

Neue Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Beton mit Steinkohlenflugasche

erschieden in

beton
Verlag Bau + Technik

Ausgabe 1+2/2001

Untersuchungsergebnisse zum normalfesten Beton

Neue Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Beton mit Steinkohlenflugasche

Peter Schießl, München; Udo Wiens und Petra Schröder, Aachen; Christoph Müller, Düsseldorf

In den vergangenen Jahren wurden im Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen eine Reihe größerer Forschungsprojekte mit dem Ziel durchgeführt, die Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Betonen mit Steinkohlenflugasche (SFA) zu erweitern. Dabei standen im Wesentlichen Untersuchungen zum Verhalten flugaschehaltiger Betone (normalfeste und hochfeste Betone) gegenüber Beton und Stahl angreifenden Stoffen im Vordergrund. Prinzipiell konnte gezeigt werden, dass flugaschehaltige Betone mit normaler und hoher Druckfestigkeit für eine Reihe von Stahlbetonanwendungen, bei denen eine hohe Dichtheit gefordert wird, in besonderem Maße geeignet sind. In diesem Beitrag werden im ersten Teil die Grundlagen und die Untersuchungsergebnisse zum normalfesten Beton mit SFA erläutert. Im zweiten Teil (beton 2/2001) wird ausführlich auf die Ergebnisse zum hochfesten Beton mit SFA eingegangen.

1 Einleitung

Basierend auf den Ergebnissen aus den beiden Forschungsvorhaben „Einfluss von Steinkohlenflugasche (SFA) auf den Sulfatwiderstand von Betonen“ [1] und „Verbesserung des Sulfatwiderstands von Beton durch Steinkohlenflugasche“ [2] wurde in die DAfStb-Richtlinie „Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau“ [3] eine Regelung für die Verwendung von Kombinationen aus Flugasche nach DIN EN 450 und Zement nach DIN 1164-1 als gleichwertiger Ersatz für Zemente mit hohem Sulfatwiderstand aufgenommen. Die Berechtigung für diese Anwendungserweiterung soll durch Langzeituntersuchungen zum Sulfatwiderstand flugaschehaltiger Betone (bis zu neun Jahren) untermauert werden. Die Leistungsfähigkeit flugaschehaltiger Betone im Hinblick auf die chloridinduzierte Korrosion der Bewehrung wurde in [4] untersucht. Hierbei standen sowohl der Eindringwiderstand flugaschehaltiger Betone gegenüber Chlorid als auch die Korrosionsgeschwindigkeiten des Stahls in Beton nach Überschreiten des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts an der Stahloberfläche im Vordergrund. Wie nachfolgend erläutert wird, ist die besondere Charakteristik des Porengefüges flugaschehaltiger Betone ursächlich für den hohen Eindringwiderstand gegenüber Chlorid und für die geringen Korrosionsgeschwindigkeiten des Stahls verantwortlich.

Im Rahmen von neueren Untersuchungen wurde die Möglichkeit geprüft, unter welchen Randbedingungen die Herstellung hochfester Betone mit Steinkohlenflugasche (ohne Silicastaub) möglich ist, mit welchen mechanischen Eigenschaften gerechnet werden kann

[5] und welches Widerstandspotential diese Betone gegenüber korrosivem Angriff aufweisen [6].

Die Verwendung von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff ist mittlerweile seit vielen Jahren etabliert, was neben der praktisch 100%igen Verwertung der 3,9 Mio. t SFA (1999) auch in der ersten europäischen Baustoffnorm für den Betonbereich (DIN EN 450: „Flugasche für Beton“ [7]) zum Ausdruck kommt. Nach zahlreichen Untersuchungen zu verschiedenen betontechnischen und umweltrelevanten Fragestellungen beim Einsatz von SFA kann die Leistungsfähigkeit von Betonen mit SFA weitgehend beschrieben werden. Insbesondere wenn es um eine hohe Dichtheit von Beton gegenüber Beton und Stahl angreifenden Stoffen geht, werden zukünftig vermehrt Hochleistungsbetone zum Einsatz kommen.

Allgemein können Hochleistungsbetone als solche Betone definiert werden, die eine oder mehrere Anforderungen bzw. Eigenschaften in besonderer Weise erfüllen. Unter dem Begriff „Hochleistungsbeton“ lassen sich demnach nicht nur hochfeste Betone mit niedrigen äquivalenten Wasserzementwerten, sondern beispielsweise auch Normalbetone nach DIN 1045 (07.88) [8] mit hohem Widerstand gegenüber Beton oder Stahl angreifenden Stoffen zusammenfassen. Vor diesem Hintergrund sollen im Rahmen dieser Veröffentlichung die Möglichkeiten des Flugascheeinsatzes in normal- und hochfesten Betonen vorgestellt und die Leistungsfähigkeit dieser Betone bezüglich ihrer Dauerhaftigkeitseigenschaften aufgezeigt werden. Es wird sowohl auf Normalbetone üblicher Festigkeitsklassen nach DIN 1045 (07.88) mit

Die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Peter Schießl studierte Bauingenieurwesen an der TU München und promovierte dort 1973. Anschließend war er am Institut für Betonstahl tätig. Von 1985 bis 1998 war er Professor für Baustoffkunde an der RWTH Aachen und Direktor des Instituts für Bauforschung. 1998 übernahm er die Professur für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung an der TU München und die Direktion des Münchner Baustoffinstituts.

Dip.-Ing. Udo Wiens studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Seit 1991 ist er wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen. 1996 übernahm er die Leitung der Arbeitsgruppe „Bindemittel und Beton“. Seine wissenschaftlichen Arbeiten behandeln die Reaktionsmechanismen von Puzzolanen im Beton und die Auswirkung der Verwendung solcher Baustoffe im Beton auf Dauerhaftigkeitseigenschaften wie Eindringwiderstand gegenüber Beton- und Stahl angreifenden Stoffen.

Dipl.-Ing. Petra Schröder studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Seit 1995 ist sie wissenschaftliche Angestellte am Institut für Bauforschung Aachen (ibac) und Mitarbeiterin der Arbeitsgruppe „Bindemittel und Beton“.

Dip.-Ing. Christoph Müller studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Von 1994 bis 2000 war er wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) und Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Bindemittel und Beton. Seit Mai 2000 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf.

Flugaschegehalten bis 60M.-%, bezogen auf die Gesamtmenge von Zement und Flugasche, als auch auf hochfeste Betone >B55 mit Steinkohlenflugasche (ohne Silicastaub) eingegangen. Im Einzelnen werden Ergebnisse zu folgenden Dauerhaftigkeitsuntersuchungen vorgestellt:

- Eindringwiderstand flugaschehaltiger normalfester Betone und hochfester Betone gegenüber Chlorid
- Korrosionsgeschwindigkeiten von Stahl in flugaschehaltigen normalfesten Betonen
- Langzeitwiderstand von Normalmörteln mit verschiedenen Zement/Flugasche-kombinationen gegenüber Sulfateinwirkung
- Gaspermeabilität hochfester Betone mit Flugasche
- Frost-Tausalz-Widerstand flugaschehaltiger Betone > B 55

Zusätzlich zu den schwerpunktmäßig dargestellten Dauerhaftigkeitsuntersuchungen werden für die hochfesten Betone mit Steinkohlenflugasche auch eine Reihe von mechanischen Eigenschaften angegeben und mit Werten für hochfesten Beton aus der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [9] verglichen.

2 Ausgangsstoffe

Für die Versuche an hochfesten Betonen >B55 wurden zwei Portlandzemente CEMI 42,5 R und CEMI 52,5 R aus werkmäßiger Produktion eingesetzt. Für die hier vorgestellten Ergebnisse an normalfesten Betonen und Mörteln wurden überwiegend Portlandzemente CEMI 32,5 R sowie punktuell Hochofenzemente CEM III/A 32,5 bzw. CEM III/B 32,5 nach DIN 1164-1 [10] aus unterschiedlichen Herstellwerken verwendet.

Für die Untersuchungen an normalfesten und an hochfesten Betonen kam eine Steinkohlenflugasche mit mittlerer Feinheit aus einem Kraftwerk mit Trockenfeuerung aus unterschiedlichen Produktionschargen zum Einsatz. In den Untersuchungen zum Sulfatwiderstand wurden mehrere Trockenfeuerungsflugaschen sowie eine Flugasche aus einer Schmelzkammerfeuerung verwendet, die hinsichtlich ihrer Feinheit als repräsentativ für Flugaschen aus deutschen Kohlekraftwerken angesehen werden können. Alle Flugaschen erfüllten die Anforderungen der DIN EN 450 [7].

Als Betonzuschlag wurden Rheinkies und -sand aus Beständen des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen verwendet. Die Kornzusammensetzung des Zuschlags entsprach für alle Betone der Sieblinie A 16/B 16 nach DIN 1045 (07.88). Als Betonzusatzmittel für die hochfesten Betone kam ein allgemein bauaufsichtlich zugelassenes Fließmittel zum Einsatz; die Betone normaler Druckfestigkeit wurden ohne Fließmittel hergestellt.

3 Mischungszusammensetzung

Die Flugaschegehalte der Betone, an denen Untersuchungen zum Chlorideindringwiderstand und zur Korrosionsgeschwindigkeit des Stahls durchgeführt wurden, betragen 20M.-%, 40M.-% und 60M.-% bezogen auf

Tafel 1: Zusammensetzung und Frischbetoneigenschaften der Normalbetone und der hochfesten Betone

Zement	z	w	f	g	w (z+f)	f (z+f)	FM ¹⁾	Frischbeton			$\beta_{D,28}^{2)}$
								ρ_f	LP	a	
-	kg/m ³				-	-	M.-%	kg/m ³	Vol.-%	mm	N/mm ²
CEM I 32,5 R	360	180	0	1815	0,50	0	-	2350	1,8	450	48,8
	320	180	80	1770	0,45	0,20	-	2330	1,8	440	46,0
	270	180	180	1697	0,40	0,40	-	2310	1,9	400	45,8
	206	180	309	1590	0,35	0,60	-	2280	2,2	< 350	37,2
CEM I 42,5 R	498	154	0	1718	0,31	0	1,46	2370	3,0	430	76,0
	449	153	50	1719	0,31	0,10	2,75	2370	2,8	430	83,2
	399	152	100	1710	0,30	0,20	2,37	2360	2,8	430	80,5
	349	150	150	1701	0,30	0,30	2,20	2350	2,8	450	80,7
CEM I 52,5 R	502	155	0	1753	0,32	0	2,01	2410	2,3	440	97,4
	451	151	50	1738	0,30	0,10	2,06	2390	2,7	460	94,5
	399	151	100	1720	0,30	0,20	2,01	2370	2,5	450	93,7
	351	151	150	1707	0,30	0,30	2,34	2360	2,4	460	83,6

¹⁾ bezogen auf (z+f)

²⁾ Druckfestigkeit im Alter von 28 d (Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm)

den Gehalt an Zement und Flugasche. Der Wassergehalt aller Betone wurde mit 180 kg/m³ konstant gehalten. Abweichend von den zulässigen Anwendungsregeln für SFA [7] wurde die gesamte Flugasche einheitlich mit einem Wirksamkeitsfaktor von $k = 0,5$ auf den $w/(z+k \cdot f)$ -Wert angerechnet. Bei einem konstantem $w/(z+k \cdot f)$ -Wert von 0,50 wurden für alle Betone, mit Ausnahme des Betons mit Portlandzement CEMI 32,5 R und 60M.-% Flugasche, etwa die gleichen 28-Tage-Druckfestigkeiten wie bei den entsprechenden Vergleichsmischungen ohne SFA erreicht (Tafel 1). Zur weiter gehenden Interpretation der Ergebnisse wurden Versuche zum Diffusionswiderstand gegenüber Chlorid (Migrationsversuche) an Mörteln durchgeführt. Die Herstellung dieser Mörtelmischungen erfolgte in Anlehnung an DIN EN 196-1. Dabei wurde Normsand 0,08/2 mm verwendet. Die Bindemittelzusammensetzung und die äquivalenten Wasserzementwerte ($w/(z+0,5f)$) der Mörtel- und Betonmischungen waren identisch.

Der Sulfatwiderstand wurde an Mörteln nach DIN EN 196-1 mit Hilfe des Flachprismenverfahrens ermittelt. Dabei wurden bei konstantem äquivalenten Wasserzementwert von $w/(z+f) = 0,50$ Mischungen ohne und mit jeweils 40M.-% SFA verglichen.

Da bisher wenig Erfahrungen mit der Herstellung hochfester flugaschehaltiger Betone vorliegen, wurden in Vorversuchen zunächst die Mischungszusammensetzungen hochfester Betone mit SFA (ohne Silicastaub) bei unterschiedlichen Bindemittelgehalten und verschiedenen $w/(z+f)$ -Werten (<0,35) untersucht [5]. Hierbei stand neben der Zielgröße „möglichst hohe Druckfestigkeit“ vor allem das Erreichen verarbeitbarer Betone bei moderater Dosierung des gewählten Fließmittels im Vordergrund.

Auf der Grundlage dieser Vorversuche wurde zur Herstellung der Betone ohne und mit SFA unter oben genannten Randbedingungen ein einheitlicher Gehalt an Zement und Steinkohlenflugasche von 500 kg/m³

festgelegt. Bei Zementgehalten zwischen 350 kg/m³ und 500 kg/m³ wurden Flugaschegehalte ($f/(z+f)$) von 0M.-% bis 30M.-% gewählt. Der Wassergehalt wurde mit 150 kg/m³ so gewählt, dass Regelkonsistenz KR nach DIN 1045 (07.88) bei moderater Fließmitteldosierung einstellbar war. Die Mischungen wiesen unter Berücksichtigung des Fließmittels äquivalente Wasserzementwerte $w/(z+f)$ zwischen 0,30 und 0,32 auf. Tafel 1 enthält die Zusammensetzung der untersuchten normalfesten und der hochfesten Betone.

4 Untersuchungsmethoden

4.1 Festigkeits- und Verformungsverhalten

Die Lagerung der Probekörper und Prüfung der Druck- bzw. Spaltzugfestigkeit der Betone erfolgten nach DIN 1048-5 [11] an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm bzw. an Balken mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x 500 mm. Zur Ermittlung der Druckspannungs-Dehnungs-Beziehungen wurden jeweils drei Zylinder mit den Abmessungen $D = 150$ mm, $H = 300$ mm hergestellt, die ebenfalls nach DIN 1048-5 gelagert und geprüft wurden. Die Ermittlung des statischen E-Moduls E_b aus diesen Druckversuchen erfolgte gleichermaßen nach DIN 1048-5. Zur Bestimmung des Verlaufs der Spannungs-Dehnungs-Linie oberhalb von $\beta_D/3$ wurden die Probekörper bis zum Bruch belastet, und es wurden die Druckfestigkeit sowie die Bruchdehnung ermittelt.

Für die lastgesteuerten Versuche zur Ermittlung der Zugspannungs-Verformungs-Beziehungen wurden je Mischung fünf Zylinder ($D = 150$ mm; $H = 300$ mm) hergestellt. Die Probekörper lagerten 1 Tag in der Schaltung in der Nebelkammer und anschließend bis zur Prüfung unter Wasser bei 20 °C. Die zentrische Zugfestigkeit der Betone wurde nach dem in [12] beschriebenen Verfahren im Alter von 28 Tagen bestimmt.

Das Kriech- und das Schwindmaß (Trocknungsschwinden) wurden nach den in [12] angegebenen Prüfverfahren an Betonzy-

lindern mit den Abmessungen $D=150\text{ mm}$ und $H=300\text{ mm}$ ermittelt (Lagerung: 1 Tag in der Schalung in der Nebelkammer, 6 Tage unter Wasser bei 20°C und anschließend bis zur Prüfung im Normalklima $20^\circ\text{C}/65\%$ relativer Feuchte [r.F.]). Im Alter von 28 Tagen wurden die Prüfkörper für die Kriechversuche in die Prüfeinrichtung eingebaut und mit einer Kriechspannung $\beta_D/3$ belastet. Die Nullmessung bei den Schwindversuchen erfolgte im Alter von 7 Tagen, unmittelbar nach der Beendigung der Wasserlagerung.

4.2 Dauerhaftigkeit

Zur Ermittlung des Eindringwiderstands gegenüber Chlorid wurden Einlagerungs- und Diffusionsversuche (Schnelltest) in NaCl-Lösung an Normalbetonen und hochfesten Betonen mit SFA durchgeführt. Bei den Einlagerungsversuchen verblieben die Prüfkörper im Anschluss an die 7-tägige Feuchtlagerung nach der Herstellung bis zur Prüfung im Normalklima $20^\circ\text{C}/65\%$ r.F. Im Alter von 28 Tagen bzw. 91 Tagen wurden die Prüfkörper in eine 3%ige NaCl-Lösung eingelagert. Im Anschluss an den jeweiligen Beaufschlagungszeitraum wurden Bohrmehlproben in verschiedenen Abständen von der Oberfläche aus dem Prüfkörper entnommen. Zur Bestimmung des Chloridgehalts wurde das Bohrmehl bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet und $< 125\ \mu\text{m}$ gemahlen. Die Analyse des Gesamtchloridgehalts wurde in Anlehnung an das in [13] beschriebene Verfahren durchgeführt.

Neben den Einlagerungsversuchen wurden so genannte Migrationstests zur Ermittlung von Chloriddiffusionskoeffizienten durchgeführt. Die Prüfkörper wurden nach der eintägigen Lagerung in der Schalung in der Nebelkammer bis zur Prüfung wassergelagert, um kapillares Saugen zu vermeiden. Der Versuchsaufbau und die Bestimmung der Migrationskoeffizienten sind in [14, 15] detailliert beschrieben und dargestellt. Der Vorteil dieses Schnellverfahrens liegt darin, dass aufgrund der vergleichsweise kurzen Versuchsdauer der momentane Diffusionskoeffizient des Betons ermittelt werden kann, der – anders als ein aus Einlagerungsversuchen ermittelter Diffusionskoeffizient – nicht durch zeitliche Änderungen des Gefügewiderstands über den Beaufschlagungszeitraum, beispielsweise infolge der Bildung von Hydratationsprodukten, beeinflusst wird. Auf diese Weise wird eine realistische zeitliche Abbildung des Diffusionswiderstands von Beton erst möglich. Die Erfassung der Stahlkorrosion in Beton erfolgte über die Messung von Elementströmen und Elektrolytwiderständen mit Hilfe von Korrosionszellen, die ebenfalls ausführlich in [15] vorgestellt werden. Den Frischbetonen wurde einheitlich 1 M.-% Chlorid, bezogen auf den Zementgehalt (z), zugegeben.

Für die Beurteilung der Sulfatwiderstandsfähigkeit der verschiedenen Zement-Flugasche-Kombinationen wurde das Flachprismenverfahren verwendet [16, 17]. Zur Bewertung des Sulfatwiderstands werden bei diesem Verfahren die Dehnungsdifferen-

zen zwischen Mörtelprismen (Flachprismen $10\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 160\text{ mm}$) herangezogen, die in einer Sulfatlösung ($30\,000\text{ mg SO}_4^{2-}/\text{l}$) bzw. in Wasser lagern.

Als Kennwert für die Dichtheit der hochfesten Betone wurde der Gaspermeabilitätskoeffizient herangezogen. Zur Ermittlung der Gaspermeabilitätskoeffizienten wurden Scheiben ($D/H = 150/50\text{ mm}$) verwendet, die im Alter von 14 Tagen, 28 Tagen und 90 Tagen geprüft wurden. Die Betonscheiben wurden im jeweiligen Prüfalter bei 105°C bis zur Massekonstanz getrocknet, um den Hydratationsfortschritt zu verhindern. Die Versuchsdurchführung wurde an der institutseigenen Messeinrichtung durchgeführt, die mit der in [18] beschriebenen Anlage vergleichbar ist. Um den Einfluss der Nachbehandlung zu untersuchen, wurden die Prüfkörper unter folgenden Randbedingungen gelagert:

L2: 1 Tag in der Schalung in der Nebelkammer, 1 Tag Wasserlagerung und anschließend bis zur Prüfung im Normalklima $20^\circ\text{C}/65\%$ r.F.

L7: 1 Tag in der Schalung in der Nebelkammer, 6 Tage Wasserlagerung und anschließend bis zur Prüfung im Normalklima $20^\circ\text{C}/65\%$ r.F.

L2F: 1 Tag in der Schalung in der Nebelkammer, 1 Tag Wasserlagerung und anschließend bis zur Prüfung eingepackt in Folie bei einer Temperatur von 20°C .

Der Frost-Tausalz-Widerstand (FTSW) der hochfesten Betone wurde mit dem CDF-Test (Capillary Suction of De-Icing Chemical and Freeze-Thaw Test) ermittelt. Die Lagerung und Prüfung der verwendeten Platten mit einer Kantenlänge von 150 mm und einer Dicke von 75 mm erfolgten nach dem in [19] beschriebenen Verfahren. Als Prüffläche wurde die Schallfläche genutzt, die in der Schalung einer Teflonscheibe ohne Schalöl zugewandt war. Nach 6, 14 und 28 Frost-Tau-Wechseln wurde die Abwitterung der Prüfkörper durch Filtration der Prüflösung, Trocknung des Filtrerrückstands und nachfolgender Wägung bestimmt. Um lose anhaftendes Material mit zu erfassen, wurden die Prüfbehälter vorher für zwei Minuten in ein Ultraschallbad gestellt.

5 Ergebnisse zum Beton normaler Festigkeit mit SFA

5.1 Chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton – Allgemeines

Die Nutzungsdauer („Service-life“) von Betonbauwerken, die durch Chlorid bean-

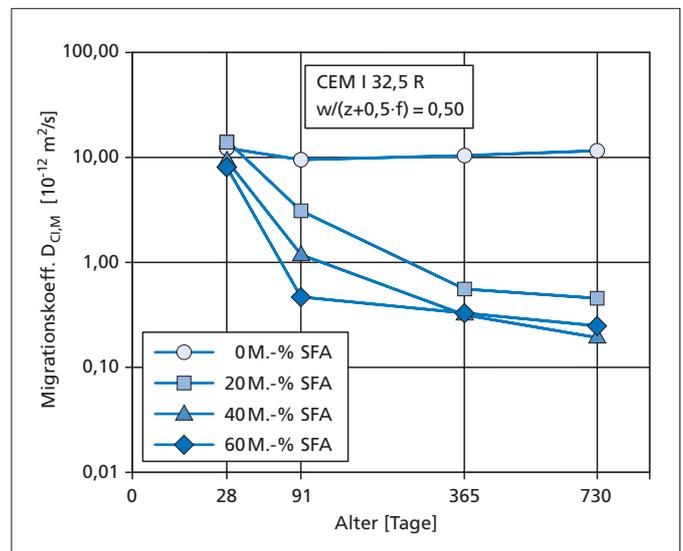


Bild 1: Einfluss des Flugaschegehalts auf die zeitliche Entwicklung des Migrationskoeffizienten von Normalmörteln

sprucht werden (z.B. Bauwerke im Meerwasserbereich, Parkdecks, Piers etc.), hängt in besonderem Maße von der Qualität der Betondeckung ab. Der gesamte Zeitraum, bis zu dem der Zerstörungsgrad der Bewehrung durch die Stahlkorrosion Instandsetzungsmaßnahmen an einem Bauwerk erforderlich macht, lässt sich in zwei Phasen unterteilen:

- Phase 1: „Einleitungsphase“: Zeitraum bis zur Zerstörung des Passivfilms durch Überschreiten des kritischen Chloridgehalts an der Stahloberfläche bzw. durch Vordringen der Karbonatisierungsfront an die Stahloberfläche.
- Phase 2: „Zerstörungsphase“: Zeitraum, bis Instandsetzungsmaßnahmen für das Bauteil durch Schädigung infolge der Stahlkorrosion erforderlich werden.

Die Sicherstellung eines dichten Gefüges in der Betondeckung führt zu einer Verlängerung der Einleitungs- und der Zerstörungsphase, da sowohl die Eindringgeschwindigkeit für Chlorid (oder CO_2 bei der karbonatisierungsinduzierten Korrosion) als auch die Korrosionsgeschwindigkeiten des Stahls nach Überschreiten des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts an der Stahloberfläche verringert werden.

5.2 Eindringwiderstand flugaschehaltiger Betone gegenüber Chlorid

Im Folgenden soll zunächst auf die Auswirkung der Flugaschezugabe auf den Eindringwiderstand gegenüber Chlorid eingegangen werden (Phase 1 in Abschnitt 5.1). Bild 1 zeigt die zeitliche Entwicklung der Migrationskoeffizienten $D_{\text{Cl,M}}$ für den CEM I 32,5 R mit unterschiedlichen Flugaschegehalten. Bei dem gewählten Ansatz etwa gleicher 28-Tage-Druckfestigkeiten (Tafel 1) zeigt sich, dass im Alter von 28 Tagen, unabhängig vom Flugaschegehalt, ein etwa gleicher Cl^- -Diffusionswiderstand gegenüber Chlorid wie bei der entsprechenden reinen PZ-Mischung erzielt wird. Während die Migrationskoeffizienten für den Portlandzement über den un-

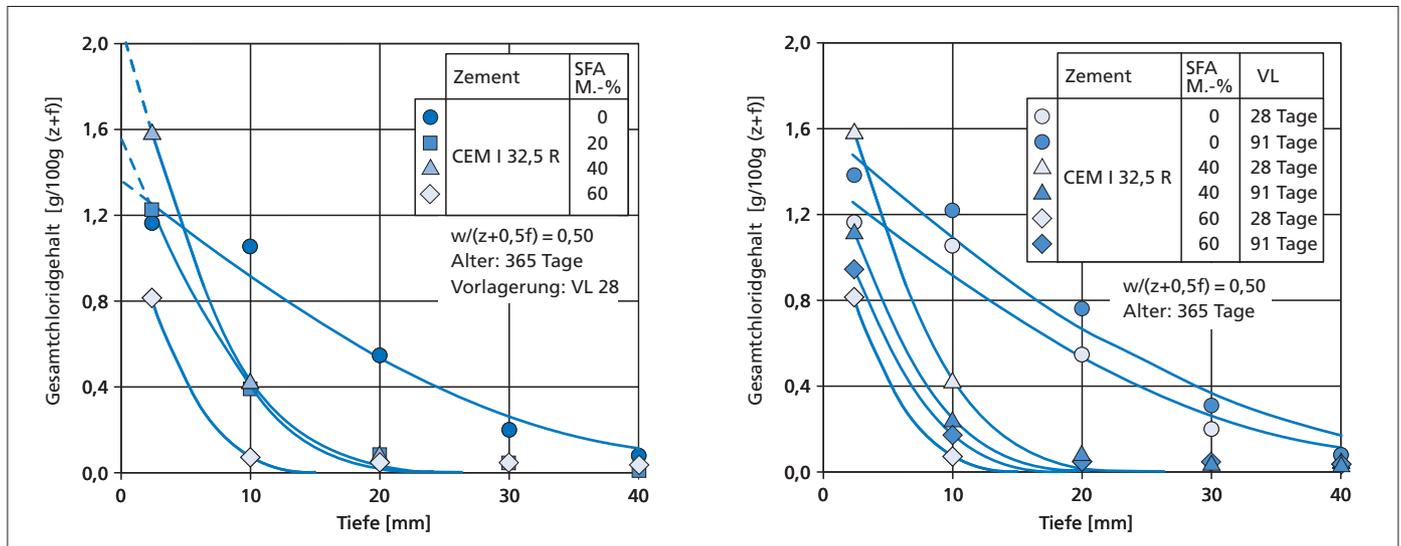


Bild 2: Einfluss des Flugaschegehalts (links) und der Nachbehandlung (rechts) auf das Chloridprofil von Beton; Alter der Betone 365 Tage; VL 28 bzw. VL 91: Beaufschlagung der Prüfkörper im Alter von 28 Tagen bzw. 91 Tagen

tersuchten Zeitraum von 730 Tagen nahezu unverändert bleiben, verringern sich die Migrationskoeffizienten für die flugaschehaltigen Mischungen ab einem Alter von 91 Tagen mit zunehmendem Flugaschegehalt deutlich. Interessant ist, dass die im Alter von 91 Tagen zu beobachtende starke Abhängigkeit des Migrationskoeffizienten von dem Flugaschegehalt nach 365 Tagen bzw. 730 Tagen praktisch nicht mehr gegeben ist. Für die Mischungen mit 40 M.-% bzw. 60 M.-% SFA werden zu diesen Zeitpunkten annähernd die gleichen Migrationskoeffizienten gemessen.

Die wesentliche Ursache für die starke Zunahme des Diffusionswiderstands der flugaschehaltigen Mischungen ist in Gefügeänderungen durch die puzzolanische Reaktion der Flugasche zu suchen. Durch CSH-Phasen aus der Reaktion der SFA wird die Kontinuität des Kapillarporensystems wirksam unterbrochen [20]. Diese spezielle Wirkung der Flugasche wird mit dem Begriff „poreblocking effect“ umschrieben [21]. Der Kapillarporenraum wird durch diese Wirkung nicht oder nur in geringem Maße reduziert, jedoch werden bestimmte Porenanteile für den Transport von Medien nicht mehr zugänglich. Dieser „poreblocking effect“ ist nicht nur charakteristisch für Betone mit SFA, sondern findet sich auch in Mischungen mit Hochofenzement. Die Produkte, die bei der Reaktion dieser Stoffe entstehen, schlagen sich insbesondere im Bereich von Poreneingängen bzw. Porenkanälen nieder, so dass das Eindringen bzw. Durchfließen des dahinter liegenden Porenraums behindert wird oder gar nicht mehr möglich ist.

Die Einlagerungsversuche in Chloridlösung bestätigen im Prinzip den höheren Eindringwiderstand flugaschehaltiger Betone. Bild 2 zeigt den Einfluss des Flugaschegehaltes (links) und die Auswirkung unterschiedlicher Vorlagerungsbedingungen (rechts) auf das Eindringen von Chloridlösung in den Beton. Als Bezug für den Chloridgehalt wurde die Gesamtmenge an Zement und Flugasche

gewählt, da in der Regel der Chloridgehalt für Hochofenzemente oder Flugaschezemente auch nicht auf den Klinkergehalt, sondern auf den Zementgehalt bezogen wird. Der Zementgehalt als Bezugsbasis für den Chloridanteil im Beton wird in der Regel deshalb gewählt, weil unterstellt wird, dass lediglich der Zement eine gewisse Chloridbindefähigkeit besitzt. Bei Bezug der Chloridgehalte auf die gesamte Menge (z+f) wird demnach der Flugasche hinsichtlich der Chloridbindung eine gleichwertige Wirkung zugesprochen. Mit zunehmendem Flugaschegehalt ergeben sich im Vergleich zum reinen Portlandzement bereits bei einer Tiefe von 10 mm deutlich verringerte Chloridgehalte, was auf die merkliche Reduktion der Transportgeschwindigkeiten für Chlorid infolge der puzzolanischen Reaktion der Flugasche hindeutet. Im Abstand von 20 mm von der Betonoberfläche wird bei allen Flugaschegehalten bereits der natürliche, durch die Ausgangsstoffe in den Beton eingetragene Chloridgehalt erreicht.

Die Chloridprofile bestätigen damit grundsätzlich den Verlauf der Migrationskoeffizienten aus Bild 1. Vergleicht man die rechnerischen Chloridgehalte an der Betonoberfläche (gestrichelte Verlängerung der Kurven in Bild 2, links), die sich aus der Anwendung des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes zur rechnerischen Ermittlung der Chloridprofile ergeben, so wird deutlich, dass die Mischungen mit 20 M.-% und 40 M.-% SFA höhere Chloridgehalte an der Oberfläche aufweisen als die Nullmischung ohne SFA. Unter der Annahme, dass in der Porenlösung für alle Betone die Konzentration der freien Chloridionen gleich ist und der Chloridkonzentration der anstehenden Lösung entspricht, deutet das auf eine erhöhte Bindefähigkeit der Flugasche für Chlorid hin. Dies konnte auch im Rahmen von Zementsteinuntersuchungen zum Einfluss von SFA auf die Chloridbindung nachgewiesen werden [22]. Für den Beton mit 60 M.-% SFA ist keine Extrapolation für den Chloridgehalt an

der Oberfläche möglich, da hier nur ein „echter“ Messwert vorliegt, weil bereits in einer Tiefe von rd. 10 mm nahezu der natürliche Chloridgehalt des Betons erreicht wird.

Eine längere Trockenlagerung bei 20 °C/65 % r.F. vor der Chloridbeaufschlagung bewirkt eine höhere Chloridaufnahme des Betons durch Kapillarkräfte. Die Auswirkung unterschiedlicher Trocknungszeiten (VL 28 bzw. VL 91) auf das Eindringverhalten von Chlorid in Beton ohne und mit SFA wurde daher ebenfalls untersucht und ist in Bild 2 (rechts) dargestellt. Aufgrund der in der Praxis vorkommenden starken jahreszeitlichen Schwankungen in der Umgebungsfuchte und damit auch im Feuchtegehalt in der Betonrandzone ist dieser Aspekt von direktem baupraktischen Interesse. Für den Referenzbeton und den Beton mit 60 M.-% SFA ergaben sich trotz kürzerer Gesamtbeaufschlagungsdauer durch die vermehrte Chloridaufnahme in der trockeneren Randzone mit längerer Vorlagerungsdauer höhere Chloridgehalte, während der Beton mit 40 M.-% SFA ein umgekehrtes Verhalten zeigt.

Insgesamt weisen die Betone mit SFA auch bei längerfristiger trockener Vorlagerung einen deutlich höheren Chlorideindringwiderstand auf als der Referenzbeton ohne SFA. Dies zeigt, dass durch die Produkte aus der puzzolanischen Reaktion der SFA auch in einer vergleichsweise trockenen Betonrandzone noch eine wirksame Abschottung des Porengefüges gegen eindringendes Chlorid möglich ist.

Die Erkenntnisse spiegeln das Verhalten flugaschehaltiger Betone in der Praxis wider. In Feldversuchen wurden aus zahlreichen chloridbeaufschlagten Betonbauwerken Bohrmehlproben entnommen, tiefenabhängig die Chloridgehalte bestimmt, die Ergebnisse im Rahmen eines durch die EG geförderten Forschungsvorhabens in eine Datenbank eingespeist und statistisch ausgewertet [23]. Weitgehend unabhängig von den jeweiligen Umgebungsbedingungen des Bauwerks

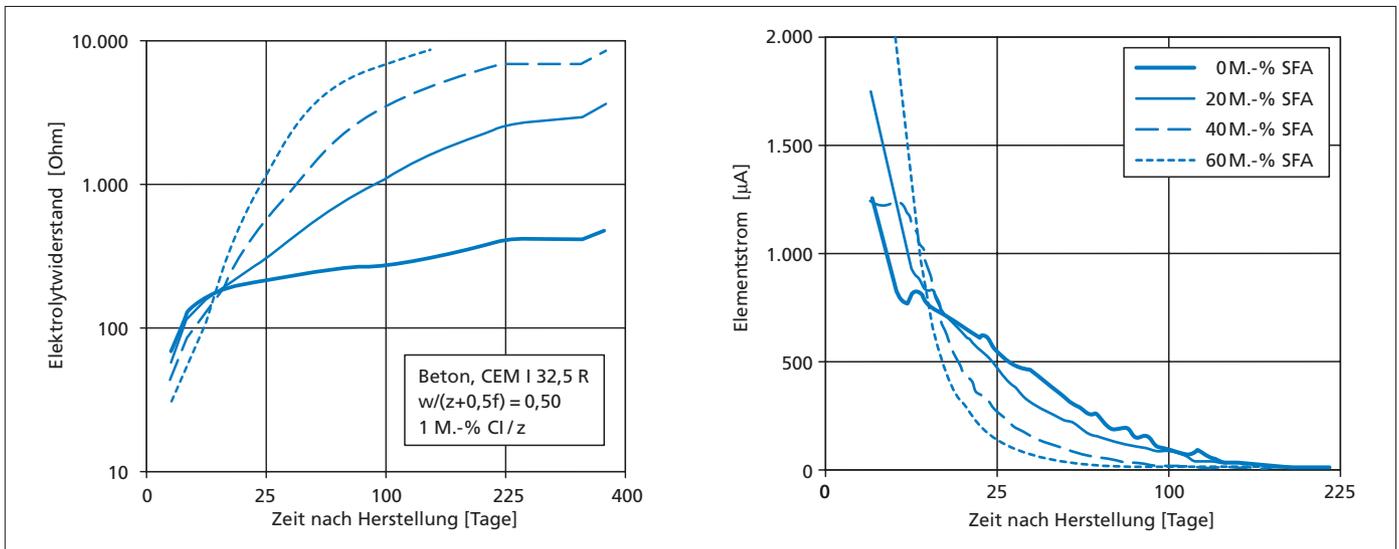


Bild 3: Zeitliche Entwicklung des Elektrolytwiderstands und der korrespondierenden Elementströme; Beton mit CEM I 32,5 R und unterschiedlichen SFA-Gehalten

lagen die Chloridkonzentrationen in der oberflächennahen Schicht bei flugaschehaltigen Betonen im Vergleich zu Betonen mit Portlandzement höher (= höhere Chloridbindekapazität) und fielen dann – bedingt durch den hohen Chloriddiffusionswiderstand – schnell auf den natürlichen Chloridgehalt ab.

5.3 Korrosionsgeschwindigkeiten des Stahls in flugaschehaltigen Betonen

Die Dichtigkeit des Porengefüges ist in gleichem Maße für den Transport von Chloridionen wie auch für wesentliche Teilprozesse, die bei der Korrosion von Stahl im Beton eine Rolle spielen, entscheidend (s. Phase 2 in Abschnitt 5.1). Einer der wesentlichen Teilprozesse ist der Ladungstransport von Ionen zwischen anodisch und kathodisch wirkenden Stahlflächen, der durch den Widerstand des Elektrolyten (in diesem Fall der Beton) bestimmt ist. Bild 3 (links) zeigt die zeitliche Entwicklung des Elektrolytwiderstands für Betone mit CEM I und unterschiedlichen Flugaschegehalten. Im rechten Teil des Bilds 3 sind die korrespondierenden Elementströme aufgetragen, die als Maß für die Korrosionsgeschwindigkeit des Stahls angesehen werden können. Bis zu einer Hydratationsdauer von rd. 10 Tagen liegen die Elektrolytwiderstände der SFA-Betone unterhalb der Widerstände des Referenzbetons; entsprechend höher fallen die Elementströme für die SFA-Betone aus. Ursache für die höheren Elementströme mit zunehmendem Flugaschegehalt ist das in der Frühphase der Hydratation durchlässigere Porengefüge infolge der höheren Gesamtporosität der Mischungen mit SFA im Vergleich zur Referenzmischung [15]. Nach rd. 20 Tagen kommt es mit zunehmendem Flugaschegehalt zu einem starken Anstieg der Widerstände. Untersuchungen von Hårdtl [20] sowie Sybertz und Wiens [24] zeigen, dass bis zu diesem Zeitpunkt zwar eine gewisse Menge $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durch die puzzolanische Reaktion der Flug-

asche zu Hydratationsprodukten umgesetzt wurde, die absolute Menge an Hydratationsprodukten aber kaum ausreichen kann, um die Kapillarporosität so stark herabzusetzen, dass damit der deutliche Anstieg des Elektrolytwiderstands mit steigendem Flugaschegehalt erklärbar wäre. Vielmehr scheint bereits eine geringe Menge an Produkten aus der puzzolanischen Reaktion, die sich auf der Oberfläche bzw. in der Nähe der Flugaschepartikel bilden, auszureichen, um die Kontinuität des Porensystems so weit zu unterbrechen, dass der Ionentransport durch die Matrix drastisch reduziert wird („poreblocking effect“).

Mit zunehmendem Alter verringert sich der Anstieg des Elektrolytwiderstands in den flugaschehaltigen Mischungen. Die Bildung von weiteren Reaktionsprodukten verlangsamt sich aufgrund des dichten Porengefüges mehr und mehr. Der Austausch von Reaktionspartnern zwischen der unreaktierten Flugascheoberfläche und der Porenlösung läuft aufgrund der dichten Hydrathülle im Wesentlichen diffusionskontrolliert ab. Korrespondierend zum starken Anstieg der Elektrolytwiderstände über ein Alter von 20 Tagen hinaus kommt es in den SFA-Betonen zu einem drastischen Abfall der Korrosionsströme (Bild 3, rechts). Baupraktisch bedeutet dies, dass durch die Verwendung von SFA sowohl die Einleitungs- als auch die Zerstörungsphase der chloridinduzierten Korrosion von Stahl in Beton verlängert werden kann. Diese Erkenntnis kann u.a. bei der Lebensdauerbemessung von chloridbeanspruchten Bauwerken aus Beton Verwendung finden.

5.4 Sulfatwiderstand

Eine weitere mögliche Umwelteinwirkung stellt die Beanspruchung eines Betonbauteils durch Sulfat dar. Generell können bei längerfristiger Einwirkung von sulfathaltigen Böden oder Wässern Betone üblicher Zusammensetzung so angegriffen und geschädigt werden, dass eine Einschränkung der Ge-

brauchsfähigkeit und Tragfähigkeit des Betons eintreten kann. Dabei reagieren im Wesentlichen die im Zementstein vorhandenen aluminathaltigen Phasen in hydratisierter und unhydratisierter Form (im Wesentlichen C_3A) sowie Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mit dem Sulfat. Als Reaktionsprodukte können volumenreiche Phasen wie Ettringit, Monosulfat und sekundärer Gips entstehen, die zu einem treibenden Angriff führen. Bei starkem chemischen Angriff sind aus diesem Grund Zemente mit einem hohen Sulfatwiderstand (HS) nach DIN 1164-1 zu verwenden. Bei diesen Zementen handelt es sich entweder um Portlandzemente mit einem C_3A -Gehalt $\leq 3\text{M.}\%$ und einem Al_2O_3 -Gehalt $\leq 5\text{M.}\%$ oder um Hochofenzemente mit mindestens 65M.-% Hüttensand. Da die Diffusionsgeschwindigkeit der Sulfationen maßgeblich von der Dichtigkeit des Porengefüges bestimmt wird, werden nach DIN 1045 der w/z-Wert auf 0,50 und die Wassereindringtiefe auf 30 mm begrenzt.

Eine Reihe von Untersuchungen sowie praktische Erfahrungen belegen, dass der Einsatz von SFA als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 den Sulfatwiderstand von Mörteln und Betonen deutlich verbessern kann [17, 25, 26]. Dies ist auch dann der Fall, wenn Zemente verwendet werden, die für sich gesehen keinen hohen Sulfatwiderstand besitzen. Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse wird die Wirkung der SFA im Zusammenhang mit dem Sulfatwiderstand von Beton im Wesentlichen auf ein dichteres Porengefüge mit höherem Diffusionswiderstand, auf eine Reduktion des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalts durch die puzzolanische Reaktion sowie auf die Verringerung des bindemittelbezogenen C_3A -Gehaltes durch den teilweisen Austausch von Zement gegen Flugasche zurückgeführt.

Im Rahmen zweier größerer Forschungsprojekte [1, 2] wurden umfassende Untersuchungen zur Klärung der Wirkungsmechanismen der SFA bei Angriff durch Sulfate durchgeführt. Dabei stand die Untersuchung

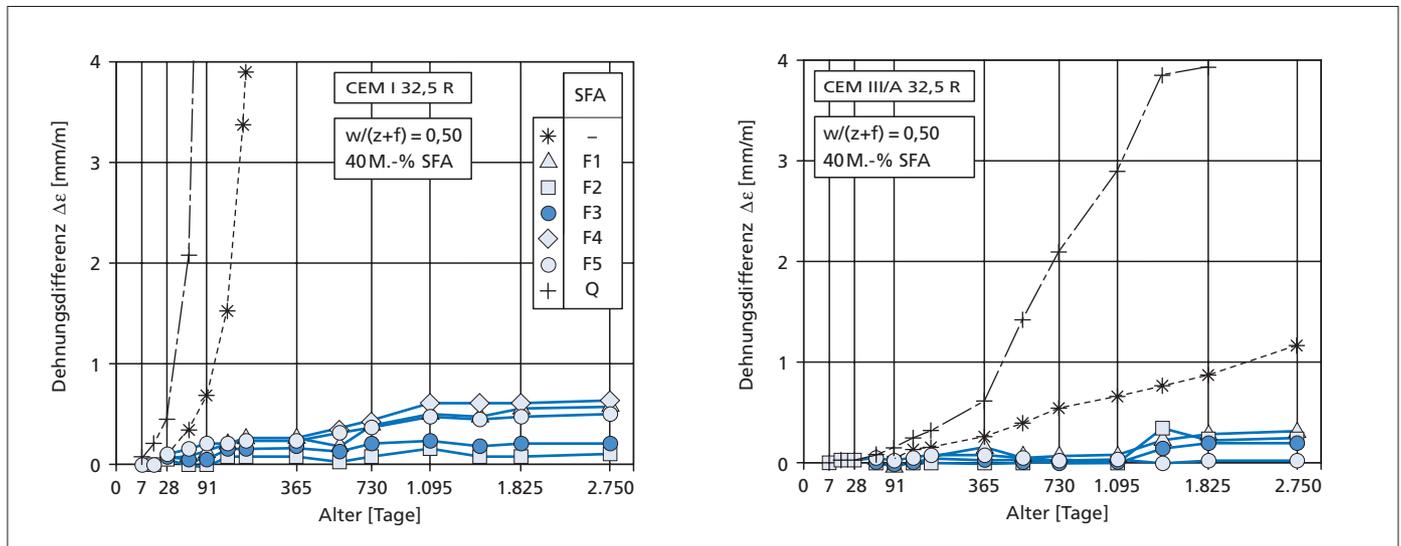


Bild 4: Verlauf der Dehnungsdifferenzen der Mörtel mit CEM I 32,5 R und CEM III/A 32,5 (fünf verschiedene SFA und ein Quarzmehl)

der Wechselwirkungen von verschiedenen Zementen und Flugaschen unter Berücksichtigung ihrer chemischen, mineralogischen und granulometrischen Zusammensetzung im Vordergrund.

In Bild 4 sind exemplarisch aus dem umfangreichen Versuchsprogramm die Dehnungsdifferenzen zwischen in Sulfatlösung und in Wasser gelagerten Prismen von Mischungen mit einem Portlandzement (CEM I 32,5 R) und einem Hochofenzement (CEM III/A 32,5) in Kombination mit fünf unterschiedlichen SFA (vier Trockenfeuerungs- und eine Schmelzkammerflugasche F3) über einen Einlagerungszeitraum von rd. 2.750 Tagen (entspricht rd. 7,5 Jahren) zusammengestellt. Um den Einfluss der puzzolanischen Reaktion der SFA deutlicher herauszustellen, wurde zu Vergleichszwecken ein gemahlenes Quarzmehl etwa gleicher Feinheit als Zusatzstoff eingesetzt (Mischung Q). Bei einem konstanten äquivalenten Wasserzementwert $w/(z+f)$ von 0,50 wurden bei allen Mischungen jeweils 40M.-% Zement gegen die gleiche Menge Zusatzstoff ausgetauscht. Dieser Einsatz der SFA entspricht zwar nicht der praxisüblichen Anwendung, er eröffnet jedoch die Möglichkeit, die grundsätzlichen Wechselwirkungen zwischen Zement und SFA herauszuarbeiten.

Es wird deutlich, dass durch Einsatz von SFA der Sulfatwiderstand deutlich und dauerhaft erhöht wird. Für den Beitrag der SFA zur Erhöhung des Sulfatwiderstands von Beton lassen sich im Prinzip drei Gründe angeben:

- Gefügeverdichtung durch die Produkte aus der puzzolanischen Reaktion der SFA (Abschnitt 5.2)
- Beteiligung des löslichen SO_3 aus der SFA an den Reaktionen in der Frühphase
- Verringerung des C_3A -haltigen Klinkeranteils und Reduzierung des $Ca(OH)_2$ -Angebots durch den Austausch von Zement gegen die gleiche Menge SFA

Die Wirkung der puzzolanischen Reaktion der SFA auf den Sulfatwiderstand wird insbe-

sondere im Vergleich mit den Quarzmehlmischungen deutlich. Bei Austausch des Zements gegen Flugasche bzw. Quarzmehl im Verhältnis 1:1 erhöht sich der Wasserzementwert w/z , woraus sich gleichzeitig eine Erhöhung der Gesamtporosität ergibt. Die Erhöhung der Gesamtporosität führt einerseits zu einer Abnahme des Gefügewiderstands gegenüber dem treibenden Sulfatangriff, andererseits dringen die Sulfate aufgrund der höheren Kapillarporosität deutlich schneller ein (geringerer Diffusionswiderstand). Bedingt durch die Tatsache, dass die Produkte aus der puzzolanischen Reaktion kein größeres Volumen einnehmen als die reagierenden Ausgangsstoffe ($SFA + Ca[OH]_2$) [20], nehmen die Gesamtporositäten der Flugasche- und Quarzmehlmischungen etwa in gleichem Maße zu. Dies hätte zur Folge, dass die Flugasche- und Quarzmehlmischungen einen etwa gleich geringen Sulfatwiderstand aufweisen müssten. Bedingt durch die Bildung von CSH-Phasen aus der puzzolanischen Reaktion, die zu einer wirksamen Reduzierung des transportrelevanten Porenraums führen und somit zu einer deutlichen Erhöhung der Diffusionsdichtheit beitragen, wird der höhere Sulfatwiderstand der SFA-Mischungen im Vergleich zu den Quarzmehlmischungen und den reinen Portlandzementmischungen verständlich.

In [1] konnte ein tendenzieller Zusammenhang zwischen dem SO_3 -Gehalt der SFA und den Dehnungsdifferenzen festgestellt werden [27]. Dabei nimmt der Sulfatwiderstand mit steigendem Sulfatgehalt der SFA zu. Es ist bekannt, dass sich die Sulfate im Rauchgasstrom in zumeist löslicher Form auf den Oberflächen der Flugaschepartikel niederschlagen. Nach der Wasserzugabe zum Gemisch aus Zement und SFA können diese Sulfate sehr schnell in Lösung gehen und sich an den Reaktionen in der Frühphase der Zementhydratation beteiligen. Findet bevorzugt eine Reaktion mit den Aluminatphasen des Zements statt, so steht später beim Eindringen des Sulfats nur noch eine geringere

Menge der Aluminate für die Bildung von schädlichen Reaktionsprodukten zur Verfügung.

Phasenanalysen mittels Röntgenbeugung zeigten, dass bei SFA mit höherem Sulfatgehalt höhere Anteile Ettringit und geringere Mengen Monosulfat im Zementstein gebildet wurden. Verringerte sich der SO_3 -Gehalt der SFA, so konnte mehr Monosulfat bei gleichzeitig sinkendem Ettringitanteil nachgewiesen werden. Diese Resultate werden durch Ergebnisse anderer Untersuchungen bestätigt, die zeigen, dass Mischungen mit SFA, in denen die Aluminatphasen vor der Sulfatbeaufschlagung bevorzugt als Ettringit vorlagen, einen hohen Sulfatwiderstand aufwiesen. Lag dagegen ein vermehrter Anteil an Monosulfat vor, kam es nach dem Sulfatangriff zu Schädigungen infolge Ettringitbildung. Durch diese Reaktionsvorgänge wirkt sich ein höherer Sulfatgehalt der SFA günstig auf den Sulfatwiderstand aus. Versuche, bei denen Sulfate zudosiert wurden bzw. wesentliche Anteile des Sulfats durch Waschen entfernt wurden, bestätigen das Ergebnis.

Unter anderem aufgrund dieser Untersuchungen wurden die bauaufsichtlichen Anwendungsregeln in [3] dahingehend geändert, dass Zement-/Flugaschekombinationen unter bestimmten Randbedingungen als Alternative zu ansonsten vorgeschriebenen Zementen mit hohem Sulfatwiderstand eingesetzt werden können.

Literatur

- [1] Schießl, P.; Hårdt, R.: Einfluß von Steinkohlenflugasche (SFA) auf den Sulfatwiderstand von Betonen – Abschlußbericht. Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F 262, Aachen 1992
- [2] Schießl, P.; Meng, B.; Hårdt, R.: Verbesserung des Sulfatwiderstands von Beton durch Steinkohlenflugasche. Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F 1262, Aachen 1996
- [3] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton; DAfStb: Richtlinie zur Verwendung von Flugaschen nach DIN EN 450 im Betonbau. September 1996
- [4] Schießl, P.; Wiens, U.: Einfluß von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F 436, Aachen 1997

- [5] Schießl, P.; Müller, Ch.: Herstellung von hochfestem Beton mit Steinkohlenflugasche (SFA). Institut für Bauforschung, Forschungsbericht Nr. F 552, Aachen 1997
- [6] Wiens, U.; Schröder, P.; Müller, Ch.: Verwendung von Steinkohlenflugasche (SFA) in Hochleistungsbetonen. Institut für Bauforschung. – Forschungsvorhaben Nr. F 521, Aachen 1999
- [7] DIN EN 450 (01.95) Flugasche für Beton; Definitionen, Anforderungen und Qualitätssicherung
- [8] DIN 1045 (07.88) Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Richtlinie für hochfesten Beton. Ergänzung zu DIN 1045(07.88) für die Festigkeitsklassen B 65 bis B 115, August 1995
- [10] DIN 1164 Teil 1 (10.94) Zement; Zusammensetzung, Anforderungen
- [11] DIN 1048 (06.91) Prüfverfahren für Beton. Teil 1: Frischbeton; Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper
- [12] Bunke, N.: Prüfung von Beton. Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Nr. 422, Berlin 1991
- [13] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): Arbeitskreis „Prüfverfahren Chlorideindringtiefe“: Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1989), Nr. 401, S. 9–43
- [14] Tang, L.: Chloride Transport in Concrete - Measurement and Prediction. Göteborg, Chalmers University of Technology, Diss. 1996
- [15] Schießl, P.; Wiens, U.: Neue Erkenntnisse zum Einfluß von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. In: 13. Internationale Baustofftagung, ibausil 24.–26. September 1997 in Weimar, S. 1.0161–1.0173, Weimar 1997
- [16] Locher, F.W.: Zur Frage des Sulfatwiderstandes von Hüttenzementen. In: Zement-Kalk-Gips 19 (1966), H.9, S. 395–401
- [17] Wittekind, W.: Sulfatbeständige Zemente und ihre Prüfung. In: Zement-Kalk-Gips 13 (1960), Nr. 12, S. 565–572
- [18] Gräf, H.; Grube, H.: Verfahren zur Prüfung der Durchlässigkeit von Mörtel und Beton gegenüber Gasen und Wasser. In: Beton 36 (1986), Nr. 5, S. 184–187, Nr. 6, S. 222–226
- [19] CDF Test – Test method for the Freeze-Thaw Resistance of Concrete – Tests with Sodium Chloride Solution (CDF). In: Materials and Structures RILEM 29 (1996), Nr. 193, S. 523–528
- [20] Härdtl, R.: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluß auf die Betoneigenschaften. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Nr. 448 = Dissertation, Berlin 1995
- [21] Marsh, B. K.; Day, R. L.; Bonner, D. G.: Pore Structure Characteristics Affecting the Permeability of Cement Pastes Containing Fly-Ash. In: Cement and Concrete Research 15 (1985), Nr. 6, S. 1027–1038
- [22] Wiens, U.; Schießl, P.: Chloride Binding of Cement Paste Containing Fly Ash. Göteborg: Amarkai AB and Congrex, 1997. In: Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol 4: Performance and Durability of Cementitious Materials, Göteborg, June 2.–6., 1997 (Justnes, H.[Ed.]), S. 4iv016, 10 pp
- [23] Gehlen, C.: Statistical Quantification – Onset of Corrosion. Bruxelles: Brite-Euram, Project No. BE95-1347 (Version 07/98, Draft Report, Task 4, 1998)
- [24] Sybertz, F.; Wiens, U.: Effect of Fly Ash Fineness on Hydration Characteristics and Strength Development. London: Elsevier Applied Science, 1991. – In: International Conference on Blended Cements in Construction, University of Sheffield 9.–12. September 1991 (Swamy, R.N. [Ed.]), S. 152–165
- [25] Mehta, P. K.: Effect of Fly Ash Composition on Sulfate Resistance of Cement. In: ACI-Journal 83 (1986), Nr. 6, S. 994–1000
- [26] Schubert, P.; Lühr, H. P.: Zum Sulfatwiderstand flugaschehaltiger Mörtel und Betone. In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 45 (1979), Nr. 3, S. 177–182
- [27] Schießl, P.; Härdtl, R.; Meng, B.: Sulfatwiderstand von Beton mit Steinkohlenflugasche. In: Betonwerk und Fertigteil-Technik 62 (1996), Nr. 12, S. 97–98, 100–105

Untersuchungsergebnisse zum hochfesten Beton

Neue Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Beton mit Steinkohlenflugasche (Teil 2)

Peter Schießl, München; Udo Wiens und Petra Schröder, Aachen; Christoph Müller, Düsseldorf

In den vergangenen Jahren wurde im Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen eine Reihe größerer Forschungsprojekte mit dem Ziel durchgeführt, die Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Betonen mit Steinkohlenflugasche (SFA) zu erweitern. Dabei standen im Wesentlichen Untersuchungen zum Verhalten flugaschehaltiger Betone (normalfeste und hochfeste Betone) gegenüber Beton und Stahl angreifenden Stoffen im Vordergrund. Prinzipiell konnte gezeigt werden, dass flugaschehaltige Betone mit normaler und hoher Druckfestigkeit für eine Reihe von Stahlbetonanwendungen, bei denen eine hohe Dichtheit gefordert wird, in besonderem Maße geeignet sind. Im ersten Teil dieses Beitrags (**beton 1/2001**) wurden die Grundlagen und die Untersuchungsergebnisse zum normalfesten Beton mit SFA erläutert. Teil 2 stellt nun die Ergebnisse zum hochfesten Beton mit SFA dar.

7 Ergebnisse zum hochfesten Beton mit SFA

7.1 Festigkeits- und Verformungsverhalten hochfester Betone mit SFA

7.1.1 Allgemeines

Die Ergebnisse zum Festigkeits- und Verformungsverhalten der untersuchten Betone im Alter von 28 Tagen, bei denen neben der Druckfestigkeitsentwicklung weitere Festigkeits- und Verformungskenngrößen bestimmt wurden, sind in Tafel 2 zusammengefasst.

Diese und weitere an hochfesten Betonen ohne und mit Steinkohlenflugasche erzielten Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert und eingeordnet.

7.1.2 Druckfestigkeitsentwicklung und puzzolanische Reaktion

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen bis zum Alter von 365 Tagen sind in Bild 5 dargestellt. Mit steigendem Flugaschegehalt verringern sich die Frühfestigkeiten der Betone im Alter von 2 Tagen und 7 Tagen im

Die Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Peter Schießl studierte Bauingenieurwesen an der TU München und promovierte dort 1973. Anschließend war er am Institut für Betonstahl tätig. Von 1985 bis 1998 war er Professor für Baustoffkunde an der RWTH Aachen und Direktor des Instituts für Bauforschung. 1998 übernahm er die Professur für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung an der TU München und die Direktion des Münchner Baustoffinstituts.

Dipl.-Ing. Udo Wiens studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Seit 1991 ist er wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Bauforschung dort. 1996 übernahm er die Leitung der Arbeitsgruppe „Bindemittel und Beton“. Seine wissenschaftlichen Arbeiten behandeln die Reaktionsmechanismen von Puzzolanen im Beton und die Auswirkung der Verwendung solcher Baustoffe im Beton auf Dauerhaftigkeitseigenschaften wie Eindringwiderstand gegenüber Beton- und Stahl angreifenden Stoffen.

Dipl.-Ing. Petra Schröder studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Seit 1995 ist sie wissenschaftliche Angestellte am Institut für Bauforschung Aachen (ibac) und Mitarbeiterin der Arbeitsgruppe „Bindemittel und Beton“.

Dipl.-Ing. Christoph Müller studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Von 1994 bis 2000 war er wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Bauforschung (ibac) und Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Bindemittel und Beton. Seit Mai 2000 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf.

Tafel 2: Ergebnisse zum Festigkeits- und Verformungsverhalten der Betone im Alter von 28 Tagen; $z+f = 500 \text{ kg/m}^3$; $w/(z+f) \approx 0,30$

Zement	f/(z+f)	β_D	β_Z	β_{SZ}	E_D	E_Z	E_{dyn}	μ	$\epsilon_{D,u}$	$\epsilon_{Z,u}$	$\epsilon_{s,\infty}$	$\Phi_{K,\infty}$
		N/mm ²						–	mm/m			–
CEM I 42,5 R	0	76,0	3,32	5,44	35 700	52 100	41 700	0,18	2,70	0,082	0,53	2,08
	0,10	83,2	4,00	5,89	36 700	42 700	45 100	0,16	2,62	0,128	0,46	1,30
	0,20	80,5	3,74	5,36	37 000	42 800	45 200	0,17	2,38	0,114	0,41	1,06
	0,30	80,7	n. b.	5,23	37 500	n. b.	45 000	0,18	2,39	n. b.	0,41	0,92
CEM I 52,5 R	0	97,4	n. b.	6,46	38 800	n. b.	47 000	0,17	2,29	n. b.	n. b.	n. b.
	0,20	93,7	n. b.	5,76	37 600	n. b.	44 000	0,17	2,36	n. b.	n. b.	n. b.

β_D : Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen; Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm
 β_Z : zentrische Zugfestigkeit im Alter von 28 Tagen; Zylinder: D/H= 150/300 mm
 β_{SZ} : Spaltzugfestigkeit im Alter von 28 Tagen; Balken: 100 mm · 100 mm · 500 mm
 E_D : statischer Druck-E-Modul im Alter von 28 Tagen; Zylinder: D/H= 150/300 mm
 E_Z : statischer Zug-E-Modul im Alter von 28 Tagen; Zylinder: D/H= 150/300 mm
 E_{dyn} : an Zylindern zum Druckspannungs-Dehnungs-Verhalten bestimmter dynamischer E-Modul im Alter von 28 Tagen

μ : Verhältnis Querdehnung zu Längsdehnung bei $\beta_D/3$ (Druckspannungs-Dehnungs-Versuch)
 $\epsilon_{D,u}$: Längsdehnung im Bruchzustand bei Druckbeanspruchung (lastgeregelt)
 $\epsilon_{Z,u}$: Zugbruchdehnung
 $\epsilon_{s,\infty}$: rechnerische Endschwindmaße auf der Basis der Schwinddehnungen bis rd. 300 Tage nach Beginn der Luftlagerung
 $\Phi_{K,\infty}$: rechnerische Endkriechzahl auf der Basis der Kriechdehnungen bis rd. 300 Tage nach Belastungsbeginn
 n. b.: nicht bestimmt

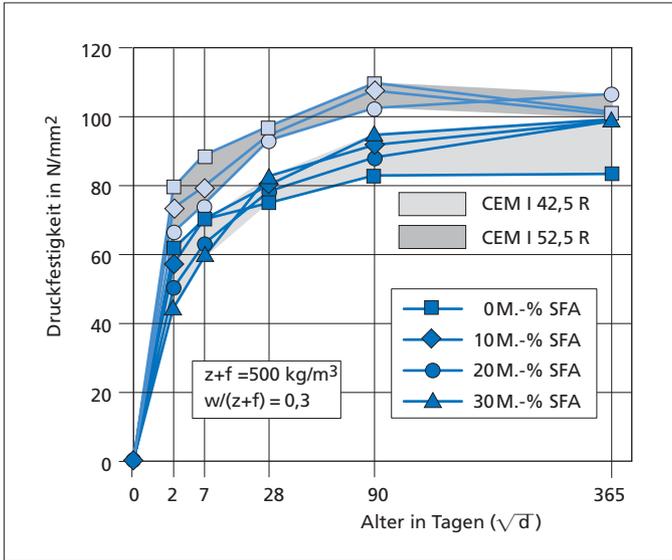


Bild 5: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit

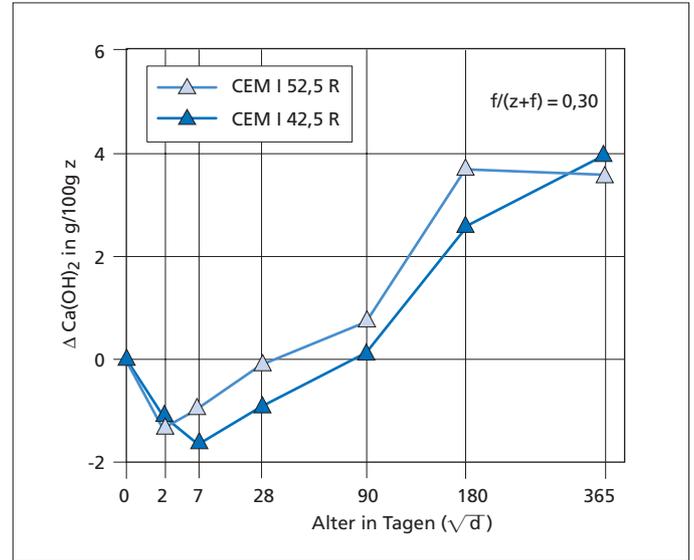


Bild 6: Einfluss von SFA auf den Ca(OH)_2 -Gehalt¹⁾

Vergleich zur Mischung ohne Flugasche. Nach 28 Tagen wird die Druckfestigkeit des Betons ohne Flugasche von allen Mischungen mit Flugasche erreicht bzw. geringfügig überschritten. Die Betone mit SFA erfahren zwischen einem Alter von 90 Tagen und 365 Tagen im Vergleich zu dem Beton ohne SFA nochmals einen zum Teil deutlichen Festigkeitszuwachs.

Wie die Messungen der Calciumhydroxidbindung ($\Delta\text{Ca(OH)}_2$) zeigen, wird in Mischungen mit SFA ab einem Alter von 90 Tagen verstärkt Calciumhydroxid verbraucht (Bild 6). Dies lässt den Schluss zu, dass der Festigkeitsbeitrag der SFA in Kombination mit Zement CEM I 42,5 R ab diesem Zeitpunkt eindeutig auf die puzzolanische Reaktion der SFA zurückgeführt werden kann. Bei der Kombination aus SFA mit CEM I 52,5 R wird ein ähnlich starker Verbrauch von Ca(OH)_2 gemessen, der Beitrag zur Druckfestigkeit ist dagegen weniger deutlich ausgeprägt.

Die hier nicht dargestellten Versuche zur Ermittlung der freigesetzten Hydrationswärme über einen Zeitraum von etwa 5 Tagen belegen weiter, dass SFA wie in Betonen normaler Festigkeit auch in hochfesten Betonen eine Beschleunigung der Zementhydratation bewirkt. Diese Wirkung der SFA wird als sogenannter „chemisch-mineralogischer Füllereffekt“ bezeichnet und beruht auf der Abscheidung von CSH-Phasen des Zements auf den Oberflächen reaktionsfähiger und inerte Feinstoffe, wodurch sich der Hydratationsgrad des Zements erhöht. Erkennbar wird dies auch an den negativen $\Delta\text{Ca(OH)}_2$ -Werten bis zum Alter von 28 Tagen (Bild 6).

7.1.3 Druckspannungs-Dehnungs-Verhalten und Trocknungsschwinden

In Bild 7 ist der Verlauf der Längs- und Querdehnungen der Betone mit Zement CEM I 42,5 R und 0 M.-%, 10 M.-%, 20 M.-% und 30 M.-% SFA bezogen auf

¹⁾ Die Ermittlung des Calciumhydroxidgehalts der verschiedenen Betonrezepturen erfolgte an Zementsteinprüfkörpern mit Hilfe der Thermogravimetrie (TG).

(z+f) bis zum Bruchzustand dargestellt. Anhand der Kurven wird das Druckspannungs-Dehnungs-Verhalten der vier Betone im Folgenden erläutert.

Die Längsdehnungen der Betone im Bruchzustand unterscheiden sich nur wenig. Der Beton ohne SFA weist mit rd. 2,7 mm/m eine geringfügig größere Längsdehnung auf als die Betone mit 10 M.-%, 20 M.-% und 30 M.-% SFA (2,4 mm/m bis 2,6 mm/m), was sich bei geringfügig höherer Druckfestigkeit der Betone mit Flugasche zunächst auf die im Verhältnis zum Vergleichsbeton höheren w/z-Werte bei Einsatz von Flugasche zurückführen lässt [28].

In Querrichtung sind die Dehnungsunterschiede im Bruchzustand deutlicher. Das Ma-

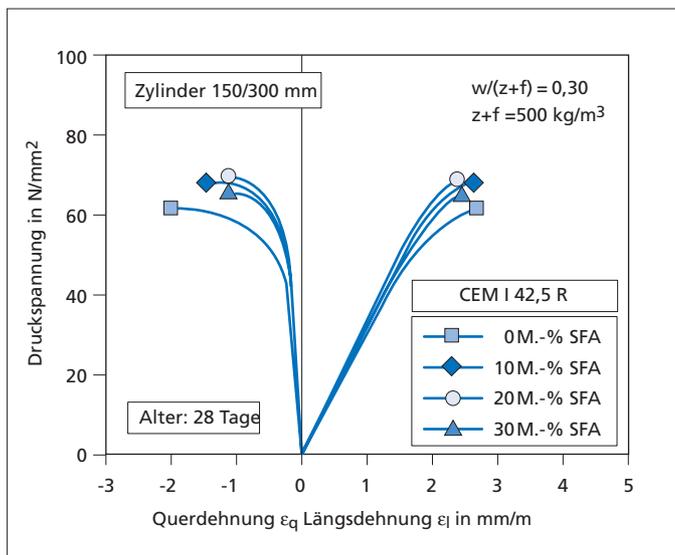


Bild 7: Verlauf der Druckspannungs-Dehnungs-Linien bis zum Bruch

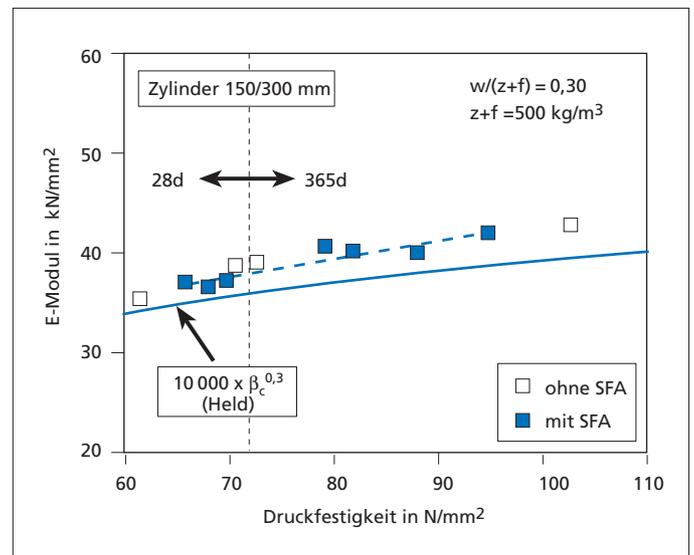


Bild 8: Statischer E-Modul in Abhängigkeit von der Zylinderdruckfestigkeit

ximum des Betons ohne SFA liegt bei rd. 2,1 mm/m. Die Betone mit SFA versagen bei rd. 1,2 mm/m bis 1,5 mm/m. Die Betone mit Flugasche zeigen ein weniger verformungswilliges Verhalten. Der Verbund zwischen Betonzuschlag und Matrix, in der der Bruch in den auf Zug beanspruchten Bereichen hervorgerufen wird, wird bei Verwendung von Flugasche verbessert. Dadurch können im Verbundbereich höhere Zugspannungen übertragen werden. Die Betone mit Flugasche weisen deshalb ein geringfügig spröderes Verhalten auf als der Beton ohne Flugasche, was an dem fast bis zum Bruch reichenden linearen Zusammenhang zwischen Spannung und Längsdehnung erkennbar ist. Die Verbesserung der Verbundzone zwischen Betonzuschlag und Matrix spielt auch bei verschiedenen Dauerhaftigkeitskenngrößen eine Rolle.

Die Betone mit Flugasche und CEM I 42,5 R weisen etwas höhere Elastizitätsmodule auf als der Vergleichsbeton ohne Flugasche (Tafel 2). Dies deutet ebenfalls darauf hin, dass der Verbund zwischen Betonzuschlag und Matrix durch den Einsatz von Flugasche verbessert wird. Auch hier ermöglicht die Verbesserung des Verbunds zwischen Betonzuschlag und Matrix die stärkere Ausnutzung des Zuschlagdehnvermögens. Alle Betone ohne und mit SFA folgen dem von hochfesten Betonen bekannten – im Vergleich zu Betonen normaler Festigkeit schwächeren – Zusammenhang zwischen dem statischen E-Modul und der Betondruckfestigkeit (empirische Formel von Held [29] Bild 8).

Aus den vorliegenden Versuchsergebnissen zum Kriechen wurden Endkriechmaße $\epsilon_{k,\infty}$ mit dem „Hyperbelansatz“ nach Ross [30] bestimmt. Aus $\epsilon_{k,\infty}$ wurden die Endkriechzahlen $\phi_{k,\infty}$ der Betone mit CEM I 42,5 R ohne und mit SFA berechnet. Während sich für den Beton ohne SFA eine Endkriechzahl $\phi_{k,\infty} = 2,08$ ergab, wurden bei den Betonen mit SFA Endkriechzahlen $\phi_{k,\infty}$ zwischen 0,92 und 1,30 ermittelt. Die Endkriechzahl verringert sich mit steigendem Flugasche-

gehalt. In [9] wird für hochfeste Betone bei einem Belastungsalter von 28 Tagen und ~ 50 % relativer Feuchte (r.F.) bei einer wirksamen Bauteildicke von 50 mm eine Endkriechzahl $\phi_{k,\infty}$ von 1,7 angegeben. Für die hier untersuchten Betone mit SFA („wirksame Bauteildicke“ = 75 mm, Zylinder $D = 150$ mm) war zu erwarten, dass sich ihr Kriechverhalten günstiger entwickelt.

Im Hinblick auf das Schwindverhalten (hier: Trocknungsschwinden) nach 7-tägiger Wasserlagerung wirkte sich der Einsatz von SFA nicht signifikant aus. Über den untersuchten Versuchszeitraum (nach rd. 300 Tagen Lagerung im Klima 20 °C/65 % r.F.) wiesen der Beton ohne SFA ein Schwindmaß von 0,52 mm/m, die Betone mit SFA eines zwischen 0,39 und 0,45 auf. In [9] werden für hochfeste Betone bei ~ 50 % r.F. in Abhängigkeit von der wirksamen Bauteildicke Endschwindmaße $\epsilon_{s,\infty}$ von 0,5 bzw. 0,6 angegeben. Analog zu den Kriechendwerten wurden für die untersuchten Betone Endschwindmaße $\epsilon_{s,\infty}$ berechnet. Dabei ergaben sich Werte von 0,53 mm/m für den Beton ohne SFA und 0,41 mm/m bis 0,46 mm/m für die Betone mit SFA (Tafel 2).

7.1.4 Zugspannungs-Dehnungsverhalten

Die Betone mit Zement CEM I 42,5 R und 0 M.-%, 10 M.-% und 20 M.-% SFA bezogen auf (z+f) erreichen Zugfestigkeiten von 3,3 N/mm², 4,0 N/mm² und 3,7 N/mm². Die zentrischen Zugfestigkeiten liegen etwa im Streubereich der von König [31] angegebenen Versuchswerte und damit in einem für hochfeste Betone typischen Bereich. Die Verbesserung der Verbundzone bzw. die Erhöhung der Haftzugfestigkeit zwischen Betonzuschlag und Matrix, die sich bereits im Querdehnungsverhalten der Betone mit SFA unter Druckbeanspruchung zeigte, drückt sich auch in einer Erhöhung der Zugbruchdehnung aus. Die Zugbruchdehnung wird durch die Verwendung von SFA gegenüber dem Referenzbeton um rd. 39 % bzw. 56 % von 0,082 mm/m auf 0,114 mm/m bzw. 0,128 mm/m erhöht.

7.2 Dauerhaftigkeit

7.2.1 Gaspermeabilität

Eine wesentliche Voraussetzung für die Dauerhaftigkeit eines Betons ist eine hohe Dichtigkeit der Oberfläche gegenüber Wasser, Sauerstoff und Luftkohlendioxid. Eine Regelgröße zur Erzielung eines dichten Betongefüges ist der Wasserzementwert. Mit abnehmendem Wasserzementwert reduziert sich die Kapillarporosität, wodurch die Eindringgeschwindigkeit von Beton und Stahl angreifenden Stoffen reduziert wird. Wie in Abschnitt 5.2 (s. **beton** 1/2001, S. 12) erläutert wurde, wird der Kapillarporenraum durch die Zugabe von SFA wirksam unterbrochen („pore-blocking effect“). Inwieweit dieser gefügeverdichtende Effekt, der bisher in Mischungen mit höheren äquivalenten Wasserzementwerten nachgewiesen wurde, auch in Betonen mit niedrigen äquivalenten Wasserzementwerten noch zum Tragen kommt, wurde anhand von Permeabilitätsmessungen untersucht. Als Beurteilungskriterium für die Dichtigkeit der hier untersuchten Betone ohne und mit SFA wurde der Gaspermeabilitätskoeffizient gewählt.

Für die Ermittlung des Gaspermeabilitätskoeffizienten wurden die Betone mit CEM I 42,5 R ohne und mit 30 M.-% SFA bezogen auf (z+f) ausgewählt. Zum Einfluss der Nachbehandlung auf den Gaspermeabilitätskoeffizienten wurden die Prüfkörper den Lagerungsarten L2, L2F und L7 (s. Abschnitt 4.2, **beton** 1/2001, S. 12) ausgesetzt. Die Untersuchungsergebnisse sind in den Bildern 9 und 10 dargestellt.

Der Beton ohne SFA (Bild 9) weist je nach Lagerungsart einen Gaspermeabilitätskoeffizienten zwischen $4,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und $7,7 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ auf. Die Gaspermeabilitätskoeffizienten des Betons mit 30 M.-% SFA (Bild 10) liegen je nach Lagerungsart zwischen $1,5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und $3,2 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$, womit dieser Beton als geringfügig dichter eingestuft werden kann. Die Dichtungssteigerung durch die puzzolanische Reaktion der Flugasche ist damit auch bei hochfesten Betonen gegeben, fällt hier aber schwächer aus als bei

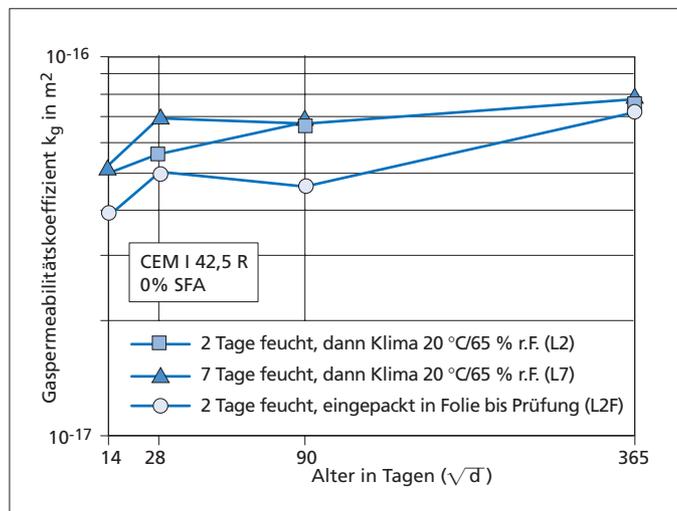


Bild 9: Gaspermeabilitätskoeffizienten der hochfesten Betone ohne SFA in Abhängigkeit von der Nachbehandlung und dem Prüfalter

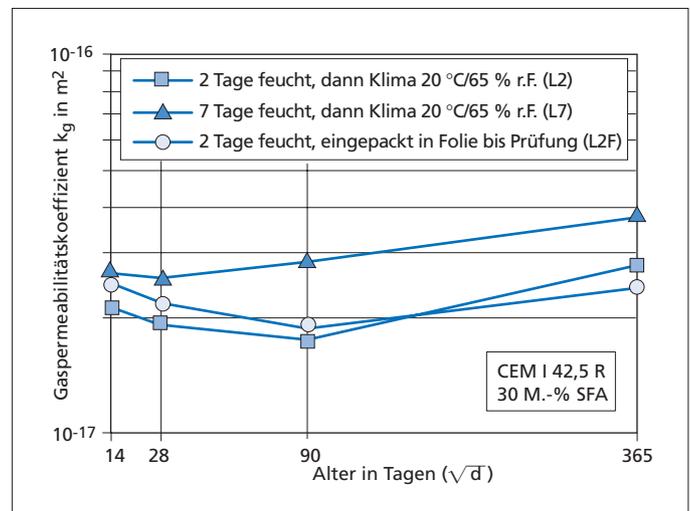


Bild 10: Gaspermeabilitätskoeffizienten der hochfesten Betone mit SFA in Abhängigkeit von der Nachbehandlung und dem Prüfalter

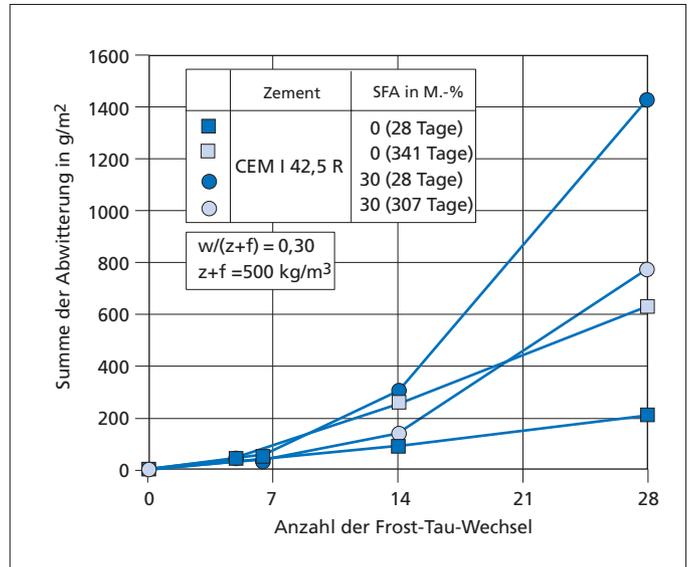
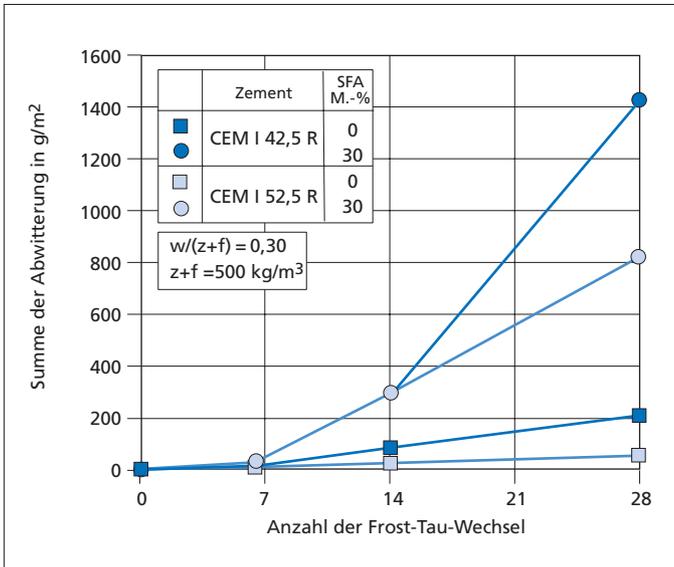


Bild 11: Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Test) der Betone ohne und mit SFA im Alter von 28 Tagen

Bild 12: Abwitterungsmenge der Betone ohne und mit SFA

Betonen normaler Druckfestigkeit. Die Variation der Art und Dauer der Nachbehandlung beeinflusst die Gaspermeabilitätskoeffizienten insgesamt nur unwesentlich. Die Permeabilitäten der flugaschehaltigen Betone liegen etwas unterhalb der von Guse [32] angegebenen Werte für hochfeste Betone mit Silicastaub ($5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ bis $10 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$). Bei seinen Untersuchungen stellte Guse im oberflächennahen Bereich eine Erhöhung der Gaspermeabilitätskoeffizienten fest, die er mit einer verstärkten Mikrorissbildung in Zusammenhang brachte. Mikrogefügeuntersuchungen an Dünnschliffen aus den hier verwendeten Betonen zeigten im Probenalter von 28 Tagen unabhängig vom Flugascheeinsatz kaum Mikrorisse [6]. Eine Schwächung des Gefüges durch Mikrorisse, die – wie bei Betonen mit Silicastaub – zu einer Erhöhung der Durchlässigkeit führen kann, war demnach nicht vorhanden.

7.2.2 Frost-Tausalz-Widerstand

Die Abwitterungen der Betone im Frost-Tausalzversuch ohne und mit 30 M.-% SFA bei Versuchsbeginn im Alter von 28 Tagen sind in Bild 11 dargestellt. Das vorgeschlagene CDF-Abnahmekriterium von 1500 g/m^2 wird sowohl von den Betonen ohne SFA als auch von den Betonen mit SFA nicht überschritten. Nach 28 Frost-Tausalz-Wechseln wurde für den Beton mit Zement CEM I 42,5 R und SFA eine Abwitterungsmenge von 1420 g/m^2 , für den Beton mit Zement CEM I 42,5 R ohne SFA wurden Abwitterungen von 230 g/m^2 ermittelt. Folglich weist der flugaschefreie Beton nach dem CDF-Verfahren einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand (FTSW) auf. Der entsprechende Beton mit SFA weist einen ausreichenden FTSW auf, der durch einen progressiven Abwitterungsverlauf gekennzeichnet wird. Hierbei sind die Anfangsabwitterungen sehr gering und steigen im Laufe der Frost-Tausalz-Beanspruchung deutlich an. Ursache für die höheren Abwit-

terungen scheint im Wesentlichen der im Vergleich zu den Referenzbetonen höhere w/z -Wert der SFA-haltigen Betone zu sein. Wie auch bei dem Beton mit Zement CEM I 42,5 R und SFA stellt sich für den Beton mit Zement CEM I 52,5 R und SFA ein höheres Abwitterungsniveau als beim SFA-freien Vergleichsbeton ein. Die Abwitterungsmenge nach 28 Frost-Tau-Wechseln beträgt für den Beton mit 30 M.-% SFA bezogen auf $(z+f)$ 823 g/m^2 und liegt somit rd. 600 g/m^2 niedriger als bei Beton mit CEM I 42,5 R und 30 M.-% SFA bezogen auf $(z+f)$. Beide Abwitterungsverläufe steigen ab dem 6. Wechsel progressiv an. Die Abwitterungsmenge für den Beton mit CEM I 52,5 R ohne SFA beträgt nach dem 28. Wechsel 74 g/m^2 .

Zur Berücksichtigung der langsamen Reaktion von SFA (Bild 6) wurden rd. einjährige Probekörper der Betone mit CEM I 42,5 R ohne und mit 30 M.-% SFA bezogen auf $(z+f)$ im CDF-Test geprüft. Die Abwitterungen der Frost-Tausalz-Untersuchung sind in Bild 12 dargestellt. Der progressive Abwitterungsverlauf des Betons mit SFA, der im Alter von 28 Tagen ab dem 6. Frost-Tau-Wechsel beobachtet werden konnte, tritt nach 307 Tagen erst ab dem 14. Frost-Tau-Wechsel in abgeschwächter Form auf. Nach dem 28. Frost-Tau-Wechsel wurde für diesen Beton eine Abwitterungsmenge von rd. 800 g/m^2

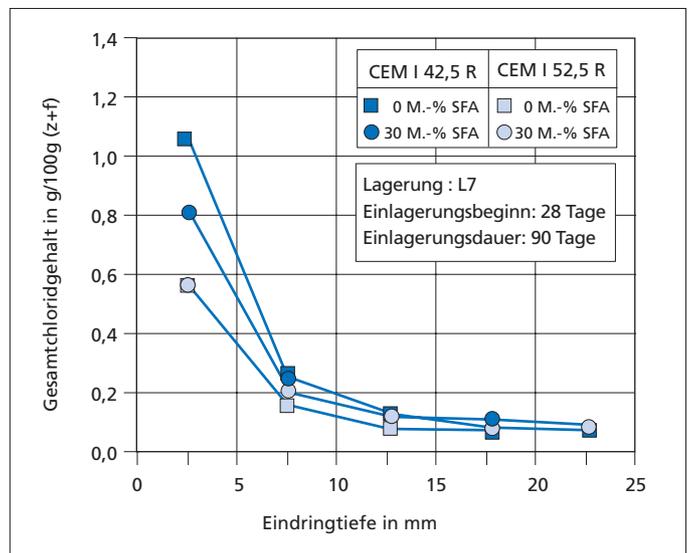


Bild 13: Chloridprofile der Betone ohne und mit 30 M.-% SFA bezogen auf $(z+f)$

ermittelt. Die Abwitterung des entsprechenden Referenzbetons nach dem 28. Frost-Tau-Wechsel stieg dagegen im Vergleich zur 28 Tage alten Probe von 226 g/m^2 auf 647 g/m^2 an.

Die vorliegenden Abwitterungsmengen des Betons mit Zement CEM I 42,5 R und 30 M.-% SFA bezogen auf $(z+f)$ zeigen eine deutliche Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstands im Alter von 307 Tagen. Die Verbesserung des FTSW ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die puzzolanische Reaktion der SFA zurückzuführen, die zu einer weiteren Porenverdichtung führt. Anhand der Ergebnisse wird erneut deutlich, dass der Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen mit langsam erhärtenden Bindemitteln nicht realistisch abgebildet wird, wenn die Prüfung bereits im Alter von 28 Tagen durchgeführt wird. Praxiserfahrungen zeigen, dass flugaschehaltige Betone durchaus einen ähnli-

chen Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen wie Betone ohne SFA [33].

7.2.3 Chloridprofile

Bild 13 zeigt die Chloridprofile der Betonprüfkörper mit den Zementen CEM I 42,5 R und CEM I 52,5 R jeweils ohne und mit 30 M.-% SFA bezogen auf (z+f) nach einer Chloridbeaufschlagungsdauer (3%ige NaCl-Lösung) von 90 Tagen. Die Prüfkörper wurden gemäß L7 vorgelagert und im Alter von 28 Tagen in die Chloridlösung eingelagert. Als Bezug für den Gesamtchloridgehalt wurde wie zuvor die gesamte Menge an Zement und Flugasche gewählt. Die ermittelten Gesamtchloridgehalte der hochfesten Betone sind insgesamt als gering zu bewerten (vgl. Bild 2; **beton** 1/2001, S. 14) und dokumentieren den hohen Eindringwiderstand.

Die Gesamtchloridgehalte liegen in Tiefenlagen über 12,5 mm unabhängig von der Mischung bereits in der Größenordnung des „natürlichen“ Chloridgehalts. Wie bei den Gasdurchlässigkeiten weist der Beton mit CEM I 42,5 R und SFA einen geringfügig höheren Eindringwiderstand gegenüber Chlorid auf als der korrespondierende Nullbeton. Bei den Betonen mit Zement CEM I 52,5 R werden unabhängig von der Flugaschezugabe etwa gleiche Chloridgehalte in allen Tiefenlagen gemessen.

Die Gesamtchloridgehalte der Betone mit CEM I 42,5 R ohne und mit SFA wurden zusätzlich an Probekörpern ermittelt, die bis zum Alter von 28 Tagen wassergelagert wurden, um den Einfluss des kapillaren Saugens auszuschließen. Aus den Chloridprofilen dieser Betone (Beaufschlagungsdauer = 90 Tage) wurden nach dem 2. Fickschen Gesetz effektive Diffusionskoeffizienten ermittelt (vgl. auch [4]). Der ermittelte Cl-Diffusionskoeffizient für den Beton mit 30 M. % SFA bezogen auf (z+f) beträgt $1,2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Für den Referenzbeton wird ein etwas höherer Cl-Diffusionskoeffizient von $1,9 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ermittelt. Die Untersuchungen zeigen, dass durch die Zugabe von SFA auch in hochfesten Betonen der effektive Diffusionskoeffizient verringert werden kann. Die Steigerung der Dichtheit kann den Erkenntnissen der Kalkbindung (Bild 6) zufolge auch in hochfestem Beton im Wesentlichen auf die puzzolanische Reaktion zurückgeführt werden. Grundsätzlich sind die Unterschiede zwischen flugaschehaltigen und flugaschefreien Betonen aber nicht so stark ausgeprägt wie bei den Betonen mit normaler Druckfestigkeit.

8 Zusammenfassung

Durch die vorgestellten Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass die Leistungsfähigkeit des Baustoffs „Beton“ durch die Verwendung von SFA hinsichtlich bestimmter Umwelteinwirkungen erheblich verbessert werden kann. Die Zugabe von SFA führt zu einer Erhöhung des Eindringwiderstands

gegenüber Chlorid sowie zu einer Abnahme der Korrosionsgeschwindigkeiten nach Überschreiten des kritischen Chloridgehalts an der Stahloberfläche. Beide Aspekte erhöhen die Nutzungszeiträume von Stahlbetonbauteilen in chloridhaltiger Umgebung.

Auch der Widerstand des Betons gegenüber Sulfat aus Wässern oder Böden wird durch die Zugabe von SFA erhöht. Wesentliche Ursachen für die Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Betons für diese Anwendungsfälle sind die wirksame Unterbrechung des Porensystems durch CSH-Phasen aus der puzzolanischen Reaktion der SFA (sog. „pore-blocking effect“) sowie im Fall der Beaufschlagung mit Chlorid eine Erhöhung der Chloridbindekapazität durch die SFA. Während der „pore-blocking effect“ weitgehend unabhängig von Flugascheeigenschaften ist [34], spielt für die Erhöhung des Sulfatwiderstands zusätzlich der SO_3 -Gehalt der Flugasche eine Rolle.

Bei den hier vorgestellten hochfesten CEM I-Betonen mit SFA konnte ein k-Wert der Flugasche im Alter von 28 Tagen von $k \approx 1,0$ festgestellt werden, d.h., bei gleichem Gehalt an Zement und Zement + Flugasche (z bzw. $z+f = 500 \text{ kg/m}^3$) und Wasserzementwert und äquivalentem Wasserzementwert w/z bzw. $w/(z+f) = 0,30$ weisen die flugaschefreien und flugaschehaltigen Betone im Alter von 28 Tagen vergleichbare Druckfestigkeiten auf. In der Gegenüberstellung mit Betonen normaler Festigkeit ist somit die Wirksamkeit der Flugasche in hochfesten Betonen im Hinblick auf die Druckfestigkeiten etwas größer. Die hochfesten Betone mit SFA der Festigkeitsklassen B 65 bis B 95 unterschieden sich im Hinblick auf ihr Verformungsverhalten nicht von hochfesten Betonen herkömmlicher Konzeption, d.h. unter Verwendung von Silicastaub und ohne SFA als Betonzusatzstoff. Der Vergleich mit entsprechenden Referenzbetonen ohne und mit Silicastaub hat gezeigt, dass das Verformungsverhalten hochfester Betone mit SFA zum Teil verbessert wird. Die untersuchten Betone mit SFA waren im Vergleich zu entsprechenden Betonen ohne SFA geringfügig spröder, was auf eine Verbesserung der Kontaktzone zwischen Zuschlag und Matrix durch die Zugabe von SFA zurückgeführt werden kann.

Der Chlorideindringwiderstand der hochfesten Betone kann durch die Zugabe von SFA teilweise verbessert werden, wobei der Beitrag der Flugasche zur Erhöhung der Dichtheit in hochfesten Betonen geringer ausfällt als in Betonen normaler Festigkeit mit hohen Wasserzementwerten. Die Erhöhung der Undurchlässigkeit kann auch in hochfesten Betonen auf die puzzolanische Reaktion der SFA zurückgeführt werden. Die ermittelten Gaspermeabilitätskoeffizienten der untersuchten hochfesten Betone ohne und mit SFA lagen im Erfahrungsbereich hochfester Betone ($5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ bis $10 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$)

mit tendenziell kleineren Werten für die Betone mit SFA und bestätigen damit die Aussagen zum Chlorideindringwiderstand. Ein Einfluss der Nachbehandlung war nicht zu erkennen, so dass diese Betone als „in der Nachbehandlung unempfindlich“ eingestuft werden können.

Die nach dem CDF-Verfahren geprüften hochfesten Betone mit SFA weisen einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auf. Alle Abwitterungen lagen unterhalb des empfohlenen CDF-Abnahmekriteriums von 1500 g/m^2 . Der Beton mit 30 M.-% SFA bezogen auf (z+f) wies bei Prüfung im Alter von 28 Tagen höhere Abwitterungen auf als der Beton ohne SFA. Bei älteren Prüfkörpern (Prüfalter: rd. 1 Jahr) zeigte sich jedoch eine Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstands der flugaschehaltigen Betone, was im Wesentlichen auf die Gefügeverdichtung durch die puzzolanische Reaktion der SFA zurückgeführt werden kann.

9 Förderhinweise

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf umfangreichen Forschungsarbeiten über die Einsatzmöglichkeiten von Steinkohlenflugasche in hoch- und normalfesten Betonen, die aus Mitteln der Forschungsstiftung der Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. (VGB) und aus Hausmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. gefördert wurden [1, 2, 4, 5, 6].

Literatur

Die nachfolgend aufgeführten Literaturverweise werden fortlaufend zum ersten Teil des Beitrags ab Literaturstelle [28] weitergeführt. Verweise auf frühere Literaturstellen finden sich im Literaturverzeichnis des Beitrags aus **beton** 1/2001.

- [28] Wiens, U.; Grahn, F.; Schießl, P.: Verbesserung der Undurchlässigkeit, Beständigkeit und Verformungsfähigkeit von Beton. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Nr. 457, S. 5-87
- [29] Held, M.: Ein Beitrag zur Herstellung und Bemessung von Druckgliedern aus hochfestem Normalbeton (B 60-B 125), Diss., Darmstadt 1992
- [30] Ross, A.D.: Concrete Creep Data. In: The Structural Engineer 15 (1937), Nr. Aug., S. 314-326
- [31] König, G.; Bergner, H.; Grimm, R.; Held, M.; Rempel, G.; Simsch, G.: Hochfester Beton, Sachstandsbericht. Teil 2: Bemessung und Konstruktion. In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Nr. 438, S. 43-61
- [32] Guse, U.: Dauerhaftigkeit von hochfestem Beton. In: Beiträge zum 32. Forschungskolloquium am 21. und 22. März 1996 in Karlsruhe, S. 99-106
- [33] Thomas, M.D.A.: Laboratory and Field Studies of Salt Scaling in Fly Ash Concrete. London: E & FN Spon, 1997. – In: Frost Resistance of Concrete. Proceedings of the International RILEM Workshop, University of Essen, September 22-23, 1997, (Setzer, M.J.; Aueberg, R. (Ed.)), S. 21-30
- [34] Schießl, P.; Wiens, U.: Rapid Determination of Chloride Diffusivity in Concrete with Blending Agents. In: Proceedings of the RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete, St.-Remy-les-Chevreuse, France, October 15-18, 1995. Chachan Cedex: RILEM