

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung: VDZ gGmbH (Zementwerke)  
IGF-Vorhaben-Nr.: 19112 N  
Bewilligungszeitraum: 01.04.2016-30.09.2018

Forschungsthema:

## **Vermeidung einer schädigenden AKR durch Portlandflugaschezement – Wirkungsmechanismen im Beton**

### **1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung**

Beim Einsatz von alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen im Beton müssen gemäß der aktuellen Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) unter bestimmten Bedingungen vorbeugende Maßnahmen gegen eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) getroffen werden. Eine der möglichen Maßnahmen in den Feuchtigkeitsklassen WF oder WA ist bei bestimmten Zementgehalten im Beton die Verwendung eines Zements mit niedrigem wirksamem Alkaligehalt (NA-Zement) gemäß DIN 1164-10. Als NA-Zemente gelten generell alle Zemente nach DIN EN 197-1 mit einem Gesamtalkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent) von nicht mehr als 0,60 M.-%. Bei hüttensandhaltigen Zementen sind mit steigendem Hüttensandgehalt auch höhere Gesamtalkaligehalte zugelassen, weil nur ein Teil der Alkalien in Hüttensanden als wirksam zu betrachten ist. Eine entsprechende Regelung existiert in Deutschland für Zemente mit Flugasche als Hauptbestandteil nicht. Dadurch ist die Herstellung von NA-Zementen mit Flugasche als Zementhauptbestandteil zwar theoretisch möglich, aber auf Grund der im Vergleich zu Portlandzementklinker oft relativ hohen Gesamtalkaligehalte von Flugaschen praktisch kaum umsetzbar. Viele Forschungsergebnisse zeigen jedoch, dass sich auch die Verwendung von kieselssäurereicher Flugasche als Zementhauptbestandteil zur Vorbeugung gegen eine schädigende AKR eignet. Dabei sind verschiedene Wirkungsmechanismen bekannt, die an der Wirkung der Flugasche beteiligt sind (Verringerung der Alkalität der Porenlösung, Verringerung des Gehalts an Calciumhydroxid (CH) im Zementstein, Verdichtung des Porengefüges, Freisetzung von Aluminium).

Zur Optimierung der NA-Eigenschaften flugaschehaltiger Zemente ist ein grundlegendes Verständnis unerlässlich, wie die Eigenschaften der Zemente (Flugascheeigenschaften,

Flugaschegehalt, Aufbereitungszustand der Flugasche, Portlandzementklinkereigenschaften) sich auf die genannten Wirkungsmechanismen auswirken. Dieses Verständnis wurde in dem abgeschlossenen Forschungsprojekt „Vermeidung einer schädigenden AKR durch den gezielten Einsatz von Steinkohlenflugasche als Zementhauptbestandteil“ (IGF 17249N; Kurztitel „NA-Zemente mit Flugasche“) [VDZ2014] und einer darauf basierenden Dissertation [Böhm2016] erheblich erweitert. Es konnte gezeigt werden, wie stark die verschiedenen Zementeigenschaften die genannten Wirkungsmechanismen beeinflussen.

Im Rahmen dieses Projektes wurden jedoch keine Betonversuche durchgeführt. Dadurch war die Frage noch offen, wie stark die verschiedenen Wirkungsmechanismen im Beton jeweils zur AKR-Vorbeugung beitragen. Darüber hinaus wurde nicht untersucht, wie die Eigenschaften flugaschehaltiger Zemente die Aluminiumfreisetzung beeinflussen.

## **2            Forschungsziel und Lösungsweg**

Das Forschungsvorhaben verfolgte zwei Ziele. Zum Ersten sollte untersucht werden, wie sich die Eigenschaften flugaschehaltiger Zemente auf die Freisetzung von Aluminium in die Porenlösung auswirken, das einen deutlichen Einfluss auf die Löslichkeit von Silikaten und damit auf den Verlauf einer AKR zu haben scheint. Dazu wurden ähnlich wie in IGF 17249N Zementsteine aus verschiedenen flugaschehaltigen Laborzementen hergestellt und die daraus gewonnenen Porenlösungen auf den Gehalt an gelöstem Aluminium untersucht. Die Ergebnisse wurden mit den Eigenschaften der Laborzemente korreliert, um so die umfassenden Erkenntnisse zu den Zusammenhängen zwischen Zementeigenschaften und den anderen Wirkungsmechanismen von Flugasche zur AKR-Vorbeugung aus dem Vorgängervorhaben zu vervollständigen.

Zum Zweiten wurden Betonversuche mit gezielt ausgewählten und hergestellten flugaschehaltigen Laborzementen durchgeführt, um zu untersuchen, welcher der in diesem und im Vorgängervorhaben untersuchten Wirkungsmechanismen wie stark zur Vorbeugung einer schädigenden AKR beiträgt. Durch eine unerwartet niedrige Alkaliempfindlichkeit des verwendeten Grauwackesplitts traten in Betonversuchen ohne Alkalizufuhr beim Einsatz flugaschehaltiger Laborzemente praktisch keine Dehnungen auf. Daher wurden die Betonprobekörper noch einmal den Prüfbedingungen des 60 °C-Betonversuchs mit Alkalizufuhr ausgesetzt. Dabei wurde eine 10%ige NaCl-Prüflösung verwendet. Die Erkenntnisse sollten die gezielte Optimierung der Leistungsfähigkeit flugaschehaltiger Zemente hinsichtlich der Vorbeugung einer schädigenden AKR sowie die Definition von Anforderungen an NA-Zemente mit Flugasche ermöglichen.

## **3            Ergebnisse**

### **Freisetzung von Aluminium**

Die Verwendung verschiedener Portlandzementklinkerbestandteile in den flugaschehaltigen Laborzementen ließ keine systematischen Einflüsse auf die Anteile an gelöstem Aluminium in der Porenlösung erkennen.

Die Eigenschaften der Flugaschekomponente in Laborzementen (chemische-mineralogische Zusammensetzung Anteil im Zement, Aufbereitungszustand) wirkten sich systematisch auf die Aluminiumionenkonzentration der Porenlösung aus.

Die Aluminiumionenkonzentrationen der Porenlösungen flugaschehaltiger Zementsteine stiegen während der beobachteten Hydratationsdauer von 28 bis 365 d mit zunehmender puzzolanischer Reaktion der Flugaschen. Dabei waren die Konzentrationen schon nach 28 d meist höher als in den entsprechenden flugaschefreien Zementsteinen.

Die Fähigkeit der flugaschehaltigen Laborzemente, die Aluminiumionenkonzentration der Porenlösung im Zementstein anzuheben, wurde vor allem von zwei Faktoren beeinflusst, nämlich dem im Flugascheglas gebundenen Aluminiumanteil (reaktives  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und dem Flugascheanteil im Zement. Mit steigendem Gehalt an reaktivem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und an steigendem Anteil der Flugasche am Zement stieg der Aluminiumgehalt der Porenlösung.

Die Aufbereitung der Flugaschen und damit ihre Feinheit wirkten sich in begrenztem Umfang ebenfalls auf die Aluminiumionenkonzentration der Porenlösung aus. Bei Verwendung aufbereiteter Flugaschen wurden höhere Konzentrationen beobachtet als bei Verwendung derselben Flugaschen im Ausgangszustand.

Alle Ergebnisse deuten somit darauf hin, dass das Flugascheglas bei der puzzolanischen Reaktion Aluminium freisetzt, das teilweise in der Porenlösung verbleibt. Die Menge an gelöstem Aluminium steigt mit fortschreitender Reaktion der Flugasche, höherem Anteil an reaktivem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , höherem Flugaschegehalt und höherer Feinheit der Flugasche im Zement.

## **Betonversuche**

Durch die vergleichsweise geringe Anzahl an Betonversuchen lassen die Ergebnisse teilweise keine eindeutigen Rückschlüsse zu, welche Wirkungsmechanismen wie stark zur Vorbeugung einer AKR beitragen. Der Einfluss des Alkalihaushalts der Porenlösung war jedoch ausgeprägt und gut erkennbar. Dieser Faktor wird am stärksten durch die Alkaligehalte von Portlandzementklinkerkomponente und Flugasche kontrolliert. Der Einfluss der Al-Freisetzung in die Porenlösung scheint dagegen begrenzt zu sein. Dieser Faktor hängt stark vom Anteil von Aluminium im Flugascheglas ab. Dadurch konnte er nicht unabhängig vom Alkaligehalt der Flugaschen untersucht werden und wurde in den Betonversuchen durch die Auswirkungen des Alkalihaushalts auf die Dehnungen überdeckt. Der Einfluss eines dichteren Zementsteingefüges war nicht eindeutig erkennbar. Dieser Faktor wird unter anderem durch die Aufbereitung der Flugasche beeinflusst. Hier war jedoch kein durchgehend positiver Effekt hinsichtlich der Vorbeugung einer AKR erkennbar. Der Einfluss des Zementsteingefüges scheint somit zumindest bei den verwendeten Betonrezepturen begrenzt zu sein. Möglicherweise ist der Einfluss des CH-Gehalts größer. Dieser Faktor wird am stärksten durch den Flugaschegehalt kontrolliert. Höhere Flugaschegehalte wirkten sich in Form geringerer Dehnungen aus. Da der Flugaschegehalt jedoch auch deutliche Auswirkungen auf alle anderen Wirkungsmechanismen hat, lässt sich ein klarer Zusammenhang zum CH-Gehalt nicht sicher belegen.

## Anforderungen an NA-Zemente mit Flugasche als Zementhauptbestandteil

Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Vorläuferprojekt und aus den hier beschriebenen Untersuchungen lassen sich Anforderungen an NA-Zemente mit Flugasche als Zementhauptbestandteil ableiten.

Die Anforderungen müssen insbesondere die große Rolle der Alkaliionenkonzentration der Porenlösung berücksichtigen, die wesentlich durch die Alkaligehalte von Portlandzementklinkerkomponente und Flugasche bestimmt werden. Die mögliche Rolle des CH-Gehalts kann durch Mindestgehalte an Flugasche berücksichtigt werden. Dies wirkt sich auch noch einmal mindernd auf den Alkaligehalt der Porenlösung aus. Der in der Porenlösung gelöste Aluminiumanteil und das durch die Flugascheeigenschaften ebenfalls beeinflusste Mikrogefüge des Zementsteins scheinen bei der Vermeidung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion dagegen – im Rahmen der hier untersuchten Stoffe und Betonrezepturen – nur eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Wie bereits in [Boehm20106] diskutiert, lassen sich nun folgende praxisnahen Anforderungen an flugaschehaltige NA-Zemente ableiten:

- Mindestgehalt an Flugasche: 30 M.-%
- Höchstgehalt an Alkalien im Klinker: 1,0 M.-%
- Höchstgehalt an Alkalien in der Flugasche: 3,0 M.-%

Einzelne Beobachtungen, wie z. B. die sehr geringen Dehnungen eines Betons mit nur 20 M.-% der alkalireichen Flugasche V08 (ZB1/V08uG\_20%\_H) zeigen, dass auch Flugaschezemente, die die genannten Anforderungen nicht einhalten, dennoch wirksam einer schädigenden AKR vorbeugen können. Dies müsste dann durch gezielte Betonversuche, etwa im Rahmen einer bauaufsichtlichen Zulassung, nachgewiesen werden.

## Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19112 N der Forschungsvereinigung VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

## Literatur

- Böhm2016      Böhm, M.: Beitrag von Steinkohlenflugasche in Zement zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 83 Verlag Bau + Technik (2016), 223 S.
- VDZ2014      VDZ gGmbH: Vermeidung einer schädigenden AKR durch den gezielten Einsatz von Steinkohlenflugasche als Zementhauptbestandteil. Schlussbericht IGF-Forschungsvorhaben Nr. 17249N, VDZ gGmbH (2014)