

Ergebnisse von Laboruntersuchungen

Hochleistungsbeton mit Feinstflugasche als Betonzusatzstoff

Dirk Brandenburger, Herten, und Roland Hüttl, Berlin

Innerhalb des Forschungsprojekts „Untersuchung der Eigenschaften und der Wirkungsweise von Feinstflugaschen“ wurde nachgewiesen, dass sich durch den Einsatz von Feinstflugaschen als Betonzusatzstoff dichte und widerstandsfähige Betone herstellen lassen. Bei der Untersuchung der Dichtheit gegenüber Chloriden und Sulfaten sowie bei der Ermittlung des Frost-Tausalz-Widerstands wurden bei Mischungen mit Feinstflugasche im Vergleich zu Mischungen mit Mikrosilika ähnliche oder sogar bessere Ergebnisse erzielt, wenn beide Zusatzstoffe in den erlaubten Dosierungen verwendet wurden. Insbesondere wurde ein deutlich höherer Frost-Tausalz-Widerstand nachgewiesen. Gleichzeitig werden durch den Einsatz von Feinstflugaschen die Festigkeitseigenschaften sowie insbesondere die Rheologie bzw. Verarbeitbarkeit von entsprechenden Betongemischen verbessert. Die Betonrezepturen mit Feinstflugaschen sind „robuster“, zudem kann Fließmittel eingespart werden.

1 Einführung

Hochleistungsbetone unterscheiden sich von Normalbetonen durch höhere Festigkeiten, besondere Verarbeitungseigenschaften und/oder höherer Dauerhaftigkeit gegenüber chemischem und physikalischem Angriff. Sie zeichnen sich durch ein besonders dichtes Betongefüge aus, das einen hohen Widerstand gegenüber dem Eindringen von Wasser, Salzen und Gasen bietet. Das dichte Betongefüge ist meist das Resultat einer Kombination aus niedrigem äquivalenten Wasserzementwert und hoher Packungsdichte der Gesteinskörnung und der Feinstoffe. Durch die Bildung von Hydratationsprodukten leisten puzzolanische Zusatzstoffe wie Steinkohlenflugasche und Mikrosilika einen zusätzlichen Beitrag zur Dichtheit und Festigkeit des Betongefüges.

In [1] wurde bereits über die Herstellung der Feinstflugasche „Microsit“ als Betonzusatzstoff für Hochleistungsbetone, ihre stofflichen Eigenschaften und ihren Einfluss auf Verarbeitbarkeit und Festigkeit berichtet. Im Folgenden wird die Wirkung von Feinstflugasche auf die Widerstandsfähigkeit von Beton gegenüber dem Eindringen von Chloriden und Sulfationen sowie gegen Frost-Tausalz-Banspruchung dargestellt. Grundlage dieses Berichts sind die Ergebnisse vergleichender experimenteller Untersuchungen an normgemäß zusammengesetzten Mörteln und Betonen.

2 Untersuchungsprogramm

In einem Untersuchungsprogramm wurden Eigenschaften von Betonen mit Feinstflugaschen als Betonzusatzstoff ermittelt und mit Betonen/Mörteln anderer Zusammensetzung verglichen. Betone bzw. Mörtel unterschiedlicher Zusammensetzung haben verschiedene

Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie einen veränderten Reifeprozess zur Folge. Für die Versuchsdurchführung wurde ein möglichst praxisnaher Ansatz (z.B. gleicher w/z-Wert und k-Wert) gewählt.

Es wurden zwei Feinstflugaschen unterschiedlicher Korngrößenverteilung für die Versuche verwendet (Microsit® M10 und Microsit® M20), die durch Sichtung einer zertifizierten Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450 gewonnen wurden:

- M10: Partikelgrößen von 95 % < 10 µm
 - M20: Partikelgrößen von 95 % < 20 µm
- Betone/Mörtel mit Feinstflugasche als Betonzusatzstoff wurden mit Betonen/Mörteln ohne Zusatzstoff (CEM I-Beton) sowie mit Betonen/Mörteln mit Steinkohlenflugasche und mit Mikrosilika als Betonzusatzstoff verglichen.

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Widerstand gegen Chloridangriff

Die Dichtheit von Betonen gegenüber dem Eindringen von Chloriden hat entscheidenden Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen. Die Bestimmung der Dichtheit gegenüber dem Eindringen von Chloriden erfolgte zunächst an Mörtelmischungen entsprechend Tafel 1. Aufgrund der 4 mm dünnen Prüfscheiben wurde mit einem Größtkorn von 1 mm gearbeitet. Der w/z bzw. (w/z)_{eq} betrug bei allen Mischungen 0,5, wobei die Steinkohlenflugasche und die

Tafel 1: Zusammensetzung der Mörtelmischungen

Verwendeter Zusatzstoff	Zusatzstoff	Ausgangsstoffmengen [g]		
		CEM I 42,5 R	Wasser	Normsand
–	–	450	225	1 350
M10	113	338	191	1 350
M20	113	338	191	1 350
SFA	113	338	191	1 350
Mikrosilika	45	405	225	1 350

Feinstflugasche mit $k = 0,4$ und Mikrosilika mit $k = 1$ angerechnet wurden. Der unterschiedliche Reifegrad und die unterschiedliche Verarbeitbarkeit blieben hinsichtlich Gleichwertigkeit unberücksichtigt.

Die Prüfung der Dichtheit der Mörtelmischungen gegenüber Eindringen von Chlori-

Die Autoren:

Dipl.-Ing. Dirk Brandenburger studierte Bauingenieurwesen an der Universität Dresden (TU). Seit 1990 ist er im Vertrieb der BauMineral GmbH tätig und seit 2005 Leiter des Vertriebs für Steinkohlenflugasche.

Dr. rer. nat. R. Hüttl studierte Chemie an der Ruprecht Karls Universität Heidelberg sowie der TU Berlin. Im Anschluss an seine Diplomarbeit war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauingenieurwesen, Fachbereich Baustoffkunde, der TU Berlin beschäftigt, wo er im Jahr 2000 promovierte. Ebenfalls seit 2000 ist er als geschäftsführender Gesellschafter der Gesellschaft für Materialprüfung und Baustoffforschung mbH, Berlin, tätig. Zusätzlich ist er Geschäftsführer der Materialprüfungsanstalt Berlin-Brandenburg.

den erfolgte in so genannten Diffusionszellen. In den Diffusionszellen wird jeweils eine Mörtelscheibe als Barriere zwischen die beiden Hälften der Zelle eingesetzt. Die beiden Zellenhälften werden zum einen mit künstlicher Porenlösung (NaOH/KOH im gleichen molaren Verhältnis, pH = 13,0), zum anderen mit künstlicher Porenlösung und Chlorid (35,5 g/l NaCl) gefüllt (Bild 1).

Vor der Prüfung werden die Prüfkörper-scheiben einen Tag in künstlicher Porenlösung gelagert. Gemessen wird der Anstieg des Chloridgehalts in der Zellenhälfte ohne Chloridzusatz in Abhängigkeit von der Zeit mittels Ionenchromatografie. In Bild 2 sind die durch die Mörtelscheiben der Mischungen diffundierten Chloridkonzentrationen in Abhängigkeit von der Zeit ab einem Alter von 14 Tagen dargestellt.

Die weitaus höchste Durchlässigkeit für Chloride wurde an den Zementsteinscheiben aus 100 M.-% Portlandzement gemessen. Beim Einsatz von Zusatzstoffen wurde eine signifikante Erhöhung der Dichtheit der Mörtelmischungen gegenüber Chloriden festgestellt.

Zur besseren Unterscheidung der Wirkung der einzelnen Zusatzstoffe zeigt Bild 3 die für die Mischungen mit den Zusatzstoffen gemessenen Chloridkonzentrationen ohne Berücksichtigung der reinen Zementmischung.

Die Mischungen mit den Feinstflugaschen und dem Mikrosilika zeigen sehr ähnliche Durchlässigkeiten. Gegenüber der Mischung ausschließlich mit Zement wurde bei der Mischung mit der Feinstflugasche Microsit® M10 eine Verringerung der Durchlässigkeit für Chloride um das rd. 190fache gemessen. Im Vergleich zu der Mischung mit Steinkohlenflugasche wurde bei der Mischung mit der Feinstflugasche M10 eine Verringerung der Durchlässigkeit für Chloride um das rd. 8fache ermittelt.

In weiterführenden Messreihen wurde untersucht, welchen Einfluss die Menge an eingesetzter Feinstflugasche auf die Dichtheit gegenüber Chloriden hat, um einen optimalen Anteil von Feinstflugasche hinsichtlich der Dichtheit gegenüber Chloriden zu bestimmen.

Diese Untersuchungen wurden mit Betonrezepturen mit unterschiedlichen Gehalten an Feinstflugasche (5 M.-%, 15 M.-%, 25 M.-%) durchgeführt (16 mm Größtkorn, jeweils 390 kg Gesamtgehalt an Zement und Zusatzstoff, w/z bzw. (w/z)_{eq}-Wert = 0,42, k-Wert = 1). Die Prüfung erfolgte mithilfe des Chloridmigrationsverfahrens, wie es von Tang [2] und Schießl [3] beschrieben wird.

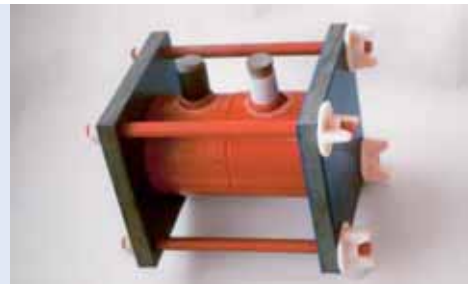
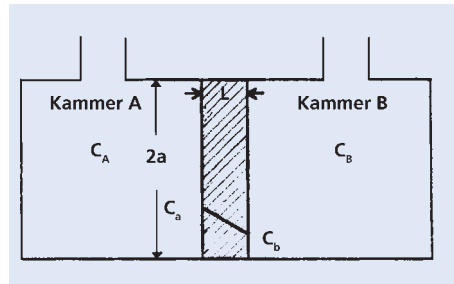


Bild 1: Schematische Darstellung und Foto der Diffusionszelle

Die Ergebnisse zeigen, dass die Durchlässigkeit von Betonmischungen für Chloride mit steigendem Gehalt an Feinstflugasche im Austausch mit Portlandzement nahezu linear abnimmt.

Bei der Betonrezeptur mit 25 M.-% Feinstflugasche M10 (M.-% bezogen auf den Gesamtgehalt an Zement und Zusatzstoff) wurde ein Chloriddiffusionskoeffizient von $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ gemessen. Die niedrigsten Chloriddiffusionskoeffizienten, die mit Hochleistungsbetonen (mit Mikrosilika) erreicht werden können, liegen bei rd. $0,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Der gemessene Chloriddiffusionskoeffizient der Betonrezeptur mit 25 M.-% Feinstflugasche (bezogen auf Zement und Zusatz-

stoff) wurde an einer Betonrezeptur mit moderatem w/z- bzw. (w/z)_{eq}-Wert von 0,42 gemessen. Zudem wurde die Feinstflugasche mit einem k-Wert von 1 und nicht wie üblich bei Flugaschen mit 0,4 angerechnet.

Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen zeigen die Versuche, dass mit Feinstflugaschen Betonrezepturen herzustellen sind, die in gleicher Weise wie Mikrosilikabete eine sehr hohe Dichtheit gegenüber dem Eindringen von Chloriden besitzen.

3.2 Widerstand gegen Sulfatangriff

Zur Bestimmung des Widerstands gegen Sulfatangriff wurden Mörtelmischungen mit Feinstflugaschen nach dem SVA-Verfahren

untersucht und mit den Mörtelmischungen ausschließlich mit Portlandzement sowie mit Steinkohlenflugasche und Mikrosilika als Zusatzstoff verglichen (Zusammensetzung der Mörtelmischungen nach Tafel 1). Bei dem SVA-Verfahren wird die Längenänderung von Mörtelflachprismen (160 mm x 40 mm x 10 mm) durch den treibenden Angriff einer Sulfatlösung (30 g SO₄²⁻/l) bestimmt. Von den ermittelten Längenänderungen wird jeweils die „natürliche“ Längenänderung subtrahiert, die parallel an Referenz-Mörtelflachprismen derselben Zusammensetzung in einer gesättigten Calciumhydroxidlösung gemessen wird. Der Grenzwert der sich daraus ergebenden Längenänderung für eine sulfatwiderstandsfähige Matrix beträgt für Mörtelflachprismen 0,5 mm/m nach 91 Tagen.

Bild 4 zeigt die errechneten Längenänderungen der jeweiligen Mörtelflachprismen in Abhängigkeit von der Zeit. Die Ergebnisse zeigen, dass der Grenzwert für eine sulfatwiderstandsfähige Mischung sowohl von der Mikrosilikamischung wie auch der Mischung mit M10 deutlich unterschritten wird, wobei die Längenänderung der Mischung mit Feinstflugasche M10 nochmals rd. 5-mal kleiner ist als die Längenänderung der Mikrosilikamischung.

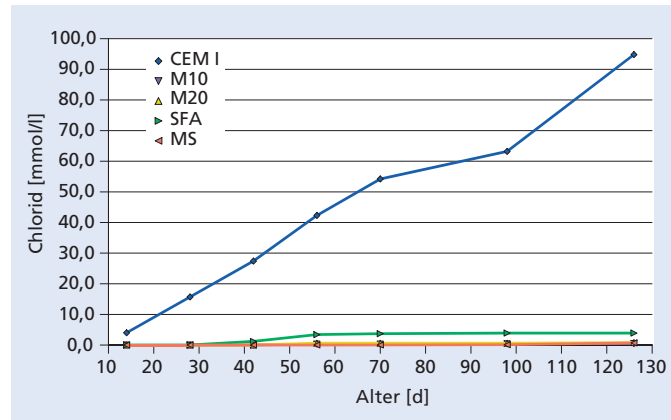


Bild 2: Zeitlicher Verlauf der Chloriddiffusion

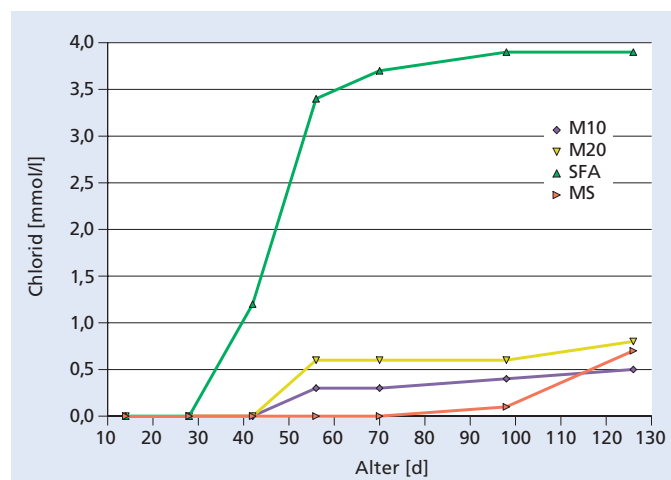


Bild 3: Zeitlicher Verlauf der Chloriddiffusion bei Mörteln mit Zusatzstoffen

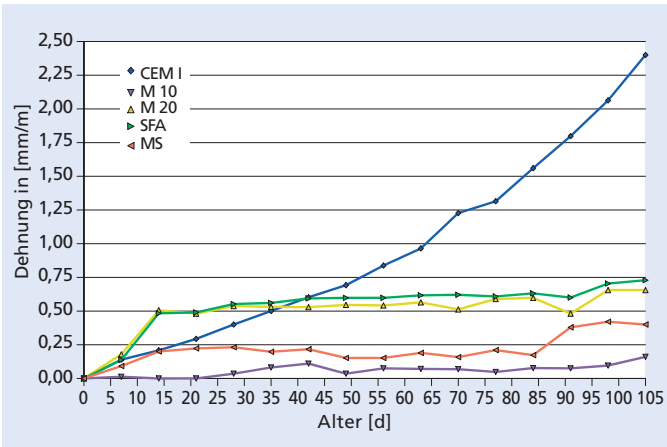


Bild 4: Längenänderung der Mörtelflachprismen durch treibenden Sulfatangriff, ermittelt nach dem SVA-Verfahren

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen, dass mit Feinstflugaschen (in diesem Fall Microsit® M10) Mörtel- und mit Sicherheit auch Betonmischungen herzustellen sind, die einen sehr hohen Sulfatwiderstand aufweisen.

Derzeit laufen zusätzliche Untersuchungen, die den Nachweis erbringen sollen, dass durch die Verwendung von Feinstflugaschen Mörtel- und Betonmischungen herzustellen sind, die gleichermaßen einen sehr hohen Widerstand gegenüber lösendem Angriff (von Säuren) besitzen.

3.3 Frost-Tausalz-Widerstand

Die Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand erfolgten mithilfe des CDF-Verfahrens [5] (56 Frost-Tausalz-Zyklen) an Betonmischungen ausschließlich mit Portlandzement bzw. mit Zement und jeweils einem der vier Zusatzstoffe Feinstflugasche M10 und M20, Steinkohlenflugasche und Mikrosilika. In Tafel 2 sind die Zusammensetzungen der eingesetzten Betone aufgelistet. Bild 5 zeigt die ermittelten Abwitterungen der Betone nach 28 und nach 56 Frost-Tausalz-Zyklen.

Nach 28 Frost-Tausalz-Zyklen zeigt sich, dass die Mischung ohne Zusatzstoff die größte Abwitterungsmenge aufweist. Es folgen die Mischungen mit Steinkohlenflugasche und Feinstflugasche M20 mit im Mittelwert vergleichbaren Abwitterungen. Die Mischungen mit der Feinstflugasche M10 sowie mit Mikrosilika weisen die geringsten Abwitterungsmengen auf.

Für die Beanspruchungsphase von 29 bis 56 Zyklen steigt die Abwitterung mit der

Zeit deutlich stärker als in den ersten 28 Zyklen. Der Abtrag beschleunigt sich für alle Mischungen. Die geringste Abwitterung besitzt die Mischung mit der Feinstflugasche M10; sie beträgt nur noch rd. ein Drittel der Referenzmischung ohne Zusatzstoff. Am bemerkenswertesten ist jedoch der völlige Zerfall der Mikrosilika-Prüfkörper nach 56 Zyklen, obwohl die Mikrosilika-Mischung nach 28 Tagen zusammen mit der Mischung mit der Feinstflugasche M10 die besten Ergebnisse zeigte.

Die Untersuchung des Frost-Tausalz-Widerstands von Betonmischungen zeigt, dass durch die Verwendung von Feinstflugaschen (in diesem Fall M10) Betone mit sehr hohen Frost-Tausalz-Widerstand hergestellt werden können. Die hier geprüften Betone waren nicht hinsichtlich Frost-Tausalz-Widerstand optimiert. Weiterführende Untersuchungen an entsprechend optimierten Betonen haben dieses zwischenzeitlich bestätigt. Betonrezepturen mit Feinstflugaschen (in diesem Fall Microsit M10) weisen gerade unter dem Aspekt der Langzeiteinwirkung einen höheren Widerstand gegenüber Frost-Tausalz-Angriff auf als Mischungen mit reinem Zement bzw. Mischungen mit Zement und Steinkohlenflugasche bzw. Mikrosilika als Betonzusatzstoff.

4 Zusammenfassung

Innerhalb des Forschungsprojekts „Untersuchung der Eigenschaften und der Wirkungsweise von Feinstflugaschen“ wurde nachgewiesen, dass sich durch den Einsatz von Feinstflugaschen als Betonzusatzstoff

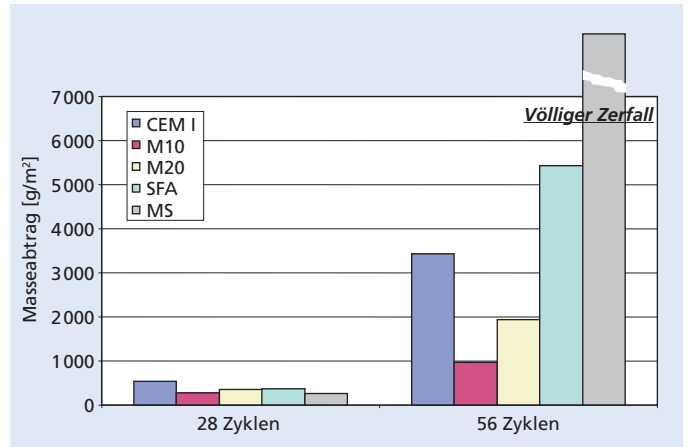


Bild 5: Mittelwerte der Abwitterungsmengen nach dem CDF-Verfahren

dichte und widerstandsfähige Betone herstellen lassen.

Bei der Untersuchung der Dichtheit gegenüber Chloriden und Sulfationen sowie bei der Ermittlung des Frost-Tausalz-Widerstands wurden bei Mischungen mit Feinstflugasche im Vergleich zu Mikrosilikamischungen ähnliche oder sogar bessere Ergebnisse erzielt, wenn beide Zusatzstoffe in den erlaubten Dosierungen verwendet wurden (Feinstflugasche 25 M.-%, Mikrosilika 10 M.-%). Insbesondere wurde ein deutlich höherer Frost-Tausalz-Widerstand nachgewiesen.

Gleichzeitig werden durch den Einsatz von Feinstflugaschen die Festigkeitseigenschaften sowie insbesondere die Rheologie bzw. Verarbeitbarkeit von entsprechenden Betongemischen verbessert [1]. Die Betonrezepturen mit Feinstflugaschen sind „robuster“, zudem kann Fließmittel eingespart werden.

Den vollen Umfang der Leistungsfähigkeit von Feinstflugaschen zur Herstellung von Hochleistungsbetonen muss nun die Praxis zeigen.

Die Feinstflugaschen Microsit® M10 und M20 besitzen ein Zertifikat nach DIN EN 450 und können somit im Beton nach DIN 1045-2 wie herkömmliche zertifizierte Steinkohlenflugasche verwendet werden.

Literatur

- [1] Maibaum, Ch.; Hüttel, R.: Neuer Zusatzstoff für Hochleistungsbetone. beton 54 (2004) H. 3, S. 132-133
- [2] Tang, L.; Nilsson, L.-O.: Chloride Binding Capacity, Penetration and Pore Structures of Blended Cement Pastes with Slag and Fly Ash. London: Elsevier Applied Science, 1991. International Conference on Blended Cements in Construction, held at the University of Sheffield, 9-12 September 1991; Ed.: Swamy, R. N.
- [3] Schießl, P.; Wiens, U.: Neue Erkenntnisse zum Einfluss von Steinkohlenflugasche auf die chlorinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. ibausil Tagungsbericht – Band 1; Hrsg.: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
- [4] Deutsches Institut für Bautechnik: Prüfplan für die Zulassungsprüfung eines von DIN 1045 abweichenden Betons mit hohem Sulfatwiderstand, DIBt, Berlin Februar 1998
- [5] RILEM Draft Recommendation: 117-FDC Freeze-Thaw and Deicing Resistance of Concrete: Draft Recommendation for test method for the freeze-thaw resistance of concrete; Test with water (CF) or with sodium chloride solution (CDF)

Tafel 2: Zusammensetzung und Frischbetoneigenschaften (w/z bzw. (w/z)_{eq} = 0,5; für SFA k = 0,4; für Mikrosilika k = 1)

Verwendeter Zusatzstoff	Zusatzstoff [kg/m³]	Zementzusammensetzung			Frischbetoneigenschaften	
		CEM I 42,5 R [kg/m³]	Wasser [kg/m³]	Gesteinskörnung [kg/m³]	Luftgehalt [Vol.-%]	Rohdichte [kg/dm³]
-	-	390	195	1753	0,90	2,42
M10	98	293	166	1805	1,15	2,41
M20	98	293	166	1805	1,60	2,40
SFA	98	293	166	1805	1,25	2,41
Mikrosilika	39	351	195	1736	2,1	2,35