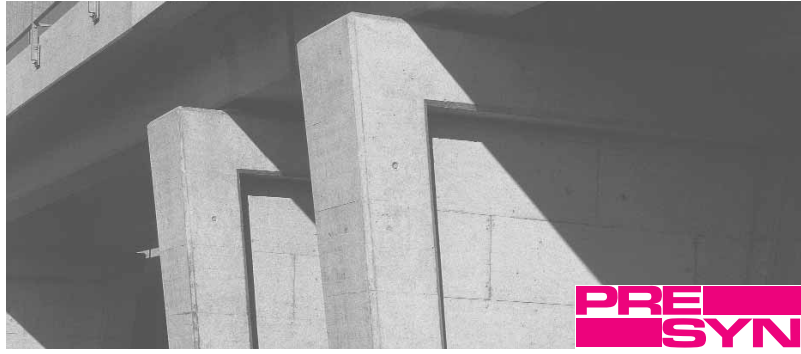




Pretop – Markenbeton auf Erfolgskurs

**Dokumentation über den Einsatz von
Steinkohleflugasche im Beton**





PRE
SYN
pretop

und Eigenschaften

aus dem Kessel mitgerissen und erstarren im abkühlenden Rauchgasstrom wegen ihrer geringen Grösse sehr schnell. Sie weisen deshalb eine überwiegend glasige Struktur auf (siehe Abb. 1). Bevor der Rauchgasstrom durch die Rauchgasentschwefelung und den Kamin als Abgas in die Umwelt gelangt, werden diese feinen Partikel über Elektrofilter herausgefiltert. Dieser Filterstaub (Steinkohlen-Flugasche oder kurz SFA) wird in Siloanlagen gesammelt. Größere Aschepartikel verbleiben im Feuerraum und werden über den Kesselboden über ein Wasserbad abgezogen.

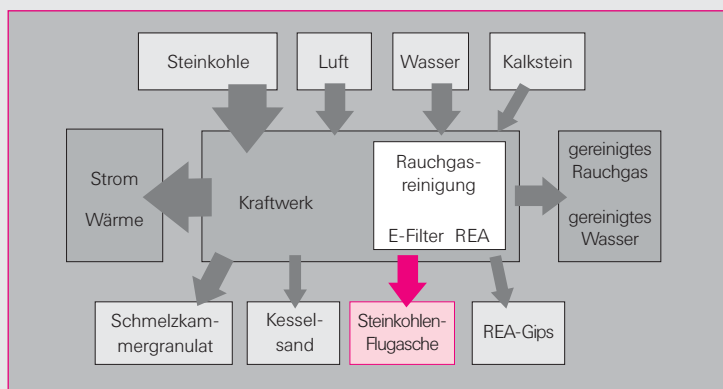


Abb. 2 Schema der Flugascheproduktion im Kraftwerk

Bei der Kohlestaubfeuerung muss zwischen Schmelzkammer- und Trockenfeuerung unterschieden werden. Bei der Schmelzkammerfeuerung liegt im Kesselraum eine Temperatur von rund 1500 bis 1700 °C vor. Die mineralischen Bestandteile der Kohle schmelzen dabei fast vollständig auf und fließen als Schlacke an der Brennkammerwand herunter. Maximal 50% der Gesamtasche fallen hierbei als Flugasche an. Bei der Trockenfeuerung sind die Feuerraumtemperaturen deutlich niedriger. Sie liegen bei rund 1100 bis 1300 °C. Bei dieser Art der Feuerung fallen etwa 90% der mineralischen Bestandteile als Flugasche an. Wegen der bei höheren Temperaturen entstehenden Probleme mit Stickoxiden (NO_x) werden – bedingt durch die Umweltauflagen – neuere Kessel nur mehr in der Technik der Trockenfeuerung gebaut. Der Anteil an Schmelzkammerfeuerungs-Flugaschen ist deshalb stark rückläufig.

3

Zusammensetzung von SFA

SFA ist ein feiner mineralischer Staub von hell- bis dunkelgrauer oder hellbrauner Farbe. Infolge der hohen Verbrennungstemperaturen besteht SFA überwiegend aus glasigem, kugelförmig erstarrtem Material (siehe Abb. 1). Die chemische Zusammensetzung entspricht im Wesentlichen den Bestandteilen wie sie in natürlichen Gesteinen oder Böden vorkommen und wird bis auf den Restkohlenstoffgehalt praktisch ausschliesslich durch die verfeuerte Kohle bestimmt. Die mineralogische Zusammensetzung und Granulometrie (Korngrößenverteilung, Kornform) hängen zusätzlich von der Art des Kessels und den Betriebsbedingungen im Kraftwerk ab. Im Vergleich zu Portlandzement sind Steinkohlen-Flugaschen vor allem durch einen höheren Gehalt an SiO_2 und Al_2O_3 gekennzeichnet, dagegen ist der Gehalt an CaO relativ gering (siehe Tab. 1 und Abb. 3).

	SFA	Trass	Portlandzementklinker
Oxid	Gehalt [M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
SiO_2	40–58	55–71	19–23
Al_2O_3	24–33	16–22	3–7
Fe_2O_3	4–17	3–10	1–5
CaO	1–8	2–10	61–67
MgO	0,8–4,8	0–5	0,6–3
K_2O	1,5–5,5	4–8	0,3–1,9
Na_2O	0,1–3,5		0,1–0,4
TiO_2	0,5–1,3	< 1	0,1–0,3
SO_3	0,1–2,0	< 1	0,01–1,5

Tab. 1 Chemische Zusammensetzung von Steinkohlen-Flugasche (SFA), Trass und Portlandzement im Vergleich

SFA entspricht somit in der chemischen Zusammensetzung den seit mehr als zweitausend Jahren verwendeten vulkanischen Aschen und Erden wie Trass oder Bims. Der mittlere Korndurchmesser liegt zwischen 10 und 30 μm . Die Rohdichte liegt meist zwischen 2000 und 2500 kg/m^3 und die Schüttdichte zwischen 800 und 1100 kg/m^3 .

4

Normen und Regeln

Im europäischen Regelwerk sind Qualität und Überwachung von Flugasche in der europäischen Norm EN 450 «Flugasche für Beton – Definition Anforderungen und Güteüberwachung» seit Januar 1995 genormt. Die Übereinstimmung der Eigenschaften der Steinkohlen-Flugasche mit den Bestimmungen der EN 450 muss für jedes Herstellerwerk aufgrund der festgelegten Qualitätskontrolle nach einer durchzuführenden Erstprüfung und in weiterer Folge durch ein Übereinstimmungszertifikat, erteilt von einer hierzu zugelassenen Zertifizierungsstelle (unter Einschaltung einer anerkannten Über-

Charakteristika und Eigenschaften von Steinkohlen-Flugasche im Beton

Die Glasmatrix der Flugasche enthaltene SiO_2 und Al_2O_3 in ionischer Form in Lösung. Zusammen mit dem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bilden sich Hydratphasen, welche denen aus der Hydratation des Zementes sehr ähnlich sind; sie sind jedoch im Verhältnis zu diesen kalkärmer. Diese zusätzliche

für die puzzolanische Reaktion zur Verfügung. Um dieses Potenzial für die Reaktion von SFA voll auszunutzen, müsste man dem Beton insgesamt die rund 1,5fache Menge des Zementes als SFA zugeben. Die im normalen Betonbau eingesetzten Mengen an Flugasche

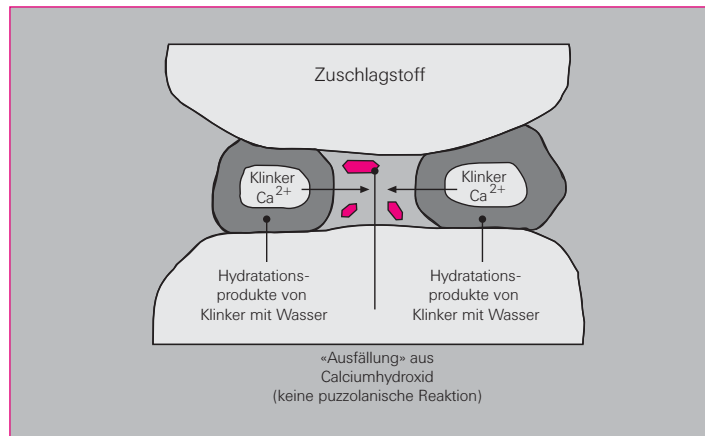
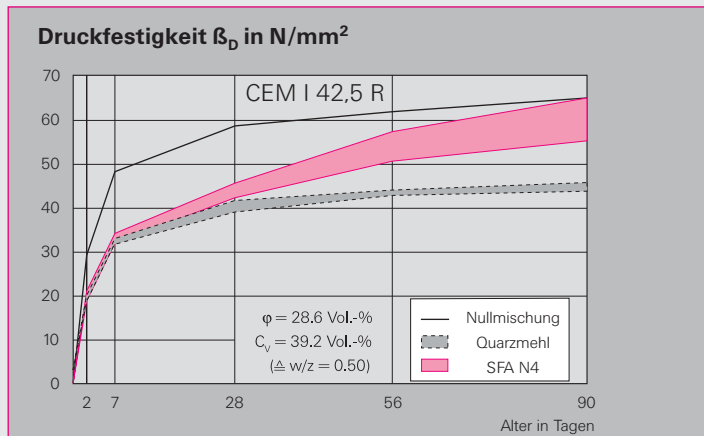
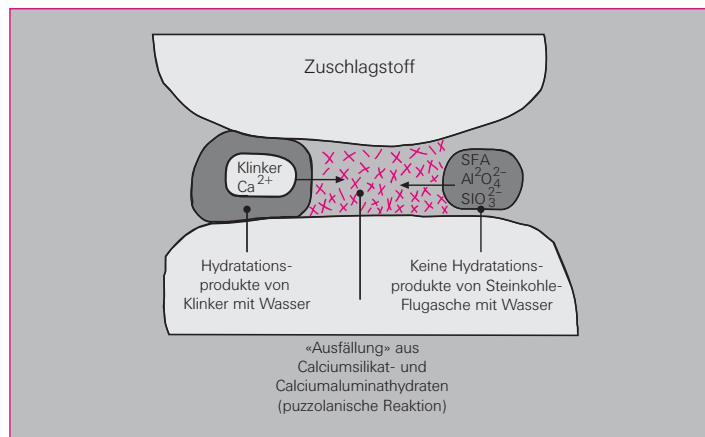
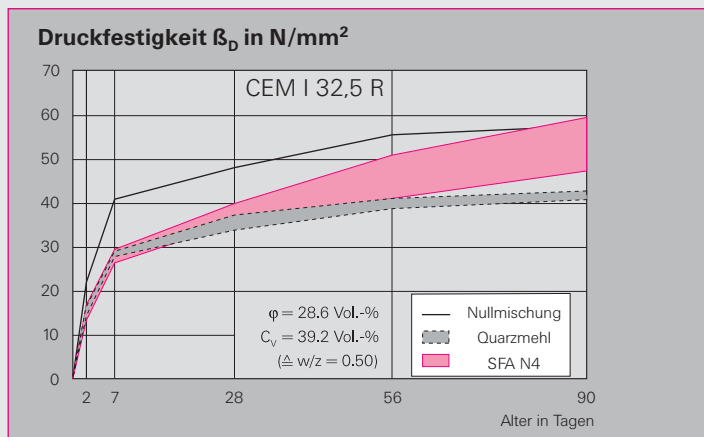


Abb. 1 Festigkeitsentwicklung von Beton mit und ohne SFA bzw. Quarzmehl (inert Füller)

Abb. 2 Mechanismus der Gefügeverdichtung durch SFA im Beton

Bildung von CSH-Phasen geschieht im vorhandenen Porenraum des Zementsteines (siehe Abb. 2). Der Zementstein wird so mit zunehmender Zeit dichter. Bei üblichen SFA-Gehalten (< als Zementgehalt) reagiert nur ein Teil des entstandenen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mit der SFA, sodass ausreichend $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zur langfristigen Aufrechterhaltung des hohen pH-Wertes des Betons verbleibt.

betragen in der Regel lediglich 20% des Zementes und liegen somit weit unter diesem Grenzwert.

Für die gemeinsame Zugabe von SFA und Silikastaub (SF) zum Beton gelten die gleichen Verhältnisse aus der Sicht der Alkalitätsreserve. Das puzzolanische Bindungsvermögen von Silikastaub ist rund dreimal so hoch wie das von SFA. Aus diesem Verhältnis berechnet sich bei gleichzeitiger Verwendung von SFA und SF ein «Silikastaubäquivalent» $C = (\text{SF} + \text{SFA}/3)$ in [M.-%] vom Zementgehalt. Um mit dem erforderlichen Sicherheitsniveau eine ausreichende Alkalitätsreserve zu erhalten, darf C einen von der Zementart abhängigen Grenzwert nicht überschreiten (siehe Tab. 1).

3

Alkalität (Korrosionsschutz) und SFA

Zur Aufrechterhaltung der Alkalitätsreserve des Betons, das heisst, um ausreichenden Widerstand gegen die Einflüsse der Carbonatisierung zu behalten, sind z.B. bei der Verwendung von Portlandzement etwas über 10% des entstehenden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ erforderlich. Der Rest steht

Ausgangsstoffe (SFA und $\text{Ca}(\text{OH})_2$) (siehe Abb. 4). Insbesondere für die Dauerhaftigkeit ist aber nicht der Gesamtporenraum, sondern die Porengrößenverteilung massgebend. Das Porengefüge flugaschehaltiger Betone unterscheidet sich von reinen Portlandzementbetonen durch einen höheren Anteil an feinen (Gel-)Poren.

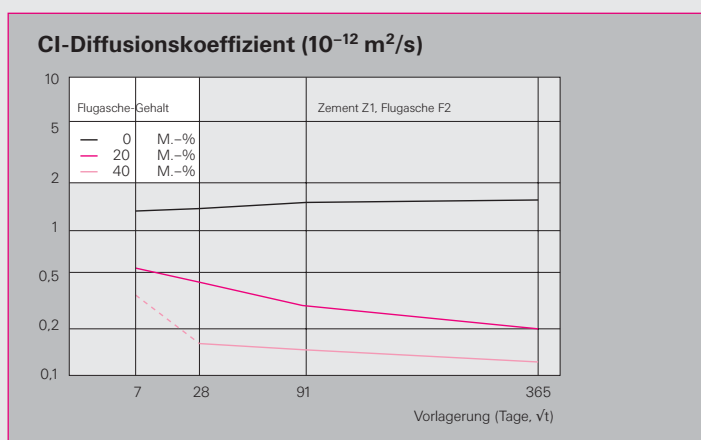


Abb. 5 Entwicklung des Cl-Diffusionskoeffizienten in Abhängigkeit vom Flugaschegehalt

Der Kapillarporenraum, massgebend für die Transportprozesse «Kapillares Saugen» und «Diffusion», wird dabei zugunsten des im Wesentlichen nicht transportrelevanten Gelporenraumes verringert. Parallel dazu setzen sich die puzzolanischen Reaktionsprodukte besonders im Bereich der Poreneingänge bzw. Porenkanäle nieder und blockieren somit den dahinter liegenden Porenraum gegen eindringende Flüssigkeiten oder Gase («pore blocking effect»). Insgesamt ergibt sich somit für flugaschehaltige Betone im Vergleich zu Betonen mit reinem Portlandzement ein mit der Zeit um bis zu 70 % geringerer Diffusionskoeffizient (siehe Abb. 5).

6

Chloridinduzierte Korrosion

Die Nutzungsdauer von Betonbauwerken, die durch Chlorid beansprucht werden (Parkdecks, Brücken, Tunnelinnenschalen usw.) hängt in besonderem Masse von der Qualität der Betondeckungsschicht ab. Durch die Sicherstellung eines dichten Gefüges in der Betondeckungsschicht kann sowohl das Eindringen von Chloriden bis zum Stahl als auch die Korrosionsgeschwindigkeit nach Überschreiten des korrosionsauslösenden Chloridgehaltes an der Stahloberfläche verringert werden.

Mit zunehmendem Flugaschegehalt ergeben sich gegenüber Betonen mit reinem Portlandzement deutlich geringere Chlorideindringtiefen (siehe Abb. 6). Dies deutet auf eine merkliche Verringerung der Transportgeschwindigkeit für Chlorid infolge der puzzolanischen Reaktion der SFA hin («pore blocking effect») – siehe auch Gefügedichtheit/Porosität).

Neben dem Einfluss des Gefüges auf den Eindringwiderstand von Chloriden in den Beton werden auch wesentliche Teilprozesse bei der Korrosion von Stahl in Beton durch die Dichtheit des Porengefüges beeinflusst. Einer der wesentlichen Teile ist der Ladungstransport von Ionen zwischen anodisch und kathodisch wirkenden Stahloberflächen,

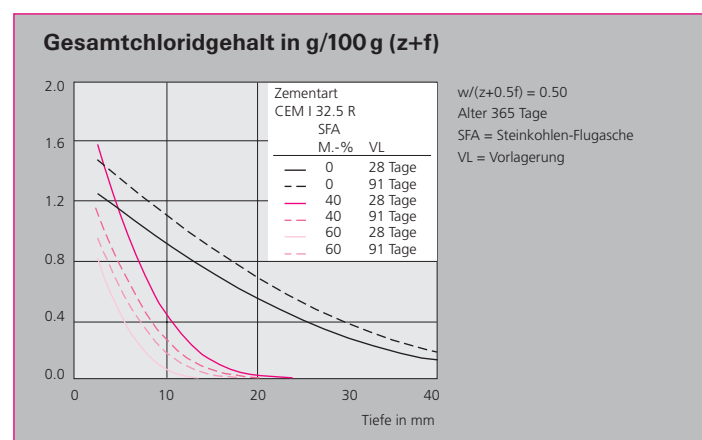


Abb. 6 Vergleich der Chlorideindringtiefe flugaschehaltiger Betone im Vergleich zu Betonen mit reinem Portlandzement

der durch den Elektrolytwiderstand des Betones bestimmt wird. Betone mit SFA zeigen hier im Laufe der Zeit im Vergleich zu Betonen mit reinem Portlandzement bei gleichen Umgebungsbedingungen einen deutlich höheren Widerstand gegen den Ionentransport. Damit kann durch den Einsatz von Flugasche im Beton sowohl das Eindringen von Chloridionen in den Beton deutlich verringert, als auch im Fall der chloridinduzierten Korrosion die Korrosionsgeschwindigkeit verlangsamt werden.

7

Sulfatwiderstand von Beton mit SFA

Durch langfristige Einwirkung von sulfathaltigem Wasser auf Beton kann dessen Gefüge derart geschädigt werden, dass die Gebrauch- und Tragfähigkeit des Betones beeinträchtigt wird. Im Wesentlichen reagieren die im Zementstein enthaltenen aluminathaltigen Phasen (hydratisiert und unhydratisiert) und Calciumhydroxid mit dem eindringenden Sulfat. Dabei entstehen volumenreiche (wasserreiche) Phasen wie Ettringit, Monosulfat und sekundärer Gips.

Bei der Einwirkung von Wässern und Böden mit erhöhtem Sulfatgehalt muss (nach SIA 162) ein Zement mit hohem Sulfatwiderstand (PCHS) verwendet werden. Zusätzlich muss der Beton die Anforderungen an die Dichtigkeit (gemäss SIA 162 Pkt. 3.36) erfüllen. Als PCHS gelten nach dem Anhang zur SIA 215.002 Portlandzemente mit einem C3A-Gehalt von unter 3 M.-%. Nach DIN 1164 gelten auch Hochofenzemente (CEM III B) mit einem Hüttensandanteil von über 65 M.-% als sulfatbeständig.

1

Einführung

Steinkohlen-Flugasche (SFA) liefert auf Grund ihrer chemischen und physikalischen Wirkung einen wesentlichen Beitrag zu den Eigenschaften des Frisch- und Festbetons, der zumeist unter dem Begriff «Wirksamkeit von SFA» zusammengefasst wird. Die Wirkung von SFA, oder besser das Zusammenwirken von SFA mit dem Bindemittel Zement auf die einzelnen Betoneigenschaften wird von zahlreichen Faktoren beeinflusst und ist dementsprechend komplex. Da nach der zurzeit geltenden SIA 162 «Betonbauten» Zusatzstoffe – also auch SFA – nur eingesetzt werden dürfen, wenn durch Vorversuche deren Eignung nachgewiesen wurde (z.B. Presyn Silicoline), ist die Kenntnis der wesentlichen Einflüsse von SFA auf die Eigenschaften sowohl des Frisch- als auch des Festbetons zur zielgerichteten Erstellung von Betonrezepten mit SFA zwingend notwendig. Die wesentlichen Zusammenhänge werden im Folgenden dargestellt. Bezüglich normativer Regelungen wird auf die prEN 206 «Beton» [1] verwiesen, die im Frühjahr 2000 als Europäische Norm angenommen wurde.

2

Frischbetoneigenschaften

2.1

Verarbeitbarkeit/Konsistenz

Der Einsatz von Flugasche im Beton als teilweiser Zementersatz bewirkt in der Regel eine Verbesserung/Erhöhung der Konsistenz und der Verarbeitbarkeit (z.B. Pumpbarkeit) – siehe Abb. 1. Die Wirksamkeit der SFA wird dabei auf die folgenden Faktoren zurückgeführt:

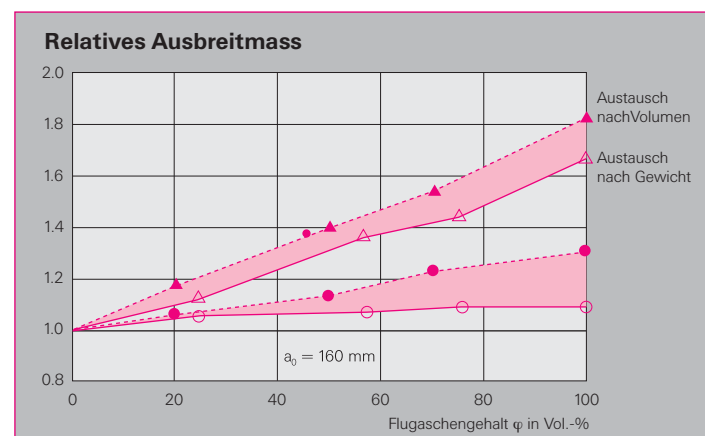


Abb. 1 Bandbreite der Erhöhung des Ausbreitmasses von Feinmörtel durch den Einsatz von SFA [3] (relatives Ausbreitmass = Ausbreitmass von Mörtel mit SFA/Ausbreitmass Zementmörtel).

Die Flugaschepartikel lagern sich in die Zwickel des Korngemisches (gute Zusammensetzung vorausgesetzt) ein und verdrängen das dort vorhandene Anmachwasser, welches so zu einer weicheren Konsistenz des Mörtels bzw. Betons führt.

Die Angaben zur Nachbehandlung finden sich dann zukünftig in den Ausführungsnormen, welche auf europäischer Ebene jedoch zurzeit noch in Bearbeitung sind.

3.3 Temperaturspannungen

Durch die in Betonbauteilen während der Erhärtung entstehende Hydrationswärme sowie deren Abfließen an die Umgebung können sich auf Grund des vorhandenen Temperaturgefälles zwischen Kern- und Randzone Eigenspannungen im Querschnitt einprägen (siehe Abb. 4).

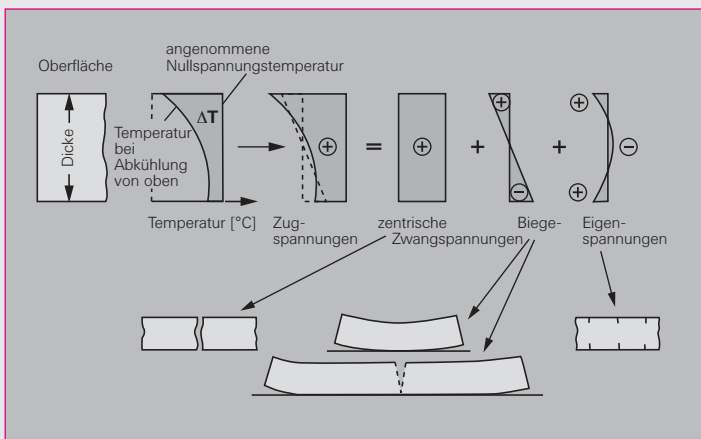


Abb. 4 Spannungen im Querschnitt infolge Abfließens der Hydrationswärme [5]

Wird der Beton beim und nach dem Erhärten in seiner Verformung behindert, so entstehen durch das Abfließen der Hydrationswärme Zugspannungen. Diese Zugspannungen führen beim Überschreiten der Betonzugfestigkeit zu Rissen im Beton.

Massgebend für die Gefahr der Rissbildung ist nicht die Gesamtmenge der freigesetzten Energie, sondern der zeitliche Verlauf der Hydrationswärme in Abhängigkeit von der Entwicklung des Elastizitätsmoduls des Betons. Durch den Einsatz von SFA kann sowohl die Wärmeentwicklung des Betons als auch die zeitliche Entwicklung des E-Moduls positiv beeinflusst werden (siehe Abb. 5). Gemeinsam mit konstruktiven Massnahmen kann so die Gefahr der Rissbildung in massigen Bauteilen (dicke Fundamentplatten, massive Wände, usw.) wirksam vermieden werden.

3.4 Festigkeitsentwicklung

Der Beitrag der Flugasche zur Festigkeit des Betons beruht im Wesentlichen auf zwei unterschiedlichen Effekten. Im jungen Beton (in den ersten Tagen) wirkt die Flugasche vor allem durch ihre Füllerwirkung, d.h. durch das Ausfüllen der Zwickel und Hohlräume und durch Reaktionsleimbildung (Beschleunigung der Zement-

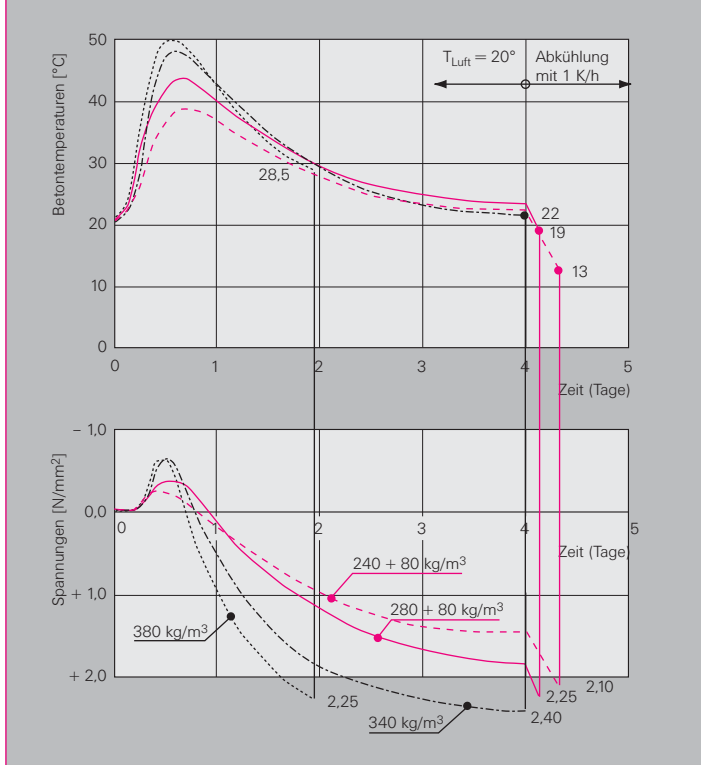


Abb. 5 Reissneigung von Betonen mit und ohne SFA im Reissrahmenversuch

hydratation). In späterem Alter (i.d.R. nach mehr als 14 Tagen) trägt die SFA durch ihre puzzolanische Reaktion massgeblich zur Festigkeit des Betons bei. Hierbei werden von der SFA unter dem teilweisen Verbrauch des in den Poren vorhandenen Calciumhydroxids neue CSH-Phasen («Zementstein») gebildet. Die nach 90 Tagen erreichten Festigkeiten von Betonen mit einem teilweisen Ersatz des Zementes durch Flugaschen entsprechen in der Regel den Vergleichsbetonen ohne Flugasche und die Endfestigkeiten liegen meist auf Grund der gefügeverdichtenden Wirkung der SFA über denen von vergleichbaren Betonen ohne SFA (siehe Abb. 6).

3.5 E-Modul

Die Elastizitätsmoduln von Betonen gleicher Festigkeit mit und ohne Flugasche unterscheiden sich nicht wesentlich voneinander. Im Hinblick auf die statische Berechnung von Bauwerken sind hier keine Unterscheidungen erforderlich. Durch die bessere Nacherhärtung von Betonen mit SFA ist auch ein im Endstadium höherer E-Modul als bei vergleichbaren Betonen ohne SFA zu erwarten.

4

Widerstand gegen Umweltentwicklung

4.1

Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand

Betone, die im durchfeuchteten Zustand Frosteinwirkung mit Wasser oder Taumitteln ausgesetzt sind, müssen nach SIA 162 3.37 in Vorversuchen ihre Eignung gegen diese Angriffe nachweisen. Bei der Beanspruchung durch Frost ist durch den Einsatz von SFA keine signifikante Änderung des Frostwiderstandes zu erwarten, wenn gleiche 28-Tage Festigkeiten wie bei Vergleichsbetonen erreicht werden. Zahlreiche Untersuchungen haben belegt, dass die verwendete Zementart einen wesentlich höheren Einfluss auf den Frostwiderstand eines Betones besitzt als der Einsatz von SFA. Nach der zukünftigen EN 206 und den zurzeit in Deutschland geltenden Regeln darf bei Beton, der einer Frost-Tausalz-Beanspruchung ausgesetzt ist, Flugasche als Zusatzstoff zwar eingesetzt, nicht jedoch auf den Zementgehalt angerechnet oder bei der Berechnung des w/z-Wertes berücksichtigt werden. Ob diese Einschränkung gerechtfertigt ist, wurde bislang nicht systematisch überprüft und ist zurzeit Gegenstand mehrerer Forschungsvorhaben.

4.2

Alkali-Zuschlag-Reaktion

Einzelne Zuschläge unterschiedlicher geologischer Herkunft enthalten amorphe und somit gegenüber alkalischen Lösungen reaktive Silikatbestandteile (z.B. Opal, Flint, Grauwacke). Durch die Reaktion des alkalischen Porenwassers des Betons (hauptsächlich die mit dem Zement eingebrachten wasserlöslichen Alkalien Na_2O und K_2O) mit diesen reaktiven Bestandteilen der Zuschläge kommt es zur Bildung eines quellfähigen Alkali-Silika-Gels. Je nach Reaktivität des Zuschlages führt die daraus resultierende Volumenzunahme zur Zerstörung des Betongefüges. Durch den Einsatz von SFA im Beton kann einerseits der Anteil an löslichen Alkalien im Beton insgesamt reduziert werden, andererseits wird durch die puzzolanische Reaktion der SFA das Betongefüge verdichtet und die Zusammensetzung des Porenwassers günstig beeinflusst. Als wirksam haben sich SFA-Gehalte von über 20 M.-% erwiesen.

5

Anrechnung von SFA auf den Zementgehalt

Der im Laufe der Zeit wachsende Beitrag der SFA zur Betonfestigkeit durch die puzzolanische Reaktion kann durch eine teilweise Anrechnung der SFA auf den Zementgehalt berücksichtigt werden. Grundlage dieser Anrechnung ist die Überlegung, in welchem Verhältnis die k-fache Menge Zement durch SFA ausgetauscht werden kann, ohne dass zu einem bestimmten Zeitpunkt ein Abfall in der Betonfestigkeit oder eine signifikante Verschlechterung anderer Betoneigenschaften erfolgt. Der Austausch von Zement durch Flugasche darf jedoch nicht beliebig erfolgen. In der zukünftigen EN 206 sind für die Verwendung von Flugasche folgende Regeln vorgesehen:

- Die Höchstmenge an Flugasche, die auf den w/z-Wert angerechnet werden darf, beträgt $0,33 \times$ Zementgehalt. Darüber hinausgehende eingesetzte Mengen dürfen weder auf den w/z-Wert noch auf den Mindestzementgehalt angerechnet werden.
- Bei der Verwendung von CEM I 32,5 darf ein k-Wert von 0,2 und bei CEM I 42,5 und höher ein k-Wert von 0,4 angesetzt werden.
- Der Zementgehalt darf um Wert:
 $\text{Mindestzementgehalt} - k \times (\text{Mindestzementgehalt} - 200)$ in kg/m^3 nicht unterschreiten. Der Gehalt an Zement + SFA darf insgesamt nicht geringer als der geforderte Mindestzementgehalt sein.

Auf Grund der in Deutschland bislang gemachten Erfahrungen wird dort der k-Wert in Verbindung mit CEM I, CEM II/A-S, CEM II/B-S, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM II/A-L, CEM III/A und CEM III/B mit einem nachgewiesenen Hüttensandanteil $< 70\%$ generell auf 0,4 festgelegt. Wird der Beton durch Frost- und Taumittel beansprucht, darf zwar Flugasche eingesetzt werden, jedoch nicht auf den Zementgehalt angerechnet werden.



**PRE
SYN**