

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 Flugascheinsatzes 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 60 M.-%, 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/Flugaschekombinationen gegenüber Sulfateinwirkung
- Gaspermeabilität hochfester Betone mit Flugasche
- Frost-Tausalz-Widerstand flugaschehaltiger Betone > B55

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 20 M.-%, 40 M.-% und 60 M.-% bezogen auf

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

Zement	z	w	f	g	$\frac{w}{(z+f)}$	$\frac{f}{(z+f)}$	FM ¹⁾	Frischbeton			$\sigma_{D,28}^{2)}$
								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·f)-Wert angerechnet. Bei einem konstantem w/(z+k·f)-Wert von 0,50 wurden für alle Betone, mit Ausnahme des Betons mit Portlandzement CEMI 32,5 R und 60 M.-% 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 40 M.-% 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 0 M.-% bis 30 M.-% 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 $\sigma_D/3$ 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 Betonzyl-

lindern mit den Abmessungen $D=150$ mm und $H=300$ 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 $\sigma_{D/3}$ 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 1M.-% 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 ($D/H=150/50$ 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 Filterrückstands 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-

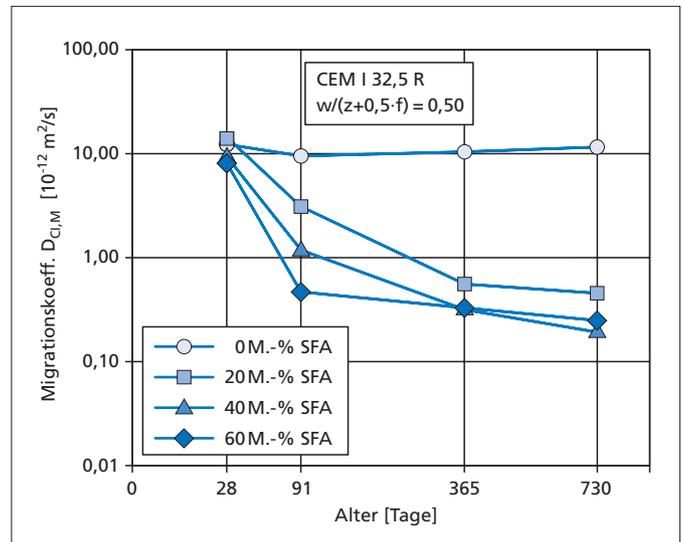


Bild 1: Einfluss des Flugaschegehalts auf die zeitliche Entwicklung des Migrationskoeffizienten von Normalmörteln

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-

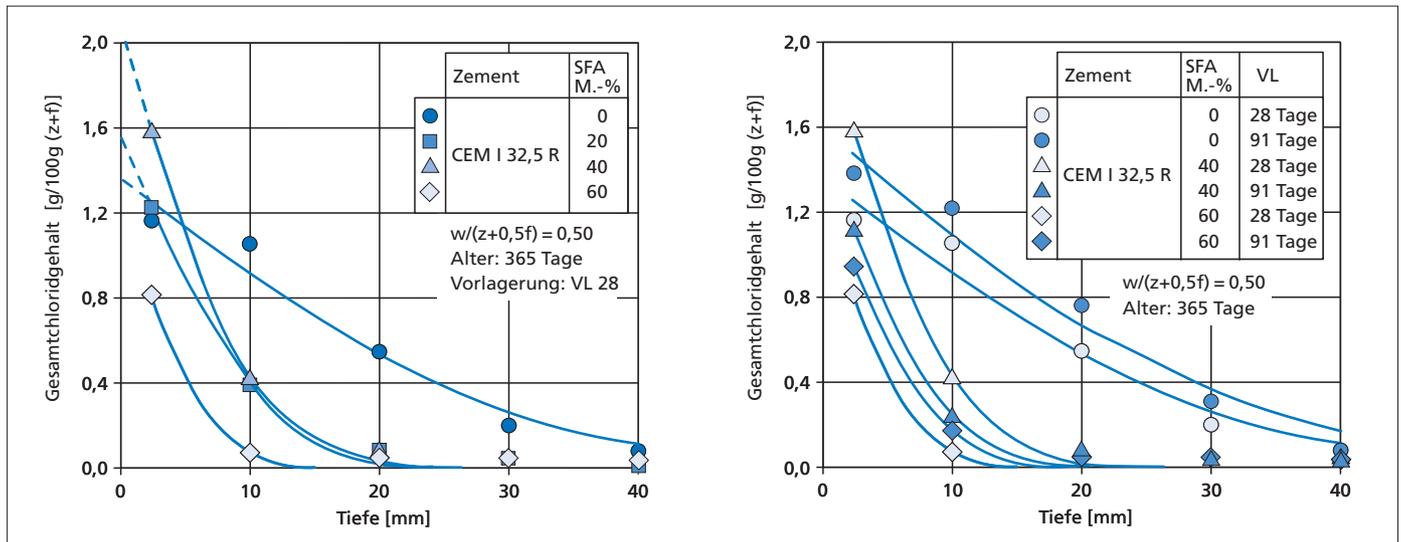


Bild 2: Einfluss des Flugaschegehalts (links) und der Nachbehandlung (rechts) auf das Chloridprofil von Beton; Alter der Betone 365 Tage; VL 28 bzw. VL 91: Beaufschlagung der Prüfkörper im Alter von 28 Tagen bzw. 91 Tagen

versuchten 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 Umgebungfeuchte 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

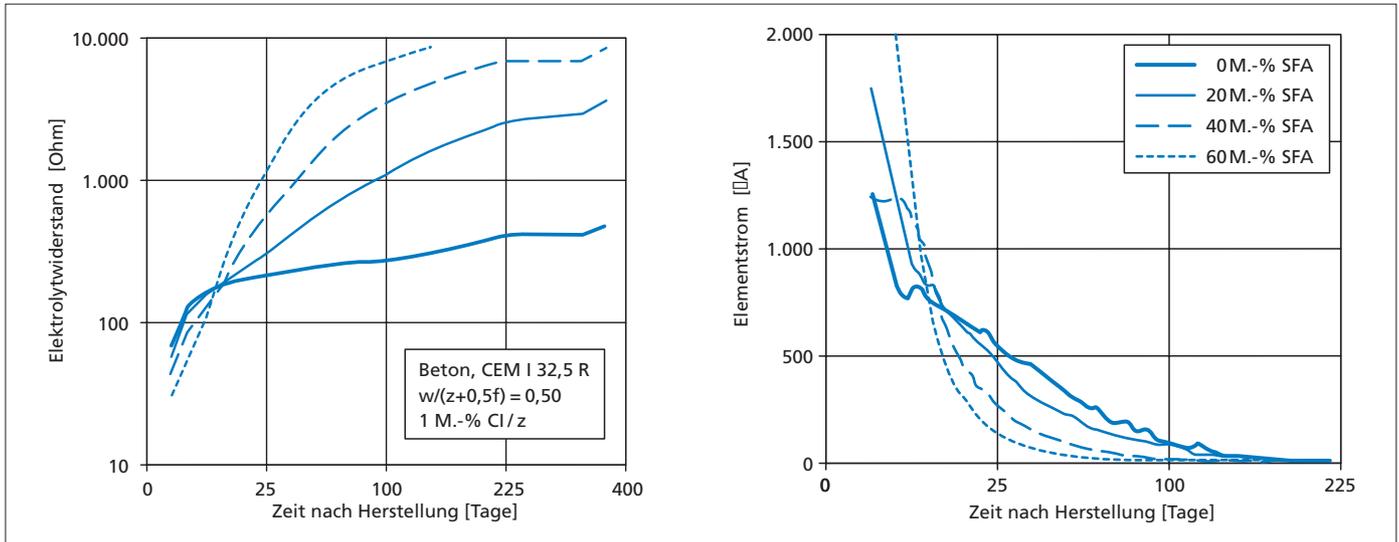


Bild 3: Zeitliche Entwicklung des Elektrolytwiderstands und der korrespondierenden Elementströme; Beton mit CEM I 32,5 R und unterschiedlichen SFA-Gehalten

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 Dichtheit 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 Hydrationsdauer 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 puzzolische Reaktion der Flug-

asche zu Hydrationsprodukten umgesetzt wurde, die absolute Menge an Hydrationsprodukten 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 puzolanischen 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 65 M.-% Hüttensand. Da die Diffusionsgeschwindigkeit der Sulfationen maßgeblich von der Dichtheit 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 puzzolische 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

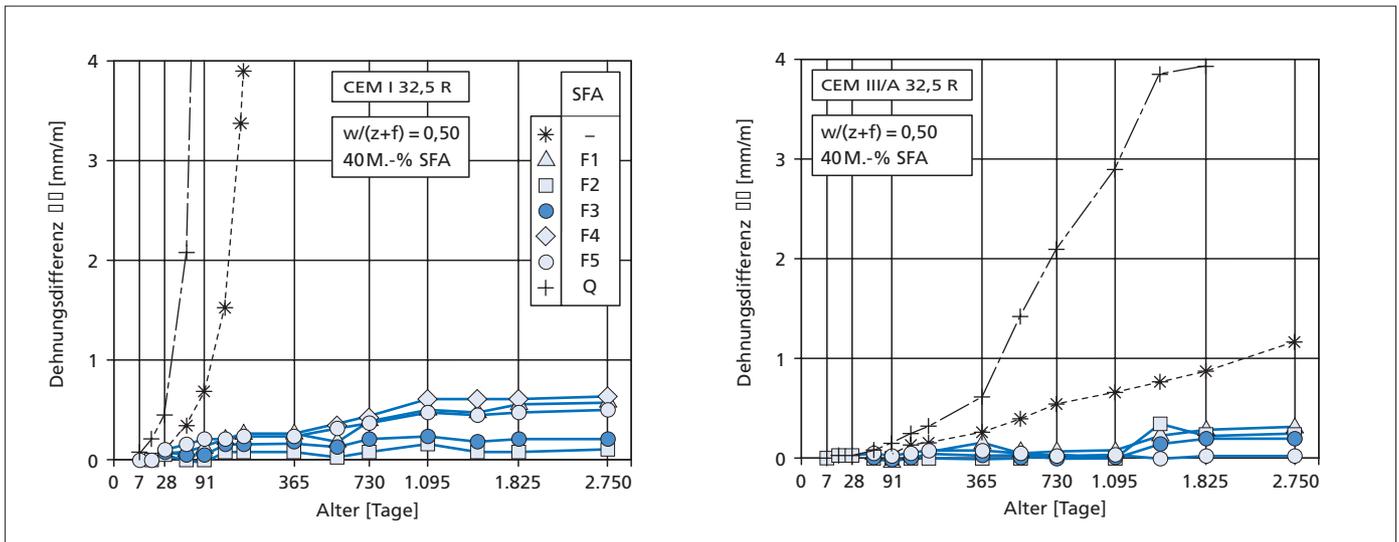


Bild 4: Verlauf der Dehnungsdifferenzen der Mörtel mit CEM I 32,5 R und CEM III/A 32,5 (fünf verschiedene SFA und ein Quarzmehl)

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 Schmelzkammerfeuerungsasche 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 40 M.-% 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 der 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.; Härdtl, 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.; Härdtl, 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

MEGAFEST

- [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



Beton mit mehr als 100 N/mm²? Flüssigkeitsdicht und absolut dauerhaft, eben „megafest“? Gibt es das?

Seit es **Mikrosilica** gibt, hat sich vieles im modernen Betonbau verändert. Silicapartikel, fast 100 mal feiner als Zement, füllen die Kapillarporen im Beton, reagieren mit Ca (OH)₂ und verbessern den Kontakt zwischen Zementstein und Zuschlag.

Die Folge: extrem niedrige Kapillarporosität und verbesserter Phasenbestand. Die Festigkeit steigt und der Widerstand gegen Flüssigkeiten und Gase aller Art. Was der Bauherr davon hat? Beton mit außergewöhnlich hoher Dauerhaftigkeit bei gleichzeitig schlankeren Bauteilen.

Wollen Sie mehr wissen über den Baustoff, der aus der Zukunft kommt? Dann rufen Sie uns bitte an. Wir sind immer für Sie da.

WOERMANN

Gute Werte
für Beton

WOERMANN Bauchemie GmbH & Co. KG · Wittichstraße 1 · D-64295 Darmstadt
Telefon (0 61 51) 8 54-0 · Telefax (0 61 51) 8 54-52 · E-Mail: info@woermann.com