

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 16148 N  
Bewilligungszeitraum: 01.07.2009 – 31.12.2011  
Forschungsstelle 1: VDZ gGmbH, Forschungsinstitut der Zementindustrie  
Forschungsstelle 2: FEhS - Institut für Baustoffforschung e.V.

Forschungsthema:

## **Gemeinsame Nutzung von Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Portlandzementklinker zur Herstellung optimierter Zemente und Betone**

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

In Deutschland lag 2011 der Marktanteil des Portlandzements im Vergleich zum europäischen Ausland mit 35 % noch vergleichsweise hoch. Zwar wird zunehmend die Herstellung von z. B. hüttensandhaltigen Zementen forciert, aber der Hüttensand, ein Nebenprodukt der Roheisenerzeugung im Hochofen, findet bereits fast ausschließlich seine Verwendung in CEM II-S-, CEM II-M (S-LL)- und CEM III-Zementen. Steinkohlenflugasche, ein Verbrennungsrückstand der Kohleverstromung, findet, sofern technisch geeignet, überwiegend Verwendung als Betonzusatzstoff und in nur untergeordnetem Umfang als Zementbestandteil. CEM IV- und CEM V-Zemente werden in Deutschland bisher so gut wie nicht hergestellt.

Verschiedene Gründe geben Anlass, sich intensiv mit der Herstellung und den Eigenschaften von Zementen zu beschäftigen, die sowohl Hüttensand als auch Steinkohlenflugasche und Portlandzementklinker enthalten. So ist es seit einigen Jahren Ziel der Zementindustrie, verstärkt Portlandzement durch Zemente mit weiteren Bestandteilen wie z. B. Hüttensand und/oder Kalkstein zu substituieren. Dies bietet, neben der Verwendung von Sekundärbrennstoffen, eine Möglichkeit, den mit der Zementerzeugung verbundenen vergleichsweise hohen spezifischen Rohstoff- und Primärenergiebedarf sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu begrenzen.

Hüttensand ist auf Grund seiner latent-hydraulischen Eigenschaften ein leistungsfähiger Zementhauptbestandteil. Er kann gemäß DIN EN 197-1 bis zu 95 M.-% als Zementhauptbestandteil eingesetzt werden und wird seit mehr als 100 Jahren für die Zementherstellung genutzt.

Steinkohlenflugasche weist puzzolanische Eigenschaften auf und ist daher nicht nur als Betonzusatzstoff, sondern auch als Zementbestandteil geeignet. Allerdings erfolgt die puzzolanische Reaktion relativ langsam. Flugaschehaltige Zemente werden in Deutschland bisher nur in sehr geringem Umfang produziert, obwohl Steinkohlenflugaschen für die Zementindustrie noch ein erhebliches Substitutionspotential besitzen.

Bezüglich der Kombinationen aus Klinker, Hüttensand und Flugasche liegt eine besondere Herausforderung in der Tatsache begründet, dass in Deutschland intensive Erfahrungen mit hüttensandhaltigen Zementen und auch begrenzt Erfahrungen mit flugaschehaltigen Zementen, jedoch keine mit den flugaschereichen CEM IV- oder den Kombinationen in CEM V-Zementen vorliegen. Auch aus dem Ausland gibt es nur wenig Erfahrungsberichte. Wenn man aus ökologischen und ökonomischen Erwägungen heraus Flugasche verstärkt als Ze-

mentbestandteil nutzen möchte, ist es daher zwingend erforderlich, sehr umfassende technische Fragestellungen zu bearbeiten. In diesem Forschungsprojekt wurden daher die bekannten binären Systeme Hüttensand-Klinker und Flugasche-Klinker auf das ternäre System Hüttensand-Flugasche-Klinker erweitert. Neben den in diesem System ablaufenden Hydratationsreaktionen und der technischen Leistungsfähigkeit der Zemente wurden auch die Wechselwirkungen im System Flugasche-Hüttensand untersucht. Die Zusammensetzung der untersuchten Zemente entsprach zum Teil der Zementnorm DIN EN 197-1, ging aber auch darüber hinaus.

## **2            Forschungsziel und Lösungsweg**

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Möglichkeiten und Grenzen von Zementen sowohl mit genormten wie auch mit nicht genormten Kombinationen aus Klinker, Hüttensand und Flugasche aufzuzeigen. Der Bereich der hierfür untersuchten Kombinationen reichte von den CEM II-Zementen über die CEM IV- und CEM V-Zemente hin zu bisher nicht genormten Zementen. Um dieses weite Feld möglicher Zusammensetzungen sowie die Vielzahl stofflicher Einflussparameter systematisch und effektiv zu bearbeiten, wurde nach der Auswahl und Charakterisierung der Ausgangsstoffe (Arbeitspaket 1) mittels statistischer Methoden ein Versuchsplan erarbeitet (Arbeitspaket 2). Dieser wurde im Laufe des Projekts von beiden Forschungsstellen gleichermaßen bearbeitet.

Diese Art der Arbeitsaufteilung war nur möglich, weil die Ergebnisse, die von beiden Forschungsstellen ermittelt wurden, vergleichbar waren. Um diese Voraussetzung zu überprüfen, wurden vorab verschiedene handelsübliche Zemente an beiden Instituten analysiert. Ferner wurden auch während der Bearbeitung des statistischen Versuchsplans ausgewählte Versuche an beiden Forschungsstellen parallel durchgeführt. Dadurch wurde der Einfluss der jeweiligen Prüfeinrichtung auf das aus den Ergebnissen der statistischen Versuchsplanung berechnete mathematische Modell minimiert.

Bevor in Arbeitspaket 3 vertiefende zement- und mörteltechnische Untersuchungen erfolgten, wurde das mithilfe der statistischen Versuchsauswertung erstellte mathematische Modell praktisch überprüft. Hierfür wurden 7 Zemente analysiert, deren stoffliche Parameter und deren Zusammensetzung im Rahmen der vorab definierten Versuchsgrenzen frei gewählt wurden. Danach wurden in Arbeitspaket 4 begleitende Untersuchungen zu den Reaktionsabläufen durchgeführt.

Abschließend wurden im Arbeitspaket 5 mit einigen ausgewählten Zementen Betone hergestellt und deren Festigkeitsentwicklung sowie Dauerhaftigkeit exemplarisch untersucht. Umfangreiche betontechnische Untersuchungen standen jedoch nicht im Fokus des Forschungsvorhabens.

Anhand der Forschungsergebnisse erfolgten ökologische Betrachtungen und die Ausarbeitung von Handlungsempfehlungen.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Verwendete Ausgangsstoffe

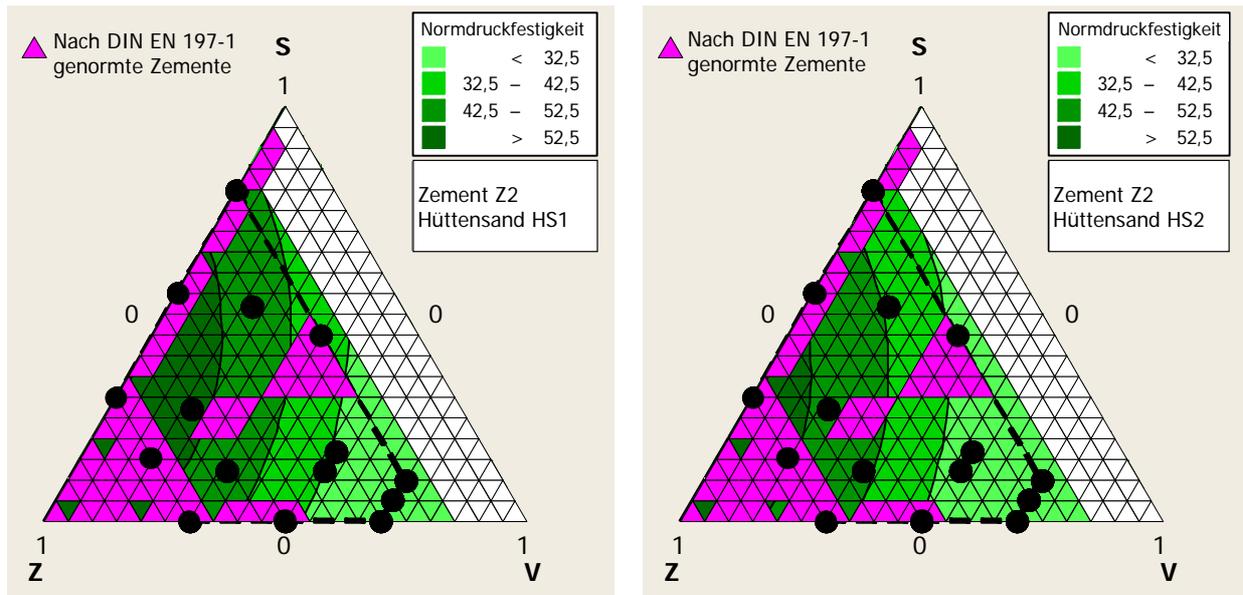
Für die Herstellung der hüttensand- und flugaschehaltigen Zemente wurden zwei verschiedene Portlandzemente CEM I der Festigkeitsklasse 42,5 R eingesetzt, die die Anforderungen an Prüfzemente nach DIN EN 450-1 erfüllten. Weiterhin wurden zwei Hüttensande, von denen aus Erfahrung bekannt ist, dass sie eine unterschiedliche Reaktivität aufweisen, für das Forschungsvorhabens ausgewählt. Die beiden Hüttensande deckten die Spannweite der in Deutschland erhältlichen Hüttensandqualitäten ab. In dem Forschungsvorhaben kamen beide Hüttensande in zwei verschiedenen Feinheiten (4200 cm<sup>2</sup>/g und 5500 cm<sup>2</sup>/g nach Blaine) zum Einsatz. Es wurden darüber hinaus zwei Steinkohlenflugaschen aus deutschen Kohlekraftwerken genutzt, die sich hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung deutlich voneinander unterschieden.

#### 3.2 Parameterstudie

Basierend auf der Analyse der die Zementleistungsfähigkeit beeinflussenden Parameter wurde mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung eine Versuchsmatrix mit 108 Zementen bei 15 verschiedenen Zusammensetzungen (Punkte in **Bild 1**) erstellt, an denen neben der Normdruckfestigkeit auch die isotherme Hydratationswärme nach 2 und 7 Tagen ermittelt wurde. Die Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet, so dass für jeden Ergebnisparameter ein Modell mit möglichst hoher Regression entstand, das nur noch signifikante Einflussparameter enthielt.

Die Ergebnisse der Regression der 28-Tage-Druckfestigkeit zeigen, dass neben der Klinker- und der Hüttensandsorte auch die Wechselwirkungen der Gehalte der verschiedenen Zementbestandteile als signifikant eingestuft werden können. Weiterhin waren die Wechselwirkungen zwischen den Gehalten der Zementbestandteile und der Klinker- bzw. der Hüttensandsorte signifikant für das Modell.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der Bestimmung der Normdruckfestigkeit in **Bild 1** dargestellt. Zur besseren Einordnung der Zementzusammensetzung sind die nach DIN EN 197-1 genormten Zementzusammensetzungen pink hervorgehoben.



**Bild 1** Erzielbare 28-Tage-Druckfestigkeiten in Zementen mit Klinkerkomponente Z2 und Hüttensand HS1 (links) bzw. HS2 (rechts), die pinkfarbenen Bereiche kennzeichnen die Zementzusammensetzungen nach DIN EN 197-1

Für Zemente mit einem Klinkergehalt zwischen 40 und 65 M.-% war unabhängig von den verwendeten Hauptbestandteilen Portlandzementklinker und Hüttensand ein Steinkohlenflugaschegehalt von maximal 30 M.-% möglich, um eine 28-Tage-Druckfestigkeit von mehr als 42,5 MPa zu gewährleisten. Dabei hatte die Qualität des Hüttensandes einen deutlichen Einfluss auf die im Alter von 28 Tagen bestimmte Festigkeit. So ermöglichte der Einsatz eines besonders reaktiven Hüttensands (linkes Diagramm in **Bild 1**) die Verwendung von bis zu 40 M.-% Steinkohlenflugasche, ohne die Normdruckfestigkeit zu beeinträchtigen.

Bei geringeren Portlandzementklinkergehalten kommt der Reaktivität der Hauptbestandteile eine wachsende Bedeutung zu. Bei ungünstigen Kombinationen (geringere Klinker- und Hüttensandreaktivität) war es bei den im Rahmen der Forschungsarbeit vorliegenden Untersuchungen nicht in jedem Fall möglich, eine Normdruckfestigkeit von mindestens 42,5 MPa zu erreichen. Dies geht ebenso aus **Bild 1** hervor.

Generell ist zu berücksichtigen, dass die untersuchten Zemente durch Mischen von Portlandzement, Hüttensandmehl und Steinkohlenflugasche hergestellt wurden. Eine auf die einzelnen Ausgangsstoffe abgestimmte Festigkeitsoptimierung durch eine Anpassung der Mahlfineinheiten oder durch eine Sulfatträgeroptimierung fand nicht statt. Es ist daher davon auszugehen, dass unter praxisnahen Bedingungen auch Zemente mit weniger als 40 M.-% Portlandzementklinker, mit einer Mörteldruckfestigkeit von mehr als 42,5 MPa nach 28 Tagen hergestellt werden können. Besonders der individuellen Abstimmung der einzelnen Komponenten aufeinander kommt hierbei, wie durch die Versuche gezeigt werden konnte, eine große Bedeutung zu.

Als signifikante Parameter für die Menge der nach 2 Tagen freigesetzten Hydrationswärme konnte die Feinheit des Hüttensands und der Flugasche herausgearbeitet werden. Daneben konnten eine Reihe von Wechselwirkungen als signifikant für das Modell erkannt werden. Bezüglich der nach 7 Tagen freigesetzten Hydrationswärme konnten sowohl die Hütten-

sandsorte als auch dessen Feinheit als signifikante Parameter ausgemacht werden. Daneben sind einige Wechselwirkungen, die diese Faktoren enthalten, signifikant.

Um die Ergebnisse der Modellierung zu überprüfen, wurden 7 zusätzliche Zemente, die nicht Bestandteil der statistischen Versuchsmatrix waren, ausgewählt und hinsichtlich ihrer Zementleistungsfähigkeit untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass mit Hilfe des erstellten Modells mit sehr guter Näherung Festigkeiten auf Basis der Zementzusammensetzung und der Reaktivität der Ausgangsstoffe vorhergesagt werden können. Ebenso konnte die Hydratationswärmeentwicklung der untersuchten Zemente durch das errechnete Modell in guter Näherung vorhergesagt werden.

### **3.3 Vertiefende Untersuchungen**

23 von den 108 hergestellten Zementen wurden tiefergehend untersucht. Die Mörteldruckfestigkeiten dieser Zemente im Alter von 28 Tagen entsprachen in guter Näherung denen, die mit Hilfe des auf Basis der statistischen Versuchsplanung ermittelten Modells berechnet wurden.

Die Frühfestigkeiten der Zemente, bestimmt am Normmörtel im Alter von 2 bzw. 7 Tagen lagen jeweils in einem weiten Bereich zwischen 5 und 25 MPa bzw. 18 und 39 MPa. Somit erfüllten alle untersuchten Zemente die Frühfestigkeitsanforderung an die Festigkeitsklasse 32,5 N. Die Frühfestigkeit nach 2 Tagen lag bei dem überwiegenden Teil der untersuchten Zemente über 10 MPa, so dass auch die Anforderungen der Festigkeitsklassen 32,5 R bzw. 42,5 N eingehalten wurden.

Die im Rahmen der vertieften Bindemittelanalyse erzielten Ergebnisse zur Hydratationswärmeentwicklung bestätigten das mittels statistischer Versuchsauswertung aufgestellte Modell in guter Näherung.

Alle untersuchten Zemente erfüllten die Anforderungen der DIN EN 197-1 hinsichtlich Erstarrungsbeginn und Raumbeständigkeit. Die Erstarrungszeiten nahmen mit sinkendem Klinkergehalt zu. Dagegen verbesserte sich die Verarbeitbarkeit, ausgedrückt als Ausbreitmaß des Normmörtels, mit abnehmenden Klinkergehalt. Der Wasseranspruch der Zemente lag mit Werten zwischen 26,0 und 29,5 % im marktüblichen Bereich.

Die Dehnungen von Mörtelprismen, hergestellt mit 8 Zementen mit geringem Klinkeranteil, lagen unterhalb des Grenzwerts für das SVA-Verfahren von 0,500 mm/m. Somit wiesen diese Zemente einen hohen Sulfatwiderstand auf.

### **3.4 Begleitende Untersuchungen zu den Reaktionsabläufen**

Von 4 verschiedenen Zementen wurden die Hydratationsprodukte eingehend untersucht, um Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten herausarbeiten zu können. Die Zusammensetzung der Zemente ist in **Tabelle 1** angegeben.

**Tabelle 1** Zusammensetzung der Zemente zur eingehenden Untersuchung der Hydratationsprodukte in M.-% (Z = Zement; HS = Hüttensand; Flugasche = Steinkohlenflugasche)

Laufende Nummer im statistischen Versuchsplan	Z1	Z2	HS 1	HS 2	FA 1	FA 3
5	-	56	27	-	17	-
56	56	-	-	27	17	-
98	-	31	-	52	17	-
99	31	-	52	-	-	17

Die Verteilung der Carboaluminat in den Zementsteinen unterschied sich deutlich voneinander. Tendenziell wiesen die Zementsteine mit höheren Klinkergehalten größere Mengen an Carboaluminaten auf, wobei zum Teil verschiedene Spezies stabilisiert wurden. Durch die Messung des Calciumhydroxidgehalts in hydratisierten Proben konnte gezeigt werden, dass sich die Anwesenheit von Hüttensand und Steinkohlenflugasche positiv auf die Reaktion des Alits auswirkte. Die Klinkerkomponente beeinflusste umgekehrt durch ihre chemische Zusammensetzung die Auflösung und Reaktion der beiden anderen Hauptbestandteile.

Sowohl die drei Ausgangsstoffe als auch binäre und ternäre Mischungen wurden hydratisiert und anschließend thermoanalytisch und röntgendiffraktometrisch untersucht. Bei der Hydratation von Zementen bestehend aus einer Klinkerkomponenten und Steinkohlenflugasche wurden je nach Steinkohlenflugascheanteil die Carboaluminat in unterschiedlichem Maße gebildet. Bei der Hydratation von Zementen mit Hüttensand als Hauptbestandteil neben Klinker konnte gezeigt werden, dass die feinere Aufmahlung des Hüttensands nicht zu einer stärkeren Umsetzung des Klinkers führte. In Gemischen bestehend aus etwa 50 M.-% Hüttensand und 50 M.-% Steinkohlenflugasche schien ein Optimum hinsichtlich der Bildung von CSH-Phasen und Ettringit vorzuliegen. Dies spiegelte sich aber nicht in der Festigkeits- und Hydratationswärmeentwicklung der Mischungen bei der Hydratation in alkalischer Prüflösung wider.

### 3.5 Betontechnische Untersuchungen

Basierend auf den Ergebnissen der bindemitteltechnischen Untersuchungen wurden 8 Zemente ausgewählt, mit denen orientierende Betonversuche durchgeführt wurden. **Tabelle 2** zeigt die Zusammensetzung dieser Zemente.

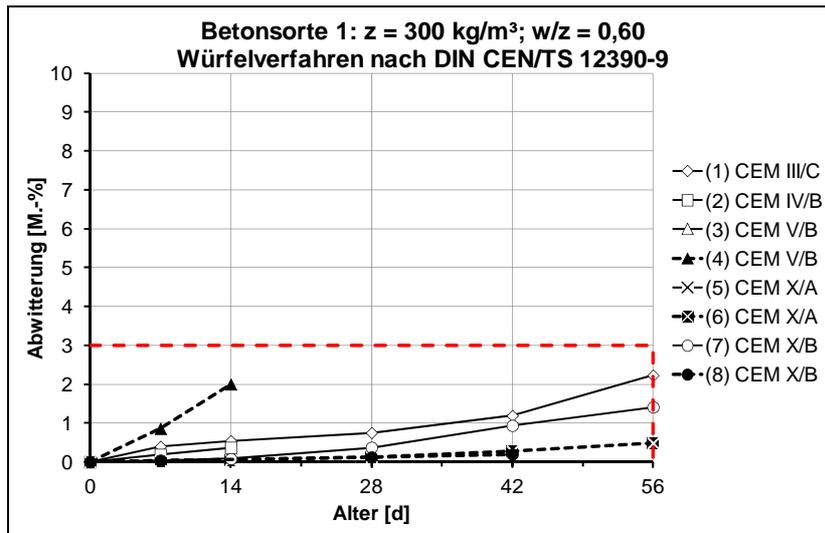
**Tabelle 2** Zusammensetzung der Zemente für die Betonversuche in M.-%  
(Z = Zement; HS = Hüttensand; Flugasche = Steinkohlenflugasche)

Laufende Nummer	Zementart	Z1	HS1	FA1
1	CEM III/C	20	80	-
2	CEM IV/B	60	-	40
3	CEM V/B	30	35	35
4	CEM V/B	30	35	35
5	CEM X/A	56	12	32
6	CEM X/A	56	36	12
7	CEM X/B	31	52	17
8	CEM X/B	40	45	15

Die Frischbetoneigenschaften der untersuchten Betone lagen im für die beiden Betonsorten üblichen Bereich und entsprachen denen von Betonen mit Zementen nach DIN EN 197-1.

Mit Ausnahme der beiden CEM V/B-Zemente wurden mit allen Zementen bei Betonen der Sorte 1 Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen ermittelt, mit denen sich zielsicher die Festigkeitsklasse C25/30 nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 realisieren lässt. Es war nicht zielsicher möglich, mit der nach DIN 1045-2 für die Expositionsklasse XF4 festgelegten Mindestbetonzusammensetzung die vorgeschriebene Festigkeitsklasse C30/37 nach 28 Tagen zu erreichen. Ebenso fiel auf, dass mit dem CEM V/B-Zement eine signifikant geringere Betonfestigkeit erzielt wurde, als es mit den anderen Zementen möglich war. Die Frühfestigkeiten der Betone mit Zementen mit geringem Klinkeranteil waren erwartungsgemäß geringer als die vergleichbarer Betone mit Portland- bzw. Portlandkompositzementen.

Hinsichtlich des Frostwiderstands lagen die nach dem Würfelverfahren bestimmten Abwitterungen der Betone in einer vergleichbaren Größenordnung, wie die von Betonen mit nach DIN 1045-2 für die Expositionsklasse XF3 zugelassenen Zementen (vgl. **Bild 2**).



**Bild 2** Abwitterungen der Betone der Sorte 1, bestimmt mit dem Würfelverfahren nach DIN CEN/TS 12390-9

Bei der Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands wiesen alle Betone eine mit Werten von über  $1,5 \text{ kg/m}^2$  hohe Abwitterung nach dem CDF-Verfahren auf. Diese war durch eine starke Anfangsabwitterung während der ersten Frost-Tau-Wechsel geprägt, die u. a. auf die für langsamer erhärtende Zemente ungünstigen Vorlagerungsbedingungen der Prüfkörper ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $65 \text{ } \%$  rel. F.) sowie deren Vorlagerungsdauer zurückgeführt werden kann. Im weiteren Verlauf der CDF-Prüfung nahmen die Abwitterungen dann nur noch moderat zu. Sowohl die kapillare Wasseraufnahme als auch die Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel waren für alle untersuchten Betone unauffällig.

### 3.6 Ökologische Betrachtungen und Handlungsempfehlungen

Basierend auf den für die statistische Versuchsplanung gewählten Randbedingungen lassen sich die  $\text{CO}_2$ -Emissionen für die möglichen Kombinationen aus Hüttensand, Portlandzementklinker und Steinkohlenflugasche berechnen. Auf Grund der sehr viel kleineren spezifischen  $\text{CO}_2$ -Beiträge des Hüttensands und der Steinkohlenflugasche nahmen die  $\text{CO}_2$ -Emissionen der Zemente mit sinkendem Portlandzementklinkergehalt unabhängig von den relativen Anteilen der anderen Hauptbestandteile fast linear ab.

Die Modellrechnung ergab, dass sich Zemente mit Normdruckfestigkeiten von über  $42,5 \text{ MPa}$  bzw. von über  $52,5 \text{ MPa}$  mit bis zu rund  $75 \text{ } \%$  bzw. rund  $55 \text{ } \%$  geringeren  $\text{CO}_2$ -Emissionen verglichen mit Portlandzement herstellen lassen. Dabei trug insbesondere die Substitution des Klinkers durch Hüttensand zu gleichbleibenden Zementfestigkeiten bei. Besonders der nicht genormte Bereich zwischen den CEM III- und CEM V-Zementen ist sehr vielversprechend hinsichtlich sowohl der erreichbaren Festigkeiten als auch der möglichen  $\text{CO}_2$ -Einsparung. Bisher erlaubt die Zementnorm DIN EN 197-1 die Herstellung von Zementen dieser Zusammensetzung allerdings nicht. Der Bereich zwischen den CEM IV- und CEM V/A-Zementen ist ebenfalls nicht durch die Vorgaben der Norm abgedeckt. Die Herstellung von Zementen der Festigkeitsklasse 42,5 ist aber auch innerhalb dieser Zusammensetzung möglich.

#### 4 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse

Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Möglichkeiten und Grenzen von Zementen sowohl mit genormten wie auch mit nicht genormten Kombinationen aus Klinker, Hüttsand und Steinkohlenflugasche aufzuzeigen.

Basierend auf der Analyse der die Zementleistungsfähigkeit beeinflussenden Parameter wurde mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung eine Versuchsmatrix mit 108 Zementen bei 15 verschiedenen Zusammensetzungen erstellt. An diesen Zementen wurde neben der Normdruckfestigkeit auch die isotherme Hydratationswärme nach 2 und 7 Tagen ermittelt. Die Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet. Über weite Bereiche des untersuchten Zusammensetzungsbereichs war es möglich, Zemente mit einer Normdruckfestigkeit von über 42,5 MPa herzustellen. Aus den Untersuchungen lässt sich ableiten, dass sich auch hinsichtlich der Frühfestigkeitsentwicklung und der weiteren Anforderungen der DIN EN 197-1 marktfähige Zemente herstellen lassen.

Von 4 verschiedenen Zementen wurden die Hydratationsprodukte eingehend untersucht, um Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Komponenten herausarbeiten zu können.

Basierend auf den Ergebnissen der zementtechnischen Untersuchungen wurden 8 Zemente ausgewählt, mit denen orientierende Betonversuche durchgeführt wurden. Die Frischbetoneigenschaften der untersuchten Betone lagen im für die beiden hergestellten Betonsorten üblichen Bereich. Mit Ausnahme der beiden CEM V/B-Zemente wurden mit allen Zementen bei Betonen der Sorte 1 Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen ermittelt, mit denen sich zielsicher die Festigkeitsklasse C25/30 nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 realisieren lässt. Die Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit führten größtenteils zu zufriedenstellenden Ergebnissen.

Basierend auf den für die statistische Versuchsplanung gewählten Randbedingungen lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die möglichen Kombinationen aus Hüttsand, Portlandzementklinker und Steinkohlenflugasche berechnen. Die Modellrechnung ergab, dass sich Zemente mit Normdruckfestigkeiten von über 42,5 MPa bzw. von über 52,5 MPa mit bis zu 75 % bzw. 55 % geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen verglichen mit Portlandzement herstellen lassen. Besonders der nicht genormte Bereich zwischen den CEM III- und CEM V-Zementen ist sehr vielversprechend hinsichtlich sowohl der erreichbaren Festigkeiten als auch der möglichen CO<sub>2</sub>-Einsparung. Auch im Bereich zwischen den CEM IV- und CEM V/A-Zementen, der ebenfalls nicht durch die Vorgaben der Norm abgedeckt wird, ist die Herstellung von Zementen der Festigkeitsklasse 42,5 möglich.

Bei der großtechnischen Produktion von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen und geringeren Klinkergehalten werden Kenntnisse über den Einfluss der verschiedenen Komponenten immer wichtiger. Das Potential klinkerarmer Zemente hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und der mit ihrer Herstellung verbundenen CO<sub>2</sub>-Einsparung konnte in diesem Forschungsprojekt aufgezeigt werden.

**„Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.“**

## 5 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 16148 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