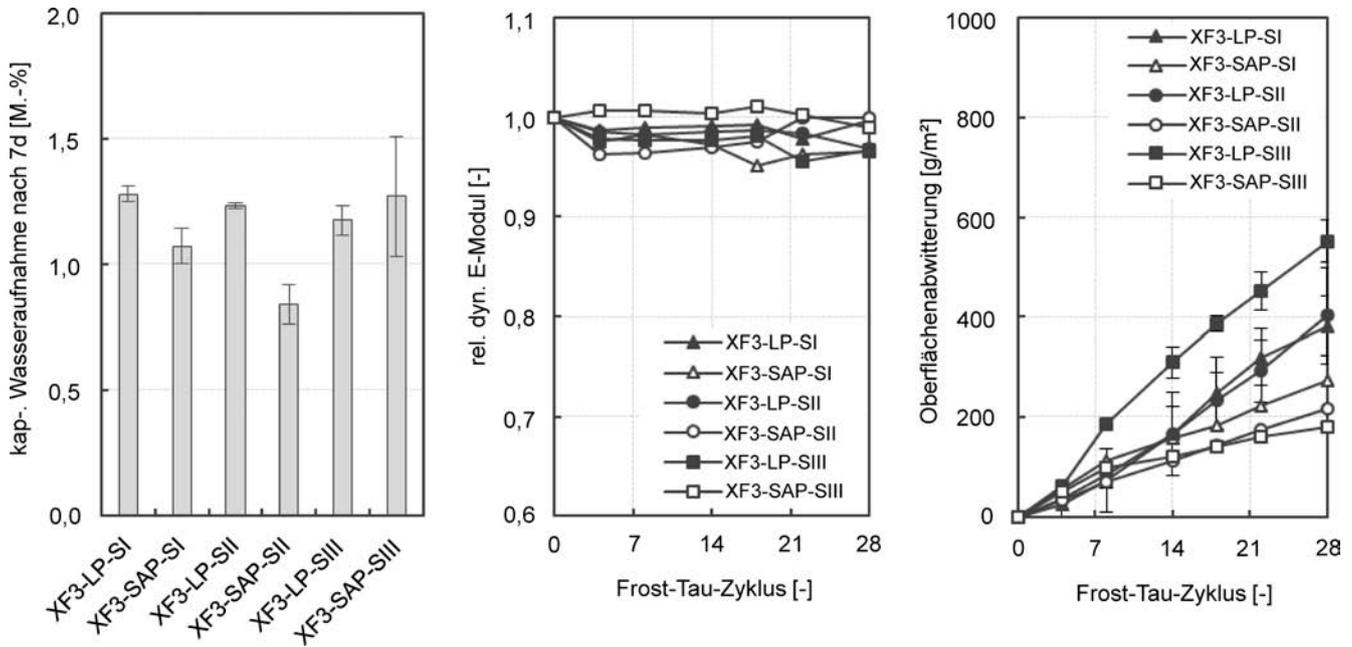


Bild 5 Kapillare Wasseraufnahmekapazität nach 7 d (links), relativer dynamischer E-Modul (Mitte) und Oberflächenabwitterung (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation der feinen Gesteinskörnung (SI–SIII)
 Capillary water absorption capacity after 7 d (left), 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)

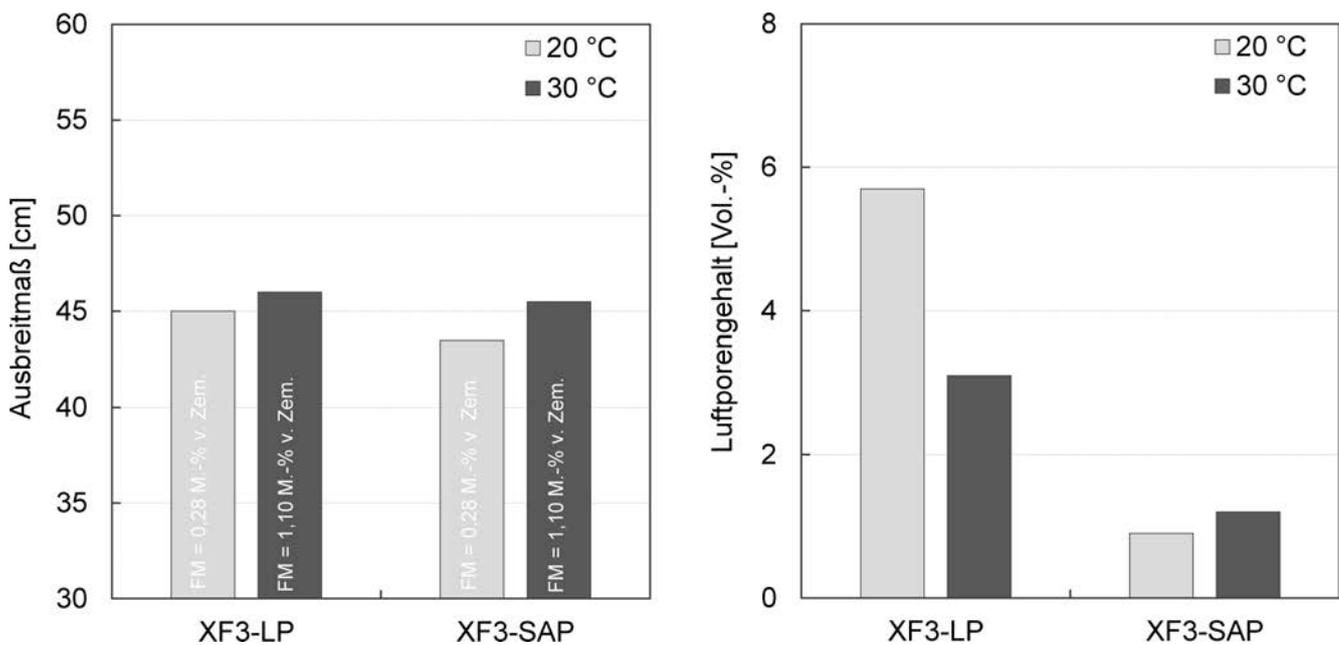


Bild 6 Ausbreitmaß (links) und Luftporengehalt im Frischbeton (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation der Frischbetontemperatur (20°C und 30°C)
 Consistency (left) and air void content in the fresh concrete (right) of the concrete compositions investigated 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/m² 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 ₃₀₀ (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

schen dem Luftporengehalt im Frischbeton und dem berechneten theoretischen Porenvolumen (ΔLP_{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 ΔLP_{A-FB} -Werten theoretisch ein Luftporenanteil von ca. 3,6 Vol.-% rauskommen. Die ermittelten ΔLP_{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 ΔLP_{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 ΔLP_{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 Betonem 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-

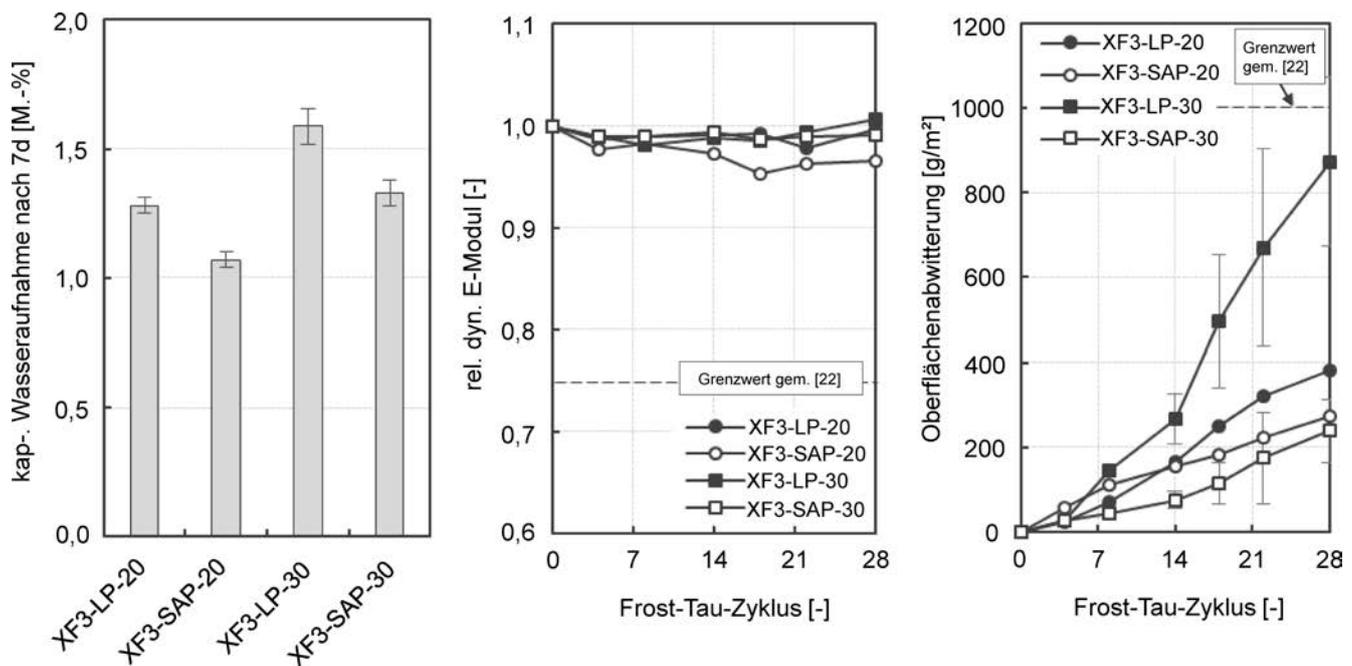


Bild 7 Kapillare Wasseraufnahmekapazität nach 7 d (links), relativer dynamischer E-Modul (Mitte) und Oberflächenabwitterung (rechts) der untersuchten Betonzusammensetzungen mit LP-Bildner und SAP unter Variation der Frischbetontemperatur (20°C und 30°C)
Capillary water absorption capacity after 7 d (left), 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)

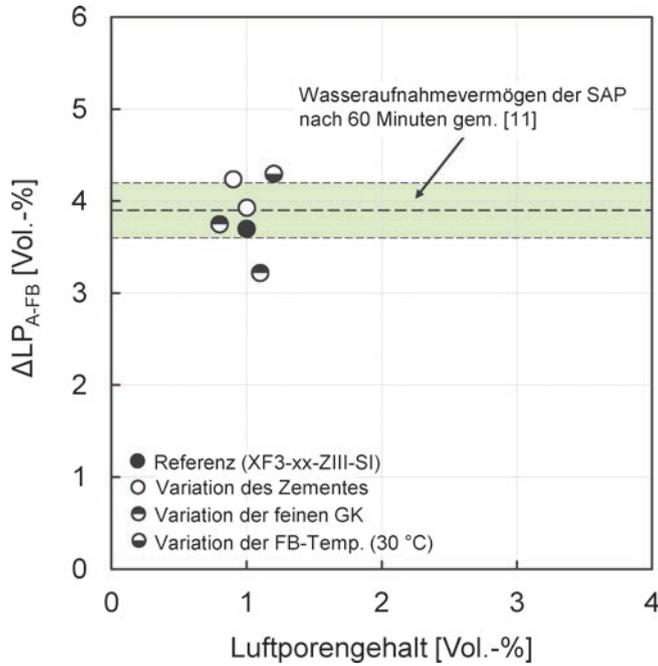


Bild 8 Gegenüberstellung des berechneten ΔLP_{A-FB} -Werts (von den SAP in den Festbeton eingeführtes Luftporenvolumen) und des Luftporengehalts im Frischbeton aller untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation der Ausgangsstoffe (Zement oder feine Gesteinskörnung) und der Umgebungsbedingungen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

Comparison of the calculated ΔLP_{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

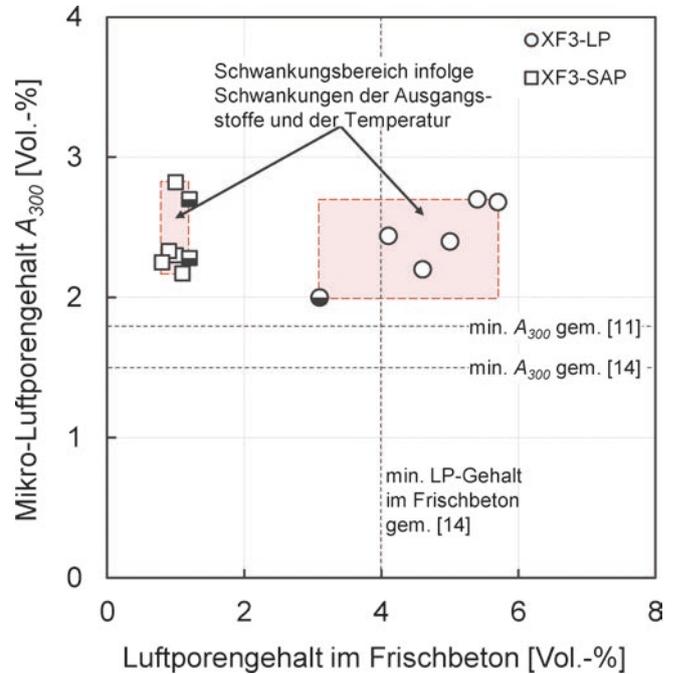


Bild 9 Gegenüberstellung des Mikro-Luftporengehalts A_{300} und des Luftporengehalts im Frischbeton aller untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation der Ausgangsstoffe (Zement oder feine Gesteinskörnung) und der Umgebungsbedingungen (Temperatur)

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)

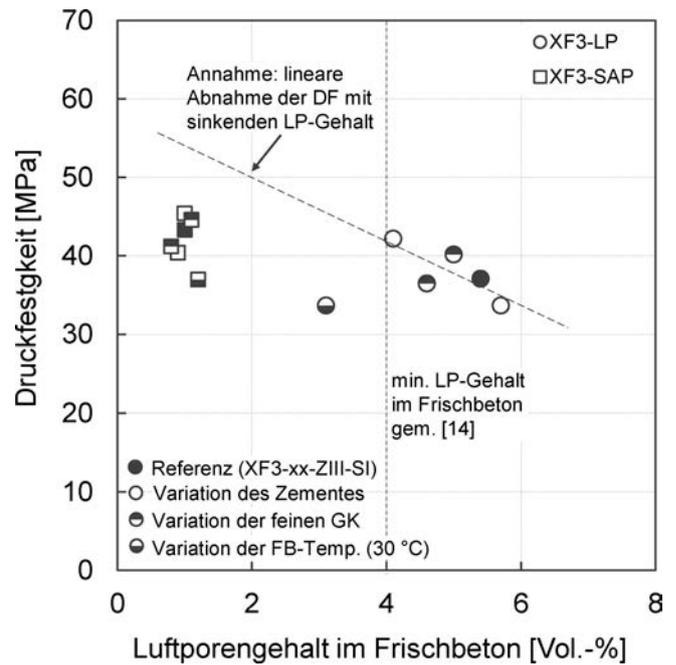


Bild 10 Druckfestigkeit nach 28 d in Abhängigkeit vom Luftporengehalt im Frischbeton aller untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation der Ausgangsstoffe (Zement oder feine Gesteinskörnung) und der Umgebungsbedingungen (Temperatur)

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

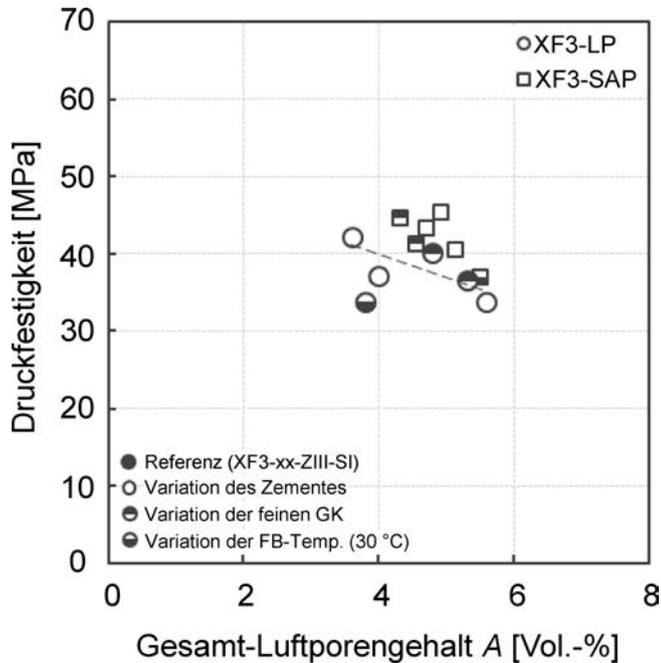


Bild 11 Druckfestigkeit nach 28 d in Abhängigkeit vom Gesamt-Luftporengehalt A im Festbeton aller untersuchten Betonzusammensetzungen unter Variation der Ausgangsstoffe (Zement oder feine Gesteinskörnung) und der Umgebungsbedingungen (Temperatur)
Compressive strength (28 d) as a function of the air void 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: Frischbetonrohddichte*. 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.