

Ein Erfahrungsbericht

Dauerhafte Hochleistungsbetone mit Feinstflugasche

Christoph Maibaum und Matthias Meißner, Herten

Gegenstand dieses Beitrags sind gesichtete Steinkohlenflugaschen Microsit® der Feinheitskategorie S nach DIN EN 450-1 [1] mit einem Größtkorn von 10 µm. In Verbindung mit geeigneten Zementen können mit derartigen Feinstflugaschen dauerhafte Hochleistungsbetone hergestellt werden. Im Folgenden werden die stoffspezifischen Eigenschaften von Microsit® vorgestellt sowie Prüfergebnisse zur Porosität, Chlorid-Migration, zum Widerstand gegen Frost-Tausalz und Säureangriff von Betonen, die mit Microsit® hergestellt wurden.

1 Einleitung

Microsit® ist eine Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450-1 der Feinheitskategorie S [1], die von der BauMineral GmbH seit 2002 durch Sichten, d.h. Klassierung im Luftstrom, aus ausgewählten Steinkohlenflugaschen nach DIN EN 450-1 der Feinheitskategorie N [1] erzeugt wird. Gegenstand dieses Beitrags ist Feinstflugasche Microsit® mit einem Größtkorn von 10 µm. Sie wird zur Herstellung von Betonen eingesetzt, an die besonders hohe Dauerhaftigkeitsanforderungen gestellt werden. Neben der Korngröße unterscheidet sich Microsit® von „normalen“ Flugaschen durch einen höheren Verglasungsgrad sowie durch nahezu ausschließlich kugelförmige Partikel. Der Wasseranspruch liegt in der Regel unter dem handelsüblicher CEM I-Zemente der Festigkeitsklasse 52,5 und ist damit im Vergleich zu anderen Zusatzstoffen ähnlicher Feinheit sehr gering. In Tafel 1 sind die Haupt-

bestandteile der Feinstflugasche der nicht aufbereiteten Flugasche gegenüber gestellt.

Für die Anwendung von Microsit® als Betonzusatzstoff nach DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 [2] gelten die gleichen Bedingungen wie für normale Flugaschen. Neben einem Zertifikat der Leistungsbeständigkeit nach DIN EN 450-1 [1] wird in Deutschland zum Nachweis der Umweltverträglichkeit eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung mit Übereinstimmungszertifikat gefordert. Microsit® wird trocken in Pulverform in Säcken, Hobbocks, Big-Bags und Silo-Lkw geliefert sowie als Suspension in Gebinden von 25 l bis 1 m³.

2 Stoffeigenschaften und Wirkung mit Zement

Die in Tafel 1 dargestellten Prüfergebnisse stammen aus der Eigenüberwachung der Flugaschen nach DIN EN 450-1. Sie wurden

im Zentrallabor auf dem Gelände des Kraftwerks Scholven, Gelsenkirchen, sowie im Labor des Kraftwerks Heyden, Petershagen, ermittelt. Da die Prüfergebnisse nicht an korrespondierenden Proben, d.h. an unbehandelter Ausgangsflugasche sowie dem unmittelbar aus dieser Charge gesichteten Endprodukt gewonnen wurden, ist ein direkter Vergleich der Prüfergebnisse nicht möglich. Die Prüfergebnisse zeigen jedoch, dass sich die unbehandelte Flugasche und die aus ihr gewonnene Fraktion < 10 µm im Hinblick auf ihre che-

mische Zusammensetzung sehr ähnlich sind. Lediglich der Verglasungsgrad, ausgedrückt durch das reaktive SiO₂, ist bei den feineren Partikeln deutlich größer. Nach Sybertz [3] sind die Feinheit und der Verglasungsgrad die für die Leistungsfähigkeit einer Flugasche maßgebenden Stoffeigenschaften.

Die in Tafel 2 dargestellten Prüfergebnisse der Kornrohddichte und der spezifischen Oberfläche zeigen, dass mit höherer Feinheit auch die Kornrohddichte der Partikel zunimmt. Die spezifischen Oberflächen der „normalen“ Flugaschen liegen im Bereich von CEM I 32,5- und CEM I 42,5-Zementen, die spezifische Oberfläche von Microsit® ist höher als bei Zementen der Klasse CEM I 52,5.

Die Autoren:

Dipl.-Ing. Christoph Maibaum studierte Bergbau an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Seit 1992 arbeitet er in leitender Funktion im Bereich Technik der BauMineral GmbH und ist zuständig für die Bereiche Anlagentechnik, Baustoffproduktion und Produktneuentwicklungen. Hier beschäftigt er sich derzeit im Wesentlichen mit der praxisbezogenen Umsetzung interner Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie der Markteinführung neuer Produkte.

Dr.-Ing. Matthias Meißner studierte nach einer Berufsausbildung zum Beton- und Stahlbetonbauer Bauingenieurwesen an der Ruhr-Universität Bochum mit der Vertiefungsrichtung Konstruktiver Ingenieurbau. Von 1992 bis 1996 war er als Bauleiter in der Bauindustrie tätig und von 1996 bis 1999 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Stahlbeton- und Spannbetonbau der Ruhr-Universität Bochum. Im Anschluss an seine Promotion im Jahr 1999 war er bis 2001 Projektsteuerer bei einem Ingenieurbüro. Seit 2001 ist Matthias Meißner bei der BauMineral GmbH u.a. für die Qualitätssicherung von Steinkohlenflugasche verantwortlich.

Tafel 1: Hauptbestandteile von Microsit® 10 und unaufleriteter Flugasche EFA-Füller® HP in M.-% (Mittelwerte)

Parameter	Microsit® 10	EFA-Füller® HP
C	1,90	1,69
SO ₃	0,89	0,57
Cl	0,01	0,01
CaO _{frei}	0,17	0,32
SiO ₂	53,8	54,8
reaktives SiO ₂	48,6	39,0
Al ₂ O ₃	25,0	24,8
Fe ₂ O ₃	6,2	8,1
Σ(SiO ₂ ; Al ₂ O ₃ ; Fe ₂ O ₃)	85,0	87,7
CaO	4,0	4,5
MgO	1,9	1,9
K ₂ O	2,3	1,1
Na ₂ O	1,0	0,6

Bild 1 zeigt eine „normale“ Flugasche der Feinheitskategorie N sowie aus dieser hergestelltes Microsit® mit einem Größtkorn von 10 µm. In der „normalen“ Flugasche ist ein höherer Anteil an unregelmäßig geformten Partikeln vorhanden als in der Feinstkorngruppe.

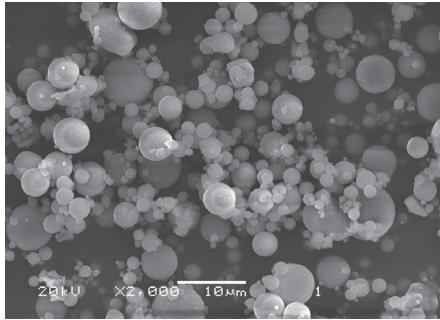


Bild 2 zeigt die Korngrößenverteilungen von Microsit® mit einem Größtkorn von 10 µm sowie 20 µm im Vergleich zu der Ausgangsflugasche der Feinheitskategorie N sowie zu einem CEM I 42,5 R und einem CEM I 52,5 R, ermittelt im Baustofflabor der BauMineral GmbH mit einem Laser-

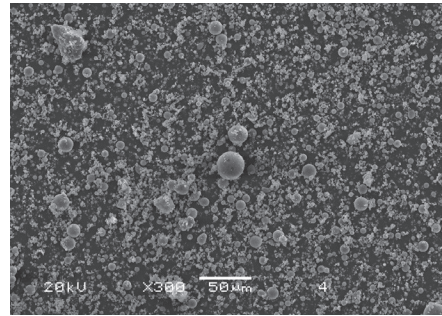


Bild 1: REM-Aufnahmen von Microsit® 10 (links) und der Ausgangsflugasche EFA-Füller® HP (rechts)

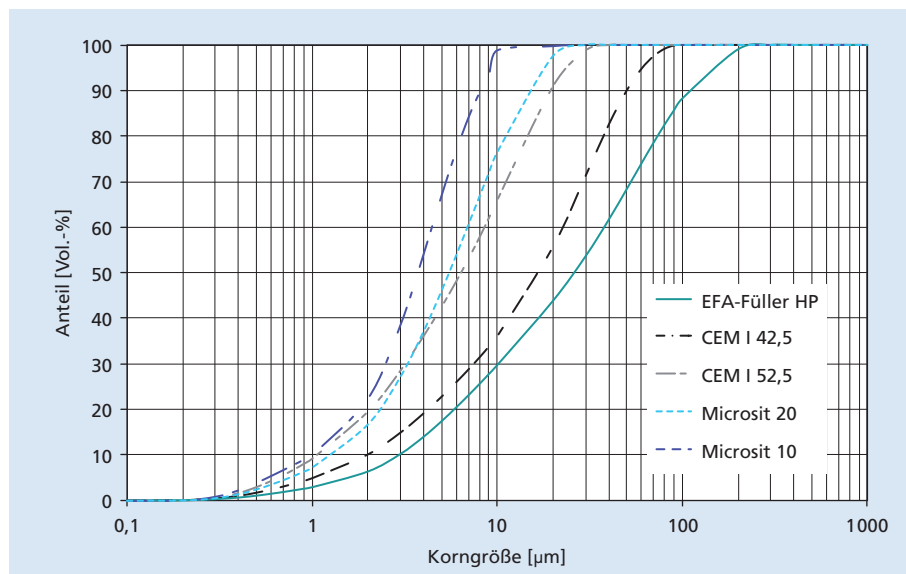


Bild 2: Korngrößenverteilung von Microsit® mit 10 µm und 20 µm Größtkorn sowie von Flugasche der Kategorie N und CEM I

Tafel 2: Kornrohddichte und spezifische Oberfläche von Microsit® 10 sowie der Ausgangsflugasche EFA-Füller® HP (Mittelwerte)

Parameter	Einheit	Microsit® 10	EFA-Füller® HP
Kornrohddichte nach DIN EN 196-6	kg/dm ³	2,55	2,32
Spezifische Oberfläche nach Blaine	cm ² /g	6800	3600

Tafel 3: Wasseranspruch von Microsit® 10 und EFA-Füller® HP, ermittelt mit verschiedenen Prüfverfahren, auch im Vergleich zu den Referenzzementen (Mittelwerte)

Prüfverfahren	Einheit	Microsit® 10	EFA-Füller® HP
„Hausverfahren“ in Anlehnung an Punkte	M.-%	29,8	25,1
DIN EN 450-1, Anhang B ¹⁾	%	93,6	– ¹⁾
DIN EN 1015-3 ²⁾ : rel. Ausbreitmaß z/f = 75/25	%	108,2	109,0
DIN EN 196-3 ²⁾ : rel. z/f = 75/25	%	97,3	97,9

z = Referenzzement; f = Flugasche; z/f = Verhältnis von Zement und Flugasche

¹⁾ Wasseranspruch eines Mörtels mit Microsit® 10 im Vergleich zu einem Mörtel mit Referenzzement bei gleichem Ausbreitmaß; nach DIN EN 450-1 nur gefordert für Flugaschen der Feinheitskategorie S

²⁾ Ausbreitmaß und Wasseranspruch eines Zement-Flugasche-Leims im Vergleich zu reinem Zementleim

Partikelmessgerät. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Packungsdichte eines CEM I 52,5 durch Zugabe von Microsit® noch erhöht werden kann.

In Tafel 3 sind die im Rahmen der Eigenüberwachung mit verschiedenen Prüfverfahren ermittelten Wasseransprüche von Microsit® und von „normaler“ Flugasche aufgeführt. Referenzzement für Microsit® ist ein CEM I 52,5 R, Referenzzement für EFA-Füller® ein CEM I 42,5 R. Beide Zemente erfüllen die Anforderungen an Referenzzemente nach DIN EN 450-1. Das nur an Flugascheproben durchgeführte „Hausverfahren“, bei dem abweichend von dem Verfahren nach Punkte die Kornrohddichte unberücksichtigt bleibt, zeigt, dass Microsit® im Mittel einen um ca. 5 M.-% höheren Wasseranspruch aufweist als seine Ausgangsflugasche. Die Betrachtung von Leimen aus Zement und Flugasche sowie von Mörteln zeigt jedoch, dass eine Kombination von CEM I und Microsit® – wie bei „normalen“ Flugaschen – im Mittel einen geringeren Wasseranspruch bzw. ein höheres Ausbreitmaß aufweist als ein Leim/Mörtel mit Zement ohne Flugasche.

3 Dauerhaftigkeitsbeitrag von Microsit® in Hochleistungsbetonen

Die Stoffeigenschaften von Microsit® lassen erwarten, dass bestimmte Betoneigenschaften noch mehr als mit üblicher Flugasche gezielt verbessert werden können. Ursächlich dafür sind u.a.

- der Kugellagereffekt, der die Fließfähigkeit des Mörtels oder Betons verbessert,
- der Füllereffekt, der – unterstützt durch den Kugellagereffekt – die Packungsdichte im unteren Mehlkornbereich erhöht,
- der höhere Verglasungsgrad, der zu einer dichteren Vernetzung der C-S-H-Phasen führt und dadurch die Dichtigkeit der Matrix über den Füllereffekt hinaus erhöht und
- die höhere Dichtigkeit, die zwangsläufig auch zu höheren Festigkeiten und Dauerhaftigkeit von Mörteln und Betonen führt.

Die Bilder 3 und 4 stammen von Dünnschliffen unter dem Polarisationsmikroskop. Die Dünnschliffe wurden aus Mörtelprismen im Anschluss an Druckfestigkeitsprüfungen gewonnen. Helle Flecken in der dunklen Matrix sowie in der Kontaktzone zu eingebetteten Gesteinskörnern deuten auf eine erhöhte Porosität hin. Ein Vergleich der beiden Fotos zeigt, dass die Matrix mit Microsit® weniger helle Flecken aufweist als die Matrix allein mit CEM I 52,5 R. Dies weist darauf hin, dass die Matrix mit Microsit® dichter ist und insbesondere auch der Verbund zwischen Matrix und Gesteinskörnern stärker ausgeprägt ist als bei alleiniger Verwendung des Zements.

Somit wurden bereits kurz nach Produktionsbeginn erste Untersuchungen zum Einfluss von Microsit® auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton durchgeführt [4, 5]. Die Versuchsergebnisse und anstehende Bauaufgaben führten schnell zu einer Fokussierung auf Betone mit erhöhtem Widerstand

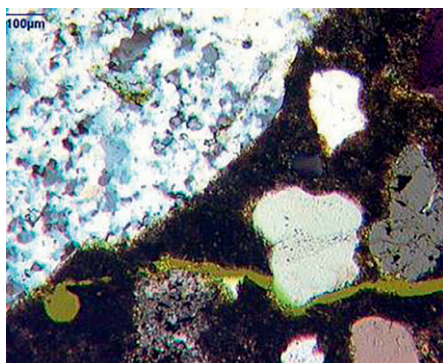


Bild 3: Polarisationsmikroskopie an einem Dünnschliff aus einem Mörtelprisma nach Druckfestigkeitsprüfung im Alter von 90 d; Prüfergebnis: 78 N/mm²; Zusammensetzung der Matrix: 100 % CEM I 52,5 R; w/z = 0,5

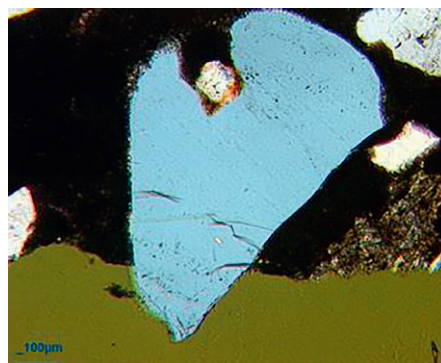


Bild 4: Polarisationsmikroskopie an einem Dünnschliff aus einem Mörtelprisma nach Druckfestigkeitsprüfung im Alter von 90 d; Prüfergebnis: 94 N/mm²; Zusammensetzung der Matrix: 80 % CEM I 52,5 R; 20 % Microsit® 10; w/z = 0,58; w/(z+f) = 0,46

gegen Säureangriff. Dieser wurde zunächst gefordert für Kühltürme von Kohlekraftwerken, die zusätzlich auch als Schornsteine zur Ableitung schwefelhaltiger Rauchgase dienen [6]. Die Rauchgase verbinden sich mit dem Wasserdampf und schlagen sich als Schwefelsäure an der Kühlturmschale nieder. Ein weiteres Einsatzgebiet ist das zurzeit laufende Emscherprojekt, bei dem natürliche Gewässer und Abwässer mithilfe eines neuen Kanalisationssystems voneinander getrennt werden sollen. Die großformatigen Kanalisationsrohre aus Beton müssen über Jahrzehnte dem Angriff durch Schwefelsäure standhalten [7, 8].

Sowohl für die Kühlturbetone als auch für die Kanalisationsbetone wurden im Vorfeld betontechnische Gutachten der heutigen KIWA MPA Bautest GmbH Berlin, vormals MBF Gesellschaft für Materialprüfung und

Baustoffforschung mbH/MPA Berlin-Brandenburg, gefordert. Diese Gutachten basieren auf einem System aufeinander abgestimmter Dauerhaftigkeitsprüfungen, die an der TU Berlin erstmals für den Bau des Kühlturms des Braunkohlekraftwerks Niederaußem entwickelt wurden [9]. Die für diesen Kühlturm eingesetzte Betonzusammensetzung zeigt Tafel 4. Neben dem Widerstand gegen Säureangriff wurden Porosität, Chloridmigration, Frost-Tausalz-Widerstand und Restalkalität geprüft und bewertet.

3.1 Porosität und Chloridmigration

Die Porosität eines Betons hat bekanntlich hohen Einfluss auf seine Festigkeit und Dauerhaftigkeit. In Bezug auf die Festigkeit stellen Poren generell Schwachstellen dar. Für die Dauerhaftigkeit sind insbesondere die durch Verdunstung von chemisch-physikalisch nicht

benötigtem Wasser entstehenden Kapillarporen der Matrix von Bedeutung. Je dichter die Matrix, desto höher ist in der Regel die Dauerhaftigkeit eines Betons. Die Eigenschaften von Gesteinskörnungen und Zusatzmitteln und ihre Einflüsse auf die Beton-eigenschaften werden hier nicht betrachtet.

Bei Stahl- und Spannbetonbauteilen muss der Beton und damit im Wesentlichen die Matrix zudem die eingebettete Bewehrung dauerhaft gegen Korrosion schützen. Dies erfordert auch eine beanspruchungsgerechte Dichtheit gegen das Eindringen von Chloriden.

Dementsprechend werden im Zuge der Säurewiderstandsprüfung nach Hüttl die Gesamtporosität, die Porengrößenverteilung, die auch Rückschlüsse auf die Kapillarporosität ermöglicht, und die Chloridmigration eines Betons bestimmt. Maßstab für die Bewertung sind Prüfergebnisse, die an einem Referenzbeton gewonnen werden, der gemäß dem „Niederaußem-Beton“ zusammengesetzt ist (Tafel 4).

3.2 Frost-Tausalz-Widerstand

Der Widerstand eines Betons gegen Frost und Tausalz ist ebenfalls im Wesentlichen von seiner Kapillarporosität abhängig. Nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [2] sind in einen Beton, der gemäß der Expositionsklasse XF4 bei hoher Wassersättigung Frost-Tauwechsel-Angriffen in Verbindung mit Taumitteln ausgesetzt ist, zur Unterbrechung mikroporöser Transporte Mikroluftporen durch Luftporenbildner definiert einzubringen. In der Fachwelt ist bekannt, dass Betone mit sehr niedrigen Wassergehalten auch ohne eingebrachte Mikroluftporen widerstandsfähig gegen Frost und Tausalz sein können. Ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands eines Betons ist das CDF-Verfahren. Es wird nach Hüttl angewendet, um die Neigung eines Betons zur Bildung von Mikrorissen und zusammenhängender Mikrorissgefüge festzustellen. Anstelle der üblichen 28 Frost-Tauwechsel-Zyklen werden die Prüfkörper jedoch mit 56 Frost-Tauwechsel-Zyklen beaufschlagt. Die höchstzulässige Abwitterungsrate entspricht jedoch dem Grenzwert nach 28 Zyklen. Weiterhin wird der Abfall des dynamischen E-Moduls gemessen und bewertet.

3.3 Restalkalität

Steinkohlenflugasche, Hüttensandmehl und Silikastaub können die Festigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton durch Bildung eigener C-S-H-Phasen erhöhen. Hierbei wird jedoch Calciumhydroxid Ca(OH)₂ verbraucht, das auch für die Passivierung der Bewehrung benötigt wird. Der höchstzulässige Anteil von Silikastaub, bezogen auf definierte Zementarten, ist nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [2] auf 10 M.-% begrenzt, um die für den Korrosionsschutz der Bewehrung erforderliche Alkalität der Porenlösung zu gewährleisten. Hüttl legt als Grenzwert den Ca(OH)₂-Gehalt fest, der sich bei „typischer Verwendung“ eines CEM III/B nach vollständiger Reaktion ergibt.

Tafel 4: Betonzusammensetzung des Kühlturms des Kraftwerks Niederaußem

Zementart		CEM I 42,5 R-HS
Zementgehalt	kg/m ³	248
Wassergehalt	kg/m ³	97 + 28 aus Silikastaubsuspension
Flugasche EFA-Füller® KM/C	kg/m ³	74
Silikastaub aus Suspension	kg/m ³	28
Fließmittel	M.-% v.z	bis 2
Quarzsand und Kies	kg/m ³	ca. 1935

Tafel 5: Bandbreite der Zusammensetzungen und Druckfestigkeiten der auf Säurewiderstandsfähigkeit geprüften Betone mit Microsit®

Kenngröße	Einheit	Wert	Würfeldruckfestigkeit [N/mm ²]			
			1 d	7 d	28 d	90 d
Zementgehalt ¹⁾	kg/m ³	220...300	20...40	60...80	70...100	bis 130
Flugaschegehalt	kg/m ³	30...80				
Micrositgehalt	kg/m ³	20...50				
Wassergehalt	kg/m ³	100...150				
w/(z+f)-Wert	–	0,31...0,37				
Gesteinskörnung	in der Regel quarzitisches, Größtkorn bis 16 mm					

¹⁾ Zementarten: CEM I 42,5 R; CEM I 42,5 R-HS; CEM I 52,5 R; CEM II/B-5 52,5 R; CEM III/A 52,5 N, CEM III/A 42,5 N

Tafel 6: Anforderungen an Betone mit erhöhtem Säurewiderstand

Betoneigenschaft	Prüfverfahren	Einheit	Anforderung	Prüfergebnis
Frost-Tausalz-Widerstand	CDF-Verfahren mit 56 Zyklen	g/m ²	Abwitterung < 1500	500...1200
Dynamischer E-Modul		%	< 40	5...10
Gesamtporosität	Differenz aus Rohdichte und Reindichte	Vol.-%	< 11	9...11
Wasseraufnahme	DIN 52103	M.-%	–	2...5
Chlorid-Diffusionskoeffizient	Chloridmigrationsverfahren nach Tang und Schießl	m ² /s	< 1,2·10 ⁻¹²	0,3...0,8·10 ⁻¹²
Alkalitätsreserve Ca(OH) ₂ in Bezug auf Zement und Zusatzstoff	Thermogravimetrisch	M.-%	> 3	8...11,5
Porenraum < 100 µm				
Kumuliertes Porenvolumen	Quecksilberdruckporosimetrie	mm ³ /g	< 40	25...35
Durchschnittlicher Porenradius	Quecksilberdruckporosimetrie	µm	< 0,1	0,03...0,07
Säurewiderstand				
Masseabtrag	Gewichtsdifferenz	%	gemäß dem Referenzbeton	ca. 1
Schädigungstiefe	Polarisationsmikroskopie an Dünnschliffen	mm		1...2
Restbiegezugfestigkeit	Festigkeitsabfall nach Säurelagerung im Vergleich zu Wasserlagerung	%	–	0...20

3.4 Widerstand gegen Säureangriff

Bei der Konzipierung eines Betons mit möglichst hohem Säurewiderstand sollten grundsätzlich Ausgangsstoffe gewählt werden, die der Säure gegenüber keine Reaktionspartner sind. Flugasche und Silikastaub sowie ihre Reaktionsprodukte sind bei den genannten Beanspruchungsfällen unempfindlich. Das Gleiche gilt für quarzitisches Sande und Kiese. Empfindlich gegen Säureangriff sind dagegen Gesteinskörnungen aus Kalkstein sowie Reaktionsprodukte des Zementklinkers. Bei der Zusammensetzung der Kombination aus Zement und Zusatzstoff ist die Restalkalität nach Abschluss der Reaktionen zu berücksichtigen. Weiterhin sollten die Ausgangsstoffe so gewählt werden, dass sich eine möglichst hohe Packungsdichte ergibt. Bei der Minimierung des Wassergehalts zur Optimierung der Packungsdichte sowie zur Minimierung des Kapillarporenanteils der Matrix ist zu berücksichtigen, dass der Beton unter Praxisbedingungen noch verarbeitbar sein muss. In Tafel 5 sind die den Verfassern bekannte Bandbreite der Zusammensetzungen der untersuchten Betone sowie die ermittelten Betondruckfestigkeiten dargestellt.

Für die Säureprüfung werden prismenförmige Probekörper aus Betonwürfeln herausgesägt, wassergesättigt und drei Monate lang in Schwefelsäure mit einem konstanten pH-Wert von 3,5 gelagert. In festgelegtem Turnus werden die Probekörper gebürstet, abgespült und gedreht sowie die Säure ausgetauscht und der pH-Wert neu eingestellt. Im Anschluss an die Säurelagerung werden die Masseverluste sowie an Dünnschliffen mikroskopisch die Abtrags- und Schädi-

gungstiefen ermittelt. Zudem wird die Restbiegezugfestigkeit der säurebeanspruchten Probekörper im Vergleich zu wassergelagerten Probekörpern bestimmt.

Tafel 6 gibt einen Überblick über das Prüfsystem zur Bestimmung des Säurewiderstands eines Betons nach Hüttl sowie die den Verfassern bekannte Bandbreite der an Betonen mit Microsit[®] erzielten Ergebnisse mit den zugehörigen Anforderungen. Neben der zu prüfenden Betonzusammensetzung wird stets der nach Tafel 4 zusammengesetzte „Nieder- außen-Beton“ als Referenzbeton mit geprüft. Der zu prüfende Beton darf in Bezug auf die nachzuweisenden Eigenschaften nur unwesentlich von dem Referenzbeton abweichen.



Aufgrund langjähriger Erfahrungen ist es inzwischen möglich, zusätzlich absolute Grenzwerte vorzugeben (Tafel 6). Die den Verfassern bekannten Prüfergebnisse zeigen, dass mit Microsit[®] unter ansonsten gleichen Randbedingungen gleiche oder bessere Dauerhaftigkeitseigenschaften erzielt werden können als mit Silikastaub. Die Alkalitätsreserve der Porenlösung ist unter ansonsten gleichen Randbedingungen bei Verwendung von Microsit[®] höher als bei Silikastaub.

4 Ausgeführte Bauwerke mit Microsit[®]

Tafel 7 zeigt die Zusammensetzung der mit Microsit[®] hergestellten Betone für Bauwerke, die einem erhöhten Säureangriff ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen standhalten müssen. Die Beanspruchungsseite wird in der Regel durch einen pH-Wert von 3,5 charakterisiert; die projektierte Lebensdauer beträgt in der Regel mindestens 50 Jahre. Während des Bauablaufs wurden die Betonzusammensetzungen z.T. noch geringfügig in den Bereichen Fließmittel sowie Gesteinskörnung/Sieblinie modifiziert. Änderungen bei Zement und Zusatzstoff sowie im Wassergehalt hätten eine erneute gutachterliche Bewertung auf Basis der geschilderten Säurewiderstandsuntersuchungen erfordert. Bild 5 zeigt eine

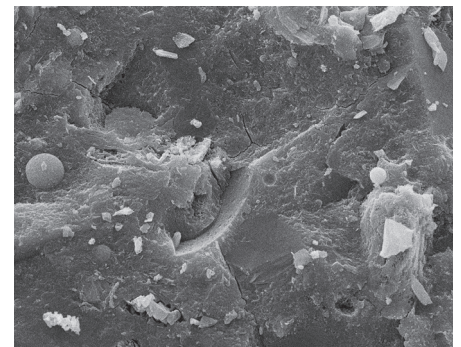


Bild 5: REM-Aufnahme der Gefügestruktur des Betons für den Kühlturm des Kraftwerks Datteln 4, aus [10]

Bild 6: Hoch belastbare Drainagebauteile mit Microsit[®]

Betontechnologische Kenngrößen:
 Zementgehalt: ca. 600 kg/m³
 Gehalt an Microsit[®] 10: 80 kg/m³
 Wassergehalt: 155 kg/m³
 Größtkorn Gesteinskörnung: 8 mm
 Druckfestigkeit > 100 N/mm²
 Zugfestigkeit > 10 N/mm²

Tafel 7: Beispiele von Betonzusammensetzungen für ausgeführte Bauwerke mit Microsit®, die einem erhöhten Säureangriff standhalten müssen

Betonzusammensetzung	Einheit	Kühlturm KW Boxberg	Kühlturm KW Lünen	Kühlturm KW Datteln 4	Emscherprojekt (exemplarisch)
Zementart Zementgehalt	kg/m ³	CEM II/B-S 42,5 R-NA 270	CEM II/B-S 42,5 R-NA 270	CEM II/B-S 52,5 R 270	CEM III/A 42,5 N-NA; alternativ CEM II/B-S 52,5 N-NA 270
Gehalt an Microsit® 10	kg/m ³	30	30	20	20
Gehalt an Flugasche Kategorie N	kg/m ³	60	60	60	60
Wassergehalt	kg/m ³	125	125	130	124
Fließmittelart: PCE					
Gesteinkörnungsart: quarzitisch, Größtkorn 16 mm					

REM-Aufnahme der auffällig dichten Gefügestruktur des Betons, der für den Bau des Kühlturms des Kraftwerks Datteln 4 verwendet wurde. Die Kombination von Zement und Flugasche ist in Tafel 7 angegeben.

Bild 6 zeigt die Herstellung von hochbelastbaren Drainagebauteilen aus Beton mit Microsit® für den Einsatz im Landebahnbereich von Großflughäfen.

5 Zusammenfassung

Von der Korngrößenverteilung her liegt Microsit® mit einem Größtkorn von 10 µm in der Regel zwischen Zementen der Festigkeitsklasse 52,5 und Silikastaub. Der die Reaktionsfähigkeit kennzeichnende Verglasungsgrad ist höher als bei üblichen Flugaschen. Auch Zemente der Festigkeitsklasse 52,5 können in der Regel noch im Feinstbereich ergänzt werden. Die besonders stark ausgeprägte Kugelform ermöglicht einen besseren „Schlupf“ in die von größeren Partikeln gebildeten Zwischenräume als eine splittige Kornform. Die Verarbeitbarkeit zementgebundener Systeme lässt sich somit durch Microsit® gezielt verbessern.

Das Erstarrungsverhalten sowie die Festigkeitsentwicklung werden wie bei üblichen Flugaschen leicht verzögert. Der Festigkeits-

beitrag ist unter den hier betrachteten Randbedingungen höher als bei üblichen Flugaschen.

Für die Anwendung von Microsit® als Zusatzstoff für Beton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [2] gelten die gleichen Regeln wie für übliche Flugaschen. Bei Verwendung in Suspensionsform ist der Wassergehalt zu berücksichtigen.

Mit Microsit® können sehr dichte Betone mit entsprechend geringen Porositäten hergestellt werden. Demzufolge ist der Widerstand dieser Betone auch gegenüber dem Eindringen von Chloriden sehr hoch. Das zeigt sich auch in einem hohen Frost-Tausalz-Widerstand ohne durch Luftporenbildner erzeugte Mikroluftporen. In zahlreichen Versuchsreihen wurde nachgewiesen, dass die wie beschrieben zusammengesetzten Betone einen sehr hohen Säurewiderstand aufweisen. Die Alkalität der Porenlösung ist bei Verwendung von Microsit® unter sonst gleichen Randbedingungen in der Regel deutlich höher als bei Silikastaub. Das gilt auch dann, wenn hüttenandhaltige Zemente CEM II/B-S und CEM III/A eingesetzt werden und der Zementgehalt dem (reduzierten) Mindestzementgehalt nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [2] entspricht.

Literatur

- [1] DIN EN 450 -1 „Flugasche für Beton-Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien“; Deutsche Fassung EN 450-1:2012-10
- [2] DIN Fachbericht 100 „Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1“ Ausgabe: März 2008
- [3] Sybertz, F.: Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff. DAFStb H. 434, Beuth Verlag, Berlin 1993
- [4] Maibaum, C.; Hüttl, R.: Neuer Zusatzstoff für Hochleistungsbetone. beton 54 (2004) H. 3, S. 132–133
- [5] Brandenburger, D.; Hüttl, R.: Hochleistungsbeton mit Feinstflugasche als Betonzusatzstoff. beton 56 (2006) H. 5, S. 198–200
- [6] Budnik, J.; Starkmann, U.: Der Naturzugkühlturm Niederaußem. beton 49 (1999) H. 10, S. 548–553
- [7] Schauerte, J.: Besondere Anforderungen an Betonqualität und Betontechnologie beim Abwasserkanal Emscher. beton 64 (2014) H. 4, S. 118–122
- [8] Götz, M.: Betone mit erhöhtem Säurewiderstand beim Bau des Abwasserkanals Emscher. beton 64 (2014) H. 4, S. 118–122
- [9] Hüttl, R.: Vergleichende Prüfung der Säurebeständigkeit und der Frost-Tausalz-Beständigkeit an Microsit®-Betonen – zusammenfassender Bericht. MBF Gesellschaft für Materialprüfung und Baustoffforschung mbH, Bericht Nr. 179/06; Berlin 05.12.2006 (unveröffentlicht und exemplarisch)
- [10] Meißner, M.; Schultz, W.; Hornung, D.; Büchter, M.: Spezialbeton für den Naturzugkühler im Kohlekraftwerk Datteln 4. Kraftwerksbau Ernst & Sohn – Special, Berlin 2010