

# Wirkung von Steinkohlenflugaschen in Beton

Von Peter Schießl, Aachen\*)

## Übersicht

*Steinkohlenflugasche ist ein Reststoff aus der Kraftwerkstechnologie, der im Beton als Zusatzstoff eingesetzt werden kann. In Abhängigkeit von den Flugascheeigenschaften können dabei die Frischbeton- und die Festbetoneigenschaften verbessert werden, wenn unter Berücksichtigung der übrigen Mischungskomponenten die Flugaschen richtig eingesetzt werden. Die Art der Feuerung beeinflusst sowohl die chemisch-mineralogischen als auch die physikalischen Eigenschaften der Flugasche, von denen die Wirkungen im Beton ausgehen. Im wesentlichen sind es die Kornform und Korngrößenverteilung sowie die Größe der puzzolanzischen Reaktivität, die die Betoneigenschaften beeinflussen.*

*Mit der Feinheit der Flugasche steigt die chemische Reaktivität an, und es erhöht sich damit der sogenannte Füllereffekt, bei dem die zwischen Zement und Feinzuschlagpartikel noch vorhandenen Zwischenräume ausgefüllt werden. Der damit verbundene verminderte Wasseranspruch und die bei entsprechender Nachbehandlung entstehende Phasenbildung leisten einen Festigkeitsbeitrag und erhöhen die Gefügedichtigkeit. Der bei der chemisch-mineralogischen Reaktion verbrauchte Anteil an Calciumhydroxid führt auch bei Außenbauteilen nicht zu einem verminderten Korrosionsschutz der Bewehrung, wenn der Flugaschegehalt den gültigen Anwendungsregeln entspricht und Zemente eingesetzt werden, die ausreichend Calciumhydroxid abspalten.*

*Laboruntersuchungen ergaben, daß sich flugaschehaltiger Beton hinsichtlich weiterer Dauerhaftigkeitseigenschaften, wie z. B. des Frostwiderstandes, grundsätzlich nicht ungünstiger verhalten als flugaschefreie Betone. Für den Ersatz von Zement durch Flugasche haben sich die bestehenden Anrechenbarkeitsregeln, die in der Prüfzeichenrichtlinie für Flugasche enthalten sind, als sachgerecht erwiesen.*

## 1 Einführung

Steinkohlenflugaschen werden in Deutschland seit mehr als 20 Jahren als Betonzusatzstoff verwendet und haben heute als Sekundärrohstoff einen festen Platz in der Betontechnologie. Bislang liegen veröffentlichte Zahlen zum Anfall von Steinkohlenflugaschen in der

\*) Nach einem Vortrag auf der Technisch-wissenschaftlichen Zementtagung '90 des VDZ am 31. Januar/1. Februar 1990 in Düsseldorf.

Bundesrepublik Deutschland (ohne ehemalige DDR) nur bis zum Jahr 1985 vor [1].

Im Jahr 1985 wurden knapp 3 Mill. t Steinkohlenflugaschen erzeugt. Für das Jahr 1990 wird diese Menge in dem vorgenannten Gebiet auf über 3 Mill. t anwachsen. Der Anteil an Schmelzkammeraschen beträgt derzeit etwa ein Drittel mit deutlich rückläufiger Tendenz. Die Verwertung der Steinkohlenflugaschen betrug im Jahr 1985 insgesamt etwa 2,3 Mill. t, davon im Beton etwa 1,8 Mill. t. Für das Jahr 1990 kann mit einer verwerteten Menge von etwa 2,6 bis 2,8 Mill. t gerechnet werden. Wegen der zunehmenden Deponiekosten kann man davon ausgehen, daß der Verwertungsdruck und auch die verwertete Menge weiter zunehmen werden.

Betrachtet man die Verwertung im einzelnen, so stellt man fest, daß von den 2,3 Mill. t im Jahr 1985 etwa zwei Drittel direkt im Beton und in Betonergezeugnissen verwendet worden sind, etwa 5% direkt im Zement sowohl als Ausgangsstoff als auch als Zuschlagstoff und 3% in sonstigen Bauprodukten, z. B. Mauersteinen.

Der Betonindustrie kommt bei der Verwendung von Steinkohlenflugasche eine doppelte Aufgabe zu: Auf der einen Seite steht das Entsorgungs- bzw. Verwertungsgebot für industrielle Nebenprodukte, andererseits dürfen mit dem Einsatz von Steinkohlenflugaschen keine Qualitätseinbußen des Baustoffes Beton einhergehen.

Die Wirkung von Steinkohlenflugaschen im Beton, oder besser gesagt, das Zusammenwirken mit dem Bindemittel Zement ist äußerst kompliziert und nicht in allen Einzelheiten geklärt. Es ist deshalb nicht verwunderlich, daß Aussagen hierzu häufig zumindest scheinbar widersprüchlich sind.

Im nachfolgenden Beitrag werden die Auswirkungen von Steinkohlenflugaschen auf die wesentlichen Betoneigenschaften an Hand von zwar beispielhaften, aber dennoch möglichst repräsentativen Versuchsergebnissen aufgezeigt und diskutiert.

## **2 Eigenschaften von Steinkohlenflugaschen**

### **2.1 Entstehung der Aschen**

Bei der Erzeugung von elektrischer Energie wird in Kohlekraftwerken fein aufgemahlene Kohle in den Feuerungsraum eingeblasen. Ein Teil der unbrennbaren Rückstände — bei den in Deutschland verfeuerten Kohlen i. M. etwa 15% [2] — werden im Rauchgas als feine Ascheteilchen mitgeführt und in Elektrofiltern abgeschieden. Die im Filter abgelagerte Steinkohlenflugasche wird aus den Filterspitzen abgezogen und bei Eignung als Prüfzeichenasche speziell dafür vorgesehenen Silos zugeführt.

### **2.2 Chemisch-mineralogische Zusammensetzung**

Durch das rasche Abkühlen der Asche liegt sie mineralogisch in zum Teil amorpher bzw. glasiger Struktur vor. Der Anteil der Glasphasen hängt von den Feuerungsbedingungen (Kesselart, Kesselast) und der Zusammensetzung der Kohle (Herkunft) ab. In der Regel ist der Glasgehalt bei Schmelzkammeraschen höher.

Tafel 1 enthält charakteristische Kennwerte für die chemisch-mineralogische Zusammensetzung von Steinkohlenflugasche, Hütten-

Tafel 1 Vergleich der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung von Steinkohlenflugasche, Hüttensand und PZ-Klinker

Angaben in M.-%	Steinkohlenflugaschen <sup>1)</sup>	Hüttensand <sup>2)</sup>	Portlandzementklinker
SiO <sub>2</sub>	40 — 58	33 — 39	18 — 24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24 — 33	9 — 14	4 — 8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6 — 16	< 1 (FeO)	1 — 4
CaO	1 — 8	37 — 45	62 — 69
Glasgehalt	68 — 96	90 — 100	—
Glühverlust	0,8 — 5	< 1,5	0,1 — 3

1) mit Prüfzeichen nach DIN 1045

2) für Zemente nach DIN 1164

sand und Portlandzementklinker. Während der SiO<sub>2</sub>- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalt bei den drei Stoffen von der Steinkohlenflugasche zum Portlandzement deutlich abnimmt, zeigt sich ein umgekehrtes Bild beim Kalk. Steinkohlenflugaschen sind verglichen mit Portlandzement also im wesentlichen gekennzeichnet durch den hohen Anteil an SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und den geringen Anteil an CaO. In dem Maße, in dem Flugasche eine glasige oder amorphe Struktur aufweist, liegen SiO<sub>2</sub> und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in reaktionsfähigem Zustand vor, das heißt, sie können bei normalen Temperaturen mit Calciumhydroxid von anderen Bindemittelbestandteilen chemisch-mineralogisch reagieren und dabei u. a. Calciumsilicathydrate bilden. Aufgrund dieser puzzolanischen Reaktion gehört Steinkohlenflugasche zur Gruppe der Puzzolane. Der Glühverlust resultiert bei Steinkohlenflugaschen im wesentlichen aus unverbrannten Kohlepartikeln.

### 2.3 Kornform und Korngrößenverteilung

Steinkohlenflugaschen und Portlandzement unterscheiden sich nicht nur durch die chemisch-mineralogische Zusammensetzung, sondern auch in ihrer Kornform und -größenverteilung. Neben dem chemisch-mineralogischen Einfluß gibt es bei der Verwendung im Beton somit auch einen physikalischen Einfluß.

Bild 1 zeigt das Streuband der Korngrößenverteilungen von 23 Steinkohlenflugaschen und von sieben Zementen. Das Bild zeigt, daß der Streubereich der möglichen Korngrößenverteilungen bei den Steinkohlenflugaschen etwas größer ist als bei den Zementen, zumindest nach dem hier durchgeführten Vergleich. Bestimmte Flugaschen können also feinere Korngrößenverteilungen aufweisen als übliche Zemente. Während Steinkohlenflugascheteilchen meist rund bzw. kugelförmig sind, haben die gemahlene Zementpartikel eine eckige bzw. scharfkantige Form (siehe hierzu auch Abschnitt 4.1). Eine kugelige Form von Steinkohlenflugaschen ist bei Schmelzkammeraschen wegen der höheren Feuerraumtemperaturen ausgeprägter als bei Trockenfeuerungsaschen. Hinsichtlich der Kornverteilung liegen die Schmelzkammeraschen in der Regel im feineren Bereich. Es gibt aber auch sehr feine Trockenfeuerungsaschen und grobe Schmelzkammeraschen. Die gröbste der im Bild 1 gezeigten Aschen ist beispielsweise eine Schmelzkammerasche. Bei Trockenfeuerungen wurden in der jüngeren Vergangen-

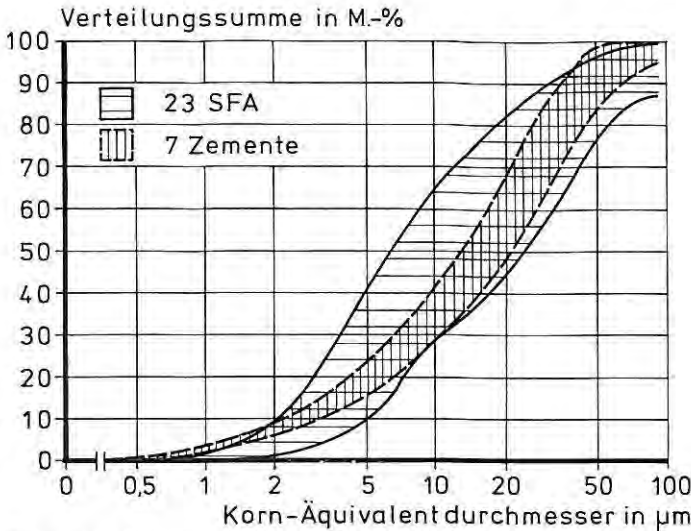


Bild 1 Vergleich der Korngrößenverteilung von Steinkohlenflugasche und Zementen

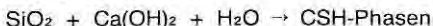
heit durch Optimierung der Feuerungsbedingungen — sogenannte Primärmaßnahmen — erhebliche Reduzierungen des  $\text{NO}_x$ -Anfalls erreicht. Obwohl sich diese Maßnahmen tendenzmäßig auf Kornform und Glasgehalt auswirken, zeigen die laufend anfallenden Ergebnisse der Eigen- und Fremdüberwachung von Prüfzeichenaschen praktisch keine Auswirkung der Primärmaßnahmen auf die Unschädlichkeit, Gleichmäßigkeit und den Festigkeitsbeitrag der Steinkohlenflugaschen im Beton. Mit anderen Worten, eventuelle Auswirkungen von Primärmaßnahmen auf die Festbetoneigenschaften sind gering und werden von den Prüfstreuungen überdeckt.

### 3 Wirkung von Steinkohlenflugaschen im Beton

#### 3.1 Chemisch-mineralogische und physikalische Wirkung

Die Wirkung von Steinkohlenflugasche im Beton ist sowohl chemisch-mineralogischer als auch physikalischer Natur.

Die chemisch-mineralogische bzw. puzzolanische Reaktion der amorphen Kieselsäure mit dem Calciumhydroxid ist in nachstehender Gleichung sehr vereinfacht dargestellt. Für die Reaktion der glasigen  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Anteile können ähnliche Reaktionsmechanismen angegeben werden.



Die amorphe Kieselsäure der Flugasche reagiert mit dem bei der Zementhydratation entstehenden Calciumhydroxid und Wasser zu festigkeitsbildenden Calciumsilikathydratphasen, die den CSH-Phasen aus der Zementhydratation grundsätzlich ähnlich sind, sich in ihrer molaren Zusammensetzung von diesen jedoch unterscheiden.

Die Korngrößenverteilung hat sowohl eine physikalische Wirkung als auch eine Auswirkung auf die chemische Reaktion. Je feiner die

Korngrößenverteilung ist, das heißt, je größer der Anteil der feinen Partikel in einem Korngemisch ist, desto größer ist die spezifische Oberfläche, an der die chemisch-mineralogischen Reaktionen unmittelbar ablaufen. Die puzzolanische Reaktion ist deshalb um so ausgeprägter und schneller, je feiner die Flugaschen sind.

Ein zweiter wesentlicher Aspekt der physikalischen Wirkung ist der sogenannte Füllereffekt, der immer dann besonders deutlich in Erscheinung tritt, wenn sich die Kornbänder von Flugasche und Zement ergänzen, z. B. wenn die Flugasche feiner als der Zement ist. Die Flugaschepartikel können dann die sonst zwischen den Zementkörnern und auch zwischen Zement und Feinzuschlaganteilen vorhandenen Zwickel ausfüllen und somit sowohl den Wasseranspruch des Frischbetons als auch die Festigkeitsentwicklung günstig beeinflussen.

### 3.2 Wirkung im Frischbeton

Bei der Auswirkung von Steinkohlenflugaschezusätzen zum Beton interessieren insbesondere der Wasseranspruch, die Verarbeitbarkeit sowie die Neigung zum Wasserabsondern. In bestimmten Fällen, wie z. B. bei Pumpbeton, können auch andere Einflüsse von Bedeutung sein.

Auf die Verarbeitbarkeit wirken sich im wesentlichen die Feinheit und der Glühverlust der Flugasche aus. In der Regel nimmt mit zunehmender Feinheit und abnehmendem Glühverlust die verflüssigende Wirkung von Flugasche zu [3].

Den Einfluß der Kornform auf das Ausbreitmaß zeigt Bild 2. Dabei wird das relative Ausbreitmaß für Mischungen mit verschiedenen Flugaschen und Mischungen mit verschiedenen Quarzmehlen verglichen, die jeweils über den gesamten Korngrößenbereich gleiche Korngrößenverteilungen aufgewiesen haben. Hierzu wurden die

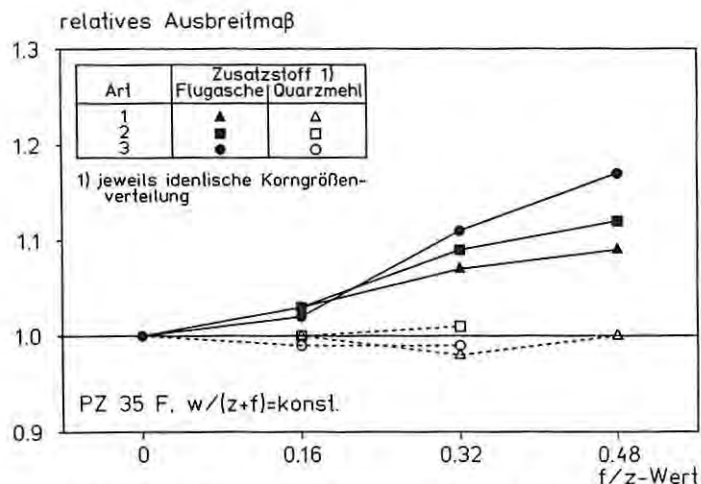


Bild 2 Einfluß der Kornform von Betonzusatzstoffen auf das relative Ausbreitmaß (bezogen auf den Wert der Nullmischung)

Ausgangsstoffe durch gezieltes Sieben und Sichten fraktioniert und neu zusammengestellt [4]. Die Kornform des Quarzmehles ist unregelmäßig und eckig, die Kornform der Flugasche dagegen im wesentlichen rund. Das Bild zeigt, daß bei zunehmendem Anteil der beiden Zusatzstoffe die Flugasche verflüssigend wirkte, während dies bei der Zugabe von Quarzmehl bzw. dem Austausch von Quarzmehl gegen Zement nicht der Fall war. Der Wassergehalt wurde in den untersuchten Mischungen konstant gehalten. Allerdings ist der Ausbreitversuch nicht uneingeschränkt geeignet, die günstige Wirkung von Flugaschezusätzen auf die Frischbetoneigenschaften zu zeigen. Versuche mit dem Rohrversuch nach Nycander [5] haben ergeben, daß z.B. die in der Praxis beobachtete günstige Auswirkung von Flugasche auf die Pumpbarkeit von Beton [6] mit dem Rohrversuch wesentlich reproduzierbarer nachgewiesen werden kann als mit dem Ausbreitversuch nach DIN 1048.

### 3.3 Wirkung im Festbeton

Die Auswirkung von Flugaschezusätzen auf die Festbetoneigenschaften ist im wesentlichen durch drei Einflüsse gekennzeichnet:

- die relativ langsame Reaktion,
- den Verbrauch von Calciumhydroxid und
- die Wirkung auf die Porenstruktur des Zementsteins.

Die relativ langsame Reaktion des Puzzolans wird aus Bild 3 deutlich. Aufgetragen ist die Festigkeitsentwicklung von verschiedenen Mischungen bis zu einem Alter von 90 Tagen: eine Nullmischung, drei Flugaschemischungen, bei denen 32 Vol.-% des Zements durch drei verschiedene Flugaschen ersetzt wurden, und eine Mischung, bei der ebenfalls 32 Vol.-% des Zementes durch einen Inertstoff (Quarzmehl) mit einer den Flugaschen vergleichbaren Korngrößenverteilung ersetzt wurde. Die Kurvenverläufe zeigen, daß nach sieben Tagen die Festigkeit der Flugaschemischungen praktisch noch der Festigkeit der Quarzmehlmischung entsprach; beide lagen deutlich unter der Nullmischung mit dem schnell erhärtenden

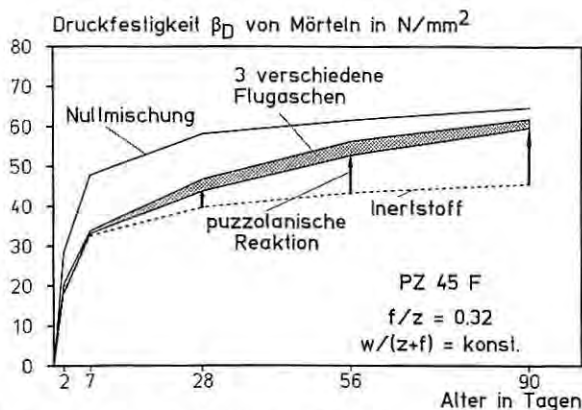


Bild 3 Entwicklung der puzzolanischen Reaktion, dargestellt anhand des Festigkeitsverlaufs

Portlandzement PZ 45 F. Eine puzzolanische Reaktion oder ein Beitrag der puzzolanischen Reaktion zur Festigkeit war nach sieben Tagen noch nicht erkennbar. Auch nach 28 Tagen war dieser Beitrag noch gering. Bei ungünstigen Zement-Flugaschekombinationen, wie beispielsweise bei Zementen mit niedrigem Alkaligehalt, kann der puzzolanische Beitrag nach 28 Tagen ebenfalls kaum merkbar sein. Erst in höherem Alter kommt die puzzolanische Reaktion deutlicher zur Auswirkung.

Durch die puzzolanische Reaktion wird Calciumhydroxid verbraucht. In Langzeitversuchen [7] konnte gezeigt werden, daß die Reduktion des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Depots und damit die puzzolanische Reaktion auch nach 14 Jahren noch nicht völlig zum Stillstand gekommen ist. Allerdings kann man davon ausgehen, daß die puzzolanische Reaktion nicht zu einem den pH-Wert oder die Dauerhaftigkeit beeinträchtigenden Abbau der Alkalitätsreserven führt, wenn der Flugaschegehalt entsprechend der gültigen Anwendungsregel begrenzt ist und wenn Zemente verwendet werden, die bei der Hydratation ausreichende Mengen Calciumhydroxid abspalten.

Die puzzolanische Reaktion und damit der Verbrauch von Calciumhydroxid wirkt sich für die Karbonatisierung zunächst ungünstig aus, da karbonatisierbare Substanz verlorengeht. Kompensiert wird dieser ungünstige Einfluß aber durch die Veränderung der Porenstruktur. Diesen Effekt zeigt Bild 4. Nach 28 Tagen ist die Porengrö-

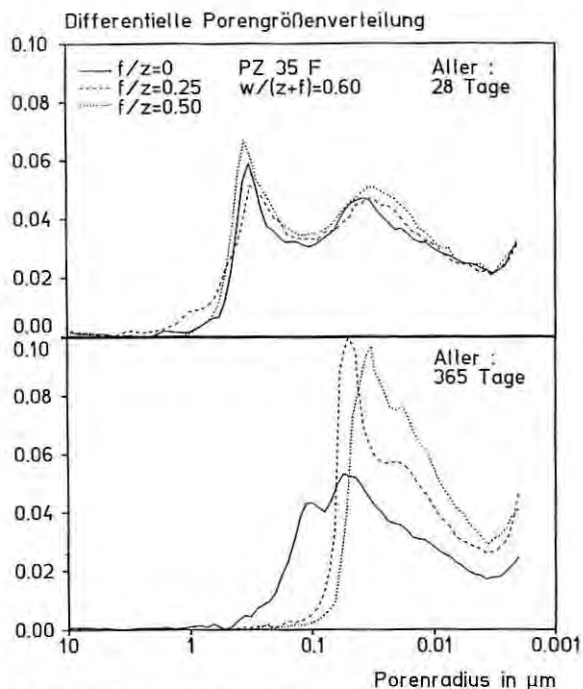


Bild 4 Einfluß des Flugaschegehaltes auf die Porengrößenverteilung (Flugaschegehalt in M.-%)  
oben: im Alter von 28 Tagen; unten: im Alter von 365 Tagen

Benverteilung noch weitgehend unabhängig vom Flugaschegehalt, nach einem Jahr hat der Zementersatz durch Flugasche den Kapillarporengehalt im Porengrößenbereich zwischen 0,1 und 1  $\mu\text{m}$  deutlich reduziert, der Anteil der Poren im Feinstbereich hat deutlich zugenommen.

Die Veränderung der Porenstruktur hat eine Reduzierung der Durchlässigkeit gegenüber diffundierenden Stoffen zur Folge. Den Effekt zeigen beispielhaft die Versuchsergebnisse von Locher [8] in Bild 5. Untersucht wurde der Sauerstoffdiffusionskoeffizient von Mörteln, die wassergelagert waren. Die Kurven zeigen, daß durch die zunehmende Hydratation der Sauerstoffdiffusionskoeffizient am stärksten bei Hochfenzementen abnahm, das heißt, der Beton wurde gegenüber Gasdiffusion deutlich dichter, und daß flugaschehaltige Betone etwa zwischen Portlandzement und Hochfenzement lagen. Die puzzolanische Reaktion führt also zu einer Verdichtung des Porengefüges. Wesentlich deutlicher wirkt sich diese Veränderung der Porenstruktur auf andere Eigenschaften aus, wie nachfolgend dargelegt wird.

Die drei vorstehend erläuterten Auswirkungen wirken sich auf folgende wichtige Festbetoneigenschaften mehr oder weniger stark aus:

- Hydratationswärme,
- Nachbehandlungsempfindlichkeit,
- Karbonatisierung,
- Frostwiderstand,
- Chloriddiffusion,
- Widerstand gegen chemische Angriffe.

Weil die puzzolanische Reaktion relativ langsam abläuft, entwickelt sich die Hydratationswärme von Zement-Flugasche-Gemischen entsprechend langsam. Unveröffentlichte Untersuchungen zeigen, daß

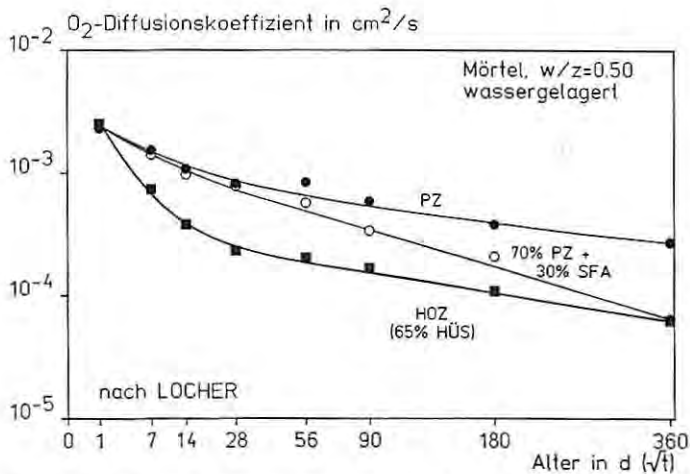


Bild 5 Einfluß von Hüttensand und Steinkohlenflugasche auf den O<sub>2</sub>-Diffusionskoeffizienten von Mörtel [8]



bei Betonen gleicher 28-Tage-Festigkeit die durch die Hydrationswärme verursachte Temperaturerhöhung nach ein bis zwei Tagen, die in der Praxis bei massigen Bauteilen auftritt, deutlich reduziert werden kann, wenn anstelle Zement hierfür Zement-Flugasche-Gemische verwendet werden.

Bei Austrocknung kommt die Hydratation weitgehend zum Stillstand. Da die puzzolanische Reaktion langsam verläuft, können der Festigkeitsbeitrag sowie die positiven Auswirkungen auf die Porenstruktur nur bei Sicherstellung einer ausreichend langen Hydrationsdauer, das heißt, bei Sicherstellung einer ausreichenden Nachbehandlungsdauer, erreicht werden. Anders ausgedrückt bedeutet dies, daß flugaschehaltige Mischungen mit zunehmenden Flugaschegehalten unter sonst gleichen Bedingungen nachbehandlungsempfindlicher sind als reine Portlandzementmischungen. Dies kommt z.B. in Auswertungen von Pomeroy [9] deutlich zum Ausdruck. Bei starker Austrocknung in sehr frühem Alter nimmt die Gasdurchlässigkeit flugaschehaltiger Mischungen, wie dies auch von hüttensandreichen Hochofenzementen bekannt ist, stark zu.

Während bei hüttensandreichen Hochofenzementen die Karbonatisierung eine Vergrößerung der Porenstruktur bewirkt [10], tritt dieser Effekt bei praxisüblichen Flugaschezusätzen nicht auf, wie die Versuche von Schönlin [11] zeigen.

Versuche verschiedener Forscher [12] zeigen, daß die Karbonatisierungstiefe flugaschehaltiger Betone dann mit denen flugaschefreier Betone mit gleichen Zementen weitgehend übereinstimmt, wenn vergleichbare Festigkeiten erzielt werden und wenn eine ausreichende Nachbehandlung vorliegt. Das heißt, daß bei praxisgerechten Flugaschegehalten entsprechend den gültigen Anwendungsregeln die Reduktion des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Depots durch die Verdichtung der Porenstruktur praktisch kompensiert wird.

Eine weitere wesentliche Kenngröße für die Dauerhaftigkeit ist der Frostwiderstand. Dazu liegt eine Reihe von Untersuchungen vor. In Bild 6 sind Ergebnisse aus dem Institut für Bauforschung der RWTH Aachen gezeigt, bei denen verschiedene Zement-Flugasche-Kombinationen untersucht wurden. Dabei wurden bei den flugaschehaltigen Mischungen 60 kg/m<sup>3</sup> Zement durch Flugasche ausgetauscht, die Anrechnung der Flugasche auf den w/z-Wert erfolgt mit einem Wert  $k = 0,5$ . Somit entsprach der  $w/(z + 0,5 \cdot f)$ -Wert mit 0,60 dem w/z-Wert der flugaschefreien Nullmischung; allerdings mußte dazu der Wassergehalt der flugaschehaltigen Mischung von 180 l/m<sup>3</sup> (Nullmischung) auf 162 l/m<sup>3</sup> gesenkt werden. Das Bild zeigt, daß der Frostwiderstand zementabhängig ist und daß sich mit Ausnahme der HOZ-NW-HS-Zement-Flugasche-Mischung kein signifikanter Einfluß des Zementaustausches durch Flugasche nachweisen läßt, wenn 60 kg Zement durch Flugasche ausgetauscht werden und die Anforderungen an den w/z-Wert bzw.  $w/(z + 0,5 \cdot f)$ -Wert für Außenbauteilbetone eingehalten werden.

Ein wesentlicher Kennwert für den Widerstand gegenüber Korrosion der Bewehrung im Beton ist sein Diffusionswiderstand gegenüber Chlorid, z.B. bedeutend im Straßenbrückenbau.

Es ist bekannt, daß der Chloriddiffusionswiderstand von Hochofenzementbetonen mit hohem Hüttensandgehalten wesentlich größer ist als von reinen Portlandzementbetonen. Ein gleicher Effekt ergibt

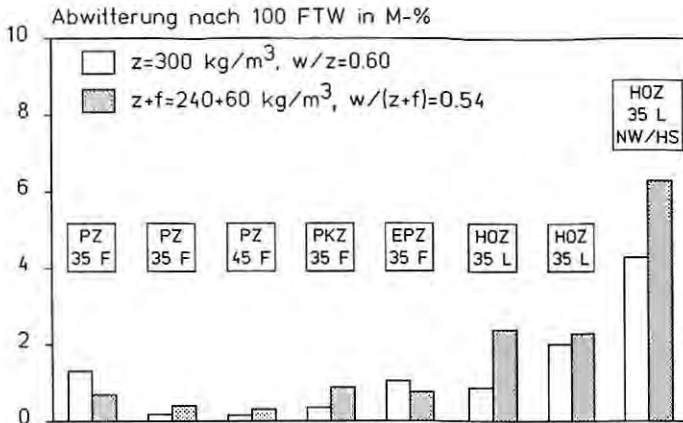


Bild 6 Einfluß des Austausches von 60 kg/m<sup>3</sup> Zement durch Flugasche auf die Frostabwitterung bei gleichzeitiger Reduzierung von w/(z + f) um 0,06

sich durch Flugaschezusätze. Die Ergebnisse in Bild 7 zeigen, daß der Chlorideindringwiderstand von Flugaschezementen deutlich höher ist als von entsprechenden Nullmischungen mit Portlandzement und in der gleichen Größenordnung liegt wie der des zum Vergleich herangezogenen Hochofenzementes. Neben der Auswirkung von Flugaschezusätzen auf die Porenstruktur wird dieser günstige Effekt auf veränderte Grenzflächenreaktionen zurückgeführt, die bei Ionendiffusion eine wesentliche Rolle spielen.

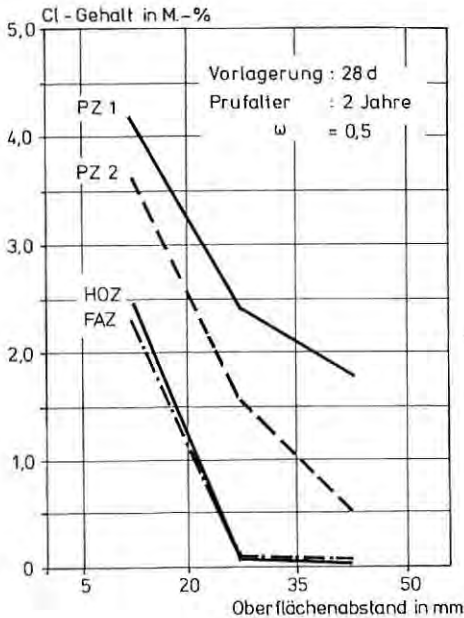


Bild 7 Chloridprofile von Betonen mit verschiedenen Zementen nach zweijähriger Lagerung

Ein weiterer wichtiger Kennwert für die Korrosionsschutzwirkung flugaschehaltiger Betone ist die elektrolytische Leitfähigkeit, meßbar ausgedrückt durch den elektrischen Widerstand des Betons. Der elektrische Widerstand ist entscheidend für die Korrosionsgeschwindigkeit, wenn Depassivierung aufgetreten ist. Bild 8 zeigt Ergebnisse [13] an verschiedenen Betonen in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer. Das Bild zeigt, daß für die Flugaschezementmischung in jungem Hydratationsalter vergleichbare elektrische Widerstände, wie sie für Portlandzemente und Eisenportlandzement gemessen wurden, auftraten. Der HOZ 35 L-NW/HS zeigte von Anfang an sehr viel höhere elektrische Widerstände als die übrigen Betone. Der Flugaschezementbeton erreicht nach längerer Hydratationsdauer, hier nach etwa einem Jahr, noch höhere elektrische Widerstände als der gezeigte HOZ 35 L-NW/HS. Diese starke Zunahme des elektrischen Widerstandes bis zu einem Jahr zeigt ebenso wie oben bereits erläuterte Ergebnisse einerseits die langsame und lang andauernde puzzolanische Reaktion des Flugascheanteils im hier untersuchten Flugaschezement und andererseits den starken Einfluß auf Ionentransportvorgänge.

Die beiden letztgenannten Ergebnisse zeigen also, daß Flugaschezusätze im Beton bei Chlorideinwirkung im Hinblick auf die Korrosionssicherheit des Betonstahls positive Auswirkungen haben: Die Chlorideindringung wird sehr stark behindert, und die nachfolgende Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung, sofern kritische Chloridgehalte die Oberfläche der Bewehrung erreicht haben, wird reduziert.

Auch bei allen chemischen Angriffen, bei denen das  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  der Reaktionspartner ist, wirken sich Flugaschezusätze günstig aus. Dies gilt beispielsweise für den Angriff kalklösender Kohlensäure in besonderem Maße [14]. Nach BS 8110 Teil 1 wird flugaschehaltigen

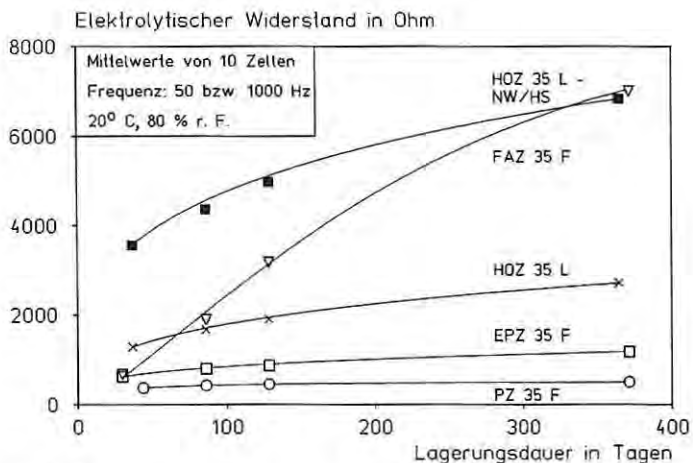


Bild 8 Entwicklung des elektrolytischen Widerstandes bei der Verwendung verschiedener Zemente

Betonen unter bestimmten Voraussetzungen ein erhöhter Sulfatwiderstand zugewiesen.

#### **4 Anrechenbarkeit von Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff**

Die derzeit in den Prüfzeichenbescheiden bei Steinkohlenflugaschen festgelegte gültige Regelung in Deutschland [15] berücksichtigt die Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen mit Prüfzeichen durch Ansatz eines sogenannten  $k$ -Wertes, das heißt, festgelegte Maximalmengen von Flugasche dürfen auf den Wasserzementwert mit einer Wirksamkeit von 30% bezogen auf den Zement angerechnet werden. Der wirksame Wasserzementwert wird danach mit der einfachen Formel  $w/z = w/(z + 0,3 \cdot f)$  ermittelt. Der Zementgehalt darf für Außenbauteile auf  $270 \text{ kg/m}^3$  vermindert werden, wenn mindestens die doppelte Menge des Mindestzementgehaltes durch Flugasche ersetzt wird. Der maximal anrechenbare Flugaschegehalt darf 25% des Zementgewichts betragen. Die Nachbehandlungsdauer ist bei Anrechnung der Flugasche um zwei Tage zu verlängern.

Im Rahmen der Güteüberwachung werden Unschädlichkeiten, Feinheit, Gleichmäßigkeit und Festigkeitsbeitrag laufend überprüft.

Im Rahmen des europäischen Regelungswerkes liegt ein Entwurf einer Stoffnorm für Steinkohlenflugaschen vor, in den wesentliche Anforderungen der deutschen Prüfzeichenregelung eingeflossen sind. Die Anforderungen an den maßgebenden Parameter Feinheit sind dabei schärfer gefaßt als nach den derzeit gültigen deutschen Regelungen, was hinsichtlich der Betonqualität begrüßenswert ist. Die Anrechenbarkeitsregeln werden derzeit in einer der ENV 206 zugeordneten Task Group diskutiert. Das Ergebnis dieser Diskussionen ist derzeit noch nicht absehbar.

#### **5 Schlußbemerkung**

Wenn Flugaschen richtig eingesetzt werden, können wesentliche Eigenschaften des Betons günstig beeinflusst werden. Anrechenbarkeitskonzepte müssen dazu führen, daß die Betonqualität eher verbessert wird, Qualitätseinbußen können nicht akzeptiert werden. Es ist von allen beteiligten Gruppen anerkannt, daß eine gewisse Verwertungspflicht gegeben ist, dies aber nicht auf Kosten der Qualität gehen darf.

#### **SCHRIFTTUM**

- [1] Risse, F., J. Zolkowski: Anfall und Verwertung von Asche aus Steinkohlenkraftwerken in den Jahren 1981 bis 1985 in der Bundesrepublik Deutschland. VGB Kraftwerkstechnik 67 (1987), Nr. 11, S. 1065—1069
- [2] Böhm, E., P. Kunz: Möglichkeiten der verstärkten Verwertung von Rückständen aus Kraftwerksfeuerungen. VGB Technisch-Wissenschaftliche Berichte „Wärme-kraftwerke“ (1982), Nr. VGB TW 205
- [3] Sybertz, F.: Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen. Betonwerk + Fertigteile-Technik 54 (1988), Nr. 1, S. 42—47; Nr. 2, S. 80—88

- [4] Schiessl, P., R. Härdtl: The Change of Mortar Properties as Result of Fly Ash Processing. International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim 1989, Supplementary Papers (Malhotra, V. M., editor), S. 277—294
- [5] Sybertz, F., R. Härdtl: Einfluß von Steinkohlenflugasche auf die Verarbeitungs-eigenschaften von Beton. (Veröffentlichung in Vorbereitung)
- [6] Kern, E.: Einsatzgebiete für Flugasche aus der Sicht der Bauausführung. VGB-Konferenz „Bautechnik in Wärmekraftwerken“, Berlin, 1988, S. 67—76
- [7] Helmuth, R.: Fly Ash in Cement and Concrete. Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 1987
- [8] Locher, Ch. H.: Zum Einfluß verschiedener Zuschlagstoffe auf das Gefüge von erhärtetem Zementstein in Mörteln und Betonen. Dissertation der RWTH Aachen, 1988
- [9] Pomeroy, D.: Concrete Durability: From Basic Research to Practical Reality. Concrete Durability — Katharine and Bryant Mather International Conference, Atlanta/Georgia, ACI SP-100, Vol. 1, S. 111—130
- [10] Bier, Th. A.: Influence of Type of Cement and Curing on Carbonation Progress and Pore Structure of Hydrated Cement Paste. Material Research Society Fall-Meeting (Struble, L., editor), 1986, Pittsburgh, S. 123—134
- [11] Schönlin, K.: Permeabilität als Kennwert der Dauerhaftigkeit von Beton. Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie (1989), Nr. 8; Dissertation an der Universität Karlsruhe, 1989
- [12] Schubert, P.: Karbonatisierungsverhalten flugaschehaltiger Mörtel. Forschungsbericht Nr. F 174 des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen, 1986
- [13] Schiessl, P., M. Raupach: Influence of Blending Agents on the Rate of Corrosion of Steel in Concrete. Durability of Concrete; Aspects of Admixtures and Industrial By-Products; 2nd International Seminar, Stockholm, June 1989, Swedish Council for Building Research, 1989 — Publ. Nr. D9:89, S. 205—214
- [14] Backes, H.-P., E. Schneider: Verhalten flugaschehaltiger Mörtel beim Angriff kalklösender Kohlensäure. TIZ International 112 (1988), Nr. 1, S. 42—45
- [15] Richtlinie für die Erteilung von Prüfzeichen für Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 (Prüfzeichenrichtlinie). „Mitteilungen“ Institut für Bautechnik 11 (1980), Nr. 2, S. 39—43; 17 (1986); Nr. 6, S. 200—201