

## Ergebnisse von Labor- und Praxisversuchen

# Frostwiderstand von Luftporenbeton mit Flugasche

Wolfgang Brameshuber, Aachen; Frank Spörel, Karlsruhe; Heinz-Peter Backes und Matthias Meißner, Herten

Die gezielte Einstellung der für den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand relevanten Luftporenkennwerte ist häufig mit Schwierigkeiten verbunden. Die Ursachen können Wechselwirkungen zwischen den Ausgangsstoffen wie auch Randbedingungen bei der Herstellung, dem Transport und dem Einbau sein. Der Einfluss des Betonzusatzstoffs Flugasche ist in einem umfangreichen Versuchsprogramm am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) ermittelt worden. Basierend auf vorangegangenen Grundlagenforschungen wurden Reihenuntersuchungen an verschiedenen Chargen einer bestimmten Flugasche sowie vergleichende Versuchsreihen an Suspensionen, Mörteln und Betonen mit und ohne Flugasche durchgeführt. Der Beitrag beschreibt die Untersuchungen und deren Ergebnisse.

### 1 Luftporenbeton – Stand der Technik

Zur Sicherstellung eines ausreichenden Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands werden in Betonen durch Zugabe von Luftporenbildnern (LP) gezielt geschlossene Mikroluftporen erzeugt. Im erhärteten Beton unterbrechen diese Mikroluftporen das Kapillarporensystem und so die für eine schadenskritische Wassersättigung verantwortlichen Transportvorgänge. Voraussetzung für die Wirksamkeit eines Luftporenbildners ist eine ausreichende Anzahl gleichmäßig verteilter Mikroluftporen im Frischbeton, die von der Herstellung über den Transport, die Förderung und den Einbau bis zur Erhärtung stabil bleiben. Die Luftporenbildung und -stabilität werden von vielen Randbedingungen beeinflusst. Grundsätzlich können sowohl einzelne Ausgangsstoffe als auch die Wechselwirkungen zwischen mehreren Stoffen zu Verträglichkeitsproblemen innerhalb des Betonsystems führen. Besonders beim Luftporenbeton können sich schwankende Ausgangsstoff-

eigenschaften verstärkt auf die relevanten Frischbeton- und Festbetoneigenschaften auswirken. Dies kann dazu führen, dass der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand eines Betons fraglich ist, obwohl seine Zusammensetzung die Anforderungen an die Expositionsklasse XF2 bis XF4 nach DIN EN 206-1/A2:2005-09 [1] in Verbindung mit DIN 1045-2:2008-08 [2] erfüllt.

Im Zuge umfangreicher Forschungsaktivitäten wurde nachgewiesen, dass Betone, bei denen die Flugasche auf den Wasserzement angerechnet wird, bei Einhaltung weiterer Anforderungen an die Betonzusammensetzung einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand haben [3, 4]. Mit Aufnahme der entsprechenden Regelungen der im Juni 2008 bauaufsichtlich eingeführten DIN 1045-2 [2] entspricht die Anrechnung von Flugasche auf den Wasserzementwert bei den Expositionsklassen XF2 und XF4 nunmehr ebenfalls dem Stand der Technik.

Das Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton der For-

### Die Autoren:

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Brameshuber** studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Karlsruhe, wo er 1988 promoviert wurde. Von 1989 bis 1991 war er Mitarbeiter des Ingenieurbüros BUNG in Heidelberg und ab 1991 im Zentralen Labor für Baustoffe und Bauwerkserhaltung der Bilfinger Berger AG, Mannheim, tätig. Von 1992 bis 1998 arbeitete er als Handlungsbevollmächtigter und Leiter des Zentralen Labors in Mannheim und der Baustofflabore in Wiesbaden (Auslandsbereich) und Leipzig. Seit 1999 ist Wolfgang Brameshuber Professor und Leiter des Instituts für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen und RILEM-Delegierter für Deutschland.

**Dipl.-Ing. Frank Spörel** war nach seinem Studium des Bauingenieurwesens an der RWTH Aachen zwischen 2001 und 2008 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen beschäftigt. Seit 2008 ist er in Karlsruhe bei der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) im Referat Baustoffe der Abteilung Bautechnik tätig.

**Dr.-Ing. Heinz-Peter Backes** studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen. Von 1980 bis 1986 war er Wissenschaftlicher Angestellter und Akademischer Rat am Lehrstuhl für Baustoffkunde und Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac), Leiter der Arbeitsgruppe „Bindemittel“ mit den Schwerpunkten „Zusatzstoffe für Beton und andere Baustoffe“ und „Dauerhaftigkeit von Beton“. Im Jahr 1985 wurde er promoviert. Von 1986 bis 1989 war er Mitarbeiter der VEBA Kraftwerke Ruhr AG (VKR) in der Abteilung Reststoffverwertung. Seit 1990 ist Heinz-Peter Backes Geschäftsführer der BauMineral GmbH, Vorsitzender des Bundesverbands Kraftwerksnebenprodukte e.V. (BVK) und Governing Board Member of the European Coal Combustion Products Association e.V. (ECOBA).

**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.

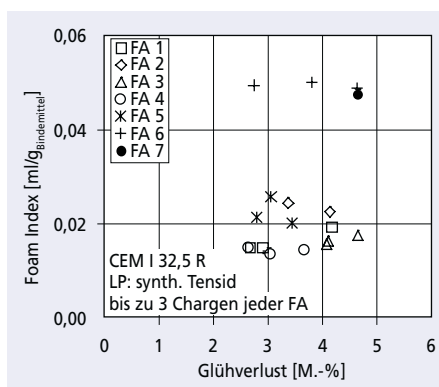


Bild 1: Zusammenhang zwischen Foam Index und Glühverlust [10]

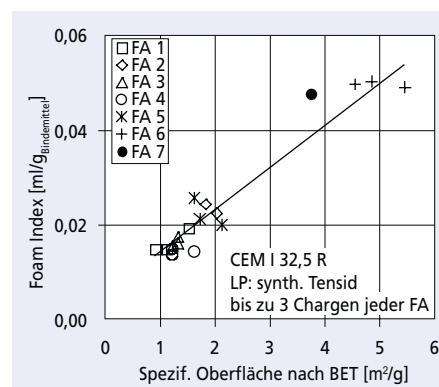


Bild 2: Zusammenhang zwischen Foam Index und spezifischer Oberfläche nach BET [10]

schungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) [5] behandelt die vielfältigen Einflüsse auf die Luftporenbildung und gibt Hinweise für eine sichere Herstellung von Luftporenbeton. Trotzdem treten heute in der Praxis noch Schwierigkeiten bei der Herstellung von Luftporenbeton auf. Aus diesem Grunde wurde beim Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) eine Arbeitsgruppe eingerichtet, deren Aufgabe es ist, die aktuellen Probleme zu analysieren. Auch in den USA werden aufgrund der zunehmenden Vielfalt an Betonausgangsstoffen Anstrengungen unternommen, um den Ursachen auf den Grund zu gehen [6, 7].

Weitere grundlegende Untersuchungen werden in Deutschland derzeit in einem durch die Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsförderung (AiF) geförderten Forschungsvorhaben zum Thema „Luftporenbeton mit verflüssigenden Betonzusatzmitteln“ am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) und am Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) unter Beteiligung der Industrie durchgeführt.

## 2 Einfluss von Flugasche auf die Luftporenbildung

Steinkohlenflugasche besteht im Wesentlichen aus kugelförmigen, glasig-amorphen Partikeln mit den Hauptbestandteilen  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und  $\text{CaO}$ . Außerdem enthält Flugasche noch Kleinmengen an Kokspartikeln, deren Anteil näherungsweise dem Glühverlust entspricht. Flugaschen, die als Betonzusatzstoff nach DIN 1045-2 [2] eingesetzt werden, müssen der Kategorie A nach DIN EN 450-1:2005-05 [8] entsprechen, d.h., ihr Glühverlust darf maximal 5 M.-% betragen.

Die in der Flugasche enthaltenen Kokspartikel werden häufig für Probleme bei der Bildung und Stabilität von Mikroluftporen im Beton verantwortlich gemacht. Kokspartikel weisen häufig eine poröse Struktur auf, die während des Verbrennungsprozesses der Kohle entsteht. Nach der Ausgasung der flüchtigen Bestandteile beginnt der Abbrand des Kohlenstoffs zunächst an der äußeren Oberfläche, besonders an Porenöffnungen. Diese vergrößern sich, und zunehmend wird auch die innere Oberfläche der Partikel angegriffen, wodurch die Partikelstruktur poröser wird. Ein wichtiges Differenzierungsmerkmal des unverbrannten Kohlenstoffs ist daher die Größenordnung der spezifischen Oberfläche. Diese lässt sich repräsentativ durch Gasadsorption mit dem Verfahren nach Brunauer, Emmet und Teller (BET) gemäß DIN ISO 9277:2003-05 [9] messen. Die spezifische Oberfläche von Flugasche kann auch bei gleichem Glühverlust unterschiedliche Größenordnungen annehmen [10].

Die in [10] vorgestellten Ergebnisse einer Literaturswertung weisen darauf hin, dass möglicherweise an den Oberflächen der Kokspartikel LP-Moleküle adsorbiert werden und so die Luftporenbildung eingeschränkt werden kann. Eine große spezifische Oberfläche bietet ein großes Adsorptionspotenzial für die LP-Moleküle. Neben der Größe der

spezifischen Oberfläche der Flugasche können zusätzlich die Eigenschaften der Oberfläche die Luftporenbildung deutlich beeinträchtigen.

## 3 Prüfverfahren Foam Index Test

Zur Erfassung des Einflusses von Flugasche auf die Luftporenbildung wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens [10, 11] sieben ausgewählte europäische Flugaschen der Glühverlustkategorie A nach DIN EN 450 unterschiedlicher Herkunft aus bis zu drei Produktionschargen mit verschiedenen Untersuchungsmethoden charakterisiert. Neben Mörtel- und Betonuntersuchungen kam ein Schnellprüfverfahren, der Foam Index Test (FIT), zum Einsatz, mit dem die Wirkungen der unterschiedlichen Flugaschen im Luftporenbeton untersucht wurden. Der auch international zur Einschätzung der Auswirkung von Bindemitteln auf die Luftporenbildung angewendete Foam Index Test (FIT) [7] ermöglicht mit geringem Material- und Geräteaufwand die vergleichende Prüfung von Bindemitteln hinsichtlich ihres LP-Anspruchs im Beton. Anhand einer sich in einer Suspension bildenden Schaumschicht kann der Luftporenbildneranspruch (LP-Anspruch) einer Bindemittelkombination, der als Foam Index bezeichnet wird, abgeschätzt werden. Randbedingungen, die bei der Durchführung eingehalten werden müssen, wurden erarbeitet, sodass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den Betonmaßstab möglich ist [10, 11]. Neue Erkenntnisse zeigen, dass mit einer Verfahrensmodifikation auch der Einfluss von Fließmitteln auf die Luftporenbildung im Beton erfasst werden kann [12].

Die Foam Indizes ermöglichen die Betrachtung von Zusammenhängen zwischen den charakteristischen Kennwerten eines Betonausgangsstoffs, wie z.B. der Flugasche, und dem LP-Anspruch der geprüften Bindemittelkombination. Die in Bild 1 dargestellten Ergebnisse wurden mit einem CEM I 32,5 R sowie einem LP-Bildner auf Basis eines synthetischen Tensids ermittelt [10]. Es zeigt, dass zwischen dem Foam Index und der Höhe des Glühverlusts einer Flugasche nach DIN EN 450 kein systematischer Zusammenhang besteht. Die Ergebnisse des FIT wurden durch Frischmörteluntersuchungen bestätigt [10].

In Bild 2 sind die Foam Indizes den spezifischen Oberflächen der Flugaschen, bestimmt durch Gasadsorption nach dem BET-Verfahren, gegenübergestellt. Hier deutet sich ein proportional zur spezifischen Oberfläche ansteigender LP-Anspruch an. Die gleiche Tendenz wurde auch bei LP mit anderen Wirkstoffen beobachtet. Dies weist darauf hin, dass nicht die Menge des Kohlenstoffes, sondern vielmehr dessen Eigenschaften eine entscheidende Rolle spielen. Die in der Literatur im Wesentlichen an Flugaschen aus nordamerikanischen Kraftwerken beobachteten Zusammenhänge wurden somit bestätigt.

Für weitergehende Frischbetonuntersuchungen wurde der LP-Anspruch einer Be-

tonzusammensetzung als Zielgröße festgelegt. Der LP-Anspruch wurde definiert als die LP-Dosierung, die erforderlich ist, um 45 Minuten nach Mischende im Beton einen Luftgehalt von 4,5 Vol.-% zu erzielen. Neben verschiedenen Flugaschen wurden sowohl ein Portlandzement als auch ein Hochofenzement eingesetzt. Der Zementgehalt der flugaschefreien Mischung lag bei  $320 \text{ kg/m}^3$ , bei den flugaschehaltigen Mischungen wurden  $270 \text{ kg/m}^3$  Zement und  $90 \text{ kg/m}^3$  Flugasche bei einem äquivalenten Wasserzementwert von 0,50 eingesetzt.

Die Bilder 3 und 4 zeigen die LP-Ansprüche von Betonen unter Verwendung verschiedener Flugaschen und Zemente gegenüber den Foam Indizes bzw. den spezifischen Oberflächen nach BET. Es ist zu erkennen, dass mit steigendem Foam Index bzw. steigender spezifischer Oberfläche nach BET auch der LP-Anspruch des Betons zum Erreichen des Zielluftgehalts zunimmt.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus dem Forschungsvorhaben [10, 11] sind:

- Bei einer Flugasche der Glühverlustkategorie A nach DIN EN 450-1 [8] besteht zwischen der Höhe des Glühverlusts bzw. ihrem Anteil an Kokspartikeln und dem LP-Anspruch sowie der Stabilität von Mikroluftporen in einem flugaschehaltigen LP-Beton kein Zusammenhang.

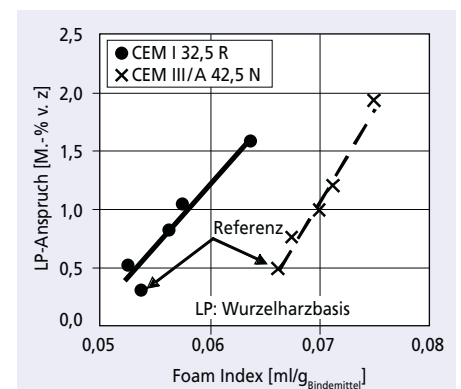


Bild 3: Zusammenhang zwischen Foam Index und LP-Anspruch des Betons zur Erzielung eines Luftgehalts von 4,5 Vol.-% [10]

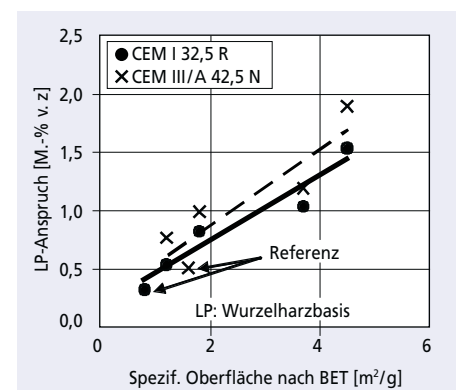


Bild 4: Zusammenhang zwischen spezifischer Oberfläche nach BET und LP-Anspruch des Betons zur Erzielung eines Luftgehalts von 4,5 Vol.-% [10]

- Der LP-Anspruch einer Bindemittelkombination lässt sich einfach und repräsentativ mit dem Foam Index Test ermitteln.
- Der mit dem Foam Index Test ermittelte LP-Anspruch einer flugaschehaltigen Bindemittelsuspension korreliert mit der spezifischen Oberfläche der Flugasche nach BET. Zwischen der spezifischen Oberfläche und dem Glühverlust einer Flugasche der Glühverlustkategorie A nach DIN EN 450-1 [8] gibt es keinen direkten Zusammenhang.
- Der an einer Bindemittelsuspension bestimmte Foam Index korreliert mit dem LP-Anspruch eines mit der gleichen Bindemittelkombination hergestellten Mörtels oder Betons.

## 4 Praxisanwendung

### 4.1 Programm der Laborversuche

Im Folgenden werden Untersuchungen des Instituts für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) zum Einfluss der Flugasche auf die Luftporenbildung im Beton beschrieben [13, 14], die ihren Abschluss in einem Praxisversuch auf der Baustelle „Schleuse Münster“ fanden. Im Zuge dieses Bauvorhabens werden abschnittsweise zwei alte Schleusenkammern aus den Jahren 1899 und 1914 durch eine den heutigen Anforderungen entsprechende Zwillingschleuse ersetzt [15, 16].

Ziel der Untersuchungen war die systematische Untersuchung eines Luftporenbetons mit Flugasche über die Ebenen Bindemittel, Suspension und Mörtel bis zum Beton, der unter Baustellenbedingungen ziel-sicher reproduzierbar sein sollte.

Die Untersuchungen sollten im ersten Schritt dazu dienen, die Schwankungen der

hier relevanten Stoffeigenschaften der Flugasche festzustellen. Dazu wurden 16 Flugascheproben aus 16 verschiedenen Chargen aus einem Produktionszeitraum von ca. fünf Monaten verwendet. Des Weiteren wurde eine Zementprobe aus einem Transportbetonwerk, von dem das Bauvorhaben „Schleuse Münster“ beliefert wurde, entnommen. Die bei allen Versuchen verwendeten Gesteinskörnungen, Luftporenbildner auf Basis von modifiziertem Wurzelharz und Betonverflüssiger (Ligninsulfonat) entsprachen ebenfalls den auf der Baustelle eingesetzten Stoffen und stammten aus einer Charge. Im Zuge der folgenden Schritte sollte dann, basierend auf den Erkenntnissen des Forschungsvorhabens [7], festgestellt werden, inwieweit sich ggf. schwankende Flugascheeigenschaften auf den LP-Anspruch von Suspensionen (Foam Index Test), Mörteln und Betonen sowie auf die Stabilität von Mikroluftporen in diesen Systemen auswirken. Daher wurde auch eine Flugascheprobe in das Versuchsprogramm aufgenommen, die aufgrund eines Glühverlusts von 5,5 M.-% nicht den Anforderungen an einen Betonzusatzstoff nach DIN 1045-2 entsprach.

**Tafel 1: Betonzusammensetzung der Referenz- und flugaschehaltigen Mischung**

		Referenzbeton	Flugascheton
CEM III/A 32,5 N-LH/NA		300	280
Flugasche		–	50
Wasser		160	160
Sand 0/2	kg/m <sup>3</sup>	688	673
Splitt 2/8		148	144
Splitt 5/22		997	975
BV (Ligninsulfonat)		1,95	1,82
LP (Wurzelharzbasis)		0,39	0,36
Projektiertes Luftgehalt	Vol.-%	5,5	5,5
w/z bzw. w/(z + 0,4·f)	–	0,53	
f/z-Verhältnis	–	0	0,18

können, wurden die 15 Chargen zunächst mit einem höheren f/z-Verhältnis (0,33) geprüft. Nach der Vorsicht wurden vier Flugaschen für die weiterführenden Untersuchungen ausgewählt. Mit diesen wurde dann mit dem maßgebenden f/z-Verhältnis von 0,18 und unter Verwendung des auf der Baustelle verwendeten BV erneut der FIT durchgeführt.

Zur Übertragbarkeit der Mörtelversuche auf die Betonebene wurden für die Mörtelversuche in Anlehnung an die Betonzusammensetzungen auf der Baustelle und damit abweichend von DIN EN 196-1:2005-05 [17] ein (äquivalenter) Wasserzementwert von 0,53 mit BV sowie ein f/z-Verhältnis von 0,18 gewählt. Weiterhin wurde der gleiche Sand 0/2 wie bei dem Baustellenbeton verwendet. Das Programm der Laborversuche ist in Tafel 2 zusammengestellt.

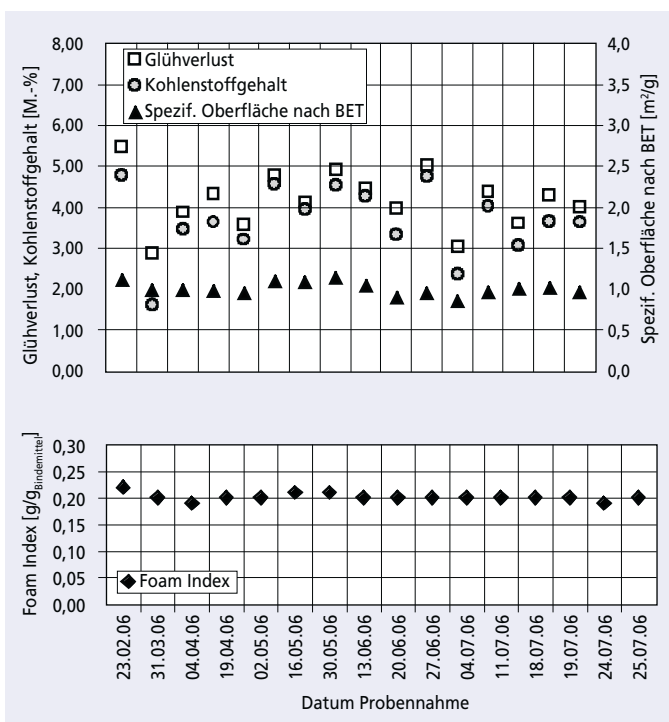
Im letzten Schritt wurde dann die Übertragbarkeit der Erkenntnisse, die an im Labor hergestellten Luftporenbetonen gewonnen wurden, auf Betone überprüft, die im Transportbetonwerk hergestellt wurden. Auf der Baustelle „Schleuse Münster“ konnte abschließend die Beeinflussung des Luftgehalts durch den Einsatz einer Betonpumpe untersucht werden.

## 4.2 Ergebnisse der Laborversuche

### 4.2.1 Eigenschaften der Flugasche und Foam Indizes

In Bild 5 sind die Glühverluste, Kohlenstoffgehalte und spezifischen Oberflächen nach BET der untersuchten Flugascheproben sowie die Foam Indizes von Suspensionen aus Wasser, Zement (z) und Flugasche (f) dargestellt. Der Wassergehalt sowie das Verhältnis f/z = 0,33 wurden konstant gehalten.

Die Glühverluste und Kohlenstoffgehalte korrelieren relativ gut miteinander und schwankten zwischen ca. 1,8 M.-% und



**Bild 5: Glühverluste, Kohlenstoffgehalte und spezifische Oberflächen der 16 Flugascheproben sowie Foam Indizes der 16 flugaschehaltigen Suspensionen**

5,5 M.-%. Die spezifischen Oberflächen nach BET der einzelnen Flugascheproben sowie die Foam Indizes der flugaschehaltigen Suspensionen lagen sehr gleichmäßig bei ca.  $1 \text{ m}^2/\text{g}$  bzw.  $0,2 \text{ g}/\text{g}_{\text{Bindemittel}}$ . Im Vergleich zu Bild 1 liegen hier geringe Schwankungen vor. Die Zugabe des BV zeigte keinen Einfluss auf den LP-Anspruch. Auch die Flugascheprobe mit dem überhöhten Glühverlust von 5,5 M.-% war hinsichtlich ihres LP-Anspruchs und ihrer LP-Bildnerverträglichkeit unauffällig (Bild 5). Die Versuchsergebnisse bestätigten somit folgende Erkenntnisse aus [10]:

- Die Höhe des Glühverlusts bzw. der Anteil der Kokspartikel einer Flugasche nach DIN EN 450 korreliert nicht mit ihrer spezifischen Oberfläche nach BET und erlaubt somit auch keine Aussage über deren Auswirkungen auf die Luftporenbildung im Luftporenbeton.
- Eine Flugasche mit einer gleichmäßigen spezifischen Oberfläche nach BET und einem gleichmäßigen Foam Index lässt auch einen gleichmäßigen LP-Anspruch in Beton erwarten.

Eine Angabe zu Größenordnungen der Veränderungen des Foam Index, wann von einem signifikanten Einfluss der Ausgangsstoffe auf den LP-Anspruch ausgegangen werden kann,

ist derzeit aufgrund der bislang noch eingeschränkten Datenbasis nicht möglich. In [7] werden Veränderungen des Foam Index von 30 % im Vergleich zu vorab bestimmten Kennwerten als signifikant eingestuft.

#### 4.2.2 Ergebnisse der Mörteluntersuchungen

Die im Foam Index Test untersuchten Bindemittelkombinationen mit BV wurden auch für die Mörteluntersuchungen verwendet. Die Mörtelzusammensetzung ergab sich aus der vorgegebenen Betonzusammensetzung. Abweichend von DIN EN 196-1 [17] wurde ein an die Betonzusammensetzung angepasster (äquivalenter) Wasserzementwert von 0,53 gewählt sowie der gleiche Sand 0/2 wie im Beton eingesetzt. Bei den Flugaschemörteln wurde das f/z-Verhältnis entsprechend der Betonzusammensetzung zu 0,18 gewählt. Der Zielluftgehalt im Mörtel wurde aus dem Zielluftgehalt des Betons und aus den in Beton und Mörtel unterschiedlichen Volumenanteilen des Bindemittelleims abgeleitet. So ergab sich für die Referenz- und Flugaschemischung ein Zielluftgehalt von 8,0 Vol. %. Um den LP-Anspruch möglichst genau erfassen zu können, wurde die Toleranz auf  $\pm 0,5 \text{ Vol.-%}$  festgelegt. Um eine mögliche Wechselwirkung der Betonzusatzmittel berücksichtigen zu können, wurde auch der

gleiche BV wie im Beton eingesetzt. Der Zielluftgehalt sollte 45 Minuten nach Wasserzugabe erzielt werden. Zusätzlich wurde der Luftgehalt zehn Minuten nach Wasserzugabe erfasst, um die zeitliche Stabilität des Luftgehalts zu dokumentieren. Zwischen den Prüfzeitpunkten wurde der Mörtel abgedeckt im Mischgefäß belassen. So sollten die Transportzeiten des Betons zur Baustelle zwischen Herstellung und Einbau berücksichtigt werden. Die Zusammensetzungen der Mörtel sind in Tafel 3 dargestellt.

Die Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen sind in Tafel 4 zusammengefasst. Die zur Erzielung des projektierten Luftgehalts erforderlichen LP-Dosierungen – bezogen auf den Zementgehalt bzw. auf den Gesamtbindemittelgehalt – lagen für alle Mischungen aufgrund der Ausgangseigenschaften und Foam Indizes erwartungsgemäß in gleicher Größenordnung.

Die Stabilität der Luftporen wurde durch den Vergleich der Luftgehalte zehn Minuten und 45 Minuten nach Wasserzugabe bewertet. Bei der Referenzmischung nahm der Luftgehalt um 3,5 Vol.-% ab, bei den flugaschehaltigen Mischungen wurden Verluste zwischen 0,9 Vol.-% und 2,5 Vol.-% beobachtet. Die Flugasche mit dem Glühverlust von 5,5 M.-% (Charge 1) führte im Mörtel

Tafel 2: Programm der Laborversuche an Bindemitteln, Suspensionen, Mörteln und Betonen

Stoff/Zubereitung	Zusammensetzung [g] z/f/w/g/LP v. z	Anzahl	Untersuchungen
Zement CEM III/A 32,5 N-LH/NA		Eine Probe für das gesamte Versuchsprogramm	– Dichte – Spez. Oberfläche nach Blaine – Hüttensandgehalt – Na <sub>2</sub> O-Äquivalent
Flugasche		16 Proben entnommen aus 16 verschiedenen Chargen im Zeitraum 2/2006 bis 7/2006 im Kraftwerk Scholven	– Spez. Oberfläche nach BET – Glühverlust – Kohlenstoffgehalt
Suspensionen	– 20/0/50 ohne Flugasche mit BV – 20/0/50 ohne Flugasche ohne BV	Je eine Mischung ohne Flugasche	– Foam Index
	– 15/5/50 mit Flugasche ohne BV – 17/3/50 mit Flugasche mit BV	16 Mischungen mit 16 verschiedenen Flugascheproben sowie eine Zementprobe	
Frischmörtel	– 450/0/240/1350/8 (ohne Flugasche)	Eine Mischung ohne Flugasche	– LP-Gehalt – Rohdichte – Ausbreitmaß – Mörteltemperatur – LP-Anspruch
	– 382/68/218/1350/8 (mit Flugasche)	Fünf Mischungen mit fünf verschiedenen Flugascheproben aus fünf unterschiedlichen Chargen sowie eine Zementprobe	
Frischbeton (Labor)	– 300/0/160/1833 (ohne Flugasche)	Eine Mischung ohne Flugasche	– LP-Gehalt – Rohdichte – Ausbreitmaß – Betontemperatur – LP-Anspruch
	– 280/50/160/1792 (mit Flugasche, davon eine Probe mit GV > 5 M.-%)	Fünf Mischungen mit fünf verschiedenen Flugascheproben aus fünf unterschiedlichen Chargen sowie eine Zementprobe	
Festbeton (Labor) nach 56 d	– 280/50/160/1792 (mit Flugasche, davon eine Probe mit GV > 5 M.-%)	Fünf Mischungen mit fünf verschiedenen Flugascheproben aus fünf unterschiedlichen Chargen sowie eine Zementprobe	– Druckfestigkeit 56 d – Carbonatisierungstiefe – Gesamtluftgehalt – Mikroluftporengehalt – Abstandsfaktor
	– 300/0/160/1833 (ohne Flugasche)	Eine Mischung ohne Flugasche	– Druckfestigkeit 56 d – Carbonatisierungstiefe – Gesamtluftgehalt – Mikroluftporengehalt – Abstandsfaktor – Rel. dyn. E-Modul (CIF) – Wasseraufnahme (CIF) – Abwitterung (CIF)
	– 280/50/160/1792 (mit Flugasche)	Eine Mischung mit einer Flugascheprobe	

Tafel 3: Zusammensetzung des Referenz- und Flugaschemörtels

	f/z	w/z bzw. $(w/z)_{eq} = (z+0,4 \cdot f)$	z	f	Sand 0/2	w	BV	Zielluftgehalt		LP
								Vol.-%		
Referenzmörtel	0	0,53	450	–	1350	240	2,8	8,0 ± 0,5		n. B.
Flugaschemörtel	50/280 = 0,18	0,53	382	68	1350	218	2,8	8,0 ± 0,5		n. B.

n. B.: nach Bedarf

zu einem Luftporenrückgang von 1,9 Vol.-% (Bild 6).

Bei etwas geringerem LP-Bildner-Anspruch waren die Mikroluftporen in den Flugaschemörteln geringfügig stabiler als in dem Zementmörtel. Insgesamt kann das Verhalten der untersuchten Mischungen jedoch als gleichwertig angesehen werden.

### 4.2.3 Ergebnisse der Betonuntersuchungen im Labor

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der Ergebnisse wurden an Betonen die gleichen

Wasser-Bindemittelkombinationen untersucht wie zuvor an Mörteln. Die Zusammensetzungen der Betone ist in Tafel 1 enthalten. Ein Luftgehalt von  $5,5 \pm 0,5$  Vol.-% wurde 45 Minuten nach Wasserzugabe projiziert und eingestellt. Der LP-Anspruch zur Erzielung dieses Zielwerts wurde für jede Mischung erfasst. Die einzelnen Betone wurden in 60-l-Mischungen mit einem Tellermischer mit einem maximalen Nutzinhalt von 150 l hergestellt. Die Herstelltemperatur des Betons betrug zwischen 18 °C und 22 °C. Zunächst wurden Zement, Flugasche und die

Gesteinskörnung trocken angemischt. Direkt nach der Wasserzugabe wurde der BV zugegeben und im Anschluss der LP. Die Gesamtmischdauer betrug 2,5 Minuten.

Zehn Minuten nach Wasserzugabe wurden die Frischbetontemperatur sowie das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5:2000-06 [18] bestimmt. Der Luftgehalt und die Frischbetonröhdichte wurden gemäß DIN EN 12350-7:2000-11 [19] bzw. DIN EN 12350-6:2000-03 [20] bestimmt. Der Beton wurde in den Luftporentopf mit Aufsatzkasten in drei Lagen eingefüllt und jeweils lagenweise zehn Sekunden verdichtet. Der überstehende Beton wurde entfernt. Bis zur erneuten Bestimmung der Kennwerte nach 45 Minuten wurde der Beton im geschlossenen Mischer belassen. Tafel 5 enthält die Prüfergebnisse.

Wie bei den Mörteluntersuchungen waren auch die LP-Ansprüche der hier untersuchten Betone vergleichbar. Ein Unterschied zwischen dem Referenzbeton und den flugaschehaltigen Betonen konnte bei insgesamt geringen Streuungen der erforderlichen LP-Dosierungen nicht festgestellt werden. Der absolute zeitliche Rückgang des Luftgehalts betrug beim Referenzbeton 1,7 Vol.-% und bei den flugaschehaltigen Betonen 0,5 Vol.-% bis 1,3 Vol.-%. Wie bei den Mörteluntersuchungen zeigten auch die hier untersuchten flugaschehaltigen Betone eine etwas höhere Luftporenstabilität über der Zeit. Ein ungünstiger Einfluss der Flugasche bei einem Glühverlust von 5,5 M.-% war nicht feststellbar (Bild 7).

Von der Referenzmischung und der flugaschehaltigen Mischung Nr. 13 wurden 45 Minuten nach Wasserzugabe fünf CIF-Platten mit den Abmessungen 150 mm x 150 mm x 70 mm zur Durchführung des CIF-Tests nach dem BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ [21], drei Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm zur Bestimmung der Druckfestigkeit im Alter von 56 d nach DIN EN 12 390-3:2002-04 [22], zwei Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe im Alter von 56 d entsprechend Heft 422 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [23] sowie zwei Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm zur Bestimmung der Luftporenkennwerte gemäß DIN EN 480-11:2005-12 [24] hergestellt.

Tafel 4: Ergebnisse der Frischmörteluntersuchungen

	Luftgehalt nach ... min		Frischmörtelröhdichte nach ... min		Ausbreitmaß nach ... min		Frischmörteltemperatur nach ... min		LP-Anspruch	
	10	45	10	45	10	45	10	45	z	z+f
	Vol.-%		kg/m <sup>3</sup>		mm		°C		M.-%	
Referenzmörtel	11,0	7,5	2010	2120	248	232	22,5	21,6	0,136	0,136
Flugaschemörtel (Charge 1; GV = 5,5 M.-%)	9,5	7,6	2040	2090	221	210	22,3	22,0	0,120	0,101
Flugaschemörtel (Charge 2)	9,0	8,1	2040	2080	237	224	22,6	21,3	0,140	0,119
Flugaschemörtel (Charge 13)	9,9	7,8	2030	2090	229	215	22,6	19,4	0,134	0,114
Flugaschemörtel (Charge 14)	10,5	8,4	2030	2090	228	225	21,7	21,4	0,134	0,114
Flugaschemörtel (Charge 15)	10,5	8,0	2050	2080	230	221	22,6	21,9	0,139	0,118

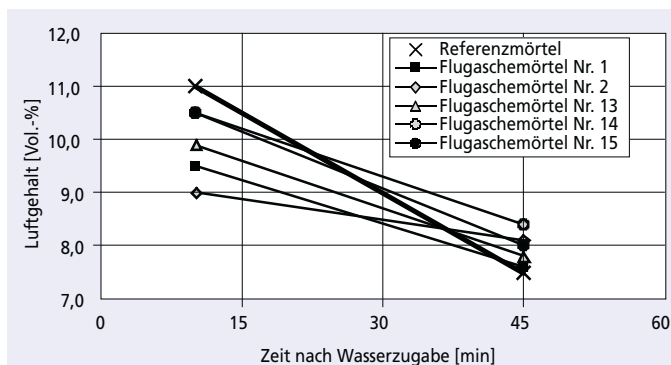


Bild 6: Zeitliche Entwicklung des Luftgehalts der untersuchten Mörtel

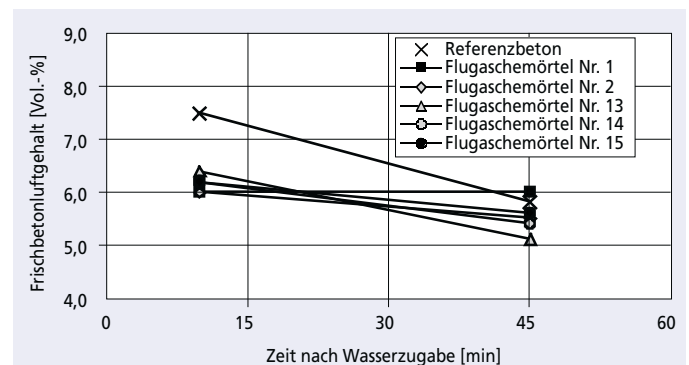


Bild 7: Zeitliche Entwicklung des Luftgehalts der untersuchten Betone

Tafel 5: Frischbetonergebnisse der untersuchten Laborbetone

	Luftgehalt nach ... min		Frischmörtelrohddichte nach ... min		Ausbreitmaß nach ... min		Frischmörteltemperatur nach ... min		LP-Anspruch	
	10	45	10	45	10	45	10	45	z	z+f
	Vol.-%		kg/m <sup>3</sup>		mm		°C		M.-%	
Referenzmörtel	7,5	5,8	2 150	2 270	520	480	20,6	22,4	0,128	0,128
Flugaschemörtel (Charge 1; GV = 5,5 M.-%)	6,0	6,0	2 250	2 260	510	470	23,2	23,7	0,149	0,126
Flugaschemörtel (Charge 2)	6,0	5,5	2 280	2 300	540	470	21,9	–	0,131	0,111
Flugaschemörtel (Charge 13)	6,4	5,1	2 240	2 280	490	470	22,7	23,0	0,125	0,106
Flugaschemörtel (Charge 14)	6,2	5,4	2 220	2 250	520	480	22,7	22,3	0,149	0,126
Flugaschemörtel (Charge 15)	6,2	5,6	2 230	2 240	520	480	22,4	23,4	0,149	0,126

Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte nach DIN EN 12 390-2:2001-06 [25]. Die Prüfkörper lagerten bis zum Ausschalen im Alter von 24 Stunden in einem Feuchtraum bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte  $\geq 95\%$ . Die anschließende Wasserlagerung bei 20 °C erfolgte bei den Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm bis zu einem Alter von 7 d und bei den CIF-Prüfkörpern sowie den Würfeln mit einer Kantenlänge von 100 mm bis zum Alter von 14 d. Nach der Entnahme aus dem Wasserbecken lagerten alle Prüfkörper bis zur Prüfung im Alter von 56 d im Klimaraum bei 20 °C/65 % rel. Luftfeuchte. Die Lagerung der CIF-Prüfkörper entsprach dem BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ [21] für langsam erhärtende Betone. Im Alter von 56 d begann das kapillare Saugen. Die Prüfkörper für die Carbonatisierungsprüfung wurden gleich gelagert, um den Carbonatisierungszustand bei Beginn der Frostprüfung erfassen zu können. Die Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen enthält die Tafel 6.

Die Druckfestigkeit des flugaschehaltigen Betons ist bei etwas niedrigerem Luftgehalt höher als die des Referenzbetons. Die ermittelten Carbonatisierungstiefen verhalten sich umgekehrt. Der Referenzbeton weist einen höheren Gesamtluftgehalt und auch einen höheren Mikroluftporengehalt auf sowie demzufolge auch einen geringeren Abstandsfaktor. Bei beiden Betonen liegen die Abstandsfaktoren oberhalb des im Merkblatt der FGSV [5] geforderten Grenzwerts von 0,20 mm.

Zur Bestimmung der im CIF-Test aufgetretenen inneren Schädigung wurde die Änderung des dynamischen E-Moduls mithilfe der Schalllaufzeit ermittelt. Die Schalllaufzeit wurde nach dem kapillaren Saugen sowie nach 4, 10, 16, 24, 28, 42 und 56 Frost-Tau-Wechseln bestimmt. Zu den gleichen Prüfterminen wurden die Abwitterungen sowie die Wasseraufnahme der Prüfkörper ermittelt. Die Prüfergebnisse sind in Bild 8 dargestellt.

Beide Betone zeigen im CIF-Test ein gleichwertiges Verhalten. Die Anforderung

Tafel 6: Festbetonergebnisse der untersuchten Laborbetone im Alter von 56 d

	Druckfestigkeit		Carbonatisierungstiefe		Luftporenkennwerte (Mittelwert)		
	Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert	Gesamtluftgehalt	Mikroluftporengehalt $L_{300}$	Abstandsfaktor
	N/mm <sup>2</sup>		mm		Vol.-%		mm
Referenzbeton	32,2	31,0	3,4	3,5	7,8	2,3	0,25
	29,9		3,6				
	30,8		–				
Flugascheton (Charge 13)	40,0	38,7	2,7	2,8	6,3	1,3	0,31
	39,2		2,8				
	37,0		–				

des BAW-Merkblatts „Frostprüfung“ an den dynamischen E-Modul mit einem Abfall von weniger als 25 % nach 28 FTW werden klar erfüllt. Auch die Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln liegen unterhalb des Kriteriums von 1000 g/m<sup>2</sup>. Unterschiede zwischen den Betonen konnten nicht beobachtet werden.

### 4.3 Praxisversuch auf der Baustelle „Schleuse Münster“

Zunächst wurden in einem Transportbetonwerk Frischbetonprüfungen durchgeführt und Proben der Betonausgangsstoffe zur weiteren Charakterisierung entnommen. Die Umgebungstemperatur betrug 7 °C bei bewölkter Witterung und leichtem Regen. Die Betonzusammensetzungen sind in Tafel 7 dargestellt. Ziel des Versuchs war es, auf der Baustelle annähernd gleiche Luftgehalte zu erreichen wie bei den Laborprüfungen.

Im Transportbetonwerk wurde zunächst der Referenzbeton hergestellt. Aus einem mit insgesamt vier Chargen zu je 1 m<sup>2</sup> beladenen Fahrnischer wurde eine Probe zur Bestimmung des Luftgehalts und des Ausbreitmaßes entnommen. Zur Prüfung des Luftgehalts wurde der Beton in zwei Lagen eingefüllt und jeweils fünf Sekunden ohne Aufsatzkasten verdichtet. Anschließend wurde der Fahrnischer mit vier weiteren Chargen auf 8 m<sup>3</sup> gefüllt und erneut eine Probe zur Bestimmung des Ausbreitmaßes und des Luftgehalts entnommen. Im Anschluss an den Referenzbeton wurde der flugaschehaltige Beton hergestellt. An diesem wurden ebenfalls im Werk zweimal der Luftgehalt und das Ausbreitmaß geprüft.

Die Fahrnischer trafen jeweils ca. 30 Minuten nach ihrer Beladung auf der Baustelle ein. Auf der Baustelle wurden zunächst sowohl von dem Referenzbeton als auch von dem flugaschehaltigen Beton noch vor Beginn des Pumpvorgangs eine Probe aus dem Fahrnischer entnommen. An beiden Proben wurde das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 sowie die Frischbetonrohddichte und der Luftgehalt nach DIN EN 12350-6 bzw. DIN EN 12350-7 bestimmt. Wie bei den Laboruntersuchungen wurde der Beton im Luftporenopf mit Aufsatzkasten in drei Lagen jeweils 15 Sekunden auf einem Vibrationstisch verdichtet. Die etwas längere Verdichtungszeit im Vergleich zur Laborprüfung wurde aufgrund der etwas steiferen Konsistenz gewählt. Nach dem Pumpvorgang wurde von beiden Betonen eine weitere Probe entnommen und die Frischbetonprüfungen wiederholt. Tafel 8 enthält die ermittelten Frischbetonkennwerte.

Nach im Transportbetonwerk gemessenen Ausgangsluftgehalten von 7,5 Vol.-% bzw. 8,5 Vol.-% wurden nach Ankunft auf der Baustelle noch Luftgehalte von 6,5 Vol.-% bzw. 6,1 Vol.-% gemessen. Nach dem Pumpen wurden noch Luftgehalte von 3,5 Vol.-% bzw. 2,9 Vol.-% gemessen. Die Frischbetoneigenschaften beider Betone waren somit auch unter Baustellenbedingungen vergleichbar.

Da der Versuch aus Zeitgründen nicht wiederholt werden konnte, wurden trotz der

niedrigen Luftgehalte jeweils zwei Würfel mit 150 mm Kantenlänge zur Bestimmung der Druckfestigkeit im Alter von 56 d hergestellt. Der Referenzbeton wurde in zwei Lagen in Stahlschalungen mit Aufsetzkasten gefüllt und jeweils 15 Sekunden verdichtet. Vom flugaschehaltigen Beton wurden eine Probekörperserie mit einer Verdichtungslage und eine zweite Serie mit zwei Verdichtungslagen hergestellt. Zusätzlich wurden auf gleiche Weise von dem Referenzbeton zwei Würfel und jeweils ein Würfel von dem Flugaschebeton zur Bestimmung der Luftporenkennwerte am Festbeton hergestellt. Weiterhin wurden für den CIF-Test von dem Flugaschebeton vier Probekörper mit den Abmessungen 150 mm x 150 mm x 70 mm hergestellt und von dem Referenzbeton zwei entsprechende Probekörper. Die Probekörperherstellung war zwei Stunden nach Beladung des Fahrzeugs abgeschlossen. Die Ergebnisse der Festbetonprüfungen sind in Tafel 9 zusammengestellt.

Die im Transportbetonwerk entnommene Flugascheprobe wies einen Glühverlust von

3,6 M.-% und eine spezifische Oberfläche nach BET von 1,2 m<sup>2</sup>/g auf. Die Foam Indizes wurden an Suspensionen aus den im Transportbetonwerk entnommenen Zement-, Flugasche- und Zusatzmittelproben bestimmt. Der Foam Index der Referenzmischung betrug 0,25 g/g<sub>Bindemittel</sub>, der der flugaschehaltigen Mischung 0,23 g/g<sub>Bindemittel</sub>. Damit waren beide Foam Indizes etwa 10 % bis 15 % höher als bei den Voruntersuchungen.

Aufgrund der niedrigeren Wassermenge und der geringeren Luftgehalte waren die Druckfestigkeiten der Baustellenbetone deutlich höher als die der Laborbetone. Die Carbonatisierungstiefen lagen jedoch in gleicher Größenordnung. Die am Festbeton ermittelten Luftporenkennwerte korrespondieren mit den niedrigen Frischbetonluftgehalten. Besonders deutlich sind die Abweichungen zwischen den im Labor und auf der Baustelle hergestellten Referenzbetonen, die bei dem Baustellenbeton dann auch zu einem reduzierten Mikroluftporengehalt und einem höheren Abstands faktor als bei dem Labor-

beton führen. Bei einem insgesamt niedrigeren Gesamtluftgehalt liegen der Mikroluftporengehalt und der Abstands faktor bei dem Flugaschebeton in gleicher Größenordnung wie bei dem Laborbeton.

Wie bei den Laborbetonen zeigte der dynamische E-Modul über die Prüfdauer von 42 Frost-Tau-Wechseln keine Veränderung. Dies geht einher mit einer vergleichbaren Wasseraufnahme der im Labor und auf der Baustelle hergestellten Probekörper. Die Abwitterungen der auf der Baustelle hergestellten Probekörper sind geringer als die der Laborprobekörper. Ursache können die geringeren Wassermenge der Baustellenbetone sein, die besser ausgebildete Randzonen und geringere Kapillarporen bewirken. Sowohl der auf der Baustelle hergestellte Flugaschebeton als auch der Referenzbeton zeigten im CIF-Test eine gute Widerstandsfähigkeit gegen Frost (Bild 9).

## 5 Zusammenfassung

Die gezielte Einstellung der für den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand relevanten Luftporenkennwerte durch künstlich eingeführte Mikroluftporen in komplexen „LP-Beton-Systemen“ ist bis heute immer wieder mit Schwierigkeiten verbunden. Die Ursachen können Wechselwirkungen zwischen den Ausgangsstoffen wie auch Randbedingungen bei der Herstellung, dem Transport und dem Einbau sein. Schwerpunkt dieses Beitrags ist der Einfluss des Betonzusatzstoffs Flugasche auf das Gesamtsystem. Basierend auf vorangegangenen Grundlagenforschungen wurden Reihenuntersuchungen an verschiedenen Chargen einer bestimmten Flugasche sowie vergleichende Versuchsreihen an Suspensionen, Mörteln und Betonen mit und ohne Flugasche durchgeführt. Die Flugasche zeigte durchgängig einen gleichmäßigen LP-Anspruch und eine gute Systemverträglichkeit. Der Foam Index erwies sich als zuverlässiges Bewertungskriterium. Im Rahmen eines auf die Laborversuche aufbauenden Baustellenversuchs wurden sowohl für den Flugaschebeton als auch für den Referenzbeton ohne Flugasche die Anforderungen an den mit dem CIF-Test geprüften Frostwiderstand erfüllt.

Das vorgestellte Untersuchungskonzept zeigt, wie Problemanalyse und Qualitätssicherung bei der Herstellung von Luftporenbeton verbessert werden können. Des Weiteren wird die Bedeutung von Baustellenversuchen ersichtlich, da spezifische Einflüsse wie unterschiedliche Witterungsverhältnisse sowie Transport-, Pump- und Verdichtungs Vorgänge im Labor kaum realitätsnah abgebildet werden können.

Weiterführende Grundlagenuntersuchungen mit direktem Praxisbezug werden derzeit in einem durch die Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsförderung (AiF) geförderten Forschungsvorhaben zum Thema „Luftporenbetone mit verflüssigenden Betonzusatzmitteln“ am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) und am Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) unter Beteiligung der Industrie durchgeführt.

Tafel 7: Betonzusammensetzung im Praxisversuch

		Referenzbeton	Flugaschebeton	
CEM III/A 32,5 N-LH/NA	kg/m <sup>3</sup>	300	280	
Flugasche		–	50	
Wasser		150	148	
Sand 0/2		715	695	
Splitt 2/8		159	156	
Splitt 5/22		1014	990	
BV (Ligninsulfonat)		2,10	1,96	
LP (Wurzelharzbasis)		0,48	0,45	
Projektiertes Luftgehalt		Vol.-%	5,5	5,5
w/z bzw. w/(z + 0,4·f)		–	0,50	0,49
f/z-Verhältnis	–	0	0,18	

Tafel 8: Frischbetonkennwerte im Praxisversuch

	Probennahme	Luftgehalt	Frischbetonrohddichte	Ausbreitmaß	Frischbetontemperatur
		Vol.-%	kg/m <sup>3</sup>	mm	°C
Referenzbeton	1. Charge (Werk)	7,9 <sup>1)</sup>	–	520	–
	2. Charge (Werk)	7,5 <sup>1)</sup>	–	480	10,5
	vor dem Pumpen	6,5 <sup>2)</sup>	2 220	460	11,5
	nach dem Pumpen	3,5 <sup>2)</sup>	2 320	450	13,5
Flugaschebeton	1. Charge (Werk)	7,8 <sup>1)</sup>	2 220	480	13,0
	2. Charge (Werk)	8,5 <sup>1)</sup>	2 180	470	11,0
	vor dem Pumpen	6,1 <sup>2)</sup>	2 240	445	11,9
	nach dem Pumpen	2,9 <sup>2)</sup>	2 310	410	13,9

<sup>1)</sup> Verdichtung in zwei Lagen à 5 Sekunden ohne Aufsetzkasten

<sup>2)</sup> Verdichtung in drei Lagen à 15 Sekunden mit Aufsetzkasten

Tafel 9: Festbetonergebnisse der Betone des Praxisversuchs im Alter von 56 d

Beton	Druckfestigkeit		Carbonatisierungstiefe		LP-Kennwerte (Mittelwert)		
	Einzelwert	Mittelwert	Einzelwert	Mittelwert	Gesamtluftgehalt	Mikroluftporengehalt $L_{300}$	Abstandsfaktor
	N/mm <sup>2</sup>		mm				
Referenzbeton	45,2	44,8	3,6	3,4	3,3	1,5	0,29
	44,4		3,1				
Flugaschebeton (zweilagig verdichtet)	49,4	46,8	3,1	-	4,8	1,5	0,32
	44,2		-				
Flugaschebeton (einlagig verdichtet)	49,9	50,4	2,9	-	4,0	1,4	0,30
	50,9		-				

Weiterführende Erkenntnisse zur Wechselwirkung der Betonausgangsstoffe im Luftporenbeton und Lösungsmöglichkeiten für eine zielsichere Herstellung unter den jeweiligen Randbedingungen mit einer ständig steigenden Vielfalt an Betonausgangsstoffen können dabei erwartet werden.

## Literatur

- [1] DIN EN 206-1/A2:2005-09: Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität  
 [2] 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

- [3] Brameshuber, W.; Schießl, P.; Uebachs, S.; Brandes, C.; Eck, T.: Einfluss von Flugasche auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Aachen: Institut für Bauforschung, 2004, – Forschungsbericht Nr. F 759/2  
 [4] Brameshuber, W.; Uebachs, S.: Einfluss von Flugasche auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton – Ergänzende Untersuchungen für selbstverdichtende Betone mit hohem Flugaschegehalt (VGB-Nr. 215). Aachen: Institut für Bauforschung, 2008. – Forschungsbericht Nr. F 827  
 [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Köln 2004  
 [6] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Association: Identifying incompatible Combinations of Concrete Materials: Volume I-Final Report. Publication No. FHWA-HRT-06-079 (2006)

- [7] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Association: Identifying incompatible Combinations of Concrete Materials: Volume II-Test Protocol. Publication No. FHWA-HRT-06-080 (2006)  
 [8] DIN EN 450-1:2008-05: Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderungen und Konformitätskriterien  
 [9] DIN ISO 9277:2003-05: Bestimmung der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Gasadsorption nach dem BET-Verfahren (ISO 9277:1995)  
 [10] Brameshuber, W.; Uebachs, S.; Spörel, F.: Einfluss von Flugasche auf die Bildung und Stabilität künstlich eingeführter Luftporen im Beton (VGB-Nr. P 210). Aachen: Institut für Bauforschung, 2003 – Forschungsbericht Nr. F 806  
 [11] Spörel, F.; Uebachs, S.; Brameshuber, W.: Investigations on the Influence of Fly Ash on the Formation and Stability of Artificially Entrained Air Voids in Concrete. Materials & Structures 42 (2009) H. 2  
 [12] Brameshuber, W.; Spörel, F.: Ein Prüfverfahren zur Erfassung der Wirksamkeit von Luftporenbildnern in Beton: A Test Procedure to Evaluate the Efficiency of Air-Entraining Agents in Concrete. Frankfurt: GDCh-Fachgruppe Bauchemie. Monographie Band 37, Tagung Bauchemie der GDCh-Fachgruppe Bauchemie 27. bis 28. September 2007 in Siegen, S. 121-128 [ISBN 3-936028-50-8]  
 [13] Brameshuber, W.; Spörel, F.: Untersuchungen an Luftporenbetonen mit Flugasche. Aachen: Institut für Bauforschung, 2006 – Prüfbericht Nr. M 938/2  
 [14] Vollpracht, A.; Spörel, F.; Steinhoff, J.: Baustellenversuch LP-Beton an der Schleuse Münster. Aachen: Institut für Bauforschung, 2008 – Prüfbericht Nr. M 1014  
 [15] Wienkamp, R.: Neue Schleuse Münster: Bauausführung der Schleuse 1. beton 59 (2009) H. 1+2, S. 12-16  
 [16] Kordts, S.: Neue Schleuse Münster: Konzeption und Einbau der Betone. beton 59 (2009) H. 1+2, S. 18-22  
 [17] DIN EN 196-1:2005-05: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit  
 [18] DIN EN 12350-5:2000-06: Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß  
 [19] DIN EN 12350-7:2000-11: Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalte, Druckverfahren  
 [20] DIN EN 12350-6:2000-03: Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte  
 [21] Bundesanstalt für Wasserbau: Merkblatt Frostprüfung von Beton (BAW-Merkblatt „Frostprüfung“), Ausgabe Dezember 2004  
 [22] DIN EN 12390-3:2002-04: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern  
 [23] Bunke, N.: Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1991), Nr. 422  
 [24] DIN EN 480-11:2005-12: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel. Prüfverfahren – Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton  
 [25] DIN EN 12390-2:2001-06: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen

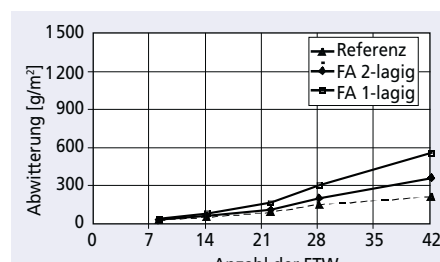
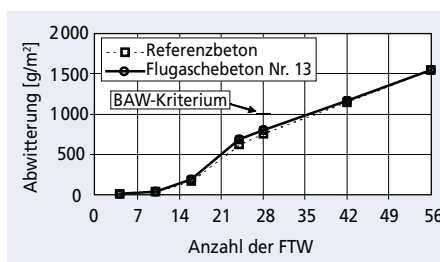
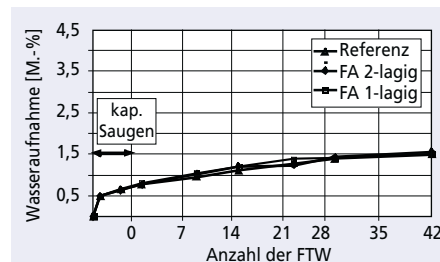
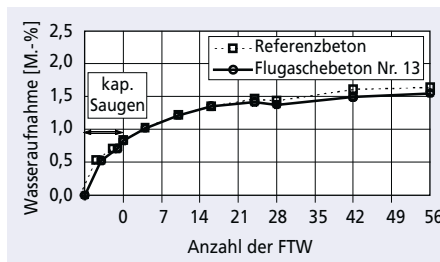
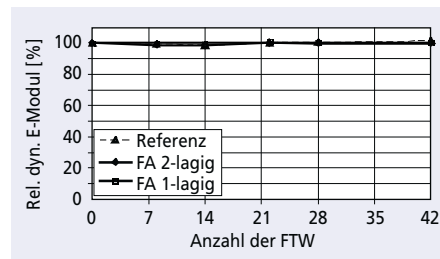
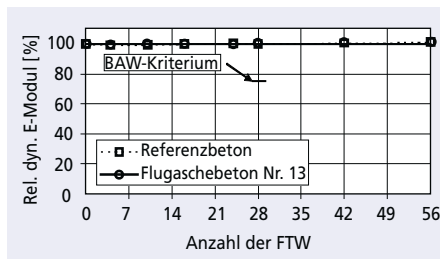


Bild 8: Ergebnisse des CIF-Tests der untersuchten Laborbetone

Bild 9: Ergebnisse des CIF-Tests der Baustellenbetone