

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 16206 N
Bewilligungszeitraum: 01.09.2009 – 31.08.2011

Forschungsthema:

Verbesserung der Leistungsfähigkeit flugaschehaltiger Bindemittel durch Untersuchung und Steuerung des Reaktionsverhaltens von Steinkohlenflugasche in Abhängigkeit von der Flugaschezusammensetzung

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Im Jahr 2004 wurden in Deutschland 52 Mio. t Steinkohle in Kraftwerken zur Stromerzeugung verfeuert. Dabei fielen 4,45 Mio. t Steinkohlenflugasche an, die nahezu vollständig verwertet wurden. Der Großteil dieser Flugasche wurde als Betonzusatzstoff verwendet, etwa 10 M.-% fanden Einsatz als Sekundärrohstoff zur Zementklinkerherstellung, aber nur ein minimaler Anteil wurde zur Herstellung flugaschehaltiger Zemente genutzt. Diese Option wird durch die steigende Bedeutung klinkerarmer Bindemittel aus ökologischen und ökonomischen Gründen für die Zementindustrie jedoch zunehmend interessanter. Durch den Einsatz von Steinkohlenflugasche als Zementbestandteil eröffnet sich den Zementwerken die Möglichkeit, neben primären Roh- und Brennstoffen auch elektrische Energie, z. B. für Rohstoff- und Zementmahlung, einzusparen. Zur Herstellung leistungsfähiger Zemente mit Flugasche ist aber ein grundlegendes Verständnis der Hydratationsreaktionen von Flugaschen unerlässlich.

Steinkohlenflugaschen reagieren sowohl puzzolanisch zu Calciumsilicat- und Calciumaluminhydraten (CSH und CAH) als auch infolge alkalischer Aktivierung zu alumosilicatischen Reaktionsprodukten. Bei der Verwendung als Zementhauptbestandteil oder Betonzusatzstoff wird ihre puzzolanische Reaktivität ausgenutzt. Untersuchungen hierzu bezogen sich bisher weitgehend auf die Parameter Restkoksgehalt, Freikalkgehalt und Gehalt an reaktiver Kieselsäure. Darüber hinaus wurde der Einfluss der Kornform und der Feinheit auf die puzzolanische Reaktion untersucht und die eingesetzten Zemente sowie das alkalische Milieu variiert. Die genauen Abläufe der Flugaschereaktionen in verschiedenen Medien und insbesondere der Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Flugaschen auf deren Reaktionsverhalten im Zementleim sind bisher wenig untersucht. Diese Parameter sind aber besonders für die Herstellung von Zementen mit geringeren Klinkeranteilen auf Flugaschebasis von großer Bedeutung, weil sie zur Steuerung der Flugaschereaktivität unerlässlich sind. Diese gewinnt bei zunehmendem Steinkohlenflugascheanteil im Zement an Einfluss, da die Flugasche in solchen Systemen einen höheren Festigkeitsbeitrag leisten muss.

Bezüglich des Reaktionswegs, den eine im alkalischen Medium reagierende Flugasche einschlägt, und der Zusammensetzung der bei der Hydratation der Flugasche entstehenden Produkte sind noch viele Fragestellungen offen. Die Forschung beschränkte sich bisher hauptsächlich auf die Beschreibung des Einflusses von Flugasche auf die technischen Mörtel- und Betoneigenschaften. Häufige Ansätze waren die Variation der eingesetzten Zemente und des für die Anregung der reaktiven Kieselsäure der Flugasche benötigten alkalischen Milieus. Der Einfluss der chemischen Zusammensetzung der Flugaschen auf die ablaufenden Reaktionen hingegen wurde nur wenig untersucht, obwohl Einigkeit darüber herrscht,

dass die Elemente Silizium, Calcium, Aluminium und die Alkalimetalle die Reaktionsfähigkeit der Flugaschen und die Art der entstehenden Hydratationsprodukte wesentlich mitbestimmen. Kenntnisse über den Einfluss der oben genannten Elemente sind für die Optimierung flugaschehaltiger Zemente aber unerlässlich, weil nur so eine gezielte Steuerung der für die Zementqualität wichtigen Flugascheeigenschaften möglich ist.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

Ziel des Forschungsvorhabens war die Verbesserung der Produkteigenschaften flugaschehaltiger Zemente durch Steuerung des Reaktionsverhaltens der eingesetzten Flugaschen.

Das Forschungsprojekt gliederte sich in zwei große Abschnitte. Im ersten Teil des Projektes wurden die während der Korrosion des Flugascheglasses in unterschiedlichen Reaktionsmedien ablaufenden Reaktionen untersucht. Die hierbei erworbenen Kenntnisse über die chemischen Reaktionen, die beteiligten Reaktionspartner und die Einbindung der Flugasche in die Matrix des Zements wurden im zweiten Schritt dazu genutzt, die Hydratationsreaktionen der Flugaschen zu beeinflussen. Dies erfolgte durch Zugabe von Zusätzen und durch Mischen verschieden zusammengesetzter Aschen.

Zunächst wurde 8 verschiedenen Steinkohlenflugaschen, die die in Deutschland verfügbaren Aschen abdecken und sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung deutlich voneinander unterscheiden, ausgewählt und umfassend charakterisiert. Dadurch sollten sich erste Rückschlüsse auf die Reaktivität der Steinkohlenflugaschen ziehen lassen. Im nächsten Schritt wurden die Flugaschen zum Teil aufgemahlen und zum Teil gesichtet, um anschließend auch Versuche an aufbereiteten Aschen durchführen zu können. Die Sichtung und anschließende chemisch-mineralogische Charakterisierung der Flugaschefractionen hatte zum Ziel, die Reaktivität der verschiedenen Fractionen einordnen zu können.

Durch Suspensionsversuche der Steinkohlenflugaschen in verschiedenen Medien und anschließende Untersuchungen des Eluats sollten Komponenten, die während der Reaktion der Aschen in Lösung gehen, sowohl qualitativ als auch quantitativ bestimmt werden. Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung der Flugasche, dem Reaktionsmedium und den in Lösung gehenden Ionen sollten mit Hilfe dieser Versuche herausgearbeitet werden.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden umfassende Untersuchungen an verschiedenen Flugaschereaktionsprodukten durchgeführt. Hierfür wurden die Steinkohlenflugaschen in bestimmten Verhältnissen mit Calciumhydroxid gemischt, in verschiedenen Medien zur Hydratation gebracht und anschließend untersucht. In diesem Arbeitspaket wurden u. a. die Umsätze der Aschen auf zwei unterschiedlichen Wegen bestimmt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sollten gegenübergestellt und Zusammenhänge zwischen der Aschereaktivität und -zusammensetzung aufgezeigt werden. Die Kombination aus Röntgendiffraktometrie, thermischer Analyse und Festkörper-NMR-Messungen ermöglichte dabei eine detaillierte Beschreibung der entstandenen Reaktionsprodukte.

Anschließend wurden flugaschehaltige Zemente mit verschiedenen Flugaschegehalten und zwei verschiedenen Klinkerkomponenten hergestellt und untersucht. Die Ergebnisse der Normfestigkeitsuntersuchungen sollten zu den Umsatzberechnungen in Beziehung gesetzt

werden. Zudem sollten rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen Aufschluss über die Gefügeentwicklung der flugaschehaltigen Systeme geben.

Abschließend wurden Zemente mit zwei verschiedenen Steinkohlenflugaschen, die mineralische Zusätze enthielten, auf ihre Reaktivität hin untersucht. Hierbei kamen wiederum die Röntgendiffraktometrie, thermische Analyse und Festkörper-NMR-Analytik mit dem Ziel zum Einsatz, die entstandenen Reaktionsprodukte detailliert zu beschreiben. Auch die Druckfestigkeit der Zemente mit Zusätzen wurde untersucht.

3 Ergebnisse

3.1 Chemisch-mineralogische Charakterisierung der eingesetzten Steinkohlenflugaschen

Die mittels Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmte chemische Zusammensetzung der verwendeten Steinkohlenflugaschen ist in **Tabelle 1** aufgeführt. Diese Tabelle enthält ebenso Angaben zu den Parametern Freikalk und reaktive Kieselsäure sowie zu den granulometrischen Eigenschaften der Aschen.

Tabelle 1 Chemische Zusammensetzung der Steinkohlenflugaschen, M.-% glühverlusthaltig

Komponente	A1	A2	A7	A8	A10	A11	A13	A14
Glühverlust	4,89	2,58	2,28	3,27	2,88	7,12	3,77	4,20
Silicium(IV)-oxid	40,96	39,48	45,07	50,48	51,82	50,17	51,57	48,72
Aluminiumoxid	26,56	22,56	28,31	30,25	24,86	24,12	26,83	28,90
Eisen(III)-oxid	9,98	14,27	12,13	6,04	7,30	6,22	6,65	4,66
Calciumoxid	7,73	11,28	2,14	0,75	5,74	3,31	3,62	7,47
Natriumoxid	1,48	1,04	1,40	1,13	0,66	1,03	0,85	0,17
Kaliumoxid	1,79	2,28	3,25	3,92	1,97	3,74	3,07	0,60
Natriumäquivalent	2,65	2,53	3,54	3,71	1,96	3,49	2,87	0,57
Phosphor(V)-oxid	0,94	0,06	0,58	0,44	0,94	1,13	0,58	1,06
Magnesiumoxid	3,82	3,02	2,58	1,92	1,93	1,76	1,65	1,45
Mangan(III)-oxid	0,21	0,21	0,18	0,08	0,09	0,07	0,06	0,06
Titandioxid	1,09	0,81	1,14	1,26	1,14	1,07	1,24	1,64
Sulfat als SO ₃	0,65	2,09	0,94	0,40	0,67	0,22	0,34	0,26
Freikalk	1,27	1,10	0,39	n.n.	0,82	0,14	0,22	0,89
Reaktives SiO ₂	33,8	33,8	36,5	44,3	39,0	44,1	40,6	34,1
Dichte, g/cm ³	2,70	2,79	2,64	2,53	2,20	2,36	2,58	2,64
x', µm	27,27	32,04	25,46	13,20	32,42	26,01	27,79	36,39
n, -	0,77	0,87	0,80	1,10	0,90	0,70	0,80	0,88

n.n. = nicht nachweisbar

Der Glasgehalt der acht Steinkohlenflugaschen wurde sowohl röntgendiffraktometrisch als auch nasschemisch bestimmt. Mit der nasschemischen Methode wird der im alkalischen Milieu lösliche Anteil ermittelt, der auch bei der Reaktion der Flugasche in der Zementsteinmatrix von Bedeutung ist. Daher ist für die Einschätzung der Reaktionsfähigkeit der Asche die nasschemische Bestimmung des Glasgehalts gut geeignet. Dieser Parameter korrelierte mit der Lösungswärme der Steinkohlenflugaschen (vgl. **Bild 1**).

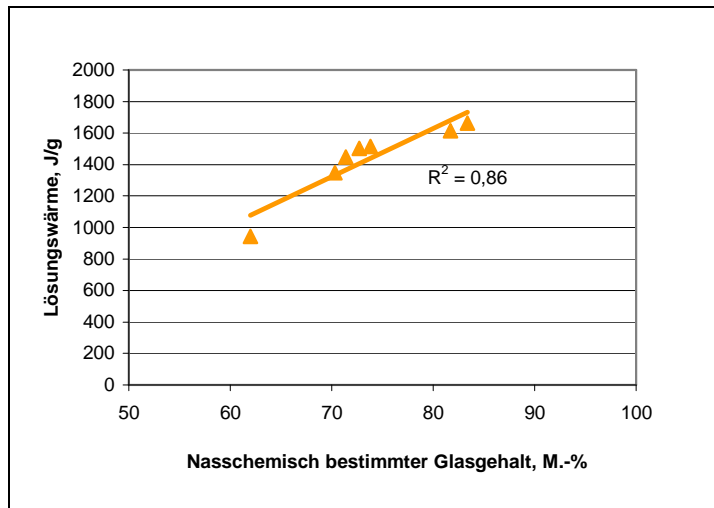


Bild 1 Abhängigkeit der Lösungswärme vom Glasgehalt der eingesetzten Steinkohlenflugaschen

Hinsichtlich der Lösungswärme war insgesamt jedoch nicht der absolute Gehalt einer reaktiven Komponente, z. B. reaktives SiO_2 , in der Flugasche ausschlaggebend, sondern ihre Relation zum Gesamtgehalt dieser Komponente.

3.2 Suspensionsversuche

Die Durchführung von Suspensionsversuchen in verschiedenen Medien sollte die Korrosion der Steinkohlenflugaschen beschleunigen, so dass die Freisetzung verschiedener Komponenten ermittelt werden konnte. Das Verhalten der Steinkohlenflugaschen während der Suspensionsversuche unterschied sich in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung zum Teil deutlich voneinander. Bei der Suspendierung in Wasser wurden mehr Alkalien freigesetzt als in Reaktionsprodukte eingebaut. Insgesamt wurde das Flugascheglas in Wasser nur in sehr geringem Maße angegriffen. Der Gehalt an verschiedenen Ionen in der Lösung wurde vor allem durch die Löslichkeit der Oberflächenbelegungen, z.B. Anhydrit, der verschiedenen Aschen bestimmt.

Bei Suspendierung in der alkalischen Prüflösung p1 ($c(\text{KOH}) = 0,54 \text{ mol/L}$, $c(\text{NaOH}) = 0,11 \text{ mol/L}$) banden die Reaktionsprodukte der Flugaschen mehr Kalium als Natrium ein. Es konnte gezeigt werden, dass die alkalische Porenlösung Aluminium und Silicium kongruent löste.

Die Suspendierung in der hochalkalischen Prüflösung p2 ($c(\text{KOH}) = 8,26 \text{ mol/L}$, $c(\text{NaOH}) = 1,74 \text{ mol/L}$) stellte die chemische Umgebung einer Steinkohlenflugasche bei alkalischer Anregung nach. Dabei ähnelten sich besonders die Aschen A2 und A8 als auch die Aschen A10 und A14 in ihrem Verhalten. Die untersuchten Aschen beider Gruppen hatten jeweils dasselbe molare Verhältnis von Silicium zu Aluminium in ihrem reaktiven Bestandteil, wodurch die Strukturen der alumosilicatischen Netzwerke der Aschen geprägt werden. Dieses Verhältnis betrug bei A2 und A8 jeweils 1,8 und bei A10 und A14 jeweils 2,7. Demnach war für die Löslichkeit und damit für die Reaktionsfähigkeit der Aschen in diesem Milieu ihr molares Silicium/Aluminium-Verhältnis und somit die Art des alumosilicatischen Netzwerks der Steinkohlenflugaschen entscheidend (vgl. **Bild 2**).

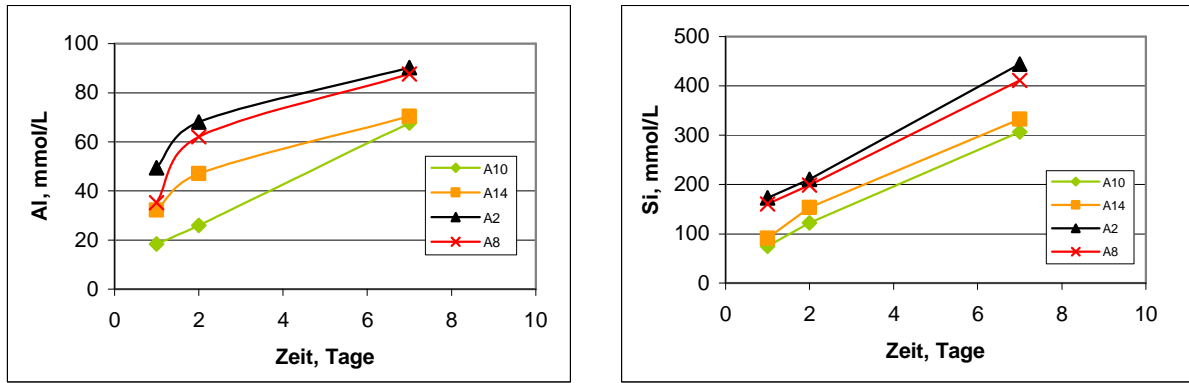


Bild 2 Aluminiumgehalte (links) und Siliciumgehalte (rechts) der Lösungen aus den Suspensionsversuchen in p2, mmol/L

Es wurden auch Mischungen der Steinkohlenflugaschen mit Calciumhydroxid in der alkalischen Prüflösung p1 suspendiert. Dabei war der Einbau von Kalium in Flugaschereaktionsprodukte sehr deutlich zu erkennen, da die Konzentration der Lösungen zu jedem Zeitpunkt unter der Konzentration der eingesetzten Prüflösung p1 lag. Natrium hingegen wurde durch die Asche in die Lösung abgegeben. Bei Anwesenheit von Calciumhydroxid im Gemisch verringerte sich der Aluminiumgehalt in den Eluaten durch den Einbau in Hydratphasen wie Ettringit deutlich. Es wurde ein Zusammenhang zwischen dem Aluminium- und Sulfatgehalt im Eluat und dem Sulfatgehalt der Aschen ermittelt, der in

Bild 3 dargestellt ist. Je mehr Sulfat eine Asche enthielt, umso geringer war der Aluminiumgehalt im Eluat, da dieses für die Bildung von AFt- bzw. AFm-Phasen benötigt wird.

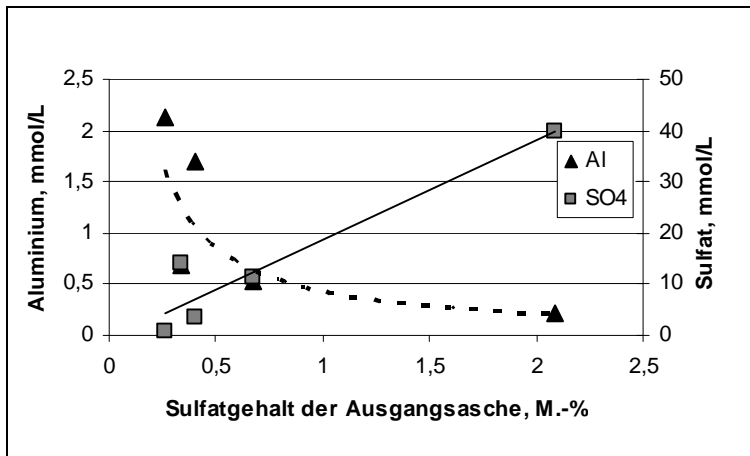


Bild 3 Aluminium- und Sulfatgehalt in den Lösungen aus Suspensionsversuchen von Mischungen Steinkohlenflugasche/Calciumhydroxid = 86/14 in p1, mmol/L

3.3 Untersuchung von reinen Hydratationsprodukten der Steinkohlenflugaschen

Die Hydratationsprodukte der Steinkohlenflugaschen, die in Wasser oder in einer Prüflösung mit oder ohne Zugabe von Calciumhydroxid entstanden, wurden mit verschiedenen Methoden untersucht. Ohne Zugabe von Calciumhydroxid reagierte Steinkohlenflugasche A2 in der

Prüflösung p1 am stärksten. Durch ihre chemische Zusammensetzung verfügte diese Flugasche über ein nahezu latent-hydraulisches Reaktionsverhalten und konnte ohne Calciumzufuhr festigkeitsrelevante Reaktionsprodukte bilden. Das Wasser/Feststoff-Verhältnis hatte bei der Hydratation der Aschen in Prüflösung p1 und p1c einen Einfluss auf die Art der gebildeten Reaktionsprodukte. So wurde Ettringit besonders bei kleinen Wasser/Feststoff-Verhältnissen gebildet, da dann die relevanten Ionen in den nötigen Konzentrationen vorliegen.

Im Gemisch der Steinkohlenflugaschen mit Calciumhydroxid bildeten sich abhängig von der Flugasche in der jeweiligen Probe unterschiedliche Mengen an Mono- und Hemicarboaluminat. Die Art und Menge der Carboaluminat-Änderung änderte sich ebenso in Abhängigkeit vom Wasser/Feststoff-Verhältnis. Mit steigendem Wasser/Feststoff-Verhältnis erhöhten sich generell der Calciumhydroxidumsatz und auch die Menge an gebildeten Hydratationsprodukten.

Die Reaktion der Steinkohlenflugaschen in der hochalkalischen Prüflösung p2 lief weitgehend gleich ab. Die Bildung von Zeolithen unter diesen Bedingungen war zum einen stark von der Flugasche selber abhängig, zum anderen aber auch vom Wasser/Feststoff-Verhältnis in den Proben.

An Probenserien der Steinkohlenflugaschen A8 und A14 wurden NMR-Messungen an ^{29}Si - und ^{27}Al -Kernen durchgeführt. In den untersuchten Proben der beiden Steinkohlenflugaschen deuteten sich Unterschiede hinsichtlich ihrer Reaktionsfähigkeit an. So enthielt Asche A14 nach Hydratation mit Calciumhydroxid mehr Siliciumspezies, die CSH-Ketten zugeordnet werden konnten, als Flugasche A8. Auch die Reaktionsfähigkeit dieser Asche in der hochalkalischen Prüflösung p2 war stärker als die von Flugasche A8. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass in Proben beider Aschen die Kettenlänge der CSH-Phasen nach einer Hydratationszeit von 91 Tagen wieder abnahm.

Durch Sichtung der Steinkohlenflugaschen wurden Fraktionen erzeugt, die eine höhere Oberfläche und veränderte chemisch-mineralogische Zusammensetzungen aufwiesen. Daher reagierten die Feinfraktionen ($< 12 \mu\text{m}$) in den untersuchten Probenserien deutlich stärker als die übrigen Fraktionen und die Originalaschen. Auffällig war zudem, dass durch die Anreicherung von sulfathaltigen Phasen in den Feinfraktionen die Carboaluminat-Änderung in den Hydratationsprodukten dieser Fraktionen weniger stabilisiert wurden als bei der Hydratation der übrigen Fraktionen.

3.4 Umsatzbestimmungen

Der Umsatz der Steinkohlenflugaschen bei ihrer Reaktion mit Calciumhydroxid wurde zum einen mittels DSC durch die Bestimmung des Gehalts an Calciumhydroxid in den hydratisierten Proben und zum anderen mittels MSS-Aufschluss nach prEN 196-4 ermittelt. Mit steigendem reaktivem Anteil der Flugaschen stieg auch deren mittels DSC bestimmter Umsatz nach 28 Tagen Hydratation. Ebenfalls konnte eine Abhängigkeit des Umsatzes der Steinkohlenflugasche vom Aluminiumgehalt im Flugascheglas ermittelt werden.

Die Umsatzbestimmung mittels MSS-Aufschluss zeigte, dass in der Prüflösung p1 ohne Calciumhydroxid-Zusatz das Flugascheglas nur in sehr geringem Maße und nach einer sehr langen Hydratationszeit angegriffen wurde. Unabhängig von der Art der Anregung und der Mischung wurde Steinkohlenflugasche A2 stärker umgesetzt als die Aschen A8 und A10.

Der Umsatz der Aschen bei der Reaktion mit Calciumhydroxid stieg mit abnehmendem Gehalt an reaktiver Kieselsäure und steigendem Gehalt an reaktivem CaO in den Flugaschen. Beide Verfahren zur Umsatzbestimmung führten zu unterschiedlichen Ergebnissen. Mittels DSC wurde weniger die Auflösung der Asche verfolgt, sondern eher die Bildung calciumhydroxidhaltiger Reaktionsprodukte. Der MSS-Aufschluss hingegen bestimmte die Menge der reagierten Flugasche, also die potentiell für eine puzzolanische Reaktion zur Verfügung stehende Menge an Steinkohlenflugasche.

3.5 Untersuchung der Hydratationsprodukte der flugaschehaltigen Zemente

Die Ausbildung von Carboaluminaten in flugaschehaltigen Zementen wurde durch die Reaktion der verschiedenen Steinkohlenflugaschen geprägt und war je nach eingesetzter Steinkohlenflugasche unterschiedlich. Reaktionsprodukte der Steinkohlenflugaschen waren in flugaschehaltigen Zementen schon nach einer Hydratationszeit von 28 Tagen mittels Rasterelektronenmikroskopie sichtbar (vgl. **Bild 4**).

Mit zunehmendem Aschegehalt in den Zementen wurde das Gefüge der hydratisierten Proben lockerer und die Menge der puzzolanisch reagierten Flugaschepartikel verringerte sich.

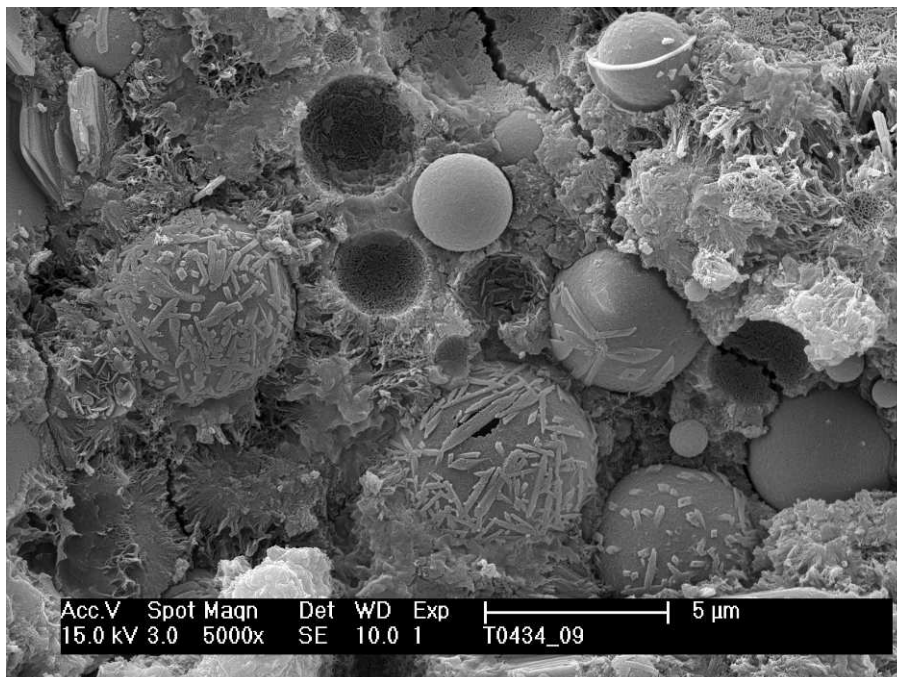


Bild 4 CEM II/B-V mit 30 M.-% Steinkohlenflugasche nach 28 Tagen Hydratation mit einem w/z-Wert von 0,5; Bruchfläche 5000-fache Vergrößerung

Durch MSS-Aufschlüsse der hydratisierten Zementsteine konnte der Umsatz der jeweiligen Steinkohlenflugasche bestimmt werden (vgl. **Bild 5**). Hierbei ergaben sich in Abhängigkeit von der Aschezusammensetzung unterschiedliche Umsatzraten im Zementstein. Der Anteil der umgesetzten Steinkohlenflugasche bezogen auf die Gesamtmenge der Asche im Zement sank mit steigendem Flugaschegehalt. Dies ist im Wesentlichen auf den sinkenden pH-Wert der Porenlösung und fehlende Reaktionspartner in den Systemen mit hohem Aschege-

halt zurückzuführen und erklärt die mit zunehmendem Flugascheanteil ansteigende Porosität der Zementsteine.

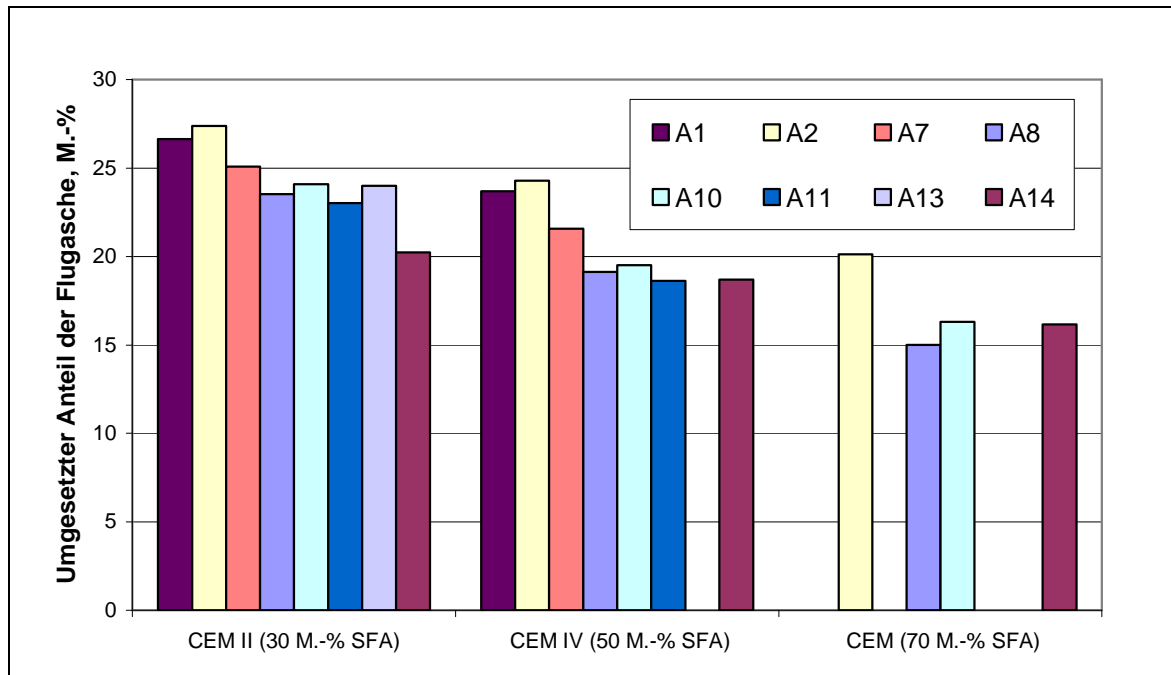


Bild 5 Umgesetzter Anteil der Steinkohlenflugaschen in den hydratisierten Zementsteinen nach 7 Tagen Hydratation in Abhängigkeit vom Flugaschegehalt in den Zementen

3.6 Druckfestigkeiten der flugaschehaltigen Zemente

Untersuchungen der Druckfestigkeit flugaschehaltiger Zemente ergaben, dass die Bildung festigkeitsrelevanter Produkte durch die Reaktion der Flugaschen zwischen den Prüfaltern 7 und 28 Tagen am stärksten war. Dies steht in Einklang mit den Untersuchungen zum Umsatz der Steinkohlenflugaschen. Der Einfluss, den die chemische Zusammensetzung der Flugaschen auf ihren Festigkeitsbeitrag im Zement hatte, änderte sich je nach Flugaschegehalt im Zement. Generell beeinflussten die Gehalte an reaktivem SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O und K_2O der Steinkohlenflugasche die Druckfestigkeit flugaschehaltiger Zemente positiv. Reaktives CaO wirkte sich dagegen negativ auf die Druckfestigkeit aus (vgl. **Bild 6**).

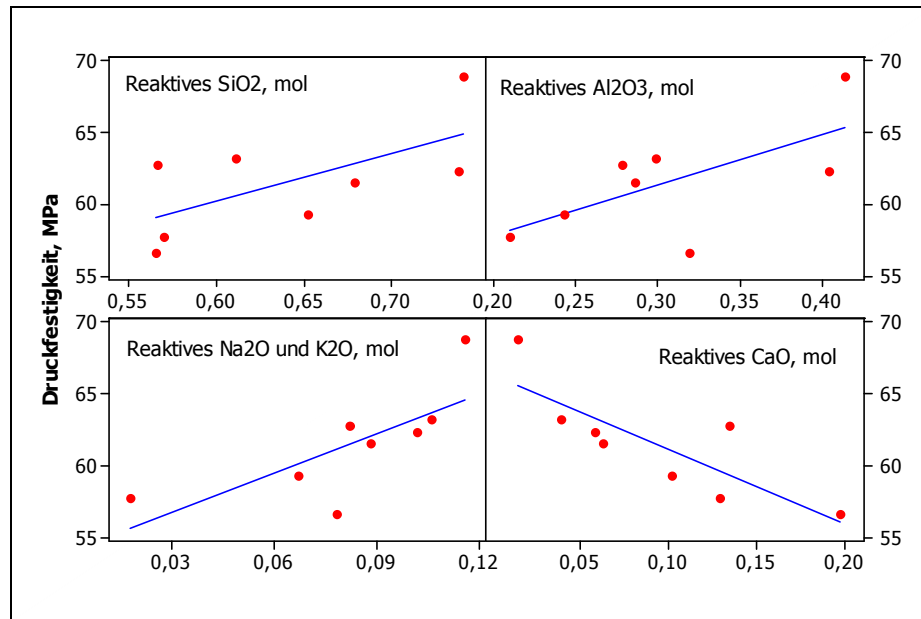


Bild 6 Druckfestigkeit der CEM II-Zemente im Alter von 91 Tagen in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung der Flugasche

3.7 Versuche zur Steuerung des Reaktionsverhaltens der Flugaschen

Die Zugabe verschiedener Zusätze zu flugaschehaltigen Zementen und die Mischung verschiedener Aschen beeinflusste die Hydratation dieser Systeme teilweise stark. Die entstandenen Reaktionsprodukte wurden ausführlich beschrieben und der Einfluss der Zusätze auf die Reaktion der Aschen und des Zements untersucht.

Die Zugabe von Alkalisulfat wirkte sich bei dem Zement, der eine sulfatarme Asche enthielt, positiv auf den Festigkeitsverlauf aus. Die Zugabe aluminiumhaltiger Stoffe war bei dem Zement mit der calciumreichen Asche A2 wirkungsvoller als bei dem mit der aluminium- und siliciumreichen Asche A7. Zudem konnte festgestellt werden, dass die Mischung verschiedener Aschen, die sich von der Zusammensetzung her positiv beeinflussen, ähnlich wirkungsvoll wie die Zugabe von Zusätzen war und zu einer verstärkten Reaktion der Klinkerkomponente in dem untersuchten Zement führte (vgl. **Bild 7**).

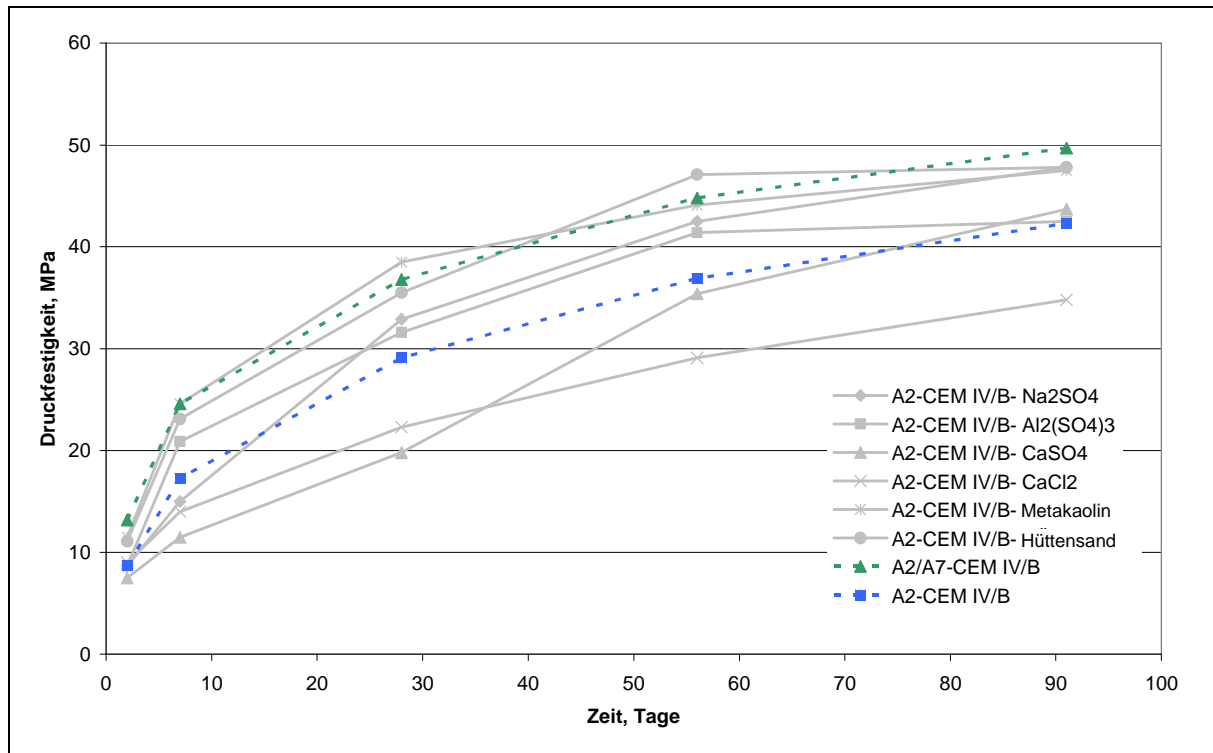


Bild 7 Festigkeitsentwicklung nach DIN EN 196-1 der CEM IV-Zemente mit 50 M.-% Steinkohlenflugasche A2 mit verschiedenen Zusätzen

4 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens war die Verbesserung der Produkteigenschaften flugaschehaltiger Zemente. Hierfür sollten die Hydratationsreaktionen von Steinkohlenflugaschen grundlegend untersucht werden, um Rückschlüsse auf ihre Reaktivität ziehen zu können und ihr Reaktionsverhalten in Zementen beeinflussen zu können.

Zunächst wurden die Steinkohlenflugaschen grundlegend chemisch-mineralogisch charakterisiert und ihr Gehalt an reaktiven Komponenten bestimmt. Durch Suspensionsversuche wurde sowohl die Korrosion der Aschen isoliert als auch in Kombination mit Calciumhydroxid untersucht. Das Verhalten der Steinkohlenflugaschen während der Suspensionsversuche unterschied sich in Abhängigkeit von ihrer Zusammensetzung und dem Suspensionsmedium zum Teil deutlich voneinander.

Die isolierte Untersuchung von in zementären Systemen gebildeten Reaktionsprodukten von Steinkohlenflugaschen ist praktisch nicht möglich. Um entsprechende Hydratationsprodukte von Steinkohlenflugaschen herzustellen, wurde daher durch Mischung mit unterschiedlichen Gehalten an Calciumhydroxid die Reaktion von Flugaschen in Zementen nachgestellt. Die dabei entstandenen Hydratationsprodukte wurden mit verschiedenen Methoden untersucht.

In dem Forschungsprojekt wurden zwei verschiedene Arten der Umsatzbestimmungen der Steinkohlenflugaschen bei ihrer Reaktion mit Calciumhydroxid durchgeführt und Abhängigkeiten des Umsatzes der Steinkohlenflugasche von ihrer chemischen Zusammensetzung ermittelt. Beide Verfahren wurden gegenüberstellend diskutiert und bewertet.

Flugaschehaltige Zemente mit 30, 50 und 70 M.-% Steinkohlenflugasche wurden hergestellt und hinsichtlich ihrer Reaktionsprodukte und ihres Umsatzes sowie ihrer Druckfestigkeits-

entwicklung untersucht. Die Bildung festigkeitsrelevanter Produkte durch die Reaktion der Flugaschen war zwischen den Prüfaltern 7 und 28 Tagen am stärksten. Der Einfluss, den die chemische Zusammensetzung der Flugaschen auf ihren Festigkeitsbeitrag im Zement hatte, änderte sich je nach Flugaschegehalt im Zement. Generell beeinflussten die Gehalte an reaktivem SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O und K_2O der Steinkohlenflugaschen die Druckfestigkeit flugaschehaltiger Zemente positiv. Reaktives CaO wirkte sich dagegen negativ auf die Druckfestigkeit aus.

Die Zugabe verschiedener Zusätze zu flugaschehaltigen Zementen und die Mischung verschiedener Aschen beeinflusste die Hydratation dieser Systeme teilweise stark. Die entstandenen Reaktionsprodukte wurden ausführlich beschrieben und der Einfluss der Zusätze auf die Reaktion der Aschen und des Zements untersucht.

Für die Herstellung leistungsfähiger flugaschehaltiger Zemente sind Kenntnisse über die im System Klinker-Steinkohlenflugasche ablaufenden Hydratationsreaktionen von großer Bedeutung. In dem Forschungsprojekt wurden diese Reaktionen grundlegend untersucht und Einflüsse auf die Reaktivität der Aschen herausgearbeitet. Da die verwendeten Flugaschen hinsichtlich ihrer Reaktion sensibel auf Veränderungen (z. B. durch die Änderung der Art und der Menge der Klinkerkomponente, der Menge des verfügbaren Wassers oder durch Zugabe eines Zusatzes) ihrer Umgebung reagierten, ist die Auswahl der richtigen Steinkohlenflugasche für die jeweilige Anwendung im Zement von großer Bedeutung.

„Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.“

5 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 16206 N der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages