

Zusatzstoffe. Teil 3, Flugaschen

Autor(en): **Hermann, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **63 (1995)**

Heft 6

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-153804>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Zusatzstoffe: Flugaschen

Steinkohlenflugaschen sind puzzolanisch wirkende Zusatzstoffe, die vor allem im Ausland zur Verbesserung bestimmter Betoneigenschaften (Verarbeitbarkeit, Dauerhaftigkeit) eingesetzt werden.

In der kleinen Reihe über Zusatzstoffe folgt auf die allgemeine Einleitung [1] und den Artikel über hydraulischen Kalk [2] eine Übersicht über Flugaschen, die sowohl in Zementen als auch als Zusatzstoffe verwendet werden. Portlandflugaschezemente werden in der Schweiz allerdings nicht hergestellt und nur selten eingesetzt. Hingegen werden jährlich rund 30 000 t Flugasche importiert, die teilweise als Zusatzstoffe in Betonen und Mörteln dienen.

Flugaschen sind ein Abfallprodukt aus der Elektrizitätsgewinnung in Feuerungsanlagen, die mit gemahltem Anthrazit oder gemahlener Steinkohle betrieben werden. Sie werden durch elektrostatische oder mechanische Abscheidung aus Abgasen gewonnen. Eine kostengünstige Entsorgung dieses Abfalls, der weltweit in riesigen Mengen anfällt, ist seine Verwendung als Zusatzstoff in Beton.

Unterschiedliche Kohlen und Feuerungsanlagen führen zu Flugaschen, die sich in ihrer Zusammensetzung (siehe *Tabelle 1*) und ihrer Eignung als Betonzusatzstoffe stark unterscheiden können. Literaturdaten lassen sich deshalb oft nicht direkt in die Praxis umsetzen. Vorversuche sind unabdingbar, wenn nicht ein bereits klassifizierter Beton verwendet wird.

| Oxide | 36 Flugascheproben | 424 Flugascheproben | Analysenwerte eines Schweizer Zements |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------------|
| SiO ₂ | 40,0–58,4 | 42,6–56,3 | 22,5 |
| Al ₂ O ₃ | 23,9–32,9 | 23,7–31,1 | 5,5 |
| Fe ₂ O ₃ | 5,9–21,5 | 4,83–15,3 | 2,0 |
| CaO | 0,96–8,44 | 0,67–6,84 | 62,5 |
| MgO | 1,14–4,15 | 1,19–4,91 | 1,5 |
| K ₂ O | 0,50–5,63 | 2,92–5,20 | 1,0 |
| Na ₂ O | nicht best. | 0,36–1,43 | 0,4 |
| SO ₃ | 0,23–1,70 | 0,09–1,71 | 2,7 |

Tab. 1 Bereiche der chemischen Zusammensetzung von Steinkohlenflugaschen in Massenprozent [9].

Flugaschen in den Normen

Am 9. September 1994 ratifizierte das Europäische Komitee für Normung (CEN) die Euronorm 450, «Flugasche für Beton – Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung» [3]. Als CEN-Mitglied hätte die Schweiz diese Norm bis spätestens 31. März 1995 in den Status einer nationalen Norm erheben müssen. Dies wird erst in absehbarer Zeit geschehen: Aus der EN 450 wird dann die Norm SIA 215.004, die sich von der EN 450 nur durch ein nationales Titelbild unterscheidet. Analog wird mit den beiden Euronormen verfahren, die Vorschriften zur Analyse von Flugaschen enthalten:

- Die EN 451–1 «Prüfverfahren für Flugasche – Teil 1: Bestimmung des freien Calciumoxids» wird zur Norm SIA 215.005 [4].
- Die EN 451–2 «Prüfverfahren für Flugasche – Teil 2: Bestimmung der Feinheit durch Nasssiegung» wird zur Norm SIA 215.006 [5].

Nach EN 450, Ziffer 3.2, ist Flugasche ein «feinkörniger Staub, der hauptsächlich aus kugelförmigen, glasigen Partikeln besteht, bei der Verbrennung feingemahlener Kohle anfällt, puzzolanische Eigenschaften hat und im wesentlichen aus SiO₂ und Al₂O₃ besteht. Der Gehalt an wirksamem SiO₂, wie er gemäss ENV 197–1 festgelegt und bestimmt

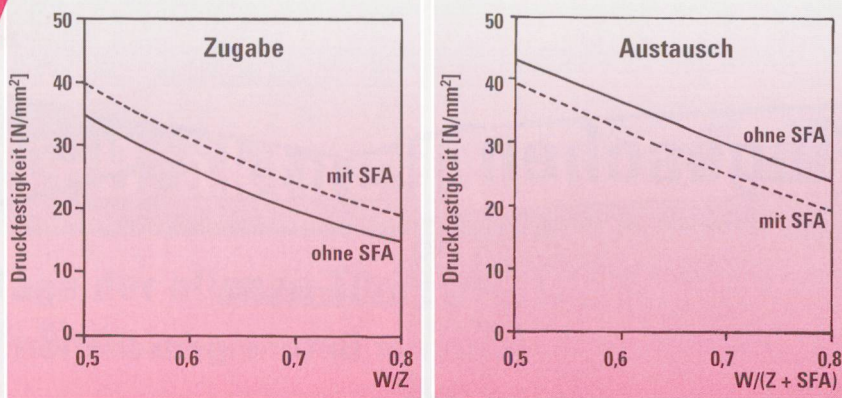


Abb. 1 Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Art der Flugaschenzugabe (SFA = Steinkohlenflugasche) [9].

Grafik: TFB/ZSD, S. Einfalt

wird, beträgt mindestens 25 % Masseanteil.»

Flugaschen sind auch Bestandteil von Portlandflugaschezementen, die in der Norm SIA 215.002 (entspricht ENV 197-1) behandelt werden [6, 7]. Hier wird zwischen kieselsäurereichen Flugaschen (V) und kalkreichen Flugaschen (W) unterschieden. Kieselsäurereiche Flugaschen bestehen im wesentlichen aus reaktionsfähigem SiO_2 und Al_2O_3 , kalkreiche Flugaschen hauptsächlich aus reaktionsfähigem CaO , SiO_2 und Al_2O_3 . Je nach Art und Menge der im Zement enthaltenen Flugasche wird unterschieden zwischen

- CEM II/A-V mit 80–94 % PC-Klinker und 6–20 % kieselsäurereicher Flugasche (V)
- CEM II/B-V mit 65–79 % PC-Klinker und 21–35 % kieselsäurereicher Flugasche (V)
- CEM II/A-W mit 80–94 % PC-Klinker und 6–20 % kalkreicher Flugasche (W)
- CEM II/B-W mit 65–79 % PC-Klinker und 21–35 % kalkreicher Flugasche (W)

Eigenschaften von Flugaschen

Flugaschen, die sich als Zusatzstoffe eignen, stammen fast immer aus thermischen Kraftwerken, in denen

Steinkohle verheizt wird. Sehr selten geeignet sind Flugaschen aus Anlagen, die mit Braunkohle befeuert werden; Flugaschen aus Kehrichtverbrennungsanlagen sind ungeeignet. Wegen ihres relativ hohen Gips- und Kalkgehalts können sie zu Treiben in Beton führen. Zudem ist ihr Schwermetallgehalt teilweise hoch [8]. Die folgenden Ausführungen beziehen sich deshalb fast ausschliesslich auf Steinkohlenflugaschen. Der Glasgehalt von Steinkohlenflugaschen aus sogenannten Schmelzfeuerungsanlagen liegt deutlich über 80 und häufig über 90 Masseprozent [9]. Der niedrige Anteil an kristallinem Material ist auf das rasche Abkühlen der Asche zurückzuführen, das die Ausbildung regelmässiger Kristallgitter erschwert. (Erwünscht

ist ein hoher Anteil an glasartigem Material, denn dieses bewirkt die puzzolanische Reaktion.)

Form und Grösse von Flugascheteilchen sind von vielen Parametern abhängig. Meistens besteht der Hauptteil aus glasigen Kugeln oder Hohlkugeln, die ihrerseits wieder Kugeln enthalten können. Den Rest bilden transparente bis opake, wenig bis stark poröse Teilchen mit runder bis länglicher Form [10].

Die Durchmesser der Flugascheteilchen können stark variieren ($< 0,001$ mm bis > 1 mm) [10]. Bei einer normkonformen Flugasche darf der Siebrückstand auf einem Sieb mit 0,045 mm Maschenweite maximal 40 Masseprozent betragen [3]. Flugaschen unterscheiden sich von Portlandzement vor allem im hohen

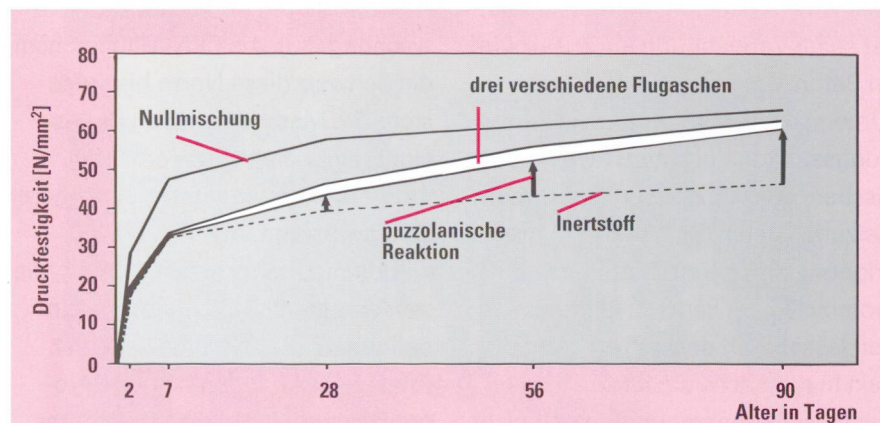


Abb. 2 Der Einfluss von Flugasche auf die Festigkeitsentwicklung setzt erst verspätet ein (nach [13]).

Grafik: TFB/ZSD, S. Einfalt

Anrechenbarkeit von Steinkohlenflugaschen in Beton

Steinkohlenflugaschen lassen sich sowohl als Bestandteile normierter Zemente als auch als Zusatzstoffe einsetzen. In beiden Fällen leisten sie einen Beitrag zu bestimmten Eigenschaften eines Betons (Druckfestigkeit, Dauerhaftigkeit oder Dichtigkeit). Darüber, wie dieser Beitrag bei der Ausarbeitung von Betonrezepturen zu berücksichtigen ist, wird schon lange diskutiert. Eindeutig ist die Situation bei den im Werk hergestellten Portlandflugaschezementen, die gemäss Norm SIA 215.002 (ENV 197-1) [6] normiert sind: Unabhängig vom Gehalt an Flugasche wird hier immer die gesamte Zementmasse einbezogen. Dies gilt auch bei der Berechnung der W/Z-Werte (Wassermenge/Zementmenge) und der Zementgehalte, an die in Tabelle 3 der Vornorm SIA V162.051 (entspricht ENV 206) [17] Maximal- bzw. Mindestanforderungen gestellt werden, die von den zu erwartenden Umwelteinflüssen abhängen.

In der immer noch geltenden Norm SIA 162 [18] wird die Verwendung von Portlandzement vorausgesetzt (Ziffer 5 14 11). Bei einem gemäss Ziffer 5 12 4 korrekt bestellten Beton müssen lediglich die Zementmenge und die Zementsorte angegeben werden, beispielsweise

- Beton B 35/25,
CEM I/32,5 300 kg/m³

Die Eigenschaften eines Betons, der pro Kubikmeter 300 kg Portlandflugaschezement (CEM II/A-V) mit einem Anteil an kieselsäurereicher Flugasche (V) von 45 kg enthält, sind an-

ders als die Eigenschaften eines vergleichbaren Betons, dem 255 kg Portlandzement (CEM I) und 45 kg Steinkohlenflugasche einzeln oder als Betonwerks- bzw. Baustellenmischung zugesetzt wurden.

In den Fällen, in denen Flugasche nicht im Zement, sondern dem Beton zugegeben wird, erhebt sich die Frage, inwieweit die Flugasche bei der Berechnung des Zement- bzw. Bindemittelgehalts und davon abhängenden Grössen zu berücksichtigen ist. Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten:

1. Es wird nur die Zementmenge Z berücksichtigt.
2. Die Zusatzstoffmenge X wird zu 100% zur Zementmenge Z hinzugezählt. Anstelle des W/Z-Wertes tritt der W/B-Wert (Wasserbindemittelwert): $W/B = W/(Z + X)$.
3. Zur Zementmenge wird auch die mit einem Faktor k multiplizierte Zusatzstoffmenge gerechnet: $W/B = W/(Z + kX)$, wobei der sogenannte «Zementäquivalentwert» oder Anrechnungswert bei Flugaschen < 1 ist.

Die dritte Möglichkeit wurde von *I. A. Smith* bereits im Jahr 1976 vorgeschlagen. Sie wird in vielen Ländern angewendet, in denen die Zusatzstoffmenge nicht einfach zur Zementmenge hinzugezählt oder vollständig ignoriert wird. Für Steinkohlenflugaschen wurde in Deutschland ursprünglich ein k -Wert von 0,3 festgelegt. Neuere Untersuchungen haben dazu geführt, dass er 1992 für die meisten Anwendungen auf 0,4 angehoben wurde [14]. Dieser k -Wert wird

voraussichtlich auch in einer revidierten Form der ENV 206 Eingang finden. Zudem werden auch Mindestzementgehalte und maximale Gehalte an anrechenbarer Flugasche eingeführt werden.

Festzuhalten ist, dass der W/Z-Wert bei einer Betonbestellung nach Norm SIA 162 nicht vorgeschrieben werden muss. Probleme können jedoch auftreten, wenn in der Betonbestellung ausdrücklich die Verwendung von Flugasche als Zusatzstoff verlangt wird.

Im günstigsten Fall wird der Betonhersteller bereits einen klassifizierten Beton anbieten, der die gestellten Anforderungen erfüllt. Andernfalls gilt Norm SIA 162, Ziffer 5 14 43 [18]: «Die Auswirkung bzw. Eignung der Zusatzmittel und Zusatzstoffe ist jeweils durch systematische, schlüssige Vorversuche nachzuweisen. Insbesondere muss festgestellt werden, ob und in welchem Masse andere für die vorgesehene Verwendung relevante Betoneigenschaften ungünstig verändert werden.»

Konkret braucht sich in diesem Fall niemand darum zu kümmern, ob jetzt mit W/Z- oder W/B-Werten zu operieren ist. Wichtig ist, dass der Beton die erforderlichen Eigenschaften erreichen wird. Dabei wird es sich in den meisten Fällen um Mindestdruckfestigkeiten nach 28 Tagen handeln. k -Werte können eine Orientierungshilfe sein, wenn bei Vorversuchen abgeklärt werden soll, wieviel Zusatzstoff einer bestimmten Menge Zement äquivalent sein könnte.

5

SiO₂- und Al₂O₃-, aber niedrigen CaO-Gehalt (siehe *Tabelle 1*).

Wirkungsweise von Steinkohlenflugaschen

Die Wirkungsweise von Flugaschen ist im Kasten «Wie Steinkohlenflugaschen reagieren» näher umschrieben. Deshalb hier nur soviel: Flugaschen beginnen erst nach rund sieben oder mehr Tagen zu reagieren, wenn durch die Zementhydratation genügend Calciumhydroxid freigesetzt worden ist. Betone, in denen nach einem Jahr nur 50 % der zugesetzten Flugasche reagiert hat, sind nicht ungewöhnlich [11].

Mit Abstand wichtigstes Kriterium für die Beurteilung der Wirksamkeit von Flugaschen ist ihre Feinheit, die nicht nur die puzzolanische Reaktivität, sondern auch die Rheologie und die Fülleraktivität massgebend beeinflusst [9].

Zusatzstoff oder Zementersatz

Flugasche kann grundsätzlich als Zusatzstoff oder als teilweiser Zementersatz dienen. Die unterschiedlichen

Konsequenzen dieser Verwendungsarten sind in den *Abbildungen 1a* und *1b* anhand des Einflusses von Flugasche auf die Druckfestigkeit dargestellt [9]. Wenn die Zementmenge bei der Flugaschezugabe beibehalten wird, resultiert im Vergleich zum Beton ohne Flugasche eine Druckfestigkeitszunahme (*Abbildung 1a*). Der Ersatz einer bestimmten Zementmenge durch die entsprechende Flugaschemenge führt dagegen zu tieferen Druckfestigkeiten. Wenn Druckfestigkeiten wie im Beton ohne Flugasche gefordert werden, muss deshalb der Wassergehalt erniedrigt werden (*Abbildung 1b*) oder die Bindemittelmenge erhöht werden.

Darüber, wie der Beitrag von Flugasche an die Eigenschaften eines Betons zu gewichten sind, herrscht seit Jahren grosse Uneinigkeit. Die Spanne reicht von der Ignorierung der Flugasche bis zur vollständigen Anrechnung. Die Masse der Flugasche wird also bei der Berechnung des Gesamtzementgehalts oder des Wassermengegehalts (W/Z-Werts) überhaupt nicht, teilweise oder vollständig zur Zementmasse hinzuge-

zählt. Die Problematik ist im Kasten «Anrechenbarkeit von Steinkohlenflugaschen in Beton» ausführlicher beschrieben.

Einfluss auf Frischbetoneigenschaften

Wenn sphärische Flugascheteilchen kantige Portlandzementteilchen ersetzen, verbessern sich die Kohäsion und die Verarbeitbarkeit eines Betons bei gleicher Wassermenge [12]. Flugaschehaltige Betone lassen sich in der Regel besser pumpen als vergleichbare Betone ohne Flugasche. Beim Einsatz von Luftporenmitteln (LP) sollten Vorversuche durchgeführt werden, da Flugaschen sich negativ auf den Gehalt und die Stabilität von Luftporen auswirken können; meistens wird mehr LP als in Betonen ohne Flugasche gebraucht [10]. Alle Betone müssen gut nachbehandelt werden. Dies gilt besonders für flugaschehaltige Betone, bei denen die Verbesserung des Zementsteingefüges durch puzzolanische Reaktionen der Flugasche nur in feuchter Umgebung stattfinden kann. Bei Wasser- und Feuchtigkeitsverlusten

Wie Steinkohlenflugaschen reagieren

Steinkohlenflugaschen reagieren puzzolanisch. Dies bedeutet, dass sie mit Wasser und Calciumhydroxid zu Calciumsilikat- und Calciumaluminathydraten umgesetzt werden. Hydrate ähnlicher Zusammensetzung entstehen auch bei der Reaktion zwischen Klinker und Wasser. Die Bildungsmechanismen sind jedoch sehr verschieden. Sie sind in den *Abbildungen 3a* und *3b* stark vereinfacht wiedergegeben. Im Verlauf der Hydratation von Portlandzement (*Abbildung 3a*) bildet sich auf den einzelnen Körnern eine zunehmend dicker werdende Schicht von Hydratationsprodukten (anfänglich hauptsächlich Calciumsilikathydrate, CSH), während das ebenfalls gebildete Calciumhydroxid teilweise als sechseckige, plättchenförmige Kristalle aus der Porenlösung ausfällt. (Die Hydratationsreaktionen von Zement sind im Kasten «Was bei der Reaktion zwischen Zement und Wasser geschieht» in [1] vereinfacht beschrieben.)

Anders ist die Situation in Anwesenheit von Puzzolanen, also beispielsweise Steinkohlenflugaschen (*Abbildung 3b*). Ausgangspunkt der Reaktionen ist auch hier die Hydratation des PC-Klinkers unter Bildung von Calciumsilikathydraten (CSH) und von Calciumaluminathydraten (CAH). Die Flugasche-Teilchen, die zuerst lediglich als Reaktionskeime für die Hydratationsprodukte des Zements dienen, reagieren nicht direkt mit Wasser; sie bilden keine Hydratationsprodukte. Vielmehr wird ihre Glasmatrix bei einer ausreichenden Konzentration von Calciumhydroxid in der Porenlösung langsam aufgelöst. Als SiO_3^{2-} bzw. $\text{Al}_2\text{O}_4^{2-}$ freigesetztes SiO_2 bzw. Al_2O_3 reagiert mit den Hydratationsprodukten des Zements (vor allem $\text{Ca}(\text{OH})_2$) und Wasser zu Calciumsilikat- und Calciumaluminathydraten, die ähnlich wie die Hydratationsprodukte von Portlandzement zusammengesetzt sind und den Porenlösung enthaltenden Raum langsam auffüllen.

Hauptquelle: [9]

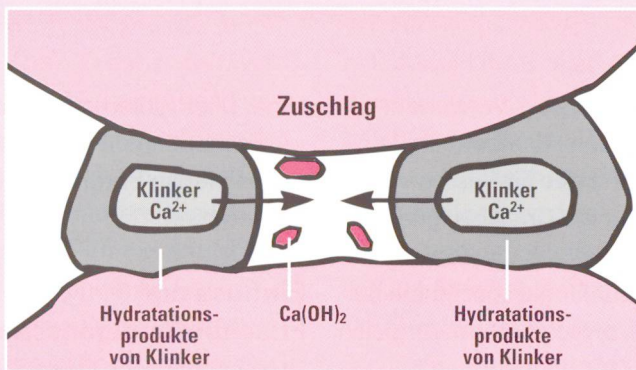


Abb. 3a Hydratation von Portlandzementklinker (nach [9]).

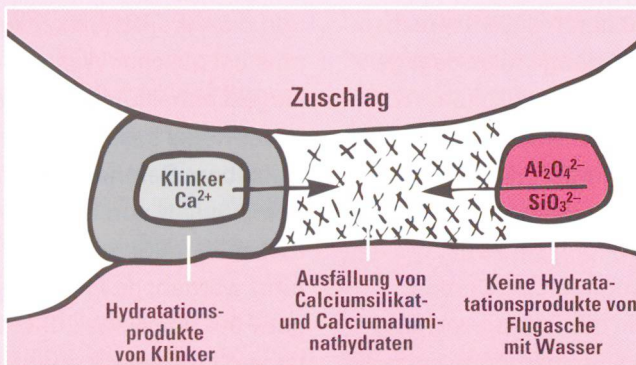


Abb. 3b Schematische Darstellung der Reaktion von Flugasche in Anwesenheit von hydratisiertem Portlandzementklinker (nach [9]).

Grafik: TFB/ZSD, S. Einfalt

in einem frühen Stadium muss an exponierten Stellen mit schwachem, durchlässigerem Beton gerechnet werden [12].

Einfluss auf die Festbetoneigenschaften

Drei Einflüsse kennzeichnen den Einfluss von Steinkohlenflugasche auf die Festbetoneigenschaften [13]:

- die relativ langsame Reaktion
- der Verbrauch an Calciumhydroxid
- die Wirkung auf die Porenstruktur des Zementsteins

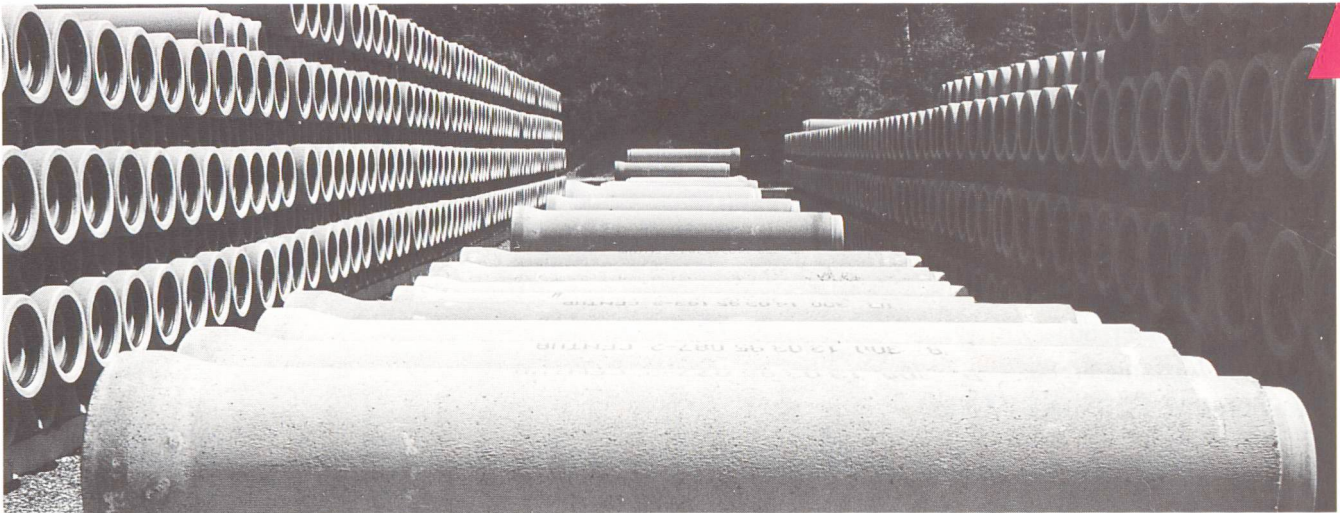
Die relativ langsame Reaktion wurde anhand einer Untersuchung demonstriert, deren Resultate in *Abbildung 2* (auf Seite 4) zusammengefasst sind. Ausgegangen wurde von

- einer Nullmischung ohne Zusatzstoff,
- drei Betonen, in denen 32 Volumenprozent des Zements durch Steinkohlenflugasche, und
- einem Beton, in dem 32 Volumenprozent des Zements durch inertes Quarzmehl (mit ähnlicher Korngrößenverteilung wie die Flugaschen)

ersetzt wurde. Als Zement wurde ein PZ 45 F (entspricht ungefähr einem CEM I 52,5) verwendet. Der Wassergehalt wurde nicht variiert.

Anfänglich verhielten sich die Betone mit Flugasche und Quarzmehl sehr ähnlich; ihre Festigkeit war wesentlich tiefer als die Festigkeit des Vergleichsbetons. Nach sieben Tagen setzte die puzzolanische Reaktion langsam ein, und nach 90 Tagen näherten sich die Festigkeiten der flugaschehaltigen Betone denjenigen der Nullmischung.

Calciumhydroxid im Porenwasser eines Betons ist ein wesentlicher Faktor beim Korrosionsschutz der Be-



Betonrohre aus flugaschehaltigem Beton.

Foto: Kurt Haberstich, TFB

wehrung. Durch die puzzolanischen Reaktionen der Flugaschen wird Calciumhydroxid verbraucht. Untersuchungen zeigen, dass der pH-Wert der Porenlösung nur wenig tiefer als in vergleichbaren Zusatzstofffreien Betonen ist und dass ausreichend Calciumhydroxid für den Korrosionsschutz vorhanden ist. Da das Porengefüge zudem durch die puzzolanische Reaktion verdichtet wird – nach einem Jahr war der Kapillarporengehalt im Bereich 0,1 bis 1 mm deutlich reduziert und der Porenanteil im Feinstbe-

reich deutlich erhöht –, vermindert sich die Durchlässigkeit des Betons im Vergleich zu Beton aus Portlandzement allein [14].

Eine niedrigere Permeabilität bedeutet einen grösseren Widerstand gegen das Eindringen von Wasser (Frostbeständigkeit!) und darin gelösten Ionen (Sulfat- und Chloridionen) [15].

Messungen an mehr als acht Jahre alten Betonen mit gleichen 28-Tage-Festigkeitswerten zeigten zudem ähnliche Karbonatisierungstiefen unabhängig davon, ob sie Flugasche enthiel-

ten oder nicht [16]. Vergleichbare Resultate wurden auch in anderen Untersuchungen gefunden ([11, 13, 14]).

Anwendungen

Eine wichtige Eigenschaft von Betonen mit Flugaschezusatz ist die erniedrigte Hydratationswärme. Dies wirkt sich besonders bei Massenbeton vorteilhaft aus. In den USA ist Flugasche deshalb Bestandteil vieler Dämme und Schleusen. Ein Beispiel ist der Hungry Horse Dam in Montana, für dessen Bau mehr als 2,3 Mio. m³ Beton verwendet wurde, der 120 000 t Flugasche enthielt. Grosse Mengen an Flugaschen wurden auch in Walzbetondämmen eingesetzt [10].

Flugasche verleiht Betonrohren eine bessere Beständigkeit gegenüber Sulfationen und schwachen Säuren. Bei der Vorfabrikation führt die verbesserte Verarbeitbarkeit zu schärferen Kanten und Ecken, und die verbesserte Fließfähigkeit bringt schönere Oberflächen [10].

Eine Warnung zum Schluss: Die Zusammensetzung von Flugaschen kann – wie bereits erwähnt – sehr unterschiedlich sein. Deshalb erfordert ihre Anwendung eine ganze Reihe von Vorsichtsmassnahmen und laufende Kontrollen der Zusammensetzung.

Kurt Hermann

Literatur

- [1] Hermann, K., «Zusatzstoffe» (Teil 1), Cementbulletin **62** [4], 3–7 (1995).
- [2] Hermann, K., «Zusatzstoffe: Hydraulischer Kalk», Cementbulletin **62** [5], 3–7 (1995).
- [3] EN 450: 1994, «Flugasche für Beton – Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung» (zukünftige Norm SIA 215.004).
- [4] EN 451-1: 1994, «Prüfverfahren für Flugasche – Teil 1: Bestimmung des freien Calciumoxids» (zukünftige Norm SIA 215.005).
- [5] EN 451-2: 1994, «Prüfverfahren für Flugasche – Teil 2: Bestimmung der Feinheit durch Nasssiebung» (zukünftige Norm SIA 215.006).
- [6] Norm SIA 215.002, «Zement – Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien; Teil 1: Allgemein gebräuchlicher Zement» (Ausgabe 1993).
- [7] Hermann, K., «Zemente: neue Normen und Sorten», Cementbulletin **62** [6/7], 3–11 (1994).
- [8] Brianza, M., «Betonzusatzstoffe», schriftliche Unterlagen zum TFB-Seminar «Betonzusatzmittel und -stoffe» vom 21. Februar 1995 in Wildegg.
- [9] Sybertz, F., «Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff», Deutscher Ausschuss für Stahlbeton **434**, 1–89 (1993).
- [10] «Use of fly ash in concrete», ACI Manual of Concrete Practice, part 1, pages 226.3R-1 to 226.3R-29 (1994).
- [11] Fraay, A. L. A., Bijen, J. M., and de Haan, Y. M., «The reaction of fly ash in concrete. A critical examination», Cement and Concrete Research **19** [2], 235–246 (1989).
- [12] Miller, E. W., «Blended cements – Applications and implications», Cement and Concrete Composites **15** [4], 237–245 (1993).
- [13] Schiessl, P., «Wirkung von Steinkohlenflugaschen in Beton», Beton **40** [12], 519–523 (1990).
- [14] Schiessl, P., und Härtl, R., «Steinkohlenflugasche in Beton – Untersuchung über Wirkung und Anrechenbarkeit», Beton **43** [11], 576–580 und [12], 644–648 (1993).
- [15] Ellis, Jr., W. E., «For durable concrete, fly ash does not «replace» cement», Concrete International **14** [8], 47–51 (1992).
- [16] Hobbs, D. W., «Carbonation of concrete containing pfa», Magazine of Concrete Research, **46** [166], 35–38 (1994).
- [17] Vornorm SIA 162.051, «Beton – Eigenschaften, Herstellung, Verarbeitung und Gütenachweis».
- [18] Norm SIA 162, «Betonbauten» (Ausgabe 1989).