

Bewilligungszeitraum: 01.01.2014 bis 31.12.2015

## **Forschungsthema**

### **Optimierung von Zementen mit getemperten Tonen als Hauptbestandteil und Dauerhaftigkeit damit hergestellter Betone**

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

Tone werden heute vor allem als Rohstoff in der keramischen Industrie, zur Erzeugung von Lehmziegeln und als Rohmehlkomponente in der Zementindustrie eingesetzt. Die Verwendung gebrannter Tone als Zementhauptbestandteil nach DIN EN 197-1 ist möglich, wenn ihr Gehalt an reaktiver Kieselsäure mindestens 25 M.-% beträgt.

Obwohl in Deutschland geeignete Rohstoffvorkommen vorliegen und die Zementhersteller auf diese Vorkommen teilweise Zugriff haben, werden gebrannte Tone bisher nicht für die Zementherstellung verwendet. Gründe hierfür sind unter anderem der Einsatz anderer Zementhauptbestandteile wie Hüttensand, Kalksteinmehl und Flugasche und auch noch fehlende Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet. So sind außer dem Einfluss der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der Tone auf ihre Eignung als Zementhauptbestandteil Möglichkeiten zur verbesserten thermischen oder mechanischen Aktivierung, zur Abstimmung mit der Klinkerkomponente sowie die Leistungsfähigkeit von solchen Puzzolanzementen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Betonen zu untersuchen.

Aus ökologischen und ökonomischen Gründen sind die Zementhersteller bestrebt, vermehrt Zemente mit geringerem Klinkerfaktor herzustellen. Das kann bei den konventionellen Zementhauptbestandteilen zu Engpässen in der Verfügbarkeit führen, wie z. B. vor einigen Jahren beim Hüttensand. Da Tone in Europa in nutzbaren Mengen und geeigneten Qualitäten verfügbar sind, bietet sich deren Verwendung als natürliches getempertes Puzzolan in Puzzolanzementen an. Die Qualität geeigneter Tonvorkommen liegt zwischen der von Tonen, die in der keramischen Industrie eingesetzt werden können, und der für Zementrohmehle. Daher würde die Nutzung von Tonen als natürlich getempertes Puzzolan nicht mit anderen Verwertungsinteressen kollidieren.

Ausgangspunkt für den hier vorgestellten Anschlussantrag ist das im Sommer 2012 abgeschlossene Forschungsvorhaben „Nutzung von natürlichen getemperten Tonen als Zementhauptbestandteil“ (IGF 16566 N). In diesem Projekt konnte für eine breite Palette mineralogisch unterschiedlicher, getemperter Tone die prinzipielle Verwendbarkeit als puzzolanischer Zementhauptbestandteil nachgewiesen werden. Um eine Umsetzung der Erkenntnisse in die Anwendung zu ermöglichen, sind noch weitere wesentliche Fragestellungen zu beantworten. So ist das Optimierungspotential im Zusammenwirken von gezielt getemperten Tonen mit unterschiedlichen Klinkern und Sulfatträgern zu erarbeiten. Von grundlegender Bedeutung für eine Anwendung von Puzzolanzementen mit getemperten Tonen ist der Nachweis, dass sie im Beton eine vergleichbare Leistungsfähigkeit hinsichtlich verschiedener Dauerhaftigkeitsaspekte erreichen wie andere, heute am Markt etablierte Zementarten.

## 2 Ziel und Umfang der Untersuchungen

Nachdem im abgeschlossenen Forschungsvorhaben „Nutzung von natürlichen getemperten Tonen als Zementhauptbestandteil“ (IGF 16566 N) die prinzipielle Eignung mineralogisch verschiedenartig zusammengesetzter, calcinierter Tonen als Zementhauptbestandteil nach EN 197-1 nachgewiesen werden konnte, sollten in diesem Forschungsprojekt (Anschlussvorhaben) Optimierungspotentiale in der Abstimmung der Zementhauptbestandteile erarbeitet sowie die Leistungsfähigkeit der resultierenden Puzzolanzemente hinsichtlich der Dauerhaftigkeit in Beton untersucht werden.

Aus der Palette der im Vorläuferprojekt untersuchten Tone wurden typische Proben unterschiedlicher Tonvarietäten ausgewählt, wobei Mischtone von geringer keramischer Qualität bevorzugt wurden. Zusätzlich wurden Proben aus Tonvorkommen hinzugezogen, die bereits heute als Rohmehlkomponente in der Zementproduktion eingesetzt werden. In Kombination mit Portlandzementen unterschiedlicher Klinkercharakteristik wurden optimierte Brenn-, Mahl- und Mischbedingungen herausgearbeitet, die eine hohe Leistungsfähigkeit der Zemente auch in Hinblick auf dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften ergeben.

Das Forschungsprojekt gliederte sich in zwei wesentliche, zeitlich aufeinanderfolgende Arbeitspakete. Zum ersten Arbeitspaket gehörte die Auswahl und Neubeschaffung verschiedener Tone aus dem abgeschlossenen Forschungsprojekt sowie von Tonen, die bereits von Zementherstellern im Rahmen ihrer Rohmehl Abstimmung verwendet werden. Parallel erfolgte eine Auswahl von vier Portlandzementen, die sich im Aluminatphasengehalt und im Natriumäquivalent unterschieden. Durch systematisch ausgewählte Brennbedingungen wurde die Charakteristik der calcinierten Tone hinsichtlich ihrer reaktiven Bestandteile, insbesondere das Verhältnis von reaktivem Silicium zu Aluminium, gezielt beeinflusst. Aus den o. g. CEM I und den calcinierten Tonen wurden Portlandpuzzolan- und Puzzolanzemente hergestellt und durch Bindemitteluntersuchungen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit beschrieben. Die Kombinationen erfolgten u. a. im Hinblick auf sich ergänzende reaktive Aluminium- und Siliziumgehalte aus den calcinierten Tonen und der Portlandzement-Komponente.

Zudem sollte in Tastversuchen untersucht werden, ob durch eine gezielte Abstimmung des Sulfatträgers auf die Reaktionskinetik der mit calcinierten Tonen hergestellten Zemente ein weiteres Optimierungspotential gegeben ist.

Das zweite Arbeitspaket umfasste die Auswahl von geeigneten Kombinationen aus Zement und calcinierten Tonen für den Einsatz in Betonversuchen. Der erster Schritt bestand in der Herstellung ausreichender Mengen dieser Zemente (kleintechnische Calcinierung und Mahlung von Tonen sowie homogene Mischung der Zemente mit den getemperten Tonen), die durch eine umfassende Zementcharakterisierung nach den Vorgaben der Norm DIN EN 196 (Teile 1, 3, 5) begleitet wurde. Danach erfolgte die Herstellung verschiedener Betone, an denen unterschiedliche, für den mitteleuropäischen Raum wesentliche Dauerhaftigkeitskriterien (Carbonatisierung, Frost- und Frost-Tausalz widerstand, Chloridmigration) überprüft wurden.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Ausgangsstoffe und Calcinierung

Im Forschungsvorhaben wurden vier Portlandzemente eingesetzt, die sich hinsichtlich ihres Gehaltes an Alkalien und an Calciumaluminat unterschieden (**Tabelle 1**). Z1 enthielt überdurchschnittlich viele Alkalien und gleichzeitig viel  $C_3A$ . Z2 wies bei einem relativ geringen Alkaligehalt einen vergleichsweise hohen  $C_3A$ -Gehalt auf. Z3 hatte ein sehr hohes Alkaliäquivalent kombiniert mit einem niedrigen Aluminat- und einem höheren Alitgehalt. Z4 war ein CEM I-SR 3 (niedrige  $C_3A$ -Gehalt) mit einem sehr geringen Alkaliäquivalent. Die vier Zemente wiesen eine vergleichbare Korngrößenverteilung auf. Gemäß ihrer Festigkeitsentwicklung entsprach Z1 einem CEM I 52,5 R, die übrigen drei einem CEM I 42,5 R bzw. CEM I 52,5 N.

**Tabelle 1**  $Na_2O$ -Äquivalent, Aluminat- und Alitgehalt der verwendeten CEM I-Zemente

Zement	$Na_2O$ -Äq.		$C_3A$		$C_3S$	
	Wert	Typ	Wert	Typ	Wert	Typ
Z1	0,87	o	13,4	+	54,8	-
Z2	0,72	-	11,4	+	56,3	-
Z3	1,05	+	9,5	o	61,4	+
Z4	0,61	-	2,4	-	58,4	o

+ = hoch                      o = mittel                      - = niedrig

Mit den Tonen T7, T10 und T11 wurden Rohstoffquellen verwendet, die bereits im Vorgängerprojekt eingesetzt wurden. Die neuen Lieferchargen der Tone entsprachen in chemischer und mineralogischer Zusammensetzung den bekannten Ausgangsstoffen. Daher konnten die vorliegenden Erkenntnisse, z. B. zu Brenntemperaturen, genutzt werden. Dementsprechend fanden sich bei den calcinierten Produkten gleichartige Phasenzusammensetzungen und Löslichkeitsverhalten wie im Vorläuferprojekt.

Ergänzend wurden zwei Werkstone eingesetzt, die aus Rohstoffvorkommen stammen, die bereits heute von Zementherstellern als Ausgangsstoff für die Klinkerherstellung verwendet werden. Diese Tone wiesen eine sehr geringe keramische Qualität und als Besonderheit geringe bis mittlere Kalkgehalte auf (**Tabelle 2**). Auf Basis von Hochtemperatur-Röntgenbeugung (**Bild 1**) und kleinmaßstäblichen Brennversuchen wurden für die Werkstone Brennbedingungen definiert, die zu unterschiedlicher Ausprägung der calcinierten Produkte führte.

Von allen Tonen wurden in einem Kammerofen Mengen von bis zu 60 kg calciniert und anschließend in einer Kugelmühle im Batchbetrieb auf eine definierte Feinheit gemahlen. An den Produkten erfolgten granulometrische, mineralogische und chemische Charakterisierungen. Es standen insgesamt fünf verschiedene Varietäten kaolinitischer, illitischer und chloritischer Tone als Ausgangsstoffe zur Verfügung. Durch unterschiedliche Temperungen wurden daraus insgesamt 13 calcinierte Tone erzeugt, die sich hinsichtlich ihrer Reaktivität unterscheiden sollten. Das puzzolanische Reaktionsvermögen wurde über das Normverfahren (reaktive Kieselsäure) und das Verfahren nach Surana bewertet, das sich im Vorgängerprojekt als geeignet erwiesen hatte.

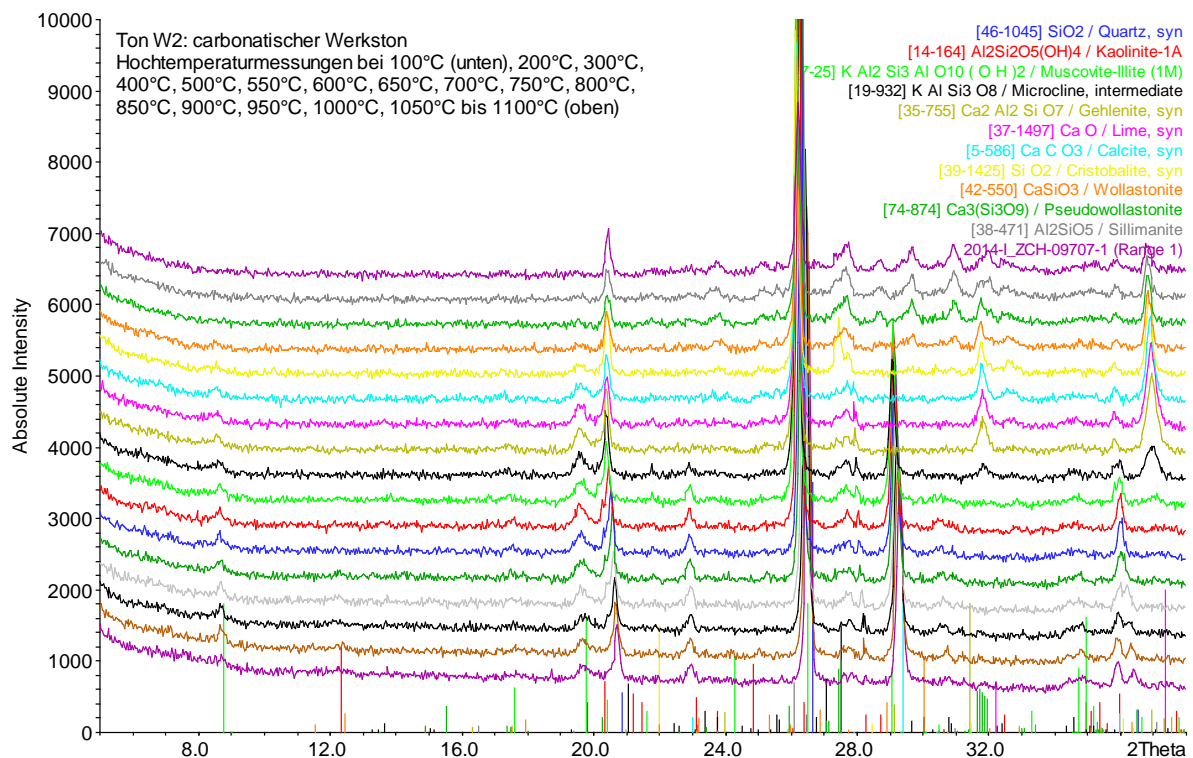
Einer der Werkstone erwies sich aufgrund seiner feinschichtigen Struktur nach der üblichen Vorzerkleinerung noch als inhomogen. In einer weiteren Versuchsreihe wurde vergleichend

geprüft, inwiefern sich eine Vorhomogenisierung auf die Eigenschaften der daraus calcinierten Tone auswirkte.

**Tabelle 2** Semiquantitative Phasenauswertung der eingesetzten Tone nach RBA

Phase	T7	T10	T11	W1	W2
Quarz	++++	+++	+++	++++	++++
Cristobalit	-	-	-	-	(+)?
Plagioklase	+	(+)	(+)	(+)	+
K-Feldspat	(+)	+	(-)	(+)	(+)
Illit/Muskovit	+++	+++	+++	++++	+++
Kaolinit	+++	++++	++	+++	++
Chlorit-Gruppe	-	-	++	++	++
Calcit	(-)	(-)	+	++	++++
Dolomit	-	-	-	+	+
Ankerit	-	-	-	-	(+)
Hämatit	-	(+)	(-)	(+)	(+)
Anatas	-	-	(+)	-	-

++++ Hauptbestandteil, Gehalt > 20 %  
 +++, ++ Nebenbestandteil, Gehalt 5-20 %  
 + Gehalt < 5 %  
 (+) Gehalt < 1 %  
 (-) Spuren



**Bild 1** Hochtemperatur-RBA der Probe „W2“

### 3.2 Zementtechnische Untersuchungen

Aus insgesamt 16 calcinierten Tonen und den vier Portlandzementen wurden Laborzemente gemischt, die entweder 20 M.-% getemperten Ton (CEM II/A-Q) oder 40 M.-% getemperten Ton (CEM IV-Q) enthielten. Auf eine Anpassung der Sulfatträgergehalte wurde bei den Laborzementen in der Regel verzichtet. Lediglich in einer Versuchsserie wurden zusätzliche Gehalte an Naturanhydrit in verschiedenen Feinheiten zugesetzt, um den Einfluss einer potentiellen sulfatischen Anregung der calcinierten Tone zu untersuchen. Die Mischungsauswahl dieser Prüferserie erfolgte über statistische Versuchsplanung.

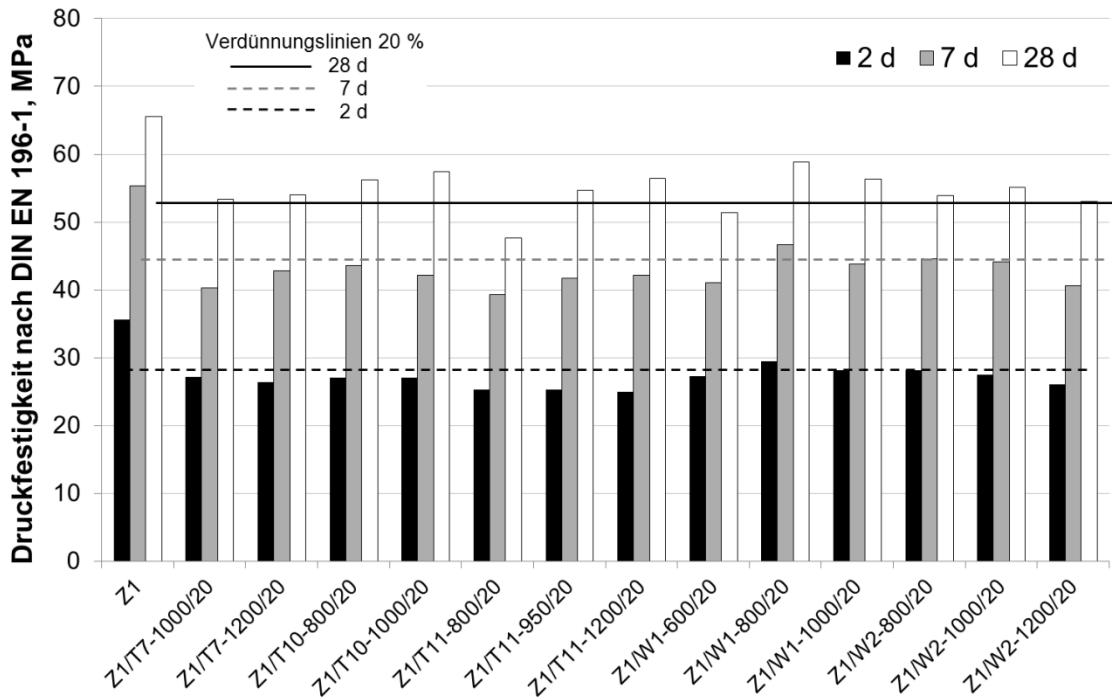
An den Laborzementen wurden die Wasseransprüche mittels des Prüfverfahrens nach Puntke ermittelt. Dann erfolgte die Prüfung der Festigkeitsentwicklung an Normmörtelprismen nach DIN EN 196-1. Als Kennwert zur Interpretation von Dauerhaftigkeitseigenschaften in den nachfolgenden Betonversuchen wurde an den Prüfmörteln im Alter von 28 Tagen die Porengrößenverteilung mittels Hg-Druckporosimetrie ermittelt.

Aufgrund ihrer hohen spezifischen Oberfläche führen die bei geringeren Temperaturen calcinierten kaolinitischen Tone (T10-800, W1-600, W1-800) zu einem erhöhten Wasseranspruch. Der Grund hierfür sind reliktsche Strukturen der Tonminerale mit hohen inneren Oberflächen. Illitische Tone weisen diese Oberflächeneffekte in geringerem Maße auf (z. B. T11-800), fungierten aufgrund ihrer geringen Partikelgröße eher als Zwickelfüller und konnten im Einzelfall den Wasseranspruch des Gemisches sogar absenken. Bei Einsatz von 40 M.-% calciniertem Ton ist mit Ausnahme von bereits gesinterten illitischen Tonen (z. B. T11-1200) durchwegs eine signifikante Erhöhung des Wasseranspruches zu verzeichnen, was sich später bei der Mörtel- und besonders der Betonherstellung durch deutlich schlechtere Verarbeitbarkeiten bemerkbar und teilweise den Einsatz von Fließmitteln erforderlich machte.

Die Druckfestigkeiten nahezu aller untersuchten Laborzemente lagen im beobachteten Zeitraum bis 28 Tage unter denen der Referenzzemente. Im Hinblick auf eine Einordnung der Laborzemente in Zementfestigkeitsklassen ließen sich aber in jedem Fall Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 R, in besonders geeigneten Kombinationen bis hin zu 52,5 N erzielen (z. B. **Bild 2**).

Nachteilig erwiesen sich die Mischungen insbesondere zu frühen Hydratationsaltern. Nach 2 und 7 Tagen lagen die meisten untersuchten Laborzemente noch maximal beim theoretischen Leistungsniveau eines inerten Zusatzstoffes (CEM II/A-Q: rd. 80 % relative Druckfestigkeit). Erst nach 28 Tagen trat verstärkt eine puzzolanische Reaktion auf, so dass Festigkeitsniveaus zwischen 80 und 100 % der Referenzzemente erreicht wurden. Lediglich Mischungen mit dem calcinierten Ton W1-800 erreichten bereits nach 28 Tagen die gleichen Festigkeiten wie die Referenzzemente. Die Festigkeitsentwicklungen vieler Mischungen lassen vermuten, dass mit fortschreitender Hydratationsdauer mit weiteren Zunahmen, ggf. auch über das Leistungsniveau der Referenzzemente hinaus, zu rechnen ist.

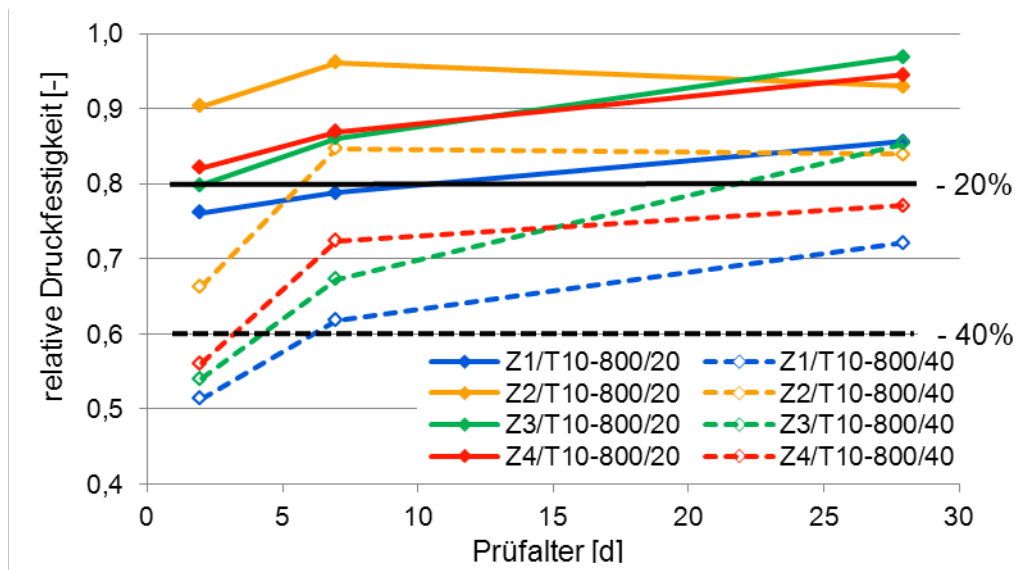
Bei den CEM IV-Q mit 40 M.-% calciniertem Ton lagen die frühen Festigkeiten zumeist noch unter dem 60 % Niveau der Referenzzemente. Hier konnte durch die puzzolanische Reaktion nach 28 Tagen in der Regel ein Festigkeitsniveau von 80 % erreicht werden, mit ebenfalls einer eindeutigen Tendenz zu einer fortschreitenden Festigkeitszunahme mit zunehmendem Alter.



**Bild 2** Mörteldruckfestigkeiten aller Laborzemente mit dem Referenzzement Z 1 und 20 M.-% calcinierten Tonen

Bei allen Tonvarietäten zeichnete sich eine spezifische Calcinerstufe als die reaktivste aus. In vielen Fällen korrelierten die Festigkeitsentwicklungen auch mit den Reaktivitätskennwerten. Insbesondere bei den kalkhaltigen Tonen ließ sich aber kein unmittelbarer Zusammenhang zwischen löslichen Anteilen und Festigkeitsbeiträgen mehr erkennen. Die Vorzerkleinerung und Homogenisierung des Werkstones W2 bewirkte eine Verringerung der für die maximale Reaktivität notwendigen Brenntemperatur. Die Calcinerung bei niedrigeren Temperaturen führte in der Regel zu höheren reaktiven Aluminiumanteilen und zeitgleich zu etwas höheren relativen 2-Tage-Festigkeiten, während die höher calcinierten Tone mit höheren reaktiven Siliciumanteilen eher die Spätfestigkeit förderten. Besonders deutlich wurde dieser Effekt in Kombination mit Zementen, die selber nur geringe reaktive Aluminiumgehalte im frühen Hydratationsalter aufwiesen (Z4 mit sehr niedrigen  $C_3A$ -Gehalten, Z2 mit höheren, aber überwiegend kubischen  $C_3A$ -Gehalten). Hier konnten hohe reaktive Aluminiumgehalte aus den calcinierten Tonen (z. B. niedrig getemperte Varietäten von T10 und W1) gewisse Kompensationen erreichen. Auch eine Optimierung des Sulfatträgergehaltes konnte nur in den Fällen Festigkeitsgewinne erzielen, in denen aus der Tonkomponente nachhaltig reaktive Aluminiumanteile geliefert wurden.

Neben den  $C_3A$ -Gehalten spielten die Alkaligehalte der eingesetzten Zemente eine wichtige Rolle. Während hohe Alkaligehalte im jungen Alter anscheinend ausschließlich die Reaktivität des Klinkers fördern, war im Hinblick auf die puzzolanische Nacherhärtung ein eindeutig positiver Effekt ab einem Alter von 28 Tagen zu verzeichnen (**Bild 4**)



**Bild 3** Druckfestigkeiten der Laborzemente mit T10\_800°C, relativ zu den Referenzzementen Z1 bis Z4

Die im Hydratationsalter von 28 Tagen an den Mörtelproben gemessenen Porengrößenverteilungen wiesen zwar Unterschiede auf, die aber nicht in jedem Fall mit den sonstigen Mörtel-eigenschaften korreliert werden konnten. Im Trend zeigte sich der zu erwartende Zusammenhang, dass Mörtel mit geringerer Gesamt- oder Kapillarporosität auch höhere Druckfestigkeiten aufwiesen. Kennwerte wie z. B. der Grenzradius, ab dem von einem zusammenhängenden, ggf. transportrelevanten Porengefüge auszugehen ist, waren bei Mischungen mit besonders reaktiven Tonen eher niedrig und dementsprechend bei Mörteln mit wenig reaktiven Tonen höher.

Erwartungsgemäß fand sich ein Zusammenhang in der Relation von Kapillar- und Gelporosität, die praktisch die Reaktivität bzw. Puzzolanität der calcinierten Tone im Zementmörtel nachzeichnet. Reaktive calcinierte Tone bildeten einen höheren Anteil an Reaktionsprodukten (höhere Gelporosität), die ihrerseits den Kapillarporenraum verringerten.

### 3.3 Betontechnische Untersuchungen

Auf Basis der Ergebnisse aus den ersten beiden Arbeitsschritten erfolgte eine Auswahl von Laborzementen, die zur Herstellung von Laborbetonen verwendet wurden (**Tabelle 3**). An diesen Betonen wurden Frischbetonkennwerte, die 28-Tage-Druckfestigkeit sowie Dauerhaftigkeitseigenschaften wie der Carbonatisierungswiderstand, der Frost- und Frost-Tausalzwiderstand und das Chlorid-Migrationsvermögen ermittelt. Die entsprechenden Betonrezepturen waren den einschlägigen Prüfvorschriften des Deutschen Institutes für Bautechnik (DIBt) entlehnt, die für bauaufsichtliche Zulassungen von Zementen angewendet werden.

Die Betone „CEM II“ enthalten Laborzemente mit 20 M.-% calciniertem Ton („CEM II/A-Q“), die Betone „CEM IV“ entsprechend Laborzemente mit 40 M.-% calciniertem Ton („CEM IV-Q“). Der Referenzbeton enthält einen handelsüblichen CEM I ohne Puzzolanzugabe.

**Tabelle 3** Auswahl der Laborzemente für die Betonversuche

Beton	Laborzement <sup>1)</sup>	Zement	Ton	Calciniierung [°C]	Tongehalt [M.-%]
CEM-REF	-	Z0	-	-	0
CEM II-1	Z1/T10-800-20-B	Z1	T10	800	20
CEM II-2	Z4/T10-800-20-B	Z4	T10	800	20
CEM II-3	Z1/T11-950-20-B	Z1	T11	950	20
CEM II-4	Z2/W1-800-20-B	Z2	W1	800	20
CEM II-5	Z2/W2-800-20-B	Z2	W2	800	20
CEM II-6	Z2/W2-1200-20-B	Z2	W2	1200	20
CEM IV-1	Z1/T10-800-40-B	Z1	T10	800	40
CEM IV-2	Z2/W1-800-40-B	Z2	W1	800	40
CEM IV-3	Z2/W2-1200-40-B	Z2	W2	1200	40

1) Zement/Ton-Brenntemperatur (°C)-Tonanteil (M.-% v.Z.)

Mit den CEM II/A-Q ließen sich in der Regel Betone mit praktikabler, im Vergleich zu einem Referenzbeton nur geringfügig verringerter Verarbeitbarkeit herstellen. Der Einsatz von calcinierten Tonen mit besonders hohem Wasseranspruch machte im Einzelfall den Einsatz eines Fließmittels zur Einstellung einer verarbeitbaren Konsistenz notwendig. Besonders deutlich wurde dieser Zusammenhang bei den Betonen mit CEM IV-Q. Laborzementen mit W2-1200, die einen geringeren Wasseranspruch hatten als die Referenzzemente, ließen sich auch in mit Tongehalten von 40 M.-% problemlos in Betonen verarbeiten. Die Konsistenz der Luftporenbetone ( $w/z = 0,50$ ) war bei allen Betonen mit calcinierten Tonen schwieriger einzustellen. Zemente mit calcinierten kaolinitischen Tonen erforderten Fließmitteldosierungen (CEM II/A-Q) oder konnten überhaupt nicht hergestellt werden (CEM IV-Q).

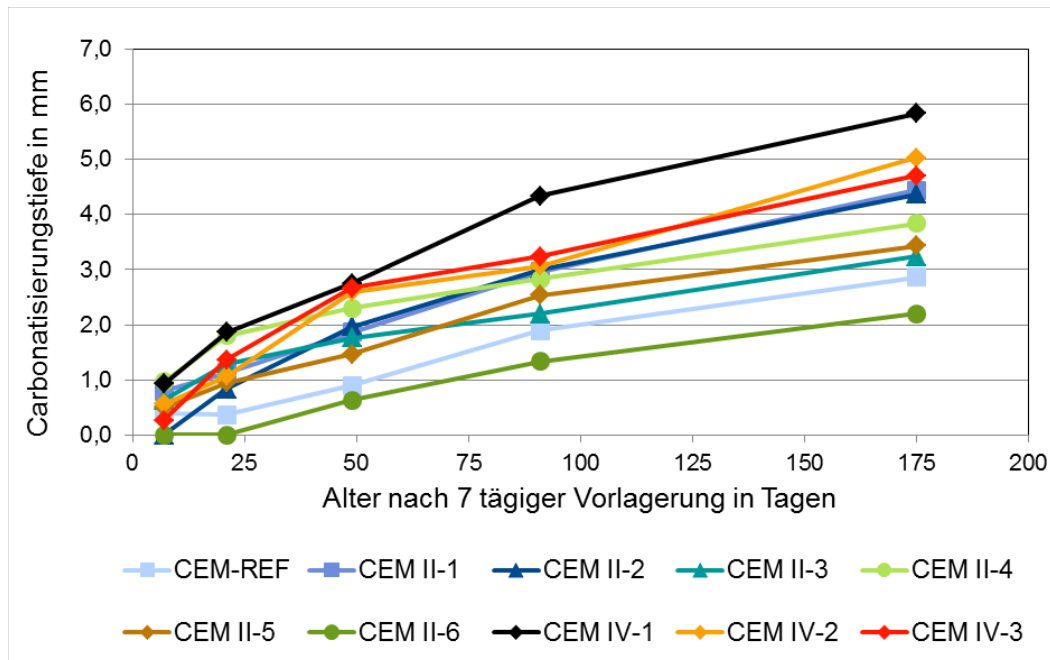
Die Druckfestigkeiten der Betone im Hydratationsalter von 28 Tagen lagen durchwegs niedriger als die Referenzwerte. Eine Zuordnung zu Betonfestigkeitsklassen ergäbe in etwa die Einbuße von einer Festigkeitsklasse, bezogen auf den Referenzbeton. Auffällig war, dass Betone mit CEM IV-Q teilweise sogar höhere Festigkeiten aufwiesen als ihr Pendant mit CEM II/A-Q auf Basis derselben Bindemittelkomponenten.

Der Carbonatisierungswiderstand der Betone mit calcinierten Tonen war etwas geringer als die Referenzwerte, ohne aber den Erfahrungsbereich von Betonen mit konventionellen puzzolanischen oder latent-hydraulischen Bindemittelanteilen (Flugasche, Hüttsand) zu verlassen (**Bild 4**). Es zeichnete sich ein eher ungünstiger Einfluss höherer Reaktionsraten ab, vermutlich weil durch die puzzolanische Reaktion  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  verbraucht und kalkarme Hydratationsprodukte gebildet wurden, was den Puffer gegen die vordringende Carbonatisierungsfrost verminderte.

Der Chlorideindringwiderstand wurde nach 35 und 98 Tagen Hydratationsdauer gemessen. Wie zuvor schon beschrieben, war zu dem früheren Zeitpunkt die puzzolanische Reaktion der calcinierten Tone noch nicht sehr weit fortgeschritten. Dementsprechend lagen die Er-



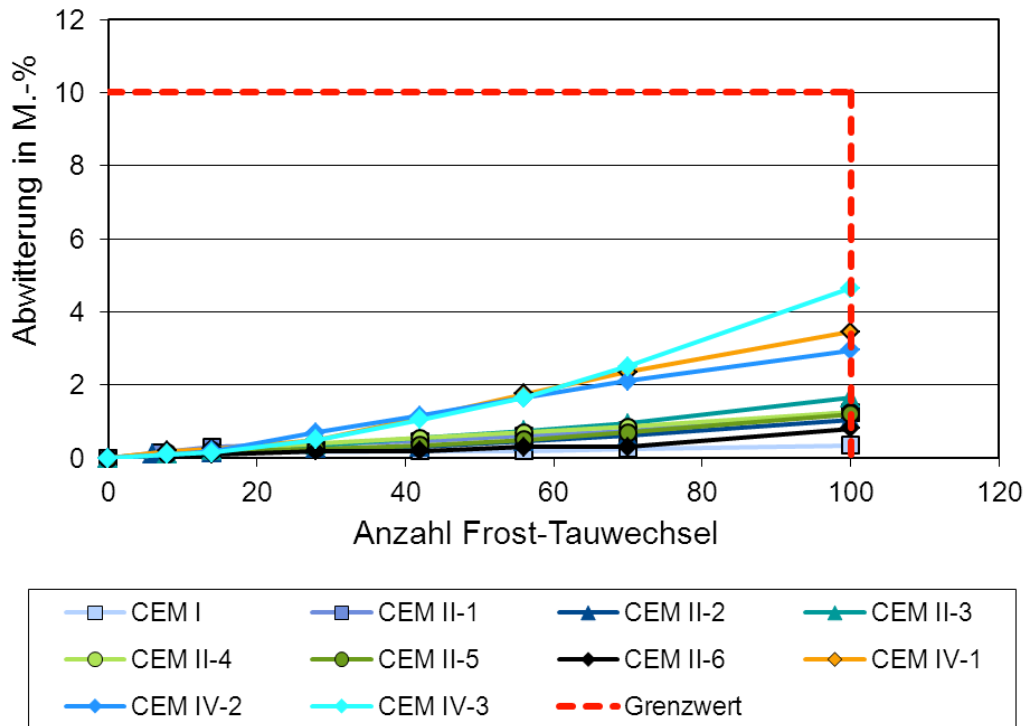
gebnisse zwischen den Vergleichswerten mit CEM I (entsprechend die Zemente mit den eher reaktiven Tonen) und Werten, die z. B. von CEM II/B-LL bekannt sind (entsprechend die Zemente mit den wenig reaktiven Tonen). Prüfungen im Alter von 98 Tagen zeigten durchwegs geringfügig, teilweise sogar deutlich verringerte Migrationskoeffizienten.



**Bild 4** Carbonatisierungstiefe der Betone A

Der im Würfelverfahren geprüfte Frostwiderstand der Betone zeigte eine für die CEM II/A-Q nur geringfügig schlechtere Leistungsfähigkeit als für den CEM I-Referenzbeton (**Bild 5**). Selbst die Betone mit CEM IV-Q, die Abwitterungen zwischen 3 und 5 M.-% nach 100 Frostwechseln aufwiesen, lagen noch sehr deutlich unter dem Abnahmewert von 10 M.-%. Eine Korrelation zu den Porenstrukturkennwerten ließ sich nicht ableiten.

Der Referenzbeton mit CEM I zeigte in der CDF-Prüfung (Frost-Tausalz-Widerstand) extrem geringe Abwitterungen ( $70-80 \text{ g/m}^2$ ). Die Prüfwerte der Betone mit calcinierten Tonen im Bindemittel wiesen durchwegs höhere Abwitterungen auf, lagen aber selbst mit Maximalwerten von  $800 \text{ g/m}^2$  noch deutlich unter dem Abnahmekriterium ( $1500 \text{ g/m}^2$ ). Der Abwitterungsverlauf war in der Regel degressiv. Die Messung des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls als Kennwert für innere Schädigungen wies noch geringere Abweichungen der Prüfbetone vom Referenzbeton auf. Eine Ausnahme bildete der CEM II/A-Q-Beton mit T10-800, der in beiden Messmethoden die ungünstigsten Werte verzeichnete und eine progressive Schädigung andeutete. Eine eindeutige Ursache konnte nicht ermittelt werden.



**Bild 5** Frostwiderstand, Abwitterung bei der Würfelfrostprüfung

Generell wiesen die Betone unter Einsatz von Zementen mit calcinierten Tonen gute bis befriedigende Dauerhaftigkeitseigenschaften auf. Unter Berücksichtigung einer vergleichsweise langsamen Entwicklung von Frühfestigkeit wäre nach den Vorgaben zur Nachbehandlung von Beton gegebenenfalls eine verlängerte Nachbehandlungsdauer dieser Betone angezeigt, wodurch sich Dauerhaftigkeitseigenschaften wie der Carbonatisierungs- oder Frostwiderstand noch weiter erhöhen würden.

#### 4 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 17930 N der Forschungsvereinigung VDZ gGmbH 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.