

IGF-Vorhaben-Nr.: 15876 N
Bewilligungszeitraum: 01.12.2008 – 31.05.2011
Forschungsthema: **Vermeidung von Farbunterschieden in Sichtbetonoberflächen:
Mischungsstabilität und Transportphänomene
(Kurztitel: Farbunterschiede in Sichtbetonoberflächen)**

1 Einleitung

Das Forschungsvorhaben „Farbunterschiede in Sichtbetonoberflächen“ war Teil der vom Deutschen Beton- und Bautechnik-Verein E.V. (DBV) und vom Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) koordinierten Verbundforschung „Sichtbeton“. Die innerhalb der Verbundforschung „Sichtbeton“ von sechs Forschungsstellen bearbeiteten drei Forschungsvorhaben wurden über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) finanziell gefördert (IGF-Vorhaben-Nr. 15873 N, 15876 N, 15940 B).

Das Vorhaben „Farbunterschiede in Sichtbetonoberflächen“ wurde in der Zeit vom 1. Dezember 2008 bis zum 31. Mai 2011 am Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf (Forschungsstelle 1) und am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der Technischen Universität München (Forschungsstelle 2) durchgeführt. Die Forschungsschwerpunkte der beiden Forschungsstellen ergaben sich aus dem Vorläufervorhaben (AiF-Vorhaben-Nr. 14079 N), das ebenfalls im Rahmen der vom DBV und VDZ geleiteten Verbundforschung „Sichtbeton“ in der Zeit vom 1. Mai 2004 bis zum 30. April 2006 an den genannten Forschungsstellen durchgeführt wurde.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

Ziel des Forschungsvorhabens war es, systematisch die Ursachen und Mechanismen, die zur Entstehung von Verfärbungen in Sichtbetonoberflächen führen können, weiter aufzuklären und somit dazu beizutragen, deren Auftreten weiter verringern zu können.

Die Forschungsstelle 1 untersuchte insbesondere den Einfluss von Hüttensand bzw. Kalkstein als weiterem Hauptbestandteil neben Klinker auf den Zement und auf Wechselwirkungen mit Fließmitteln auf der Basis von Polycarboxylatether (PCE) systematisch. Mit den gewonnenen Erkenntnissen wurde das im Vorläufervorhaben entwickelte Modell zur Entstehung möglicher Verfärbungen in Sichtbetonoberflächen infolge Sedimentation um Zemente mit den Hauptbestandteilen Klinker und Hüttensand bzw. Kalkstein und PCE-Fließmitteln erweitert.

Es wurden insgesamt 14 Laborzemente, mit der gleichen Portlandzementklinker- und Sulfat-trägerkomponente sowie systematisch variiertem weiterem Hauptbestandteil (bis zu 35 M.-% Kalkstein bzw. bis zu 80 M.-% Hüttensand), hergestellt. Die verwendeten vier Hüttensande bzw. drei Kalksteine unterschieden sich in ihrer chemischen Zusammensetzung und Granulometrie. Die untersuchten vier PCE unterschieden sich bezüglich der Art ihres

Anwendungsgebiets (Transportbeton, Fertigteilbeton) und ihrer Polymerstruktur. Zu Vergleichszwecken waren im Untersuchungsprogramm jeweils ein Fließmittel auf der Basis von Melamin- und Naphthalinsulfonat enthalten. Es wurden rheologische Eigenschaften und das Zeta-Potential von Zementleim bestimmt sowie die Zusammensetzung der Porenlösung analysiert und die adsorbierte Menge an Wirkstoff ermittelt. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden durch Betonversuche bestätigt.

Die Forschungsstelle 2 untersuchte Transportmechanismen im frischen und erstarrenden Beton und deren Auswirkungen auf die Sichtbetonqualität. Im Rahmen der Arbeiten wurden folgende Teilziele verfolgt.

Teilziel 2-A: Quantifizierung des Einflusses verschiedener betontechnologischer Parameter auf die Entstehung fleckiger Dunkelfärbungen an Sichtbetonflächen bei ungünstigen klimatischen Bedingungen anhand von Betonversuchen. Auf Grundlage der Ergebnisse wurden baupraktische Empfehlungen zur Vermeidung dieser Verfärbungen bei ungünstigen klimatischen Bedingungen, z. B. bei Winterbetonagen, gegeben.

Teilziel 2-B: Quantifizierung des Einflusses von Transportvorgängen im eingeschalteten Beton auf die Entstehung fleckiger Dunkelfärbungen im unteren Bauteilbereich anhand der Messung von Porenwasserdrücken im Frischbeton.

Es wurde der Hydratationsfortschritt, die Zusammensetzung und zeitliche Entwicklung der Porenlösung, die Ausbildung des Porengefüges zum Ausschalzeitpunkt im Kernbeton sowie der w/z-Wert-Gradient in der Randzone im Bereich von 0 bis 1500 µm Abstand von der geschalteten Oberfläche bestimmt. Dabei wurden die Parameter „w/z-Wert“, „Mahlfeinheit des Zements“, „Austauschrate Zement durch Kalksteinmehl“, „Alkalisulfatgehalt des Zements“ und „Frischbeton- und Betontemperatur in der Schalung“ variiert. Zudem wurde an allen Betonen der Verfärbungsgrad der Oberflächen im Alter von rund zwei Monaten bestimmt. Alle Versuche wurden unter Bedingungen durchgeführt, welche im Vorgängerprojekt zu starken Dunkelfärbungen führten (geringe Frischbetontemperaturen, geringe Umgebungstemperaturen, hohe relative Luftfeuchten).

3 Ergebnisse und Interpretation

Die Untersuchungen der Forschungsstelle 1 ergaben, dass die Konsistenz von Zementleim und Beton mit steigendem Anteil an Hüttensand bzw. Kalkstein im Zement, sowohl durch die Verringerung des Klinkeranteils als auch durch den jeweils verwendeten weiteren Hauptbestandteil, beeinflusst wurde. Bei nahezu gleichbleibender dynamischer Viskosität wurde die Fließgrenze von Zementleim mit steigendem Anteil an praxisüblichem Hüttensand bzw. Kalkstein im Zement sowohl durch die Substitution des Klinkers als auch durch eine Verbesserung der Korngrößenverteilung des Zements gesenkt. Dies führte zu einer Verbesserung der Konsistenz und damit der Verarbeitbarkeit von Beton. Betone mit Zementen mit praxisüblichem Hüttensand bzw. Kalkstein als weiterem Hauptbestandteil können im Vergleich zu Betonen mit Portlandzement mit geringeren Wassermengewerten hergestellt werden und weisen dennoch eine nahezu identische Konsistenz bzw. Verarbeitbarkeit auf. Bei Verwendung von Fließmittel erhöht ein geringerer Wassermengewert die Stabilität des Betons gegenüber Sedimentation, so dass das Risiko des Auftretens von Verfärbungen deutlich minimiert werden kann.

Mit der Reduktion der Klinker- und Sulfatträgerkomponente im Zement nahmen bei gleichbleibendem Wasser/Feststoff-Verhältnis die Ionenstärke sowie die Konzentration an Na^+ , K^+ und SO_4^{2-} in der Porenlösung nahezu linear ab. Die Konzentration an Ca^{2+} erhöhte sich aufgrund der verringerten Alkaliionenkonzentration. Der pH-Wert der Porenlösung veränderte sich nicht signifikant. Die Leime mit Zementen mit bis zu 35 M.-% Hüttensand bzw. Kalkstein wiesen im Vergleich zum Leim mit Portlandzement ein kaum verändertes Zeta-Potential auf. Bei höheren Gehalten an Hüttensand bzw. Kalkstein im Zement wurde das Zeta-Potential des Leims durch den weiteren Hauptbestandteil wesentlich mitbestimmt. Eine Veränderung der Zusammensetzung der Porenlösung und des Zeta-Potentials kann, je nach Struktur der PCE, Auswirkungen auf deren Konstitution und somit auf das Adsorptions- und Verflüssigungspotential von Fließmitteln haben. Davon hängen im Wesentlichen die Sättigungspunktdosierung und damit auch die Stabilität des Betons gegenüber Sedimentation und Verfärbungen ab.

Die zur Erreichung der maximalen Verflüssigung von Zementleim bzw. Beton notwendige Menge an Fließmittel (Sättigungspunktdosierung) sank mit steigendem Anteil an Hüttensand bzw. Kalkstein im Zement. Die Wirkstoffe adsorbierten vorrangig an der Klinkerkomponente bzw. ersten Hydratationsprodukten. Die Sättigungspunktdosierung war bei Verwendung von PCE stets deutlich geringer als bei Verwendung von Fließmittel auf der Basis von Melamin- oder Naphthalinsulfonat. Die untersuchten PCE für die Verwendung in Beton für Fertigteile zeigten relativ unabhängig vom weiteren Hauptbestandteil neben Klinker stets relativ große Sorptionsraten.

Hinsichtlich der Dauer der verflüssigenden Wirkung wiesen die untersuchten PCE in Kombination mit Portlandzement die erwartete produktspezifische Wirkung auf. Die PCE für den Einsatz in Transportbeton hielten die eingestellte Konsistenz des Zementleims bzw. Betons über die Dauer des Versuchs erwartungsgemäß weitestgehend aufrecht. Die Zementleime bzw. Betone, hergestellt mit den PCE für den Einsatz in Beton für Fertigteile, zeigten ein ausgeprägtes Rücksteifen. Die spezifische Wirkung der untersuchten PCE reduzierte sich mit steigendem Anteil an Hüttensand bzw. Kalkstein im Zement. Infolge der Reduktion des Klinker- und Sulfatträgeranteils im Zement sorbierten auch PCE mit geringer Ladungsmenge (Einsatz in Transportbeton), bedingt durch eine geringere SO_4^{2-} und höhere Ca^{2+} -Konzentration in der Porenlösung, schneller und bezogen auf die Zugabemenge zu einem größeren Anteil. Zementleime und Betone wiesen dann auch ein verstärktes Rücksteifen auf. Die Adsorption von PCE für Fertigteilbeton verringerte sich mit abnehmendem Anteil an Klinker im Zement. Dies führte zu einer längeren Konsistenzhaltung von Zementleim bzw. Frischbeton (Depoteffekt).

Die Untersuchungen der Forschungsstelle 2 hinsichtlich des Teilziels 2-A ergaben, dass der Verfärbungsgrad einer Sichtbetonoberfläche bei ungünstigen klimatischen Bedingungen umso geringer ist,

- je kleiner die Kapillarporosität des Kernbetons zum Ausschalzeitpunkt ist (Voraussetzung: identisches Porenvolumen im Portlandit-Ablagerungsraum),
- je kleiner die Calciumionenkonzentration in der Porenlösung des Betons zum Ausschalzeitpunkt ist (Voraussetzung: identisches Porenvolumen im Portlandit-Ablagerungsraum) und
- je größer das Volumen des als Portlandit-Ablagerungsraum zur Verfügung stehenden Porenraums im unmittelbar oberflächennahen Gefüge (wenige 100 µm Tiefe) ist (Voraussetzung: identische Menge an abgelagertem Portlandit).

Hinsichtlich des Teilziels 2-B konnte gezeigt werden, dass der ursächliche bauprozessbedingte Parameter die Dauer der Betonierpause zwischen zwei Chargen bzw. die Zeit zwischen dem Einbau der ersten und der letzten Charge bei mehrlagigen Betonagen ist. Infolge des unterschiedlichen Alters unterscheiden sich die Eigenschaften des frischen und erstarrenden Betons der verschiedenen Betonchargen im Bauteil deutlich. Dabei sind insbesondere die Differenz im Erstarrungsverlauf der jeweiligen Chargen sowie der höhere Calciumgehalt der frischen oberen Lagen maßgebend. Durch den Verdichtungsvorgang der oberen Lagen wird der Randbereich der bereits erstarrenden unteren Lage gestört. Denkbar ist auch, dass sich während des Verdichtungsvorgangs der oberen Lagen ein Mikropalt zwischen Schalung und dem bereits erstarrenden Beton der unteren Lage bildet. In der Folge kommt es zu einem Transport von Porenwasser vom oberen in den unteren Schalungsbereich. Dieser Porenwassertransport wird durch den Nachtransport von Porenwasser aus der Säulenmitte im oberen Bereich weiter gespeist. Da die Calciumionenkonzentration in der Porenlösung mit fortschreitender Hydratation abnimmt, weist das Porenwasser aus dem oberen Bereich im Vergleich zu den älteren unteren Chargen eine deutlich höhere Calciumkonzentration auf. Bei einer langen Betonierpause wird die calciumionenreichere Porenlösung schließlich aus der oberen Lage nach unten nachtransportiert. Der Anteil des in der Porenlösung gelösten Calciumhydroxids steigt somit im Schalungsbereich der unteren Lage. Je mehr Calciumhydroxid in der Porenlösung vorhanden ist, desto größer ist das Potential des Betons zu fleckigen Dunkelverfärbungen.

4 Schlussfolgerungen

Generell sind Art und Fließmittelmenge auf betontechnologische Parameter, wie z. B. die Reaktivität des Zements, den Wasserzementwert, die Frischbetontemperatur und die Dauer bis zum Einbau des Betons, abzustimmen. Die vielfältig variierbare Struktur von PCE ermöglicht sowohl die Entwicklung robuster Fließmittel als auch die gezielte Abstimmung eines PCE auf den jeweiligen Anwendungsfall, so dass eine optimale Verflüssigung und Verflüssigungsdauer ohne Sedimentation erreicht werden können. Eine Überdosierung des Fließmittels bezogen auf die Sättigungspunktdosierung führt zu einer ausgeprägten Sedimentation und zu einer deutlichen Verzögerung der Hydratation des Zements bzw. der Festigkeitsentwicklung des Betons. Die Fließmittelzugabemenge muss deshalb immer unterhalb der jeweiligen Sättigungspunktdosierung liegen, um der Entstehung von Verfärbungen in Sichtbetonoberflächen infolge Sedimentation vorbeugen zu können.

Die im Folgenden aufgeführten Maßnahmen sollen, auch bei ungünstigen klimatischen Bedingungen, z. B. bei Winterbetonagen, zur Vermeidung bzw. Verminderung der fleckigen Dunkelverfärbungen an Sichtbetonoberflächen beitragen.

- ★ ★ ★ Verwendung eines Zements mit einem hohen Gehalt an leicht löslichen Alkalien
- ★ ★ Verwendung eines Zements mit einer hohen Mahlfineinheit
- ★ ★ Beheizen der Schalung
- ★ ★ Verlängerung der Schalfristen
- ★ Erhöhung der Frischbetontemperaturen
- ★ Verwendung kleiner w/z-Werte

Die Anzahl der Sterne gibt die Qualität der jeweiligen Maßnahme im Hinblick auf den zu erwartenden Erfolg bei der Vermeidung von fleckigen Dunkelverfärbungen auf Sichtbetonflächen an. Es ist davon auszugehen, dass eine Kombination mehrerer Maßnahmen in der Baupraxis den optischen Erfolg der jeweiligen Einzelmaßnahmen übertrifft.

Hinsichtlich der Vermeidung von fleckigen Dunkelverfärbungen im unteren Bereich hoher Bauteile sollten lange Unterbrechungen zwischen dem Einbau von verschiedenen Frischbetonchargen oder lang andauernde, mehrlagige Betonagen vermieden werden. Ist dies aus baubetrieblichen Gründen nicht möglich, so sollten die zuvor beschriebenen betontechnologischen Maßnahmen Berücksichtigung finden.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben Nr. 15876 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.