

Sonderdruck



Umsetzung des Prinzips der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 mit Flugasche als Zusatzstoff

Dirk Brandenburger und Matthias Meißner, Herten

Überreicht durch:

BauMineral
KraftWerkstoffe

Verlag Bau+Technik GmbH
www.verlagbt.de

BauMineral GmbH
Hiberniastraße 12
45699 Herten
www.baumineral.de

Nachhaltiger Beton mit „Performance Concept“

Umsetzung des Prinzips der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit nach DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 mit Flugasche als Zusatzstoff

Dirk Brandenburger und Matthias Meißner, Herten

Die Nachhaltigkeit von Beton wird bislang überwiegend durch den Einsatz von klinkerreduzierten Zementen und/oder durch den Einsatz von Betonzusatzstoffen nach dem k-Wert Konzept gesteigert. Am Beispiel Steinkohlenflugasche wird aufgezeigt, welche Möglichkeit das Regelwerk zusätzlich bietet, um diese an Bedeutung zunehmende Optimierungsaufgabe von der Stoffebene auf die Betonebene zu verlagern.

1 Einleitung

Die Forderung nachhaltiger zu Bauen impliziert auch Forderungen nach der Schonung natürlicher Ressourcen, der Verringerung von CO₂-Emissionen sowie mehr Energieeffizienz, zugleich aber auch nach Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit.

Die am weitesten verbreitete Bauweise ist die Betonbauweise. Die wichtigste Komponente, ohne die Beton nicht vorstellbar ist, ist Zement. Zement ist heute ein Sammelbegriff, mit dem Portlandzement CEM I, bestehend aus fast 100 % gemahlenem Zementklinker, gemeint sein kann, aber auch ein Compound aus Portlandzement und anderen pulverförmigen Stoffen unterschiedlicher Herkunft und Leistungsfähigkeit – so genannte Hauptbestandteile. Unverzichtbar für den Beton ist jedoch nur der Portlandzement bzw. der Anteil an gemahlenem Zementklinker in einem Zement mit mehreren Hauptbestandteilen. Der gemahlene Zementklinker beansprucht den Hauptteil der Primärenergie und ist zu mehr als 90 % für die mit der Herstellung von Beton verbundenen Emissionen an Treibhausgasen verantwortlich. Der Herstellung von Portlandzement sind ca. 5 % bis 8 % der weltweiten CO₂-Emissionen zuzuschreiben.

Dem Verursachungsprinzip folgend steht somit der gemahlene Zementklinker im Mittelpunkt, wenn es darum geht, Treibhausgase zu reduzieren. Die verfahrenstechnischen Möglichkeiten dazu sind nahezu ausgeschöpft. Daher ist die Zementindustrie bestrebt, den Klinkergehalt im Zement zu reduzieren. Es werden zunehmend Portlandkompositzemente hergestellt, bei denen ein Teil des Zementklinkers durch andere „CO₂-neutralere“ Hauptbestandteile ersetzt wird. Der „Klinkerfaktor“ wird somit reduziert. Allerdings ist der Zement nicht das finale Produkt, sondern der Beton. Konsequenterweise müsste man somit die Anfor-

derungen an Energieeffizienz und CO₂-Reduzierung auf den Beton beziehen. Diese Anforderungen sind dann in Einklang mit bautechnischen Anforderungen wie Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit zu bringen.

Große CO₂-Einsparungen werden bereits durch den Einsatz von geeigneten industriellen Nebenprodukten mit definierten technischen Eigenschaften erzielt. Die Verwendung von Hüttensand und Steinkohlenflugasche zur Herstellung von nachhaltigem Beton, Stahl- und Spannbeton ist in Deutschland seit Jahrzehnten Stand der Technik. Nahezu die gesamte Menge des in deutschen Stahlwerken anfallenden Hüttensands und der in deutschen Steinkohlekraftwerken anfallenden Flugaschen werden heute für die Zement- und Betonherstellung verwendet.

Das für die Anwendung maßgebende Regelwerk schafft jedoch ungleiche Bedingungen. Während in einem Zement mit mehreren Hauptbestandteilen nach EN 197-1 [1] die einzelnen Bestandteile gleichgestellt sind, erfolgt bei Einsatz der gleichen Stoffe als Betonzusatzstoff nach DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 [2, 3] eine Wichtung zunächst über eine Einstufung in Zusatzstofftypen mit Wirksamkeitsbeiwerten „k“ für die Anwendung nach dem deskriptiven k-Wert Konzept. Einige Stoffe, die nach EN 197-1 in Verbindung mit gemahlenem Zementklinker als Hauptbestandteile zur Herstellung von „Kompositzementen“ verwendet werden können, werden in DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 als Betonzusatzstoffe gar nicht genannt. Damit ist ihre Anwendung als Betonzusatzstoff nicht geregelt (Tafel 1).

Von DIN EN 206-1/DIN 1045-2 abweichende Anwendungen können in Deutschland durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) geregelt werden. Neue oder zusätzliche Anforderungen an die Stoffe

sind unter Berücksichtigung des EuGH-Urteils zur Bauregelliste entweder mit einer abZ oder einer ETA zu regeln.

Vergleicht man die Regelungen zur Anwendung von Betonzusatzstoffen in Deutschland mit entsprechenden Regelungen in anderen Ländern, stellt man fest, dass nur wenige nationale Normen das k-Wert-Prinzip für die Anwendung von Betonzusatzstoffen vorschreiben. Überwiegend werden Betonzusatzstoffe als gleichwertiger Bestandteil des Bindemittels angesehen. Auch in Europa gibt es eine Reihe von Beispielen für entsprechende nationale Konzepte.

Die Autoren:

Dipl.-Ing. Dirk Brandenburger studierte Bauingenieurwesen an der Universität Dresden (TU). Seit 1990 ist er im Vertrieb der BauMineral GmbH tätig und seit 2005 Leiter des Vertriebs für Steinkohlenflugasche.

Dr.-Ing. Matthias Meißner studierte nach einer Berufsausbildung zum Beton- und Stahlbetonbauer Bauingenieurwesen an der Ruhr-Universität Bochum mit der Vertiefungsrichtung Konstruktiver Ingenieurbau. Von 1992 bis 1996 war er als Bauleiter in der Bauindustrie tätig und von 1996 bis 1999 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Stahlbeton- und Spannbetonbau der Ruhr-Universität Bochum. Im Anschluss an seine Promotion im Jahr 1999 war er bis 2001 Projektsteuerer bei einem Ingenieurbüro. Seit 2001 ist Matthias Meißner bei der BauMineral GmbH u.a. für die Qualitätssicherung von Steinkohlenflugasche verantwortlich.

Tafel 1: Gegenüberstellung der Einsatzmöglichkeiten und Substitutionsraten verschiedener Stoffe als Zementhauptbestandteil und als Betonzusatzstoff

Normzemente nach DIN EN 197-1		Beton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2	
Hauptbestandteil	maximale Zementklinkersubstitution	Zusatzstoff	maximale Zementsubstitution; k-Wert
Hüttensand	95 M.-%	Ja	25 M.-% mit $k = 0,4$
Silikastaub	10 M.-%	Ja	10 M.-% mit $k = 1,0$
Natürliche Puzzolane	35 M.-%	Trass	ohne Anrechnung
Getemperte Puzzolane	35 M.-%	Nein	keine Regelung
Kieselsäurereiche (Steinkohlen) Flugaschen	35 M.-%	Ja	25 M.-% mit $k = 0,4^{1)}$
Kalkreiche (Braunkohlen) Flugaschen	35 M.-%	Nein	keine Regelung
Gebrannter Schiefer	35 M.-%	Nein	keine Regelung
Kalksteinmehl	35 M.-%	Gesteinsmehle	ohne Anrechnung

¹⁾ für Bohrpfähle, Schlitzwände sowie Unterwasserbetone mit $k = 0,7$

2 Anwendung von Zusatzstoffen nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2

2.1 k-Wert Konzept

Der k -Wert wird in der Fachliteratur auch als „Wirksamkeitskennwert“ oder „Zementäquivalentwert“ bezeichnet [4]. Systematische Untersuchungen zur Wirksamkeit von Flugasche abhängig von verschiedenen Einflüssen hat Hårdtl durchgeführt [5] (Bilder 1 und 2). Der k -Wert soll die Differenz zwischen der Leistungsfähigkeit bzw. der Wirksamkeit eines Zusatzstoffs zu einem Zement ausgleichen. Als Konstante, die für den überwiegenden Teil aller Zemente unabhängig von deren Zusammensetzung und Festigkeit sowie den überwiegenden Teil aller Anwendungen ohne Berücksichtigung von Nacherhärtung und äußeren Bedingungen gelten soll, kann sie nur alle Einflüsse zugleich berücksichtigend weit auf der sicheren Seite liegend festgelegt werden. Zusätzlich wird auch die Substitutionsrate begrenzt. Mit dem k -Wert wird ein äquivalenter Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ errechnet, der bei dem Betonentwurf zu verwenden ist. Unter günstigen Randbedingungen führt dieses Konzept zwangsläufig zu einer Unterschätzung der Leistungsfähigkeit eines Zusatzstoffs.

Bei einem Einsatz von Flugasche als Zusatzstoff nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2

mit einem k -Wert von 0,4 und einer maximalen Substitutionsrate von 25 % wird dieser eine deskriptiv festgelegte Leistungsfähigkeit zugewiesen, und zwar unabhängig davon, ob es sich z.B. um einen CEM I 52,5 R oder einen CEM III B 32,5 N handelt sowie unabhängig von der Nachbehandlung des Betons und dem Zeitpunkt der maßgebenden Beanspruchungen nach seiner Herstellung.

In der Praxis führt der mit $k = 0,4$ errechnete äquivalente Wasserzementwert in vielen Fällen zu relativ steifen Mischungen. Der Wunsch nach praxistgerechter Verarbeitbarkeit (ver)führt dann zu höheren Fließmittel dosierungen, zu höheren Gesamtbindemittelgehalten, zu (oftmals ungeplanten) Überfestigkeiten in höherem Alter und zu höheren Stoffkosten.

2.2 Prinzip der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit

Nach DIN EN 206-1, 5.2.5.3, darf eine festgelegte Kombination aus Zement und Zusatzstoff von den in Anhang E, Tab. F.2.1 und F.2.2 festgelegten expositions- und druckfestigkeitsbezogenen Anforderungen an Mindestzementgehalte und höchstzulässige Wasserzementwerte abweichen, wenn die Gleichwertigkeit dieser Kombination insbesondere unter Dauerhaftigkeitsgesichts-

punkten nachgewiesen ist [2]. Nach DIN 1045-2, 5.2.5.3, bedarf die Anwendung dieses Prinzips einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) [3].

Beispiel: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.34-1977 für Hüttensandmehl „Cemeko“

Zur Umsetzung des „Prinzips der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit“ wurde nach DIN 1045-2, 5.2.5.3 die o.g. abZ für ein Hüttensandmehl mit bestimmter Herkunft und bestimmten Eigenschaften erteilt. Mit dem zugelassenen Hüttensandmehl sowie Portlandzementen nach DIN EN 197-1 beliebiger Herkunft kann ein Betonhersteller außerhalb eines Zementwerkes einen Beton so zusammensetzen, dass die Kombination einem Portlandhüttenzement (Eisenportlandzement) CEM II/A-S oder CEM II/B-S oder einem Hochofenzement CEM III A oder CEM III B entspricht [6].

Beispiel: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.34-2020 für Kalksteinmehl

Die o.g. abZ wurde für die Kombination eines Kalksteinmehls bestimmter Herkunft und mit bestimmten Eigenschaften mit Portlandzement erteilt. Der Inhaber dieser Zulassung darf in seinen Werken mit diesem Kalksteinmehl den Portlandzement soweit ersetzen, dass die Mischung aus Portlandzement und Kalksteinmehl einem Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL entspricht [7].

Beispiel: Niederländisches

„Attestbetonkonzept“ nach BRL 1802

In einigen anderen EU-Staaten wird das Prinzip der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit schon seit vielen Jahren auf Basis nationaler Regelwerke praktiziert [4]. Am bekanntesten ist in Deutschland vermutlich das niederländische „Attestbetonkonzept“.

Abweichend von den beiden genannten Zulassungen für Hüttensand und Kalksteinmehl sowie den Zulassungen für Flugasche, über die im Folgenden ausführlicher berichtet wird, werden hier konkrete Betonrezepturen „attestiert“, die keinen Spielraum bei der Kombination der Betonkomponenten sowie deren Herkunft gestatten. Dazu wird die Leistungsfähigkeit der jeweiligen „Mischung“ betrachtet ohne die Vorgabe von Wirksamkeiten. So können nachhaltige Betonzusammensetzungen realisiert werden, die nach EN 206-1 nicht zulässig wären.

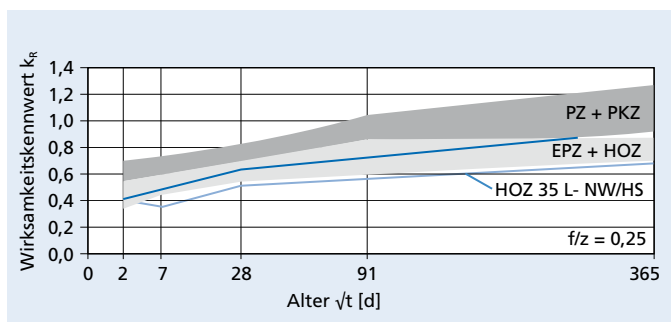


Bild 1: Wirksamkeitskennwert k abhängig von der Zementart (Zementklinkergehalt) und dem Betonalter bei konstantem Flugaschegehalt [5]

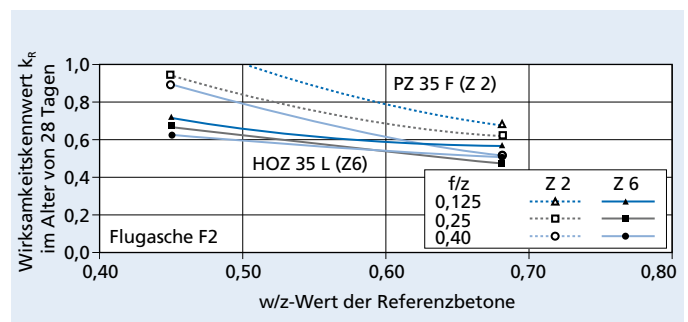


Bild 2: Wirksamkeitskennwert k abhängig von der Zementart (Zementklinkergehalt) und dem w/z-Wert bei gestaffeltem Flugascheanteil [5]

Tafel 2: Nachweiskonzept gemäß Prüfplan des DIBt [15]

Schritt	Stelle	Maßnahme
1	DIBt/SVA ¹⁾	Festlegung eines Prüfplans und Festlegung von jeweils fünf Prüfzementen sowie einem Referenzzement je abzubildendem Bezugszement bzw. je Bindemittelkombination
2	Prüfinstitut ²⁾	Beschaffung der Betonausgangsstoffe und Durchführung von Vorprüfungen zur Identifikation der leistungsschwächsten Zement-Flugaschekombination (Bindemittelkombination)
3	DIBt/SVA ¹⁾	Auswahl des ungünstigsten Referenzzements anhand der schwächsten Bindemittelkombination
4	Prüfinstitut ²⁾	Durchführung der Hauptprüfungen zur Dauerhaftigkeit, Prüfbericht
5	DIBt/SVA ¹⁾	Bewertung der Prüfergebnisse und Entscheidung über die Ausstellung der beantragten Zulassung

¹⁾ Deutsches Institut für Bautechnik/Sachverständigenausschuss

²⁾ Ruhr Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher

Die Ausstellung der Betonatteste erfolgt auf Basis von Prüfergebnissen. Bei Änderungen der Mischungszusammensetzung oder bei Austausch eines Ausgangsstoffs durch einen nach Norm gleichwertigen anderen Stoff ist ein neues Attest zu beantragen. Das „Attestbetonkonzept“ ist in der nationalen niederländischen Vorschrift BRL 1802 geregelt [8].

Beispiel: ATG Belgien

Nach dem in Belgien geltenden Regelwerk können nach EN 450-1 zertifizierte Flugaschen der Glühverlustkategorien A und B als Zusatzstoff nach dem k-Wert Konzept für Beton nach NBN EN 206-1 eingesetzt werden. In Verbindung mit einem CEM I beträgt der k-Wert 0,4, in Verbindung mit den meisten anderen handelsüblichen Zementarten beträgt der k-Wert 0,2. Alternativ kann Flugasche auch nach Abs. 5.2.5.3 in Verbindung mit einer ATG eingesetzt werden. Die ATG legt eine oder mehrere konkrete Betonzusammensetzungen fest, deren Eignungen im Zuge der Genehmigung sowohl unter Festigkeits- als auch Dauerhaftigkeitsgesichtspunkten nachzuweisen ist. Nach der zugrundeliegenden Philosophie wird ein „Kompositzement“ identifiziert, dessen Zusammensetzung der Bindemittel-

kombination der ATG [9] entspricht. An den zugelassenen Bindemittelkombinationen sind turnusmäßig die Mörteldruckfestigkeiten zu bestimmen.

2.3 Prinzip der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Bindemittelkombination

Das Prinzip der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Bindemittelkombinationen kommt in Großbritannien, Irland und Portugal zur Anwendung. In diesen Ländern wurde das Prinzip unabhängig voneinander auf Basis verschiedener Denkansätze entwickelt. In Großbritannien ist dieses Prinzip seit 1982 Gegenstand der nationalen Betonnorm BS 8500 [10, 11].

In Großbritannien geht man davon aus, dass ein definierter Zusatzstoff, der direkt dem Beton zugegeben wird, grundsätzlich in gleicher Weise funktionieren kann, wie wenn er indirekt als Hauptbestandteil eines Zements dem Beton zugegeben würde. Gemäß BS 8500 ist dieses Verfahren nur zulässig, wenn sowohl der definierte Zusatzstoff als auch der als Reaktionspartner vorgesehene Zement einer kontinuierlichen Überwachung unterliegen. Dieses von den Stoffeigenschaften und der Zusammensetzung

her definierte Gemisch wird als Kombination bezeichnet. Kombinationen werden im Vergleich zu Zementen gleicher Zusammensetzung und Festigkeitsklasse auch als gleichwertig angesehen. Kombinationen werden vollumfänglich auf den Zementgehalt und den w/z-Wert im Beton angerechnet. Kombinationen gelten nur für CEM I entsprechend EN 197-1 der Festigkeitsklasse 42,5 oder höher im Zusammenhang mit Flugasche nach EN 450-1, Glühverlustkategorie A oder B, Kalksteinmehl nach BS 7979 [12] und Hüttensandmehl nach EN 15167-1 [13].

Die Feststellung der Eignung der gewählten Kombination basiert auf Festigkeitsprüfungen an Mörtelprismen gemäß EN 196-1, ermittelt unter Verwendung von monatlichen Durchschnittsproben des CEM I und des gewählten Zusatzstoffs. Die Kombination soll:

- die Anforderungen an die Druckfestigkeit entsprechend EN 197-1 um ein festgelegtes Vorhaltemaß übertreffen,
- die obere Grenze der 28-Tage-Festigkeit entsprechend EN 197-1 bzw. EN 14216 nicht überschreiten.

Wenn die Festigkeitsanforderungen der Kombination erfüllt werden, ist das Mischungsverhältnis zulässig. Es wird ein Zertifikat bezogen auf den Zusatzstoff und den CEM I jeweils spezifischer Herkunft ausgestellt. Dieses Zertifikat enthält:

- die Kennzeichnung der Herkunft des Zusatzstoffs und des CEM I,
- Dokumentation der Probenahme für Zusatzstoff und CEM I,
- den Zeitraum für die Konformitätsbewertung, wenn dieser weniger als sechs Monate beträgt,
- die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen für die aktuelle Probenkombination mit Angabe des getesteten Mischungsverhältnisses,
- Angaben zu den zulässigen Mischungsverhältnissen und Festigkeitsklassen der Kombinationen, die den Anforderungen des Anhangs A von BS 8500-2 entsprechen und anwendbar sind.

Tafel 3: Gegenüberstellung der Zementarten mit den Hauptbestandteilen nach DIN EN 197-1 und den beantragten sowie für die Zulassungsprüfungen herzustellenden Bindemittelkombinationen [15–17]

Normzemente nach DIN EN 197-1				Bindemittelkombination im Beton			
Arten	Hauptbestandteile			Zulassungsantrag		Zulassungsprüfungen	
	K	S	V	Zement	FA	Zement	FA
CEM	Anteile [M.-%]						
I	95...100			≥ 70	≤ 30	65	35
II/B-V	65...79		21...35				
II/A-S	80...94	6...20		≥ 82	≤ 18	77	23
II/B-M(S-V)	65...79		21...35				

K: Portlandzementklinker als Hauptbestandteil von Zement nach DIN EN 197-1
 V: Kieselsäurereiche Flugasche als Hauptbestandteil von Zement nach DIN EN 197-1
 S: Hüttensand als Hauptbestandteil von CEM II/A-S nach DIN EN 197-1
 FA: Flugasche als Zusatzstoff für Beton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2

Tafel 4: Zusammensetzung der Feinbetone für die Carbonatisierungsversuche gemäß Prüfplan des DIBt [16, 17]

Betonausgangsstoffe	Bezugszement nach DIN EN 197-1	
	CEM II/B-V	CEM II/B-M(S-V)
CEM I 42,5 N	292,5 g	
CEM II/A-S 42,5 R		346,5 g
Flugasche	157,5 g	103,5 g
Verhältnis Zement/Flugasche	65 M.-%/35 M.-%	77 M.-%/23 M.-%
Gesteinskörnung, quarzitisches Sieblinie A/B 8	1350 g	
Wasser	225 g	
w/b-Wert	0,50	

3 Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen der BauMineral GmbH zur Herstellung von Beton mit Flugaschen EFA-Füller® nach dem Prinzip der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit

Gegenstand der folgenden Ausführungen ist die Anwendung kieseläurereicher Steinkohlenflugaschen, die von der BauMineral GmbH unter dem geschützten Markennamen EFA-Füller® vertrieben werden. Flugaschen EFA-Füller® entsprechen der Glühverlustkategorie A und der Feinheitkategorie N nach DIN EN 450-1 [14] und sind nach dieser Stoffnorm zertifiziert. Die Umweltverträglichkeit ist nach aktueller Rechtslage nachgewiesen. Damit erfüllen sie die Voraussetzungen um in Deutschland als Zusatzstoff vom Typ II für Beton nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 auf Basis des k-Wert-Konzepts in den meisten Fällen mit einem k-Wert von 0,4 auf den Zementgehalt angerechnet werden zu können.

3.1 Zulassungsverfahren

Das Zulassungsverfahren für die Anwendung der Flugaschen „EFA-Füller®“ nach dem Performance Concept orientierte sich an dem für Hüttensandmehl „Cemeko“ [6]. Beantragt wurde die Herstellung von Betonen im Betonwerk mit Bindemittelkombinationen aus definierten Flugaschen nach DIN EN 450-1 mit Portlandzementen CEM I oder Portlandhüttenzementen CEM II/A-S nach DIN EN 197-1 der Festigkeitsklasse 42,5 N oder höher entsprechend einem CEM II/B-V oder CEM II/B-M (S-V).

Die Flugasche sollte als Hauptbestandteil in einem „Kompositzement“ angesehen werden. Statt eines Wasserzementwerts w/z sollte ein Wasserbindemittelwert

w/b errechnet werden. Die nach den erteilten Zulassungen zusammengesetzten Betone sollten uneingeschränkt für alle Expositionsklassen eingesetzt werden können. Die wesentlichen Schritte des Zulassungsverfahrens sind in Tafel 2 dargestellt.

3.2 Vorprüfungen

Vor Beginn der Betonprüfungen wurden zunächst sämtliche Flugaschen und

Zemente auf Stoff- und Mörtel Ebene untersucht. Die Vorgehensweise war wie folgt:

- Chemische und physikalische Charakterisierung der ausgewählten Flugaschen und Zemente,
- Kombination aller Prüfzemente CEM I und CEM II/A-S mit allen Flugaschen die Gegenstand der Zulassungsanträge waren für Festigkeitsprüfungen an Mörteln zur Ermittlung der Aktivitätsindizes nach 28 d und 90 d gemäß DIN EN 450-1,
- Identifizierung der Zemente, die zu den niedrigsten Aktivitätsindizes und damit in Bezug auf die Flugaschen zu der niedrigsten Wirksamkeit führen (Zemente Z3 und Z9), zur Durchführung der nachfolgenden Dauerhaftigkeitsprüfungen (Bild 3).

Wie aus Bild 3 ersichtlich, führen die ausgewählten Zemente Z3 und Z9 zu Aktivitätsindizes der Flugasche, die unter den Mindestanforderungen der DIN EN 450-1

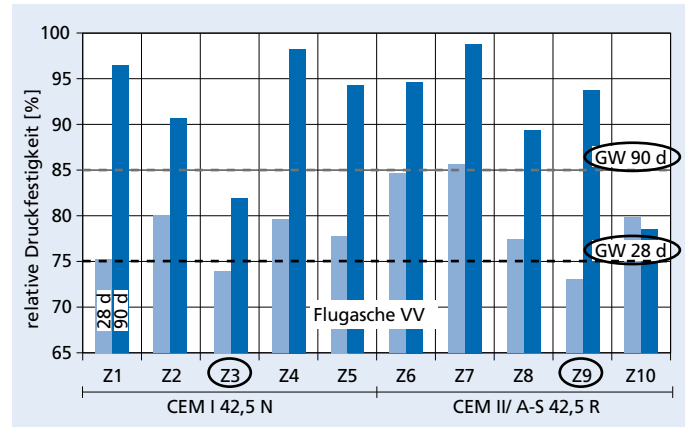


Bild 3: Aktivitätsindizes nach 28 d und 90 d exemplarisch für die Kombination einer Flugasche mit jeweils fünf Prüfzementen [16]

liegen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die ausgewählten und eingesetzten Zemente auch nicht die Anforderungen erfüllen, die an einen Referenzzement nach DIN EN 450-1 gestellt werden.

3.3 Dauerhaftigkeitsprüfungen

Für die Dauerhaftigkeitsprüfungen wurde vom Sachverständigenausschuss (SVA) des DIBt der im Hinblick auf die Aktivitätsindizes ungünstigste Prüfzement CEM I (Z3) bzw. CEM II/A-S (Z9) ausgewählt. Die Dauerhaftigkeitsprüfungen wurden für folgende Expositionsklassen durchgeführt:

- Carbonatisierung (XC4),
- Frost-Tauwechselbeanspruchung ohne Tausalz (XF3),
- Frost-Tauwechselbeanspruchung mit Tausalz (XF4),
- Chloridangriff (XD3).

Für Meerwasserangriff, chemischen Angriff und Verschleißbeanspruchung wurden keine Nachweise gefordert.

Abgesehen von den an Mörtelprismen durchzuführenden Carbonatisierungsprüfungen wurden jeweils die Bindemittelgehalte und Wasserbindemittelwerte vorgegeben, die mit den Mindestzementgehalten und maximalen w/z-Werten der maßgebenden Expositionsklassen korrespondieren. In Bezug auf die beantragten Bindemittelkombinationen war für die Herstellung der Prüfbetone der maximal zulässige Flugaschegehalt um 5 % zu erhöhen und der minimal erforderliche Zementgehalt um 5 % zu reduzieren (Tafel 3).

4 Ergebnisse der Zulassungsprüfungen

4.1 Nachweis des Carbonatisierungswiderstands

Es wurden Prismen in Anlehnung an DIN EN 196-1 [18] hergestellt. Als Gesteinskörnung wurde Quarzsand/-Kies nach DIN EN 12620 [19] verwendet, der entsprechend der Sieblinie A/B 8 nach DIN 1045-2 zusammengesetzt war. Als Prüfzemente wurden die ausgewählten CEM I 42,5 N und CEM II/A-S 42,5 R eingesetzt. Die Zusammensetzung der Feinbetone ist Tafel 4 zu entnehmen [16, 17].

Tafel 5: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an Prismenhälften für beide Feinbetone bei zwei unterschiedlichen Lagerungsvarianten [16, 17]

Bezugszement CEM II/B-V: 65 M.-% CEM I, 35 M.-% Flugasche, w/b-Wert = 0,50						
Prüfalter [d]	Variante V7			Variante V28		
	Prismendruckfestigkeit [N/mm ²] ¹⁾					
	Min.	Max.	Mittel	Min.	Max.	Mittel
7	24,4	28,0	26,3			
28				39,0	43,1	40,4
35	40,3	44,3	42,8	44,0	47,1	45,7
147	44,0	51,4	47,9			
168				54,7	59,0	57,0
Bezugszement CEM II/B-M(S-V): 77 M.-% CEM II/A-V, 23 M.-% Flugasche, w/b-Wert = 0,50						
Prüfalter [d]	Variante V7			Variante V28		
	Prismendruckfestigkeit [N/mm ²] ¹⁾					
	Min.	Max.	Mittel	Min.	Max.	Mittel
7	29,1	33,5	30,7			
28				38,1	48,7	45,0
35	45,5	50,7	48,7	49,7	54,2	52,8
147	47,0	56,3	52,2			
168				63,2	67,3	65,5

¹⁾ Mittelwerte aus sechs Einzelwerten ermittelt an sechs Prismenhälften aus einem dreier Prismensatz je Beton bei fünf verschiedenen Betonen mit fünf verschiedenen Flugaschen

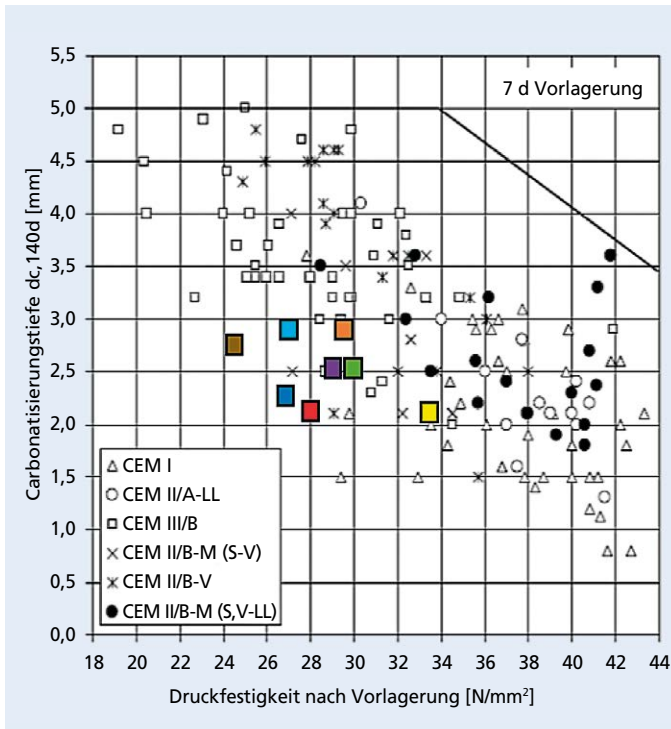


Bild 4: Aktuelle Prüfergebnisse zur Carbonatisierungstiefe nach 147 d im Vergleich zu historischen Messwerten abhängig von der Betondruckfestigkeit bei 7 d Wasserlagerung [16]

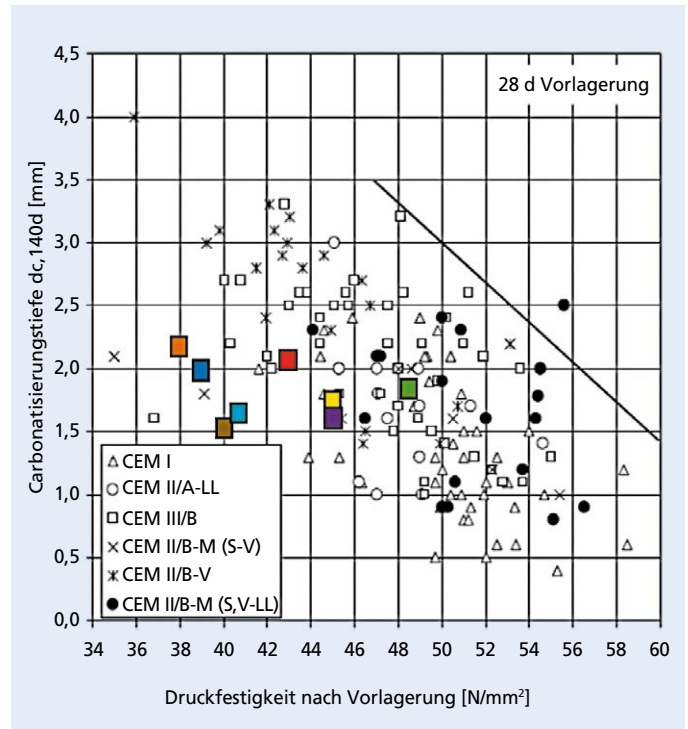


Bild 5: Aktuelle Prüfergebnisse zur Carbonatisierungstiefe nach 147 d im Vergleich zu historischen Messwerten abhängig von der Betondruckfestigkeit bei 28 d Wasserlagerung [16]

Die Lagerung der Probekörper erfolgte jeweils in zwei Varianten:

- Variante V7: 7-d-Wasserlagerung bei 20 °C, danach im Normalklima bei 20 °C Lufttemperatur und 65 % relativer Luftfeuchte,
 - Variante V28: 28-d-Wasserlagerung bei 20 °C, danach im Normalklima wie zuvor.
- Die Messung der Carbonatisierungstiefen erfolgt(e) jeweils im Alter von 14 d, 28 d, 56 d, 98 d und 140 d sowie nach 1 a, 2 a und 5 a. Zusätzlich wurden die Druckfestigkeiten beider Feinbetone an Prismenhälften im Alter von 7 d (V7) bzw. 28 d (V28), nach

35 d sowie nach 147 d (V7) bzw. 168 d (V28) bestimmt (Tafel 5).

Die Ergebnisse der nach 140 d vorliegenden Carbonatisierungsmessungen sind für die beiden unterschiedlichen Lagerungsvarianten in den Bildern 4 und 5 dargestellt. Die farbigen Quader repräsentieren die aktuellen Prüfergebnisse, die schwarz-weißen Markierungen stehen für historische Prüfergebnisse. Die von links nach rechts zunächst horizontal verlaufende und dann nach unten abknickende Linie markiert den Bereich, innerhalb dessen die Carbonatisierungstiefen abhängig von der Betondruckfestigkeit

liegen müssen. Je tiefer ein Punkt bei dieser Darstellung liegt, desto geringer ist die Carbonatisierungstiefe.

Es ist ersichtlich, dass die aktuellen Prüfergebnisse im unteren Drittel der „Punktwolke“ liegen und somit die auf die Betondruckfestigkeit bezogene Carbonatisierungswiderstände höher sind als im Durchschnitt bei den „historischen Betonen“. Damit ist nachgewiesen, dass die gemäß Prüfplan auf der sicheren Seite liegend zusammengesetzten Betone mit allen hier verwendeten Flugaschen die Anforderungen an den Carbonatisierungswiderstand gemäß XC4 erfüllen.

Tafel 6: Zusammensetzung der Betone für die Frost-Tauwechselversuche mit dem CIF-Verfahren sowie Würfeldruckfestigkeiten nach 28 d [15–17]

Beton Ausgangsstoffe	Bezugszement nach DIN EN 197-1		
	CEM II/B-V	CEM II/B-M(S-V)	
CEM I 42,5 N	208 kg/m³		
CEM II/A-S 42,5 R		246,4 kg/m³	
Flugasche	112 kg/m³	73,6 kg/m³	
Verhältnis Zement/Flugasche	65 M.-%/35 M.-%	77 M.-%/23 M.-%	
Gesteinskörnung, quarzitisches Sieblinie A/B 16	1867 kg/m³	1875 kg/m³	
Wasser	160 kg/m³		
W/B-Wert	0,50		
Würfeldruckfestigkeit, 28 d [N/mm²]	Min ¹⁾	Max ¹⁾	Mittel
	45,2	54,5	47,6
	Min ¹⁾	Max ¹⁾	Mittel
	48,7	55,6	51,4

¹⁾ Jeweils Mittelwerte aus drei Einzelwerten

4.2 Nachweis des Frost-Tauwechselwiderstands ohne Tausalz

Der Frost-Tauwechselwiderstand ohne Tausalzeinwirkung war nach dem Prüfplan mit dem CIF-Verfahren nachzuweisen [15]. Zusätzlich wurde die Betondruckfestigkeit im Alter von 28 d bestimmt. Sowohl für die CIF-Versuche als auch für die Druckfestigkeitsprüfungen wurden Würfel mit 150 mm Kantenlänge hergestellt. Die Lagerung erfolgte zunächst 7 d unter Wasser bei 20 °C, danach an der Luft bei 20 °C sowie 65 % relativer Luftfeuchtigkeit. Die Zusammensetzung der Betone sowie die ermittelten Würfeldruckfestigkeiten sind in Tafel 6 dargestellt. Ein Luftporenbildner zur Erzeugung von kapillarbrechenden Mikroluftporen wurde zunächst nicht eingesetzt.

Obgleich die Druckfestigkeiten der pessimal zusammengesetzten Betone im Bereich der Festigkeitsklasse C35/45 lagen, wurde die mit dem CIF-Verfahren verbundene

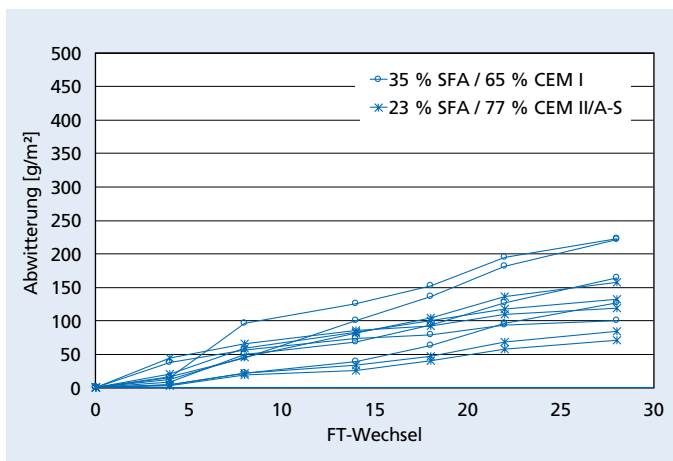


Bild 6: Abwitterungen (CIF-Verfahren) bis 28 Frost-Tauwechsel der gemäß Tafel 6 zusammengesetzten LP-Betone [16, 17]

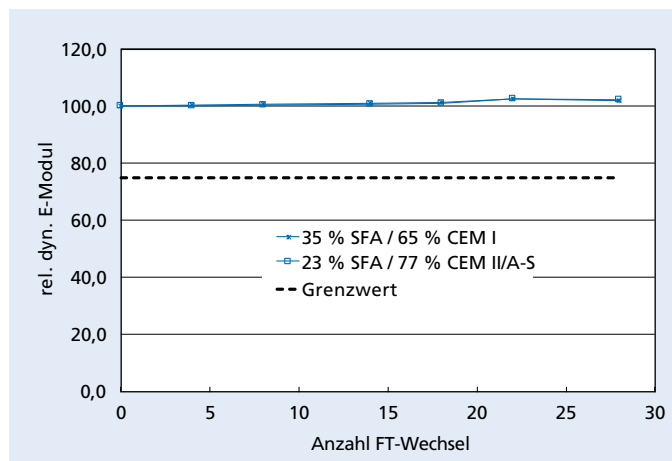


Bild 7: Entwicklung der gemittelten relativen dynamischen E-Moduli bis 28 Frost-Tauwechsel der gemäß Tafel 6 zusammengesetzten LP-Betone [16, 17]

Anforderung an den Abfall des dynamischen E-Moduls auf maximal 75 % überwiegend nicht erfüllt.

Auf Empfehlung des SVA wurden daraufhin die gemäß Tafel 6 zusammengesetzten Betone erneut hergestellt, jedoch zusätzlich unter Verwendung eines Luftporenbildners. Die Luftporenbetone wurden dann erneut nach dem CIF-Verfahren geprüft. Die Abwitterungsraten der Betone

nach 28 Frost-Tauwechseln waren insgesamt sehr gering (Bild 6). Ein Abfall des dynamischen E-Moduls war nun kaum noch feststellbar (Bild 7).

Für den sicheren Nachweis des Frost-Tauwechselwiderstands entsprechend der Expositionsklasse XF3 mit dem CIF-Verfahren sollten somit gemäß Tafel 6 zusammengesetzte Betone als Luftporenbetone hergestellt werden.

4.3 Nachweis des Frost-Bauwechselwiderstands bei Tausalzangriff

Zum Nachweis des Frost-Tausalzwanstandes war gemäß Prüfplan das CDF-Verfahren anzuwenden [15]. Zusätzlich wurde die Ermittlung der Betondruckfestigkeit im Alter von 28 d und 56 d gefordert. Für die CDF-Versuche sowie für die Bestimmung der LP-Kennwerte und der Druckfestigkeiten wurden Würfel mit 150 mm Kanten-

Tafel 7: Zusammensetzung der Betone für die Frost-Tausalz-Versuche mit dem CDF-Verfahren, Würfeldruckfestigkeiten, Luftporenkennwerte und Wassereindringtiefen nach 28 d [16, 17]

Ausgangsstoffe	Kombinationen angelehnt an Normzemente						Referenzzemente nach EN 197-1	
	CEM II/B-V			CEM II/B-M (S-V)			CEM II/B-V 32,5 R	CEM II/B-M (S-V) 32,5 N
CEM I 42,5 N	208 kg/m ³							
CEM II/A-S 42,5 R	246,4 kg/m ³							
CEM II/B-V 32,5 R							320 kg/m ³	
CEM II/B-M (S-V) 32,5 N								320 kg/m ³
Flugasche EFA-Füller	112 kg/m ³			73,6 kg/m ³				
Zement/Flugasche	65 M.-%/35 M.-%			77 M.-%/23 M.-%			21...35 M.-%/79...65 M.-%	k.A.
Gesteinskörnung, quarzitisch, Sieblinie A/B 16	1789 kg/m ³			1796 kg/m ³			1815 kg/m ³	1815 kg/m ³
Luftporenbildner [% v.z.]	0,1...0,13			k.A.			k.A.	k.A.
Wasser	160 kg/m ³			160 kg/m ³			160 kg/m ³	160 kg/m ³
w/b-Wert	0,50			0,50			0,50	0,50
Festbetonkennwerte	Min ¹⁾	Max ¹⁾	Mittel ¹⁾	Min ¹⁾	Max ¹⁾	Mittel ¹⁾	Mittelwert ²⁾	Mittelwert ²⁾
Würfeldruckfestigkeit nach 28 d [N/mm ²]	32,5	36,5	34,1	36,5	43,7	39,6	38,5	46,5
nach 56 d [N/mm ²]	35,9	39,9	38,0	38,5	47,7	43,9	43,2	50,9
Gesamtluftgehalt A [Vol.-%]	4,12	5,08	4,67	4,36	5,92	4,92	5,55	3,89
Mikroluftporengehalt A300 [Vol.-%]	1,61	3,46	2,61	2,35	3,38	2,87	2,54	1,62
Abstandsfaktor L [mm]	0,13	0,22	0,16	0,12	0,17	0,15	0,17	0,29
Wassereindringtiefe nach 28 d [mm]	12	23	18,5	12	19	14,5	15	15
Abwitterungsmenge nach 28 FTSW [g/m ²]	522	1082	800	627	1132	861	522	671
Relativer dynamischer E-Modul nach 28 FTSW [%]	98,9	101,1	99,7	95,0	100,9	97,9	97,9	99,4

¹⁾ Bezogen auf den Mittelwert einer Serie

²⁾ Mittelwert aus drei Einzelwerten

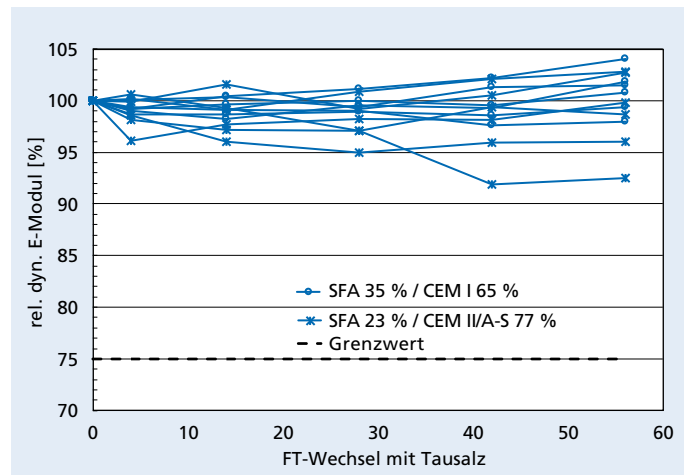
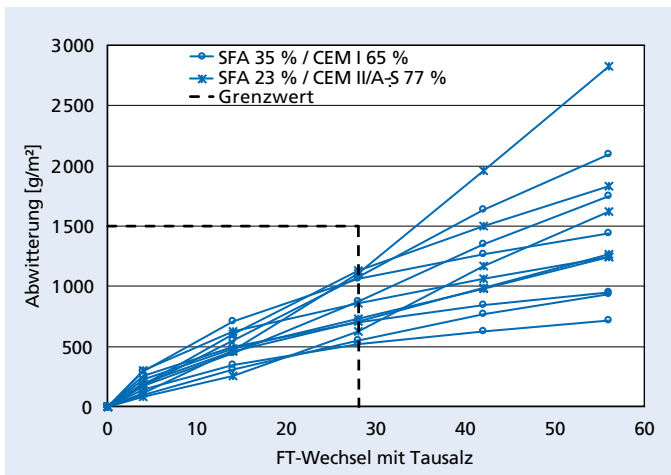


Bild 8: Abwitterungen der gemäß Tafel 7 zusammengesetzten LP-Betone bis 56 Frost-Tauwechsel (CDF-Verfahren) [16, 17]

Bild 9: Entwicklung der relativen dynamischen E-Moduli der gemäß Tafel 7 zusammengesetzten LP-Betone bis 56 Frost-Tauwechsel (CDF-Verfahren) [16, 17]

länge hergestellt, für die Wassereindringversuche so genannte „Wasserplatten“ mit den Abmessungen 200 mm × 200 mm × 120 mm. Die Lagerung erfolgte zunächst 7 d unter Wasser bei 20 °C, danach an der Luft bei 20 °C sowie 65 % relativer Luftfeuchtigkeit. Die Zusammensetzung der Betone sowie die ermittelten Prüfergebnisse sind in Tafel 7 dargestellt.

Wie die Luftporenkennwerte zeigen, gab es bei keiner Betonzusammensetzung Probleme mit der Wirksamkeit des Luftporenbildners, sodass die Anzahl und Verteilung der Mikroluftporen in allen Fällen ausreichend war. Somit wurde die mit dem CDF-Verfahren verbundene Anforderung an die Frosttausalz widerstandsfähigkeit – Abwitterung < 1500 g/m² nach 28 Frost-Tauwechseln – auch von allen Betonen sicher erfüllt (Bild 8). Der Abfall des relativen dynamischen E-Moduls war auch nach 56 Frost-Tauwechseln bei allen Betonen sehr gering bis nicht feststellbar (Bild 9).

4.4 Nachweis des Chloridwiderstands

Der Chloridmigrationskoeffizient $D_{Cl,M}$ war mit dem Schnellverfahren gemäß DAfStb-

Heft 510 zu bestimmen [15]. Dieser durfte $25 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ nicht überschreiten. Die Zusammensetzungen der geprüften Betone sowie die Mittelwerte der bestimmten Chloridmigrationskoeffizienten sind in Tafel 8 dargestellt. Die ermittelten Prüfergebnisse unterschreiten deutlich den für die Chloridmigration höchstzulässigen Grenzwert von $25 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

5 Inhalt und Anwendungsbereich der Zulassungen

Auf Basis der vorliegenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen können Flugaschen EFA-Füller® nach Tafel 9 zur Herstellung von Beton nach DIN 1045-2/DIN EN 206-1, Abs. 5.2.5.3 nach dem Prinzip der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit eingesetzt werden. Die Zulassungen gelten für alle Expositions- und Festigkeitsklassen ohne Einschränkungen bezüglich Gesteinskörnungen und Zusatzmittel.

Damit können im Betonwerk Kombinationen aus Zement und Flugasche „gemischt“ werden, die einem Portlandflugaschezement CEM II/A-V oder CEM II/B-V oder einem Portlandkompositzement CEM II/B-M (S-V) entsprechen (Tafel 10).

- Die Flugaschen werden als Hauptbestandteil des Bindemittels angesehen. Der Begriff Mindestzementgehalt wird durch Mindestbindemittelgehalt ersetzt.
- Die Herkunft der Portland- bzw. Portlandhüttenzemente nach DIN EN 197-1 gemäß Tafel 10 ist beliebig.
- Die Summe von Zement und Flugasche gemäß Tafel 10 muss mindestens den Mindestzementgehalt gemäß DIN 1045-2/DIN EN 206-1, Tabellen F.3.1 bzw. F.3.2, entsprechen.
- Für die Festlegung der Betonzusammensetzung ist stets eine Erstprüfung durchzuführen.
- Auf dem Betonlieferschein ist zusätzlich die Nummer der angewendeten Zulassung anzugeben.

6 Umsetzung in der Praxis

Mit der Anwendung des Prinzips der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit gemäß den beschriebenen und erteilten Zulassungen geht der Betonhersteller eine höhere Verantwortung ein, insbesondere dann, wenn er die Zulassungen zur Optimierung „praxisüblicher Normrezepturen“ nutzen möchte. Ein Beton, bei dem ein Zusatzstoff mit einem k-Wert von 0,4 angerechnet wird, enthält weniger Wasser als ein Beton bei dem der Zusatzstoff unter ansonsten gleichen Bedingungen mit $k = 1$, also zementgleich, in die Bestimmung des w/z-Werts eingegangen ist. Bei praxisüblichen Normalbetonen beträgt diese Differenz ca. 20 l/m³ bis 30 l/m³. Die damit verbundenen Auswirkungen auf die Qualität muss der Betonhersteller natürlich einschätzen können und diesen ggf. durch Einsatz leistungsstärkerer Zemente und Mischtechnik, genauere Dosierung insbesondere auch in Bezug auf den wirksamen Wassergehalt sowie erhöhtem Überwachungs- und Prüfaufwand entgegenwirken.

In Bild 10 sind den Verfassern bekannte Ergebnisse aus Praxisversuchen in Transportwerken dargestellt. Zu ca. 60 % entsprachen die nach 28 d ermittelten Würfeldruckfestigkeiten den projektierten Beton-

Tafel 8: Betonzusammensetzungen und ermittelte Chloridmigrationskoeffizienten $D_{Cl,M}$ [16, 17]

Ausgangsstoffe	Bezugszement nach DIN EN 197-1					
	CEM II/B-V			CEM II/B-M(S-V)		
CEM I 42,5 N	208 kg/m ³					
CEM II/A-S 42,5 R	246,4 kg/m ³					
Flugasche	112 kg/m ³			73,6 kg/m ³		
Verhältnis Zement/Flugasche	65 M.-%/35 M.-%			77 M.-%/23 M.-%		
Gesteinskörnung, quarzitisches Sieblinie A/B 8	1867 kg/m ³			1875 kg/m ³		
Wasser	160 kg/m ³					
W/B-Wert	0,50					
Chloridmigrationskoeffizient $D_{Cl,M}$ nach 35 d [m ² · 10 ⁻¹²]	Min ^{x)}	Max ^{x)}	Mittel	Min ^{x)}	Max ^{x)}	Mittel
	6,5	18	10,5	4,9	18	12,2
$D_{Cl,M}$ nach 97 d [m ² · 10 ⁻¹²]	Min ^{x)}	Max ^{x)}	Mittel	Min ^{x)}	Max ^{x)}	Mittel
	2,0	7,8	3,5	1,9	4,5	3,6

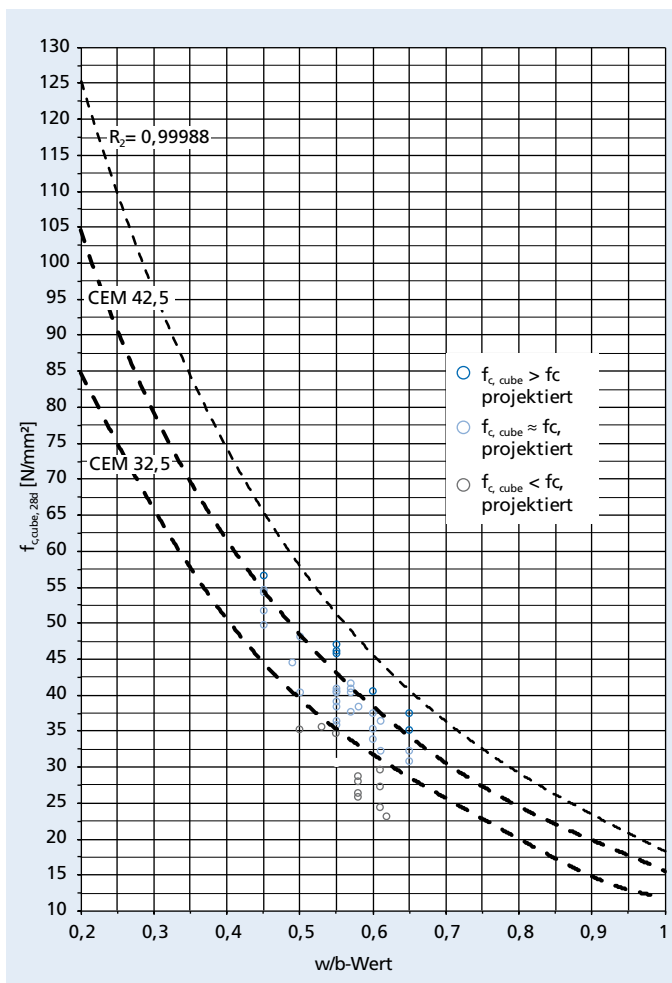


Bild 10: In Praxisversuchen erzielte Betondruckfestigkeiten an Betonen, die gemäß den erteilten Zulassungen zusammengesetzt waren

druckfestigkeiten. In ca. 25 % der Fälle wurden die projektierten Druckfestigkeiten nicht erreicht. Ca. 15 % der ermittelten Würfel­druckfestigkeiten lagen über den projektierten Betondruckfestigkeiten.

Die gleichen nach den vorliegenden Zulassungen unter Praxisbedingungen hergestellten Betone zeigten hohe Ausbreit­maße, guten Zusammenhalt und lange Konsistenzhaltung.

7 Bewertung, Ausblick, Zusammenfassung

Schwerpunkt des Berichts ist das Verfahren zur Erlangung allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen, um Flugaschen EFA-Füller® nach dem „Prinzip der gleichwertigen Beton­leistungsfähigkeit“ nach DIN EN 206-1/ DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.3, potenziell­gerecht als Betonzusatzstoff einsetzen zu können. In Vorversuchen wurden zunächst die ungünstigsten Zement-Flugaschekombinationen ermittelt. Mit den Zementen, die zu den niedrigsten Aktivitätsindizes führten, wurden dann an Betonen die Widerstände gegen Carbonatisierung, Frost-Tauwechsel ohne und mit Tausalz sowie Chloridmigration ermittelt und den Anforderungen gegenübergestellt.

Der Betonhersteller kann mit diesen Zulassungen Kombinationen aus beliebigen

CEM I 42,5 und 52,5 und Flugaschen EFA-Füller im Betonwerk einen CEM II/B-V sowie mit beliebigen Kombinationen aus CEM II/A-S 42,5 und 52,5 und Flugaschen EFA-Füller® einen CEM II/B-M (S-V) abbilden. Beide Kombinationen sind uneingeschränkt für alle Expositionsklassen anwendbar. Der Betonhersteller ist dafür verantwortlich, innerhalb der Grenzen der Zulassungen die Betonausgangsstoffe so zu kombinieren, dass die Anforderungen an den Beton erfüllt werden. Der Nachweis erfolgt im Rahmen einer Erstprüfung durch Bestimmung der Betondruckfestigkeit nach im Alter von 28 d. Die Praxis­tauglichkeit der so hergestellten Betone ist unstrittig. Dies gilt insbesondere auch für ihre Verarbeitbarkeit.

Die für Flugaschen-EFA-Füller erteilten Zulassungen

sind eine Alternative zum Einsatz eines Betonzusatzstoffs nach dem k-Wert-Konzept, bei dem sich aus Sicherheitsgründen die Höhe des k-Werts sowie die auf den Zementgehalt anrechenbare Menge an den Zementarten mit dem geringsten Klinkergehalt orientiert. Dies sind Zementarten, bei denen der Zementklinker als reaktive Komponente bereits im Zement in erheblichem Maße durch andere Hauptbestandteile substituiert wurde. Somit lässt der Einsatz eines Stoffs als Betonzusatz nach dem k-Wert-Konzept die partielle Substitution von Zement in geringerem Maße zu, verglichen mit der zulässigen Substituierbarkeit von Zementklinker bei Einsatz des gleichen Stoffs als Hauptbestandteil im Zement (s. Tafel 1).

Damit reduziert sich auch die Möglichkeit, eine Betonzusammensetzung im Beton-

Tafel 9: Nach dem Prinzip der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit einsetzbare Flugaschen [20–25]

EFA-Füller®	Kraftwerk	Zulassungs-Nr.
WH	Wilhelmshaven	Z-3.34-2092
HP	Heyden	Z-3.34-2064
HM	Mehrum	Z-3.34-2094
S-MA	Scholven ¹⁾	Z-3.34-2091
SG 5	Staudinger	Z-3.34-2093
W-D/E	Westfalen	Z-3.34-2124

¹⁾ Misch- und Aufbereitungsanlage der BauMineral GmbH

werk unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit zu optimieren. Hinzu kommt, dass die Mehrzahl der Stoffe, die derzeit als Zementhauptbestandteil eingesetzt werden können, in der Betonnorm als Zusatzstoffe nicht genannt werden oder nicht angerechnet werden dürfen, da entsprechende Stoffnormen nicht existieren.

Die technisch-formalen Randbedingungen für die Substitution von Zementklinker im Zement durch andere Hauptbestandteile schafft die Zementnorm. Der Nachweis der Leistungsfähigkeit der klinker­reduzierten Zemente und damit indirekt der zulässigen Zementklinkersubstitutionsraten beschränkt sich im Wesentlichen auf die Druckfestigkeit. Die Betonnorm lässt die Mehrzahl der Zemente für alle Expositionsklassen zu, ungeachtet ihrer tatsächlichen Leistungsmerkmale. Damit sind jedoch lediglich die Voraussetzungen gegeben, um Zemente z.B. „CO₂-neutraler“ zu konfigurieren. Bei Einsatz des gleichen Stoffs als Zusatzstoff im Beton wird sein Potenzial geringer bewertet als bei Einsatz als Hauptbestandteil in einem Zement. Die einzige Möglichkeit, einen Beton mit Zusatzstoffen zu optimieren, bietet eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung auf Basis von Abs. 5.2.5.3 von DIN 1045-2.

Da Stahl- und Spannbetonbauteile komplexe Systeme sind, deren Umweltwirkung nicht nur von einem einzigen Ausgangsstoff abhängig ist, sollte zunächst das Bauteil unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten optimiert werden und danach die Baustoffe Beton und Bewehrungsstahl aus denen das Bauteil besteht. Diese Aufgabe müsste der Planungsingenieur als Systemverantwortlicher übernehmen. Die derzeitige Entwicklung geht jedoch dahin, die Optimierungsaufgabe vom Bauteil auf den Baustoff Beton und von dort auf den Betonausgangsstoff Zement zu verlagern.

Tafel 10: Zulässige Bindemittelkombinationen zur Abbildung der Kompositzemente

Bindemittelkombination gemäß einem			
CEM II/A-V, CEM II/B-V		CEM II/B-M (S-V)	
CEM I 42,5 oder 52,5 ≥ 70 M.-%	EFA-Füller® ≤ 30 M.-%	CEM II/A-S 42,5 oder 52,5 ≥ 82 M.-%	EFA-Füller® ≤ 18 M.-%

Zusätzliches Optimierungspotenzial gerade auch unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten würde eine Verschiebung des Betonalters zum Nachweis der Druckfestigkeit aber auch verschiedener Dauerhaftigkeitseigenschaften von 28 d auf 56 d oder sogar 90 d schaffen. Damit würde die verzögerte Festigkeitsentwicklung berücksichtigt, die bei der Kombination von puzzolanschen und latent hydraulischen Stoffen mit Zementklinker auftritt.

Literatur

- Abschnitt 5.2.5.3 von DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2. DIBt, 13.10.2016
- [7] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.34-2020: Kalksteinmehl der Rombold & Gfröhler GmbH & Co. KG zur Verwendung nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.3. DIBt, 09.05.2016
- [8] BRL 1802: 2016-06-24: Beoordelingsrichtlijn voor het KOMO Attest voor vulstof en/of cementbeton
- [9] ATG 6063: Technische Goedkeuring ATG met Certificatie: Hydraulische Bindmiddelen en toevoegsels: Vliegias voor beton EFA-Füller® MR 3. BÜTgb, 30.07.2018
- [10] BS 8500-1+A2:2015-12-22: Complementary British Standard to BS EN 206: Method of specifying and guidance for the specifier
- [11] BS 8500-2+A2:2015-12-22 "Complementary British Standard to BS EN 206: Specification for constituent materials and concrete"
- [12] BS 7979:2016-01-31 "Specification for limestone fines for use with Portland cement"
- [13] BS EN 15167-1:2006-10-31 "Ground granulated blast furnace slag for use in concrete, mortar and grout – Definitions, specifications and conformity criteria"
- [14] DIN EN 450-1:2012-10 „Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien“
- [15] Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Flugasche für die Verwendung als Betonzusatzstoff – abweichend von den Regelungen nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2. DIBt, Februar 2013
- [16] Zulassungsprüfung von Flugasche für die Verwendung als Betonzusatzstoff – abweichend von den Regelungen nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2: Schlussbericht – Flugaschen HP, WH, SMA, SG5, HM: Projekt Z 12 – 06 – 2015, 02.06.2015 (unveröffentlicht), Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik
- [17] Zulassungsprüfung von Flugasche für die Verwendung als Betonzusatzstoff – abweichend von den Regelungen nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2: Schlussbericht – Flugasche W-D/E: Projekt Z 12 – 04 – 2016, 21.04.2016 (unveröffentlicht), Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik
- [18] DIN EN 196-1:2016-11: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
- [19] DIN EN 12620:2008-07 + A1:2008 „Gesteinskörnungen für Beton“
- [20] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.34-2064: Flugasche „EFA-Füller HP“ der BauMineral GmbH zur Verwendung nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.3 BauMineral GmbH. DIBt, 01.04.2019
- [21] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.34-2091: Flugasche „EFA-Füller S-MA“ der BauMineral GmbH zur Verwendung nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.3; DIBt, 25.06.2015
- [22] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.34-2092: Flugasche „EFA-Füller WH“ der BauMineral GmbH zur Verwendung nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.3. DIBt, 25.06.2015
- [23] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.34-2094: Flugasche „EFA-Füller HM“ der BauMineral GmbH zur Verwendung nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.3. DIBt, 25.06.2015
- [24] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.34-2093: Flugasche „EFA-Füller SG 5“ der BauMineral GmbH zur Verwendung nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.3. DIBt, 25.06.2015
- [25] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.34-2124: Flugasche „EFA-Füller W-D/E“ der BauMineral GmbH zur Verwendung nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2, Abschnitt 5.2.5.3. DIBt, 10.05.2016
- [1] DIN EN 197-1:2011-11: „Zement Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement“
- [2] DIN EN 206-1:2001-07 „Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“
- [3] DIN 1045-2:2008-08 „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1“
- [4] DIN CEN/TR 16639:2014-06; DIN SPEC 18096:2014-06 „k-Wert-Ansatz, Prinzipien des Konzepts der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit und Konzept der gleichwertigen Leistungsfähigkeit von Kombinationen aus Zement und Zusatzstoff“; Englische Fassung CEN/TR 16639:2014
- [5] Hårdtl, R.: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften. DAfStb Heft 448
- [6] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.34-1977: Hüttensandmehl „Cemeko“ zur Verwendung nach