

IGF-Vorhaben Nr.: 18228 N
Bewilligungszeitraum: 01.07.2014 bis 31.12.2016
Forschungsthema: Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit hüttensand- und flugaschereichen Zementen

1 Einleitung

Das Forschungsvorhaben baut auf den Erkenntnissen des IGF-Vorhabens **16148 N** auf. Dort wurden Möglichkeiten und Grenzen der Leistungsfähigkeit von Zementen sowohl mit genormten wie auch mit nicht genormten Zusammensetzungen aus Portlandzementklinker, Hüttensand und Steinkohlenflugasche ermittelt. Basierend auf der Analyse der die Zementleistungsfähigkeit beeinflussenden Parameter wurden die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen statistisch ausgewertet. Über weite Bereiche der untersuchten Zusammensetzungen war es möglich, Zemente mit einer Normdruckfestigkeit entsprechend der Festigkeitsklasse 42,5 MPa herzustellen. Hinsichtlich der Frühfestigkeitsentwicklung und der weiteren Anforderungen der DIN EN 197-1 konnten marktfähige Zemente herstellgestellt werden.

Hieran anschließend haben die VDZ gGmbH und das FEhS-Institut für Baustoff-Forschung e.V. nunmehr die dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften untersucht.

2 Ziel der Untersuchungen

Wesentliches Ziel des IGF-Forschungsvorhabens **18228 N** war es, eine möglichst breit abgesicherte Datenbasis dauerhaftigkeitsrelevanter Eigenschaften von Betonen in Laborprüfungen unter Verwendung von hüttensand- und flugaschereichen Zementen zu schaffen. Die Zusammensetzung der untersuchten Zemente reichte von den bisher bekannten CEM II-Zementen bis hin zu noch nicht genormten CEM II/C bzw. CEM VI-Zementen. Für die Planung des Versuchsprogramms wurde auf Erkenntnisse des o. g. IGF-Vorhabens 16148 N zurückgegriffen. Mittels statistischer Methoden wurde ein Versuchsplan von 40 Zementen bei 5 verschiedenen Zementzusammensetzungen erarbeitet.

3 Erzielte Ergebnisse

Es besteht kein genereller Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit eines Betons und allen Dauerhaftigkeitseigenschaften. Erfahrungsgemäß ist aber ein gewisses Festigkeitsniveau notwendig, um ein entsprechendes Dauerhaftigkeitspotential zu erreichen. Im IGF-Vorhaben 16148 N hatte sich gezeigt, dass der betontechnologische Zusammenhang zwischen Zementfestigkeit, w/z-Wert und Betonfestigkeit, bekannt als Walzkurve, auch für Betone mit hüttensand- und flugaschereichen Zementen in weiten Teilen Gültigkeit hat. Daher wurden die Zemente, mit denen Dauerhaftigkeitsprüfungen erfolgen sollten, auf Basis ihrer Mörteldruckfestigkeiten ausgewählt. Die Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet, so dass für jeden Ergebnisparameter (z. B. Mörteldruckfestigkeit) ein mathematischer Zusammenhang (Modell) entstand, der nur noch die signifikanten Einflussparameter (z. B. C₃S-Gehalt des Klinkers) enthielt. Die Modelle wurden mit Versuchen überprüft. Als Ergebnis zeigte sich, dass mit Hilfe der erstellten Modelle die Festigkeiten auf Basis der Zementzusammenset-

zung und der Reaktivität der Ausgangsstoffe mit sehr guter Näherung vorhergesagt werden können.

Basierend auf den Ergebnissen der Parameterstudie wurden 5 Zementzusammensetzungen ausgewählt. Die Entwicklungen beim Fortschreiben der DIN EN 197-1 (Einführung von CEM II/C- und CEM VI-Zement) wurde durch 3 Zementzusammensetzungen berücksichtigt. Ferner wurden zwei weitere, darüberhinausgehende Zusammensetzungen ausgewählt, um das Potential dieser hüttensand- und flugaschereichen Zemente abzuschätzen. Die Versuchszemente wurden wie folgt zusammengesetzt:

- a: Klinker 30 M.-%, Hüttensand 40 M.-%, Flugasche 30 M.-%
- b: Klinker 30 M.-%, Hüttensand 64 M.-%, Flugasche 6 M.-%
- c: Klinker 35 M.-%, Hüttensand 45 M.-%, Flugasche 20 M.-%
- d: Klinker 50 M.-%, Hüttensand 30 M.-%, Flugasche 20 M.-%
- e: Klinker 45 M.-%, Hüttensand 43 M.-%, Flugasche 12 M.-%**

Die optimale Zusammensetzung hinsichtlich der in den Laborprüfungen zu erwartenden Dauerhaftigkeit des Betons repräsentierte der **Versuchszement e**.

Die Prüfungen des Carbonatisierungsverhaltens der Feinbetone (vgl. **Bild 1**) zeigten einen deutlichen Einfluss der Dauer der Vorlagerung. An den Feinbetonen unter Verwendung des Zements e mit 45 M.-% Klinker, 43 M.-% Hüttensand und 12 M.-% Flugasche wurden in Abhängigkeit vom Prüfalter Carbonatisierungstiefen im Bereich der Referenzfeinbetone mit CEM III/A ermittelt. Alle anderen Feinbetone wiesen im Vergleich höhere Carbonatisierungstiefen auf.

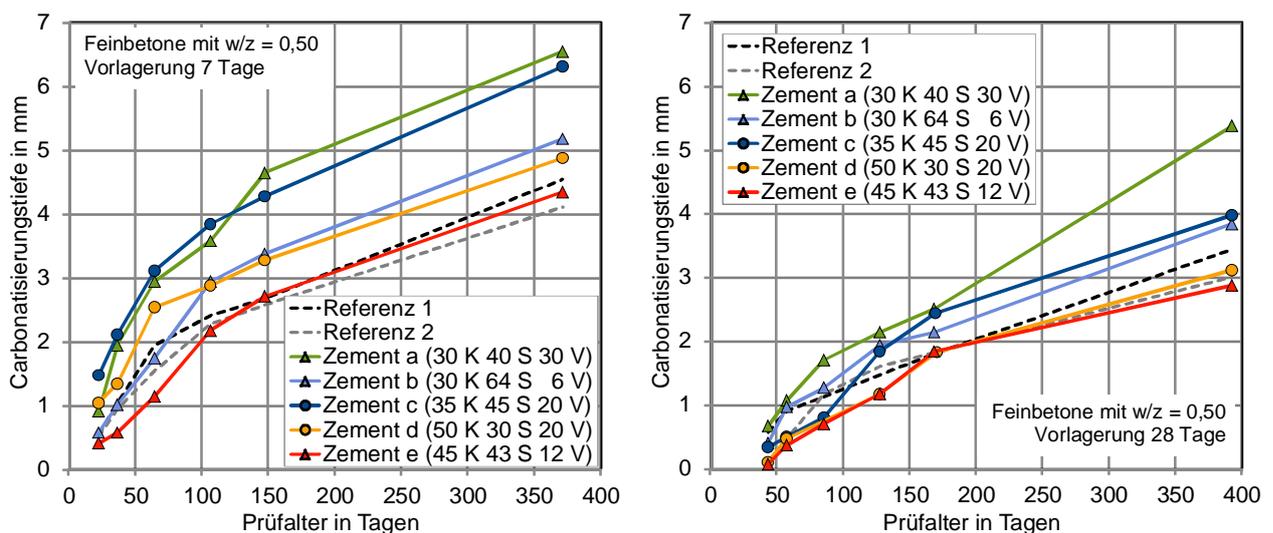


Bild 1 Carbonatisierungstiefe an Feinbetonprismen unter Verwendung der Versuchszemente und der Referenzzemente CEM III/A 42,5 N in Abhängigkeit vom Prüfalter, w/z = 0,50, Vorlagerung 7 Tage bzw. 28 Tage

Das in den Zulassungsverfahren des DIBt herangezogene Beurteilungskriterium für den Chloridmigrationskoeffizienten von $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ im Prüfalter von 35 Tagen wurde von allen

Betonen ebenso mit Abstand eingehalten wie das Beurteilungskriterium für den Chloridmigrationskoeffizienten von $10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ für die Expositionsklassen XS1/XD1 bzw. XS2/XD2 nach BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ (vgl. **Bild 2**). Die Werte lagen zum Teil im Bereich des Beurteilungskriteriums für den Chloridmigrationskoeffizienten von $5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ für die Expositionsklassen XS3/XD3 nach BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“

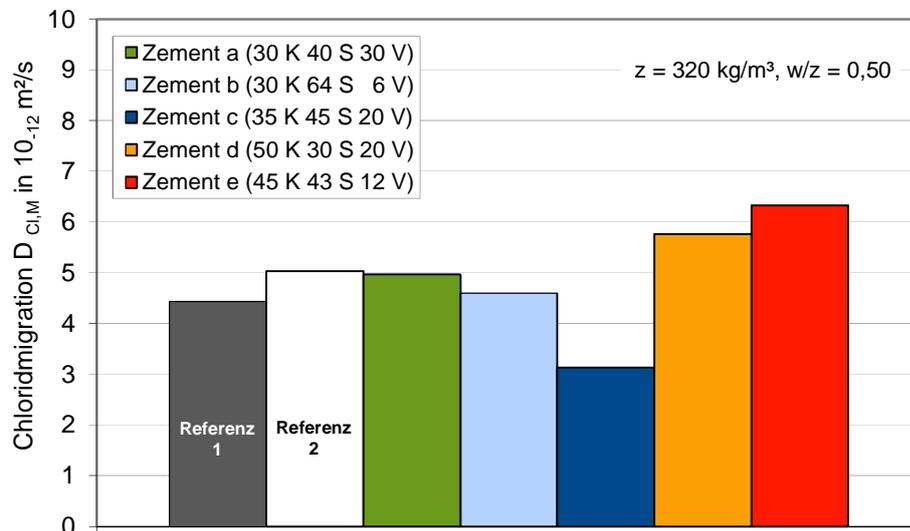


Bild 2 Chloridmigrationskoeffizienten der Betone unter Verwendung der Versuchszemente und der Referenzzemente CEM III/A 42,5 N im Schnelltest, Betone mit $z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$, Prüfalter 35 Tage

Die Betone unter Verwendung der hüttensand- und flugaschereichen Versuchszemente a, b, c, d und e erreichten im Würfelverfahren nach 100 Frost-Tau-Wechseln Abwitterungen $< 10 \text{ M.-%}$, was z. B. in Zulassungsversuchen ein Bestehen der Prüfung bedeuten würde. (**Bild 3**)

Im CIF-Test wurde die innere Gefügeschädigung anhand des relativen dynamischen E-Moduls (RDM) der Betone untersucht. Nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde das Bewertungskriterium (RDM nach 28 FTW $> 75\%$) an vier von elf Betonen eingehalten. Die Zemente, mit denen das Bewertungskriterium eingehalten wurde, hatten die Zusammensetzungen a, b und e. Die granulometrische Veränderung des Hauptbestandteils Hüttensand bzw. Flugasche zeigte in diesen Versuchen am Zement a keine Effekte. (**Bild 4**)

Der Frost-Tausalz-Widerstand der Betone wurde im CDF-Test untersucht. Das Beurteilungskriterium von $1,5 \text{ kg/m}^2$ Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde von zwei der zehn untersuchten Betone eingehalten. Unter Verwendung der Zemente mit Zusammensetzung d (50 M.-% Klinker) und Zusammensetzung e (45 M.-% Klinker) wurde der Test bestanden. Die Betone unter Verwendung der Zemente a, b und c (30 bzw. 35 M.-% Klinker) haben den Test nicht bestanden. Der Frost-Tausalz-Widerstand im CDF-Test konnte mittels granulometrischer Veränderung des Hauptbestandteils Hüttensand bzw. Flugasche im Zement a nicht verbessert werden. (**Bild 5**)

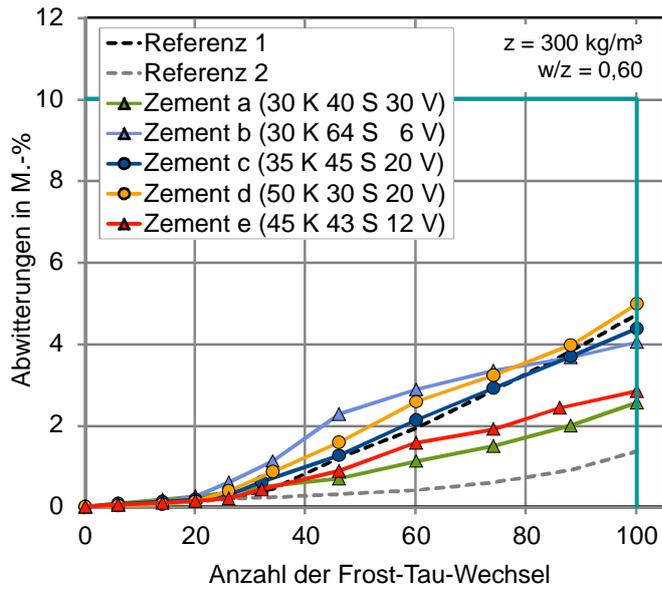


Bild 3

Abwitterungen der Betone unter Verwendung der Versuchszemente und der Referenzzemente CEM III/A 42,5 N im Würfelverfahren in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel,

Betone mit
z = 300 kg/m³, w/z = 0,60

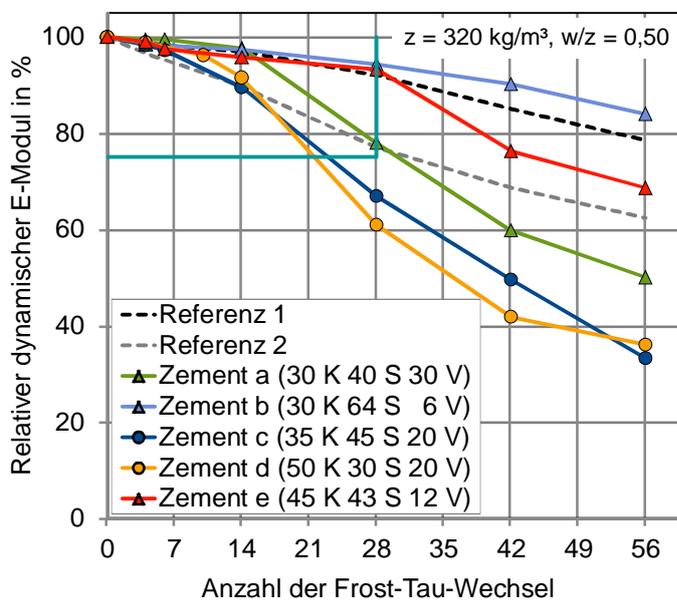


Bild 4

Relativer dynamischer E-Modul der Betone unter Verwendung der Versuchszemente und der Referenzzemente CEM III/A 42,5 N im CIF-Verfahren in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel,

Betone mit
z = 320 kg/m³, w/z = 0,50

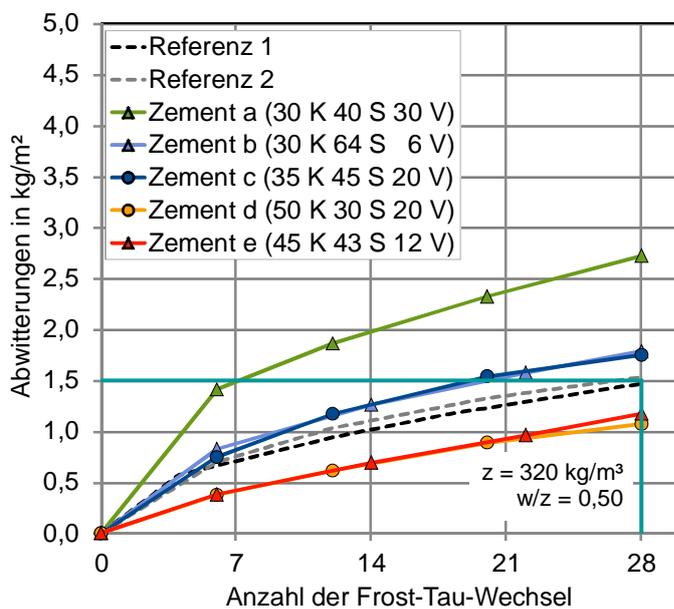


Bild 5

Abwitterungen der Luftporenbetone unter Verwendung der Versuchszemente und der Referenzzemente CEM III/A 42,5 N im CDF-Verfahren in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel,

Betone mit
z = 320 kg/m³, w/z = 0,50
Luftgehalt ≥ 4,5 Vol.-%

Die aus den Versuchszementen hergestellten Mörtel wiesen in den Untersuchungen des Sulfatwiderstands nach dem SVA-Verfahren geringe Dehnungen auf. Das DIBt-Abnahmekriterium von 0,5 mm/m nach 91 Tagen wurde mit Abstand eingehalten.

An den Zementen a unter Verwendung der Flugaschen SFA 1 und SFA3 wurden Gehalt und Art des Sulfatträgers basierend auf einem statistischen Versuchsplan variiert. Die Zielgrößen orientierten sich am Erstarrungsbeginn der Zemente. Der Einfluss auf den Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand der Betone in den Laborversuchen war gering.

Zur zielsicheren Verwendung der Zemente für dauerhafte Betone gehört auch die Robustheit gegenüber herstell- oder materialbedingten Schwankungen. Beispielhaft wurde das für Beton mit Versuchszement e (CEM II/C-Zement mit 45 M.-% Klinker, 43 M.-% Hüttensand und 12 M.-% Flugasche) in Bezug auf den Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand überprüft. Es wurden statische Versuchspläne entworfen, um den Einfluss des Wassergehaltes, des Zementgehaltes, der Feinheit der Gesteinskörnung und des Luftporengehaltes der Betone zu erfassen. Hierbei wurden zum Beispiel höhere Ausbreitmaße mit steigendem Wassergehalt bzw. höhere Festigkeiten mit steigendem Zementgehalt ermittelt.

Bei der Prüfung dieser Betone mit dem Würfelverfahren führten die herstell- oder materialbedingten Einflüsse in keinem Fall zu Abwitterungen von mehr als 6 M.-%. Die Abwitterungen waren somit deutlich geringer als die im Rahmen von Zementzulassungsversuchen vom DIBt akzeptierten 10 M.-%. Der Beton mit Versuchszement e wies einen hohen Frostwiderstand auf, der auch gegenüber material- oder produktionsbedingten Schwankungen unempfindlich war.

Bei der Prüfung der Betone im CDF-Test führten die herstell- oder materialbedingten Einflüsse zu deutlichen Oberflächenabwitterungen. In den Versuchen an Luftporenbetonen mit veränderter Betonzusammensetzung wurden nach 28 Frost-Tau-Wechseln Abwitterungen > 1,5 kg/m² ermittelt. Das von der BAW definierte Abnahmekriterium wurde nicht eingehalten. Die im CDF-Test ermittelten Werte unterlagen erheblichen Schwankungen.

In Ergänzung der Laborversuche wurde ein halbindustrieller Versuch durchgeführt. Hierzu wurden die bei einem Zementhersteller an den verschiedenen Standorten zum Einsatz kommenden Ausgangsstoffe verwendet. Sie wurden bis auf die SFA in den großtechnischen Mahlanlagen aufbereitet und anschließend im Labor entsprechend der definierten Zusammensetzung e mit 45 M.-% Klinker, 43 M.-% Hüttensand und 12 M.-% Flugasche gemischt. Im Vergleich zum CEM III/A 42,5 N-Referenz-Zement war die Festigkeitsentwicklung langsamer. Die Festigkeitssteigerung zwischen 2 und 7 Tagen fiel im Vergleich zum CEM III/A 42,5 N-Referenz-Zement gering aus. Im CDF-Test wies der Beton die für langsamer erhärtende Zemente typische Anfangsabwitterung auf. Diese dürfte auf die mit dem Prüfverfahren verbundene Vorlagerung zurückzuführen sein. Im weiteren Verlauf des Versuchs war die Abwitterungsrate den Hochofenzementbetonen vergleichbar.

Unter Verwendung des Werkzements E aus dem halbtechnischen Betriebsversuch wurden kleinformatige Betonprobekörper hergestellt und unter praxisnahen Bedingungen ausgela-

gert. Diese Auslagerungsversuche werden zeigen, wie sich die Betone in der Praxis unter den Bedingungen der Expositionsklassen XC3, XF1 und XF3 über einen langen Prüfzeitraum verhalten.

Auf Basis des Hydratationsgrades von Zementstein sowie der Porosität von Normmörteln wurden Kennwertberechnungen angewendet, die aufgrund früherer Erfahrungen geeignet erscheinen, eine Vorhersage der Ergebnisse des Würfelverfahrens und des CDF-Tests zu ermöglichen. Der Frostwiderstand und der Frost-Tausalz-Widerstand der zulassungskonform zusammengesetzten Betone ließen sich anhand der Zementstein- und Mörtel Eigenschaften gut abschätzen.

Ein Vorschlag für Anwendungsregeln von hüttensand- und flugaschereichen Zementen zur Herstellung von Beton nach DIN 1045-2 wurde erarbeitet.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Das IGF-Vorhaben 18228 N der Forschungsvereinigung VDZ gemeinnützige GmbH – 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.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages